



Parc national  
de la Guadeloupe

# LiDAR et patrimoine forestier de Guadeloupe

---

*Rapport final*

*Septembre 2014*

*Alain Rousteau*

*Enguerran Grandchamp*

A travers une convention de partenariat de recherche passée entre le Parc National de la Guadeloupe et l'Université des Antilles et de la Guyane (convention n°2013-25), signée le 11 avril 2013, la Parc National finance le projet « LiDAR et patrimoine forestier » à hauteur de 6000 € (opération 1309 du budget 2013 du Parc National de la Guadeloupe).

Le présent document constitue le rapport final mentionné dans la convention.

## Table des matières

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | Introduction : notion de sensibilité .....                                   | 4  |
| A.   | L'enjeu.....   | 4  |
| B.   | Caractérisation de la sensibilité des peuplements forestiers.....            | 4  |
| C.   | Plan du rapport.....   | 7  |
| II.  | Etude.....   | 8  |
| A.   | Modèle numérique des hauteurs (MNH) et hauteur moyenne de canopée (HMC)..... | 8  |
| B.   | Hauteur LiDAR et structure du couvert végétal .....                          | 14 |
| C.   | Hauteur LiDAR moyenne et paramètres géographiques .....                      | 17 |
| D.   | Hauteur LiDAR moyenne et composition floristique.....                        | 19 |
| E.   | Hauteur LiDAR et unités écologiques .....                                    | 23 |
| F.   | Analyse des glissements de terrain.....                                      | 26 |
| G.   | Cartes des risques de glissement .....                                       | 38 |
| III. | Conclusions générales .....  | 41 |
| IV.  | Références .....   | 42 |

# I. Introduction : notion de sensibilité

## A. L'enjeu

Les montagnes de la Basse-Terre hébergent un écosystème forestier et des fourrés sommitaux encore peu dégradés. La valeur de ces formations, l'importance biogéographique des îles tropicales dans les processus de coévolution et enfin les menaces qui pèsent sur ce patrimoine, expliquent que les îles de Guadeloupe aient été incluses dans le point chaud des îles caraïbes (*Caribbean Hotspot* Myers 1988, puis *Caribbean Islands Hotspot*, Conservation International). Ces richesses patrimoniales ont aussi justifié à la même époque, la création du Parc National de la Guadeloupe. Cet établissement public a pour mission de conserver et de faire connaître le patrimoine naturel de la Guadeloupe. A ces missions essentielles se rattachent des problématiques de gestion extrêmement variées : accueil des publics, aménagement, entretien des traces, restauration des biotopes...

La présente étude vise à fournir au Parc National, un outil permettant l'identification, la localisation et le suivi des espaces les plus fragiles du cœur de Parc.

La récente réalisation d'une couverture LiDAR par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) offre en effet de nouvelles perspectives en matière de diagnostic environnemental. Cette couverture LiDAR nous a été aimablement cédée par le Département de la Guadeloupe, dans le cadre des activités générées par le projet de diagnostic forestier. Nous cherchons ici à mettre en évidence les potentialités de ce nouvel instrument dans le domaine de l'expertise écologique.

## B. Caractérisation de la sensibilité des peuplements forestiers

### 1. Notion de sensibilité

Ce travail a pour objet les formations végétales sensibles du cœur de Parc. La notion de sensibilité n'est pas définie d'une façon univoque dans l'étude des systèmes forestiers. Il est nécessaire de définir ici, les différentes propriétés que nous voulons désigner par ce terme.

Un peuplement sera dit sensible s'il n'est pas en mesure de conserver durablement ses propriétés lorsqu'il est soumis à une perturbation.

Il est relativement facile par exemple, de mesurer la sensibilité du peuplement aux glissements de terrain ; on peut pour cela, estimer sa propension à être emporté par un glissement de terrain. La sensibilité pourrait être mesurée par la probabilité de glissement. Cette approche n'est pas suffisante car dans certaines situations, un glissement de terrain peut initier un processus successional rapide alors que dans d'autres situations, le glissement altère le biotope au point que la forêt n'est plus capable de se restaurer. Le sol emporté par le glissement cède la place à des substrats impropres à la colonisation par les arbres de sorte que la disparition du peuplement forestier est irréversible. En pratique, on ne peut pas être certain de l'irréversibilité mais on peut garantir que le retour d'un peuplement forestier sera extrêmement lent.

Il est plus difficile d'estimer la sensibilité de la composition floristique. Il peut arriver en effet, qu'après perturbation, le peuplement soit remplacé par un autre peuplement, de structure similaire au premier mais de composition floristique différente. Cette autre formation peut être un faciès provisoire, une étape dans le processus successional qui conduit à la restauration, mais elle peut aussi se substituer irréversiblement à la formation initiale. Encore une fois, il est difficile de distinguer une succession ralentie d'une substitution définitive. Le problème d'interprétation soulevé ici, se rencontre surtout dans les régions sommitales, près des crêtes, en particulier là où la forêt cède la place aux fourrés hauts (à *Clusia*, *Schefflera*...), aux fourrés bas (*Gaultheria*, *Tibouchina*...) ou éventuellement à des faciès herbacés durables (Rousteau 1996). Nous détaillerons davantage les mécanismes impliqués lorsque nous étudierons les glissements de terrain (p. 26 et suivantes).

Le concept de résilience, dans l'acception que lui confère l'écologie actuelle, est utile à la démarche entreprise. Il désigne la capacité du système à recouvrer son état initial (Thompson 2011). D'une certaine façon, la sensibilité que nous devons définir ici est le complément de la résilience. Notre projet consiste alors à identifier les peuplements forestiers dont la résilience est problématique (ou les peuplements non résilients).

## 2. Notion de contrainte

Jusqu'à présent on a raisonné en termes de perturbation. Intenses ou légères, fréquentes ou rares, les perturbations affectent la structure du peuplement forestier. On parle de perturbation lorsqu'une fraction du peuplement est supprimée. On peut mesurer l'effet de la perturbation à travers un effectif, une biomasse ou un autre descripteur de la structure.

La perturbation est le plus souvent un événement court, difficilement prédictible. On sait qu'en moyenne, un cyclone puissant devrait toucher la Guadeloupe durant le XXIème siècle mais on ne peut pas savoir la date de son passage. On sait qu'en gros, un arbre sur cent mourra dans l'année en cours mais on ne sait pas désigner (en général) les individus qui vont disparaître, ni quand leur mort interviendra.

Pourtant, les perturbations qui nous intéressent, celles qui affectent les systèmes sensibles, n'impactent pas uniformément les aires forestières analysées. Il est évident que dans certaines situations, la fréquence des perturbations est augmentée et l'impact des perturbations plus grave. Ces régions plus sollicitées que les autres, sont caractérisées par des facteurs environnementaux qui déterminent la fréquence supérieure des perturbations et la gravité accrue de leur impact. De fait, s'il n'est guère envisageable de prédire les perturbations, il est possible d'identifier les facteurs qui en aggravent les conséquences.

Ces facteurs qui finalement, affectent la résilience, sont à proprement parler des contraintes dans la mesure où elles limitent la réaction de l'écosystème aux perturbations. Il s'agit souvent de variables mésologiques, plus rarement biotiques, qui par exemple ralentissent la succession après perturbation. La pente du terrain est bien sur une contrainte qui à la fois, tend à augmenter la fréquence des glissements de terrain et à ralentir la cicatrisation du couvert végétal.

En somme, nous nous proposons d'identifier (et de cartographier) quelques contraintes majeures qui interviennent sur les systèmes et en déterminent la sensibilité. Nous devons au préalable, valider le choix des facteurs pressentis comme contraintes.

## 3. Notion de seuil

La notion de seuil est essentielle pour le développement de ce rapport. Les seuils à proprement parlé, caractérisent la non-linéarité des réponses du système à certaines sollicitations

(Figure 1). Au-delà de cette remarque un peu tautologique, on peut observer que dans les systèmes naturels qui nous intéressent, les facteurs identifiés peuvent interférer. Les seuils peuvent alors être déterminés par plusieurs contraintes coexistant et les interférences peuvent avoir des conséquences contre-intuitives (voir Figure 2).

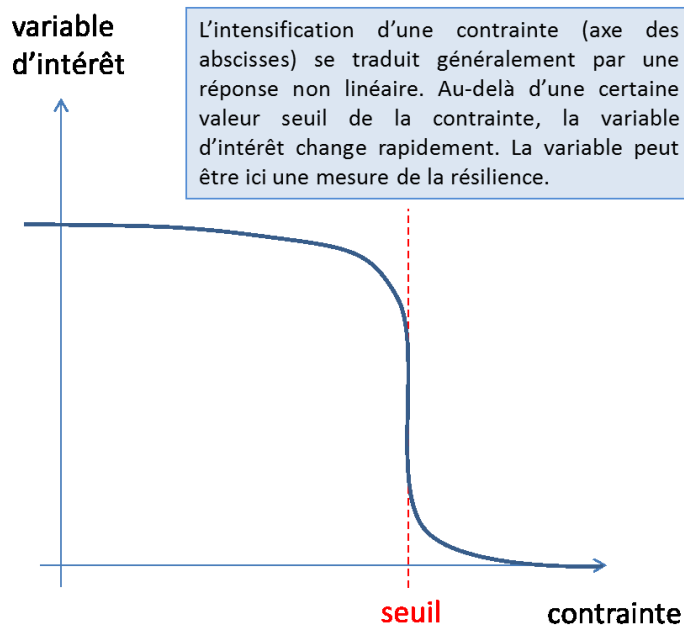
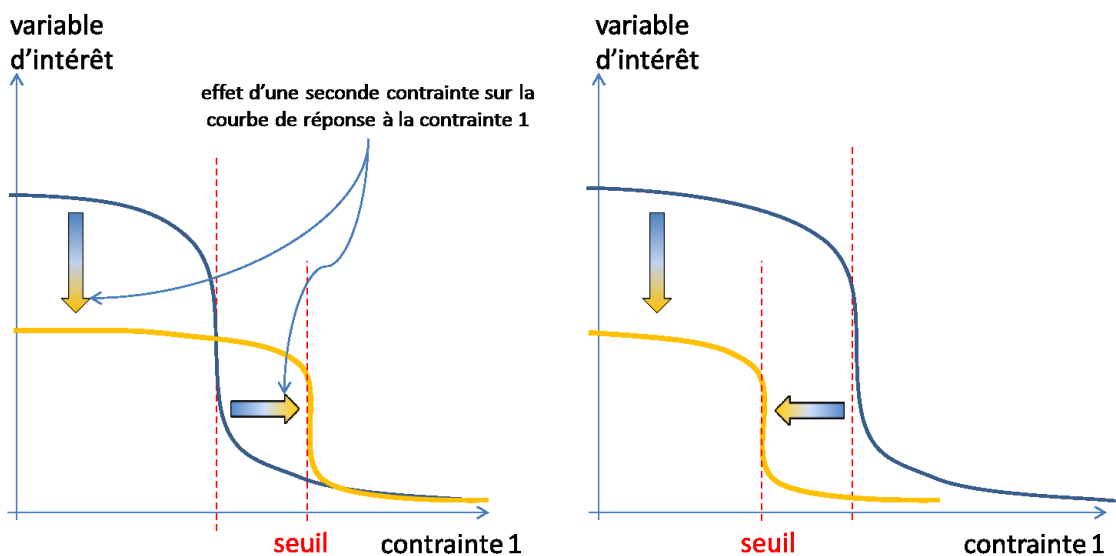


Figure 1 : Représentation graphique de l'effet d'une contrainte sur une mesure (fonctionnelle ou structurale).



L'effet d'une autre contrainte (flèches colorées) modifie la sensibilité du peuplement à la contrainte 1 représentée sur l'axe des abscisses. Généralement, la première contrainte a pour effet de diminuer le seuil de la réponse à la seconde contrainte (graphique de droite). L'inverse peut exister : une carence minérale peut réduire la hauteur des arbres et diminuer la sensibilité du peuplement au vent ou aux glissements de terrain.

Figure 2 : Représentation graphique de l'effet de deux contraintes. L'interaction d'une seconde contrainte peut améliorer la réponse à la première contrainte.

Les analyses réalisées ci-dessous vont mettre à profit ces remarques générales. En particulier, lors de l'analyse des glissements de terrain, on devra chercher à estimer par l'observation, les valeurs seuils en deçà desquelles les formations semblent soustraites au risque de glissement et au-delà desquelles l'instabilité menace le patrimoine naturel.

---

## C. Plan du rapport

---

Avant toute autre analyse il nous faut explorer les différentes significations des données LiDAR obtenues. Les tests rapportés dans la première partie du rapport (§ II.A) sont destinés à identifier ce que mesure réellement le modèle numérique des hauteurs et notamment, à modéliser la hauteur de canopée grâce au MNT.

Les données LiDAR sont ensuite utilisées pour décrire autant que possible, la structure des formations forestières (§ II.B). Dans certains cas, le MNT apparaît comme un proxy relativement précis de caractéristiques structurales.

La structure forestière dépendant du lieu, de l'altitude, de la pente... on vérifie que le MNT est corrélatif de plusieurs de ces descripteurs géographiques ou topographiques (§ II.C).

D'une façon beaucoup moins attendue, on met en évidence que le MNT permet de prédire certaines informations touchant à la composition floristique et à la biodiversité (§ II.D). Dans ce contexte, nécessairement limité à la Guadeloupe, le MNT peut contribuer à identifier automatiquement les formations (§ II.E) et par suite, à caractériser la valeur patrimoniale des forêts.

Pour finir, en tirant parti du modèle numérique de terrain et du modèle numérique des hauteurs, on examine la possibilité de prédire les zones menacées par les glissements de terrain (§ II.F). Cette application met en œuvre les relations trouvées dans les sections précédentes et aboutit à la confection automatique d'une carte des sensibilités relative aux deux secteurs les plus fréquentés du cœur du Parc National de la Guadeloupe (§ II.G).

## II. Etude

### A. Modèle numérique des hauteurs (MNH) et hauteur moyenne de canopée (HMC)

L'utilisation des mesures LiDAR nécessite un calibrage préalable. La couverture LiDAR apporte de nombreuses mesures sur chaque hectare du massif forestier. Aucune méthode alternative ne permet de renseigner la structure de la végétation avec une telle résolution spatiale. L'intérêt de ces mesures reste subordonné à une vérification préalable de leur signification.

On se propose ici, en pratique, de comparer sur les mêmes sites, les données LiDAR et les données du terrain.

Les données utilisées sont les 19 stations étudiées pour estimer les biomasses forestières (2010 – 2012).

#### 1. Nature des données LiDAR

Les données LiDAR sont acquises de manière aéroportée par télémétrie laser. A partir d'un nuage de points dont on connaît les coordonnées en trois dimensions, on est capable, après certaines manipulations, de produire le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et le Modèle Numérique de Hauteur (MNH).

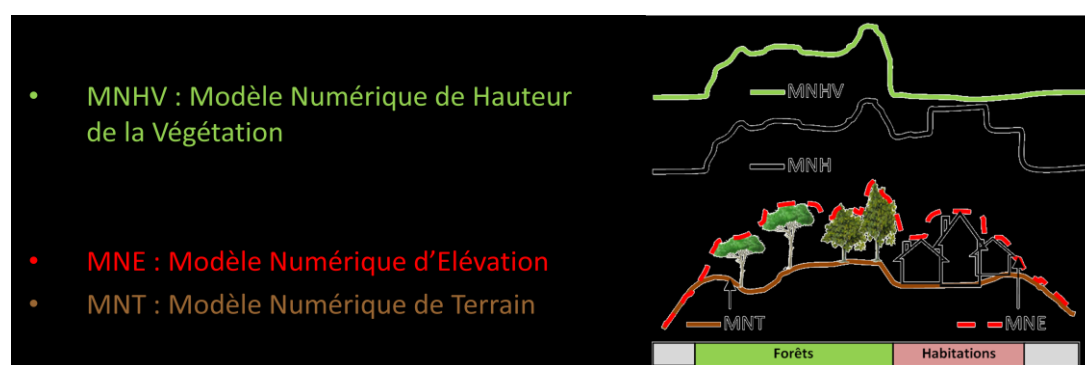


Figure 3 : Modèles Numériques : Terrain, Elévation, Hauteur

Le modèle numérique des hauteurs (MNH) fourni par l'IGN comprend deux statistiques : des mesures synthétisées par pas de 5m et des mesures synthétisées par pas de 25m. Pour la présente analyse, les données sont sélectionnées dans un rayon de 100m autour du point GPS de chaque station. Pour chaque station on dispose ainsi de 1311 à 1324 mesures LiDAR.

#### 2. Nature des données terrain

Le travail réalisé sur le terrain consiste à mesurer, sur une placette de dimension variable, le diamètre et la hauteur de chaque arbre rencontré.

La mesure du diamètre s'effectue conventionnellement à 1,30m de hauteur ; mesure à « hauteur de poitrine » ou Dbh pour « Diameter Breast Height ».



La hauteur de l'arbre est mesurée à l'aide d'un télémètre LASER (Leica Disto<sup>TM</sup> D8). Le principe consiste à viser une feuille de l'arbre, la plus haute possible, et à considérer que cette distance à la feuille estime convenablement la hauteur de l'arbre.

La représentation graphique de ces arbres dans le plan hauteur  $\times$  diamètre, fournit un nuage de points incurvé. La relation H-D est modélisée par inférence bayésienne. On adopte ici des modèles dits asymptotiques parce qu'ils présentent une asymptote horizontale :  $H(D) \rightarrow \alpha$  quand  $D \rightarrow \infty$ . L'inférence permet d'estimer la distribution de probabilité du paramètre  $\alpha$  du modèle et ce paramètre représente la « hauteur moyenne de canopée » (Mean Canopy Height).

Le modèle de WEIBULL utilisé ici  $H(D) = \alpha(1 - e^{-\beta D^\gamma})$  possède trois paramètres ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) estimés simultanément en utilisant le logiciel WinBUGS.

Il importe de noter que les mesures de hauteurs sont affectées d'une incertitude relativement importante. Il n'est pas facile de viser une feuille à une vingtaine de mètres de distance ; il est difficile de s'assurer que la feuille visée est effectivement au sommet de l'arbre ; la visée n'est pas exactement verticale... L'utilisation des télémètres LASER, que les hauteurs soient directement mesurées ou qu'elles soient calculées par trigonométrie, donne des résultats beaucoup plus précis que les autres techniques télémétriques habituelles (dendromètres Blum Leiss...). En outre, ces LASER rendent les mesures très rapides et permettent donc en pratique, l'acquisition d'échantillons plus importants. L'avantage apporté par les télémètres LASER est double : l'amélioration sur la précision des données est associée à une plus grande significativité statistique.

Les mesures de terrain s'appliquent dans les inventaires ici traités, à tous les ligneux érigés qui atteignent et dépassent 1.30m. Ce choix de mesurer les petits arbres ( $Dbh \geq 0$ ) permet de préciser les calculs de biomasse (ce qui n'est pas l'objet de la présente étude). Pour estimer la hauteur de canopée, il ne semble pas nécessaire a priori de prendre en compte les petits ligneux qui ne participent pas à la constitution de la canopée. Toutefois, dans la mesure où l'estimation de la hauteur moyenne de canopée passe par une modélisation, la prise en compte des petits ligneux est utile parce qu'elle améliore l'ajustement du modèle. Elle permet une meilleure estimation des paramètres du modèle et donc, de la hauteur moyenne de canopée ( $Hmc = \alpha$ ).

### 3. Calibrage des hauteurs LiDAR

L'échantillon traité est constitué de 19 sites, dont 18 sont localisés sur le versant au vent du massif montagneux de la Basse-Terre, à des altitudes variant de 250 à 726m. La parcelle de Bains jaunes fait exception dans la mesure où elle est placée sur le versant Sud de la Soufrière, et située à 850m. Tous ces échantillons appartiennent à l'ensemble hétérogène des forêts ombrophiles ; ces formations ne subissent pas de sécheresse saisonnière, l'évapotranspiration potentielle étant en tout mois de l'année, inférieure aux précipitations (sauf exception).

#### a) Comparaison des données LiDAR entre elles

La comparaison des deux résolutions adoptées (l'une à 5m l'autre à 25m) conduit à observer que les hauteurs minimales sont difficiles à interpréter (Figure 4).

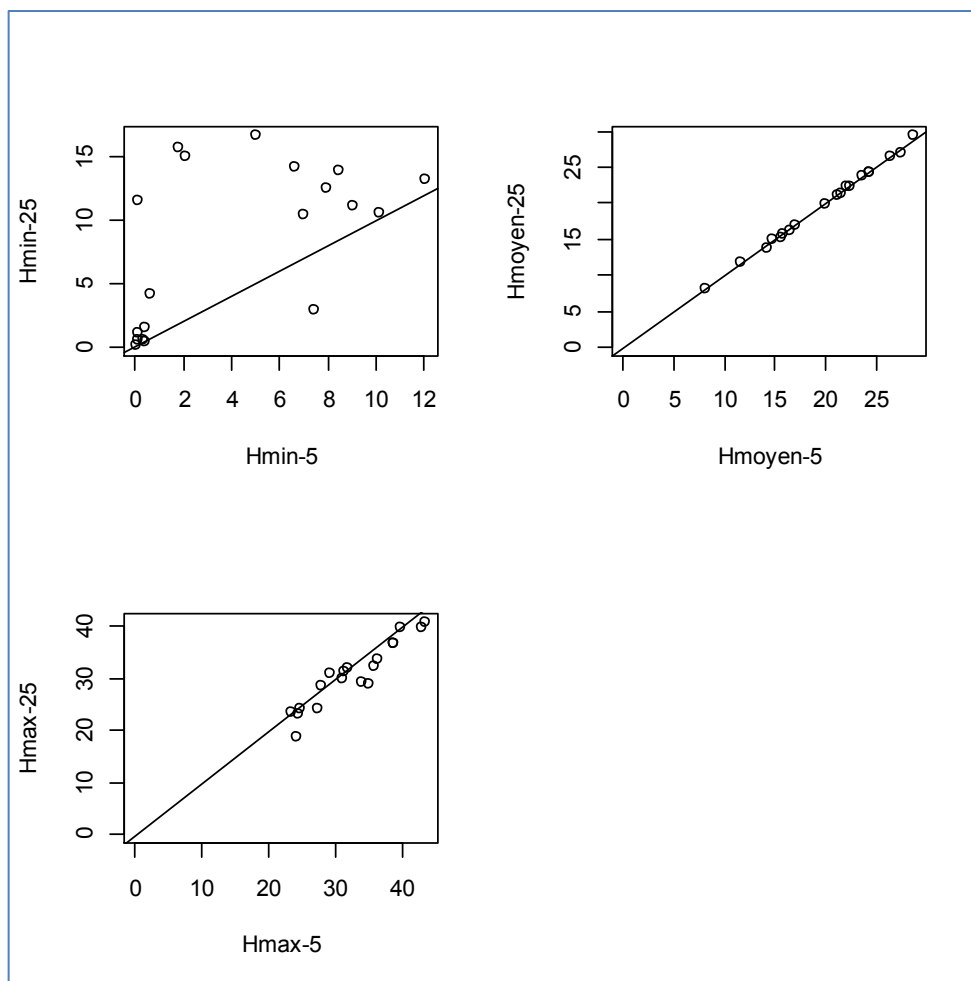


Figure 4 : Données « LiDAR ». Comparaison des résolutions (5m et 25m) pour les trois variables « hauteur minimale », « hauteur maximale » et « hauteur moyenne ».

D'une résolution à l'autre, les hauteurs maximales sont bien corrélées entre elles et les hauteurs moyennes le sont mieux encore (Figure 4).

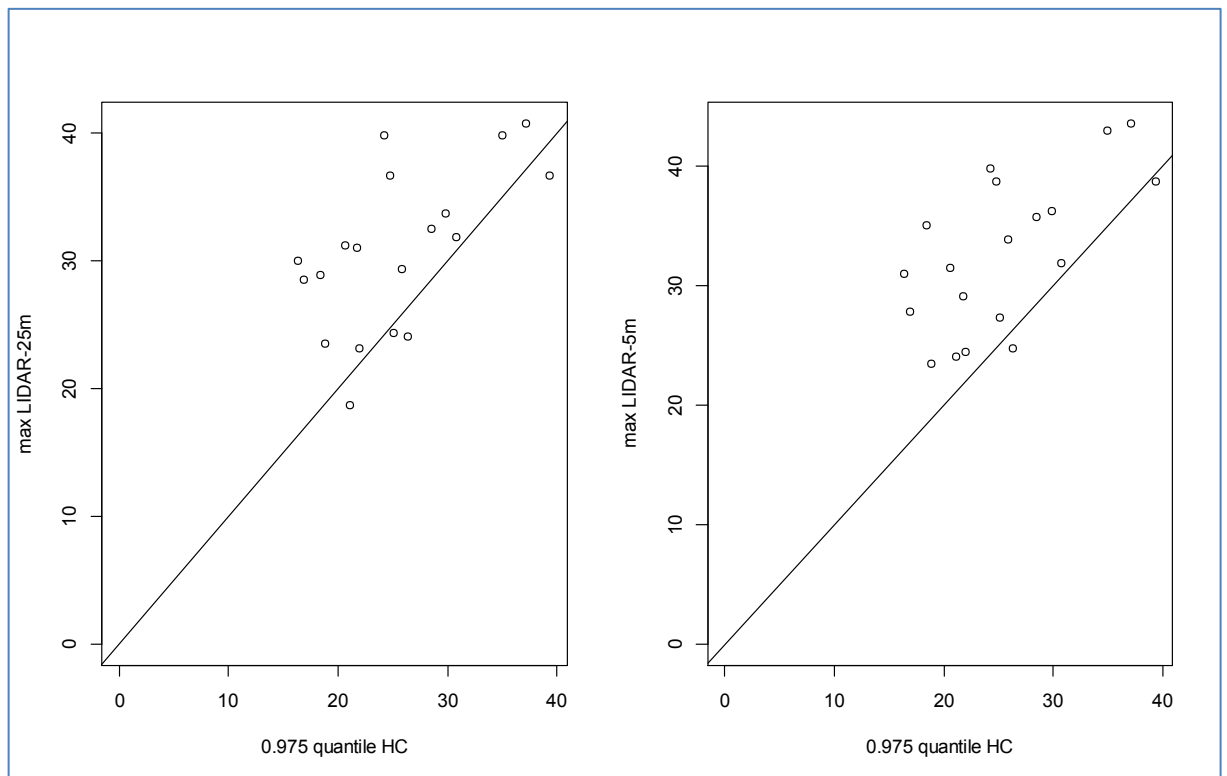
Les hauteurs minimales sont indépendantes des hauteurs moyennes (coefficient de corrélation de Spearman :  $p$ -value = 0.19) ou maximales (coefficient de corrélation de Spearman :  $p$ -value = 0.18). Seules sont corrélatives les hauteurs minimales et moyennes à la résolution de 25m (coefficient de corrélation de Spearman,  $\rho = 0.486$  et  $p$ -value = 0.0366).

## b) Relations entre les hauteurs de canopée modélisées et les hauteurs LiDAR

La canopée est la nappe formée par l'assemblage des plus hauts houppiers. Les arbres qui forment cette canopée sont directement exposés au soleil, c'est-à-dire qu'une partie au moins de leur houppier reçoit 100% de l'éclairement incident. La hauteur de canopée devrait ainsi pouvoir être mesurée par la hauteur des plus grands arbres. Les hauteurs LiDAR maximales sont pourtant assez mal corrélées aux hauteurs maximales estimées à partir des données sol (Figure 5).

En outre, il semble que parfois, les hauteurs LiDAR maximales soient nettement supérieures à la réalité. Elles atteignent 40m alors qu'on n'a pas pu observer d'arbre de cette taille en forêt de Guadeloupe. Il convient évidemment d'être très prudent puisque la totalité des mesures réalisées dans le massif forestier de la Basse-Terre n'excède pas quelques milliers

d'individus, soit approximativement le nombre d'arbres (Dbh > 10cm) rencontrés sur 1 hectare de forêt naturelle !



**Figure 5 : Relation entre le quantile 0.975 de la distribution de la hauteur de canopée (HC) et les hauteurs LiDAR maximales. La relation positive est peu précise. Les hauteurs LiDAR maximales semblent supérieures aux estimations issues des observations de terrain.**

Après discussion avec nos contacts de l'IGN, il apparaît que les mesures de hauteurs maximales a priori surestimées sont imputables à la présence d'accidents topographiques. Dans les situations défavorables, la hauteur LiDAR maximale est effectuée en haut de pente tandis que le point « sol » est mesurée en bas de pente (Thierry Saffroy, comm. pers.). Le MNH est alors surévalué d'une longueur significative.

Si les mesures relatives aux plus grands arbres posent problème, celles qui concernent les moyennes sont beaucoup plus confortables. Les meilleures relations trouvées entre les différentes mesures disponibles, sont représentées en Figure 6.

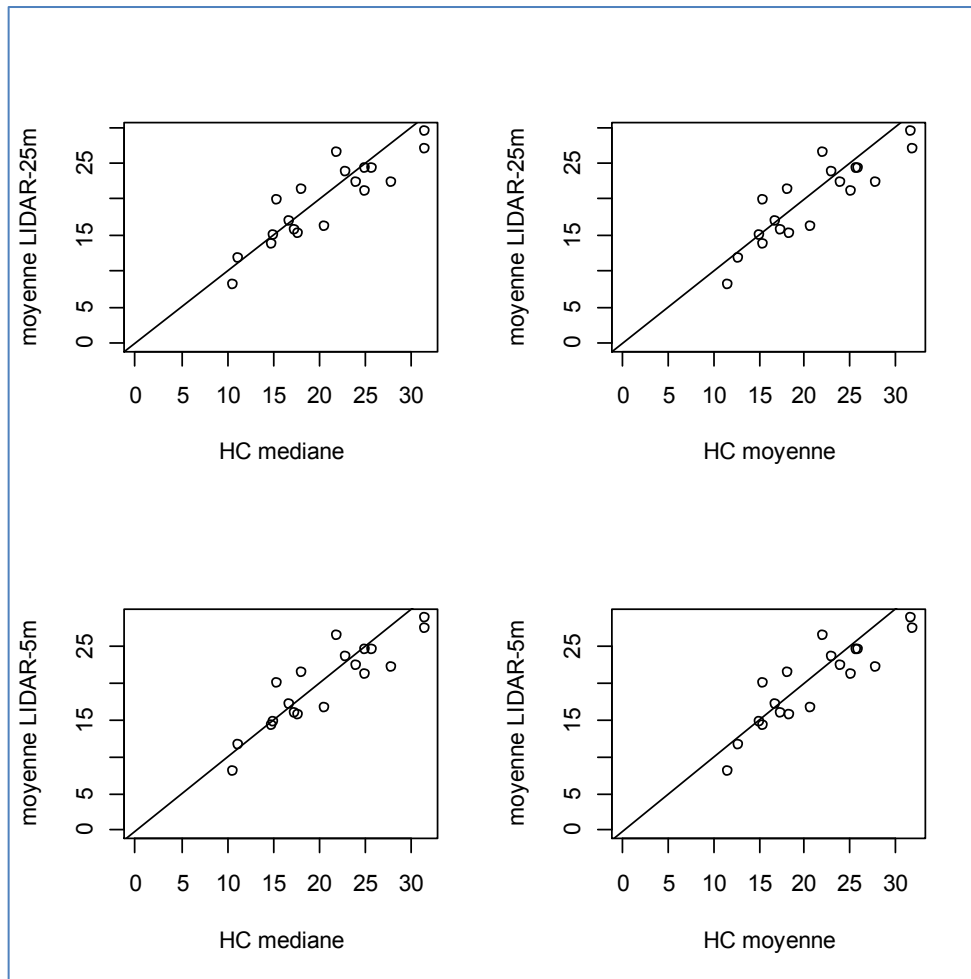


Figure 6 : Relations utiles entre mesures LiDAR et la hauteur de canopée (HC). L'estimation de la hauteur de canopée et des paramètres statistiques qui la décrivent, sont issus d'une modélisation de la relation hauteur-diamètre. Les lignes continues sont des droites de pente 1.

#### 4. Conclusion

Il est possible de prédire avec une bonne précision, la hauteur médiane de la canopée, ou de façon presque équivalente, la hauteur moyenne de canopée (HMC), à partir de la hauteur LiDAR moyenne (Figure 7). Dans le cas de la médiane, la droite des moindres carrés a pour équation :

$$HC_m \approx 1.1739 + 0.9851 \cdot \overline{HL}$$

$$r^2_{ajusté} = 0.7835$$

où  $HC_m$  représente la valeur médiane de la distribution du paramètre  $\alpha$  et où  $\overline{HL}$  représente la moyenne arithmétique des hauteurs LiDAR à 5m de résolution.

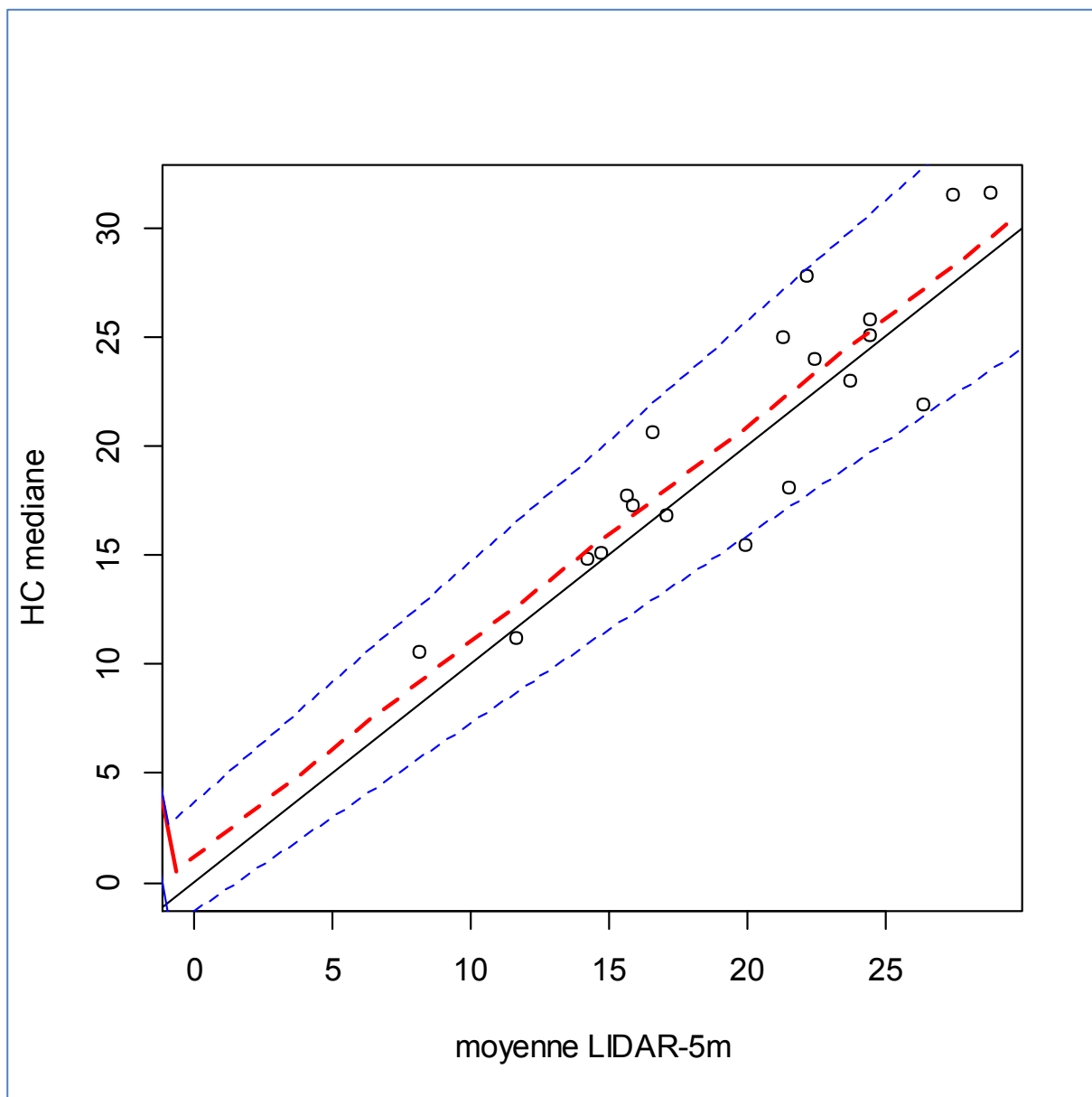


Figure 7 : Relation entre la hauteur moyenne de canopée (modélisée à partir des observations au sol) et la moyenne des hauteurs LiDAR à 5m de résolution. La droite continue représente l'identité des deux variables. La ligne de tirets rouges représente la droite des moindres carrés.

Ces relations sont d'une précision étonnante si on considère l'origine des données. Les mesures de terrain sont délicates tandis que la position même des stations n'est pas connue avec une grande précision. Dans certains cas, la déclivité des stations accroît sans doute l'incertitude sur ces données.

En outre, la hauteur LiDAR moyenne est une variable d'interprétation difficile. Les échos LiDAR récupérés sont pour partie provoqués par les feuilles des plantes. La fréquence des échos est proportionnelle à la densité de feuilles. Dans la moyenne calculée, les feuilles de la canopée sont alors mieux représentées que les feuilles de sous-bois, d'abord parce que celles-ci sont plus rares, ensuite parce que les faisceaux LASER incidents sont aussi moins fréquents.

## B. Hauteur LiDAR et structure du couvert végétal

### 1. Objectif et données

Après avoir mis à jour une relation quasi-linéaire entre la hauteur moyenne de canopée et la hauteur moyenne LiDAR, et après avoir estimé la biomasse d'un arbre en fonction de la variable ( $D^2.H$ ), il semble légitime de chercher à prévoir la biomasse à partir de la hauteur LiDAR. En outre, cette relation serait d'une utilité extraordinaire puisque les données LiDAR couvrent l'ensemble du massif forestier au pas de 5m ou de 25m ; ces données pourraient alors servir à prédire la biomasse.

Les données utilisées ici sont celles des stations « biomasses » comme précédemment.

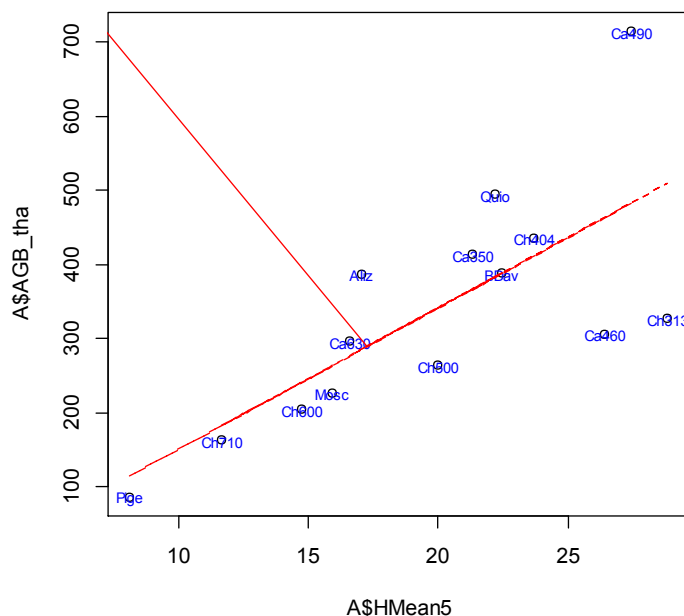


Figure 8 : Relation entre la biomasse épigée (en tonnes par hectare) et la hauteur-moyenne LiDAR au pas de 5m.

Considérer une relation linéaire entre la biomasse et les 3 hauteurs LiDAR disponibles (minimum, maximum et moyenne) n'apporte aucune amélioration à la relation précédente.

Il apparaît toutefois que les parcelles ayant les plus grandes biomasses (Quiock, Alizés, Ca350, Ca490...) sont aussi caractérisées par des surfaces terrières anormalement élevées.

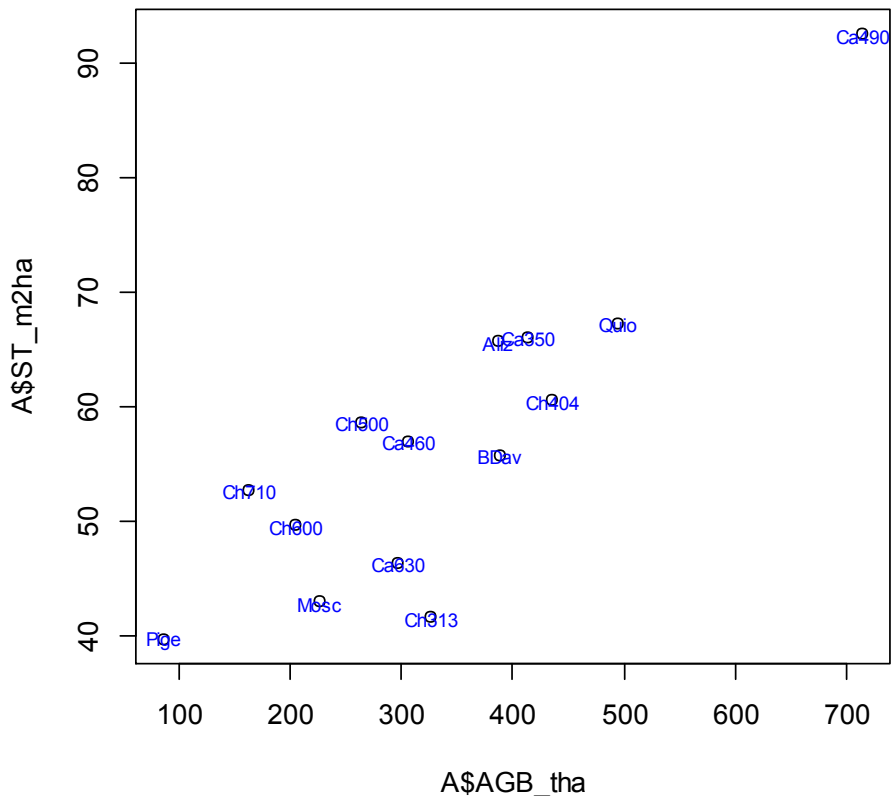


Figure 9 : Les parcelles dotées des plus grandes biomasses le doivent en partie, à leur surface terrière. La relation AGB-hauteur en est affectée : ces parcelles ont des biomasses anormalement élevées relativement à la hauteur LiDAR moyenne.

Compte tenu de la dépendance entre la surface terrière et l'altitude (**Erreur ! Source du envoi introuvable.**), on pourrait attendre une amélioration de la biomasse prédite en la faisant dépendre (1) de la hauteur LiDAR et (2) de l'altitude. En fait, cette nouvelle relation linéaire dégrade très légèrement la précision de la dépendance simple  $AGB \sim H_{mean-LiDAR}$  (au sens des résidus standards et du coefficient  $r^2$  ajusté ; voir Figure 11).

## 2. Résultats et conclusion

La moyenne des hauteurs LiDAR (H25) est un bon estimateur de la hauteur moyenne de canopée (estimée par une modélisation des relations hauteur-diamètre). La même variable H25 est corrélée à la biomasse mais la prédiction de la biomasse par la seule variable H25 est relativement incertaine. Pour améliorer les prédictions de la biomasse, il semble intéressant de chercher à estimer la biomasse à partir de H25 et d'autres paramètres tirés de la distribution des échos LiDAR. On pourrait aussi dans le même but, chercher à estimer la surface terrière à partir de la distribution des échos LiDAR.

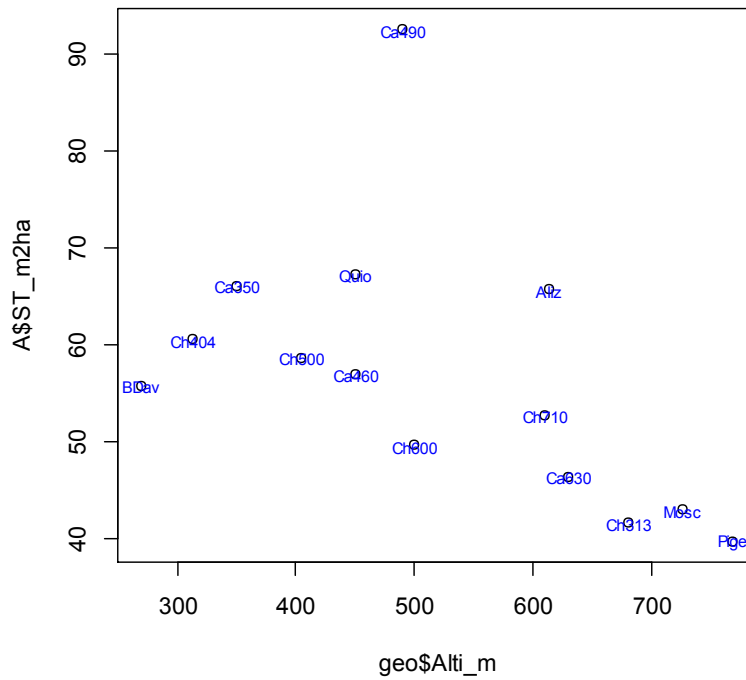


Figure 10 : La surface terrière décroît quand augmente l'altitude, au moins au-dessus de 400m d'altitude.

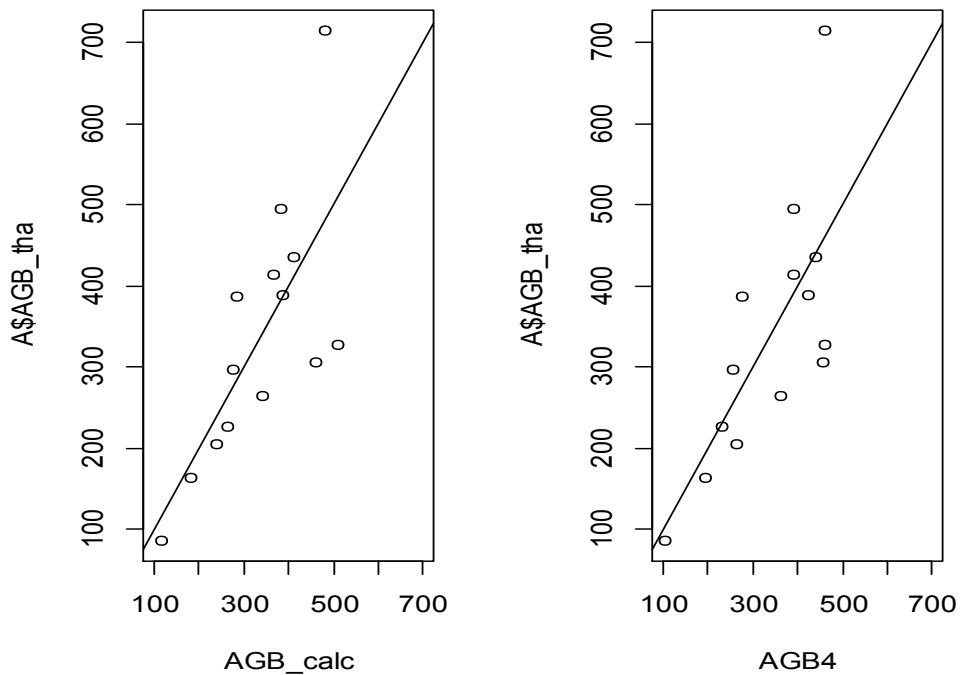


Figure 11 : La hauteur moyenne LiDAR (qui permet d'estimer AGB\_calc) est un meilleur prédicteur de la biomasse que la combinaison hauteur moyenne LiDAR et altitude (à partir de laquelle on a calculé AGB4). La droite de pente 1 et d'ordonnée à l'origine nulle, représente l'égalité exacte entre les modèles (AGB\_calc et AGB4) et la mesure réelle (AGB\_tha).



## C. Hauteur LiDAR moyenne et paramètres géographiques

### 1. Objectifs et données

L'analyse est ici limitée au secteur de la Traversée qui inclut la Mamelle de Petit-Bourg, la Mamelle de Pigeon (Morne Déboulé) et le Morne-à-Louis. Ces trois necks émergent de reliefs moins accentués.

Un couloir de 500 m de large sur 2500 m de longueur a été délimité le long de la route de la Traversée. Ce couloir englobe la Mamelle de Petit-Bourg et la Mamelle de Pigeon (ou Morne Déboulé). Cet échantillon, est découpé en 2093 petites unités homogènes (UV) relativement aux données topographiques. Les formes de ces unités sont très variables et leurs aires varient de 1 à 24938 m<sup>2</sup>.

Le découpage en UV est intersecté avec le modèle numérique des hauteurs fourni par l'IGN. On dispose ainsi d'une estimation des hauteurs MNH pour chaque unité EU. Le nombre des points MNH des EU varie de 1 à 1114 pour une résolution de 5m ; il varie de 1 à 81 lorsque la résolution est de 25m. Dans la suite de ce rapport on traitera les données à résolution de 5m ou de 25m indifféremment puisqu'on n'a pas pu montrer que la résolution supérieure (5m) apportait un gain d'information. Ces données sont réduites pour chaque UV, à une moyenne, une valeur minimale et une valeur maximale.

### 2. Résultats

Dans le contexte géographique défini ci-dessus, la hauteur moyenne LiDAR décroît significativement avec l'altitude (Figure 12). Cette relation est sans doute amplifiée par le contraste entre les mornes couverts d'une végétation relativement basse, et les reliefs environnants portant une forêt ombrophile développée. Le secteur de la Traversée a précisément été choisi pour ce contraste attendu. L'effet d'altitude pressenti, et très généralement observé (Paulsch 2008), est donc vérifié à l'échelle du secteur. Il existe ailleurs mais selon le secteur et selon l'échelle d'analyse, il peut être moins prononcé.

La pente a une incidence significative sur la hauteur moyenne LiDAR (Figure 13) ( $t = -5.0997$ ,  $df = 2091$ ,  $p\text{-value} = 3.709e-07$ ). Ce phénomène est moins attendu que le précédent. Les données de l'inventaire réalisé pour la carte écologique (inventaire CE) ne montrent pas cet effet et dans certaines situations locales, des pentes très fortes peuvent supporter des arbres particulièrement grands. Il faudrait ici, pour confirmer l'effet de pente, le dissocier de l'effet d'altitude. Le terme d'interaction de l'analyse de variance (test F,  $p=0.49$ ) permet d'évacuer l'hypothèse selon laquelle l'interaction entre la pente et l'altitude influencerait sur la hauteur moyenne LiDAR.

L'effet de l'exposition est aussi très significatif (test F,  $p\text{-value} < 1.9 \cdot 10^{-13}$ ) : la hauteur de canopée (mesurée par la hauteur moyenne LiDAR) est plus courte dans le secteur Est ou Nord et plus haute dans le secteur Sud-Ouest (Figure 14). On peut concevoir *a priori* que cet effet d'exposition est en grande partie dû à l'orientation moyenne des Alizés. L'exposition au vent a tendance à limiter la hauteur de canopée.

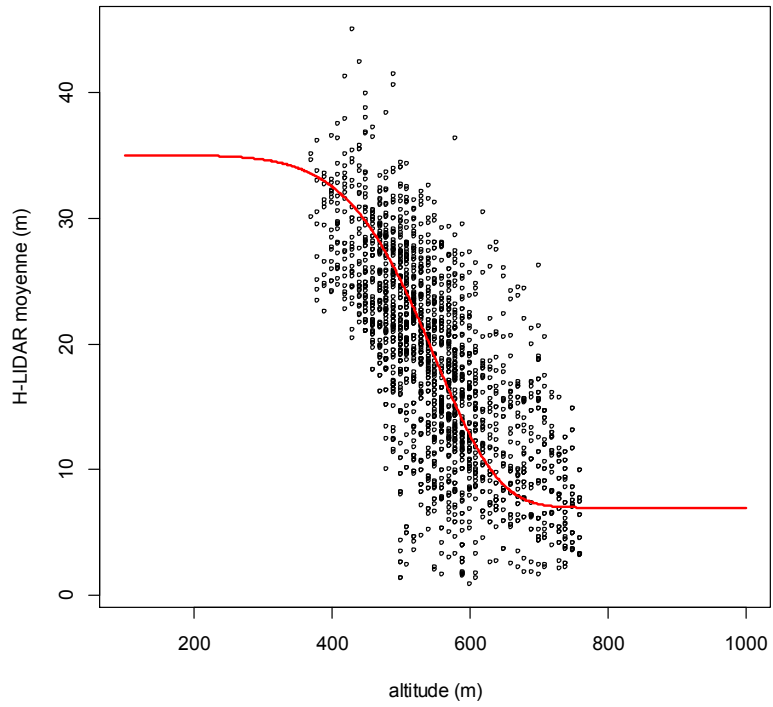


Figure 12 : Relation entre altitude et hauteur moyenne LiDAR dans le secteur de la Traversée. La courbe rouge résulte d'un ajustement approximatif.

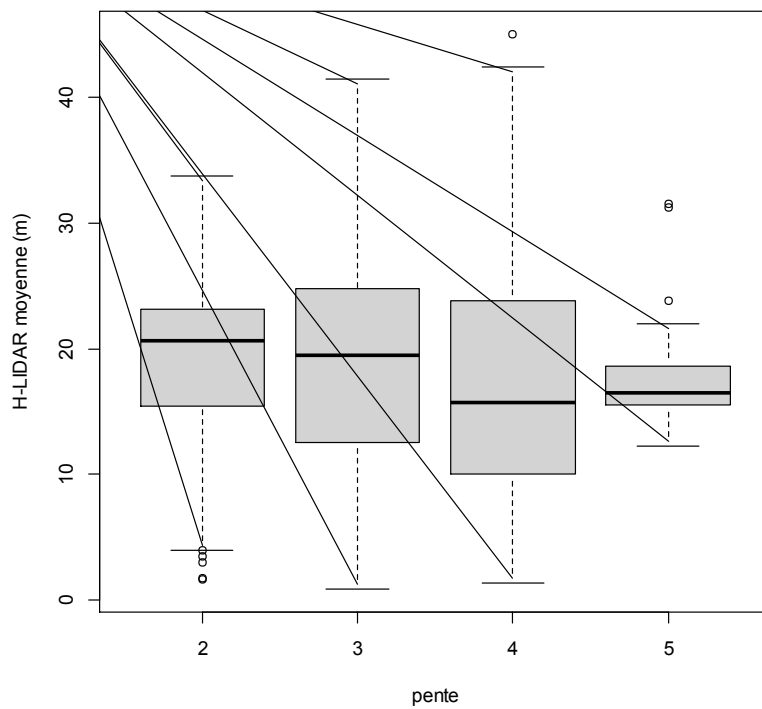


Figure 13 : La hauteur du couvert végétal (ici traduite par la hauteur LiDAR moyenne) dépend significativement de la pente. Données du secteur de la Traversée.

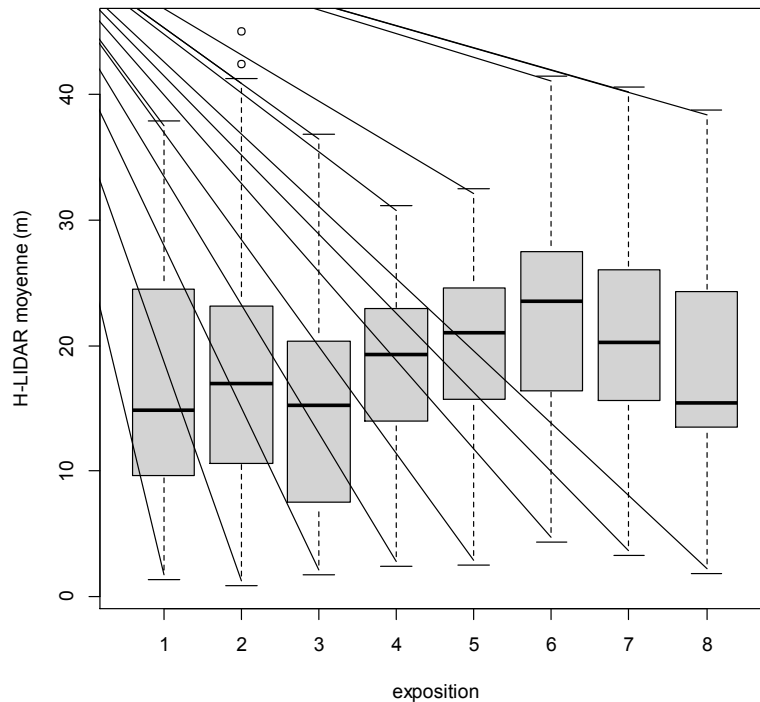


Figure 14 : L'exposition est rapportée en huit secteurs de 45°. Le secteur 1 est centré sur le Nord géographique, le secteur 3 est centré sur l'Est, le secteur 5 sur le Sud et le secteur 7 sur l'Ouest. La hauteur du couvert dépend significativement de l'exposition.

## D. Hauteur LiDAR moyenne et composition floristique

### 1. Peuplements forestiers

#### a) Objectifs et données

Les données utilisées comportent la détermination de tous les arbres de diamètre supérieur à 10cm (Dbh). L'objectif est de rechercher les critères permettant de définir la sensibilité des peuplements et d'étudier l'intérêt des données LiDAR dans le diagnostic de sensibilité.

#### b) Méthodes

Les données de base sont les surfaces terrières et les effectifs des différentes espèces trouvées dans chaque parcelle. Le traitement de ces données est réalisé en trois étapes. Le tableau de données est d'abord normalisé ; il est ensuite pondéré de façon à minorer le poids des espèces trop abondantes et le poids des espèces trop rares. Les données ainsi transformées sont soumises à un cadrage multidimensionnel non métrique (NMDS pour « *non-metric multidimensional scaling* »).

Afin de faciliter l'interprétation de la NMDS, on projette dans certains graphiques présentés ci-dessous, la typologie utilisée dans la carte écologique : peuplement DTA (*Dacryodes excelsa*, *Tapura antillana*, *Amanoa caribaea*), peuplement ATR (*A. caribaea*, *T. antillana*, *Richeeria grandis*) et R (*R. grandis*). Il importe de souligner que cette typologie n'intervient en rien dans le calcul de la NMDS.

Dans un second temps, on analyse la NMDS en projetant différentes variables relatives à la géographie, à la structure des peuplements ou à leur biodiversité. La signification des variables est testée par permutations (nombre de permutations fixé ici à 999). La NMDS est un outil efficace pour aborder l'analyse simultanée d'un grand nombre de variables. Elle permet incidemment de représenter des relations non linéaires, ce que ne fait pas l'analyse en composantes principales.

### c) Résultats

Les résultats présentés ici sont limités aux plus significatifs.

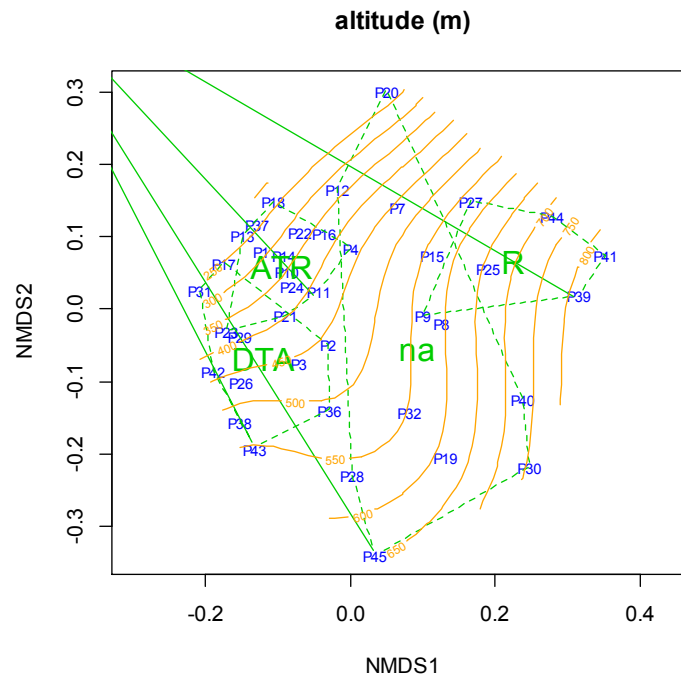


Figure 15 : NMDS portant sur la composition floristique des peuplements. Projection de l'altitude ( $p=0.001$ ).

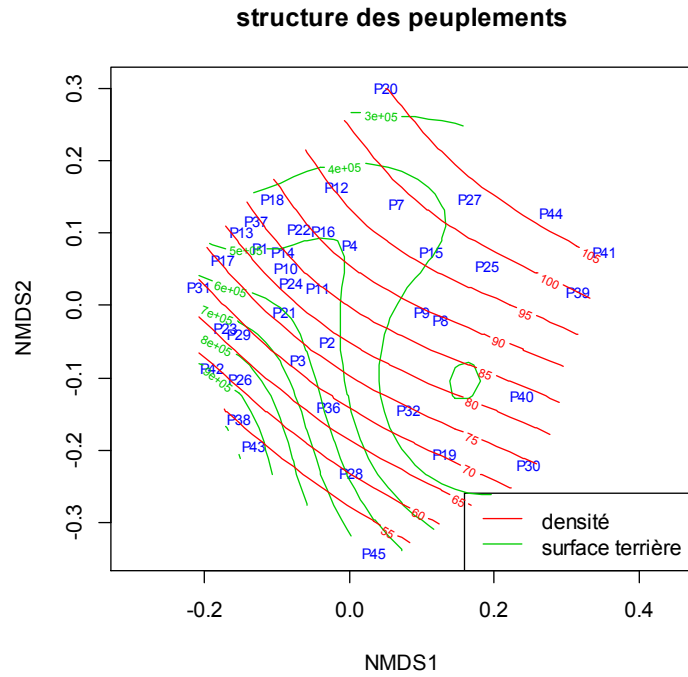


Figure 16 : Même NMDS qu'en figure 12. Projection de la densité et de la surface terrière ( $p \sim 0.015$  et  $0.001$  resp.).

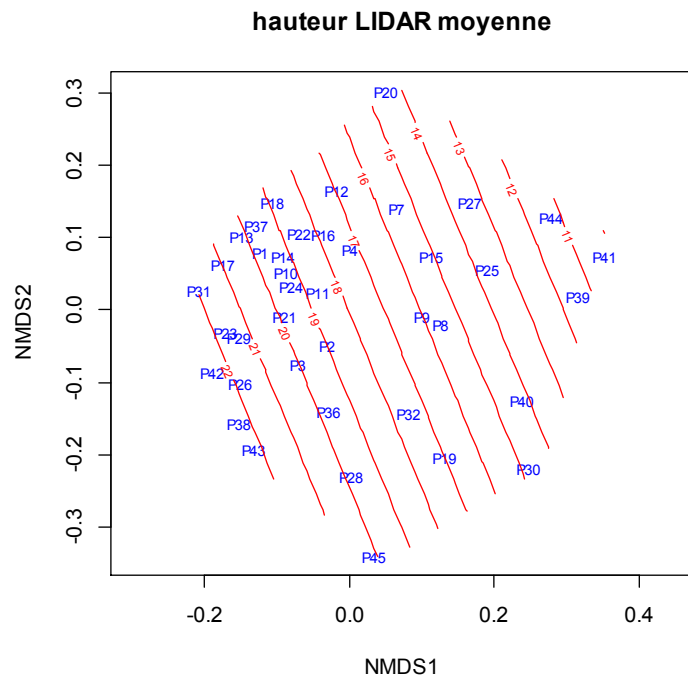


Figure 17 : Même NMDS qu'en figure 12. Projection  $p \sim 0.003$ .

### fréquence des individus endémiques

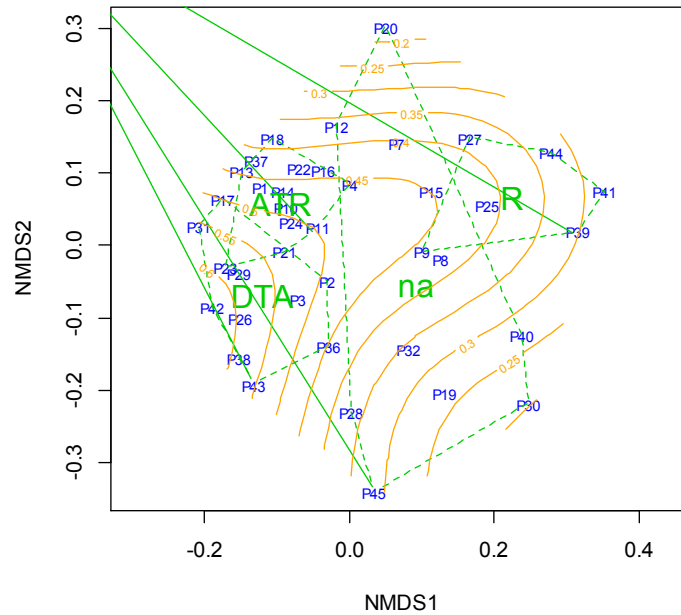


Figure 18 : Même NMDS qu'en figure 12. Projection  $p \sim 0.01$ .

### indice de mélange

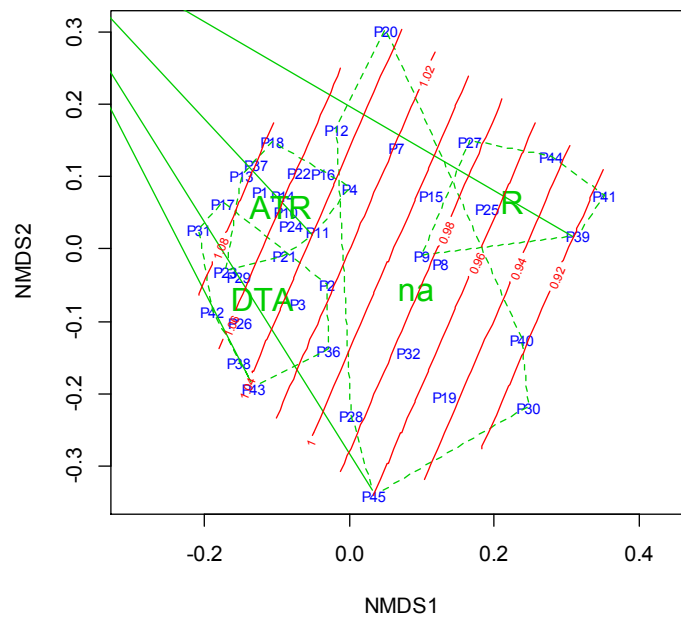


Figure 19 : Même NMDS qu'en figure 12. Projection  $p \sim 0.001$ .

L'analyse réalisée met en évidence que la composition floristique des différentes parcelles analysées, est sensible à l'environnement physique et en particulier aux variables mésologiques qui accompagnent l'altitude (Figure 15). Cette tendance attendue se traduit par une modification de la structure forestière (Portécop 1980, Rousteau 1996). La plupart des descripteurs de la structure forestières ont des variations significatives dans le plan de la NMDS. Par exemple, la densité des arbres (nombre d'individus par unité de surface) augmente tandis que la surface terrière diminue

(Figure 16). La hauteur moyenne LiDAR (Figure 17) répercute le gradient structural des peuplements. Cette variable est notamment positivement corrélée à la surface terrière (ANOVA,  $p$ -value=0.0017).

A travers cette relation attendue avec la structure forestière, la hauteur LiDAR permet aussi, dans une certaine mesure, de prévoir la composition floristique. Ainsi, les forêts relativement basses qui couvrent les hauts de versants et les crêtes, sont très souvent caractérisées par une composition floristique bien identifiées (type R) : ce sont les forêts à *Richeria*, *Byrsonima*, *Ilex*. Dans ce contexte forestier, la fréquence des arbres appartenant aux espèces endémiques des Petites Antilles change significativement dans le plan de la NMDS (Figure 18) : cette fréquence tend à diminuer dans les forêts de type R.

## 2. Cas des fourrés et des « savanes d'altitude »

En Guadeloupe, comme dans la plupart des territoires tropicaux montagneux, la représentation des endémiques augmente en altitude. Le résultat rapporté précédemment est dû à l'échantillon analysé qui ne prend pas en compte (ou pas suffisamment en compte) les formations sommitales. Près des crêtes, et notamment autour de la Soufrière, les peuplements forestiers les plus bas cèdent la place aux fourrés hauts, qui eux-mêmes, à des altitudes supérieures, cèdent la place aux fourrés bas (ce qu'on nomme parfois aux Antilles « savanes d'altitude »). Dans cette transition relativement étroite, vivent beaucoup d'espèces endémiques, *Inga guadeloupensis*, *Meliosma pardonii*, plusieurs Myrtaceae... Si on monte encore, les fourrés hauts hébergent d'autres endémiques, en particulier chez les genres *Clidemia*, *Charianthus*, *Persea*, *Myrsine*, *Myrcia*... tandis que les fourrés bas, sur les crêtes et les sommets, hébergent à leur tour de herbacées endémiques *Pitcairnia bifrons*, *Lobelia guadeloupensis*...

Quoique les peuplements forestiers analysés ci-dessus ne permettent pas de le montrer, on peut considérer sans faire erreur, que les formations végétales basses (dont les hauteurs LiDAR moyenne sont inférieures à une dizaine de mètres), sont particulièrement riches en espèces endémiques. Il est évident par ailleurs, que cette tendance est renforcée dans le Sud de l'île de la Basse-Terre et qu'elle culmine dans le massif de la Soufrière.

## 3. Conclusion

Dans le contexte montagneux de la Basse-Terre, la hauteur LiDAR moyenne peut être considérée comme un proxy de certains caractères de la flore.

---

## E. Hauteur LiDAR et unités écologiques

---

Afin d'exploiter les données LiDAR dans un processus automatique de classification, un certain nombre de valeurs doivent être calculées à partir du MNH comme les hauteurs minimales, moyennes et maximales des arbres.

Pour cela, les mesures sont regroupées au sein de zones homogènes (Unités Vectorielles de la Figure 20) selon certaines caractéristiques topographiques (altitude, pente, versant, exposition). Les valeurs sont ensuite calculées au sein de chacune de ces zones.

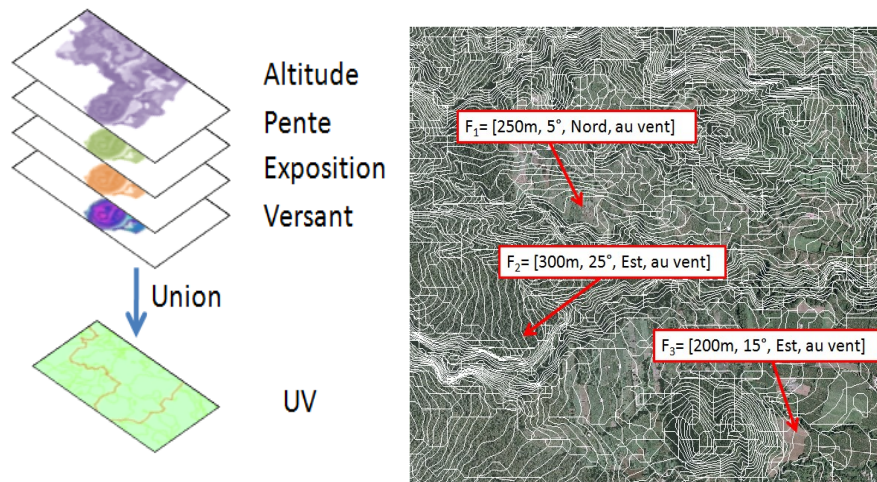


Figure 20 : Principe de construction des Unités Vectorielles (UV)

Une chaîne de traitement complète des données topographiques et Lidar a été synthétisée lors du stage de Luigui Nagapin (janvier à juin 2013) à partir d'outils développés dans le cadre d'autres travaux de recherche.

Cette chaîne permet l'extraction des données, le calcul des statistiques, la classification des données et l'affichage des résultats.

La validation des classifications a été faite par comparaison des résultats avec la classification de référence (Rousteau 1996).

L'introduction du MNH a permis d'améliorer les taux de bonne classification (Figure 21) et de lever certaines ambiguïtés sur les classifications (classes 9 et 11).

| %  | 3           | 4         | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          | 11          | 12          |
|----|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3  | <b>85,1</b> | 1,2       | 0,8         | 5,4         | 1,8         | 3,1         | 0,9         | 1,7         |             |             |
| 4  | 4,3         | <b>76</b> | 2,3         | 7,1         | 0,9         | 3,3         | 2,2         | 3,6         | 0,3         |             |
| 5  | 3,7         | 8,1       | <b>75,3</b> | 1,3         | 4,5         | 1,4         | 4,4         | 1,2         |             | 0,1         |
| 6  | 1,7         | 14,2      | 1,2         | <b>73,8</b> | 0,3         | 0,9         | 2,8         | 1,7         | 3,1         | 0,3         |
| 7  | 10          | 8,2       | 5,1         | 0,5         | <b>59,1</b> | 1,3         | 4,5         | 6           | 1,3         | 4           |
| 8  | 6,7         | 12,1      | 1,4         | 1,3         | 2,3         | <b>69,6</b> | 1,9         | 2,3         | 1,1         | 1,3         |
| 9  | 0,4         | 0,7       | 2,1         | 1,4         | 0,6         | 1,2         | <b>22,1</b> | 7,1         | <b>64,1</b> | 0,3         |
| 10 | 1           | 0,3       | 2,1         | 0,8         | 1,1         | 1,2         | 5,4         | <b>78,2</b> | 2,8         | 7,1         |
| 11 | 1,6         | 4,7       | 3,8         | 5,1         | 2,1         | 3,5         | <b>57,3</b> | 4,5         | <b>9,3</b>  | 8,1         |
| 12 | 0,1         | 0,1       | 0,9         | 1,3         | 1,1         | 7,8         | 3,4         | 1,2         | 2,5         | <b>81,6</b> |

*Sans MNH*



| %  | 3           | 4         | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          | 11          | 12          |
|----|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3  | <b>89,1</b> | 2,8       | 1,7         | 3,9         | 1,2         | 0,1         |             |             | 1,1         | 0,1         |
| 4  | 1,3         | <b>93</b> | 3,8         |             | 0,9         |             | 0,3         | 0,6         |             | 0,1         |
| 5  | 12,1        | 3,9       | <b>78,7</b> | 2,3         | 0,3         | 0,7         | 1,2         |             | 0,8         |             |
| 6  | 0,2         | 4,5       | 1,3         | <b>88,9</b> | 2,9         | 1,3         | 0,3         |             |             | 0,6         |
| 7  | 0,1         | 1,9       | 0,3         | 9,2         | <b>75,4</b> | 1,4         | 7,8         | 2,4         | 1,2         | 0,3         |
| 8  | 3,5         | 0,3       | 1,9         | 3,7         | 7,2         | <b>72,5</b> | 3,8         | 2,9         | 1,9         | 2,3         |
| 9  |             |           | 0,1         |             | 1,8         | 1,7         | <b>58,3</b> | 1,9         | <b>32,5</b> | 3,7         |
| 10 |             |           | 0,9         | 0,4         | 1,2         | 0,3         | 0,8         | <b>92,2</b> | 2,9         | 1,3         |
| 11 | 0,9         | 1,1       | 0,3         | 1           | 0,9         | 1,3         | <b>27,4</b> | 1,2         | <b>63,4</b> | 2,5         |
| 12 | 0,1         | 0,3       | 2,1         | 1,7         | 0,3         | 1           | 0,9         | 1,9         | 2,2         | <b>89,5</b> |

*Avec MNH 25m*

Figure 21 : matrices de confusion sans MNH et avec MNH 25m. Les noms de lignes et les en-têtes de colonnes sont les classes utilisées dans la carte écologique (Rousteau 1996). Les nombres du tableau représentent le pourcentage d'unités vectorielles classées. Exemple : 1,3% des unités vectorielles appartenant à la classe 4 de la carte écologique (ligne nommée « 4 ») ont été classées dans la classe 3 (colonne nommée « 3 ») par le classement automatique. 93% des unités vectorielles de la classe « 4 » ont été bien classées.

Les classifications obtenues mettent en avant les zones d'incertitude (en noir sur la Figure 22) de la classification en fonction d'un seuil fixé par l'utilisateur représentant la qualité de la classification. L'introduction du MNH permet de réduire la superficie des zones (Figure 23) et d'augmenter le seuil tout en conservant des zones d'incertitudes réduites.

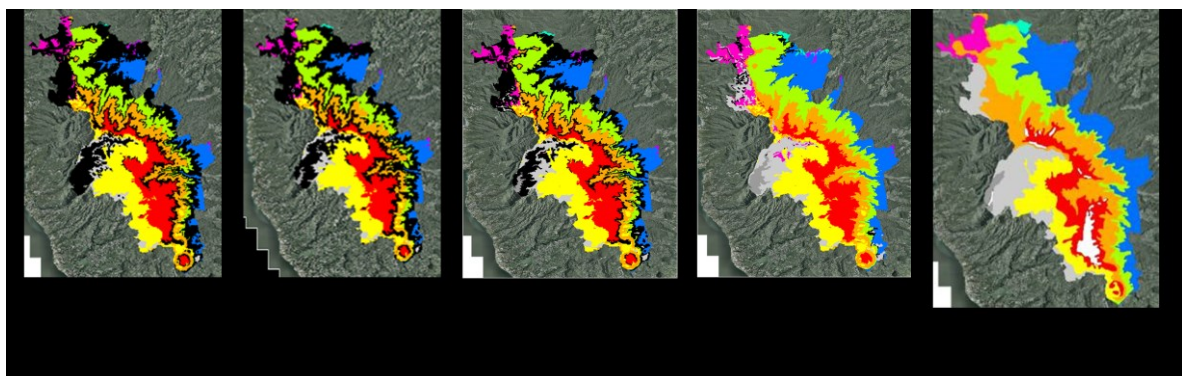


Figure 22 : zones d'incertitude (en noir) avec et sans MNH et carte de référence.

| S          | Superficie<br>(sans Mnh) | Superficie<br>(avec Mnh<br>25m) |
|------------|--------------------------|---------------------------------|
| 0          | 0                        | 0                               |
| 0.1        | 1.2 %                    | 0.5 %                           |
| 0.3        | 2.1 %                    | 1.2 %                           |
| 0.5        | 4.4 %                    | 2.1 %                           |
| <b>0.7</b> | <b>21.4 %</b>            | <b>3.1 %</b>                    |
| 0.9        | 25.1 %                   | 12.6 %                          |
| 1          | 27.2 %                   | 18.7 %                          |

Figure 23 : superficie des zones d'incertitude avec et sans MNH.

## F. Analyse des glissements de terrain

### 1. Introduction

#### a) Généralités

Les glissements de terrain comptent parmi les événements les plus destructeurs du couvert végétal. Nous évoquons ci-dessous le cas des systèmes de montagne tropicale. Outre le fait que la Guadeloupe possède de tels systèmes, ce choix est justifié par le fait qu'ailleurs, les glissements de terrain sont rares et, sauf cas particulier, ont des conséquences moindres.

Le premier effet d'un glissement de terrain est la suppression locale du couvert et l'ablation du sol sur une profondeur variable. A l'extrémité distale du glissement de terrain, les débris végétaux mêlés aux matériaux minéraux et organiques s'accumulent pour constituer un bourrelet fertile. Ailleurs, sur presque toute la longueur de la cicatrice du glissement, le substrat est une couche d'argile ou parfois affleurent la roche volcanique<sup>1</sup>. Il n'y a plus de sol à proprement parlé, la matière organique a disparu (sauf bien sûr au bord des cicatrices d'ablation), les minéraux font défaut, les cycles biogéochimiques ne sont plus réalisés (Guariguata 1990, Schuur et al. 2001 *in* Benner et al. 2010, Kitayama & Aiba 2002, Beck et al. 2008, Krashevskaya et al. 2010) notamment en raison d'un excès d'eau qui bloque les réactions aérobie, quand les sels minéraux sont libérés par voie chimique ou par voie biologique (grâce à l'activité des bactéries), ils sont exportés par le ruissellement dont l'efficacité est maximale en raison du substrat lisse, imperméable et pentu (Chen et al. 2010).

En somme, tout concourt à limiter l'activité biologique. La colonisation des glissements de terrain n'est pas l'objet de ce travail mais elle a été déjà étudiée (Cabidoche & Rousteau 1997). Elle est lente en raison de l'indisponibilité des ressources minérales nécessaires (Chen et al. 2010), en particulier la carence en azote (Wolf et al. 2011) mais elle est aussi freinée par l'absence ou la rareté de sites favorables à l'établissement des espèces colonisatrices (Guariguata 1990, Cabidoche & Rousteau 1997), par le ruissellement (imputable aux précipitations torrentielles) qui emportent

<sup>1</sup> Les roches volcaniques sont rares en raison de la vitesse très élevée de leur altération physico-chimique. L'eau abondante, la température relativement élevée, contribuent à accélérer l'altération des roches (van Oort et al. 1990) qui par nature, ne sont pas très dures : basalte rarement, andésites le plus souvent, dacites quelques fois dans le Nord...

les graines et déracinent les semis (Byer & Weaver 1977, Cabidoche & Rousteau 1997) et peut-être aussi, par l'inefficacité de la dissémination (Byer & Weaver 1977). Ces contraintes associées réalisent d'ailleurs un filtre très sélectif qui se traduit par l'installation de plantes spécialisées mais éventuellement capables de bloquer la succession. Typiquement, en Guadeloupe, les fourrés à *Dicranopteris pectinata* (le Calumet) cicatrisent la couverture végétale ouverte par le glissement mais ils empêchent pendant longtemps, l'installation des autres plantes (Guariguata 1990, Rousteau 1991, Walker et al. 2013).

D'autres limites éco-physiologiques contribuent au ralentissement. L'anaérobie affecte le métabolisme des systèmes racinaires et l'hygrométrie réduit la transpiration (Byer & Weaver 1977, Jane & Green 1985, Holwerda 2005...). D'autres mécanismes moins certains sont invoqués pour expliquer la faible vigueur des peuplements montagnards (Hamilton et al. 1993).

Au bilan des carences minérales (azote surtout, phosphore...) affecte le métabolisme. La transpiration est limitée par l'hygrométrie moyenne, ce qui diminue l'intensité de la photosynthèse (par suite d'une saturation des chloroplastes par les assimilats). La croissance des plantes se trouve donc limitée. L'activité cambiale des ligneux produit des trachéides et des vaisseaux de diamètres réduits ce qui limite la conductance et donc la transpiration (Ryan & Yoder 1997). La boucle est fermée : le ralentissement de la croissance provoque le ralentissement de la croissance...

Quoique schématique, ce modèle rend compte d'une transformation durable (voire irréversible) du couvert végétal. Les mécanismes qui président à la résilience sont ralentis ou défaillants. Le couvert végétal supprimé par le glissement est remplacé par un autre couvert végétal dont l'activité métabolique n'est pas physiologiquement équivalente. Le retour du couvert initial est subordonné à la restauration du sol et des cycles biogéochimiques mais cette restauration est lente puisque les mécanismes physico-chimiques et biologiques qui en déterminent l'efficacité sont eux-mêmes ralentis. Olander et al. (1998) à propos de formations montagnardes portoricaines, équivalentes à celles qu'on trouve en Guadeloupe sur les pentes volcaniques, mesurent qu'en 35 années de succession, 2% de la biomasse ligneuse ont été restaurés. Le couvert végétal étant dominé par des fougères et des graminées, on peut imaginer que le retour de la forêt initiale demandera plusieurs siècles, deux ou trois selon les auteurs, ... ou qu'il ne se réalisera pas.

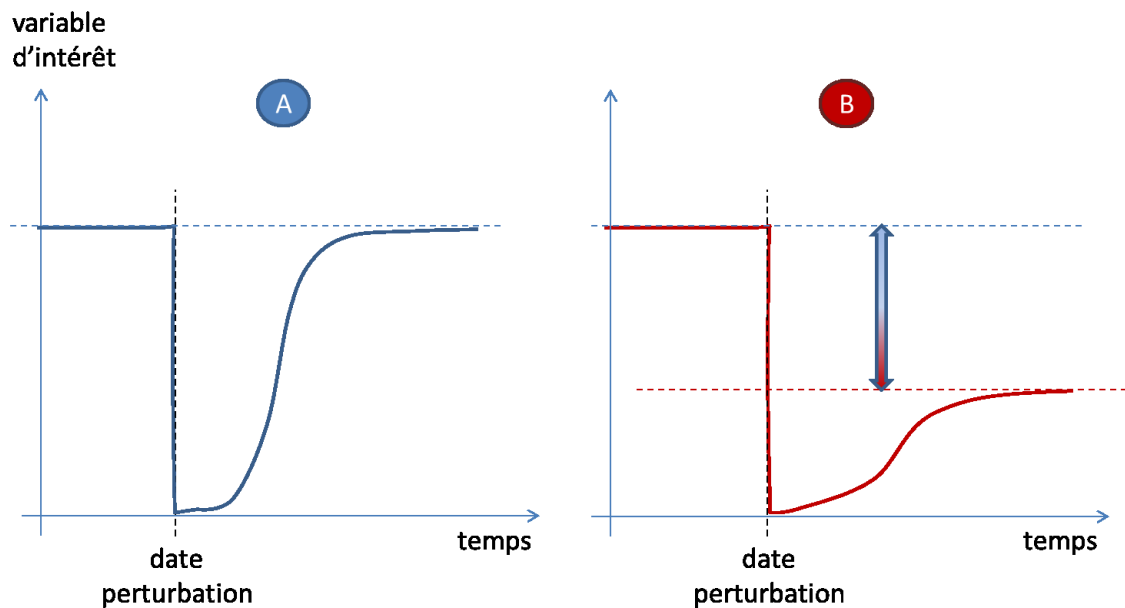
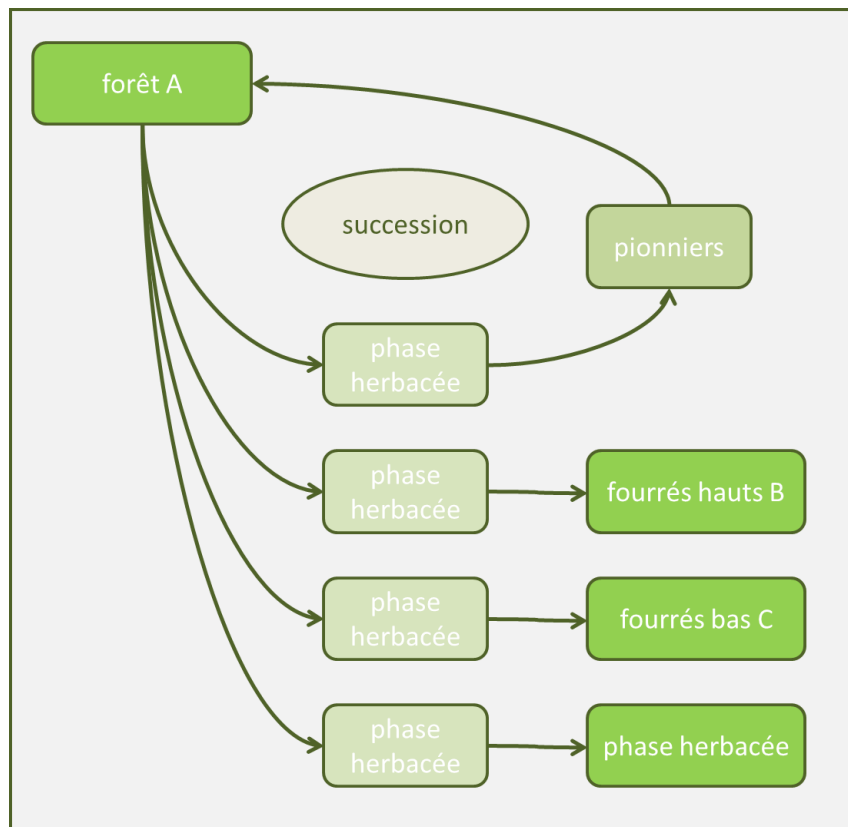


Figure 24 : Dans les situations instables (forte pente, fortes précipitations...), la perturbation (glissement de terrain...) peut conduire à une modification durable du couvert. La variable d'intérêt peut correspondre à la biomasse, la densité, la hauteur du couvert végétal *etc.* (A) Impact d'une perturbation dans un système résilient, (B) impact d'une perturbation sur un système non résilient.

Dans certaines situations sensibles que nous devons identifier dans ce travail, la résilience n'étant plus assurée, le couvert végétal perturbé subit des transformations structurales « régressives ». Il est en effet l'objet d'une dynamique orientée selon laquelle les peuplements de substitution sont moins développés que les peuplements initiaux : certains paramètres tels que la biomasse ou la hauteur de canopée, se trouvent définitivement réduits. La forêt aura cédé la place à des fourrés et la dynamique inverse, permettant de passer des fourrés au faciès forestier, est extrêmement lente.



**Figure 25 : schéma des dynamiques susceptibles d'intervenir dans les forêts sensibles. Dans certaines situations critiques, on peut s'attendre à observer une dynamique régressive, aboutissant à une substitution de fourrés à la forêt.**

Nous ne sommes pas en mesure ici de dater les glissements de terrain. Le caractère géochimique du substrat induré, la façon dont il réagit aux tensions mécaniques qui déterminent la catastrophe, la topographie locale... tous ces facteurs déterminent la forme du glissement et en grande partie, la durée nécessaire à sa cicatrisation. Dans certains cas favorables, l'installation des arbres requiert trois ou quatre années, les espèces pionnières poussant alors assez rapidement (plusieurs mètres par années au maximum pour un *Cecropia*). Dans d'autres situations, la colonisation herbacée recouvre le substrat minéral mais l'absence d'arbres perdure plus d'un demi-siècle (Walker et al. 2013).

## **b) Observations**

Plusieurs types de glissements coexistent dans l'aire étudiée. Certains glissements sont des coulées étroites qui parfois restent sous couvert forestier. Les dégâts en sous-bois sont très graves mais les arbres de la canopée sont rarement impactés. Des exemples de ces événements, intervenus en 1995, peuvent être observés le long de la route de la Traversée, sur les versants des Mamelles. D'autres désordres plus classiques, plus vastes, emportent la végétation sur de plus grandes largeurs (décamétriques essentiellement). On doit distinguer (1) la tête du glissement, où le décollement d'une lentille de terrain laisse une excavation en forme de cuiller ; (2) le chenal souvent plus étroit que l'excavation amont et (3) le dépôt aval où les matériaux extraits, sol, substrat, roches, mêlés aux débris végétaux, s'accumulent en bourrelet.

On ne peut pas aisément identifier des coulées étroites du premier type, sur les photos aériennes. L'analyse qui suit est consacrée aux désordres suffisamment vastes pour qu'on puisse les identifier sans ambiguïté et les localiser sur les photographies aériennes.

Dix glissements ont été repérés dans le secteur de la Soufrière et sept dans le secteur de la Traversée. Ces échantillons n'évaluent pas convenablement le nombre de glissements et de cicatrices de glissements, qui affectent ces secteurs aujourd'hui mais ils permettent de caractériser les lieux où se sont déroulés les plus gros glissements de terrain et les lieux les plus instables.

## 2. La topographie et les glissements de terrain

Comme on peut s'y attendre, les glissements de terrain répondent à des sollicitations topographiques.

### a) Secteur Soufrière

Dans le secteur de la Soufrière, les glissements interviennent sur des pentes moyennes (14 à 25° catégorie 3) ou plus souvent (7 cas sur 10) sur des pentes fortes (26 à 44°, catégorie 4). L'absence de glissement sur des pentes supérieures à 45° peut signifier que les terrains les plus pentus sont stabilisés par des glissements antérieurs mais l'échantillon n'est pas suffisant pour valider l'hypothèse. Dans les Alpes, les glissements de terrain n'interviennent plus au-delà de 40° ; mais dans ces pays, la cohésion des roches substrat participe à la stabilité. Les sols partis laissent la place à des falaises plus stables. Dans les secteurs analysés ici, l'argilisation des substrats rocheux peut souvent empêcher ce phénomène. Les falaises sont rares et les glissements de terrains fréquents.

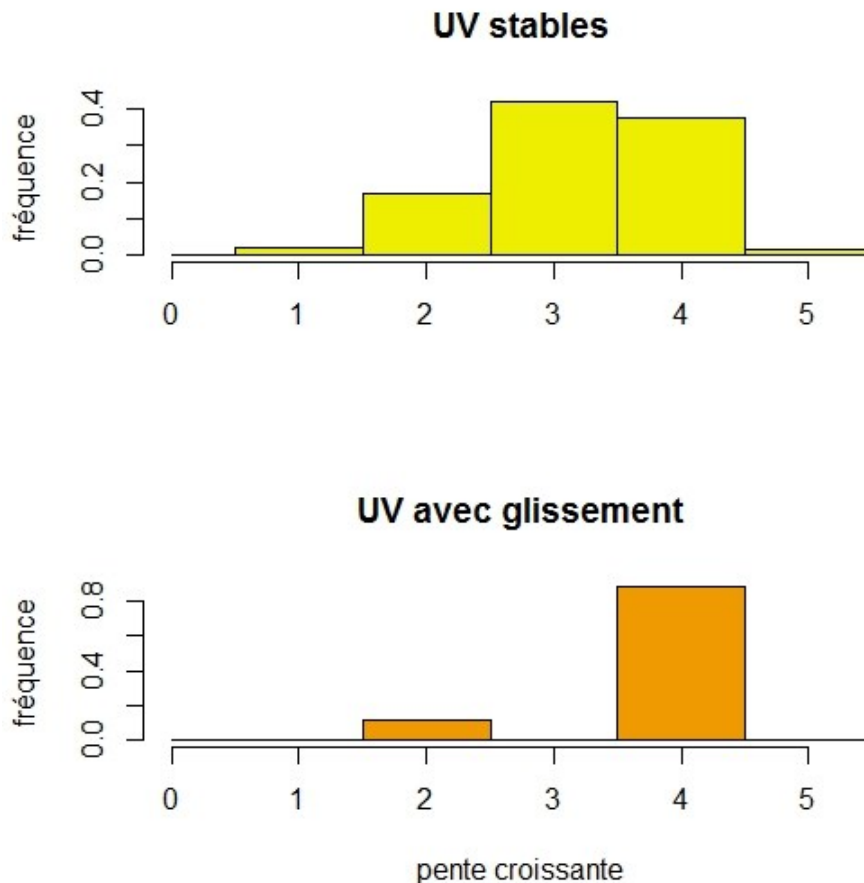


Figure 26 : Pente et glissement de terrain dans le secteur de la Soufrière. La variable « pente » est traduite en 5 catégories. Les unités vectorielles sont des polygones topographiquement homogènes. La catégorie 2 correspond à des pentes comprises entre 5° et 13° ; la catégorie 4 à des pentes comprises entre 26° et 44° ; la catégorie 5 regroupe les

pentés supérieures ou égales à 45°. Les glissements de terrain importants se déclenchent rarement lorsque les pentés sont inférieures à 25°. Ils semblent affecter rarement les UV de pente supérieure à 45° (58 UV sur 3404, soit 1.70%).

Les glissements de terrain interviennent aux altitudes élevées (ici, supérieures à 880m). Les pluies peuvent expliquer cette observation mais les fortes pentés se rencontrent préférentiellement en altitude de sorte que l'effet de l'altitude peut ne relever que d'une "interaction" pente x altitude.

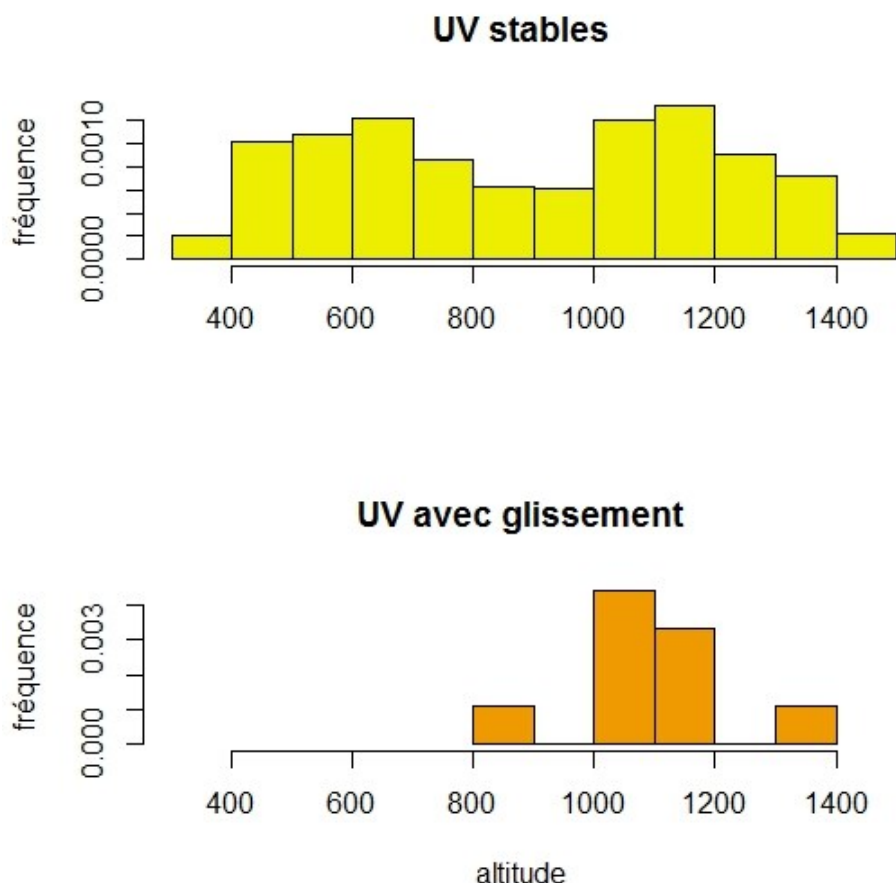


Figure 27 : Altitude et glissements de terrain constatés dans le secteur de la Soufrière.

### b) Secteur de la Traversée

Les glissements interviennent sur des pentés moyennes (14 à 25° catégorie 3) ou plus souvent (7 cas sur 10) sur des pentés fortes (26 à 44°, catégorie 4). L'absence de glissement sur des pentés supérieures à 45° peut signifier que les terrains les plus pentés sont stabilisés par des glissements antérieurs : après un ou plusieurs glissements, il n'y a plus de matériaux susceptibles d'alimenter un glissement de terrain (Figure 28).

Tous les glissements de terrain pris en compte, sont situés au-dessus de 550m d'altitude (Figure 29). Ils sont donc plus bas que dans le secteur Soufrière où la limite inférieure des glissements constatés était 750m.

Ce dernier phénomène pose la question des facteurs altitudinaux qui conditionnent les glissements de terrain. Il ne s'agit ni de la température, ni des précipitations dont les gradients altitudinaux sont en principe identiques dans les deux secteurs. On peut évoquer la pente mais on

doit toutefois remarquer que cette question rappelle le thème plus général du *Massenerhebung* selon lequel les petites montagnes représentent des images télescopées des plus grandes... (Grubb 1971).

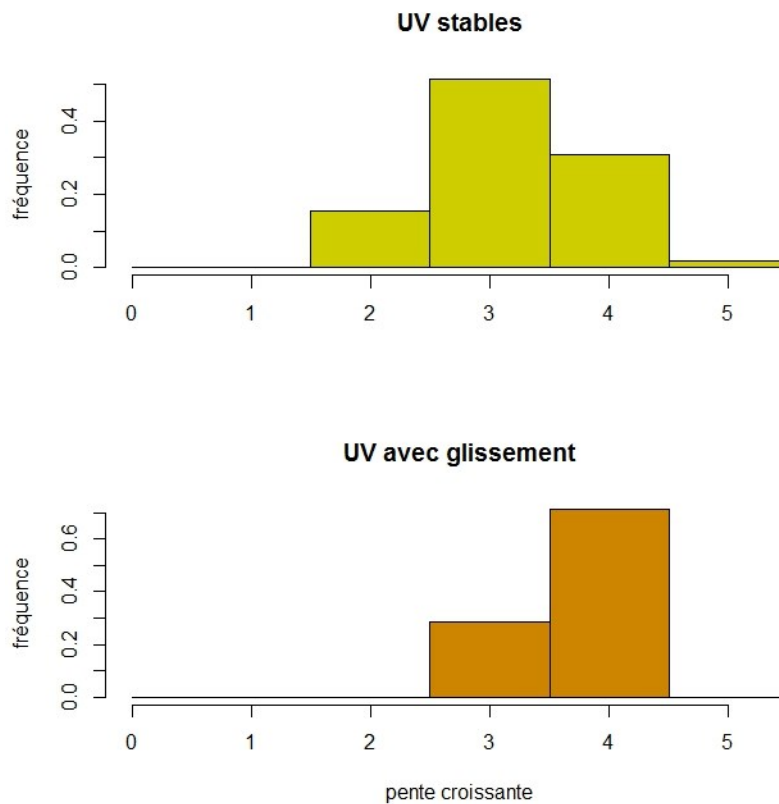
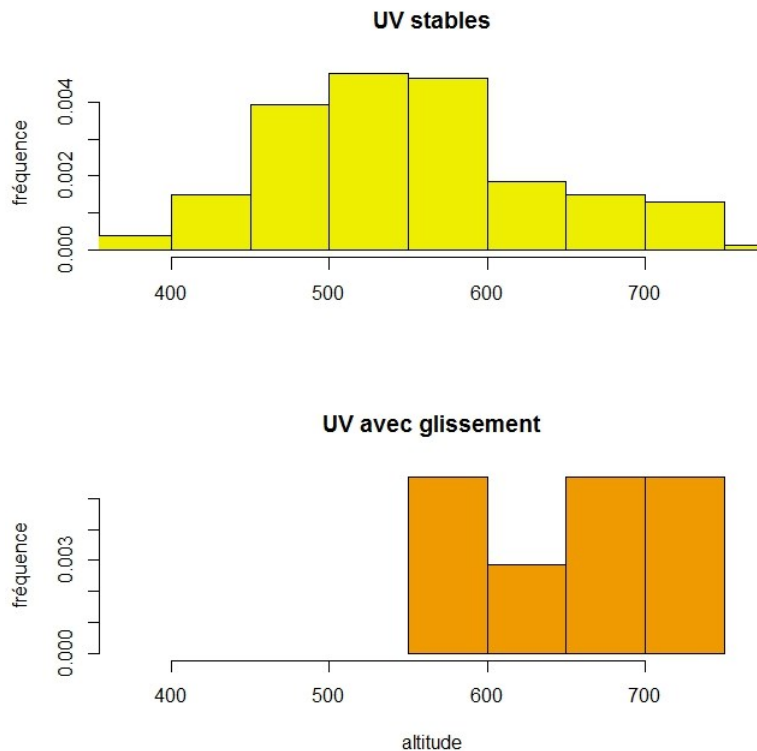


Figure 28 : Pente et glissements de terrain dans le secteur de la Traversée. La variable « pente » est traduite en 5 catégories. Les unités vectorielles sont des polygones topographiquement homogènes. La catégorie 3 correspond à des pentes comprises entre 14° et 25° ; la catégorie 4 à des pentes comprises entre 26° et 44° ; la catégorie 5 regroupe les pentes supérieures ou égales à 45°. Comme précédemment, les plus fortes pentes semblent peu propices aux gros glissements de terrain.





**Figure 29 : Altitude et glissements de terrain dans le secteur de la Traversée. Les glissements observés se produisent aux plus hautes altitudes.**

### c) Conclusion

A l'issue de cette analyse des relations entre glissements de terrain et descripteurs topographiques, nous mettons en évidence des seuils très proches de ceux qu'avaient identifiés Larsen et Torres-Sanchez (1998) dans l'île de Porto-Rico. Ces auteurs ont toutefois pu analyser la relation entre les glissements et l'orientation. Nous n'avons pas réalisé une telle analyse (II.F.4. Hauteur de la canopée et exposition p. 36) mais nous avons pu chercher si la hauteur LiDAR moyenne pouvait être utilisée comme indicateur de la probabilité de glissements de terrain.

## 3. La hauteur des arbres et les glissements de terrain

### a) Analyse des observations

Dans chacune des unités vectorielles examinées, la distribution des hauteurs LiDAR est résumée par trois variables : la hauteur LiDAR moyenne (moyenne des hauteurs LiDAR mesurées), la hauteur LiDAR minimale et la hauteur LiDAR maximale. Si on compare les UV éloignées des glissements (type « s ») et les UV où s'amorce un glissement, on observe que les hauteurs LiDAR moyennes sont moindres dans les UV où s'amorce un glissement (ANOVA, P-value=0.0152). Les hauteurs LiDAR minimales sont aussi significativement inférieures là où s'amorcent les glissements (ANOVA, P-value=0.0153). La différence observée à propos des hauteurs LiDAR maximales peut ne pas être significative (ANOVA, P-value=0.0863).

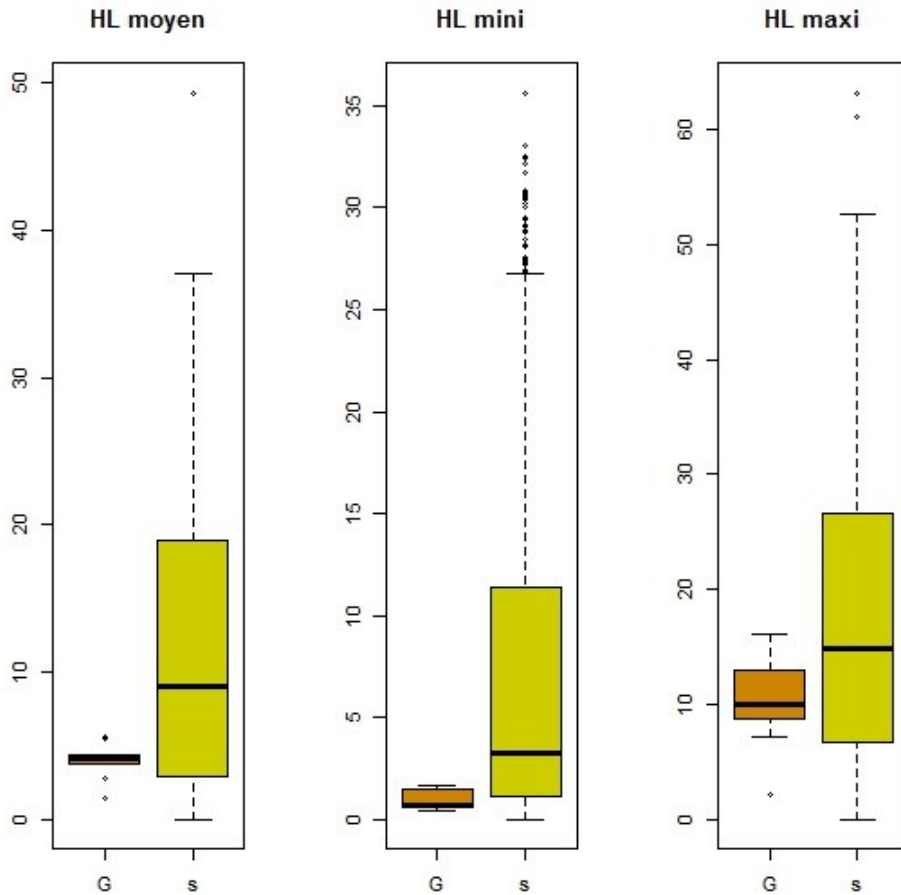


Figure 30 : Secteur de la Soufrière. Distributions des hauteurs LiDAR dans les unités vectorielles. Comparaison des UV où s’amorce un glissement de terrain (catégorie G) et dans les autres UV (catégorie s). Hauteurs LiDAR évaluées en m.

La hauteur LiDAR moyenne d’une UV où s’amorce un glissement de terrain, peut être réduite en raison du glissement lui-même, lequel a supprimé une partie plus ou moins importante du couvert végétal. Le fait que la hauteur LiDAR maximale ne soit pas significativement diminuée par la survenue d’un glissement, peut se comprendre dans la mesure où le glissement n’emporte pas la végétation sur toute l’aire de l’UV. Il reste souvent, dans l’UV, des grands arbres à proximité de la cicatrice d’ablation.

Dans le secteur de la Traversée, les différences de hauteur LiDAR des sites (UV) « G » et des sites « s » sont plus prononcées. Les analyses de variances réalisées pour les hauteurs moyennes, les hauteurs minimales et les hauteurs maximales, admettent des p-values inférieures à  $10^{-4}$ ,  $4 \cdot 10^{-3}$  et  $4 \cdot 10^{-4}$  respectivement. Dans ce cas, les précautions précédentes prises pour interpréter la relation entre le hauteur LiDAR et la possibilité de glissement, n’est plus aussi délicates que pour le secteur Soufrière.

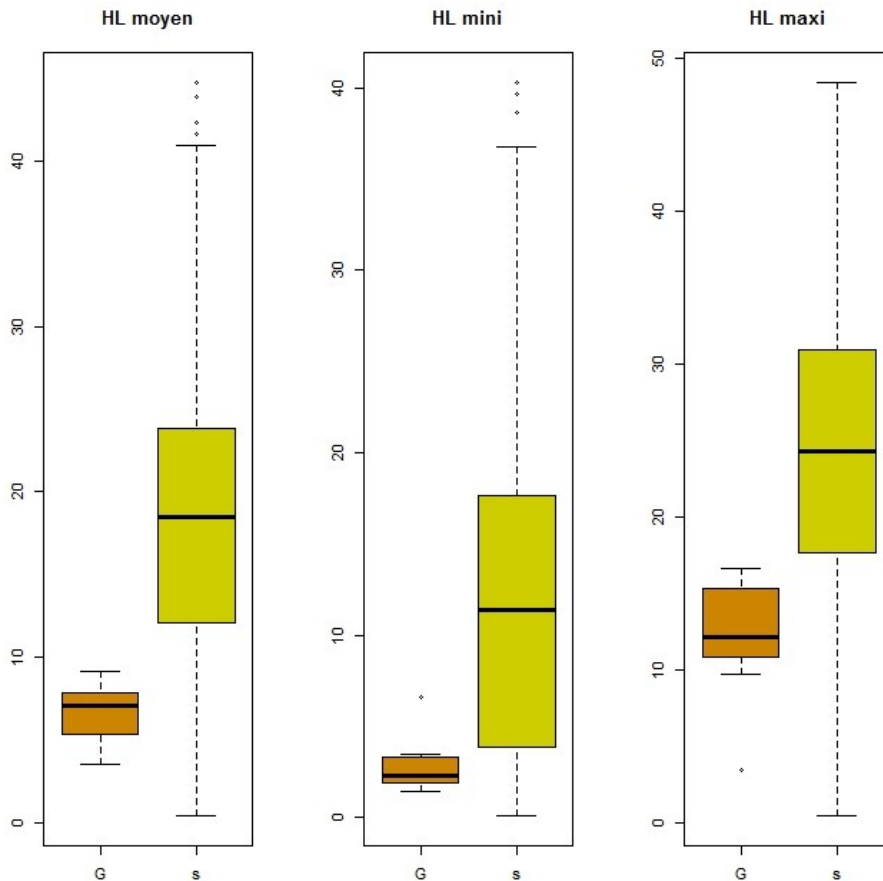


Figure 31 : Secteur de la Traversée. Distributions des hauteurs LiDAR dans les unités vectorielles. Comparaison des UV où s'amorce un glissement de terrain (catégorie G) et dans les autres UV (catégorie s). Hauteurs LiDAR évaluées en m.

### b) Sur le statut particulier de la variable « hauteur LiDAR »

La hauteur du couvert végétal est parfois le résultat logique d'un glissement de terrain ; chaque glissement emporte tout ou partie du couvert végétal et se traduit nécessairement par une modification de la hauteur LiDAR minimale et de la hauteur LiDAR moyenne. A ce titre, l'identification d'un couvert anormalement bas peut indiquer l'existence d'un glissement de terrain passé mais il peut aussi traduire des conditions défavorables à la croissance des plantes. Pour poursuivre la réflexion, il faut considérer les mécanismes qui limitent la croissance des plantes.

Si l'on exclut les défrichements réalisés par l'homme, les facteurs susceptibles de limiter la croissance des plantes sont pour l'essentiel, d'ordre climatique ou édaphique. Les deux types de facteurs (climatiques et édaphiques) sont généralement indissociables puisque les contraintes édaphiques sont souvent imputables au climat. Par exemple la plus fréquente des carences minérales, celle qu'on impute au manque d'azote, résulte en pratique de deux phénomènes. Le premier phénomène est le ralentissement des processus biogéochimiques que l'on doit à une diminution de la température et à un excès d'eau. Le second phénomène est l'exportation de

l'azote du sol par le ruissellement, ruissellement d'autant plus intense que les précipitations sont importantes. L'impact de la pente dans ce contexte, est ambivalent ; la pente accélère le ruissellement et l'exportation des minéraux solubles mais l'absence de pente conduit à l'hypoxie et bloque les cycles biogéochimiques. C'est peut-être pour cela qu'on trouve des « pseudo-tourbes » sur les crêtes stables en altitude et que ces crêtes ne portent que des fourrés bas.

Dans quelques cas rares, le métabolisme des plantes est affecté par des toxiques que libèrent les sols ou les roches (sols salés en région littorale ou acides en région volcanique...). Dans le cœur de Parc, cette situation se rencontre même à grande distance de la Soufrière. Le long de la route de la Traversée, les travaux et les glissements de terrain qui suivirent, ont remis à l'air des substrats soufrés qui par oxydation ont produit de l'acide sulfurique et tué des arbres (Yves-Marie Cabidoche, comm. pers.). Pourtant l'impact de ces toxiques n'intéresse que des aires très réduites, sauf au voisinage du volcan.

Au bilan, lorsque les végétaux ligneux ne parviennent pas à s'établir durablement et à constituer des forêts, la température trop basse, les précipitations trop fortes et la pente excessive du terrain doivent être prioritairement incriminés. Or ces facteurs sont notoirement favorables aux glissements de terrain.

Deux remarques doivent compléter ce paragraphe. Premièrement, la température en elle-même ne favorise pas les glissements de terrain mais, dans la mesure où elle affecte le métabolisme des plantes, elle réduit leur transpiration et accroît le contenu en eau des sols, ce qui conduit à augmenter leur instabilité. Deuxièmement la dimension réduite des arbres, qui très généralement fait écho à un enracinement superficiel, ne contribue guère à fixer les terrains. Le fait est avéré (Foster 2001) mais il faut ici rappeler que sur fortes pentes, ou plus encore sur les ruptures de pente, la taille réduite des arbres limite les risques de déracinement et par là, peut diminuer les amorces des glissements de terrain.

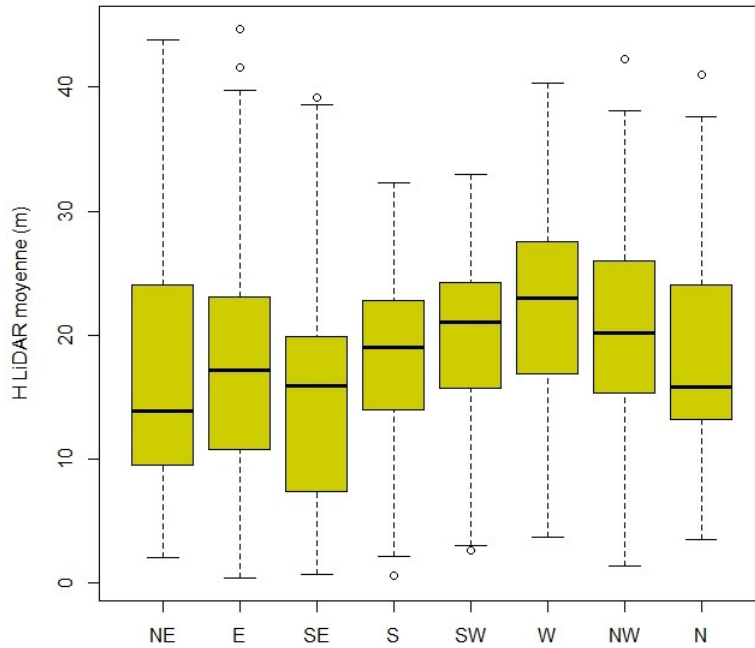
Il résulte de cette discussion que l'épaisseur du couvert, c'est-à-dire les hauteurs LiDAR fournies par le modèle numérique des hauteurs, sont des proxys de l'instabilité des sols.

Ce constat est limité aux secteurs montagnards étudiés dans le cœur de Parc. On devra toutefois préciser qu'en absence de pente (notamment sur les crêtes sommitales adoucies par l'érosion) la végétation rase n'indique pas des sites instables menacés par des glissements de terrain imminents.

#### 4. Hauteur de la canopée et exposition

L'exposition n'a pas été utilisée comme variable potentiellement explicative des glissements de terrain. L'échantillon des glissements de terrain est probablement biaisé relativement à l'exposition en raison des ombres portées qui ont préférentiellement masqué les versants occidentaux des reliefs. Nous avons donc opté pour un traitement indirect de l'effet de l'exposition. On analyse ici la relation entre l'exposition et la hauteur de canopée telle qu'elle est rendue par la variable « Hauteur LiDAR moyenne ».

La hauteur de canopée est significativement diminuée dans les secteurs Nord, Nord-Est, Sud-Est (analyse de variance,  $p < 2 \cdot 10^{-16}$ ) (Figure 32). Elle est maximale dans les secteurs Ouest (SW à NW). Cet effet d'exposition suggère une contrainte éolienne imposée par les Alizés.



**Figure 32 :** La hauteur de la canopée traduite ici par la variable « hauteur LiDAR moyenne », dépend très significativement de l'exposition. La canopée est abaissée dans les unités vectorielles soumises aux Alizés (expositions Sud-Est et voisines).

Afin de confirmer l'observation précédente, on a sélectionné les sites d'altitude, intéressant les peuplements installés sur les reliefs accentués (Mamelle de Petit-Bourg, Mamelle de Pigeon ou Morne Déboulé et Morne-à-Louis). Pour les altitudes supérieures à 600m (Figure 33), la hauteur de la canopée est sensiblement réduite sur les expositions Sud-Est à Sud-Ouest (analyse de variance,  $p < 2 \cdot 10^{-16}$ ). Au contraire les expositions Ouest à Nord portent des arbres plus grands. L'effet protecteur des reliefs est sensible et se traduit par la taille supérieure des arbres (SW, W, NW) mais il semble que la nanification des arbres qui s'étend jusqu'au secteur Sud-Ouest, ne soit pas directement imputable aux Alizés.

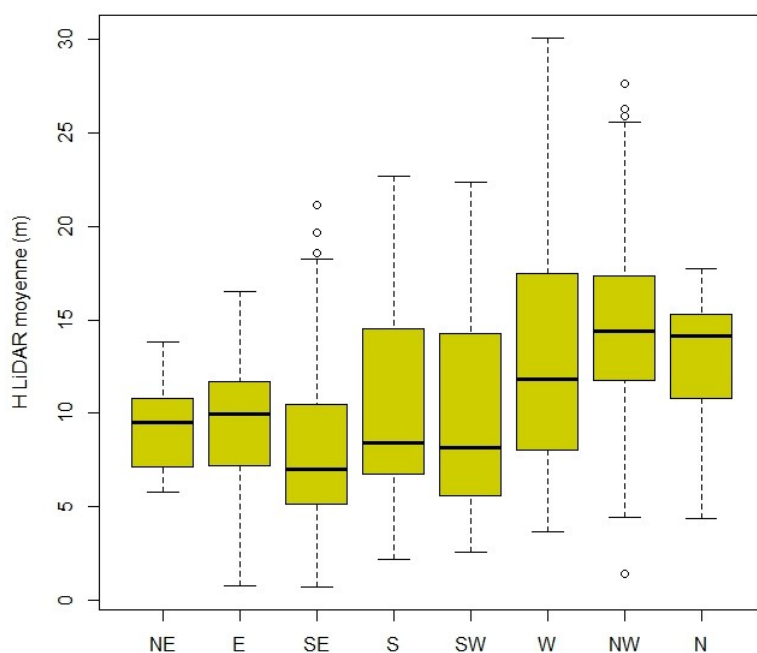


Figure 33 : Pour les altitudes supérieures à 600m, on observe une diminution générale de la hauteur de canopée (H LiDAR moyenne). La réduction des hauteurs d'arbre est ici plus prononcée dans les secteurs Sud-Est à Sud-Ouest. L'effet des Alizés semble ici modulé par d'autres facteurs.

## G. Cartes des risques de glissement

L'analyse précédente permet d'estimer les seuils de pente, d'altitude et de hauteur LiDAR moyenne, au-delà desquels les glissements de terrain interviennent.

Tableau 1 : Seuils observés pour le déclenchement des glissements de terrain.

|                           | valeur seuil | Traversée | Soufrière |
|---------------------------|--------------|-----------|-----------|
| altitude (m)              | minimale     | 550       | 750       |
| pente (°)                 | minimale     | 14        | 25        |
| hauteur LiDAR moyenne (m) | maximale     | 6.5       | 5.5       |

Les valeurs rapportées dans le tableau 1 ne relèvent que du petit nombre d'observations réalisées. Les valeurs seuils de pente et de hauteur LiDAR moyenne ne sont peut-être pas différentes. Les limites d'altitude sont au contraire, très différentes dans les deux secteurs. Seule l'altitude de la Mamelle de Pigeon (Morne Déboulé) avec 768m, dépasse le seuil observé dans le secteur de la Soufrière ; la Mamelle de Petit-Bourg n'atteint que 716m. Ceci suggère que le déclenchement des glissements de terrain ne dépend pas de l'altitude mais en contrepartie, semble lié à la pente et à la taille des arbres (rapportées par la hauteur LiDAR moyenne).

## 1. Secteur de la Soufrière

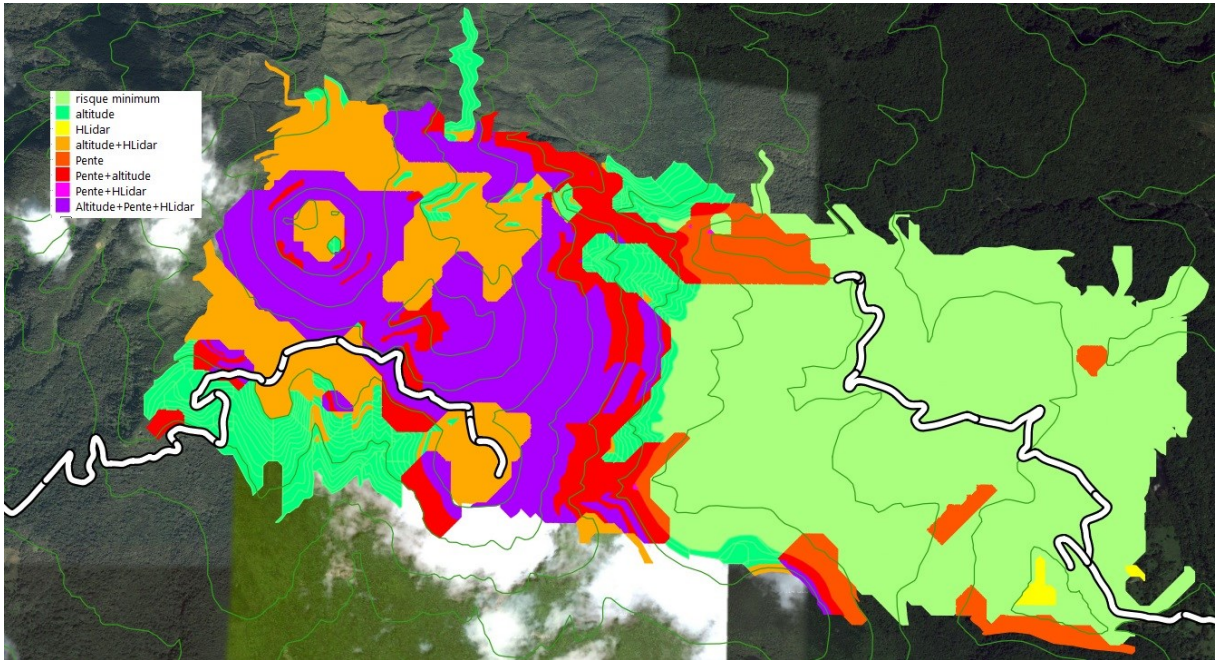
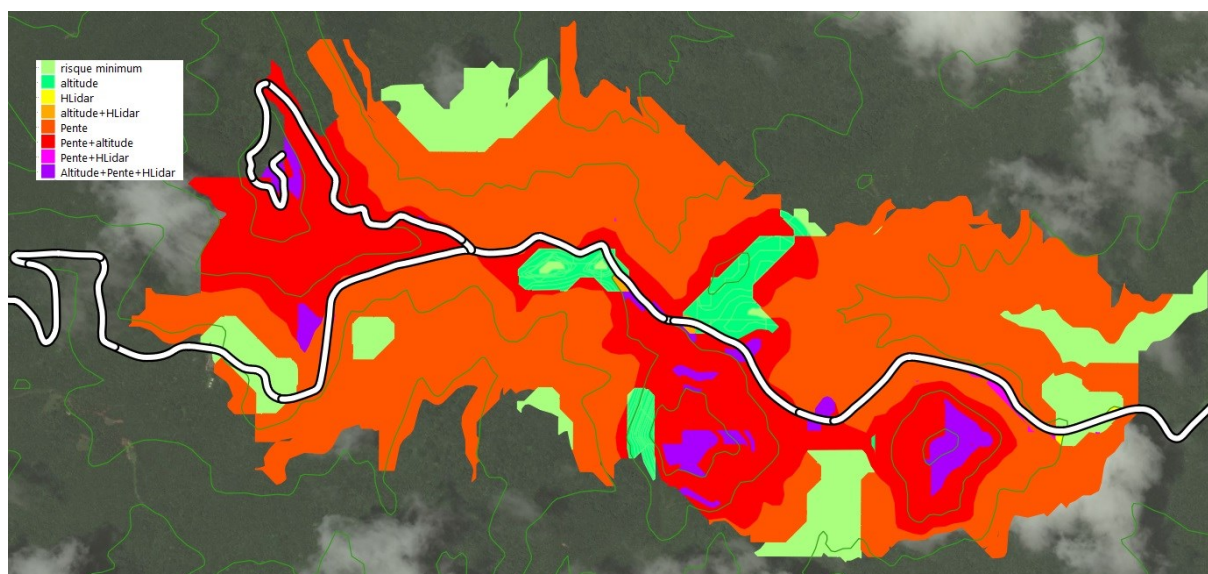


Figure 34 : Carte des risques de glissements de terrain dans le secteur de la Soufrière. Les différentes indicatrices (altitude, la pente et la hauteur LiDAR moyenne) sont utilisées pour dresser cette carte. Les seuils adoptés sont respectivement : pente > 25°, altitude > 750m, H LiDAR moyenne < 5.5m. Le risque est minimum lorsqu'aucune des variables n'atteint les valeurs critiques. En cartouche sont indiqués les facteurs qui déterminent le risque (c'est-à-dire les variables dont les valeurs dépassent le seuil). Dans nombre d'UV situées à l'ouest du secteur, deux variables dépassent les seuils critiques (couleur orange ou rouge). La couleur pourpre désigne les UV où les trois facteurs retenus dépassent simultanément les seuils. Les risques d'instabilité sont évidemment maximums.

## 2. Secteur de la Traversée





### III. Conclusions générales

Les analyses rapportées dans ce document permettent de confirmer que le modèle numérique des hauteurs, ou l'une de ces composantes (maximum, minimum ou moyenne) est une des descripteurs les plus significatifs de la structure forestière. La hauteur LiDAR moyenne est très bien corrélée à la hauteur moyenne de canopée issue des relevés de terrain. Elle est significativement corrélée à la biomasse mais la des travaux complémentaires sont nécessaires pour améliorer (si possible) la prédiction de la biomasse (Muller 2014).

A l'échelle globale de la Basse-Terre, le modèle numérique des hauteurs est un bon proxy de certains descripteurs géographiques ; il en va ainsi de l'altitude et dans une moindre mesure, de la latitude. A l'échelle locale, comme par exemple sur le secteur de la Traversée tel que défini ci-dessus, le MNH rend des services plus nombreux : la hauteur LiDAR moyenne est étroitement corrélée à l'altitude, au versant, à l'exposition et à la pente (Triolé 2014).

Il est remarquable que dans une certaine mesure, les hauteurs LiDAR moyennes permettent d'inférer des informations relatives à la composition floristique des peuplements ligneux. Deux analyses distinctes autorisent ces rapprochements entre flore et hauteur LiDAR. La première analyse consiste à observer que la forêt typique à *Richeiria* est caractérisée par une canopée inférieure à 16m de hauteur (Figure 17 p. 21). La seconde analyse permet d'améliorer très sensiblement la classification automatique des unités écologiques initialement établie sur des critères topographiques et géographiques (§ II.E. Hauteur LiDAR et unités écologiques, p. 23).

La hauteur moyenne LiDAR permet évidemment d'identifier les fourrés hauts à *Clusia mangle* et les fourrés bas (de type « savane aux Ananas » à *Guzmania plumieri* et *Pitcairnia bifrons*) qui sont des formations exceptionnelles pour leur endémisme et aussi pour leur fragilité.

Les glissements de terrain représentent peut-être la manifestation la plus incontestable de la sensibilité du patrimoine végétal. Là où les glissements de terrain se produisent trop souvent, le patrimoine est menacé par des évolutions régressives du couvert. Les analyses conduites permettent d'identifier trois paramètres favorables aux glissements de terrain. L'instabilité des substrats dépend de valeurs seuils que nous avons pu estimer. Au-delà de la mise en évidence des formations basses (fourrés hauts ou fourrés bas), la hauteur LiDAR moyenne détermine pour partie, la sensibilité des formations végétales.

## IV. Références

- Benner, J., Vitousek, P. M., & Ostertag, R. (2010). Nutrient cycling and nutrient limitation in tropical montane cloud forests. *tropical montane cloud forests*. Cambridge: Cambridge University Press. p, 90-100. In Bruijnzeel L.A., FN Scatena, LA Hamilton (ed.) *Tropical montane cloud forest: science for conservation and management*, Cambridge University Press.
- Byer, M. D., & Weaver, P. L. 1977. Early secondary succession in an elfin woodland in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Biotropica*, 35-47.
- Cabidoche Y.-M. et A. Rousteau 1997. Dégradation par les déblais naturels et routiers, des paysages végétaux montagneux en Guadeloupe : freins à la cicatrisation, voies de restauration. INRA, UAG, soutenu par le Comité EGPN (ministère de l'environnement), 33p.
- Chen, D., Li, Y., Liu, H., Xu, H., Xiao, W., Luo, T., ... & Lin, M. (2010). Biomass and carbon dynamics of a tropical mountain rain forest in China. *Science China Life Sciences*, 53(7), 798-810.
- Foster, P. 2001. The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews*, 55(1), 73-106.
- Garwood, N. C., Janos, D. P., & Brokaw, N. (1979). Earthquake-caused landslides: a major disturbance to tropical forests. *Science*, 205(4410), 997-999.
- Guariguata, M. R. (1990). Landslide disturbance and forest regeneration in the upper Luquillo Mountains of Puerto Rico. *The Journal of Ecology*, 814-832.
- Grubb, P. J. 1971. Interpretation of the 'Massenerhebung' effect on tropical mountains. *Nature*: 44-45.
- Hamilton, L.S., Juvik, J.O. & Scatena, F.N. 1993. Tropical Montane Cloud Forests. Proceeding of an international symposium, at San-Juan, Puerto-Rico 31 may-5 june 1993. East-West Center Program of Environment, UNESCO, Forest Service USDA. 264 p.
- Holwerda, F. (2005). Water and energy budgets of rain forests along an elevation gradient under maritime tropical conditions (Doctoral dissertation).
- [http://www.conservation.org/where/priority\\_areas/hotspots/north\\_central\\_america/Caribbean-Islands/Pages/default.aspx](http://www.conservation.org/where/priority_areas/hotspots/north_central_america/Caribbean-Islands/Pages/default.aspx)
- Jane, G. T., & Green, T. G. A. (1985). Patterns of stomatal conductance in six evergreen tree species from a New Zealand cloud forest. *Botanical gazette*, 413-420.
- Krashevskaya, V., Maraun, M., Ruess, L., & Scheu, S. (2010). Carbon and nutrient limitation of soil microorganisms and microbial grazers in a tropical montane rain forest. *Oikos*, 119(6), 1020-1028.

- Larsen, M. C., & Torres-Sánchez, A. J. 1998. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. *Geomorphology*, 24(4), 309-331.
- Muller L. 2014. Estimation des biomasses dans les forêts ombrophiles. Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Option « Surveillance de l'Environnement ». Université de Liège, Campus d'Arlon, 68 p.
- Myers, N. 1988. Threatened biotas: 'hotspots' in tropical forests. *Environmentalist* 8, 187–208.
- Olander, L. P., Scatena, F. N., & Silver, W. L. (1998). Impacts of disturbance initiated by road construction in a subtropical cloud forest in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 109(1), 33-49.
- Paulsch A., Piechowski D., and Müller-Hohenstein K., 2008. Forest Vegetation Structure Along an Altitudinal Gradient in Southern Ecuador. In Beck, Bendix, Erwin Beck, Jörg Bendix, Ingrid Kottke, Franz Makeschin, Reinhard Mosandl (Editors), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*. Ecological Studies, 198 : 113-122. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Portécop J. 1980. Végétation de la Guadeloupe et de ses dépendances. Atlas des DOM, 1 - La Guadeloupe. CEGET-IGN, CNRS, Paris.
- R Core Team 2012. R: A language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Rousteau A. 1991 - A propos des conséquences du cyclone Hugo sur la dynamique des forêts antillaises. In «Les ouragans de l'atlantique, comptes rendus du séminaire organisé par l'université des Antilles et de la Guyane et météo France» (11 et 12 mars 1991 à Pointe à Pitre), p. 73-76, 2 fig., 5 réf.
- Rousteau, A., 1996, Carte écologique de la Guadeloupe. 3 feuilles au 1/75.000ème et notice (36 p.). Conseil Général de la Guadeloupe, Office National des Forêts et Parc National de la Guadeloupe.
- Still, C. J., Foster, P. N., & Schneider, S. H. (1999). Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests. *Nature*, 398(6728), 608-610.
- Thompson I. 2011. Biodiversité, seuils de tolérance des écosystèmes, résilience et dégradation des forêts. *Unasylva* 238, 62 :25-30.
- Triolé S. 2014, Évaluation de la sensibilité des forêts dans le Parc National en Guadeloupe par recherche d'une corrélation entre les peuplements forestiers et les caractéristiques topographiques du milieu. Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Option « Surveillance de l'Environnement ». Université de Liège, Campus d'Arlon, 76 p.
- van Oort F., Jongmans T. G., Jaunet A.-M., van Doesburg J., Feijtel T., 1990.- Andesite weathering and halloysite newformation in a ferrallitic soil environment in Guadeloupe. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t.310, série II, 425-431.

Walker, L. R., Shiels, A. B., Bellingham, P. J., Sparrow, A. D., Fetcher, N., Landau, F. H., & Lodge, D. J. 2013. Changes in abiotic influences on seed plants and ferns during 18 years of primary succession on Puerto Rican landslides. *Journal of Ecology*, 101(3), 650-661.

WinBUGS 1996-2007. Version 1.4.3, 2007. Imperial College and MRC, UK

Wolf, K., Veldkamp, E., Homeier, J., & Martinson, G. O. (2011). Nitrogen availability links forest productivity, soil nitrous oxide and nitric oxide fluxes of a tropical montane forest in southern Ecuador. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(4).