



FTH 2003

Biomécanique d'un jeune peuplement dans une trouée de chablis

Sous la responsabilité de : Meriem Fournier, Gaëlle Jaouen
et Julien Ruelle

Guillaume Bruneteau, Jean-Guérolé Cornet, Stéphanie Debeausse, Laëtitia
Etienne, Youen Guillo, Julien Lamoulie, Xavier Piolin, , Florian Steierer

Résumé

La croissance des arbres est liée à la recherche de la lumière. La fermeture rapide des couverts forestiers tropicaux impose prioritairement la mise en place d'un port vertical, au risque de s'écrouler sous l'effet de la gravité. Dans le cas des arbres tropicaux feuillus, le bois de tension situé à la périphérie du tronc joue le rôle de stabilisateur.

A l'aide d'un protocole optimisé à la suite de l'étude FTH 2002, notre analyse menée sur un peuplement (103 arbres) très perturbé, avec une répartition homogène des diamètres, a permis d'évaluer les stratégies de redressement des jeunes arbres.

Le degré d'inclinaison des arbres n'est pas corrélé à l'intensité des forces de tensions mesurées à la périphérie du tronc. Cependant les tensions les plus fortes sont dans la plupart des cas, enregistrées sur la face supérieure des troncs inclinés. Elles compensent la force gravitationnelle, assurant l'autoportance de quasiment tous les arbres. En estimant le risque de flambement des arbres, on observe que seulement 6% d'entre eux dépassent leur hauteur critique. Les comparaisons inter-spécifiques ne mettent en évidence aucune stratégie particulière de croissance.

Mots-clés :

Biomécanique, Forêt tropicale humide, Bois de tension, Facteur de risque, Contraintes de croissance

Abstract

The growth of trees is bound to the search of light. The quick closure of the tropical canopy urges trees to grow as fast as possible during the first stage, taking the risk to break down. In the case of tropical hardwoods, tension wood located at the outside of trunks acts as stabilizer.

Using an improved set of measures drawn from the FTH session in 2002, the research led on a previously disturbed stand with a homogenous spread of diameters helped to understand the re-erecting strategies of young trees.

The bending of trees is not correlated to the tensions measured at the outside of the trunks. However, the highest tensions are most of the time observed on the up side of bent trunks. They balance the effect of gravity, avoiding the collapse of trees. By estimating the buckling risk, it appears that only 6% of the sampled trees exceed their critical height. No evidence of special growing strategy can be drawn from the comparisons between species.

Keywords :

Biomechanics, Tropical rain forest, Tension wood, Risk factor, Growth stresses.

Tous les étudiants souhaitent remercier sincèrement Meriem Fournier, Gaëlle Jaouen et Julien Ruelle pour leur sympathie, leur enthousiasme et surtout leur patience. Nous espérons qu'ils ont pris autant de plaisir que nous à réaliser ce travail.

Qu'aurait été cette étude sans la présence de Fanchon Prévost et George Elfort, sans qui il nous aurait été tout simplement impossible de pouvoir mettre un nom sur tous les malheureux arbres que nous avons été amenés à étudier. Nous connaissions la génétique au canon, nous avons découvert la botanique au fusil.

Merci également à Louise Bolore de l'ENGREF Kourou pour sa bienveillance, l'attrait de la forêt nous ayant fait oublier qu'il fallait aussi penser à la logistique.

Enfin, merci au groupe « archi » avec qui nous avons pu partager, certes, des baisses de moral mais surtout d'excellentes soirées au camp.

Table des illustrations

Tableaux

Tableau 1 : identification des arbres de diamètre supérieur à 20 cm à 1m30.

Tableau 2 : variables utilisées

Figures

Figure 1 : carte de répartition des arbres étudiés

Figure 2 : méthode Wap's – capteur HBM [Fournier & al. 1994]

Figure 3 : plan de découpe des deux rainures et phénomène de relâchement des contraintes

Figure 4 : nombre d'individus par espèce sur la placette

Figure 5 : répartition spatiale des 5 espèces les plus représentées.

Figure 6 : comparaison des classes de diamètre entre les placettes de 2002 et de 2003

Figure 7 : relation entre la hauteur des arbres et leur DBH

Figure 8 : répartition des inclinaisons entre la base et 1m50

Figure 9 : relation entre la hauteur et le diamètre des individus de la placette

Figure 10 : facteur de risque fonction de la hauteur totale

Figure 11 : facteur de risque fonction du diamètre à 1m30 et autoportance

Figure 12 : facteur de risque fonction du diamètre à 1m30 et comportement des espèces

Figure 13 : hauteur des arbres non-autoportants

Figure 14 : Histogramme des tensions sur les faces supérieure et inférieure de chaque arbre à 50 cm. Courbe de l'inclinaison.

Figure 15 : Histogramme des tensions sur les faces supérieure et inférieure de chaque arbre à 50 cm. Courbe de l'inclinaison.

Figure 16 : répartition des arbres suivant l'orientation des tensions les plus fortes à 50 cm.

Figure 17 : répartition des arbres suivant l'orientation des tensions les plus fortes à la base.

Figure 18 : comparaison des forces de redressement à celles dues à la gravité en comparant les principales espèces

Figure 19 : comparaison de la courbure du tronc due aux forces de redressement à celle due à la gravité, en tenant compte de l'excentrement de la moelle.

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	6
II.	MATERIEL ET METHODES.....	7
II.1.	SITUATION GEOGRAPHIQUE	7
II.2.	INVENTAIRE DES ARBRES.....	7
II.3.	MESURES DES DEFORMATIONS DE MATURATION	8
II.4.	DESCRIPTION GEOMETRIQUE ET REPARTITION DES MASSES	11
II.5.	VARIABLES UTILISEES	11
III.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	13
III.1.	DESCRIPTION DU PEUPLEMENT	13
III.1.1.	<i>Identification des espèces.....</i>	<i>13</i>
III.1.2.	<i>Diamètre et hauteur</i>	<i>14</i>
III.1.3.	<i>Port des arbres.....</i>	<i>16</i>
III.2.	EVALUATION DES PRISES DE RISQUE.....	17
III.2.1.	<i>Effet de la gravité</i>	<i>17</i>
III.2.2.	<i>Mesures de DRLM en fonction de l'inclinaison.....</i>	<i>20</i>
III.2.3.	<i>Orientation des tensions par rapport à l'inclinaison.....</i>	<i>21</i>
III.2.4.	<i>Comparaison des forces de redressement et de la gravité.....</i>	<i>22</i>
IV.	CONCLUSION.....	26

I. INTRODUCTION

Plusieurs facteurs gouvernent la croissance d'un jeune arbre, avec en premier lieu, la compétition pour l'accès à la lumière. Sous le couvert des grands arbres de la forêt tropicale humide, peu d'énergie lumineuse est disponible pour la régénération.

Pour de nombreuses espèces, le chablis est une opportunité de développement. Il permet aux jeunes arbres de disposer de la lumière nécessaire à leur croissance verticale. Pourtant, plus l'arbre prend de la hauteur, plus l'effet de la gravité est important. Pour ne pas s'affaisser sous son propre poids, un arbre doit mettre en place des structures capables de maintenir son port vertical. Il existe deux stratégies opposées. Soit l'arbre croît lentement en produisant beaucoup de bois, soit il se développe rapidement en hauteur pour chercher la lumière. Dans le premier cas, sa forme conique lui confère une bonne stabilité mais est très coûteuse en énergie ; dans le second cas, l'arbre domine ses voisins, au risque de flamber et de se briser sous son propre poids.

La stratégie adoptée par les espèces est toujours un compromis entre ces deux extrêmes. Dans le cas des arbres pionniers se développant après un chablis, la stratégie est généralement de privilégier la croissance en hauteur pour atteindre la canopée.

La biomécanique est la discipline qui s'attache à l'analyse de l'effet des sollicitations mécaniques sur le port et la croissance. Elle regroupe trois domaines d'étude : les structures de soutien des arbres dans un peuplement, les tissus intervenant dans le soutien du port érigé et les forces mises en jeu dans la stabilité de ces structures.

L'objet de l'étude sera de mettre en œuvre un protocole d'évaluation des stratégies de croissance des jeunes arbres. Elle prendra en compte quelques indicateurs sélectionnés à partir de l'étude FTH 2002 et permettra d'identifier les arbres en situation de risque.

De plus, cette étude se place dans le cadre d'un peuplement perturbé, par opposition au peuplement stable de l'étude de 2002, de façon à pouvoir comparer les résultats.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Situation géographique

Notre zone d'étude se situe en forêt tropicale humide sur la commune de Sinnamary à environ soixante kilomètres au Nord Ouest de Kourou (Guyane Française). L'accès se fait par la D21 dite piste de Saint Elie.

La placette retenue se situe à environ 300 mètres des carbets de l'IRD (53°0'W, 5°20'N). Elle occupe une position sommitale avec une pente assez faible où prédominent les sols bien drainés (structure micro poreuse jusqu'à 1,20 m de profondeur, d'où un drainage vertical libre).

Cette placette se situe au sein d'une parcelle qui avait fait l'objet d'un abattis en 1979 en vue de l'étude de la reconquête de la forêt sur un terrain défriché (Prévost, comm. pers.).

Afin de pouvoir travailler sur un échantillon représentatif de 100 jeunes individus en phase critique de croissance (diamètre à 1m30 compris entre 2,5 et 5 cm), nous avons été amenés à travailler sur une surface circulaire d'environ 1200 mètres carrés. Chaque individu a été numéroté et cartographié en coordonnées polaires à partir d'un point central, par rapport au Nord magnétique. La placette a ainsi été découpée en quatre quarts de cercle de même surface. Au final, 103 individus ont été inventoriés (cf. ANNEXE 1). Toute l'analyse qui suit repose donc sur un échantillon de 103 arbres de diamètres compris entre 2,5 et 5 cm.

II.2. Inventaire des arbres

Afin d'évaluer l'influence d'arbres de plus grande taille sur les 103 individus étudiés, en particulier en ce qui concerne la compétition pour la lumière et la répartition spatiale des espèces, nous avons également cartographié la position de tous les arbres de plus de 20 cm de diamètre situés au sein de notre placette d'étude.

22 arbres ont été répertoriés et sont présentés dans le tableau 1.

Gros Arbre n°	Famille	Genre	Espèce	Diamètre à 1m30 en cm
1	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>Alba</i>	47,4
2	MELASTOMATACEAE	<i>Miconia</i>	<i>mirabilis</i>	20,7
3	MELASTOMATACEAE	<i>Miconia</i>	<i>mirabilis</i>	21,9
4	ANACARDIACEAE	<i>Tapirira</i>	<i>guyanensis</i>	36,3
5	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>thibaudiana</i>	21,3
6	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>thibaudiana</i>	29
7	ANACARDIACEAE	<i>Tapirira</i>	<i>guyanensis</i>	27,7
8	CHRYSOBALANACEAE	<i>Licania</i>	<i>densiflora</i>	23,2
9	?	?	?	37,2
10	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>thibaudiana</i>	27,1
11	ARECACEAE	<i>Jessenia</i>	<i>Bataua</i>	21

12	ARECACEAE	<i>Jessenia</i>	<i>Bataua</i>	23,2
13	?	?	?	23,6
14	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>thibaudiana</i>	26,7
15	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>pezizifera</i>	39,5
16	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>sp.</i>	28,3
17	CECROPIACEAE	<i>Cecropia</i>	<i>sciadophylla</i>	37,6
18	CELASTRACEAE	<i>Goupia</i>	<i>Glabra</i>	24,2
19	ANACARDIACEAE	<i>Tapirira</i>	<i>guianensis</i>	38,5
20	MELASTOMATACEAE	<i>Miconia</i>	<i>mirabilis</i>	20,7
21	MIMOSACEAE	<i>Inga</i>	<i>Alba</i>	46,5
22	CECROPIACEAE	<i>Cecropia</i>	<i>sciadophylla</i>	26,4

Tableau 1 : identification des arbres de diamètre supérieur à 20 cm à 1m30.

La répartition spatiale de tous les arbres mesurés au sein de la placette ne montre pas de structuration spatiale évidente : aucun gradient de diamètre n'est observable du centre vers la périphérie (figure 1). Une analyse ultérieure permettra peut-être d'affiner cette observation.

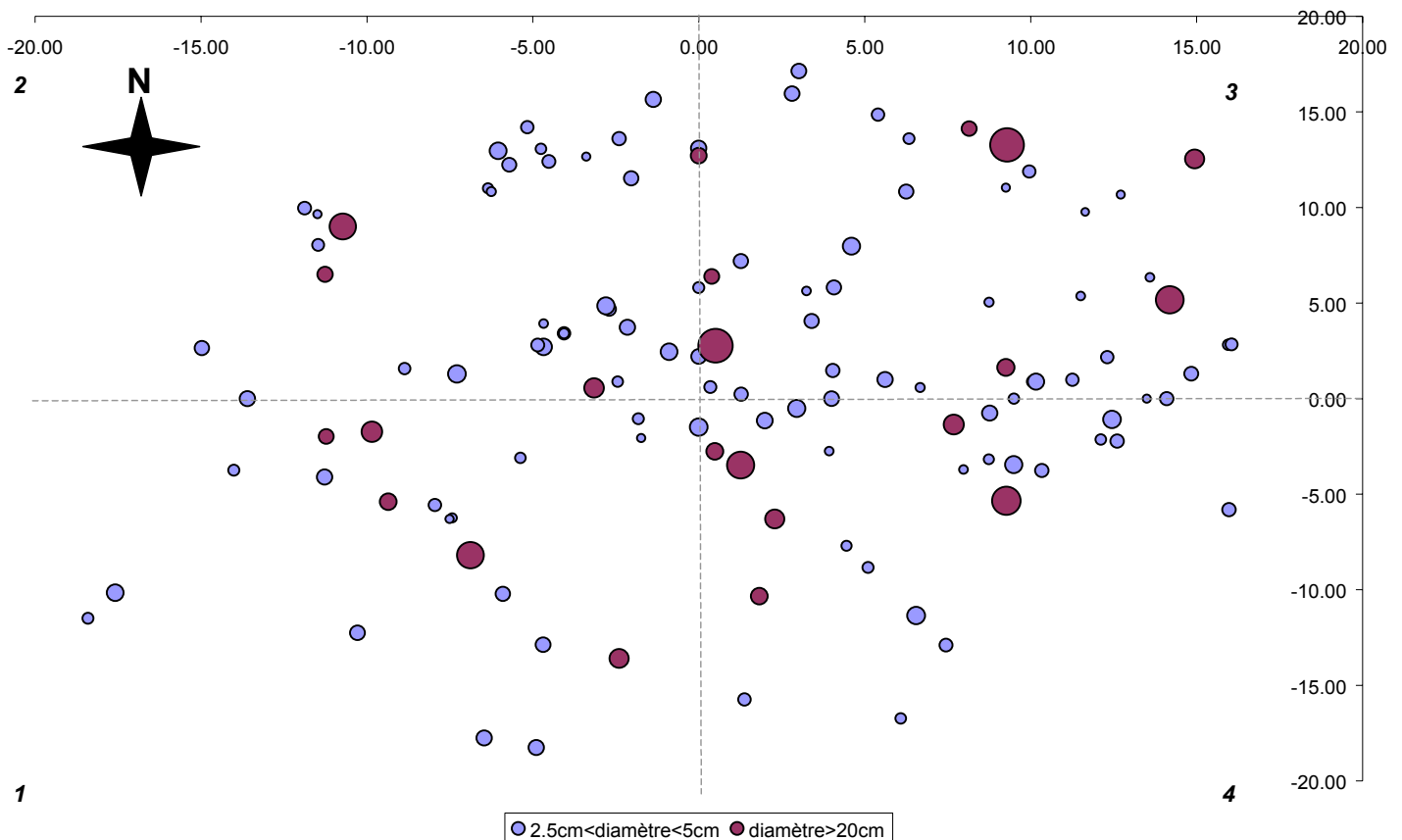


Figure 1 : carte de répartition des arbres étudiés

Note : les diamètres des cercles sont proportionnels entre eux par catégorie d'arbres.

II.3. Mesures des déformations de maturation

Afin d'estimer la rigidité de l'arbre, nous avons travaillé avec la méthode Wap's – capteur HBM [Fournier & al. 1994]. Le capteur utilisé est un extensomètre à jauges (montées en pont complet sur le palpeur) utilisé en milieu industriel (HBM ; type DD1). La course globale du

capteur est de plus ou moins 2,5 mm et sa précision est de $2/5^{\text{ème}}$ de microns. Pour l'étude, le capteur est équipé de deux pointes de compas que l'on enfonce dans le bois (après écorçage), parallèlement au fil du bois sur une profondeur de 2 à 3 mm. Il est relié à une centrale d'acquisition de terrain (système « tropicalisé » ALCO de CAPTELS) : pont mesure et compensateur. La précision de la mesure (tenant compte de la précision de l'appareil et des conditions expérimentales) est estimée entre 0,5 et 1 micron. Les deux rainures, perpendiculaires au fil du bois, à 5 mm de part et d'autre des deux pointes du capteur, permettent de libérer une grande part de la déformation longitudinale [Fournier & al. 1994].

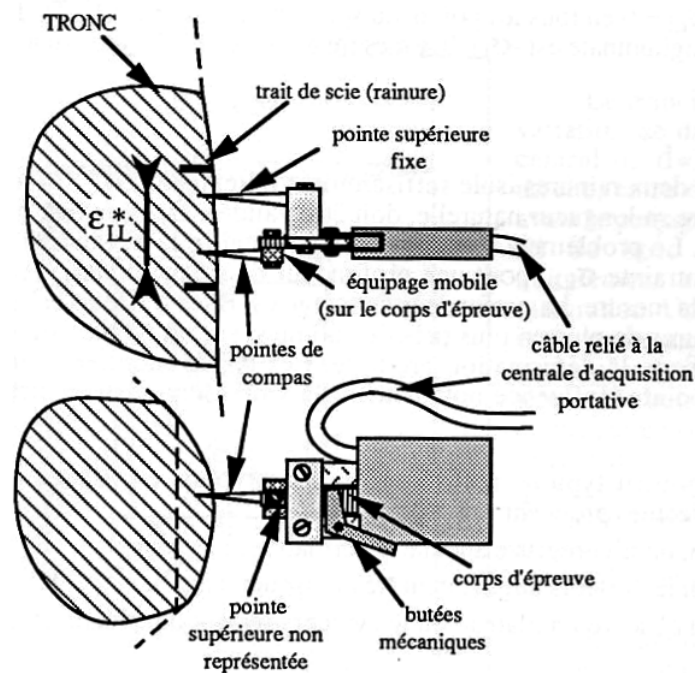


Figure 2 : méthode Wap's – capteur HBM [Fournier & al. 1994]

Cette méthode a été appliquée à huit reprises à tous les arbres de diamètre compris entre 2,5 et 5 cm répertoriés dans notre placette d'étude.

Pour chaque arbre, les mesures ont été réalisées à 50 cm de hauteur puis à la base, et ce de la manière suivante :

1. Relevé de l'inclinaison maximale et marquage au feutre de la face supérieure
2. Relevé des diamètres, dans le sens de l'inclinaison maximale et décalé de 90°
3. Ecorçage des futures zones d'implantation des capteurs
4. Mesure de rigidité à 50 cm selon l'axe d'inclinaison maximale
5. Mesure de rigidité à 50 cm selon la perpendiculaire à l'axe d'inclinaison maximale
6. Mesure de rigidité à la base selon l'axe d'inclinaison maximale
7. Mesure de rigidité à la base selon la perpendiculaire à l'axe d'inclinaison maximale

Pour les étapes 4 à 7, la mesure de rigidité a été réalisée de part et d'autres du tronc.

Dans le détail, chaque mesure de rigidité s'effectue ainsi :

- positionnement du capteur avec butée de protection abaissée, relevée ensuite afin d'effectuer une mise à zéro sur la base de mesure,
- relevé de la valeur initiale affichée par la centrale d'acquisition après positionnement (sans sciage) de la lame de scie,
- sciage d'une première rainure (profondeur d'environ de 4 mm) à 5 mm au dessus de la pointe supérieure du capteur afin de libérer les forces locales,
- sciage d'une seconde rainure à 5 mm au dessous de la pointe inférieure du capteur,
- relevé de la valeur instantanée n fin de sciage et avant retrait de la lame de scie.

Les traits de scie sont perpendiculaires à la droite DD' qui est parallèle au fil du bois et passe par les pointes. Le sciage isole le segment DD' du reste de l'axe, ainsi la mesure effectuée correspond au retrait longitudinal (dans le sens du fil du bois), qui résulte du relâchement de la tension initiale périphérique longitudinale sur les bords de la rainure.

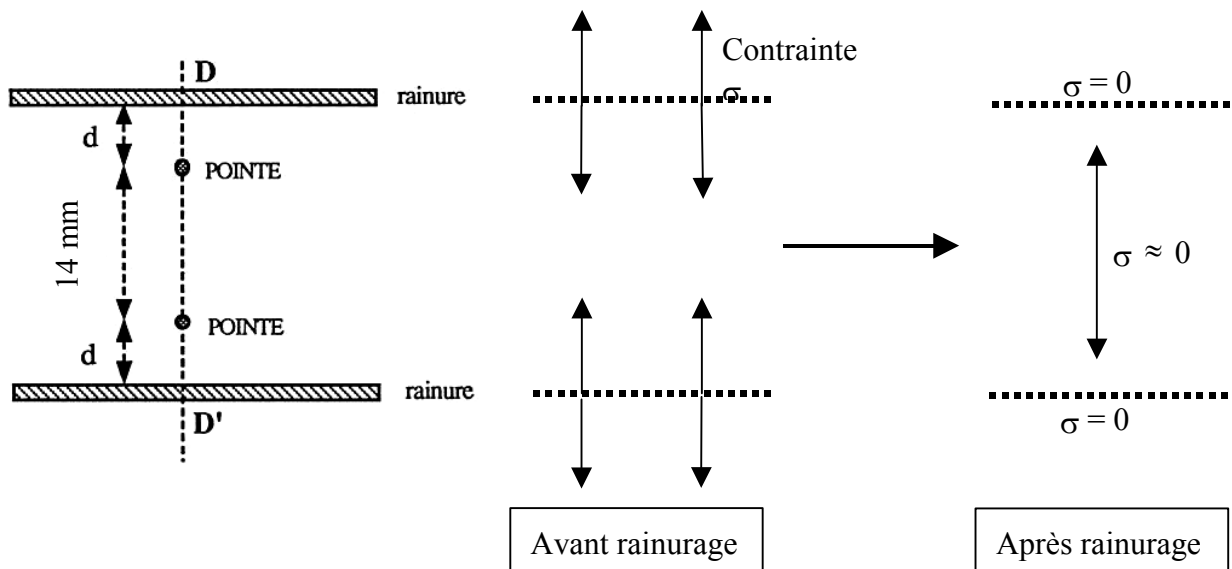


Figure 3 : plan de découpe des deux rainures et phénomène de relâchement des contraintes

On caractérise une déformation par le rapport de la différence d'écartement entre les pointes sur la distance entre les pointes :

$$\text{Déformation} = \frac{L_{fin} - L_{ini}}{L_{ini}}$$

avec $L_{ini} = 14 \text{ mm}$ [écartement des pointes]

Cette déformation est, en périphérie de l'arbre, égale à la tendance initiale du bois à se déformer lors de sa maturation (le rainurage permet aux fibres périphériques de se désolidariser du reste du tronc), on l'appelle DRLM (Déformation Résiduelle Longitudinale de Maturation). Plus la déformation est élevée, plus le bois est tendu.

II.4. Description géométrique et répartition des masses

Une fois les mesures sur pied réalisées, l'arbre est coupé.

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la structure géométrique générale de l'arbre :

- hauteur totale,
- position du centre de gravité : l'arbre est porté à bout de bras jusqu'à la détermination de la position d'équilibre. La marge d'erreur est faible (erreur relative de l'ordre de 2 %).

Des sections ont ensuite été réalisées à 50 cm, 2 m puis tous les 2 m jusqu'à la cime de l'arbre, afin de déterminer les diamètres du tronc à ces différentes hauteurs.

Dans un second temps, pour caractériser la répartition de la masse de l'arbre, l'ensemble des tronçons obtenus a été pesé.

Un échantillon de feuilles a été prélevé et conservé en vue de l'identification de chaque individu.

II.5. Variables utilisées

Morphologie de l'arbre

<i>Groupes de variables</i>	<i>Commentaires</i>
identification	famille, genre, espèce
localisation : distance au centre de la parcelle (en m) et angle par rapport au nord magnétique (en °)	converties en coordonnées cartésiennes
hauteur h (en m)	
diamètre d (en cm)	à la base, 50 cm, 130 cm, 2 m, puis tous les 2 m
masses (en kg)	obtenues par découpage du tronc en segments de 2 m
inclinaison Inc (en degrés)	à la base, à 50 cm et à 150 cm
redressement R_{12} (en m-1)	$R_{12} = (Inc_1 - Inc_2) / L_{12}$ avec $L_{12} = h_2 - h_1$
Hauteur de G (en m)	G : centre de gravité
volume du tronc (en cm ³)	obtenu en approchant le tronc par une succession de cylindres

Comportement mécanique de l'arbre

<i>Groupes de variables</i>	<i>Commentaires</i>
déformation hbm (sans unité)	h = 1 m 1 digit ↔ 19 microns ; écartement des pointes du capteur : 14 mm
DRLM (en digits) à 50 cm	surini : sur la face supérieure de l'arbre, avant sciage surfin : sur la face supérieure de l'arbre, après sciage sousini : sur la face inférieure, avant sciage sousfin : sur la face inférieure, après sciage
dC/ds mat	Variation de courbure due à la maturation cellulaire pour un incrément de section ds. Processus actif. $dC \text{ DRLM} / dS = - [(\Delta DRLM_{sup} - \Delta DRLM_{inf}) \times 8] / (\prod x D^3)$ (cf § II.2.4)
dC/ds grav	Variation de courbure due à la gravité pour un incrément de section ds. Processus passif. $dC \text{ gravité} / dS = [\sin \alpha \times (M / S) \times H_G] / E_L$ (cf § II.2.4)
masse volumique du tronc ρ (en g/cm ³)	
hauteur critique (en m)	$H_{crit} = 0.792 \times (E/\rho)^{1/3} \times D_{base}^{2/3}$
coefficient de sécurité en hauteur	$Rf = h_{tot}/h_{crit}$

Tableau 2 : variables utilisées

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Description du peuplement

III.1.1. Identification des espèces

L'identification des individus de la placette a donné les résultats suivants :

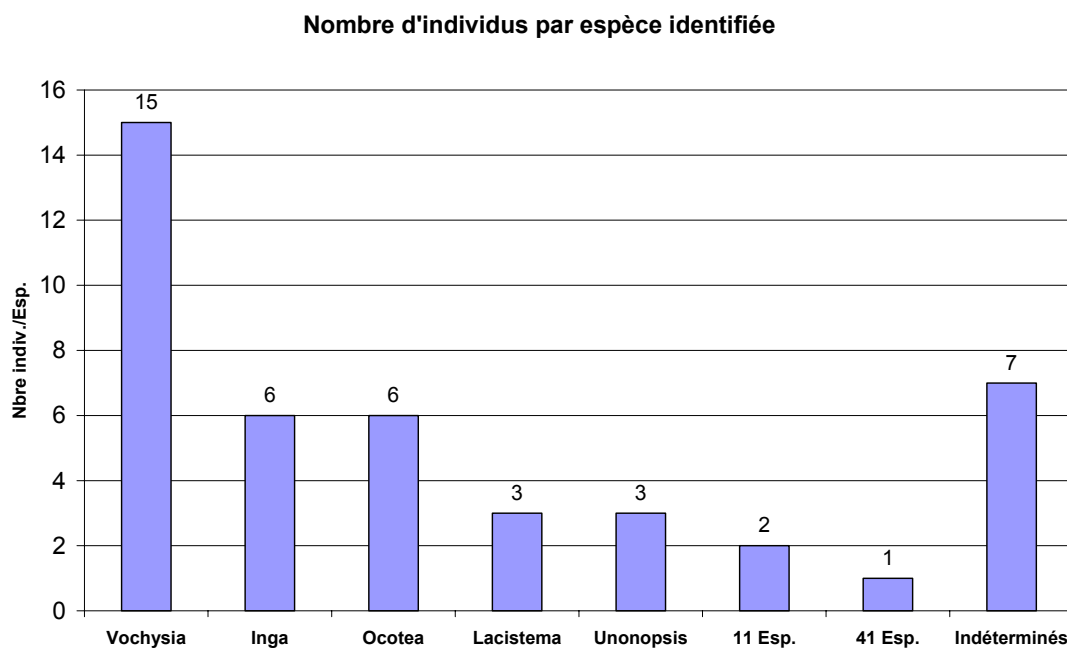


Figure 4 : nombre d'individus par espèce sur la placette

Sur les 103 individus de l'étude, 64 espèces sont présentes. Trois d'entre elles sont principalement représentées : *Vochysia tomentosa*, *Ocotea* sp. et *Inga* sp. alors que 41 espèces ne sont représentées que par un seul individu.

Parmi ces 64 espèces, on trouve 45 espèces de forêt primaire, 4 espèces de forêt secondaire, et 15 espèces que l'on peut retrouver dans les deux types de forêt.

On note la présence de 13 espèces commune avec la placette du FTH 2003.

La répartition spatiale des 5 espèces les plus représentées est relativement homogène sauf pour *Vochysia tomentosa* dont la disposition ne s'explique pas par la présence d'un semencier de gros diamètre dans la placette (cf figure 5).

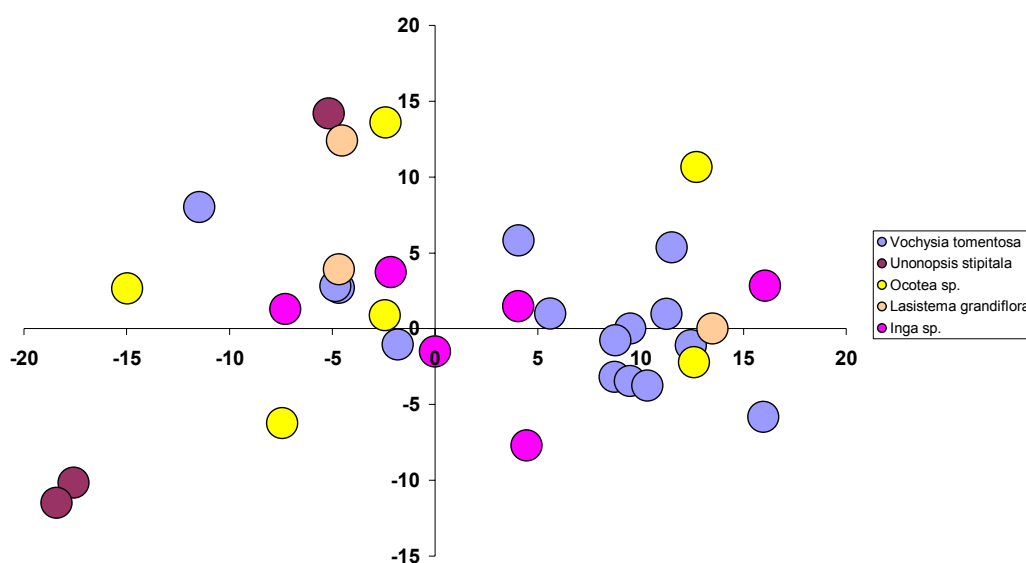


Figure 5 : répartition spatiale des 5 espèces les plus représentées.

Note : la figure 5 ne prend pas en compte les différences de diamètre.

III.1.2. Diamètre et hauteur

Les arbres ont été séparés en 3 classes de diamètre : 2,3 à 3,29 cm, 3,1 à 4,09 cm et 4,1 cm.

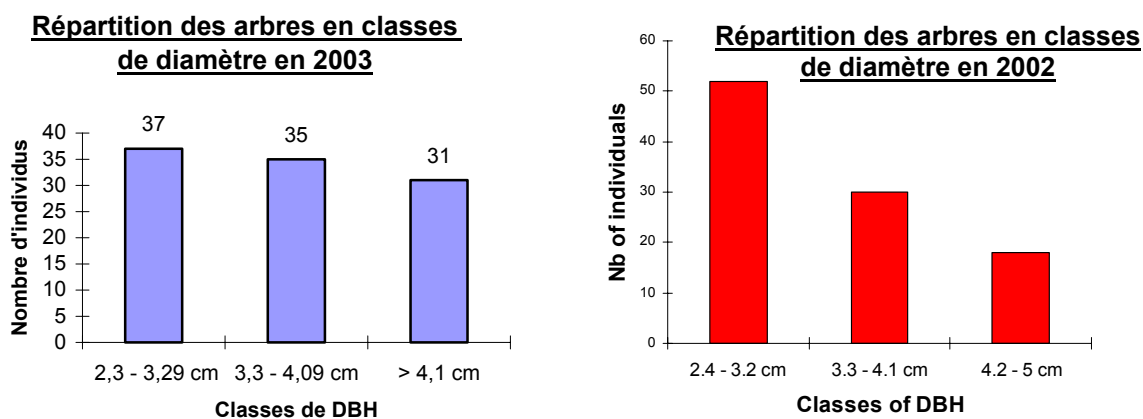


Figure 6 : comparaison des classes de diamètre entre les placettes de 2002 et de 2003

Il apparaît que tous les arbres sont équitablement répartis dans les 3 classes, sans prédominance des jeunes arbres en comparaison avec l'étude menée en 2002.

Cela tendrait à montrer que le peuplement n'a pas atteint d'équilibre de croissance, à la suite probablement de deux fortes perturbations (abattis en 1978 suivi d'un chablis naturel). La densité de petits arbres (2,5-5 cm) est de 1020 tiges/ha (alors que l'on comptait 1330 tiges/ha l'an passé, en milieu moins perturbé).

La deuxième analyse, réalisée entre la hauteur des arbres et leur DBH (figure 7), semble montrer une bonne corrélation entre ces deux paramètres. En effet, les plus petits arbres ont les plus petits diamètres et inversement.

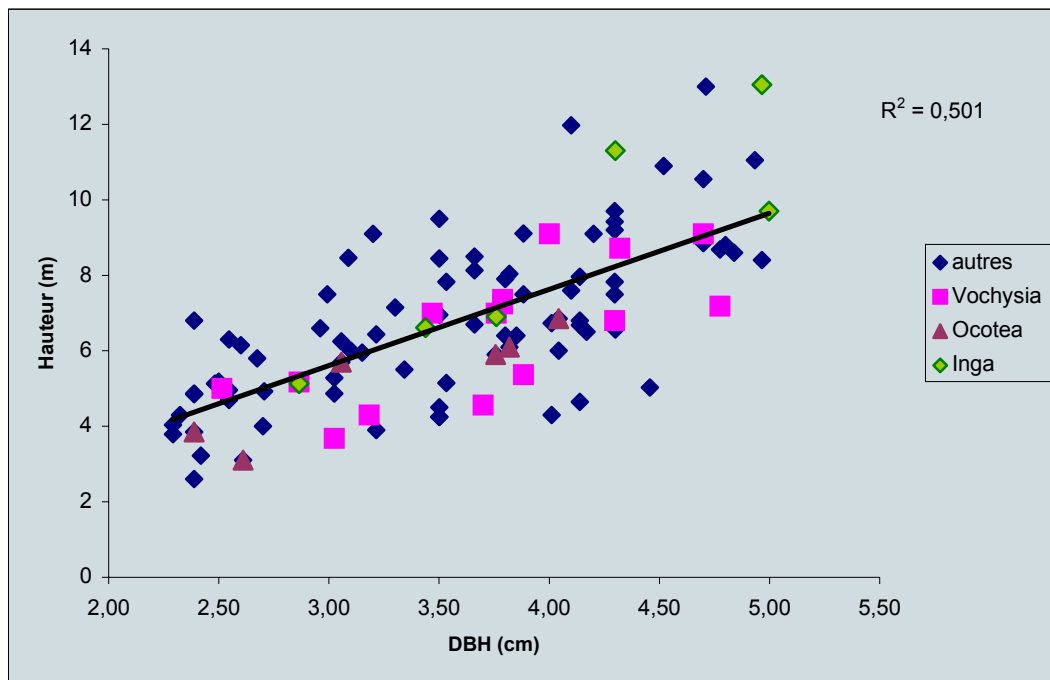


Figure 7 : relation entre la hauteur des arbres et leur DBH

On remarque également que la dispersion des hauteurs est plus importante pour les arbres de gros diamètre : ceci permet de penser que certains des arbres étudiés ont eu une croissance très rapide en hauteur, en comparaison de leur relative croissance en diamètre. Mais quelle que soit la classe de diamètre, l'écart-type est le même. De plus, il y avait de nombreux arbres cassés ce qui explique l'existence de faibles hauteurs pour de forts diamètres.

Il n'apparaît aucune corrélation entre les classes de diamètre et les espèces.

Par ailleurs, l'analyse inter-spécifique pour les trois espèces les plus représentées, ne permet d'identifier aucune stratégie de croissance particulière.

III.1.3. Port des arbres

Classes	Fréquence
-30.0	1
-15.0	4
-10.0	4
-5.0	13
-2.0	24
2.0	38
5.0	14
10.0	5
ou plus...	0

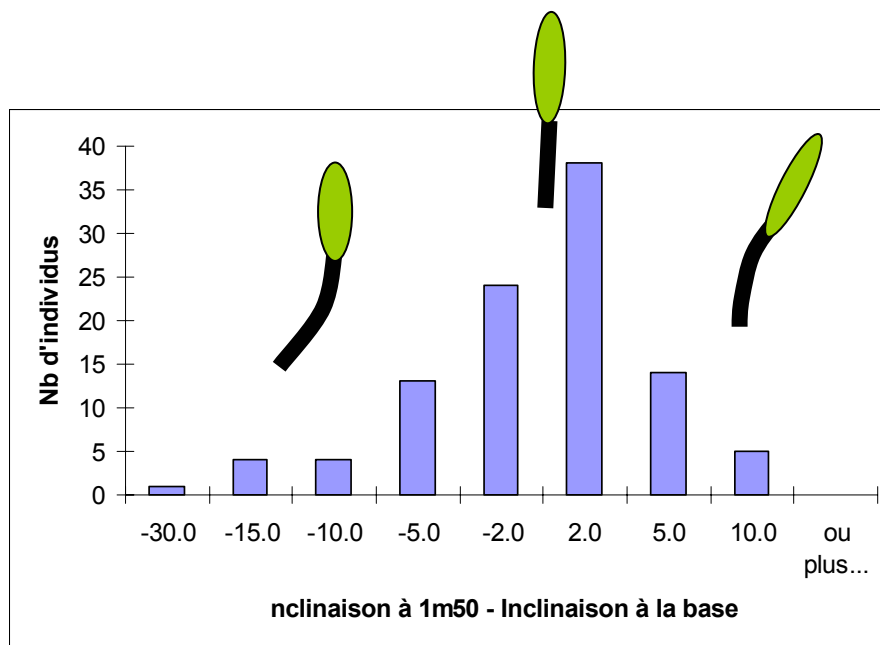


Figure 8 : répartition des inclinaisons entre la base et 1m50

Afin de pouvoir estimer l'état de redressement à 1m50 des 103 individus étudiés, la différence des inclinaisons entre la base et 1m50 a été analysée (figure 8). Lorsque cette différence est positive, l'inclinaison est plus forte à 1m50 qu'à la base, donc l'arbre plie vers le sol ; à l'inverse, si cette différence est négative, cela signifie que l'arbre se redresse.

Au sein de notre échantillon, 46 arbres s'avèrent se redresser, 38 semblent être plus ou moins droits alors que les 19 autres s'inclinent vers le sol.

La relation qui existe entre hauteur et diamètre à 1,30 m est très proche de celle établie l'an passé. La dispersion est quasi-identique (2002 : 0.39 ; 2003 : 0.42) (figure 9).

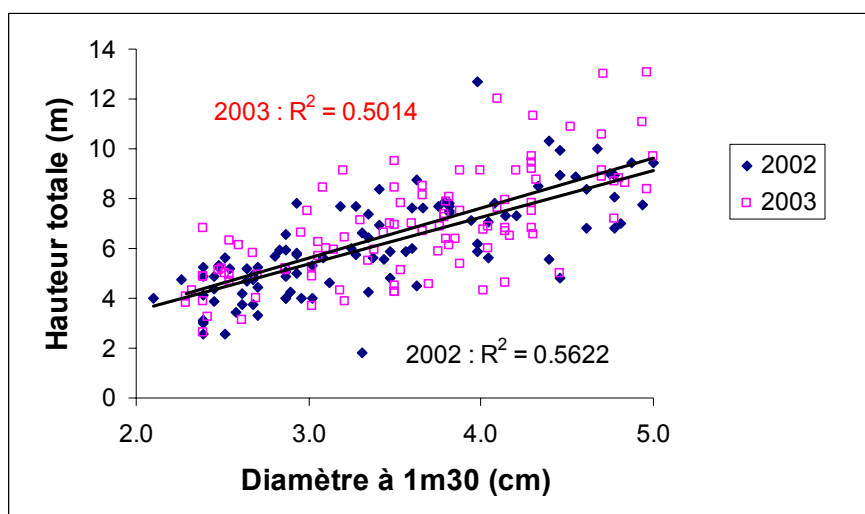


Figure 9 : relation entre la hauteur et le diamètre des individus de la placette

III.2. Evaluation des prises de risque

III.2.1. Effet de la gravité

Dans les pays tempérés, le facteur H/D (hauteur/diamètre) est un paramètre important pour caractériser la stabilité des arbres ou d'un peuplement. Les valeurs de ce rapport obtenues en Guyane sont notablement différentes de celles attendues en pays tempérés. Elles sont plus élevées (comprises entre 107 et 292, alors qu'en pays tempérés ils sont en générale au-dessous de 100) et explicables par l'absence de contraintes physiques comme la neige et le vent. La gravité semble donc être le facteur prépondérant qui limite l'accroissement vertical vers la lumière. Les formules de GREENHILL – EULER permettent une estimation de la hauteur critique au-delà de laquelle un arbre n'est plus autoportant à un diamètre donné :

$$H_{crit} = 0,792 (E/r)^{1/3} D^{2/3}$$

Avec :

- E : le module d'élasticité moyen, pris égal à 10 000 MPa pour les bois tropicaux juvéniles en vert (BEAUCHENE, comm. pers.), ultérieurement, des mesures de densité seront faites sur nos arbres et, avec les identifications d'espèces, les valeurs réelles de module d'élasticité seront extraites des bases de données du CIRAD.
- r : la masse volumique obtenue par la moyenne des rapports masse/volume des différents tronçons de 2 m. Le volume de chaque tronçon est calculé comme celui d'un cylindre ayant pour diamètre la moyenne des deux diamètres extrêmes du tronçon,
- D : le diamètre à la base pour pouvoir comparer ces résultats à ceux de l'année 2002.

En comparant cette hauteur critique à la hauteur totale de l'arbre, on obtient le facteur de risque : $R_F = H/H_{crit} = 1/SF$

L'analyse du facteur de risque en fonction de la hauteur totale révèle une forte corrélation entre ces deux variables. Ce résultat est identique à celui obtenu en 2002 (figure 10).

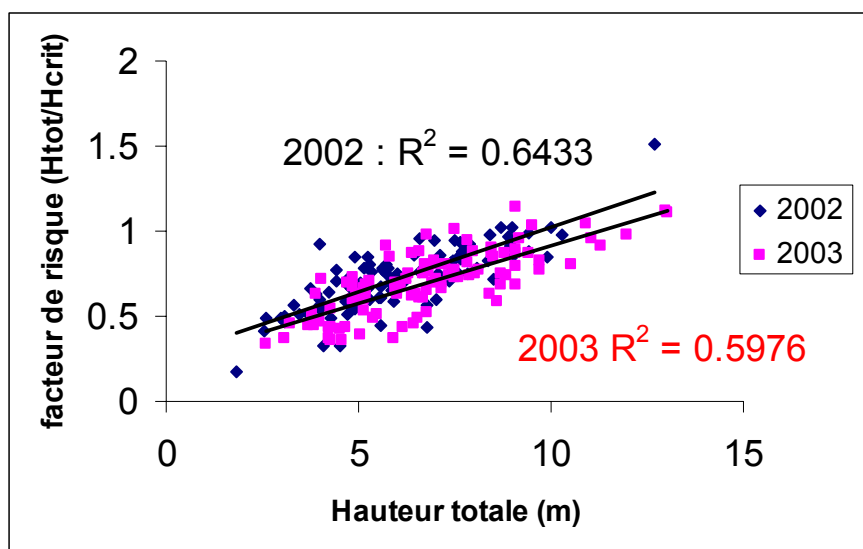


Figure 10 : facteur de risque fonction de la hauteur totale

Rapporté au diamètre à 1m30 (DBH), il n'apparaît pas de relation entre ces deux paramètres, la corrélation n'est que de $R^2 = 0,08$.

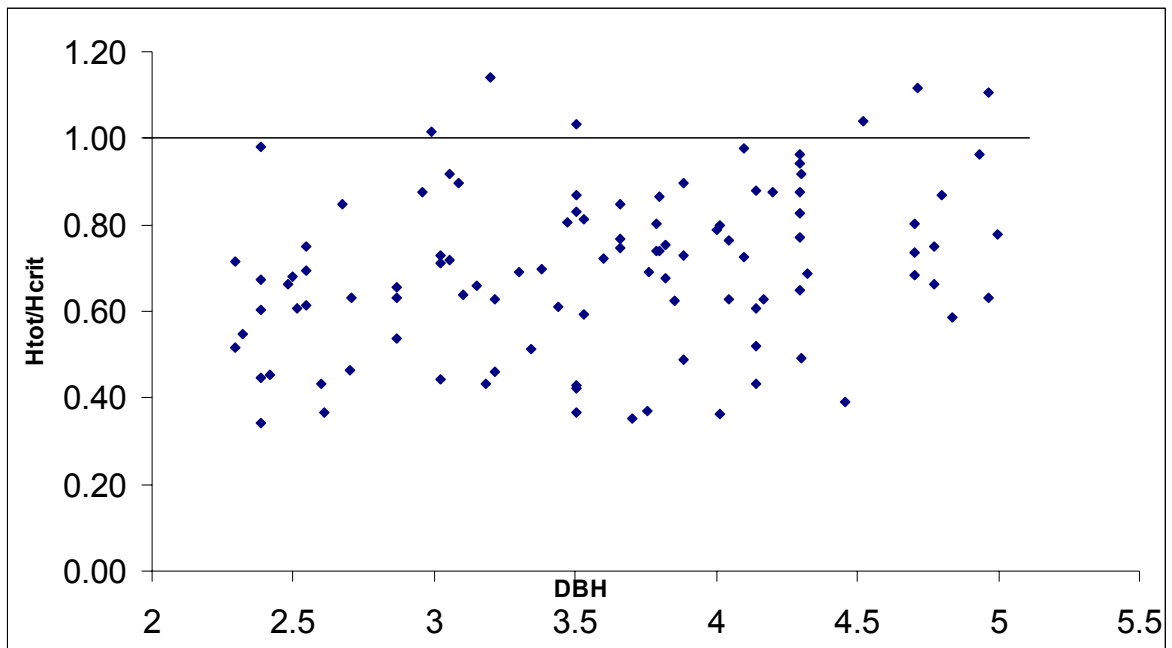


Figure 11 : facteur de risque fonction du diamètre à 1m30 et autoportance

Sterck et Bongers (1998) ont montré, sur trois espèces de forêt tropicale humide, que le facteur de risque augmentait avec le diamètre dans la phase juvénile. Ils travaillaient dans un milieu au couvert fermé, générant donc un fort gradient de lumière entre canopée et sol d'où l'intérêt pour les arbres à partir d'une certaine taille de croître vite en hauteur pour rejoindre la lumière. De plus dans un tel milieu, la densité d'arbre et la présence de lianes permet un soutien entre individus. Dans notre cas, le peuplement est plus jeune et moins dense, d'où l'absence de relation entre facteur de risque et diamètre à 1m30.

En groupant les espèces en trois ensembles suivants leur comportement : espèces de forêt primaire, héliophiles stricts et pionniers tardifs, il semble que les pionniers tardifs présentent une corrélation statistiquement significatives entre le diamètre à 1,30m et le facteur de risque. Les deux autres groupes d'espèces ne présentent aucune corrélation significative.

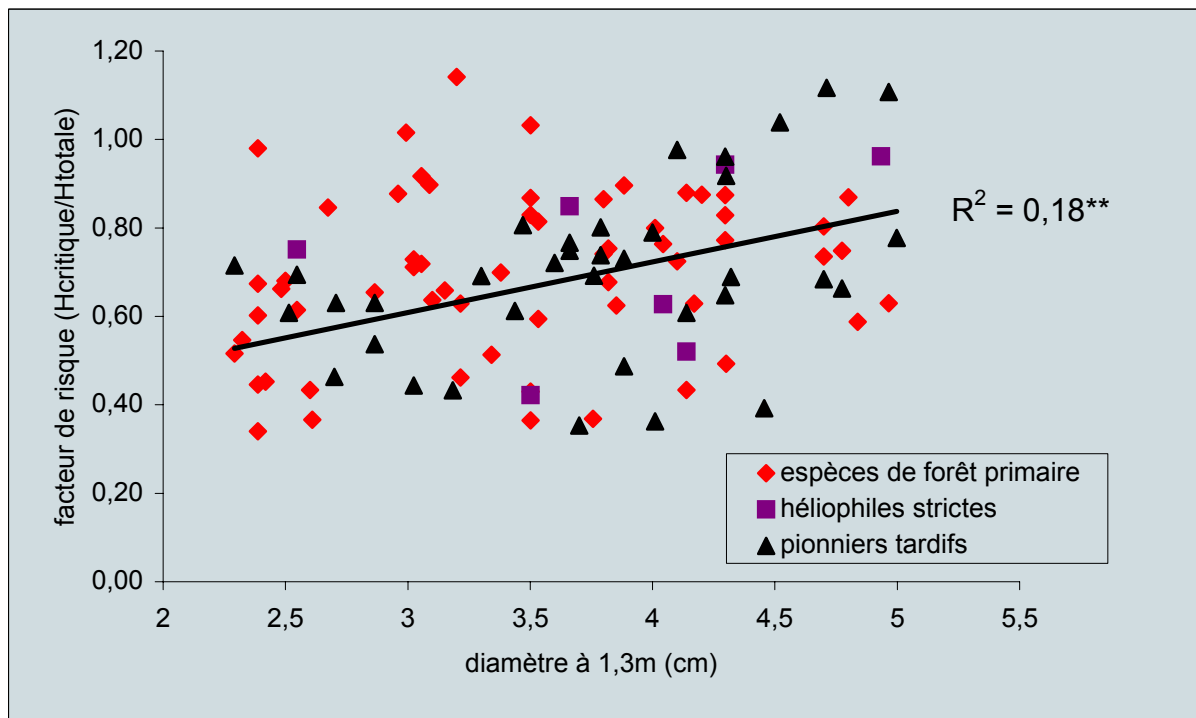


Figure 12 : facteur de risque fonction du diamètre à 1m30 et comportement des espèces

Les figures 11 et 12 montrent que la plupart des arbres ont un facteur de risque inférieur ou égal à 1, ce qui signifie qu'ils sont autoportant.

Le calcul du facteur de risque semble indiquer que 6 des 103 individus ne sont pas autoportants puisque $R_F > 1$ (Cf. Figure 10). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette non-autoportance (présence de lianes, houppiers imbriqués...). Mais tous ces individus ont une hauteur totale supérieure à la moyenne (figure 13).

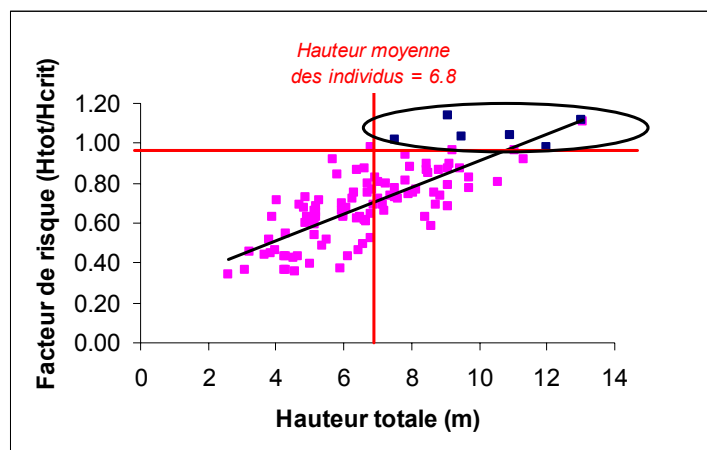


Figure 13 : hauteur des arbres non-autoportants

Les 6 arbres non autoportants appartiennent à 6 espèces différentes. D'autres individus de notre échantillon appartiennent à ces 6 espèces et sont autoportants. Nous ne pouvons donc tirer aucune conclusion du recoupement espèce/non autoportance.

Parmi les 6 individus non-autoportants (arbres n°21, 29, 51, 57, 79 et 105) le 21 fait partie d'un trio de rejet de souche. Cet individu a donc probablement été soutenu par les deux autres arbres lors de sa croissance.

L'influence des lianes et des interactions entre les arbres voisins (palmiers notamment) n'a pas été relevée lors de l'abattage des arbres. Il se peut donc que, par le calcul, certains individus se révèlent autoportants alors que sur le terrain, ils ne l'étaient pas.

III.2.2. Mesures de DRLM en fonction de l'inclinaison

A partir des valeurs de DRLM mesurées sur les faces supérieure et inférieure des arbres, on mesure les tensions exercées à la périphérie du bois. Les figures 13 et 14 représentent pour chaque arbre échantillonné ces tensions, sur la face supérieure et sur la face inférieure. La courbe représente les valeurs d'inclinaison, les arbres étant classés par ordre décroissant d'inclinaison.

Ceci est réalisé à 50 cm et à la base des arbres.

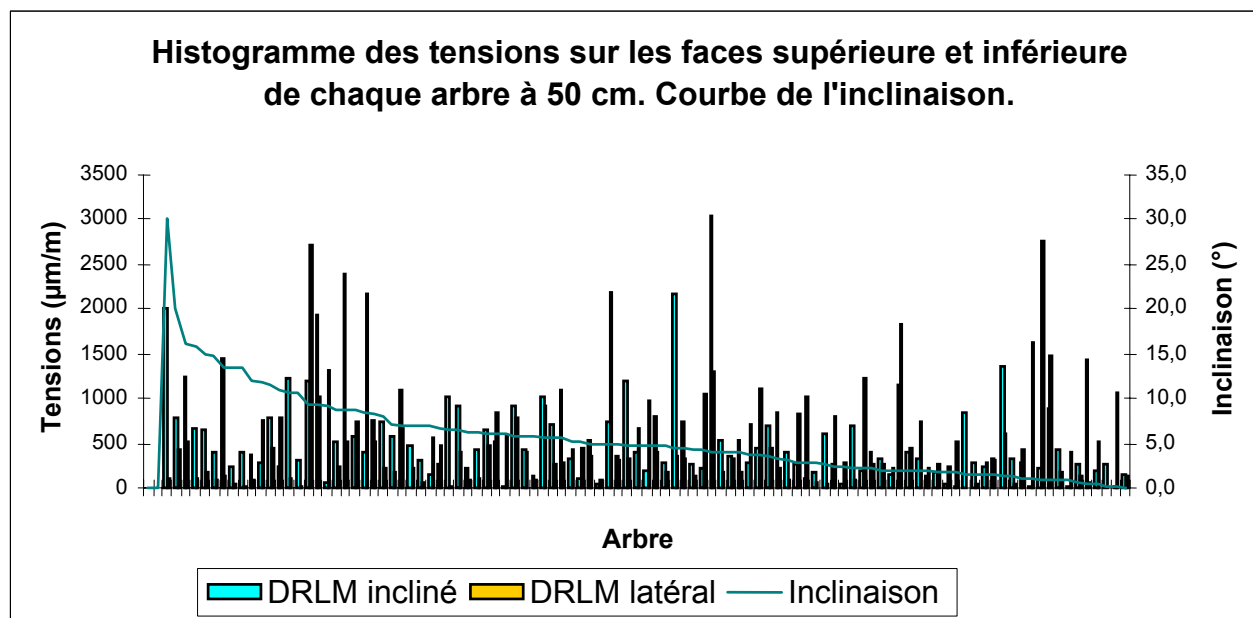


Figure 14 : Histogramme des tensions sur les faces supérieure et inférieure de chaque arbre à 50 cm. Courbe de l'inclinaison.

Il semble qu'il n'y ait aucune corrélation entre l'intensité des forces de tension exercées au niveau du tronc et l'inclinaison de l'arbre, que ce soit à 50 cm ou à la base. En effet, histogrammes et courbes apparaissent indépendants. Le même exercice réalisé sur les faces latérales ne révèle pas non plus de corrélation.

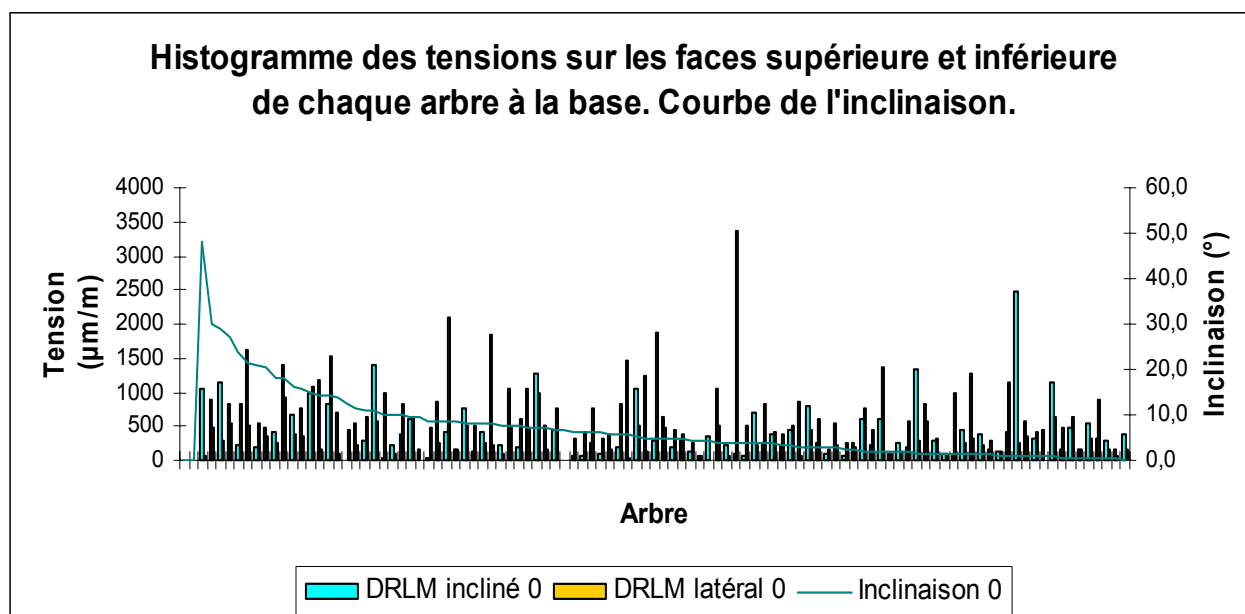


Figure 15 : Histogramme des tensions sur les faces supérieure et inférieure de chaque arbre à 50 cm. Courbe de l'inclinaison.

Plusieurs raisons sont invoquées pour expliquer cette absence de relation.

L'inclinaison du tronc peut être due à un événement récent (exemple : chablis), auquel cas l'arbre n'a pas encore eu le temps de fabriquer assez de bois de tension.

L'arbre peut être droit et produire du bois de tension afin de maintenir une croissance verticale ou de contrer l'effet du vent ou de pressions extérieures.

III.2.3. Orientation des tensions par rapport à l'inclinaison

Les figures 15 et 16 trient les arbres en fonction de leur face (supérieure, inférieure ou latérales, considérées par rapport à l'inclinaison de l'arbre à l'endroit de la mesure) présentant le plus de bois de tension.

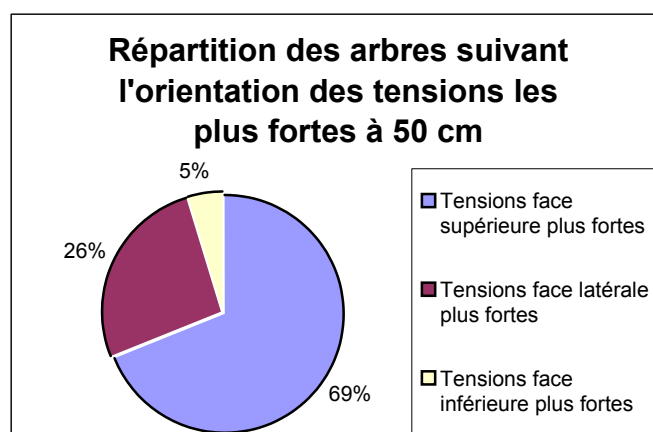


Figure 16 : répartition des arbres suivant l'orientation des tensions les plus fortes à 50 cm.

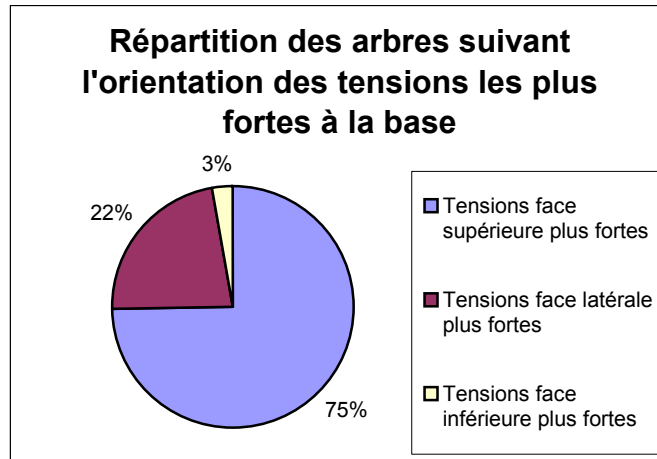


Figure 17 : répartition des arbres suivant l'orientation des tensions les plus fortes à la base.

Si l'inclinaison des arbres n'apparaît pas corrélée aux forces de tension à la périphérie du tronc, on remarque cependant que les tensions maximales enregistrées sur les différentes faces d'un même arbre sont en général situées sur la face supérieure des troncs inclinés. Que ce soit à 50 cm ou à la base, les trois quarts des arbres présentent plus de bois de tension sur la face supérieure ; le contraire n'a été mesuré que dans 5 % des cas.

On remarque qu'environ un quart des arbres a un maximum de bois de tension sur une des faces latérales. Ceci peut s'expliquer par une mauvaise lecture de l'inclinaison (dans le cas des arbres faiblement inclinés), et suggère également que l'inclinaison du tronc à l'endroit des mesures ne reflète pas nécessairement la silhouette générale de l'arbre.

Une première conclusion pratique de ce résultat est qu'il est nécessaire de réaliser au moins quatre mesures de DRLM sur le périmètre du tronc. En effet, en l'absence de mesures latérales, on risque de mal classer certains arbres en négligeant les tensions latérales plus fortes que les tensions supérieure et inférieure.

Pour la suite du travail, on élimine les quelques arbres présentant une tension maximale sur la face inférieure du tronc. On garde pour chaque arbre la différence la plus forte entre les tensions diamétralement opposées, à une hauteur donnée : dans trois quarts des cas, on considère les différences de tensions entre faces supérieure et inférieure ; et dans un quart des cas, on considère les différences entre faces latérales.

Les valeurs de tensions ainsi obtenues représentent la capacité de l'arbre à se redresser et à maintenir son port vertical. Or le port de l'arbre résulte de l'action des forces de redressement que l'on vient de mesurer et de la gravité. Chacune de ces forces peut être mesurée comme un rayon de courbure théorique du tronc par rapport à la section. Il est intéressant de comparer ces forces pour chercher à comprendre comment les structures mises en place par l'arbre contrent l'effet de la gravité.

III.2.4. Comparaison des forces de redressement et de la gravité

Les mesures réalisées sur les arbres sont converties en microdéformations. On choisit de se fixer sur la section de l'arbre à 50 cm. L'équation suivante traduit la variation de courbure du tronc sous l'effet des forces de redressement, pour une augmentation de la section :

$$\frac{dC_{DRLM}}{dS} = - \frac{[(\Delta DRLM_{sup} - \Delta DRLM_{inf}) \times 8]}{\pi \times D^3} \quad (1)$$

avec :

dC = variation de courbure pour une augmentation de croissance en surface
 dS = incrément de croissance en surface.

Ce modèle biomécanique a été développé par Fournier (1994) et Fourcaud (2003).

D'autre part, on calcule l'affaissement que subirait l'arbre en croissance du fait de son inclinaison initiale. Ceci peut s'exprimer par une variation de courbure du tronc sous l'effet de la gravité, pour une augmentation de la section :

$$\frac{dC_{\text{gravité}}}{dS} = \frac{\sin \alpha \times \frac{d(M \times H_G)}{dS}}{E_L} \quad (2)$$

avec : α = inclinaison du tronc à l'endroit de la mesure

E_L = module de Young. On choisit une valeur de 10 000, correspondant aux valeurs moyennes des bois tropicaux.

$\frac{d(M \times H_G)}{dS}$ = accroissement du produit de la masse de l'arbre par la hauteur du centre de gravité, pour un incrément de croissance sur la section.

On peut simplifier cette équation en étudiant la relation : $\mathbf{M} \times \mathbf{H}_G = \mathbf{f}(S)$

On obtient une équation du type $\mathbf{M} \times \mathbf{H}_G = \mathbf{a} \times S^b$

Soit $\frac{d(M \times H_G)}{dS} = \frac{b \times M \times H_G}{S} \quad (3)$

avec :

$$\begin{aligned} a &= 9,41 \\ b &= 0,395 \end{aligned}$$

L'équation (2) se simplifie :

$$\frac{dC_{\text{gravité}}}{dS} = \frac{\sin \alpha \times \frac{b \times M \times H_G}{S}}{E_L} \quad (4)$$

Un arbre, pour être aussi vertical que possible, doit produire des structures capables de contrer l'effet de la gravité. Cela revient à dire que les tensions enregistrées à la périphérie du tronc et correspondant à des forces de redressement doivent être supérieures à l'effet d'écrasement de l'arbre dû à la gravité. On observe sur la figure 17 que c'est le cas de la grande majorité des arbres.

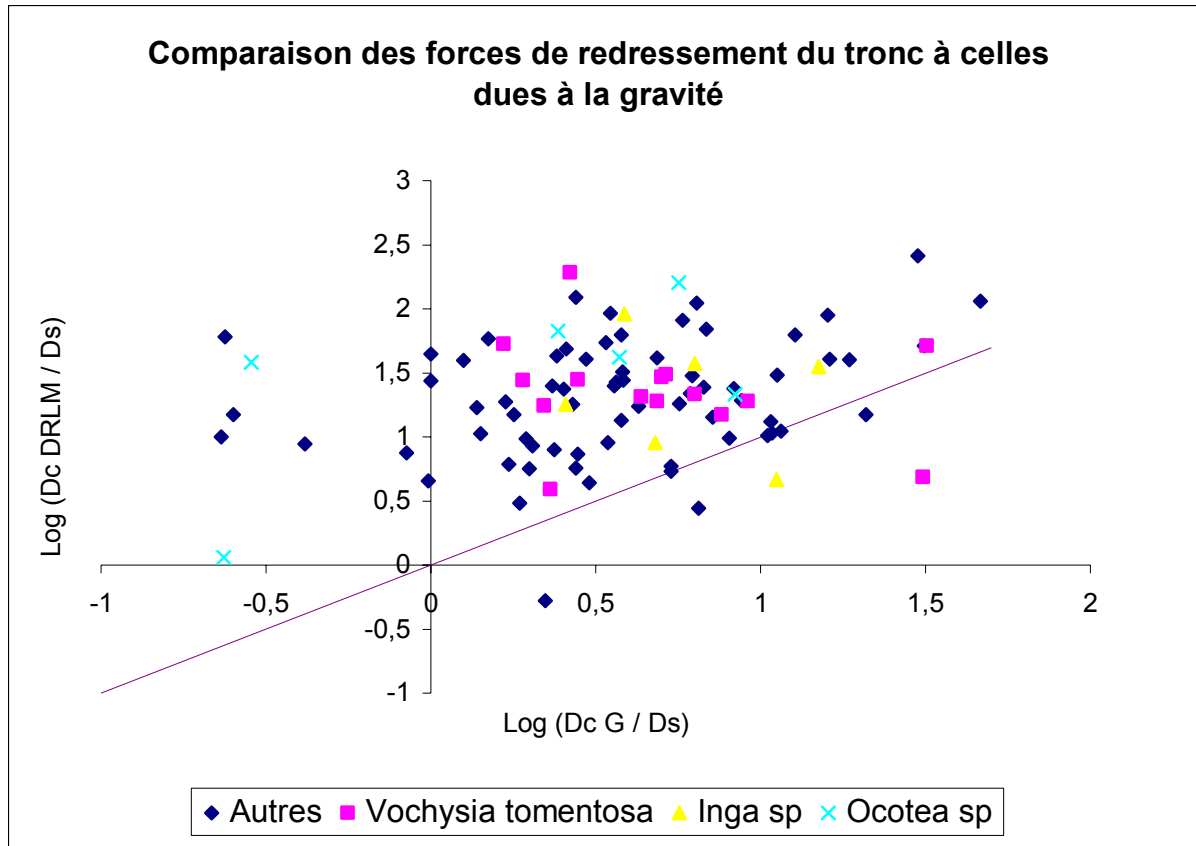


Figure 18: comparaison des forces de redressement à celles dues à la gravité en comparant les principales espèces

Les quelques arbres situés sous la droite $y = x$ ne sont pas en phase de redressement mais sont en train de s'affaisser. Il est intéressant de voir que ces arbres ne correspondent pas aux arbres non autoportants décrits précédemment, c'est-à-dire à ceux qui ont un facteur de risque supérieur à 1. Par ailleurs, pour les trois espèces les plus représentées (au moins six individus), on ne distingue aucune stratégie de croissance particulière.

Les mesures réalisées l'an dernier sur une centaine d'arbres dans une zone de forêt non perturbée donnent des résultats similaires : la grande majorité des arbres sont en redressement actif.

Il est possible d'affiner ce résultat en intégrant l'excentrement de la moelle dans le calcul des forces de redressement. On utilise la formule suivante pour calculer la nouvelle courbure théorique du tronc rapportée à sa section :

$$\frac{dC_{DRLM}}{dS} = 8 \times \frac{(\Delta DRLM_{sup} - \Delta DRLM_{inf}) + \Delta DRLM_{moy} \times (M - m)}{(M + m) \times \pi \times D^3} \quad (6)$$

M est la distance – prise sur la section du tronc au niveau de la mesure – entre le centre de la moelle et la face supérieure (m entre le centre et la face inférieure). Le protocole expérimental n'inclut pas la mesure de l'excentrement latéral de la moelle des arbres. Les arbres présentant des différences maximales de tensions entre les deux faces latérales (et non entre la face supérieure et la face inférieure) n'ont pu être pris en compte dans la figure 18.

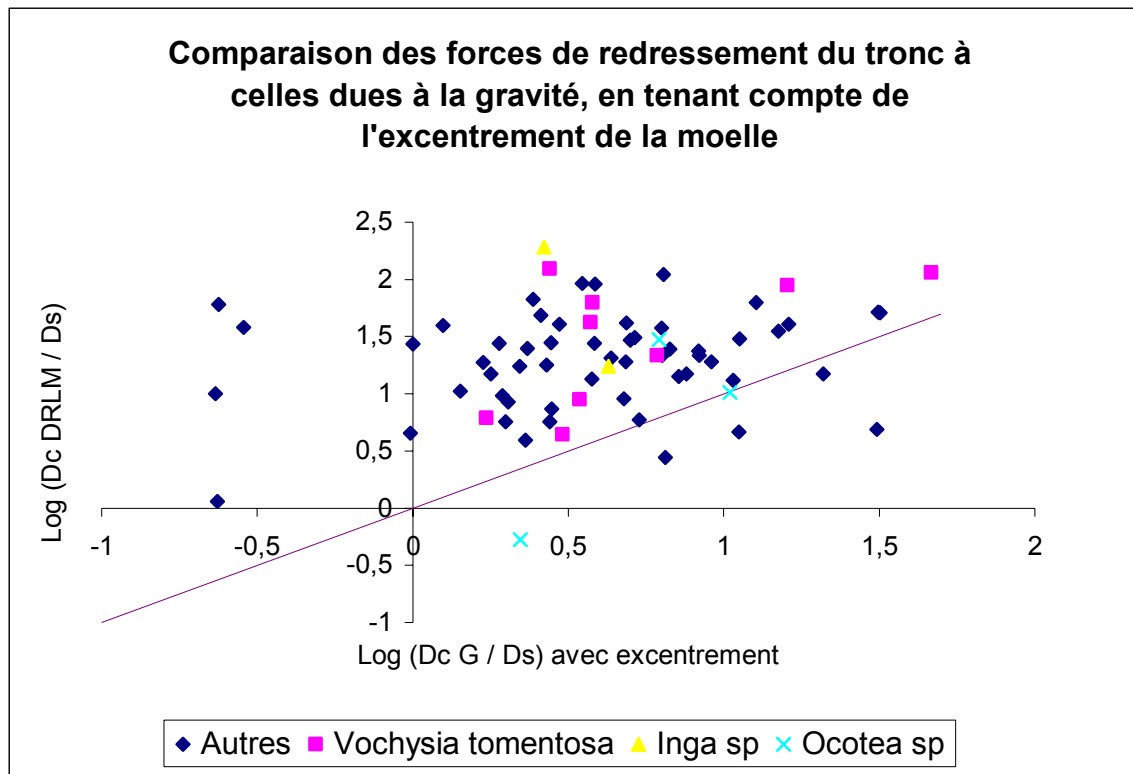


Figure 19: comparaison de la courbure du tronc due aux forces de redressement à celle due à la gravité, en tenant compte de l'excentrement de la moelle.

On remarque que la proportion d'arbres capables de contrer l'effet de la gravité est encore plus importante. Ainsi pour presque tous les arbres le redressement actif prédomine sur l'affaissement passif du au poids propre. A nouveau, on ne remarque aucune différence notable entre espèces.

IV. CONCLUSION

Bien que provenant de deux placettes différentes – l'une a été défrichée en 1979 et l'autre n'a jamais fait l'objet d'opérations sylvicoles – les résultats tirés de la centaine d'arbres échantillonnés en 2003 peuvent être mis en parallèle avec les résultats obtenus l'année précédente.

Il apparaît que la plupart des arbres sont autoportants et se redressent activement. Les résultats de 2003 montrent que moins de 20 % des arbres échantillonnés sont plus inclinés à 1,50 m qu'à 50 cm ou à la base, et seulement 6 % d'entre eux dépassent leur hauteur critique. Cela signifie que les arbres sont capables de contrer l'effet de la gravité et de mettre en place des structures prévenant leur propre affaissement.

L'expérience de 2002 a permis d'affiner le protocole expérimental. Les mesures additionnelles réalisées en 2003 permettent de tirer des conclusions supplémentaires.

Les tensions de redressement enregistrées sur la section du tronc sont dans la plupart des cas maximales sur la face supérieure. La quasi-totalité des arbres redresse activement et compense l'effet de la gravité. En revanche, aucune corrélation n'est enregistrée entre le degré d'inclinaison des arbres et l'intensité des forces de tension en périphérie du tronc.

En ce qui concerne l'étude interspécifique, aucune stratégie particulière n'a pu être mise en évidence, mais le nombre d'arbres échantillonnés par espèce était souvent trop faible pour tirer des conclusions statistiquement fiables.