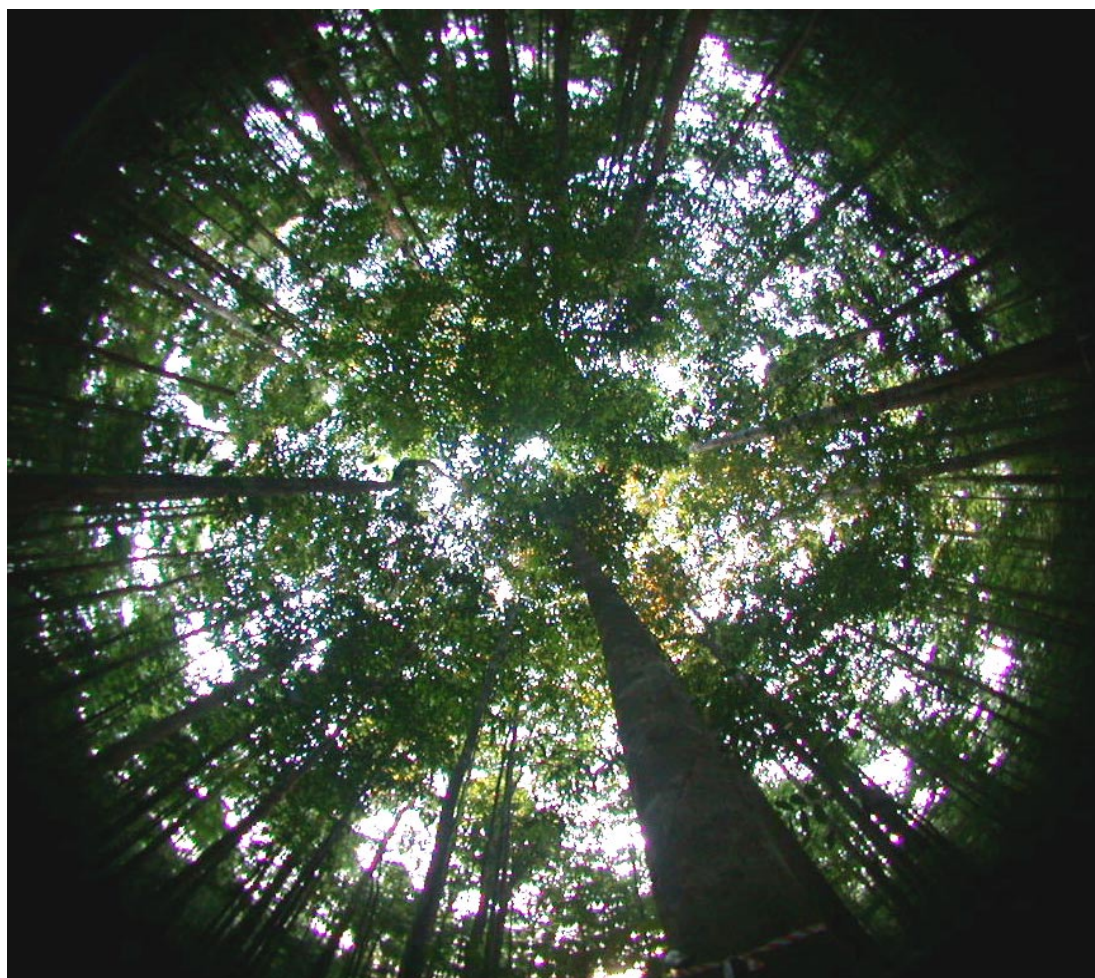




**Etude des stratégies de croissance et d'interception de la lumière mises en place par certaines espèces de la forêt tropicale.**



**sous la direction de : -Bruno Clair et Meriem Fournier.**

avec la collaboration de : Marie Françoise Prevost et Georges Elfort.

ainsi que : Pascal Blanquet, Gary Crouzet, Patrick Fourreau, Gaelle Jaouen, Murielle Ghestem, Claire Martin, Julien Ruelle, Belen Zubieta.

**FTH 2002**



**Ecologie  
des  
Forêts  
de  
Guyane**

## **Résumé**

L'objectif de cette étude est de mettre au point un protocole d'observation visant à mettre en évidence les différentes stratégies utilisées par les jeunes arbres de forêt tropicale humide pour assurer leur soutien mécanique durant leur phase de croissance vers la canopée. Sur une placette sommitale, 100 arbres de petits diamètres sont étudiés et identifiés. Pour chacun d'eux, une description morphologique (hauteur, diamètres, masses, inclinaisons) et une caractérisation mécanique (rigidité de flexion, contrainte de croissances) sont réalisées. L'analyse des résultats montre que le redressement par dissymétrie des contraintes de croissance est une stratégie utilisée par 82 % des arbres. L'efficacité de cette stratégie pour lutter contre la gravité est mise en évidence. La prise de risque de chaque arbre est calculée et il apparaît que les arbres ayant eu une croissance sans accident se permettent de prendre plus de risque pour rejoindre la canopée. Dans un cas extrême, nous observons un arbre profitant totalement de son maintien par les arbres voisins pour assurer sa survie. Les facteurs environnementaux (compétition, lumière) ne semblent que peu affecter les stratégies des jeunes arbres. Enfin, il ne semble pas qu'il y ait de différences de stratégie notoires entre les différentes espèces ou groupes d'espèces.

## **Mots clés**

Biomécanique, Forêt tropicale humide, Facteur de risque, Rigidité à la flexion, Contraintes de croissance, Bois de tension.

## **Summary**

The objective of this study is to finalize a protocol of observation aiming to put in evidence various strategies used by young rain forest trees to assure their mechanical support during their growth. 100 trees of small diameters are studied and identified. For each of them, a morphological description (height, diameters, masses, slopes) and a mechanical characterization (flexion stiffness, growth stresses) are realized. Results analysis shows that the recovery by growth stress asymmetry is a strategy used by 82 % of trees. The efficiency of this strategy to fight against the gravity is revealing. The risk-taking of every trees is calculated and it seems that trees having had a growth without accident take more risk to join the canopy. In an extreme case, we observe a tree taking advantage totally of the presence of the nearby trees to assure its survival. Environmental factors (competition, light) seem only little to affect the strategies of the young trees. Finally, it does not seem that there are notorious differences of strategy between species or groups of species.

## **Keywords**

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

Nous tenons à remercier l'IRD pour la mise à disposition du site d'étude, en particulier Fanchon Prevost et Georges Elfort pour l'aide apportée sur le terrain. Lors de la collecte de données, Pascal Imbert (INRA) nous a également été d'une aide précieuse.

Nous remercions également le CIRAD Bois pour la mise à disposition du laboratoire de Pariacabo. Nos remerciements vont tout particulièrement à Mériem Fournier et Jacques Beauchêne pour leur disponibilité lors de l'analyse des données.

Les étudiants remercient Magali Clair pour sa présence sur le terrain, ainsi que l'équipe encadrante : Bruno Clair, Gaëlle Jaouen et Julien Ruelle pour sa performance et sa bonne humeur communicative !

# **SOMMAIRE**

TABLE DES FIGURES .....	1
TABLE DES PHOTOS .....	1
TABLE DES TABLEAUX.....	1
<b><u>INTRODUCTION .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>I - MATERIEL ET METHODES.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	2
2 - INVENTAIRE DES ARBRES .....	3
3 - MESURES DE RIGIDITE.....	4
4 - PESEE DU MATERIEL VEGETAL .....	8
5 – VARIABLES UTILISEES .....	9
<b><u>II - TRAITEMENT DES DONNEES .....</u></b>	<b><u>12</u></b>
1 – ETUDE SUR LA STRATEGIE DE REDRESSEMENT DES ARBRES EN MILIEU TROPICAL .....	12
1.1 - <i>Le redressement « secondaire » : une stratégie courante</i> .....	12
2 - ETUDE DE LA CORRELATION ENTRE INCLINAISON DU TRONC ET DISSYMETRIE DE DRLM	14
3 – EVALUATION DES PRISES DE RISQUES.....	19
3.1 - <i>Indices de prise de risque</i> .....	19
3.2 - <i>Quels sont les arbres qui prennent des risques?</i> .....	22
4 - RECHERCHE DE STRATEGIES DE CROISSANCE COMMUNES ENTRE ESPECES OU GROUPES D’ESPECES .....	26
4.1 - <i>Espèces et groupes d’espèces</i> .....	26
4.2 - <i>Relation entre la hauteur et le diamètre : des stratégies différentes selon les           espèces ?</i> .....	27
4.3 - <i>Les autres facteurs varient-ils selon l’espèce ou le groupe d’espèces ?</i> .....	29
5 - RECHERCHE DE L’INFLUENCE DE LA LUMIERE.....	30
<b><u>CONCLUSION .....</u></b>	<b><u>32</u></b>

## ***Table des figures***

Figure 1 : Répartition des arbres .....	4
Figure 2 : Flèche en fonction de la masse pour l'arbre 6 ( <i>Eperua grandiflora</i> ).....	5
Figure 3 : Répartition de dmasse/dflèche.....	5
Figure 4 : méthode Wap's- capteur HBM (Fournier et al.1994).....	6
Figure 5 : Masse appliquée en fonction de la déformation HBM pour <i>Eperua grandiflora</i> (arbre n°6) .....	7
Figure 6 : Répartition de dmasse/dHBM.....	7
Figure 7 : plan de découpe des deux rainures et phénomène de relâchement des contraintes ...	8
Figure 8 : Redressement des arbres entre 0 et 150 cm .....	12
Figure 9 : DRLM dissymétrique à 50 cm.....	13
Figure 10 : Inclinaison des arbres à 50 cm en fonction de la différence de DRLM .....	15
Figure 11 : Distribution des $\Delta\theta$ calculés sur l'ensemble de nos arbres.....	16
Figure 12 : Les différents paramètres intervenants dans nos calculs .....	17
Figure 13 : relation, pour chaque arbre, entre la courbure due à la gravité et celle due à la dissymétrie de DRLM. La droite représente $y=x$ .....	18
Figure 14 : Deux cas possibles, soit la gravité l'emporte soit le moteur interne .....	18
Figure 15 : Logarithme de la hauteur en fonction du logarithme du diamètre à 130.....	19
Figure 16 : Relation entre le risque en hauteur et le risque en masse .....	21
Figure 17 : Risque en hauteur en fonction du rapport H/D130.....	21
Figure 18 : Facteur de risque en hauteur en fonction du diamètre à 130 cm .....	22
Figure 19 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à la base.....	23
Figure 20 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à 50 cm .....	23
Figure 21 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à 150 cm .....	24
Figure 22 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison la plus forte.....	24
Figure 23 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison totale.....	25
Figure 24 : Graphique du facteur de risque en hauteur en fonction de la variation de courbure par unité de surface à 50 cm.....	26
Figure 25 : Logarithme de H en fonction du logarithme du D130 pour les différentes espèces .....	27
Figure 26 : Logarithme de H en fonction du logarithme du D130 pour les différents groupes.....	28
Figure 27 : Redressement entre 0 et 150 cm pour les groupes 1 à 3 .....	29
Figure 29 : Schéma du LAI-léger.....	30

## ***Table des photos***

photo 1 : Prise des distances et azimuts .....	2
photo 2 : Pesée du feuillage.....	9
photo 3 : Exemple d'une photo hémisphérique prise avec le fisheye, aux environs de 8h du matin.....	30

## ***Table des tableaux***

Tableau 1: Gros arbres à l'intérieur de la placette .....	3
---	---

# INTRODUCTION

Afin de maximiser l'interception de la lumière, certains arbres développent leurs capacités d'adaptation pour assurer une croissance verticale. Celle-ci est obtenue par la croissance primaire du bourgeon terminal, ensuite soutenue mécaniquement par la croissance secondaire qui donne le bois.

Mais cette croissance primaire est coûteuse d'un point de vue énergétique. Une fois dépassé le stade de la survie, la plante au stade juvénile subit des contraintes mécaniques de soutien particulièrement fortes, dans un environnement de sévère concurrence. Plusieurs stratégies sont alors possibles:

La stratégie du risque minimum : la grande quantité de bois produite assure la solidité, mais elle est coûteuse et impose une croissance lente .

La stratégie inverse : une tige plus fine est produite pour atteindre plus rapidement la position souhaitée, mais les risques de chute ou de pliage sont forts et la mise en place de systèmes de récupération est nécessaire.

Entre ces deux extrêmes, tous les intermédiaires sont envisageables : quelles sont alors les stratégies adoptées par la plante pour faire face à ce problème majeur de croissance verticale ?

## Objectifs :

L'objectif de ce travail est d'abord de mettre au point un protocole standard d'observation reproductible, à l'échelle d'un peuplement, des stratégies utilisées pour le maintien de la verticalité des individus et de la maximisation de l'interception lumineuse qui en résulte : une équipe de cinq-six personnes se propose de caractériser une placette d'une centaine de jeunes arbres :

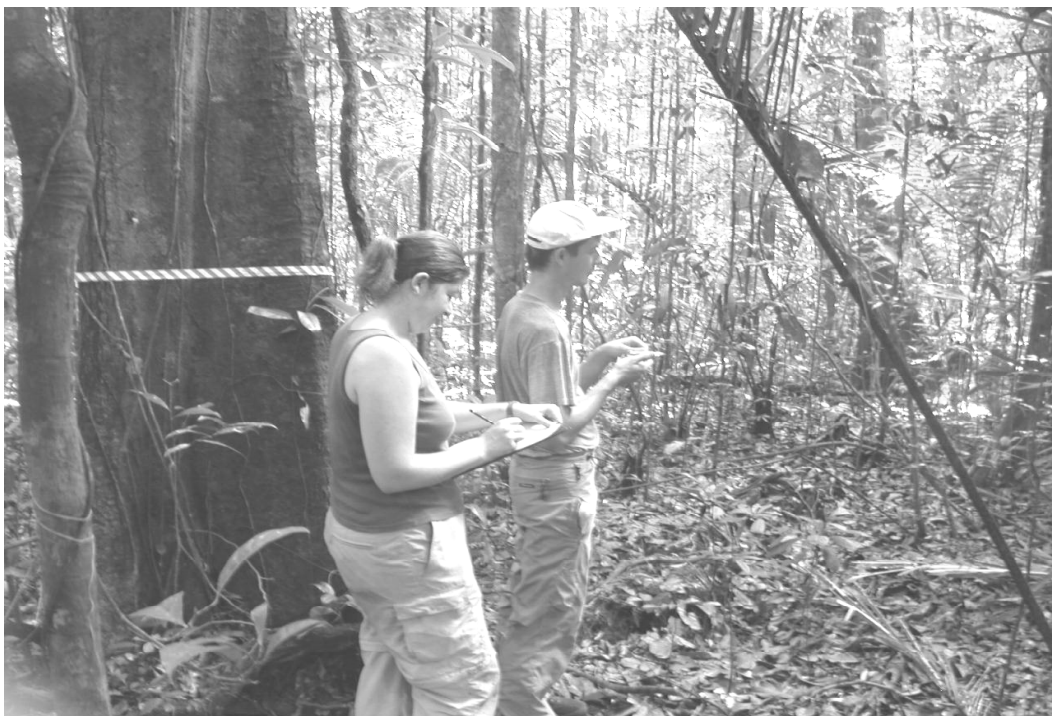
- En démontrant que le redressement secondaire, qui s'accompagne généralement de la production de bois de tension, n'est pas une pathologie des arbres tropicaux mais au contraire une stratégie courante et efficace de réorientation pour assurer le maintien de la verticalité,
- En mesurant la prise de risque de la plante, son état de perturbation, provoqué par son environnement physique, et les réactions spécifiques qu'elle met alors en place,
- En explorant les corrélations entre des variables décrivant un état mécanique des individus étudiés et des variables d'environnement, comme la lumière.

# **I - Matériel et méthodes**

## ***1 - Situation géographique***

Notre zone d'étude est située en forêt tropicale humide primaire sur la commune de Sinnamary, à une soixantaine de kilomètres de Kourou (Guyane Française). Pour y accéder, on emprunte la piste de St Elie (D21). La placette retenue se trouve à environ 200 m des carbets IRD (53°0'W, 5°20'N). Elle occupe une position sommitale avec une pente assez faible, où prédominent des sols bien drainés (structure micro poreuse jusqu'à 1 m de profondeur, d'où un drainage vertical libre).

Afin de mettre au point un protocole standard d'observation, à l'échelle d'un peuplement, des stratégies utilisées par les individus pour le maintien de la verticalité et la maximisation de l'interception lumineuse, on cherche à obtenir un échantillon d'une centaine de jeunes arbres en phase critique de développement en hauteur (diamètre à 1,30 m compris entre 2,5 et 5 cm). Nous avons ainsi travaillé sur une parcelle circulaire d'environ 700 m<sup>2</sup>, divisée en quatre quartiers (les quartiers A et B étant plus pentus que les quartiers C et D) dans laquelle les individus ont été cartographiés en coordonnées polaires à partir d'un point central, par rapport au nord magnétique.



**photo 1 : Prise des distances et azimuts**

## 2 - Inventaire des arbres

Pour caractériser l'environnement des individus étudiés, outre un repérage des zones d'ombre et de lumière, un inventaire des « gros » arbres (de diamètre supérieur à 19 cm à 1.30 m ou à 1.80 m en présence de contreforts) a été réalisé dans la parcelle et à sa périphérie (bande d'une dizaine de m de largeur). 54 arbres ont ainsi été localisés et identifiés (cf tableau page suivante).

Gros Arbre n°	Famille	Genre	Espèce	Diamètre à 1.30 m (en cm)
A1	lecythidaceae	lecythis	idatimon	10.0
A2	icacinaceae	dendrobanja	boliviana	19.9
A3	caryocaraceae	caryocar	glabrum	34.5
A4	lecythidaceae	lecythis	persistens	11.6
A5	lecythidaceae	eschweilera	sagotiana	16.6
A6	chrysobalanaceae	licania	heteromorpha	12.3
A7	annonaceae	guatteria	schomburgkiana	10.8
A8	sapotaceae	chrysophyllum	prievrii	18.8
A9	caesalpinaceae	vouacapova	americana	19.1
A10	caesalpinaceae	eperua	falcata	20.8
B1	chrysobalanaceae	couepia	guianensis	17.5
B2	lecythidaceae	lecythis	idatimon	11.6
B3	tiliaceae	luheopsis	rugosa	28.3
B4	rhabdodendraceae	rhabdodendron	amazonicum	9.5
B5	lecythidaceae	eschweilera	sagotiana	10.7
B6	caesalpinaceae	eperua	grandiflora	12.1
B7	chrysobalanaceae	couepia	bracteosa	22.3
B8	chrysobalanaceae	licania	alba	13.5
B9	mimosaceae	inga	sp3	15.0
B10	euphorbiaceae	chaetocarpus	schomburgkiana	11.0
B11 et B12	arbres morts et pourris			
C1	lecythidaceae	lecythis	poiteau	10.7
C2	olacuaceae	mimquartia	guianensis	13.5
C3	lauraceae	licaria	chrysophylla	21.0
C4	caesalpinaceae	eperua	grandiflora	19.7
C5	chrysobalanaceae	couepia	guianensis	10.3
C6	lecythidaceae	eschweilera	sp1	39.0
D1	anacardiaceae	thyrsoodium	guianensis	9.9
D2	lecythidaceae	lecythis	poiteau	9.7
D3	caesalpinaceae	vouacapova	americana	17.7
D4	chrysobalanaceae	licania	alba	17.8
D5	caesalpinaceae	vouacapova	americana	27.4

**Tableau 1: Gros arbres à l'intérieur de la placette**

La carte des cent jeunes arbres étudiés et des gros arbres met en évidence une répartition relativement homogène (densité légèrement plus élevée dans la zone de plus forte pente).



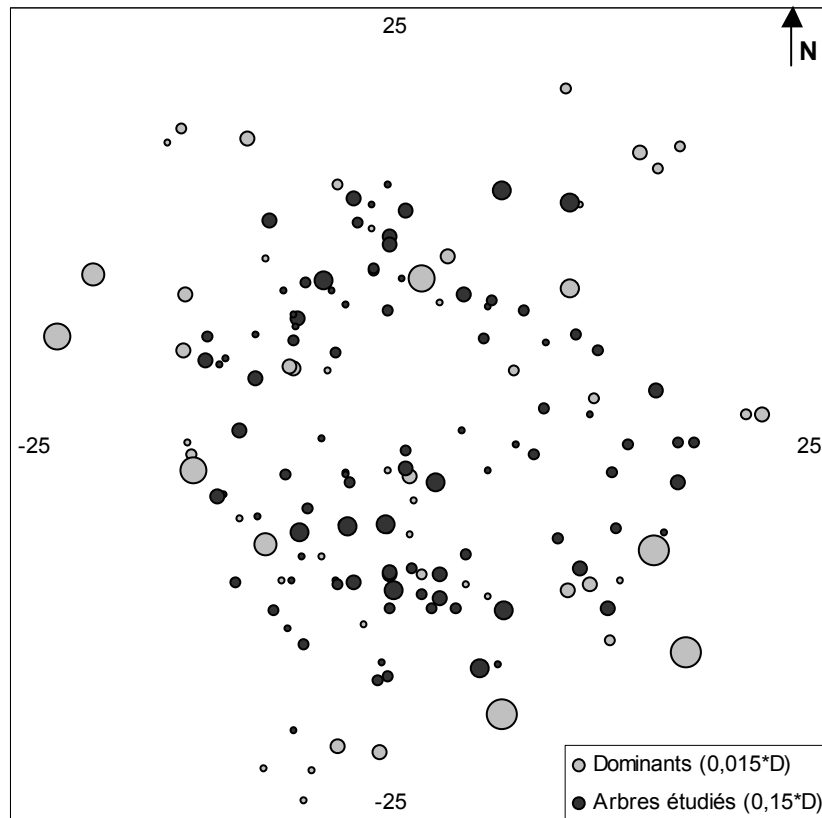


Figure 1 : Répartition des arbres

### 3 - Mesures de rigidité.

Pour chaque arbre, nous avons cherché à déterminer **la rigidité à la flexion** en suivant la déformation résultant de l'application de forces de différentes intensités. Les **rigidités globale et locale** sont mesurées grâce à deux méthodes et sont données par la pente des droites obtenues.

Pour l'application de la force, un câble est fixé à l'arbre à une hauteur de deux mètres. Ce câble passe par une poulie fixée à un trépied fabriqué par nos soins afin d'être adapté à la méthode de mesure. Au bout du câble, un plateau est suspendu, les différents poids y sont déposés. Le trépied est placé dans la direction où l'arbre est le plus penché. Les gammes de poids appliquées sont adaptées à la taille de l'arbre : de 1 à 5 kg pour les plus petits et de 2 à 12 kg pour les plus gros.

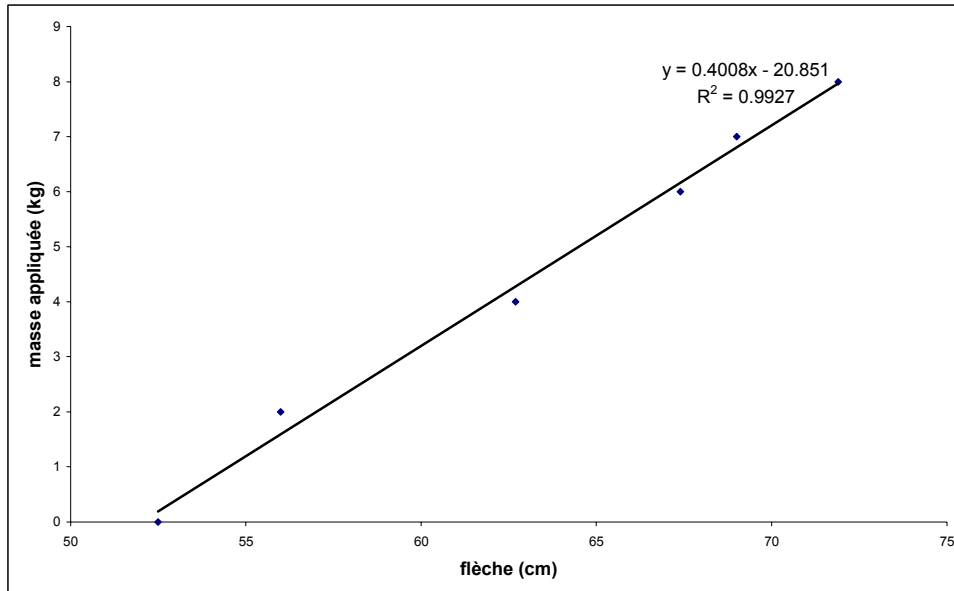
La **rigidité globale** est estimée à partir de la flèche (déplacement) de l'arbre suite à l'application des forces. Cette flèche est mesurée grâce au déplacement vertical du plateau lu sur un mètre accroché au trépied. L'angle formé par le câble avec l'arbre a été relevé avant chaque série de mesure pour permettre, ultérieurement, une correction et ainsi connaître les forces réellement appliquées.

On peut calculer la rigidité globale en posant certaines hypothèses (P. Langbour):

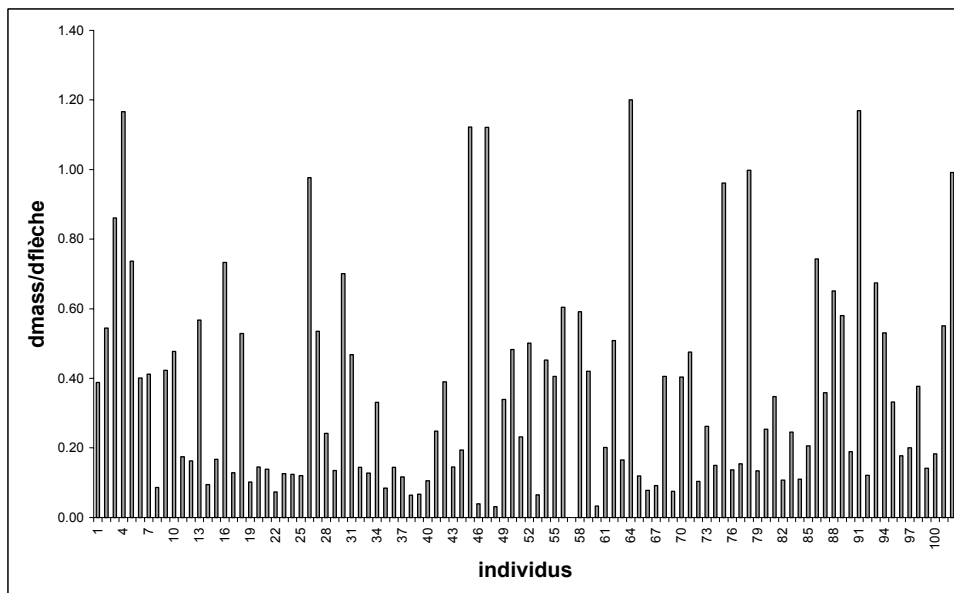
- l'arbre est un cylindre parfait,
- le bois est un matériau élastique et linéaire (l'arbre devrait revenir à sa position initiale dès qu'on enlève les poids),
- sa base ne bouge pas, c'est à dire que la tangente à la base est constante.

Dans ce cas, la rigidité globale **E** peut être calculée grâce à la pente de la droite « masse appliquée = f (flèche) ».

Il se trouve que l'on arrive à de bonnes relations linéaires entre la flèche de chaque arbre et la masse que l'on lui a appliquée, après élimination des points aberrants occasionnés par les erreurs de manip (poulie qui a sauté, houppier qui repose sur le trépied...).



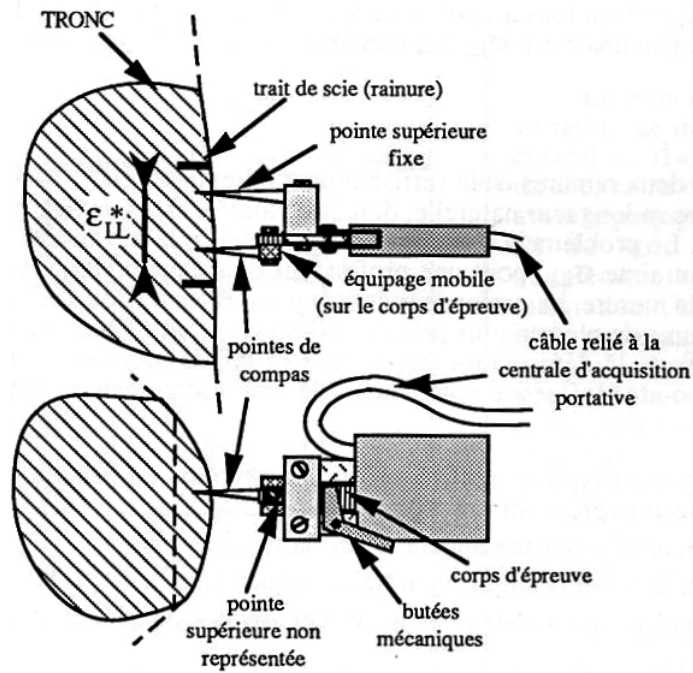
**Figure 2 : Flèche en fonction de la masse pour l'arbre 6 (Eperua grandiflora)**



**Figure 3 : Répartition de dmasse/dflèche**

Simultanément, pour estimer **la rigidité locale**, la déformation résultant de l'application des forces a été mesurée par un capteur HBM installé à 1m de hauteur sur l'arbre.

La méthode du capteur HBM permet d'une part de suivre une déformation sur un axe auquel on applique une force et d'autre part de mesurer la déformation longitudinale résultant du sciage manuel de deux rainures de part et d'autre du capteur extensométrique planté dans l'arbre, sur une zone écorcée. A géométrie fixée (base de mesure du capteur, distance des deux entailles aux pointes et profondeur du sciage), plus le retrait longitudinal est grand, plus la déformation mesurée par le capteur est grande.

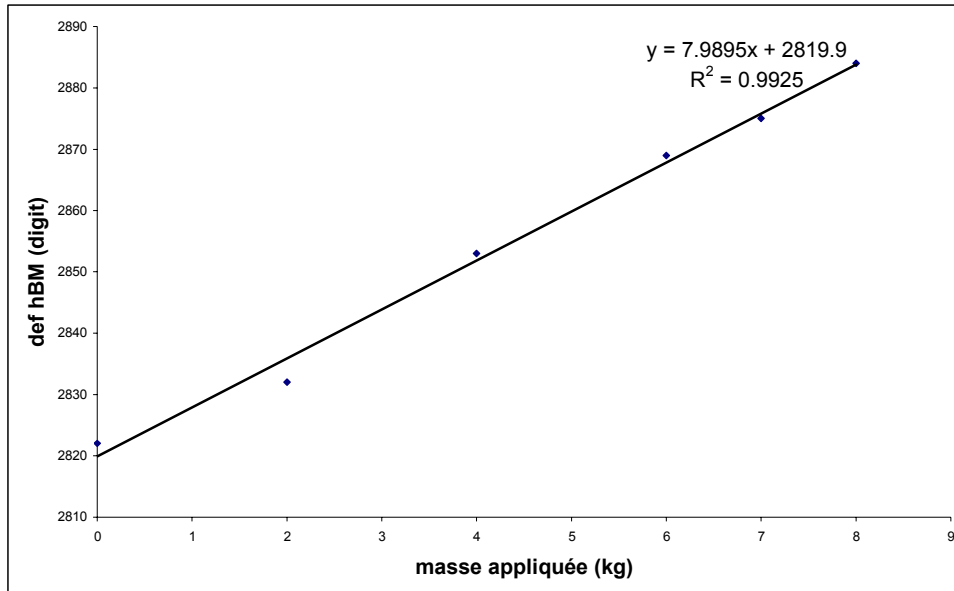


**Figure 4 : méthode Wap's- capteur HBM (Fournier et al.1994).**

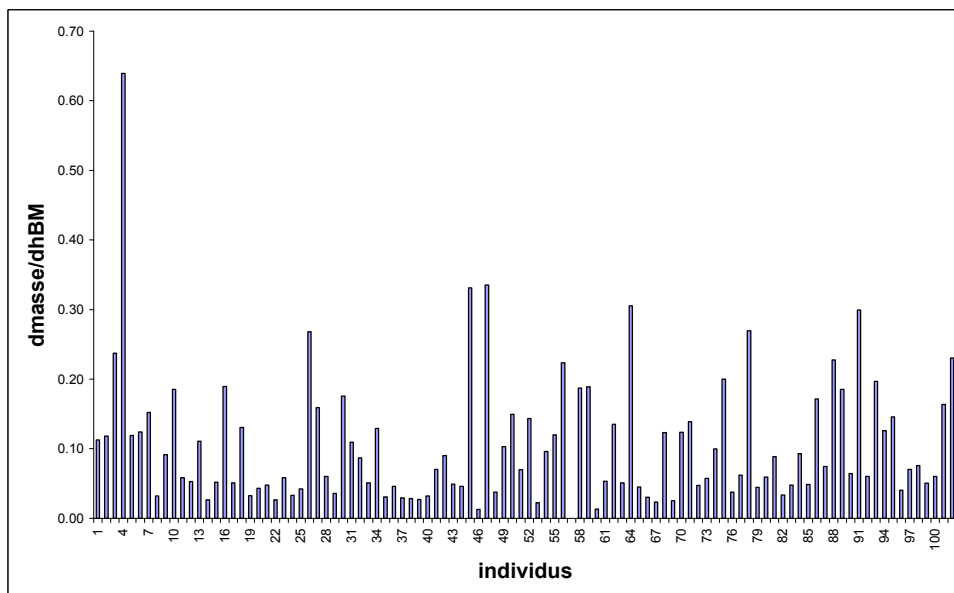
Le capteur utilisé est un extensomètre à jauges (montées en pont complet sur le palpeur) utilisé en milieu industriel (HBM ; type DD1). La course totale du capteur est de  $\pm 2,5$  mm et sa précision est de  $2/5^{\text{ème}}$  de microns). Pour l'étude, le capteur est équipé de deux pointes de compas 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 de 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 *et al.*, 1994).

Pour les mesures de rigidité locale à la flexion, le capteur est positionné sur l'arbre, à 1 m du sol, et les valeurs de déformation sont relevées à chaque application d'un nouveau poids. Cette mesure se fait en parallèle du suivi de la déformation globale.

On parvient également pour chaque arbre à de bonnes relations linéaires entre le HBM et la masse appliquée. La pente de la droite « masse = f(HBM) » donne également une idée de la rigidité, locale cette fois.



**Figure 5 : Masse appliquée en fonction de la déformation HBM pour Eperua grandiflora (arbre n°6)**



**Figure 6 : Répartition de dmasse/dHBM**

On remarque que l'obtention de l'indice de rigidité E, qu'il soit global ou local, ne dépend finalement que du matériau. C'est pourquoi on introduit ici un **indice de raideur EI**, plus rigoureux puisqu'il prend en compte également la géométrie de l'arbre.

$EI = f[(E, \text{rayon de l'arbre à la hauteur de la prise de mesure})]$

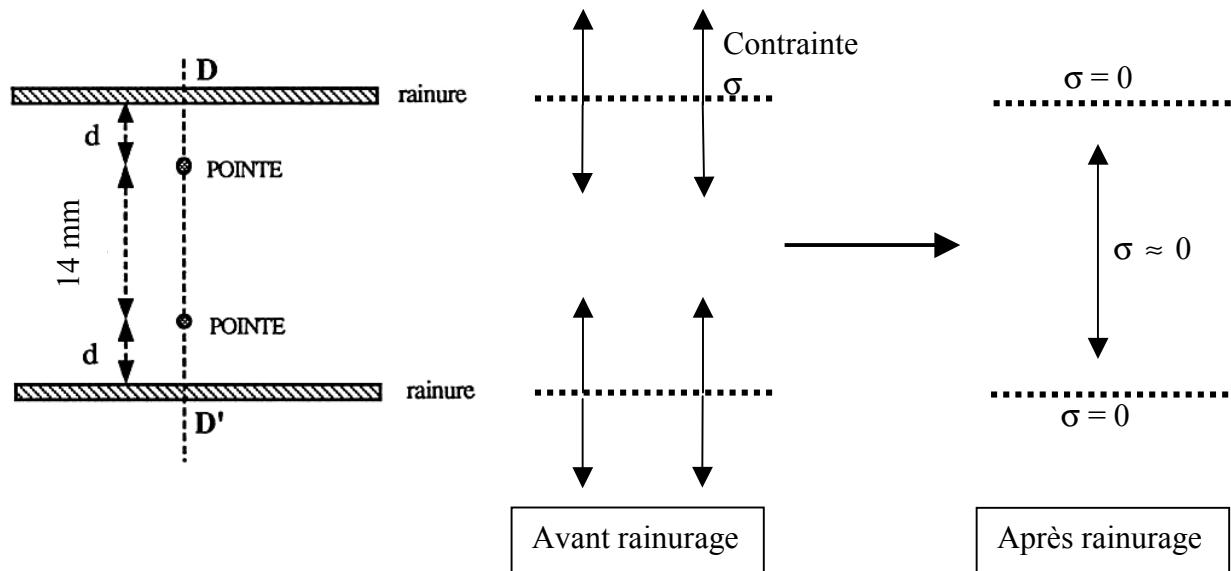
Les tensions périphériques de l'arbre ont également été mesurées. Dans ce cas, le capteur est planté à 50cm du sol (pour tous les arbres), puis, pour chaque arbre, à l'endroit présentant, entre 0 et 2m, la plus forte inclinaison. Pour les deux hauteurs, une mesure est faite sur chaque face de l'arbre (face supérieure de la partie inclinée et face opposée). La prise de mesure s'effectue comme suit :

- écorçage

- positionnement du capteur avec butée de protection abaissée, on la relève ensuite afin d'effectuer la mise à zéro sur la base de mesure
- usinage de la première rainure ; dès que la valeur affichée par la centrale d'acquisition se stabilise alors que le sciage se poursuit, on passe à l'autre rainure

On procède de la même manière pour la seconde rainure ; en fin d'opération, on note la valeur quasi-instantanée.

La mesure en elle-même (du début du sciage au relevé de la valeur) dure environ 2 min. 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 7 : 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 :

$$\text{Déformation} = (L_{\text{fin}} - L_{\text{ini}}) / L_{\text{ini}} \text{ avec } L_{\text{ini}} = 14 \text{ mm.}$$

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, *ie* le retrait, est élevée plus le bois est tendu.

#### **4 - pesée du matériel végétal**

Une fois les mesures de flexion faites, l'arbre est coupé.

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

- hauteur totale
- développement horizontal du houppier : a été mesurée la projection orthogonale de la branche la plus grande du houppier. On peut évaluer l'erreur relative de mesure d'une telle méthode à environ 10 %.

- 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. Les parties vertes ont enfin été isolées. Après avoir procédé à l'identification phylogénique, des pesées ont été effectuées directement sur le terrain (masse humide) puis après séchage (masse sèche, indicateur de la vitalité de l'arbre).

La surface foliaire a été enfin mesurée au laboratoire : en scannant un échantillon d'une quinzaine de feuilles par arbre, puis par une extrapolation utilisant la masse sèche des feuilles, on obtient la surface foliaire totale de l'arbre.



**photo 2 : Pesée du feuillage**

## **5 – Variables utilisées**

### **Morphologie de l'arbre**

identification	famille, genre, espèce
localisation : distance au centre (en m) et angle polaire 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 (estimé par régression linéaire), 2 m, puis tous les 2 m
diamètre moyen de l'arbre $d_{\text{moy}}$ (en cm)	obtenu à partir du volume du tronc $V = d_{\text{moy}}^2 \pi h / 4$

masses (en kg)	obtenues par découpage du tronc en segments
développement horizontal du houppier (en 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 $L_{12} = h_2 - h_1$
architecture	cf annexe
type de forme	cf annexe
distance G (en m)	G : centre de gravité
volume du tronc (en cm <sup>3</sup> )	obtenu en approchant le tronc par une succession de cônes tronqués
masse des feuilles (en kg)	masse humide et masse sèche

### Comportement mécanique de l'arbre

hauteur d'accrochage du cable (en m)	
angle du cable par rapport à l'horizontale (en degrés)	> 0 si la poulie est plus haute que le point d'accroche < 0 sinon
poids sur le plateau (en kg)	de 1 à 24 kg (masse du plateau : 1,8 kg) (0) : pas de poids pesée (1) : première (2) : seconde pesée...
position du plateau "cable tiré" p (en cm)	(0) : pas de poids pesée (1) : première (2) : seconde pesée...
déformation hbm (sans unité)	$h = 1 \text{ m}$ 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
dcable/dmasse (en cm/kg)	pente de l'approximation linéaire $p = f(\text{poids})$
$R^2$ cable	coefficient de corrélation de l'approximation linéaire $p = f(\text{poids})$
dHBM/dmasse (en digit/kg)	pente de l'approximation linéaire def HBM = $f(\text{poids})$
$R^2$ HBM	coefficient de corrélation de l'approximation linéaire def HBM = $f(\text{poids})$
angle cable/tronc $\theta$ (en degré)	inclinaison moyenne du tronc calculée en affectant les poids suivants aux hauteurs : base : 25 cm 50 : 75 cm 150 cm : 100
rigidité EI cable (en N.m <sup>2</sup> )	formule de la poutre console : $EI_{\text{cable}} = (d_{\text{masse}}/d_{\text{cable}}) * g * H^3 / 3$
	formule de la poutre cylindrique : $EI_{\text{local}} = (d_{\text{masse}}/d_{\text{HBM}}) * g * \cos\theta * h_{\text{mesure}} * d_{1m} / h_{\text{acc}}$
E global (en Mpa)	$E_{\text{global}} = EI_{\text{cable}} / (\pi * r^4)$ r : rayon de l'arbre à 1 m
E local en Mpa)	$E_{\text{local}} = EI_{\text{cable}} / (\pi * r^4)$ r : rayon de l'arbre à 1 m
masse critique (en kg)	Formule du flambement d'Euler : $m_c = 2,4674 * EI_{\text{cable}} / rG^2$

coefficient de sécurité massique	$C_{sm} = m_c/m_{tronc}$
masse volumique du tronc $\rho$ (en $g/cm^3$ )	
hauteur critique (en m)	$h_c = 1,26*(r_{base}^2/\rho)^{1/3}$
coefficient de sécurité en hauteur	$C_{sh} = h_c/h_{tronc}$

### Variables environnementales

LAI	
-----	--

### Variables interactions arbres/environnement

surface foliaire (en $m^2$ )	
coefficient d'humidité	
développement horizontal du houppier	



## II - TRAITEMENT DES DONNEES

Après le travail sur le terrain, est venu celui de l'analyse des données. Il fut choisi de traiter cinq sujets :

- Une étude sur la stratégie de redressement des arbres en milieu tropical.
- Une étude de la corrélation entre inclinaison du tronc et dissymétrie de DRLM.
- Une évaluation des prises de risques.
- Une recherche de stratégie entre espèces ou groupes d'espèces.
- Une recherche de l'influence de la lumière.

### *1 – Etude sur la stratégie de redressement des arbres en milieu tropical*

#### *1.1 - Le redressement « secondaire » : une stratégie courante*

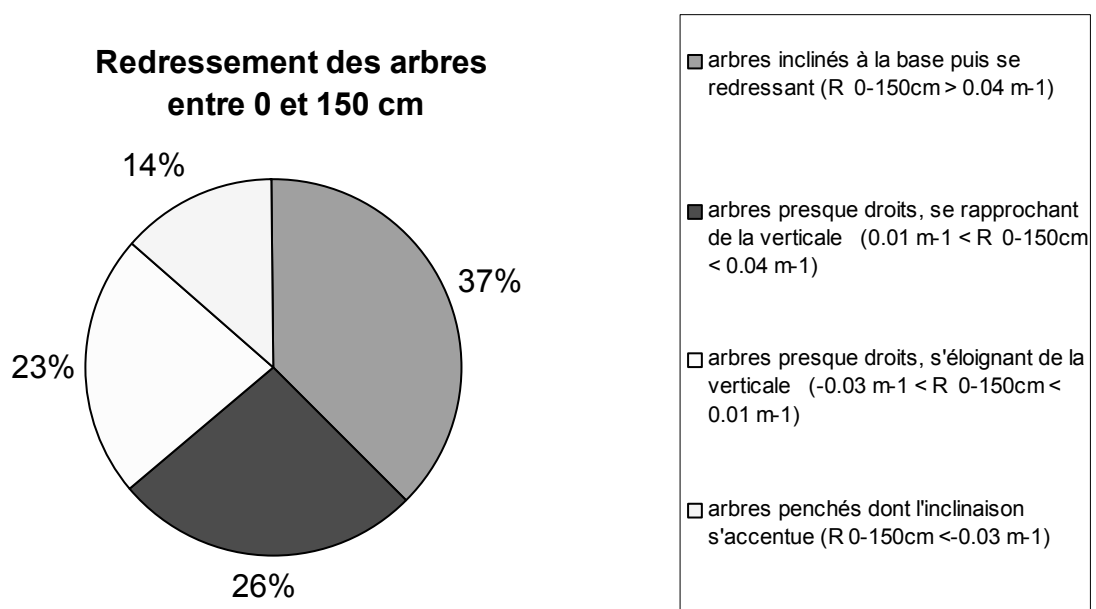
Les jeunes individus penchés mettent parfois en place une stratégie de redressement secondaire par formation de contraintes de maturation dissymétriques : il y a alors mise en place de bois de tension sur la face supérieure (opposée à la direction de l'inclinaison).

Nous nous sommes interrogés sur la proportion d'arbres adoptant une telle stratégie. Deux approches ont été retenues :

- une vision « intégratrice dans le temps », basée sur une comparaison des courbures des troncs à différentes hauteurs,
- une vision « instantanée », reposant sur l'analyse des différences de DRLM constatées entre les faces supérieure et inférieure, à 50 cm de hauteur.

#### 1.1.1 - Vision « intégratrice dans le temps »

Pour répondre à cette question, nous avons travaillé sur 96 arbres parmi les arbres étudiés.



**Figure 8 : Redressement des arbres entre 0 et 150 cm**

Le bois de pré-tension se révèle efficace. En effet, près de la moitié (49 %) des arbres étudiés peuvent être considérés comme droits ( inclinaison  $\leq 9.10^{-2} \text{ rad}$ ).

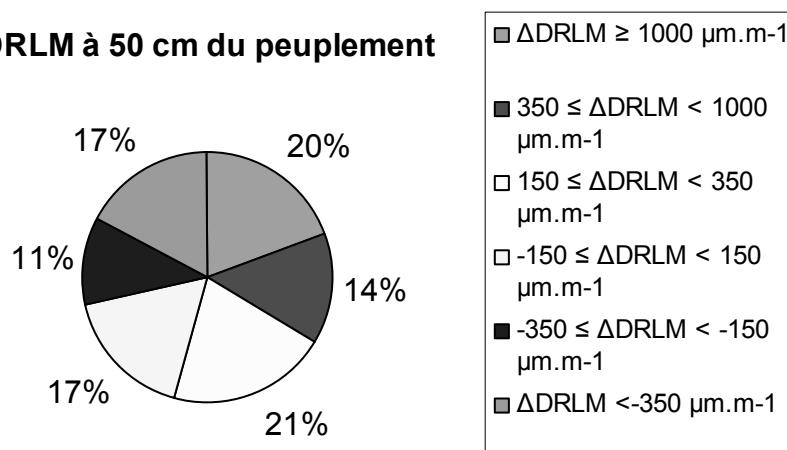
Parmi les arbres penchés, 75 % se redressent (redressement entre la base et 150 cm supérieur à  $0.04 \text{ m}^{-1}$ ) : il s'agit donc d'une stratégie **courante** utilisée par les jeunes arbres pour assurer le maintien de leur verticalité.

Enfin, certains arbres ne se redressent pas de façon marquée (redressement entre la base et 150 cm inférieur à  $-0.03 \text{ m}^{-1}$ ). On peut remarquer qu'en général, leur houppier apparaît déséquilibré ou que leur tronc s'appuie sur d'autres arbres ou lianes.

### 1.1.2 - Vision « instantanée »

Dans ce second volet, nous avons travaillé sur 98 arbres parmi les arbres étudiés.

**$\Delta\text{DRLM}$  à 50 cm du peuplement**



**Figure 9 : DRLM dissymétrique à 50 cm**

Lors des expériences de flexion, pour 17 individus (18% des arbres étudiés), qui ne sont pas forcément des arbres droits, la différence de DRLM mesurée entre les faces supérieure et inférieure n'est pas significative : comprise entre  $-150$  et  $150 \mu\text{m.m}^{-1}$ , elle ne permet pas de conclure à une dissymétrie de contraintes entre ces deux faces. En effet, cet intervalle correspond à la marge d'erreur de la mesure (incertitude de  $60 \mu\text{m.m}^{-1}$  au niveau du capteur HBM étendue à  $150 \mu\text{m.m}^{-1}$  pour tenir compte des erreurs de manipulation).

La différence de DRLM traduit une forte dissymétrie pour 82% des arbres ( $|\Delta\text{DRLM}| > 150 \mu\text{m.m}^{-1}$ ) :

- $\Delta\text{DRLM} > 150 \mu\text{m.m}^{-1}$  : ces individus (54% du peuplement étudié) peuvent être regroupés en trois classes : dissymétrie *très forte* (19 individus), *marquée* (14 individus) ou *faible* (20 individus). Cette différence positive de DRLM signifie que ces arbres synthétisent du bois de tension à 50 cm sur la face opposée à leur inclinaison.
- $\Delta\text{DRLM} < 150 \mu\text{m.m}^{-1}$  : on trouve dans cet intervalle de  $\Delta\text{DRLM}$  28 % des arbres, pouvant être regroupés en deux catégories ( $\Delta\text{DRLM} < -350 \mu\text{m.m}^{-1}$  et  $-350 \leq \Delta\text{DRLM} < -150 \mu\text{m.m}^{-1}$ ).

Il convient de noter que trois cinquièmes d'entre eux (deux individus dans la classe  $\Delta\text{DRLM} < -350 \mu\text{m.m}^{-1}$  ; 14 dans la classe  $-350 \leq \Delta\text{DRLM} < -150 \mu\text{m.m}^{-1}$ ) ont des inclinaisons à la base, à 50 cm et à 150 cm inférieure à 5 : la direction d'inclinaison est donc difficile à évaluer et il est probable que la dissymétrie de DRLM soit en fait positive. Ainsi, 17 % des

arbres possèderaient une dissymétrie marquée entre les faces opposées et 35% une dissymétrie faible.

Il faut remarquer que, pour huit arbres (8% de l'échantillon), les mesures de DRLM semblent montrer la présence de bois de tension sur l'une des faces, et de bois de compression sur l'autre face. Ce phénomène est certainement à relier à l'histoire de l'arbre et sa stratégie interne : à l'exception de deux d'entre eux, pratiquement droits, les autres ont subi un traumatisme, été entravés dans leur croissance entre 0 et 50 cm ou présentent un houppier très déséquilibré.

## ***2 - Etude de la corrélation entre inclinaison du tronc et dissymétrie de DRLM***

Les mesures de DRLM dissymétriques témoignent d'une réaction de l'arbre, en général gravitropique d'après la littérature (les arbres inclinés se redressent). On s'attend donc à une certaine relation entre inclinaison et dissymétrie de DRLM.

Néanmoins, la DRLM étant une grandeur instantanée (elle mesure la qualité du bois récemment créé et la réaction cambiale en cours) et l'inclinaison étant le résultat de tout le processus de croissance primaire et secondaire, la corrélation entre inclinaison du tronc et dissymétrie de DRLM n'a rien d'immédiat.

D'une façon théorique, différentes possibilités sont présentées:

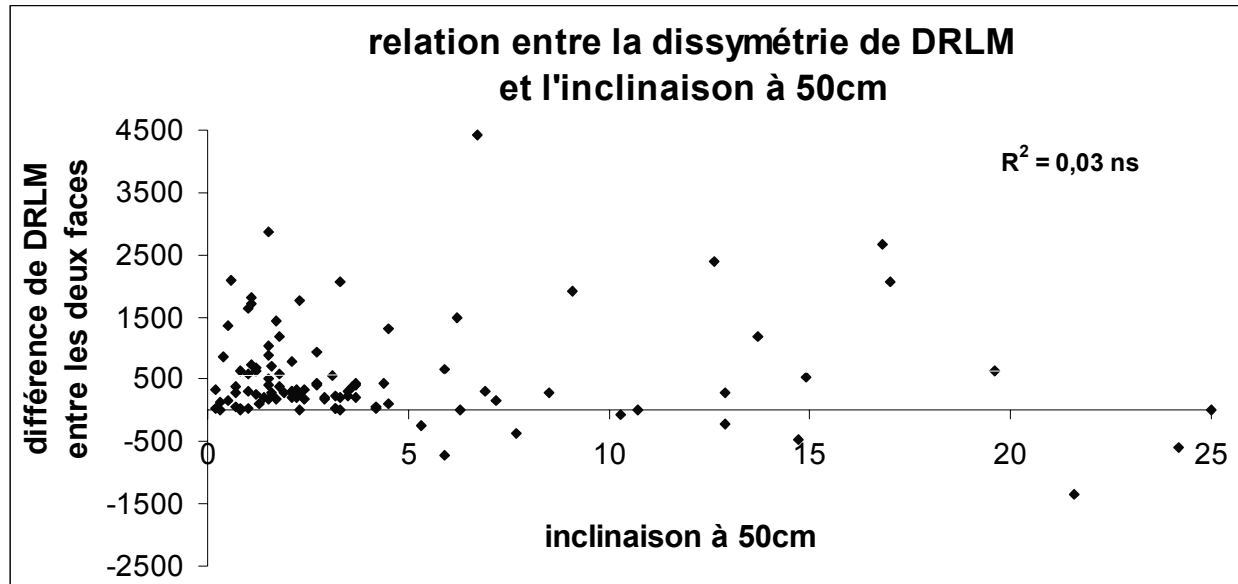
**a-si on trouve que la réaction augmente avec l'inclinaison avec des valeurs faibles d'inclinaison, cela peut s'interpréter comme le témoignage d'une bonne efficacité de la réaction** : les arbres réagissent dès qu'ils sont inclinés sont droits et n'a pas ou plus besoin de se réorienter donc de réagir.

**b-bonne corrélation et valeurs élevées, faible efficacité** : l'arbre réagit à une forte inclinaison en construisant du bois de tension, le redressement n'est pas encore flagrant car la réaction est récente ou bien la stratégie n'est pas efficace et l'arbre réagit mais ne se redresse pas.

**c-mauvaise corrélation, forte inclinaison et faible dissymétrie**: cas où le temps de réponse a été insuffisant, l'arbre encore penché n'a pas encore eu le temps de réagir ou bien n'en est pas capable.

**d-mauvaise corrélation, faible inclinaison et forte dissymétrie** : arbre droit, qui vient de finir son processus de redressement, qui présente encore une dissymétrie de DRLM, qui a pu être mesurée pour la position du bois de tension, juste au-dessous de l' écorce.

La relation entre la dissymétrie de DRLM et l'inclinaison à 50 cm est montrée dans le graphique suivant. La valeur du coefficient de corrélation montre qu'il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres pour étudier le redressement.



**Figure 10 : Inclinaison des arbres à 50 cm en fonction de la différence de DRLM**

La formation de bois de tension s'exprime par une différence de DRLM entre les faces opposées, ce qui induit une variation de courbure par unité de croissance  $ds$  :  $dc/ds$  au niveau de la section droite  $s$  (ici on s'intéresse à la section à 50 cm du sol, où les mesures de DRLM ont été faites).

Si on considère les expressions de la variation de la courbure  $c$ , selon la différence de DRLM et de la surface de la section horizontale (Fournier 1989, Fournier et al. 1994, Fourcaud 1995) :

$$dc = (2 \text{ DRLM diss} / R^3) dR \quad (1)$$

avec:

DRLM diss: la dissymétrie de DRLM entre les faces opposées à 50 cm

$R$  : rayon de l'arbre à 50 cm

$dR$  : accroissement en rayon lors de la croissance cambiale

$$s = \pi R^2 \quad ds = 2 \pi R dR \quad (2)$$

donc la variation de courbure induite par unité de croissance en surface (sur la section droite mesurée à 50cm du sol) est :

$$dc/ds = \text{DRLM diss} / \pi R^3 \quad (3)$$

Cette grandeur s'exprime en  $m^{-1}$  de courbure par  $m^2$  de croissance en surface . Il s'agit d'un **potentiel de réorientation** par unité de croissance cambiale.

Une courbure est définie comme une variation d'inclinaison le long du tronc :  $c = d\theta/dl$  ( $\theta$  = inclinaison,  $l$  = position le long du tronc). Ce n'est pas une grandeur géométrique couramment manipulée. Pour mieux se représenter les ordres de grandeur des redressements secondaires, on représente la variation de courbure (1) par la variation d'angle  $\Delta\theta$  sur  $\Delta l = 1$  mètre de tronc, pour  $2\Delta R = 1$  cm d'accroissement en diamètre :

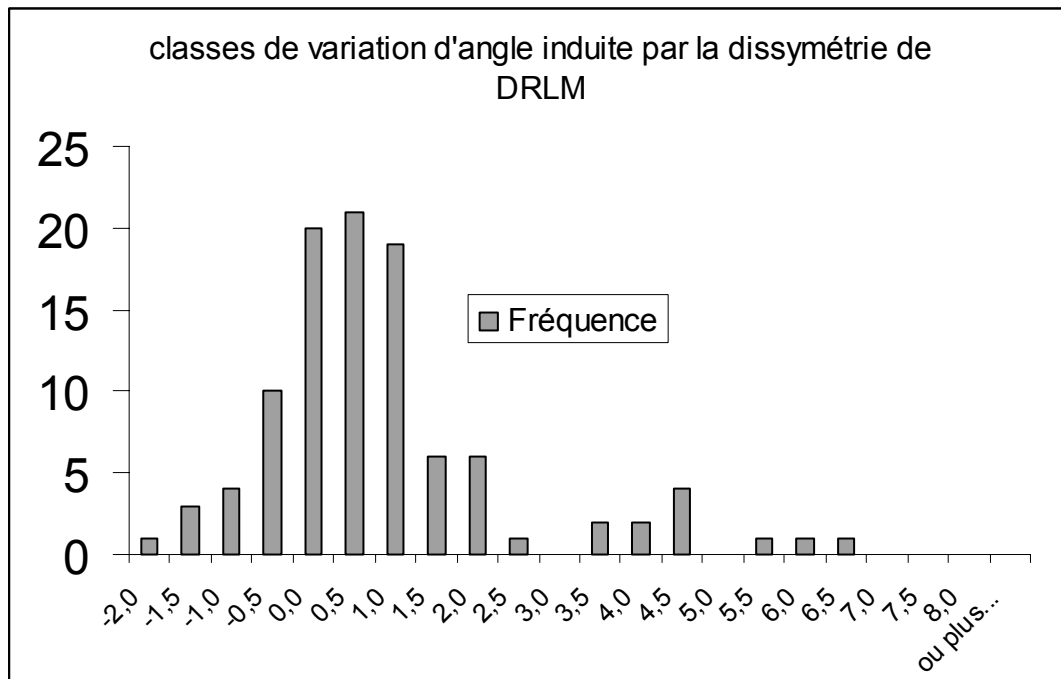
Considérant (1) et intégrant entre  $R_{50}$  et  $R_{50} + \Delta R = 0,5\text{cm}$  :

$\Delta\theta$  (sur un mètre de long et pour un accroissement de 1cm en diamètre)

$$=\Delta c \times 1m = \int (dc/dR) \cdot dR = \int (2 \text{ DRLM diss } / R^2) \cdot dR$$

$$\begin{aligned} \text{et } \int (2 \text{ DRLM diss } / R^2) \cdot dR &= 2 \text{ DRLM diss } \left[ -1/R \right]_{R_{50}}^{R_{50+0,5}} \\ &= 2 \text{ DRLM diss } \left[ -1/(R_{50}+0,5) + 1/R_{50} \right] \end{aligned}$$

La figure suivante donne la distribution des  $\Delta\theta$  (en degrés sur un mètre de long et pour un accroissement de 1cm en diamètre) calculés sur l'ensemble de nos arbres.



**Figure 11 : Distribution des  $\Delta\theta$  calculés sur l'ensemble de nos arbres**

Il apparaît qu'environ 60% des arbres ont un potentiel de redressement, pour un accroissement de 1cm en diamètre, compris entre 0 et 1,5 degrés sur 1m à la base. Ce potentiel montre que les réorientations par la croissance cambiale sont en général très lentes. Il y a également 11% d'arbres qui présentent un plus fort potentiel de redressement *ie* compris entre 3,5 et 7 degrés (sur 1m à la base, pour 1cm de croissance en diamètre).

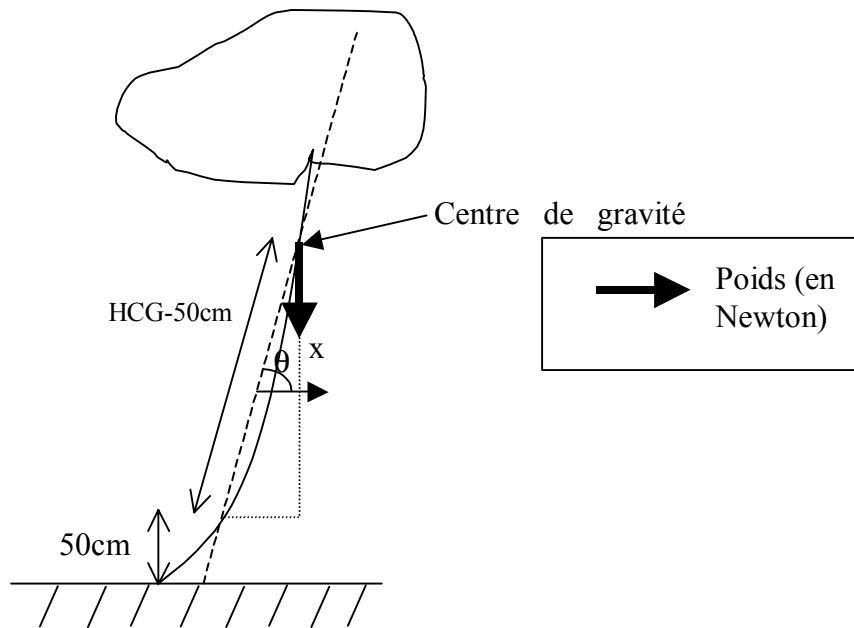
Plusieurs facteurs peuvent faire évoluer la courbure et donc la forme longitudinale des troncs. Parmi les facteurs externes, la gravité est prédominante. Elle a tendance à entraîner l'arbre vers le sol, d'autant plus s'il est incliné. A l'opposé, la dissymétrie des DRLM est une sorte de moteur interne de l'arbre qui tend, a priori, à le redresser. Quel est le facteur prédominant pour les arbres que nous avons observés ? Pour répondre à cela, nous devons estimer la variation de courbure due à la gravité.

Dans ce cas, la variation de la courbure est (Formulaire de Résistance des Matériaux) :

$$dC = d(\text{moment du poids})/EI$$

avec EI la rigidité à la flexion de chaque arbre, que nous avons tiré de nos mesures.

Nous considérons que la masse totale de l'arbre est concentrée au centre de gravité. Nous avons donc :



**Figure 12 : Les différents paramètres intervenants dans nos calculs**

Le moment du poids est donné par :

$$m = \text{masse totale} \cdot g \cdot x \quad \text{avec } x = (\text{hauteur du CG-50cm}) \cdot \sin \theta$$

donc

$$m = \text{masse totale} \cdot g \cdot (\text{hauteur du centre de gravité-50cm}) \cdot \sin \theta$$

La question est maintenant d'estimer  $dm$  pour un incrément de croissance  $ds_{50}$ .

L'angle  $\theta$  (inclinaison à 150cm) ne varie pas systématiquement avec  $s_{50}$ . C'est un paramètre propre mesuré sur chaque arbre.

Par contre, la hauteur du centre de gravité et la masse totale évoluent avec la surface de la section à 50cm. Nous n'avons pas les données nécessaires pour quantifier cette évolution pour chaque arbre. Nous cherchons donc à estimer une valeur moyenne. Sur un graphique (masse totale  $\cdot g \cdot (\text{hauteur du centre de gravité-50cm})$ ) en fonction de la surface de la section à 50cm ( $s_{50}$ ), il apparaît que les deux grandeurs sont fortement liées par une loi puissance :

$$\text{masse totale} \cdot g \cdot (\text{hauteur du centre de gravité-50cm}) = 569702 s_{50}^{1.57} = m'$$

avec  $R^2=0.60$

en dérivant, on a :

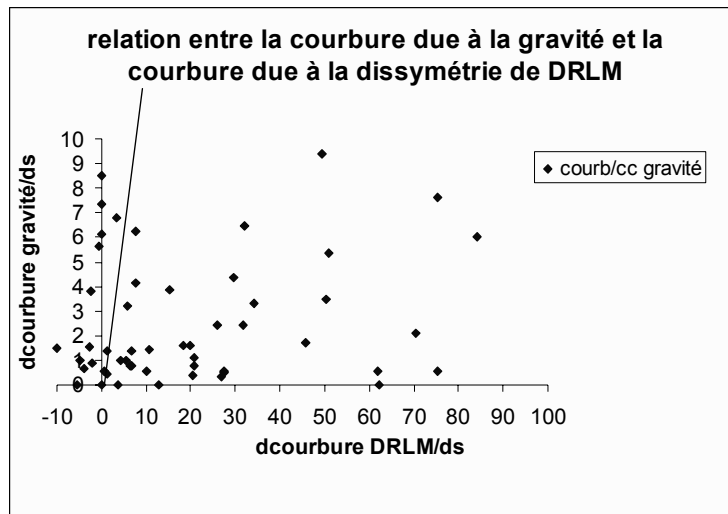
$$dm'/ds_{50} = \frac{569702 \cdot s_{50}^{1.5741}}{s_{50} \cdot 1.5741} \quad \text{où on retrouve } m' \text{ (partie soulignée de l'expression).}$$

$$\text{or, } dC = \sin \theta / EI \cdot dm'$$

$$\text{donc: } dC/ds_{50} = \sin \theta / EI \cdot dm'/ds_{50} = \sin \theta / EI \cdot 1.5741 \cdot m' / s_{50}$$

Remarque : en Guyane, la valeur de  $g$  est de  $9.83 \text{ N.m}^{-1}$

L'effet de la dissymétrie de DRLM sur la courbure a été exprimé dans la question précédente. Il est donc maintenant possible de comparer l'effet de cette dissymétrie avec celui de la gravité sur l'évolution de la courbure par unité de croissance.

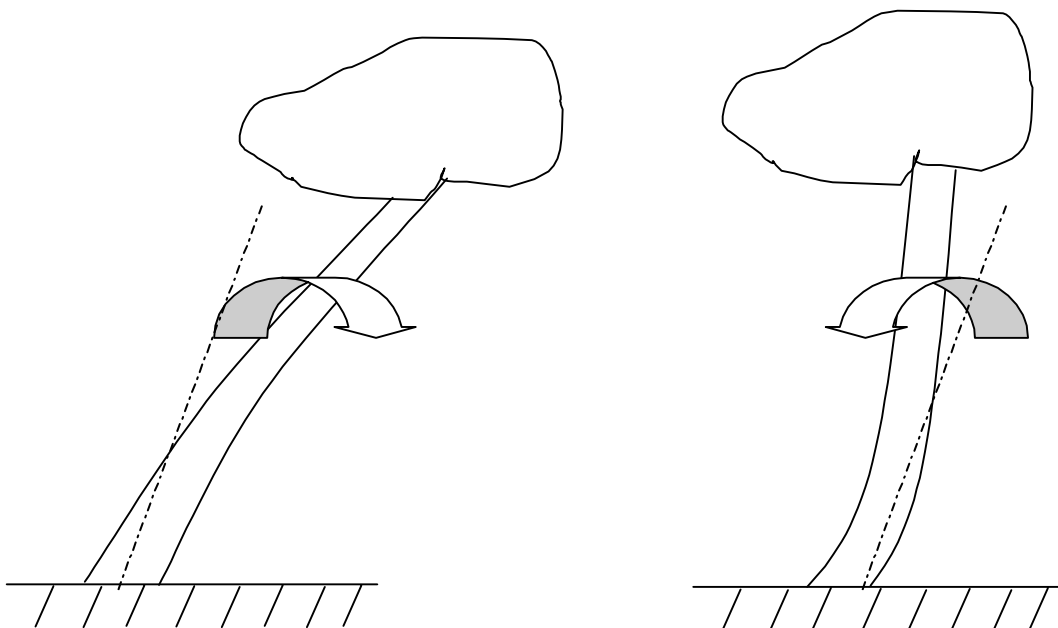


**Figure 13 : relation, pour chaque arbre, entre la courbure due à la gravité et celle due à la dissymétrie de DRLM. La droite représente  $y=x$**

Nous avons donc les deux cas suivants possibles:

Si la gravité a un effet prédominant:

Si la dissymétrie de DRLM l'emporte:



**Figure 14 : Deux cas possibles, soit la gravité l'emporte soit le moteur interne**

Il ressort que, pour une majorité d'arbres, la courbure est beaucoup plus influencée par la dissymétrie de DRLM que par la gravité. Donc, les arbres réagissent efficacement pour contrer la gravité. Ce résultat est vraisemblablement très caractéristique du stade de développement choisi (passage plantule installée – juvénile avec des diamètres de 2,5 à 5cm), sur des arbres de plus gros diamètres, le potentiel de redressement qui évolue en  $1/D^3$  risque rapidement de devenir très faible.

### 3 – Evaluation des prises de risques

#### 3.1 - Indices de prise de risque

##### 3.1.1 - Indice H/D130

Un indice couramment utilisé par les forestiers est le rapport hauteur totale de l'arbre / diamètre à 1m30 (ou dbh, « diameter at breast height »). Ce rapport peut être considéré comme un indice de prise de risque.

Oldeman (1974), propose une relation telle que :

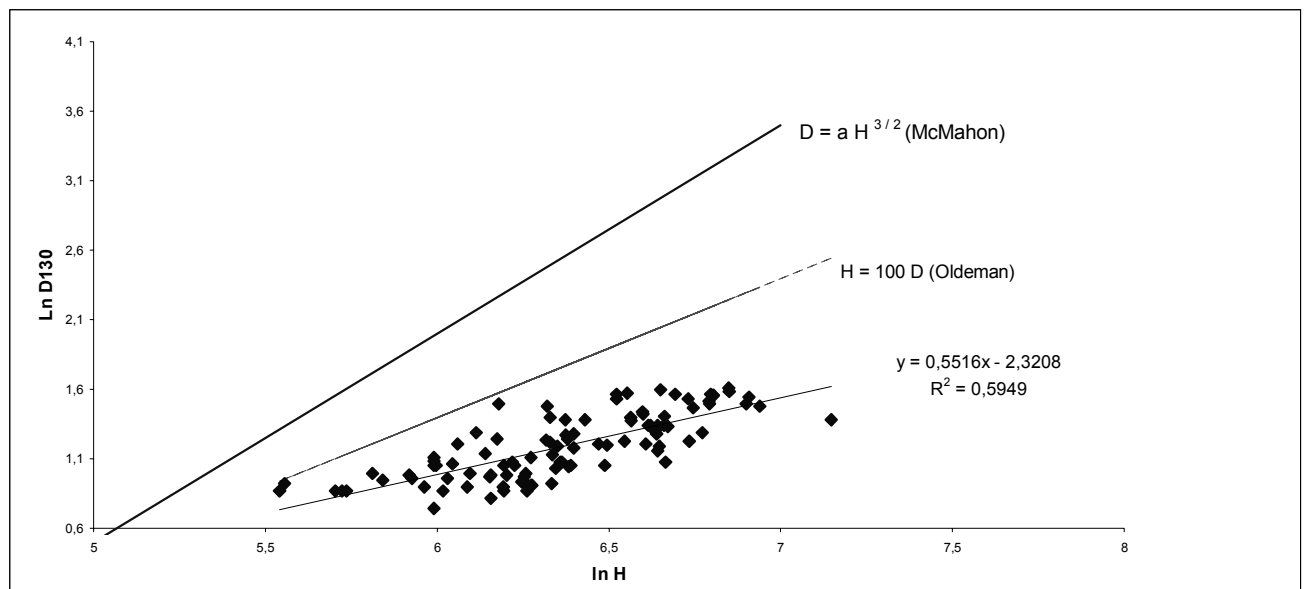
$$H = 100 \times D130$$

Soit  $\ln D130 = \ln H - \ln 100$

Mac Mahon (1973), quant à lui, estime que :

$$D130 = a H^{3/2}$$

Soit  $\ln D130 = 3/2 \ln H + \ln a$



**Figure 15 : Logarithme de la hauteur en fonction du logarithme du diamètre à 130**

Les données dont nous disposons répondent -avec une assez bonne corrélation- à la relation ci-dessous :

$$\ln D130 = 0.55 \ln H - 2.32$$

Soit  $D130 = 0.098 H^{0.55}$

#### Discussion :

$0.55 < 3/2$  et  $< 1$ , ce qui signifie que pour une même croissance en diamètre, nos individus croissent beaucoup plus vite en hauteur que les individus étudiés par Mc Mahon et Oldeman. Ceux-ci se sont intéressés principalement à des arbres adultes, ce qui n'était pas notre cas.



Il sera également intéressant d'étudier si la répartition en espèces ou groupes d'espèces influence la puissance de H ou même tout simplement le coefficient a (cf. partie suivante).

### 3.1.2 - Autres indices de risque : Rh et Rm

Nous nous sommes intéressés à deux indices qui peuvent quantifier le risque pris par chaque arbre.

Rh est le risque pris par l'arbre en croissant en hauteur, Rm est le risque pris par l'arbre en augmentant sa masse.

**Rh** = Hauteur de l'arbre / Hauteur critique

**Hauteur critique** = f ( rayon à la base<sup>2</sup>, volume massique) (Niklas 1992)

Rh est normalement toujours < 1 si l'arbre est autoportant. L'arbre n°27 (Inga sp) n'était pas autoportant, et il présente un Rh de 1.31 ce qui correspond bien à la signification de la formule. Au contraire, on a obtenu des valeurs supérieures ou très proches de 1 pour des arbres autoportants.

**Rm** = Masse de l'arbre / Masse critique

**Masse critique** = f ( coefficient de raideur EI, inverse de la hauteur du centre de gravité<sup>2</sup>) (Niklas 1992)

Rm représente en fait la masse qu'il faudrait appliquer au centre de gravité de l'arbre pour qu'il se plie sans revenir à sa position initiale (soit il resterait en position penchée stable, soit il s'écroulerait).

Rm est également normalement < 1 si l'arbre est autoportant.

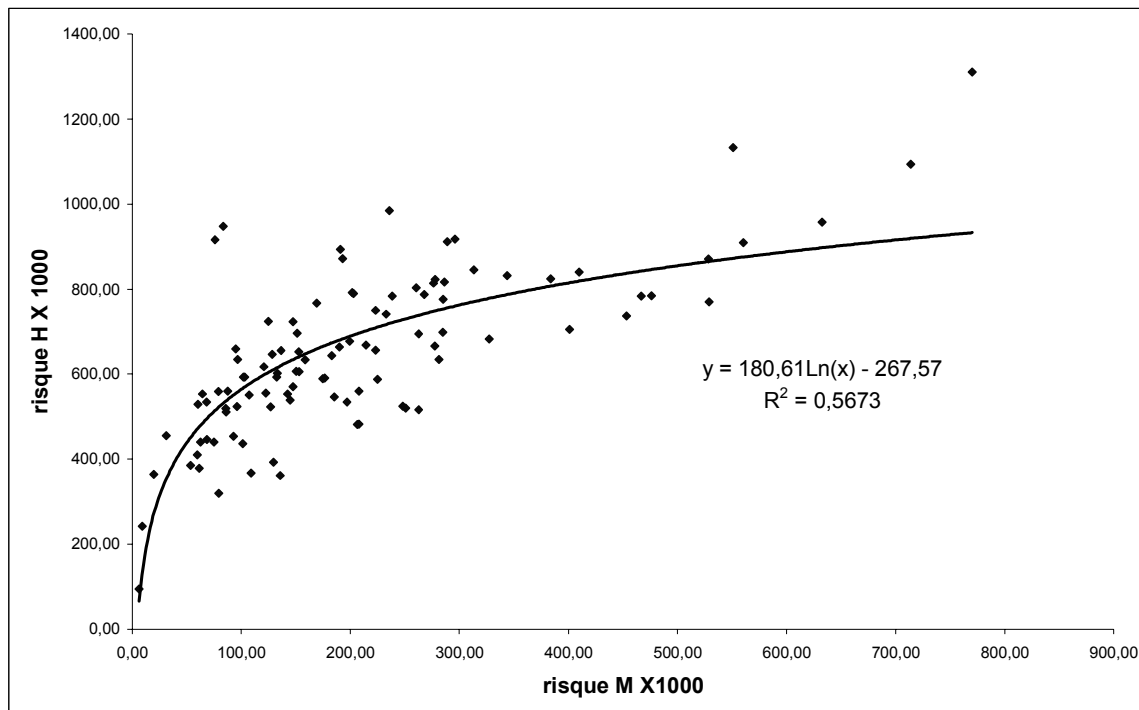
Il faut remarquer que ce ne sont pas forcément les plus grands arbres qui sont les plus proches de la hauteur critique, ni les plus lourds qui sont les plus proches de la masse critique. La hauteur critique de chaque arbre est calculée pour une masse donnée ; de même la masse critique est calculée pour une hauteur donnée.

### 3.1.3 - Y a-t-il une relation entre ces indices de risque ?

	Rm	Rh
Moyenne	0,00535	0,32679
Maximum	0,06892	1,02579
Minimum	0,00001	0,05182
Ecart-type	0,01021	0,24389

Rh est beaucoup plus important que Rm, ce qui amènerait à penser que les arbres étudiés prennent beaucoup plus de risque en poussant en hauteur qu'en grossissant. Cependant, cette grosse différence entre les ordres de valeurs de Rh et Rm est peut-être juste due au fait que Hcritique et Mcritique n'ont pas du tout la même signification dans la bibliographie. Ces deux indices ne sont d'ailleurs jamais comparés dans la biblio car on a rarement accès à la masse des individus.

Cela est peut-être dû au fait que nous nous sommes intéressés à de jeunes arbres. Par la suite, nous étudions si la prise de risque est influencée par le comportement des différentes espèces représentées (espèces pionnières ou de sous-bois).

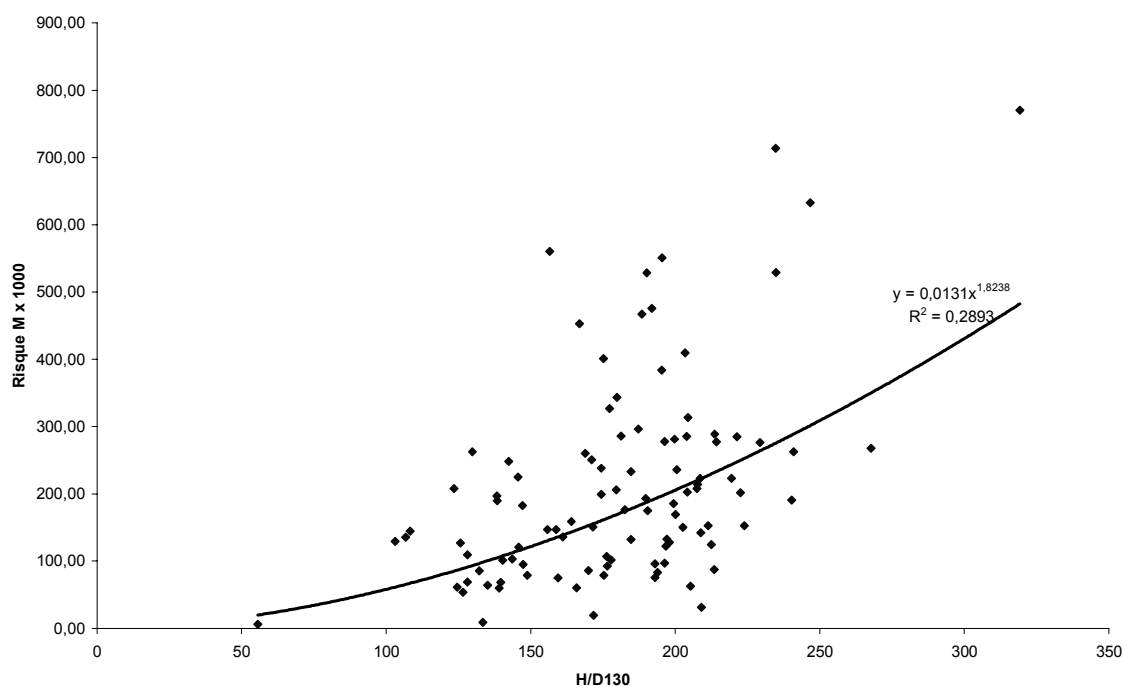


**Figure 16 : Relation entre le risque en hauteur et le risque en masse**

Rh et Rm semblent bien corrélés par une relation logarithmique, mais cette relation n'est-elle pas induite par la façon de calculer Rh et Rm ? (Cependant, nous ne sommes pas parvenus à mettre en évidence une telle relation mathématique par les formules de Rh et Rm.)

Lorsque le risque en masse augmente, le risque en hauteur augmente donc également, mais plus lentement. Il semble qu'il existe un seuil pour Rm vers 0,8 (c'est à dire que la hauteur de l'arbre est égale à 80% de sa hauteur critique).

Ensuite, nous nous sommes intéressés à une potentielle relation entre le risque (calculé selon Rh et Rm) et le rapport H/D130. En effet, cela simplifierait considérablement la collecte de données (mesurer juste H et D130) pour évaluer le risque pris par chaque arbre.



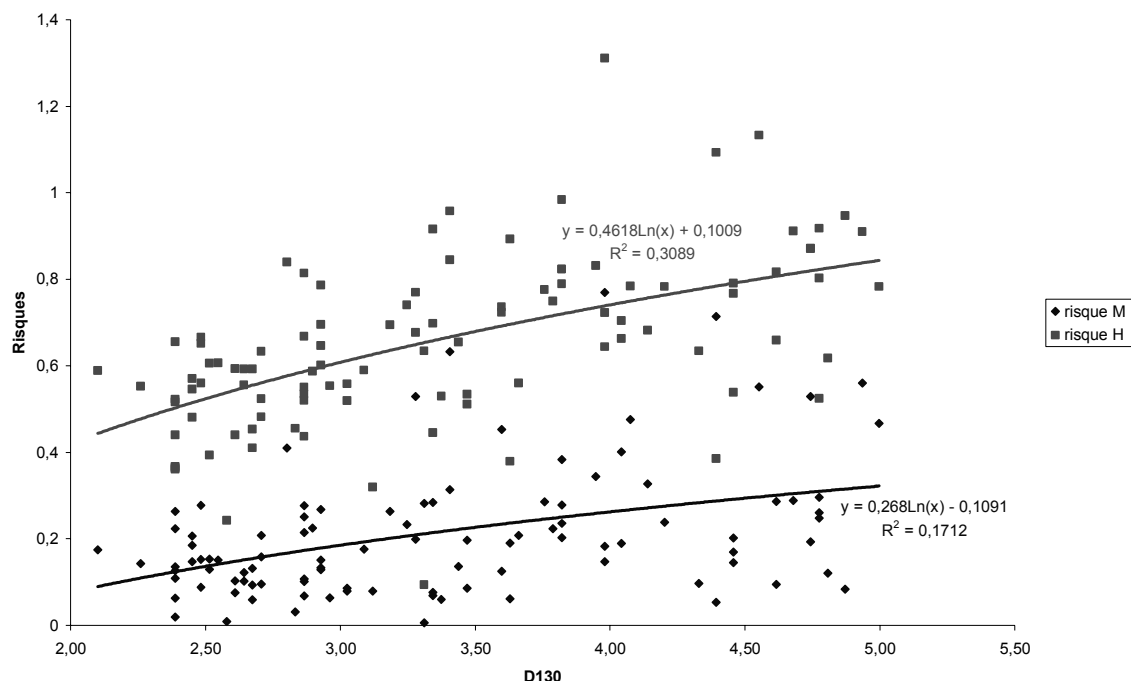
**Figure 17 : Risque en hauteur en fonction du rapport H/D130**

Ces graphique montre qu'il existe une relation entre le rapport H/D130 et la prise de risque. Par conséquent, il pourrait être plus simple de mesurer seulement les hauteurs et diamètres à 130 cm.

### 3.2 - Quels sont les arbres qui prennent des risques?

#### 3.2.1 - Est-ce que ce sont ceux qui ont un petit diamètre ?

Nous pourrions penser que ce sont les petits arbres qui peuvent se permettre de prendre beaucoup de risque : ils n'ont pas encore beaucoup investi dans leur croissance. Par contre, un gros arbre s'abstiendrait de prendre des risques.



**Figure 18 : Facteur de risque en hauteur en fonction du diamètre à 130 cm**

Les résultats présentés sur le graphique ci-dessus montrent qu'au contraire ce sont les arbres au plus grand diamètre qui prennent le plus de risque. Dans ce cas, les petits diamètres chercheraient quand même à s'assurer une première stabilité avant de prendre des risques.

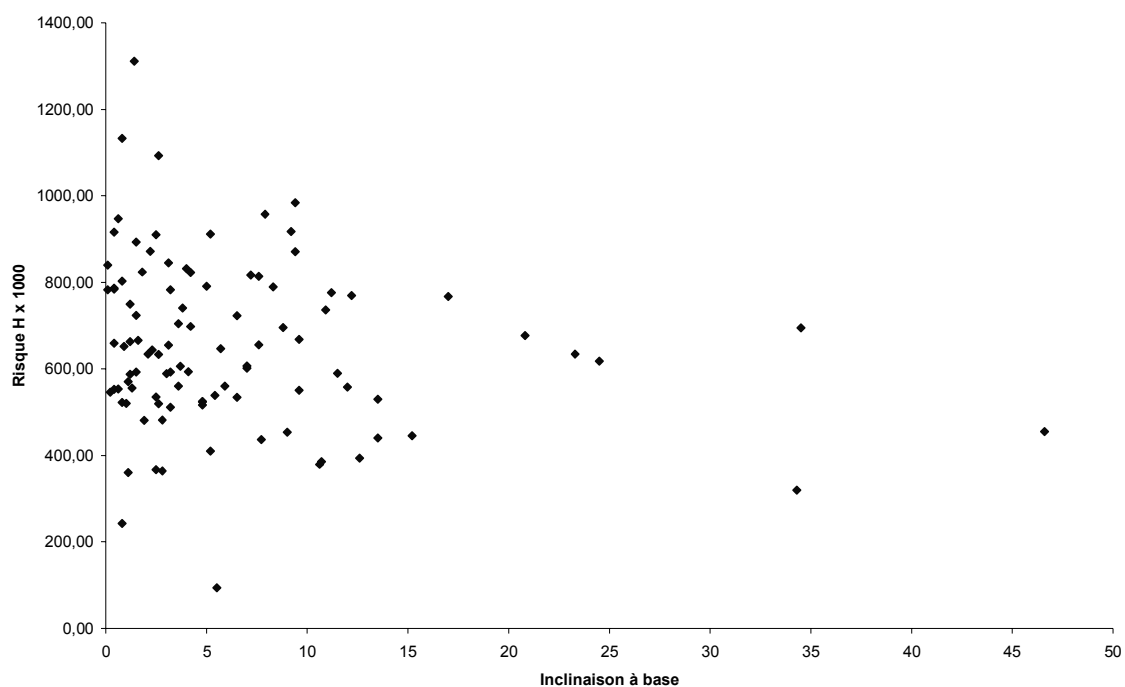
#### 3.2.2 – Est ce que ce sont les arbres penchés?

Afin d'observer l'effet de l'inclinaison des arbres sur les risques qu'ils prennent, nous avons tracé plusieurs graphiques qui expriment le facteur de risque en hauteur en fonction de différentes inclinaisons. Dans un premier temps, nous avons utilisé les inclinaisons à la base, à 50 cm et à 150 cm qui ont été mesurées sur le terrain. Puis dans un deuxième temps, nous avons regardé la corrélation entre le facteur de risque et l'inclinaison la plus forte et la somme des inclinaisons.

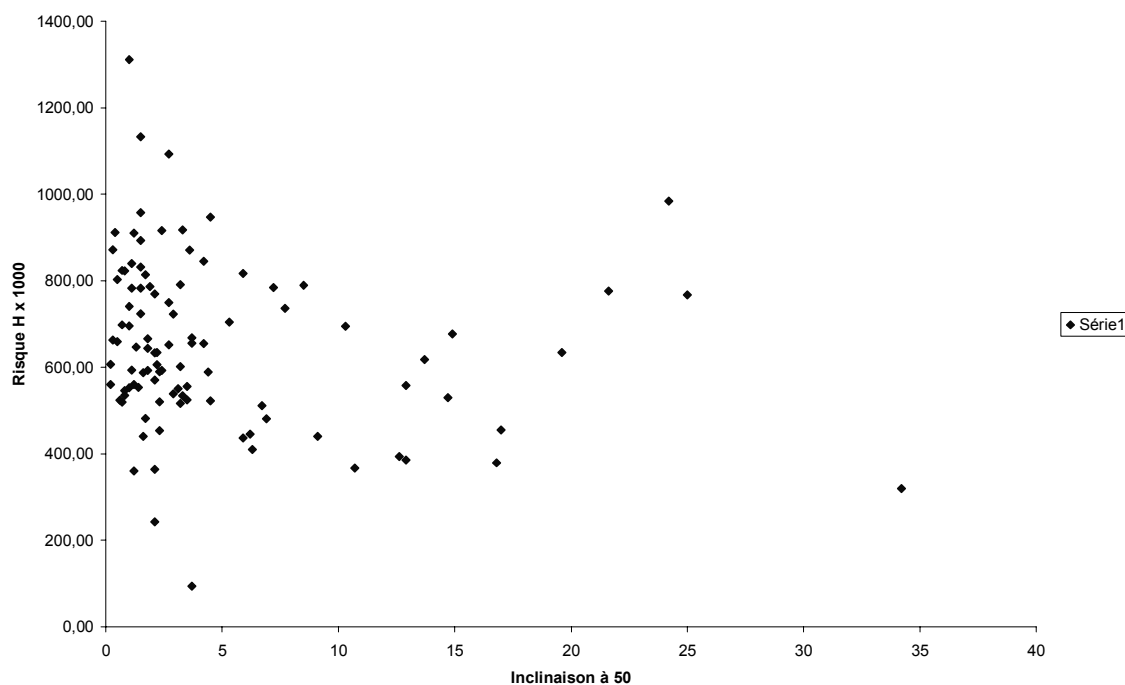
Nous avons retenu le facteur de risque en hauteur par rapport à celui en masse car c'est le plus important des deux. De plus, nous avons vu plus haut que ces deux facteurs étaient liés ce qui permet de dire que ce qui est vrai pour l'un l'est aussi pour l'autre.

## **Résultats :**

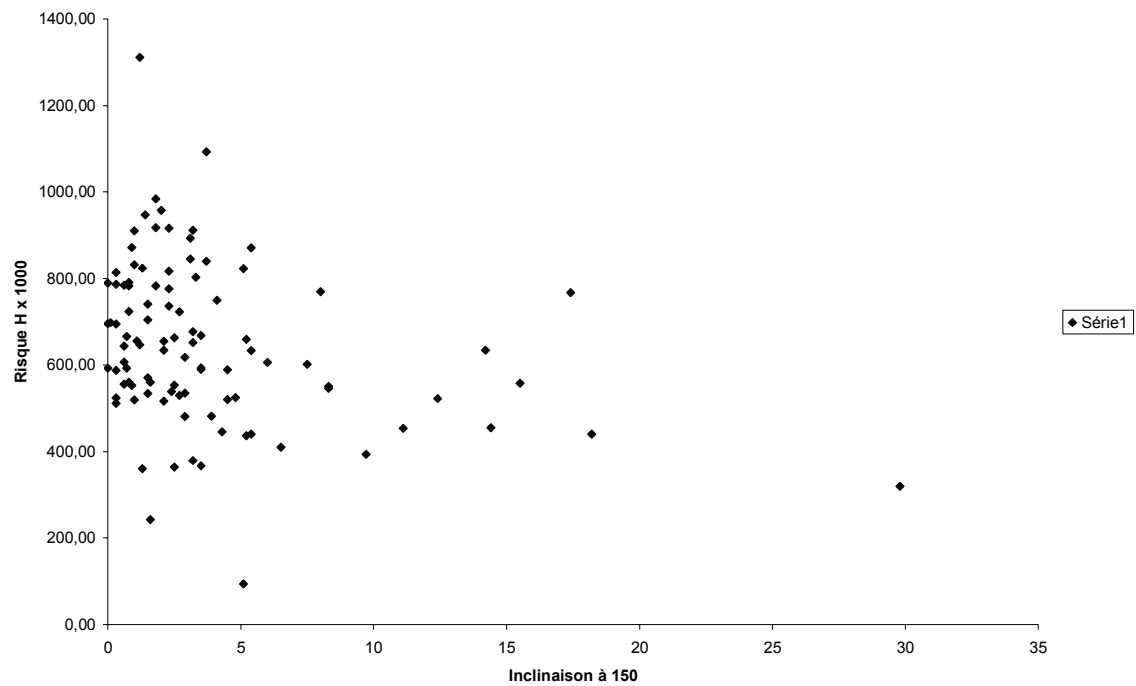
Les graphiques suivants montrent le facteur de risque en hauteur en fonction des différentes inclinaisons mesurées.



**Figure 19 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à la base**



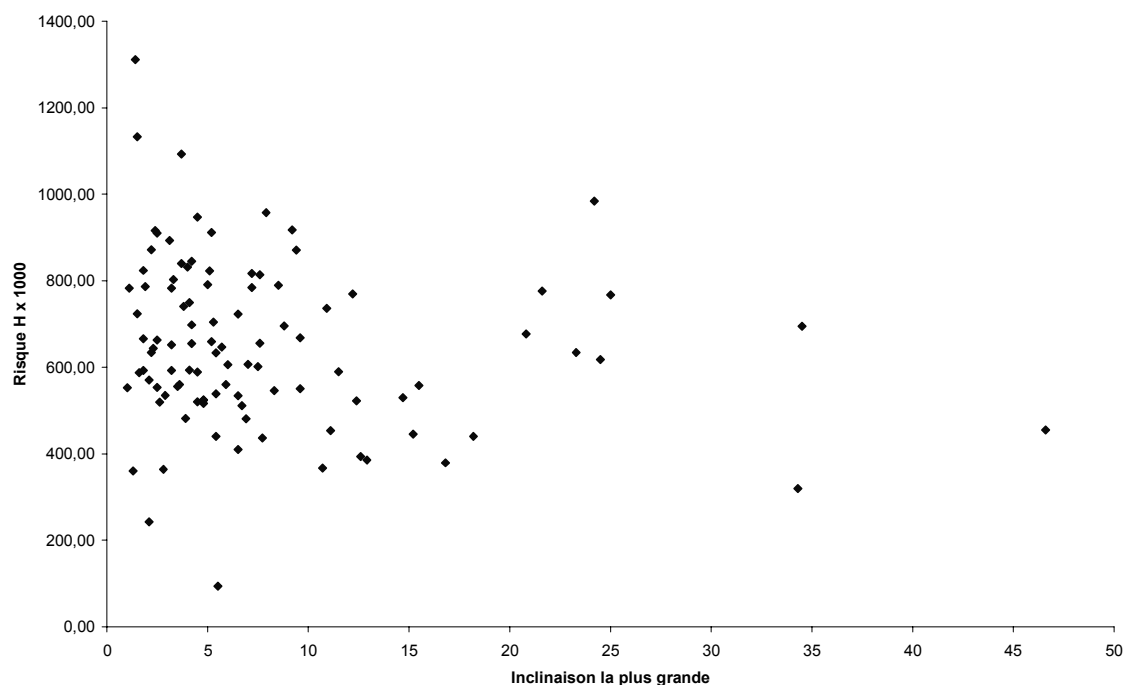
**Figure 20 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à 50 cm**



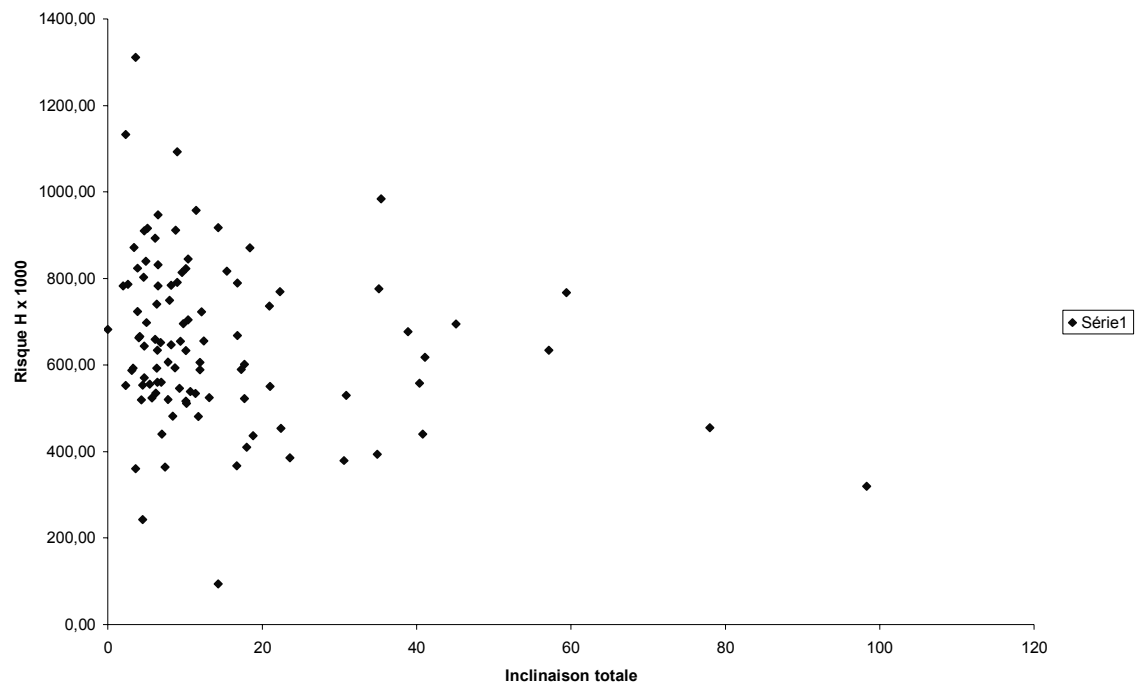
**Figure 21 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison à 150 cm**

Sur ces trois graphiques, on observe que les points sont repartis aléatoirement sans corrélation entre le risque et l'inclinaison.

Suite à cette observation, nous avons pris en compte le facteur de risque en hauteur en fonction de l'inclinaison la plus forte et la somme des inclinaisons. Les résultats se trouvent sur les deux graphiques suivants.



**Figure 22 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison la plus forte**



**Figure 23 : Graphique du risque en hauteur en fonction de l'inclinaison totale**

Comme c'est le cas pour les inclinaisons locales, on ne trouve pas de corrélation entre le facteur de risque en hauteur et l'inclinaison la plus forte ou l'inclinaison totale.

### **Discussion :**

Nous avons donc observé qu'il n'existe aucune relation simple entre les inclinaisons et le facteur de risque en hauteur. Par conséquent, il n'y a pas de relation entre le fait que l'arbre soit penché et le risque qu'il prend. En d'autres termes, ce n'est pas parce qu'un arbre est très incliné qu'il prend plus de risque qu'un autre et inversement, ce n'est pas parce qu'un arbre prend des risques qu'il est plus incliné.

Nous pouvons noter que les mesures d'inclinaisons sont locales (0, 50, 150 cm) alors que le facteur de risque prend en compte la situation globale de l'arbre. C'est pour cette raison que nous avons voulu prendre en compte la somme des inclinaisons en valeurs absolues. Mais cela n'a pas montré plus de résultats quant à la corrélation entre l'inclinaison de l'arbre et le risque qu'il prend.

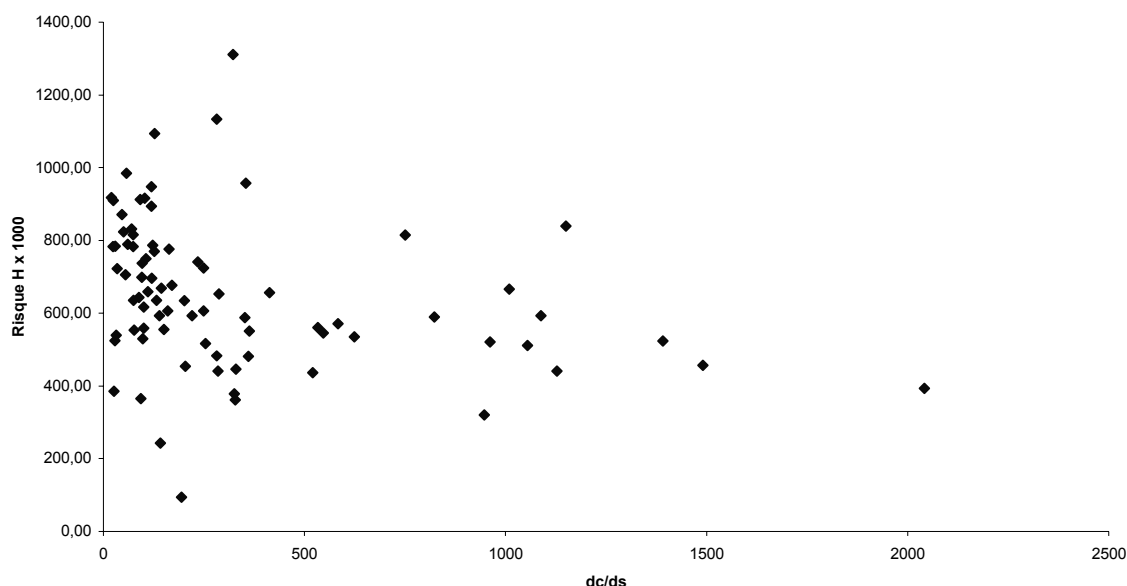
3.2.3 – Est-ce que se sont les arbres qui mettent en place du bois de tension, c'est à dire qui se redressent?

Pour observer la corrélation entre le facteur de risque et la redressement de l'arbre, nous avons tracé un graphique du facteur de risque en hauteur en fonction de la variation de courbure par unité de surface. Cette dernière correspond à la formule :  $dc/ds = (DRLM \text{ diff.}/\pi R^3)$ .

Il est important de noter que nous n'avons pas pris en compte les arbres dont la différence de DRLM était comprise entre  $-150$  et  $150 \text{ m}^{-1}$  car il est difficile de se prononcer quant à l'explication de ses valeurs. Mais nous avons pris à la fois les arbres qui se redressent (différence de DRLM  $> 0$ ) et les arbres qui se penchent (différence de DRLM  $< 0$ ) en prenant la valeur absolue de la DRLM dissymétrique.

## Résultats :

Nous avons obtenu le graphique suivant.



**Figure 24 : Graphique du facteur de risque en hauteur en fonction de la variation de courbure par unité de surface à 50 cm**

Nous observons qu'il n'existe aucune corrélation entre le facteur de risque et la variation de courbure par unité de surface à 50 cm.

## Discussion :

Nous avons montré grâce au graphique qu'il n'existe aucune relation entre potentiel de redressement et facteur de risque.

Pour cette classe d'arbres, nous pouvons dire que plus ils se redressent moins ils prennent de risques. En fait, nous pouvons dire que les arbres qui mettent en place beaucoup de bois de tension prennent peu de risque en ce qui concerne la hauteur et la masse.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de prendre en compte la rigidité du matériau.

## ***4 - Recherche de stratégies de croissance communes entre espèces ou groupes d'espèces***

Nous cherchons à présent à mettre en évidence d'éventuelles stratégies de croissance (architecture, type de forme) communes entre plusieurs individus d'une même espèce ou appartenant à un groupe d'espèces. Nous nous intéressons en particulier aux facteurs « prise de risque » (H en fonction de D, Rh et Rm), « redressement » et « inclinaison ».

### *4.1 - Espèces et groupes d'espèces*

#### *4.1.1 - Espèces*

Nous avons isolé les espèces pour lesquelles nous avons des répétitions (plus de quatre individus étudiés). Quatre espèces ont ainsi été retenues :

- Annonaceae *Oxandra asbeckii* (12 individus),
- Caesalpinaceae *Eperua falcata* (7 individus),

- Euphorbiaceae *Sagotia racemosa* (4 individus),
- Violaceae *Rinorea amapaense* (4 individus)

#### 4.1.2 - Groupe d'espèces

De façon plus générale, nous avons entrepris de regrouper les espèces par type de tempérament vis-à-vis de la lumière (cf Favrichon, 1995) pour relier une stratégie de croissance avec des paramètres structuraux. Cinq groupes sont définis de la façon suivante :

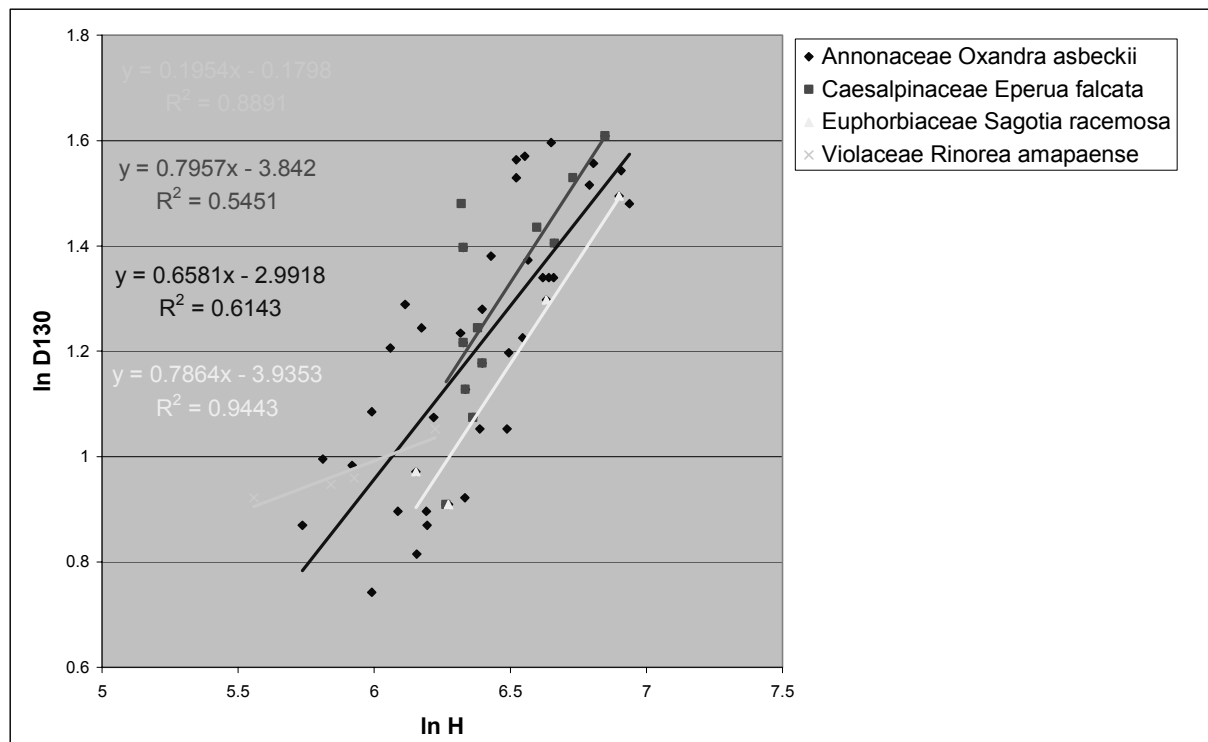
- Groupe 1 : taxons des strates inférieure et moyenne à croissance lente (Annonaceae *Oxandra asbeckii*, Euphorbiaceae *Sagotia racemosa*)
- Groupe 2 : taxons de la strate supérieure à croissance moyenne, voire faible (ex : Sapotaceae *Microfolis guianensis*)
- Groupe 3 : taxons émergents à croissance moyenne forte (ex : Caesalpinaceae *Eperua falcata*)
- Groupe 4 : taxons de la strate supérieure à croissance très forte
- Groupe 5 : taxons de la strate inférieure à croissance très forte et taux de renouvellement rapide.

Dans notre jeune peuplement, les groupes 1, 2 et 3 sont bien représentés (respectivement 28, 5 et 7 individus parmi les espèces classées).

#### 4.2 - Relation entre la hauteur et le diamètre : des stratégies différentes selon les espèces ?

Précédemment, nous avons mis en évidence une assez bonne relation allométrique entre le diamètre à 130 cm et la hauteur de chaque arbre : le D130 est proportionnel à la hauteur  $^{\frac{1}{2}}$ .

Il serait intéressant d'affiner cette étude en s'intéressant aux différentes espèces représentées. En effet, ces espèces ont peut-être des stratégies de croissance différentes les unes des autres, ce qui conduirait à un accroissement du diamètre en fonction de puissances de H différentes.



**Figure 25 : Logarithme de H en fonction du logarithme du D130 pour les différentes espèces**



Nous constatons que trois espèces ont une stratégie de croissance semblable : les pentes de leur courbe de tendance sont semblables :

Pour *Oxandra asbeckii* :  $D130 = a H^{0.65}$

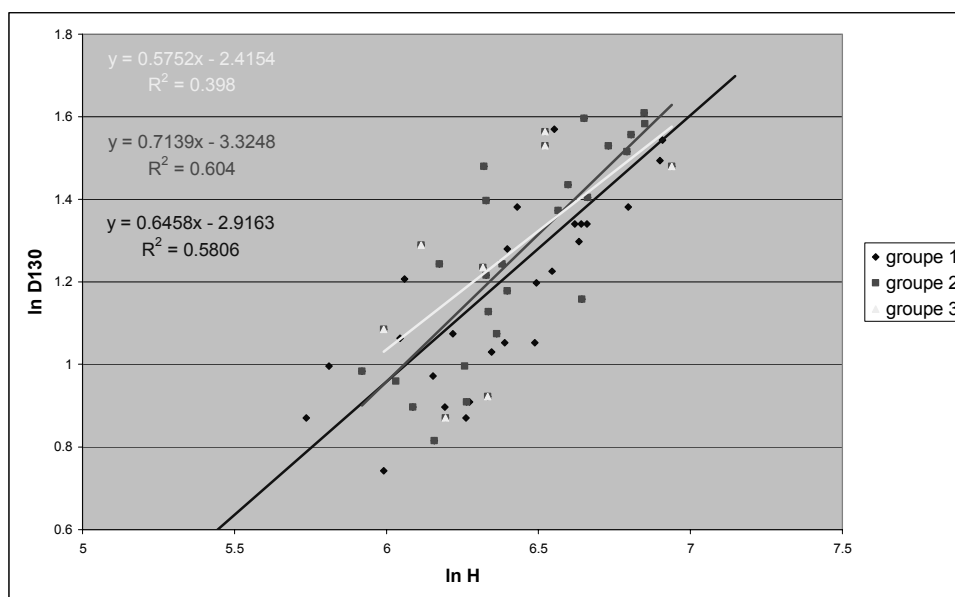
Pour *Sagotia racemosa* :  $D130 = a H^{0.8}$

Pour *Eperua falcata* :  $D130 = a H^{0.8}$  également

La quatrième, *Violaceae Rinorea amapaense*, se comporte différemment :  
 $D130 = a H^{0.2}$

C'est à dire que, pour une même augmentation en diamètre, sa hauteur croît beaucoup plus vite que les autres espèces (ou, pour une même croissance en hauteur, son diamètre augmente beaucoup moins que les autres).

Cette différence n'est pas évidente à expliquer, puisque que cette *Violaceae* est une espèce de sous-bois, tout comme *Oxandra asbeckii* et *Sagotia racemosa*. Par contre, *Eperua falcata* est plutôt une espèce émergente (Beauchêne, communication personnelle). Il serait intéressant de s'attarder sur la rigidité, ou sur la masse des feuilles des quatres individus de cette espèce.



**Figure 26 : Logarithme de H en fonction du logarithme du D130 pour les différents groupes**

Nous ne constatons pas de différence de stratégie notoire entre les différents groupes d'espèces (bien que ces groupes aient été constitués sur des critères de comportements différents !)

Pour confronter ces résultats à la **bibliographie**, nous pouvons nous inspirer du travail de recherche de P.M. Rich et all (1986) au Costa Rica. Ces chercheurs ont réussi à valider la relation  $D130 = aH^{\text{plus ou moins } 3/2}$  de McDonald pour toutes les espèces dicotylédones, en travaillant sur toutes les classes d'âge confondues. En effet, pour des espèces de climax, la puissance est un peu plus importante que  $3/2$  (1.67), tandis que pour des espèces pionnières, elle est un peu plus faible que  $3/2$  (1.24). Ceci s'explique par la différence de comportement végétatif et reproducteur de ces espèces.

Par contre, les valeurs que nous obtenons sur le site de la piste de St Elie sont semblables aux valeurs trouvées par Frisch pour les fougères arborescentes au Costa Rica (0.63 pour l'une de ces fougères).

On pourrait également vérifier si nos individus se situent entre ces deux droites :  
 -limite inférieure = limite d'écroulement  
 -limite supérieure = comportement des arbres-records en Amérique du Nord  
 Ces deux droites ont une pente de  $3/2$  mais avec une ordonnée à la base différente.

#### 4.3 - Les autres facteurs varient-ils selon l'espèce ou le groupe d'espèces ?

Quelle que soit l'espèce considérée, il n'apparaît pas de tendance marquée entre les différents individus quant aux paramètres « prise de risque », « redressement » ou « inclinaison » : chacun adopte une stratégie propre, résultant notamment des interactions avec son environnement, dans la recherche de lumière.

Ainsi, il n'est pas possible de mettre en évidence de différences ou de similarités marquées entre ces trois espèces.

Quel que soit le groupe considéré, il n'apparaît pas, à ce niveau non plus, de liens de cause à effet entre développement au stade juvénile (groupes) et architecture des individus : ceux-ci semblent croître sans être déterminés par leur appartenance à quelque groupe (cf graphes ci-dessous).

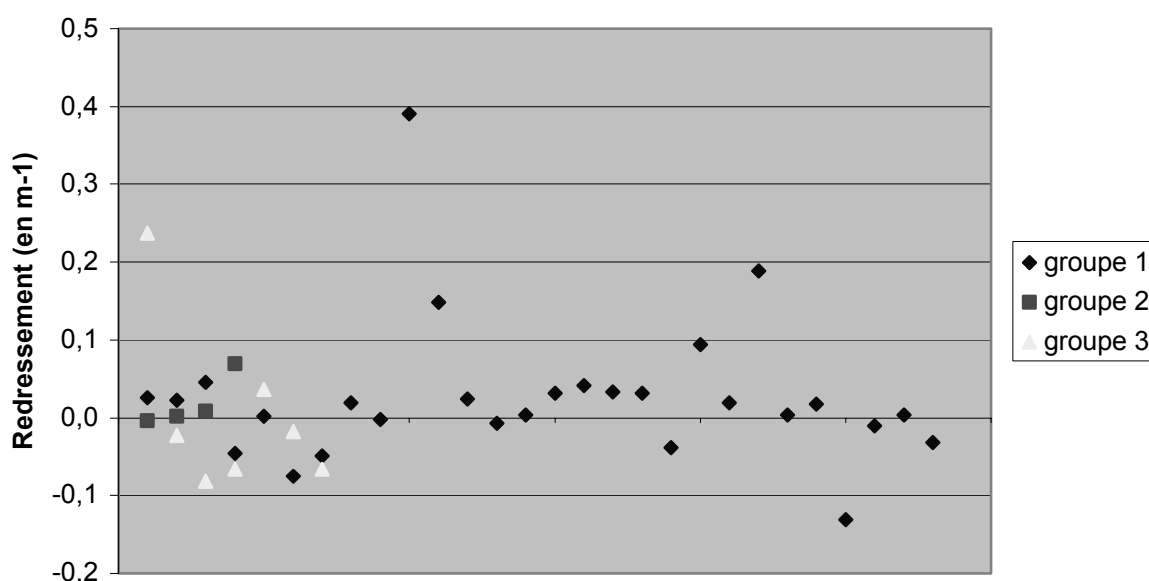


Figure 27 : Redressement entre 0 et 150 cm pour les groupes 1 à 3

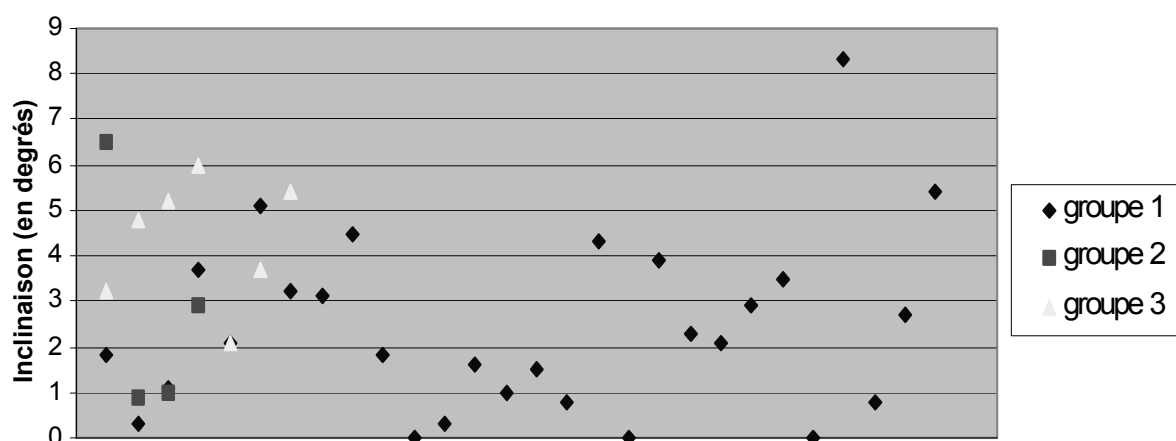
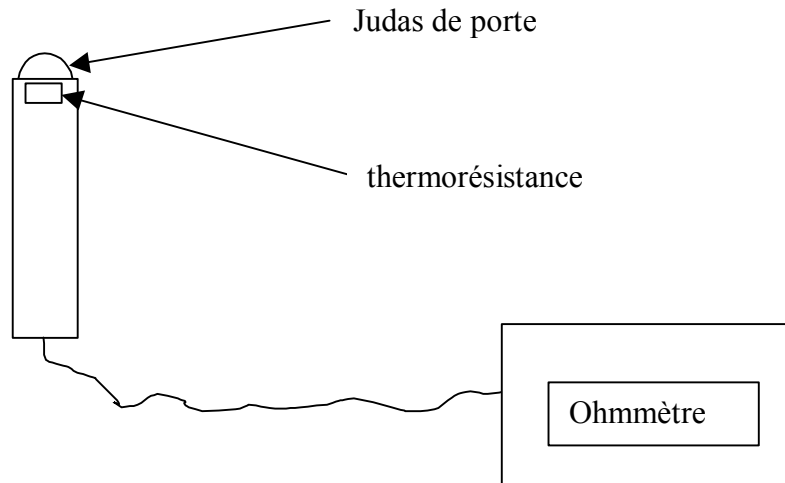


Figure 28 : Inclinaison à 150 cm pour les groupes 1 à 3

## 5 - Recherche de l'influence de la lumière

Le paramètre de la lumière est un des facteurs censés influencer fortement le redressement des arbres inclinés. C'est aussi la source d'énergie fondamentale du fonctionnement des arbres. Nous avons donc cherché à estimer la quantité de lumière qui parvenait à chaque arbre. Pour cela, deux méthodes ont été employées:

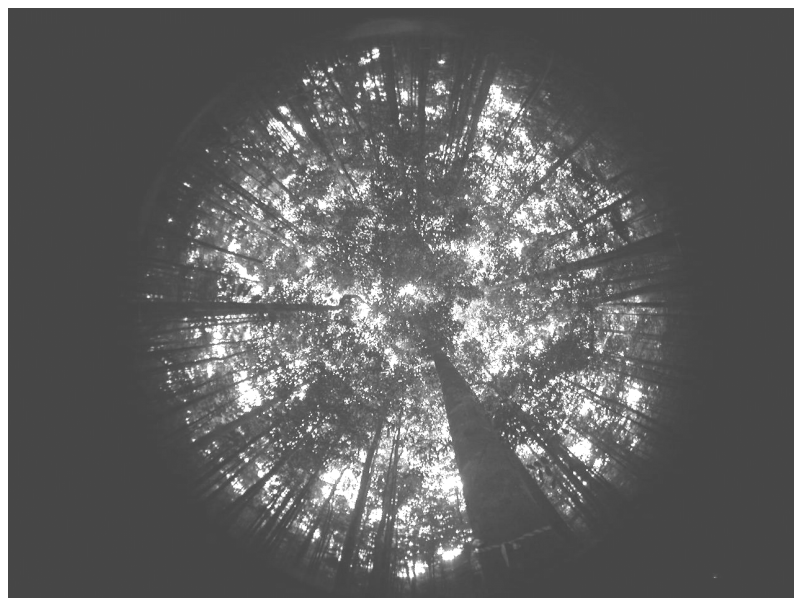
- un LAI-léger qui mesure l'intensité lumineuse au-dessus d'un point du sous-bois, sur une demi-sphère.



**Figure 29 : Schéma du LAI-léger**

Le Judas permet de concentrer tous les rayons, perçus par la demi-sphère, en un seul point correspondant à la résistance. L'intensité lumineuse est donc traduite en ohm.

-un appareil photo numérique équipé d'un objectif hémisphérique (fisheye). La photographie traduit, en deux dimensions, l'environnement lumineux de l'arbre. L'analyse de ces photographies nous donne la porosité du couvert situé au-dessus de l'arbre. Par exemple, un arbre seul au milieu d'un espace dégagé peut percevoir 100% de la lumière, contrairement à un arbre de sous-bois, ce qui correspond à nos arbres.



**photo 3 : Exemple d'une photo hémisphérique prise avec le fisheye, aux environs de 8h du matin.**

Avec le LAI-léger, les mesures ont été faites entre 11h et 13h30 sur chaque souche. Le même jour, une série de photographies hémisphériques a été réalisée le matin entre 6h et 8h30. Les photos ont été faites à 3m, 7m et 14m du piquet central de la parcelle, pour chaque point cardinal. Puis, à 7m et 14m pour les directions intermédiaires et une au milieu de la parcelle.

Les données obtenues ne sont pas utilisables pour diverses raisons :

- premièrement, les photographies hémisphériques ont été prises pendant une période de temps trop grande. En effet, nous visualisons le levé et le coucher du soleil sur les graphiques. Par conséquent les données ne peuvent être considérées comme fiables.
- Deuxièmement, les valeurs mesurées avec le LAI-léger sont beaucoup trop aléatoire pour pouvoir être utilisées.

Ainsi, il serait nécessaire de faire ces photographies et ces mesures de LAI pendant une courte période tout les jours à la même heure (par exemple, tout les jours entre 8h et 8h30).

## **CONCLUSION**

L'analyse de nos résultats a montré que, pour des petits arbres (2,5-5 cm de diamètre), une majorité (82%) réagit à une inclinaison en créant une dissymétrie des tensions périphériques du tronc. Nous avons vu que cette stratégie était efficace car elle permet une réorientation et contre l'effet de la gravité.

D'autre part, les différentes mesures effectuées nous ont permis de conclure quant au fait que plus le diamètre est important, plus la prise de risque (inverse du coefficient de sécurité) est élevée. Il ressort également qu'une espèce (*Violaceae Rinorea amapaense*) se distingue par sa stratégie de croissance.

Par contre, les mesures effectuées pour déterminer une influence précise de la lumière n'ont pas abouti à des résultats nets. Il semblerait que le choix du protocole de mesure présente quelques défauts. Il faudrait notamment adapter les plages de mesure à la quantité d'arbres. Ce afin d'avoir les mêmes conditions de mesure pour chaque arbre (position du soleil, météorologie...).

En répétant ce type d'expérience sur plusieurs placettes et en adaptant les différents protocoles en fonction des remarques émises durant ce travail, il sera possible d'affiner les résultats et d'élargir les classes de diamètre étudiées. Ceci permettra aussi une étude plus approfondie des différents paramètres en fonction des familles botaniques, espèces...