



Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses  
dans différentes situations sylvicoles et stationnelles

*Réflexion sur l'autécologie des essences et application à l'évaluation de la stabilité*

Rapport Scientifique final – Juin 2002  
Projet FORBOIS – 1420A

**Lebourgeois François**

*Responsable Scientifique*  
*ENGREF – Ecosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage*

**Collaboration :**

<i>Bruciamacchie Max</i>	(ENGREF – Dynamique des Systèmes Forestiers)
<i>Jabiol Bernard</i>	(ENGREF – Ecosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage)
<i>Archevèque Guylaine</i>	(ENGREF – FIF 10 ième Promotion )
<i>Colin Francis</i>	(INRA – Croissance et Production)
<i>Drexhage Michael</i>	(INRA – Croissance et Production)



## RESUME

Cette étude avait pour objectifs d'apporter des éléments d'information sur la réponse du système racinaire du hêtre et du chêne (sessile essentiellement) aux contraintes du sol et d'enrichir les relations allométriques entre les caractéristiques dendrométriques des parties aériennes et des parties souterraines. L'étude a été menée dans 5 forêts du plateau lorrain (Forêts de Brin et d'Amance, mélange chêne sessile et hêtre) et du plateau calcaire de lorraine (Forêt de Haye : parcelles route Frouard (hêtre pur) et parcelles du Beau-Poirier (hêtres dominants avec quelques chênes sessiles dominés); Bois du Chapitre, mélange chênes et hêtre). Les forêts sont gérées en futaies régulières sauf le Bois du Chapitre traité en irrégulier et présentant une diversité d'essences importante. Les contraintes supposées sont liées à la présence d'argile lourde mal structurée, compacte à mauvais drainage vertical ou à la présence de calcaire à faciès variés (dalle à pendage horizontal plus ou moins superficiel, grèze, plaquettes et cailloux globuleux remaniés ou non). 730 arbres (sains et chablis) et 12 espèces différentes ont été échantillonnés. Le hêtre et les chênes représentent respectivement 43% (n=312) et 24% (n=177) du total. Pour l'étude des relations entre le système racinaire et les paramètres stationnels et dendrométriques mesurés, seuls les chablis « complets » ont été utilisés. Pour le hêtre et le chêne, ces derniers représentent respectivement 35% (n=109) et 26% (n=45) de l'effectif initial disponible. *Pour les deux espèces*, la longueur de la grume et la hauteur d'extension maximale du houppier sont d'autant plus grandes que les arbres sont grands. En moyenne, les hêtres chablis sont plus gros et plus hauts que les hêtres sains. Pour les arbres de moins de 25 m, les différences relatives moyennes entre les deux types sont de +11% pour la hauteur totale, +20% pour la hauteur de la base du houppier, +17% pour la hauteur de l'extension maximale du houppier et +28% pour le diamètre. En revanche, pour les chênes, aucune différence significative n'apparaît entre les deux types. En ce qui concerne *le complexe sol-racine*, 74% des hêtres présentent des mottes plates contre 44% pour les chênes (56% de type globuleux). Exceptée l'épaisseur de la motte, tous les autres paramètres sont plus importants pour le hêtre. 73% des hêtres ont une surface de motte supérieure à 6 m<sup>2</sup> et 96% des chênes une surface inférieure à 6 m<sup>2</sup> (surfaces moyennes : 8,3 m<sup>2</sup> et 4,8 m<sup>2</sup>). 53% des hêtres prospectent plus de 10 m<sup>3</sup> alors que seulement 22% des chênes dépassent cette valeur (volumes moyens prospectés : 11,4 m<sup>3</sup> et 7,5 m<sup>3</sup>). Pour 45% des chênes, la plus grosse racine verticale dépasse 50 cm contre seulement 28% pour les hêtres. 40% des hêtres ne présentent aucune grosse racine verticale (> 20 mm) contre seulement 13% pour les chênes. Enfin, 60% des chênes ont entre 1 et 9 grosses racines verticales contre seulement 37% pour le hêtre. En ce qui concerne les racines fines, le hêtre présente une plus forte proportion de densité forte. *L'enracinement* du hêtre apparaît nettement plus sensible aux contraintes du sol que celui des chênes. Un mauvais drainage vertical, une dalle de calcaire en place à faible profondeur... se traduisent par la mise en place d'un système d'autant plus traçant que la ou les contraintes sont fortes (augmentation de la surface du complexe sol-racine). En l'absence de contrainte du sol, les hêtres dominants gérés en futaie régulière prospectent plus de 20 m<sup>3</sup> de sol ; les hêtres et les chênes dominés prospectant moitié moins de sol (10 m<sup>3</sup>). La présence d'une argile lourde légèrement hydromorphe entre 60 et 90 cm empêche la prospection en profondeur du hêtre. A dimensions équivalentes, les volumes prospectés sont néanmoins comparables entre les deux essence (10 à 12 m<sup>3</sup>) car le hêtre compense sa moindre prospection en profondeur par une extension horizontale plus importante. Dans le cas d'une hêtraie régulière, la présence de grèze seule ou associée à des cailloux plats ou globuleux généralement remaniés se traduit par une réduction de volume prospecté de 50 à 80% selon la profondeur d'apparition des éléments grossiers et leur recouvrement. La présence d'une dalle réduit fortement le volume prospecté et ceci d'autant plus qu'elle apparaît proche de la surface. Pour les deux essences, une dalle à 30 cm se traduit par une réduction de 30 à 40% du volume prospecté (par rapport à une dalle à 60 cm) mais ce dernier reste néanmoins nettement supérieur pour le hêtre par rapport au chêne (+30 à +50%). A diamètre équivalent (classe 45-50 cm), le volume moyen de sol prospecté par le hêtre est, selon la contrainte édaphique et le mode de gestion, de 15,6 m<sup>3</sup> (régulier ; sans contrainte), 14 m<sup>3</sup> (régulier ; contrainte faible), 10 m<sup>3</sup> (régulier ; contrainte moyenne à forte), 8,8 m<sup>3</sup> (irrégulier ; moyenne à très forte). Tous ces résultats sont discutés en terme de stabilité, d'alimentation hydrique et minérale.



## SOMMAIRE

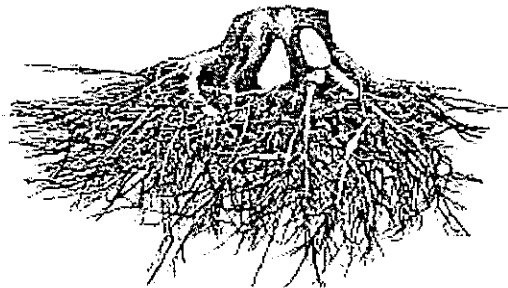
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>MATERIEL ET METHODE.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Forêts échantillonnées</b>	<b>4</b>
<b>2. Contexte mésoclimatique</b>	<b>8</b>
<b>3. Description des chablis</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Parties aériennes</b>	<b>9</b>
<b>3.2. Parties souterraines</b>	<b>10</b>
<b>RESULTATS.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Structure et caractéristiques dendrométriques de l'échantillon</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Analyse globale</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Comparaison arbres sains et chablis</b>	<b>16</b>
<i>1.2.1. Analyse globale</i>	<b>16</b>
<i>1.2.2. Analyse par massif</i>	<b>19</b>
<b>2. Caractéristiques des systèmes racinaires</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Comparaison des hêtres et des chênes « complets »</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Analyse discriminante des effets inter-sites et intra-sites</b>	<b>32</b>
<b>2.3. Analyse de variance des effets site x espèce</b>	<b>38</b>
<b>2.4. Analyse par massif</b>	<b>39</b>
<i>2.4.1. Forêts d'Amance et de Brin (plateau lorrain)</i>	<b>39</b>
<i>2.4.2. Plateau calcaire : Bois du Chapitre, forêts de Haye et Beau-Poirier</i>	<b>47</b>
<b>2.5. Typologie des arbres selon le statut social ou la contrainte édaphique</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSIONS ET DISCUSSION.....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>77</b>
<b>PUBLICATIONS RELATIVES AU PROJET.....</b>	<b>79</b>



## INTRODUCTION

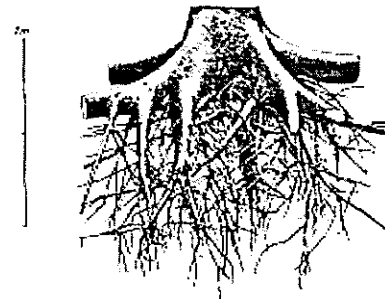
Malgré le rôle essentiel du système racinaire dans l'ancrage des arbres et dans l'exploitation des réserves du sol, son développement selon les essences et les types de contraintes est encore très peu connu et nos connaissances restent à l'heure actuelle très empiriques. Il est clair que sur une station donnée, l'architecture racinaire dépend avant tout de la réaction de l'espèce aux contraintes du sol (dalle, forte pierrosité, compaction, engorgement...) qui modifient parfois radicalement sa morphologie spécifique. Ainsi, la réalité s'éloigne souvent considérablement de ces schémas très théoriques (système traçant, pivotant, fasciculé...) (**figure 1**), et elle ne s'en rapproche, pour une espèce donnée, que dans le cas d'arbres ni juvéniles ni sénescents dont le système racinaire peut être considéré en croissance libre, c'est-à-dire ne rencontrant aucune contrainte (Köstler *et al.* 1968)

Système en cœur-traçant



*Fagus sylvatica* L.  
(Hêtre commun)

Système pivotant en cœur-traçant

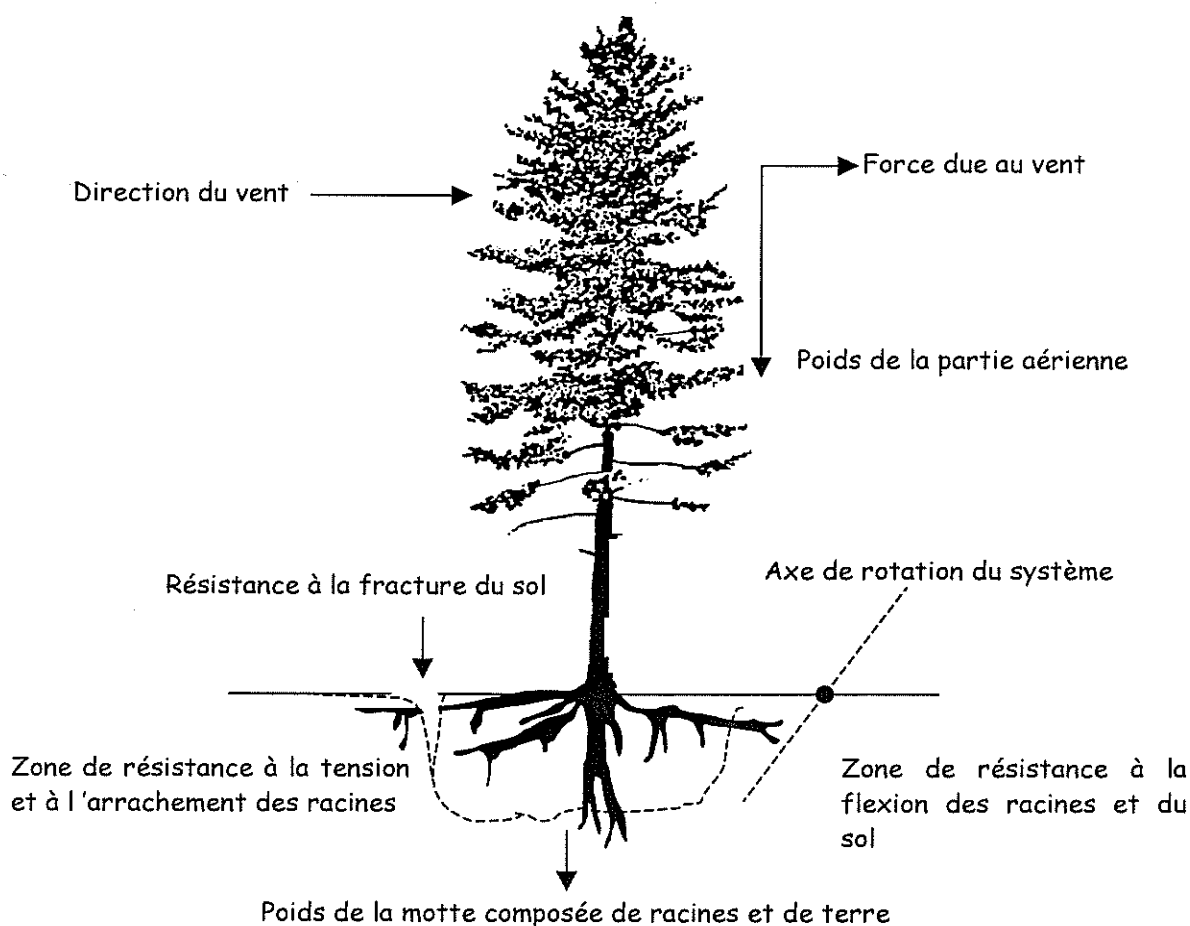


*Quercus petraea* et *Q. robur*  
(Chênes sessile et pédonculé)

**Figure 1.** Architecture racinaire pour des hêtres et chênes adultes poussant sur des sols sans contraintes (d'après Köstler *et al.* 1968).

Concernant l'autécologie des essences, les études les plus nombreuses ont été menées sur des semis ou des jeunes plants en milieux contrôlés. Dans ces conditions, les réponses des chênes (sessile, pédonculé, rouge), du hêtre ou encore du sapin pectiné apparaissent effectivement différentes face à la présence d'éléments grossiers, d'un horizon compact ou engorgé, etc. (Belgrand 1983 ; Lévy *et al.*, 1986 ; Lucot 1994 ; Lucot et Gaiffe, 1995 ; Lévy *et al.*, 1999). Les confirmations de ces observations sur arbres adultes sont très rares (Lucot 1994) principalement en raison de la lourdeur des techniques nécessaires pour l'extraction puis pour l'étude des systèmes racinaires (Colin *et al.*, 1995 ; Drexhage *et al.*, 1999).

Concernant la stabilité des arbres, deux ensembles de propriétés mécaniques jouent un rôle important (**figure 2**). Le premier est lié aux forces qui tendent à faire basculer l'arbre (Bouchon 1987). Ces propriétés dépendent de l'architecture aérienne : prise au vent offerte par la cime, bras de levier (hauteur totale), résistance du bois à la rupture... Le second correspond aux facteurs qui s'opposent à l'arrachement : résistance mécanique du sol (texture, humidité...), poids et volume du complexe racines / terre (motte), résistance à la flexion des racines principales et architecture du système. Il définit la qualité de l'ancrage qui dépend donc d'une part, des caractéristiques du sol et, d'autre part, des grosses racines appelées aussi racines charpentières (Coutts *et al.* 1999).



**Figure 2.** Systèmes de forces et de résistances mises en jeu par un coup de vent (modifié d'après Bouchon 1987).

Après la tempête de 1982 en France et celle de 1990 en Allemagne et en Suisse, les travaux de Bouchon (1987), Aldinger *et al.* (1996) et Schmidt-Haas et Bachofen (1991) donnent des résultats parfois contradictoires concernant le classement des espèces selon leur sensibilité au vent du fait, en particulier, de la grande variabilité des conditions géologiques et de sol, de la prise en compte à la fois des chablis d'hiver et d'été, des vitesses de vent propres à chaque tempête... On trouve dans la littérature, de l'espèce la moins résistante à la plus résistante :

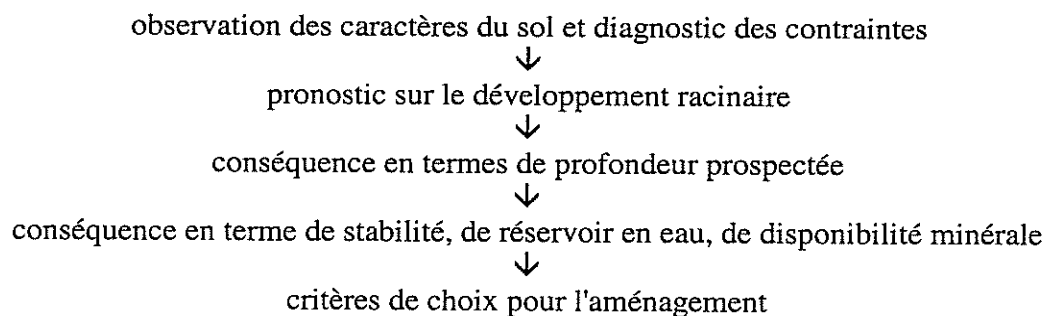
- Epicéa < pin sylvestre < sapin pectiné < épicéa de Sitka < douglas < pin laricio < mélèze (Bouchon 1987)
- Epicéa < sapin pectiné << pin sylvestre < hêtre et chêne (Aldinger *et al.* 1996)
- Epicéa = hêtre = sapin pectiné (Schmidt-Haas et Bachofen 1991)

Malgré la variabilité de ces observations, on peut considérer que, de façon générale, les conifères sont moins résistants que les feuillus. Les auteurs allemands et suisses ont fournis, par ailleurs, des relations entre les parties aériennes, l'enracinement, le sol et la stabilité des arbres comme, par exemple, entre le diamètre à 1,3 m et l'importance de la motte pour le hêtre, l'épicéa, le sapin, le pin sylvestre et le chêne ou entre le niveau trophique du sol et l'importance de la motte.



Face à notre méconnaissance et aux interrogations des gestionnaires, il nous a semblé important de profiter du champ d'expérience que représentaient les parcelles dévastées par la tempête de décembre 1999 pour apporter des éléments d'information sur ces aspects. Dès février 2000, une étude soutenue financièrement par la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF) du Ministère de l'Agriculture et la Région Lorraine, et couvrant une large gamme d'essences et de conditions pédo-climatiques et sylvicoles a été entreprise (Drexhage *et al.*, 2001). Cette étude présente deux aspects. L'aspect autécologique se propose d'apporter des éléments d'information sur la réponse du système racinaire des différentes essences feuillues et résineuses aux contraintes du sol : Quel est le développement racinaire de différentes essences dans une même station ? Pour une essence donnée, quel est le développement racinaire dans différentes stations forestières ? Cette étude a donc pour objectifs de comparer le comportement de différentes essences et d'associer cette comparaison à un type de contrainte de sol donné. C'est donc la réaction de chaque espèce face à une contrainte qui peut être précisée. L'aspect dendrométrique a pour objectifs d'enrichir les relations allométriques entre les caractéristiques dendrométriques des parties aériennes et des parties souterraines et d'avancer dans la connaissance de l'effet des structures forestières sur la vulnérabilité aux tempêtes.

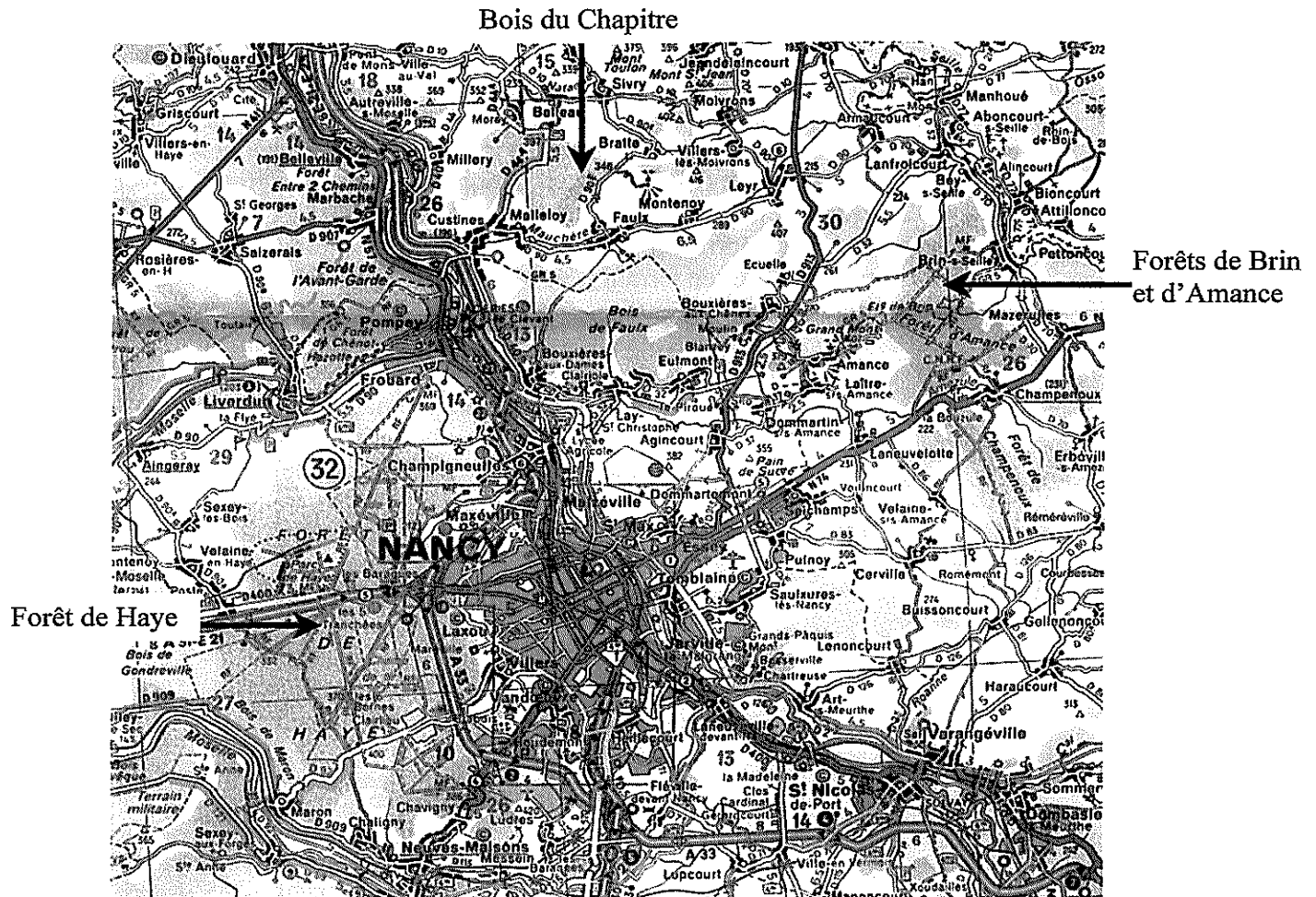
Les données ainsi rassemblées pourraient être utilisées de façon simple dans une démarche de pronostic accessible à tout forestier de terrain (Lebourgeois et Jabiol 2002) :



**MATERIEL ET METHODES**

**1. FORETS ECHANTILLONNEES**

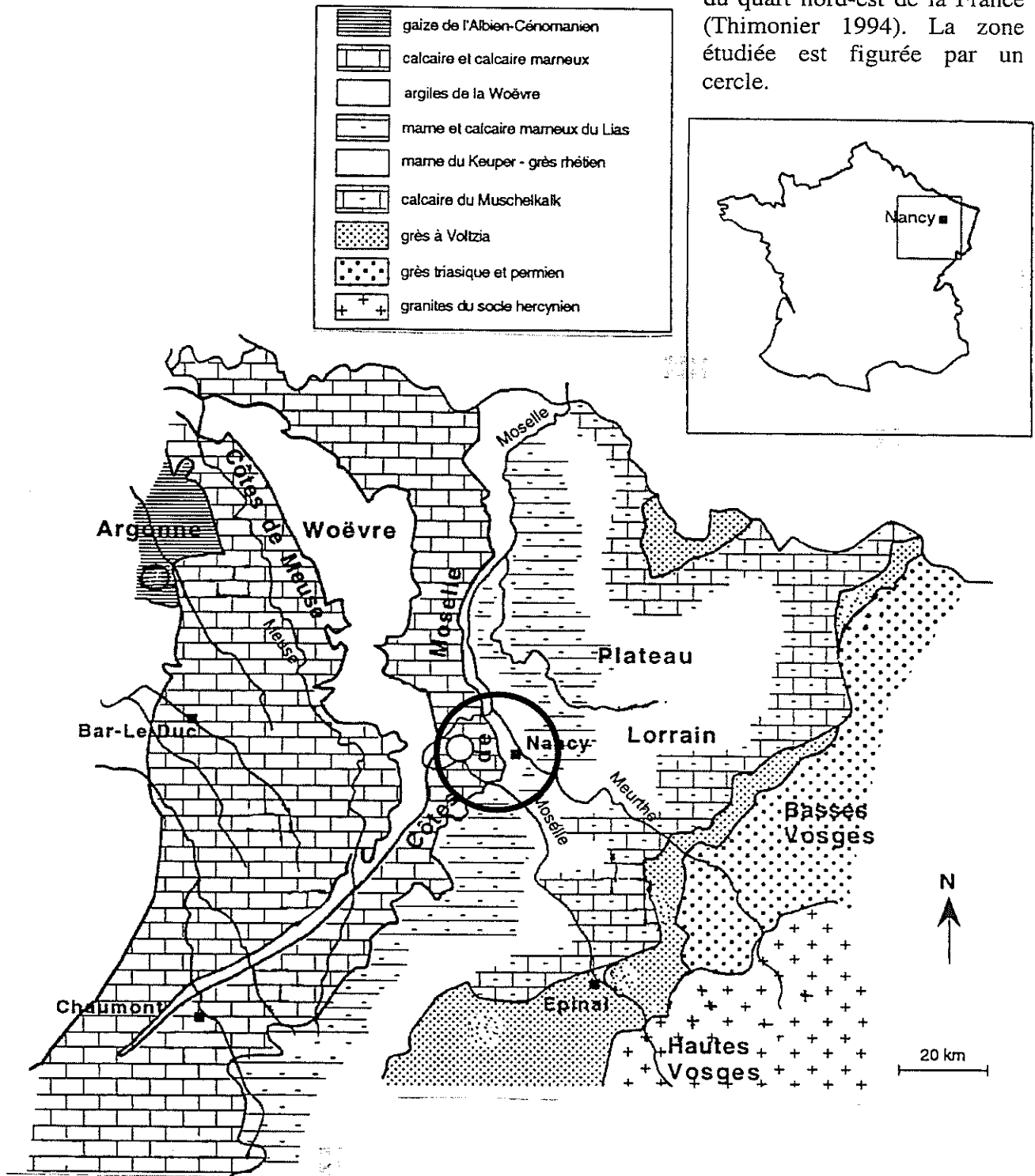
L'étude a été menée dans différentes parcelles de forêts appartenant à l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (Bois du Chapitre, Forêts de Brin et d'Amance) et sur quelques placettes expérimentales en forêts de Haye (Rte Frouard et Beau-Poirier) (carte 1 et figure 3). Les principales caractéristiques de ces forêts sont présentées dans le tableau 1.



Carte 1. Localisation géographique des forêts étudiées (Michelin n° 241 1/200 000)

Les forêts de Brin et d'Amance appartiennent à la région naturelle du « plateau lorrain » Le Bois du Chapitre et la Forêt de Haye appartiennent à la région naturelle des « plateaux calcaires ».

**Figure 3.** Contexte géologique du quart nord-est de la France (Thimonier 1994). La zone étudiée est figurée par un cercle.



Selon le catalogue des stations des « plateaux calcaires de Lorraine » (Becker *et al.* 1980), le **Bois du Chapitre** correspond globalement à une Hêtraie-chênaie mésophile (à Mélique et Aspérule ou à Canche cespiteuse et Millet diffus) (80% de la surface) (**tableau 1**). Le hêtre et les chênes sont dominants (densité respective sur l'ensemble du massif de 43 et 29 tiges/ha) mais la diversité spécifique est importante : charme (35 N/ha), merisier (7), érable champêtre (8), alisier blanc (3), érable sycomore (2), frêne (2), tilleul (2), alisier torminal (1), orme des montagnes, cormier, sapin, épicéa... (FIF-ENGREF 1993). La forêt est actuellement gérée en futaie irrégulière (ancien TSF). Le sous-sol est constitué de calcaire du Bajocien moyen inférieur. Le profil synthétique du sol correspond à des argiles de décarbonatation très bien structurées sur calcaire à faciès et profondeurs variables (*calsisols de calcaire récifal*). Localement, on trouve également des placages limoneux. On suppose que ce calcaire à faciès variés représente la contrainte majeure pour le développement racinaire.

Les forêts *de Brin et d'Amance* sont gérées en futaie régulière (**tableau 1**). La géologie se caractérise par des placages limoneux sur argile lourde et marnes du Lias. Le profil synthétique correspond à du limon puis de l'argile limoneuse meubles bien drainés sur argile lourde (*Brunisol mésosaturé de limon sur marne*). Dans ce contexte, la contrainte majeure supposée correspond à l'horizon d'argile lourde mal structurée, compacte à mauvais drainage vertical. Selon le catalogue des stations du « plateau lorrain », les types de stations les plus représentées (en situation de plateau) sont la hêtraie-chênaie sessiliflore sur sol plus ou moins hydromorphe et la hêtraie mésotrophe acide (GREF-ENGREF 1993).

Les parcelles inventoriées en *forêt de Haye* (route de Frouard et Beau-Poirier) appartiennent à un dispositif de placettes permanentes (Hêtraie) dont les caractéristiques dendrométriques sont suivies depuis de longues années. (dispositif d'éclaircie) (Dhôte 1996). Dans la suite de l'analyse, on parlera de la forêt de Haye pour la parcelle située route de Frouard et du Beau-Poirier pour la seconde.

Le Beau-Poirier correspond à une hêtraie régulière avec quelques chênes sessiles développée sur des alluvions très anciennes et limons. Le profil synthétique correspond à du limon plus ou moins argileux (sur environ 100 cm) puis de l'argile lourde bien drainée (*Néoluvisol issu de limons et d'argile de décarbonatation*). La parcelle située Route de Frouard est une hêtraie pure régulière. Comme pour le bois du Chapitre, le profil synthétique du sol correspond à des argiles de décarbonatation sur calcaire à faciès et profondeurs variables. Là encore, on suppose que ce calcaire à faciès variés représente la contrainte majeure pour le développement racinaire.

	<b>Bois du Chapitre</b>	<b>Forêt de Brin</b>	<b>Forêt d'Amance</b>
Localisation	20 km au Nord de Nancy	15 km au Nord-Est de Nancy	
Région naturelle	Plateau calcaire de lorraine	Plateau lorrain	
Altitude (m)	370 à 390	210 à 275	
Relief	Plateau (butte témoin) Pentes faibles (< 30%) Exposition NO ou SO		Plateau
Géologie	Calcaire du Bajocien moyen inférieur (calcaires oolithiques et durs à polypiers)	Placage limoneux sur argile lourde et marnes du Lias	
Profil synthétique	Argiles de décarbonatation très bien structurées sur calcaire à prof var.	Limon puis argile limoneuse meubles bien drainés sur argile lourde	
Contraintes supposées	Calcaire de faciès variés : dalle horizontale, plaquettes, cailloux...	Argile lourde mal structurée, compacte à mauvais drainage vertical	
Structure	Irrégulière	Régulière	
Essences dominantes	Hêtre et Chênes à 80% mais diversité d'essences précieuses (merisier, érables, alisier...)	Chênes, Charme et Hêtre	Hêtre et chênes
Surface forestière	138 ha 62	604 ha 22	
Volume / ha	123 m <sup>3</sup> (Tarif Schaeffer rapide n°5)	189 m <sup>3</sup> (Tarif SR 14, 1986)	
G / ha	15,3 m <sup>2</sup> (données 1993)	15,4 m <sup>2</sup> (données 1986)	
Nombre de tiges / ha	136 (données 1993)	206 (données 1986)	
<b>Parcelle et Surface inventoriées</b>	Parcelle 9 14 placettes de 18 ares (total 2,5 ha)	Parcelle 32 1 placette de 100*100 (1 ha)	Parcelle 38 1 placette de 90*90 (0,8ha)
Essence objectif	Diversité	Chêne	Hêtre
Nombre d'arbres échantillonnés	300 (dont 110 hêtres et 60 chênes)	188 (dont 37 hêtres et 100 chênes)	182 (dont 110 hêtres et 12 chênes)

	<b>Forêt de Haye</b>	<b>Route de Frouard</b>	<b>Beau-Poirier</b>
Localisation		15 km au Nord-Est de Nancy	
Région naturelle		Plateau lorrain	
Altitude (m)		210 à 275	
Relief		Plateau	
Profil synthétique		Calcosol à faciès et profondeur variables	Néoluvisol issu de limons et d'argile de décarbonatation
Contraintes supposées		Calcaire de faciès variés : dalle horizontale, plaquettes, cailloux	Argile lourde mal structurée et compacte
Structure		Régulière	
Essence dominante		Hêtre	
<b>Parcelle et Surface inventoriées</b>		Parcelles 110, 113, 117	Parcelle Beau-Poirier
Essence objectif		Hêtre	Hêtre
Nombre d'arbres échantillonnés		43 (hêtre exclusivement)	17 (dont 12 hêtres et 5 chênes)

## 2. CONTEXTE MESOCLIMATIQUE

Le mésoclimat lorrain est de type semi-continental avec des influences océaniques (**tableau 2**). La température moyenne est de 9,4°C (frais) avec environ 80 jours de gelées d'octobre à mai. Les hivers sont froids et les étés frais. Le total annuel des pluies est assez élevé avec près de 45% pendant la saison de végétation (335 mm). Les variations entre années peuvent être importantes : 466 mm en 1964 et 982 mm en 1986. L'ETP (Penman) annuelle moyenne est de 668 mm (563 en 1980 et 831 mm en 1976).

**Tableau 2.** Moyennes trentenaires (1961-90) pour le poste de Nancy-Tomblaine (alt. 212 m). NJ = Nombre de jours de pluie ; PJ = pluie moyenne journalière en mm.

(Moy. 1961-1990)	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année	Mai-Sept.
Pluie (mm)	<b>62,8</b>	<b>56,6</b>	<b>58,5</b>	<b>51,6</b>	<b>71,3</b>	<b>75</b>	<b>59</b>	<b>66,7</b>	<b>62,7</b>	<b>59,4</b>	<b>64,8</b>	<b>70,9</b>	<b>759,3</b>	<b>334,8</b>
P > 0 mm	NJ 18,5	14,3	16,5	15,1	16,2	14,7	12,3	13,2	11,9	13,6	15,8	16,1	178,2	68,3
	PJ 3,3	3,8	3,4	3,3	4,4	5,1	4,9	4,8	5,4	4	4,1	4,2	4,2	4,9
P ≥ 5 mm	NJ 3,9	4,4	4,3	4	5,2	5,2	4,1	4,8	3,8	4,3	4,4	5	53,4	4,6
	PJ 9,5	9,2	8,9	9	10,2	11,8	11	11,9	14,9	10,6	10,2	11	10,7	12,0
P ≥ 10 mm	NJ 2	2,4	2,1	1,8	2,1	2,6	2,3	2,2	2,3	2,3	1,9	2,5	26,5	2,3
	PJ 15,7	14,6	13,7	14,4	15,9	18,3	15,8	19,6	20,4	18,3	15,8	15,7	16,5	18,0
Temp. (°C)	moy 1,1	<b>2,3</b>	<b>5,2</b>	<b>8,7</b>	<b>12,8</b>	<b>16,1</b>	<b>18,1</b>	<b>17,5</b>	<b>14,4</b>	<b>9,9</b>	<b>4,9</b>	<b>2,1</b>	<b>9,4</b>	<b>15,8</b>

Des calculs de bilans hydriques montrent que, pour une réserve utile maximale en eau moyenne de 150 mm, ces conditions climatiques moyennes se traduisent par environ 70 jours de sécheresse pendant la saison de végétation (mai à octobre) (Granier *et al.* 1995 ; Lebourgeois 1999). Le seuil de sécheresse correspond à 40% de la RUM et au début de la régulation stomatique des arbres. Cette durée de stress hydrique est fortement dépendante de la RUM. Ainsi, une plus faible RUM a pour conséquence une sécheresse plus précoce et plus intense mais se recharge plus vite quand les conditions redeviennent plus favorables.

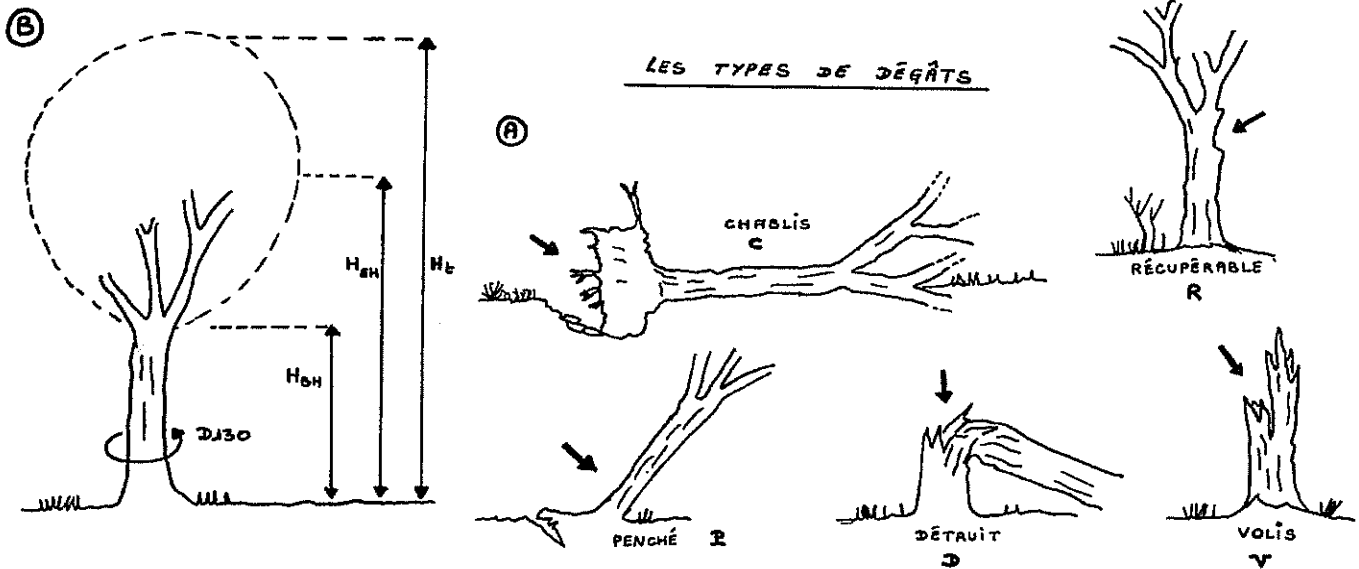
Dans cette étude, les observations des complexes « sol-racine » permettent une estimation du réservoir du sol. A partir de ces dernières, il est possible d'apprécier plus finement la contrainte hydrique subie par les arbres et ainsi d'apporter quelques éléments de réflexions sur l'adaptation de l'essence à la station.

### 3. DESCRIPTIONS DES CHABLIS

Outre les informations classiques précisant la localisation de la forêt, le type de peuplement... un protocole détaillé de description des parties aériennes et souterraines a été établi (Lebourgeois *et al.* 2001). Les codes des variables utilisées pour les différentes analyses sont figurés en *italiques*.

#### 3.1. Parties aériennes

- Essence et types de dégâts
- Diamètre à 1,30 m (*D130*), hauteur totale (*Ht*), hauteur de l'extension maximale des houppiers (*Heh*), hauteur de la base des houppiers (*Hbh*), présence et hauteur d'une éventuelle fourche, présence ou non de pourriture ;



Chêne volis et hêtres chablis en forêt d'Amance (photos : F. Lebourgeois)

### 3.2. Parties souterraines

1. **Type de galette** (deux types principaux : globuleux et plat). L'épaisseur ( $E_{motte}$ ), la largeur ( $L_{motte}$ , extension horizontale) et la hauteur ( $H_{motte}$ , extension verticale) ont été relevées.



Photos : F. Lebourgeois



A partir des mesures élémentaires, les surfaces ( $S$ , *Surfmotte*) et volumes des mottes ( $V_m$ , *Volmotte*) et du sol prospecté ( $V_p$ , *Volprospection*) ont été calculés.

#### Surface des mottes

$$S \text{ (en } m^2) = \pi * \left[ \frac{(H * L)}{4} \right]$$

#### Volumes des mottes

- *Type globuleux*

$$V_m \text{ (en } m^3) = \pi * \left( \frac{E}{6} \right) * (3 * R^2 + E^2) \quad \text{avec } R = \frac{(H * L)}{4}$$

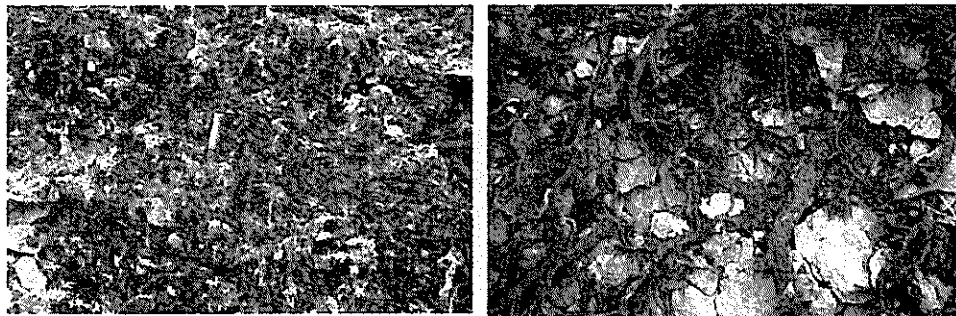
- *Type plat*

$$V_m \text{ (en } m^3) = \pi * (R^2 * E)$$

Le volume du sol prospecté ( $V_p$ ) a été calculé en ajoutant à l'épaisseur ( $E$ ) et à la largeur ( $L$ ) de la motte la longueur de la plus grosse racine verticale et la longueur maximale des racines latérales. Ce volume donne une estimation du volume de l'enracinement intensif des arbres.



2. **Type de système racinaire à la limite inférieure de la motte:** Système aplati : les racines très déformées sont aplaties et ne dépassent pas de la motte. Elles apparaissent « collées » sur la galette. Le système semi-plongeant représente des racines déformées, plus ou aplaties qui dépassent de quelques centimètres. Le système plongeant représente un système non déformé avec des racines cylindriques à décroissance régulière et dépassant largement de la motte (*deformracvert*); racines saines, cassées, pourries.



Déformations racinaires observées sur du hêtre (photos ci-dessus) et du chêne (photos ci-contre) au Bois du Chapitre : système aplati avec trame de racines fines ; système semi-plongeant avec pivots déformés



3. **Système racinaire latérale au delà de la motte :** Longueur maximale et minimale des racines dépassant de la galette (*longmaxraclat* et *longminraclat*) ; nombre de racines par classe de diamètre (< 10 racines ; 10 à 20 ; > 20 racines ; > 20 mm (*nbgrostraclat1*) ; 10 à 20 (*nbgrostraclat2*)) ; racines cassées, pourries, saines (*santeraclat*).



4. **Système racinaire verticale au delà de la motte:** Longueur de la plus longue des grosses racines (> 10 mm de diamètre) localisées dans la partie la plus épaisse de la galette ; (*longplusgrostracvert*) ; Longueur moyenne des racines fines (*longmoyracfinvert*) ; nombre de racines par classe de diamètre (< 10 racines ; 10 à 20 ; > 20 racines ; > 20 mm (*nbgrostracvert1*) ; 10 à 20 (*nbgrostracvert2*) ; racines cassées, pourries, saines (*santeracvert*).

5. **Racines fines à la limite inférieure de la motte** : Répartition globale des racines fines (homogène ou hétérogène (par taches)) (*repartracfine*); densité : forte ( $> 5$  racines /dm<sup>2</sup>) ; moyenne (1 à 5) ; faible ( $< 1$ ) (*densracfinforte*, *densracfinmoy*, *densracfinfaible*); recouvrement pour chaque densité ; pas de racines visibles ; santé des racines : cassées, pourries, saines.
6. **Éléments grossiers dans la galette (en regardant la galette de face)** : Pourcentage de recouvrement (*recegmotte*); taille maximale et minimale des éléments grossiers (EG) bien représentés ; forme : cailloux plats, globuleux, autres ; orientation (pour les cailloux plats) : horizontale, oblique, toutes directions (*orient*).



Différents types d'éléments grossiers (dalle, plaquettes...) observés au Bois du Chapitre (photos. F. Lebourgeois)



7. **Les différents horizons dans la galette** : Epaisseur des horizons ; nature du matériau (terre fine avec ou sans Éléments Grossiers EG) et de l'obstacle (contrainte pour le système racinaire) (*AppCail*, *AppObst*, *NatObst*)

- ✓ limon, argile lourde rubéfiée, limon-argileux avec moins de 20% EG
- ✓ limon, argile lourde rubéfiée, limon-argileux avec plus de 20% EG
- ✓ cailloux anisotrope ou plaquettes redressées
- ✓ cailloux et pierres horizontaux (plaquettes)
- ✓ dalles horizontales
- ✓ grèze (cailloutis dense)
- ✓ pavés et plaquettes, cailloux « globuleux »
- ✓ argile lourde
- ✓ aucune contrainte visible



<b>RESULTATS</b>
------------------

## 1. STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES DENDROMETRIQUES DE L'ECHANTILLON

### 1.1. Analyse globale

Les effectifs d'arbres échantillonnés par site, par essence et par types de dégâts, ainsi que les caractéristiques dendrométriques moyennes sont présentés dans les **tableaux 3 et 4**. Un total de 730 arbres a été échantillonné sur les 5 forêts représentant 12 espèces différentes. La parcelle 9 du bois du Chapitre représente 41% de l'effectif total des arbres. Les essences dominantes sont le hêtre (43% des tiges), le charme (25%) et les chênes (24%). Les arbres chablis représentent 42% de l'échantillon (306 arbres).

**Tableau 3.** Effectifs par site, essence et types de dégâts.

Site	Essence	Dégâts
Chapitre	300	Hêtre 312
Brin	188	Sains 325
Amance	182	Charme 179
Haye	43	Chênes 177
Poirier	17	Erable champêtre 19
		Tilleul cordé 16
		Merisier 13
		Erable sycomore 4
		Alisier blanc 3
		Sapin pectiné 3
		Frêne commun 2
		Alisier torminal 1
		Epicéa commun 1
		Chablis 306
		Volis 45
		Penché 39
		Détruit 15

La composition spécifique varie selon les massifs. La parcelle échantillonnée à **Amance** est constituée à 60% de hêtre et à peine 7% de chêne sessile. Dans cette parcelle, le hêtre représente l'essence objective (**tableau 4 et figure 4**). Pour la parcelle 32 de la forêt de **Brin**, c'est le chêne sessile qui est majoritaire (essence objective) avec un diamètre et une hauteur moyens de 43 cm et 26,5 m respectivement. Au **bois du Chapitre**, le hêtre et les chênes (chêne sessile majoritaire) sont bien représentés avec des caractéristiques dendrométriques moyennes comparables (**tableau 4**). La répartition des diamètres et des hauteurs est cependant différente selon l'essence (**figure 5**). Les petits bois ( $D < 30$  cm), bois moyens (30-50 cm) et gros bois ( $> 50$  cm) représentent respectivement pour le hêtre et le chêne 29%, 24%, 47% et 5%, 50%, 45%. Pour le hêtre, 25% des tiges ont une hauteur supérieure à 25 m (13% pour le chêne).

Les caractéristiques dendrométriques des arbres échantillonnés diffèrent nettement entre les sites en relation directe avec les types de stations et les traitements sylvicoles. Pour le hêtre, par exemple, la hauteur moyenne varie de 22 m au bois du Chapitre (structure irrégulière et sol constitué d'argiles de décarbonatation très bien structurées sur calcaire à profondeur variable) à plus de 38 m au Beau-Poirier (peuplement régulier sur alluvions anciennes et limons) (**tableau 4**).

**Tableau 4.** Caractéristiques dendrométriques des arbres par essence et massif forestier (tous types de dégâts confondus). La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type.

	Amance			Brin			Chapitre		
	n	D130	Ht	n	D130	Ht	n	D130	Ht
Hêtre	110	38,4 (9,8)	25,9 (2,7)	37	29,8 (12,7)	22,5 (4,6)	110	46,7 (19,3)	22,1 (4,9)
Charme	58	24,9 (6,5)	21,2 (3,4)	50	24,5 (6,4)	20,1 (3,9)	71	23,6 (7,4)	17,3 (3,0)
Chênes	12	32,8 (6,1)	24,4 (5,2)	100	42,8 (8,9)	26,5 (3,1)	60	49,8 (12,4)	21,9 (3,6)
Erable champ.							19	25,5 (6,8)	16,2 (3,0)
Tilleul cordé	2	20,5 (0,71)	22,4 (6,7)	1	19	16,3	13	21 (3,6)	16,5 (3,9)
Merisier							13	26,4 (6,0)	19,1 (3,6)
Erable sycomore							4	34,2 (12,3)	20,8 (2,9)
Alisier blanc							3	23 (6,2)	18 (0,7)
Sapin pectiné							3	20 (1,0)	14,3 (2,5)
Frêne commun							2	22,5 (4,9)	18,9 (2,9)
Alisier tormi.							1	18	15,7
Epicéa							1	22	7,3
	Haye			Poirier					
	n	D130	Ht	n	D130	Ht			
Hêtre	43	37,7 (7,5)	27,7 (3,4)	12	60,3 (10,2)	38,3 (2,1)			
Chêne sessile				5	43,2 (7,8)	34,3 (3,2)			

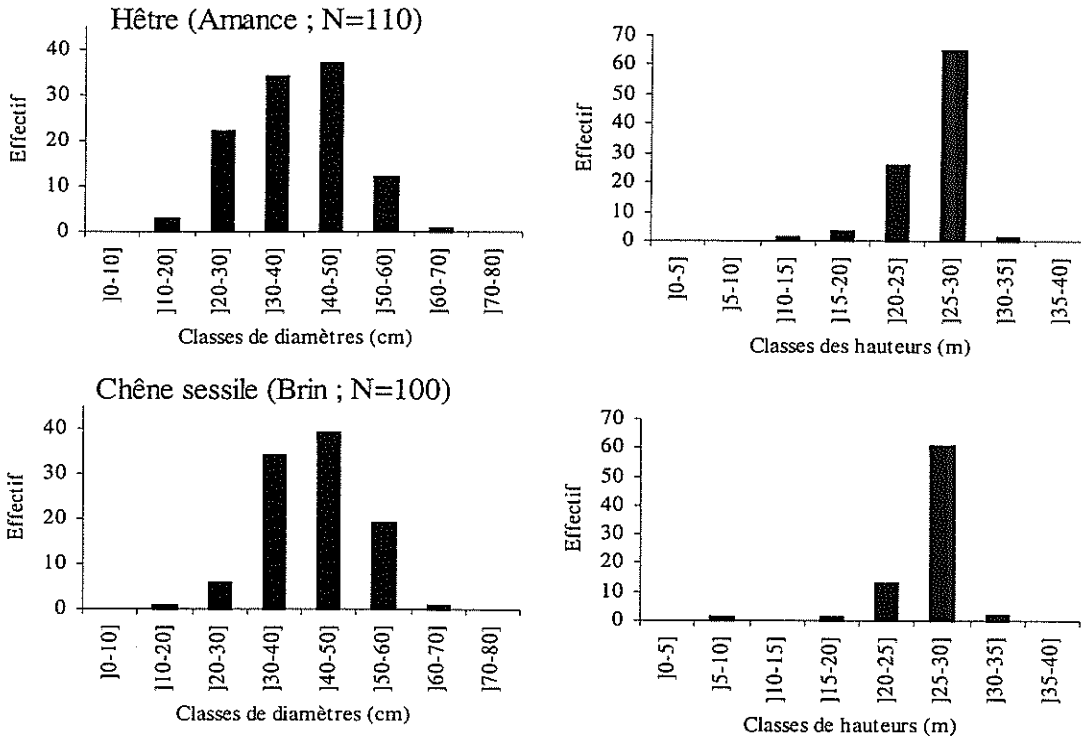


Figure 4. Répartition des diamètres et des hauteurs pour le hêtre et le chêne sessile en forêts d'Amance et de Brin.

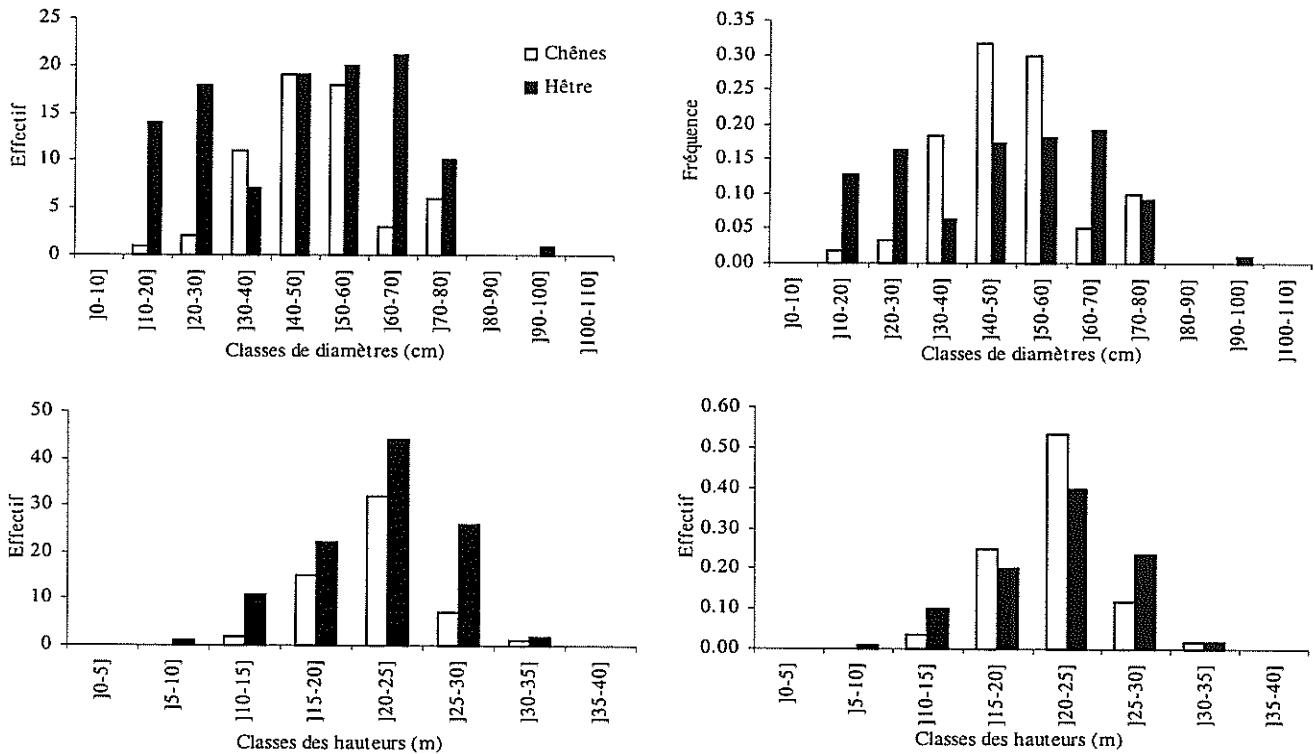


Figure 5. Répartition en effectif et fréquence des diamètres et des hauteurs pour le hêtre (N=110) et les chênes (N=60) au bois du Chapitre.

## 1.2. Comparaison arbres sains et chablis

### 1.2.1. Analyse globale

Les fréquences des arbres sains et chablis par massif et essence sont présentées dans le **tableau 5**. Pour le bois du Chapitre et la forêt de Brin, la fréquence de hêtre chablis apparaît plus forte que celle de chêne.

**Tableau 5.** Effectifs des arbres sains et chablis par essence et massif forestier. Le test du  $\chi^2$  teste la différence d'effectifs entre les deux modalités (hypothèse nulle : pas de différence ;  $\chi^2$  5% = 3,841 avec ddl=1). La valeur de  $\varepsilon$  compare les pourcentages d'arbres sains ou chablis entre les deux espèces. Si  $\varepsilon$  est supérieur ou égal à 1,96, la différence est significative au seuil de 5% (2,576 pour 1% et 3,2905 pour 1 p. mille)

Massif	Essence	N total	N sains	N chablis	$\chi^2$
Chapitre	Hêtre	110	40 (36%)	52 (47%)	1,47 ns
	Chênes	60	39 (65%)	15 (25%)	14,9 ***
	$\varepsilon$		3,58 ***	2,84 **	
Amance	Hêtre	110	39 (35%)	59 (54%)	3,73 ns
	Chênes	12	9 (75%)	0	
	$\varepsilon$		2,67 **		
Brin	Hêtre	37	18 (49%)	14 (38%)	0,54 ns
	Chênes	100	64 (64%)	12 (12%)	74,2 ***
	$\varepsilon$		1,63 ns	3,42 ***	

Sur l'ensemble des trois massifs (Chapitre, Amance et Brin), les chênes sont globalement plus hauts et plus gros que les hêtres et, pour les deux espèces, il apparaît une forte liaison positive entre la hauteur totale l'arbre (Ht) et les hauteurs de base et d'extension maximale des houppiers (Hbh, Heh) (**tableau 6**). La longueur de la grume et la hauteur d'extension maximale du houppier sont d'autant plus grandes que les arbres sont grands.

**Pour le hêtre**, 43% des chablis ont un diamètre supérieur à 50 cm contre seulement 16% pour les arbres sains. Pour les hauteurs, 69% des chablis dépassent 24 m contre 52% pour les arbres sains (**figure 6**). Les hêtres chablis sont globalement plus gros et pour les hauteurs inférieures ou égales à 25 m, les chablis présentent une base de houppier plus haute ( $\Delta = +2,2$  m ; +20%) et une hauteur d'extension maximale plus élevée ( $\Delta = +3$  m ; +17%) (**tableau 7**). Pour les hauteurs supérieures à 25 m, les chablis sont plus gros mais ne présentent pas de différences significatives des autres paramètres dendrométriques notés.

**Pour les chênes**, les arbres chablis apparaissent globalement plus gros et moins hauts que les arbres sains (**tableau 6**). Cette différence doit être considérée avec précautions car l'analyse des effectifs de types de dégâts par massif montre que les chênes chablis proviennent essentiellement du bois de Chapitre (peuplement mélangé à structure irrégulière) alors que 85% des chênes sains proviennent des futaies régulières des forêts de Brin et d'Amance.

**Tableau 6.** Caractéristiques dendrométriques des arbres sains et chablis par essence pour les forêts **d'Amance, de Brin et le Bois du Chapitre** et corrélations entre les différents paramètres. La valeur de p donne la signification statistique des comparaisons des moyennes des différents paramètres entre les arbres chablis et sains. Les corrélations significatives à  $p < 0.05$  et  $p < 0.10$  sont figurées en gras et en italiques.

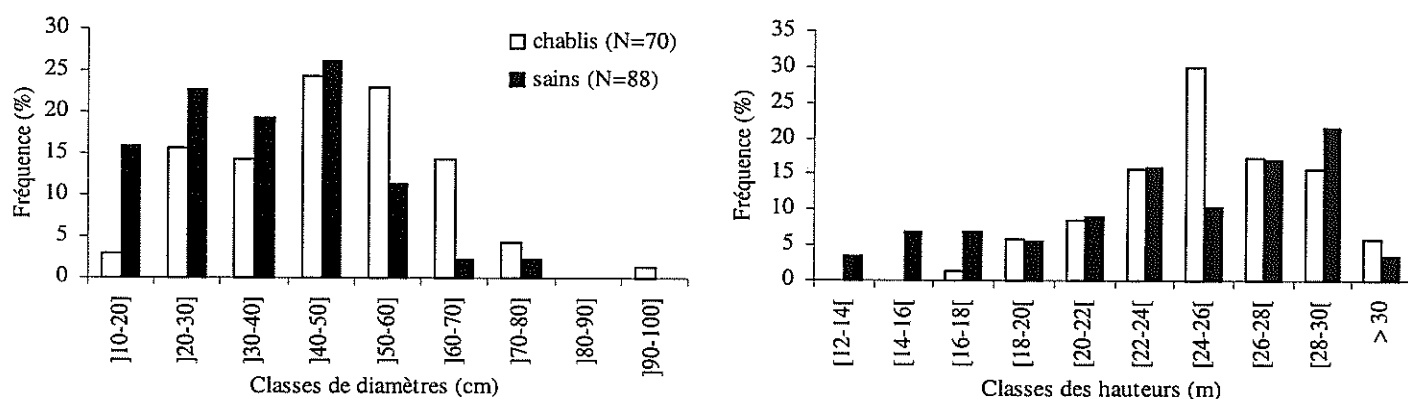
Matrice des corrélations Hêtre					Hêtre	tous types		chablis		sains		p	Matrice des corrélations Chênes				
Tous types						N=169	N=70		N=88		Tous types						
D130	HT	HBH	HEH	1	Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT		D130	HT	HBH	HEH		
D130	1.000				41.5	16.2	46.5	15.8	36.5	14.7	0.0001	D130	1.000				
HT	<b>0.583</b>	1.000			24.1	4.3	24.9	3.1	23.6	4.9	0.0551	HT	0.170	1.000			
HBH	0.106	<b>0.603</b>	1.000		11.4	3.7	12.0	3.1	11.1	4.1	0.1299	HBH	<b>-0.347</b>	<b>0.472</b>	1.000		
HEH	<b>0.226</b>	<b>0.760</b>	<b>0.682</b>	1	18.2	4.5	19.1	3.6	17.7	5.0	0.0505	HEH	-0.119	<b>0.773</b>	<b>0.517</b>	1	

Chablis					Chênes	tous types		chablis		sains		p	Chablis				
D130	HT	HBH	HEH	1		N=123	N=37		N=84		Tous types						
D130	HT	HBH	HEH	1	Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT		D130	HT	HBH	HEH		
D130	1.000				45.2	11.2	48.8	12.2	43.4	10.3	0.0135	D130	1.000				
HT	<b>0.567</b>	1.000			25.3	3.3	23.0	3.2	26.3	2.8	0.0000	HT	0.274	1.000			
HBH	-0.214	<b>0.329</b>	1.000		13.8	3.3	12.6	3.8	14.4	3.0	0.0060	HBH	-0.189	<b>0.536</b>	1.000		
HEH	-0.027	<b>0.521</b>	<b>0.390</b>	1	20.1	3.6	18.2	3.7	21.0	3.2	0.0000	HEH	0.033	<b>0.811</b>	<b>0.580</b>	1	

Sains					(HET-CH)		Chablis		Sains		Sains				
D130	HT	HBH	HEH	1	Amance	Brin	31	0	38	9	Tous types				
D130	HT	HBH	HEH	1	Chapitre	31	29	34	12	D130	HT	HBH	HEH		
D130	1.000									D130	1.000				
HT	<b>0.618</b>	1.000								HT	<b>0.311</b>	1.000			
HBH	<b>0.267</b>	<b>0.683</b>	1.000							HBH	<b>-0.383</b>	<b>0.364</b>	1.000		
HEH	<b>0.397</b>	<b>0.859</b>	<b>0.782</b>	1						HEH	-0.102	<b>0.687</b>	<b>0.411</b>	1	



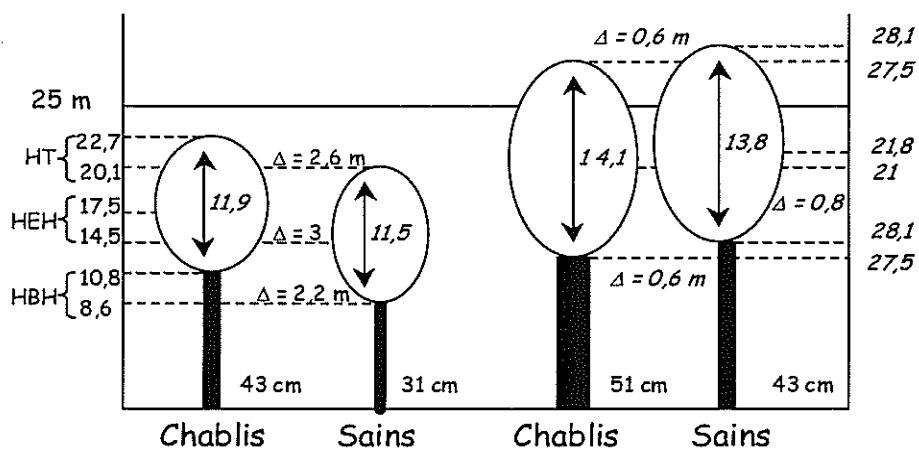
**Figure 6.** Fréquence des hêtres chablis et sains par classes de diamètre et de hauteur pour les forêts de **Brin, d'Amance et le Bois du Chapitre**

	Diamètre				
	Chablis		Sains		p
	moy	std	moy	std	
≤ 25	42.7	16.6	31.4	13.8	0.001
> 25	51.0	13.7	43.2	13.1	0.018

	Hbh				
	Chablis		Sains		P
	moy	std	moy	std	
≤ 25	10.8	2.5	8.6	3.1	0.001
> 25	13.4	3.1	14.3	2.6	0.186

	Heh				
	Chablis		Sains		p
	moy	std	moy	std	
≤ 25	17.5	2.6	14.5	3.6	0.000
> 25	21.0	3.7	21.8	3.2	0.329

**Tableau 7.** Caractéristiques dendrométriques des hêtres sains et chablis par classes de hauteur totale pour les forêts de **Brin, Amance et le Bois du Chapitre**. Pour la classe ≤25 m, la hauteur des arbres chablis et sains est respectivement de 22,7 et 20,1 m ( $p = 0.0012$  ;  $N=38$  et  $50$ ). Pour la classe > 25 m, les hauteurs sont respectivement de 27,5 et 28,1 (ns ;  $N=32$  et  $38$ ). Dans la figure ci-dessous, les valeurs en italiques ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.





### 1.2.2. Analyse par massif

Au Bois du Chapitre, les caractéristiques dendrométriques des hêtres et des chênes sont comparables avec un diamètre moyen respectivement de 46 et 51 cm et une hauteur totale de 22,6 et 22,5 m (**tableau 8**).

*Pour le hêtre*, 58% des chablis ont un diamètre supérieur à 50 cm contre seulement 30% pour les arbres sains. Pour les hauteurs, 81% des chablis dépassent 20 m contre 55% pour les arbres sains (**tableau 8 et figure 7**). Les hêtres chablis sont globalement plus gros ( $\Delta = 13,4$  cm ; +30%) et plus hauts que les hêtres sains ( $\Delta = 3,2$  m ; +15%) (**tableau 8**). Pour les hauteurs inférieures ou égales à 25 m, les chablis présentent une base de houppier plus haute ( $\Delta = +2,3$  m ; +23%) et une hauteur d'extension maximale plus élevée ( $\Delta = +3,6$  m ; +22%) (**tableau 9**). Pour les hauteurs supérieures à 25 m, les caractéristiques dendrométriques des chablis sont comparables à celles des arbres sains.

*Pour les chênes*, aucune différence significative n'apparaît entre les arbres sains et chablis.

**Tableau 8.** Caractéristiques dendrométriques des arbres sains et chablis par essence au **Bois du Chapitre** et corrélations entre les différents paramètres. La valeur de p donne la signification statistique des comparaisons des moyennes des différents paramètres entre les arbres chablis et sains. Les corrélations significatives à  $p < 0.05$  et  $p < 0.10$  sont figurées en gras et en italiques.

Matrice des corrélations Hêtre							Matrice des corrélations Chênes										
Tous types					Hêtre	tous types N=65		chablis N=31		sains N=34		Tous types					
D130	HT	HBH	HEH			Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT	p	D130	HT	HBH	HEH	
D130	1.000				D130	46.4	19.4	53.4	18.3	40.0	18.3	0.004	D130	1.000			
HT	<b>0.821</b>	1.000			HT	22.6	4.9	24.3	3.7	21.0	5.3	0.005	HT	<b>0.578</b>	1.000		
HBH	<b>0.316</b>	<b>0.480</b>	1.000		HBH	9.5	3.1	10.6	3.0	8.5	2.9	0.007	HBH	-0.002	<b>0.376</b>	1.000	
HEH	<b>0.559</b>	<b>0.687</b>	<b>0.451</b>	1.000	HEH	15.4	4.0	16.8	3.2	14.0	4.2	0.004	HEH	0.127	<b>0.462</b>	<b>0.463</b>	1
<b>Chablis</b>													<b>Chablis</b>				
D130	HT	HBH	HEH		Chênes	tous types N=41		chablis N=29		sains N=12		p	D130	HT	HBH	HEH	
D130	HT	HBH	HEH			Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT			D130	HT	HBH	HEH
D130	1.000				D130	50.9	12.1	50.1	12.9	52.8	10.2	0.537	D130	1			
HT	<b>0.744</b>	1.000			HT	22.5	2.9	22.0	2.7	23.7	3.2	0.092	HT	<b>0.502</b>	1		
HBH	-0.154	0.186	1.000		HBH	11.7	2.9	11.8	3.2	11.4	2.2	0.711	HBH	-0.120	<b>0.432</b>	1	
HEH	0.130	<i>0.346</i>	-0.060	1.000	HEH	16.7	2.8	16.9	3.0	16.3	2.1	0.482	HEH	0.165	<b>0.650</b>	<b>0.489</b>	1
<b>Sains</b>													<b>Sains</b>				
D130	HT	HBH	HEH										D130	HT	HBH	HEH	
D130	HT	HBH	HEH										D130	HT	HBH	HEH	
D130	1.000												D130	1.000			
HT	<b>0.851</b>	1.000											HT	<b>0.813</b>	1.000		
HBH	<b>0.579</b>	<b>0.571</b>	1.000										HBH	<b>0.588</b>	0.374	1.000	
HEH	<b>0.767</b>	<b>0.793</b>	<b>0.700</b>	1.000									HEH	0.024	0.147	0.305	1

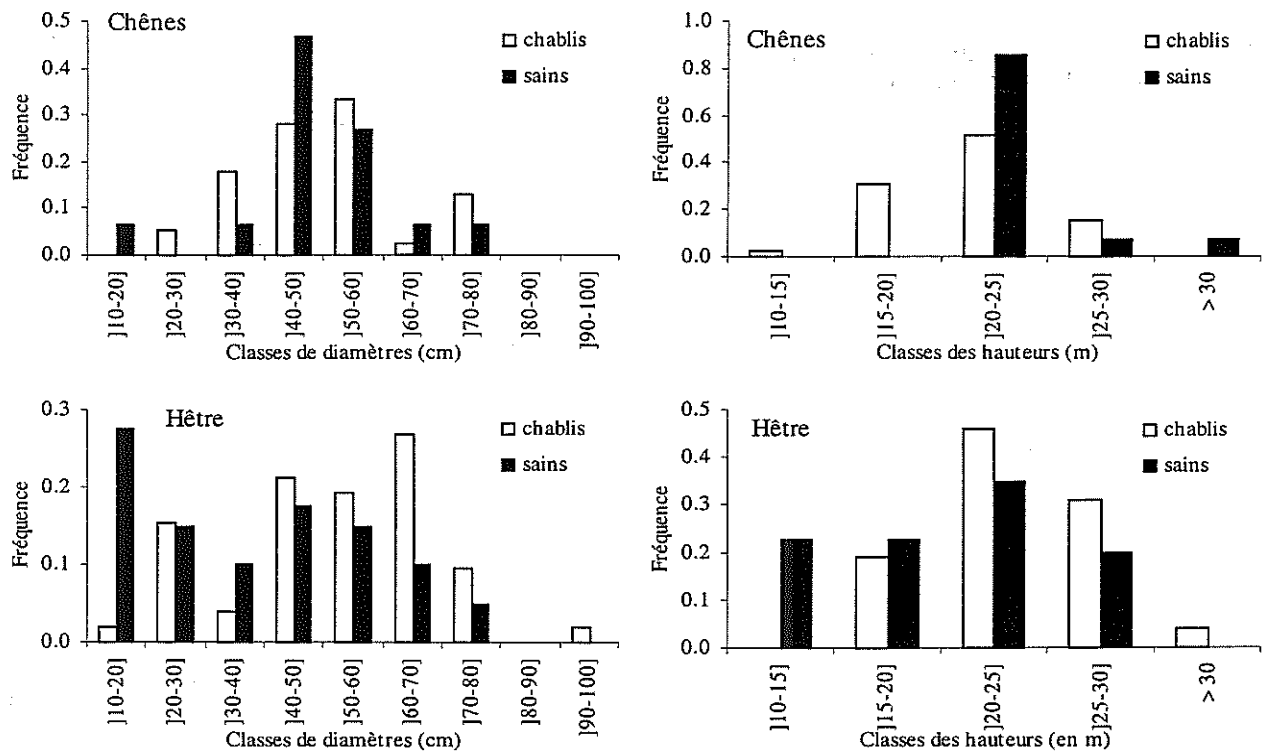


Figure 7. Fréquence des hêtres et des chênes chablis et sains par classes de diamètre et de hauteur pour le Bois du Chapitre (hêtre = 52 chablis et 40 sains ; chênes = 15 chablis et 39 sains).

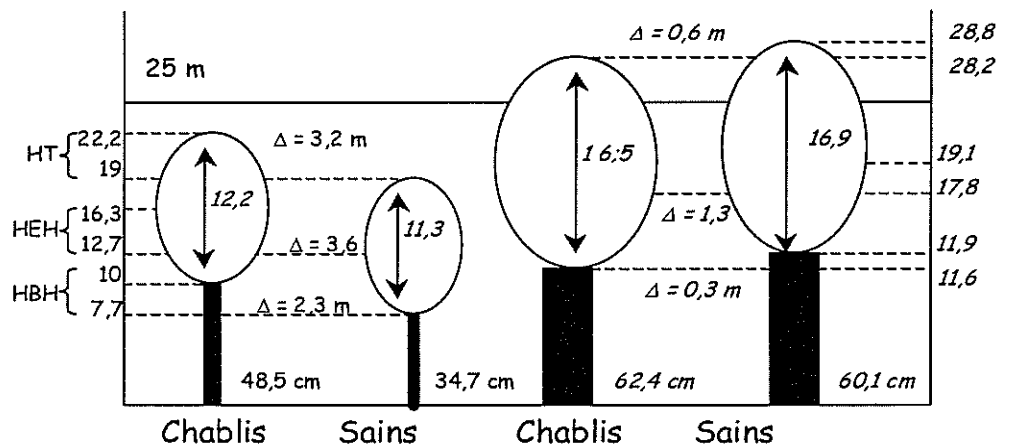
Diamètre					
	Chablis		Sains		
	moy	std	moy	std	p
<= 25	48.5	19.0	34.7	15.9	0.010
> 25	62.4	13.6	60.1	11.6	0.726

Hbh					
	Chablis		Sains		
	moy	std	moy	std	p
<= 25	10.0	2.3	7.7	2.5	0.002
> 25	11.6	3.9	11.9	2.1	0.892

Tableau 9. Caractéristiques dendrométriques des hêtres sains et chablis par classes de hauteur totale pour le Bois du Chapitre. Pour la classe <=25 m, la hauteur des arbres chablis et sains est respectivement de 22,2 et 19 m (p = 0.002 ; N=20 et 27). Pour la classe > 25 m, les hauteurs sont respectivement de 28,2 et 28,8 (ns ; N=11 et 7). Dans la figure ci-dessous, les valeurs en italiques ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

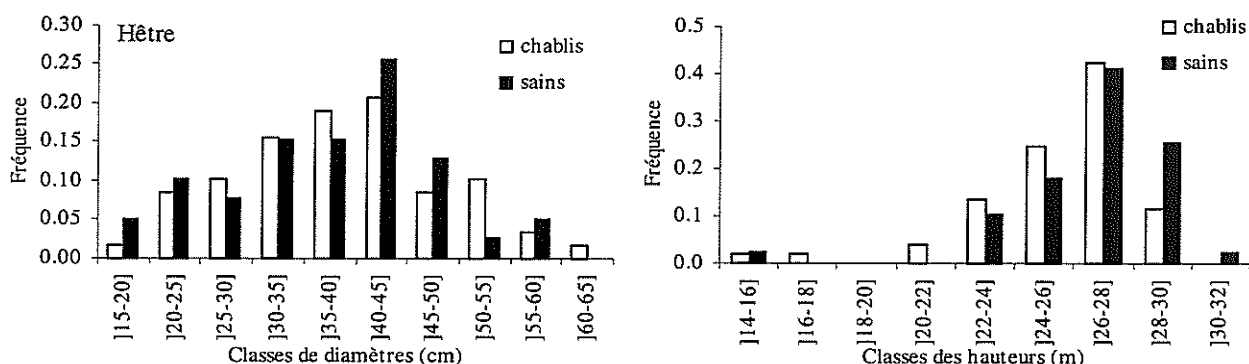
Heh					
	Chablis		Sains		
	moy	std	moy	std	p
<= 25	16.3	2.2	12.7	3.1	0.000
> 25	17.8	4.5	19.1	3.7	0.528



*En forêt d'Amance*, les hêtres sains et chablis présentent les mêmes caractéristiques dendrométriques (tableau 10 et figure 8).

**Tableau 10.** Caractéristiques dendrométriques des hêtres sains et chablis pour la forêt d'Amance et corrélations entre les différents paramètres. La valeur de p donne la signification statistique des comparaisons des moyennes des différents paramètres entre les arbres chablis et sains. Les corrélations significatives à  $p < 0.05$  et  $p < 0.10$  sont figurées en gras et en italiques.

Chablis							Tous types											
D130	HT	HBH	HEH		Hêtre	tous types N=69	chablis N=31	sains N=38		D130	HT	HBH	HEH					
						Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT			p				
D130	1.000				D130	39.7	9.9	42.2	8.9	37.7	10.3	0.060	D130	1.000				
HT	<i>0.307</i>	1.000			HT	26.0	2.4	25.6	1.9	26.4	2.8	0.195	HT	<b>0.344</b>	1.000			
HBH	-0.295	<i>0.310</i>	1.000		HBH	14.1	2.5	13.7	2.5	14.5	2.5	0.208	HBH	<b>-0.275</b>	<b>0.390</b>	1.000		
HEH	0.226	<b>0.727</b>	<b>0.417</b>	1	HEH	21.2	2.5	21.3	2.2	21.1	2.7	0.782	HEH	0.143	<b>0.691</b>	<b>0.567</b>	1	
Sains																		
D130	HT	HBH	HEH															
D130	1.000																	
HT	<b>0.440</b>	1.000																
HBH	-0.218	<b>0.422</b>	1.000															
HEH	0.090	<b>0.701</b>	<b>0.693</b>	1														



**Figure 8.** Fréquence des hêtres chablis et sains par classes de diamètre et de hauteur pour la forêt d'Amance (hêtre =31 chablis et 38 sains).

**En forêt de Brin**, les rares chablis de chênes présentent les mêmes caractéristiques dendrométriques que les chênes sains. Pour le hêtre, largement dominé par le chêne (essence objectif), les chablis ont tendance à être plus gros avec une hauteur de grume plus grande (**tableau 11**).

**Tableau 11.** Caractéristiques dendrométriques des arbres sains et chablis par essence pour la forêt de Brin et corrélations entre les différents paramètres. La valeur de p donne la signification statistique des comparaisons des moyennes des différents paramètres entre les arbres chablis et sains. Les corrélations significatives à  $p < 0.05$  et  $p < 0.10$  sont figurées en gras et en italiques.

Matrice des corrélations Hêtre							Matrice des corrélations Chênes											
Tous types					Hêtre	tous types N=24	chablis N=8	sains N=16	Tous types									
	D130	HT	HBH	HEH		Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT	p		D130	HT	HBH	HEH	
D130	1.000				D130	29.6	13.1	36.4	16.1	26.2	10.2	0.071	D130	1.000				
HT	<b>0.871</b>	1.000			HT	23.0	4.6	24.6	4.0	22.3	4.8	0.245	HT	<b>0.576</b>	1.000			
HBH	<b>0.620</b>	<b>0.683</b>	1.000		HBH	9.2	3.1	10.8	2.1	8.4	3.3	0.075	HBH	<b>-0.317</b>	<b>0.257</b>	1.000		
HEH	<b>0.819</b>	<b>0.948</b>	<b>0.594</b>	1	HEH	18.0	4.9	19.7	3.7	17.1	5.2	0.231	HEH	<b>0.367</b>	<b>0.708</b>	<b>0.235</b>	1	
<b>Chablis</b>							<b>Chablis</b>											
	D130	HT	HBH	HEH	Chênes	tous types N=71	chablis N=8	sains N=63	Tous types									
	D130	HT	HBH	HEH		Moy.	EcT	Moy.	EcT	Moy.	EcT	p		D130	HT	HBH	HEH	
D130	1.000				D130	43.1	9.1	44.1	8.1	43.0	9.3	0.745	D130	1.000				
HT	<b>0.952</b>	1.000			HT	26.8	2.4	26.7	2.2	26.8	2.4	0.921	HT	0.5978	1			
HBH	<b>0.727</b>	<b>0.734</b>	1.000		HBH	14.8	2.9	15.4	4.7	14.7	2.7	0.529	HBH	-0.158	0.377	1		
HEH	<b>0.857</b>	<b>0.872</b>	0.558	1	HEH	21.8	2.5	22.6	2.7	21.7	2.5	0.339	HEH	0.569	<b>0.95</b>	0.434	1	
<b>Sains</b>							<b>Sains</b>											
	D130	HT	HBH	HEH										D130	HT	HBH	HEH	
D130	1.000													D130	1			
HT	<b>0.883</b>	1.000												HT	<b>0.575</b>	1		
HBH	<b>0.552</b>	<b>0.643</b>	1.000											HBH	<b>-0.362</b>	<b>0.25</b>	1	
HEH	<b>0.869</b>	<b>0.967</b>	<b>0.557</b>	1										HEH	<b>0.344</b>	<b>0.69</b>	<b>0.19</b>	1

### Conclusions

Sur l'ensemble des trois massifs (Chapitre, Amance et Brin) ; les chênes ont tendance à être plus hauts et plus gros que les hêtres et, pour les deux espèces, il apparaît une forte liaison positive entre la hauteur totale l'arbre (Ht) et les hauteurs de base et d'extension maximale des houppiers (Hbh, Heh). La longueur de la grume et la hauteur d'extension maximale du houppier sont d'autant plus grandes que les arbres sont grands.

En moyenne, les hêtres chablis sont plus gros et plus hauts que les hêtres sains. En revanche, pour les chênes, aucune différence significative n'apparaît entre les deux types.

## 2. CARACTERISTIQUES DES « SYSTEMES » RACINAIRES

Il est important de rappeler que les observations des « systèmes » racinaires ne concernent ici que le complexe sol-racine c'est-à-dire la motte (ou galette) constituée des racines et de la terre dégagée suite à la chute de l'arbre. Nous n'avons donc aucune information sur les racines dans la motte et donc sur l'architecture réelle du système. Seules des informations sur les racines verticales et horizontales *visibles* et *dépassant de la motte* et d'éventuelles déformations des racines nous renseignent sur celle-ci. A partir des mesures des mottes, des calculs de surface et de volume ont été effectués. Ces valeurs sont des *estimations* concernant essentiellement le système racinaire intensif (c'est-à-dire l'ensemble des racines situées à proximité du tronc) et il faut davantage considérer les valeurs relatives entre les espèces ou les sites que les chiffres bruts. Pour l'étude des systèmes racinaires et des relations avec tous les paramètres stationnels, seuls les chablis « complets » ont été utilisés (voir légende du **tableau 12**). Pour le hêtre et le chêne, ces derniers ne représentent respectivement que 35% et 26% de l'effectif initial disponible.

**Tableau 12.** Effectif des chablis par espèce et par massif selon les paramètres étudiés. **Aérien** : chablis pour lesquels les 4 paramètres dendrométriques aériens sont disponibles (Dia, Ht, Hbh, Heh). **Motte** : chablis pour lesquels toutes les données relatives au système racinaire sont disponibles. **Complet** : chablis pour lesquels le maximum de données relatives au système aérien, racinaire **et** aux contraintes édaphiques sont disponibles. Ce sont ces seuls chablis complets qui sont utilisés pour la suite de l'analyse.

Hêtre	Total	Sains	Chablis		
			aérien	motte	complet
Amance	110	38	31	34	31
Brin	37	16	8	10	10
Chapitre	110	34	31	47	36
Haye	43			39	20
Poirier	12			12	12
	312	88	70	142	109

Chênes	Total	Sains	Chablis		
			aérien	motte	complet
Amance	12	9	0	0	0
Brin	100	63	8	10	10
Chapitre	60	12	29	36	30
Haye					
Poirier	5			5	5
	177	84	37	51	45

Les données disponibles pour les chablis complets sont présentées dans le **tableau 13**. Le système aérien est défini par 3 variables. Le complexe sol-racine (= motte = galette) est défini par 7 variables. 15 variables caractérisent les racines et 5 variables les contraintes du sol. Les épaisseurs des horizons limoneux, limono-argileux ou argileux ont également été notées.

**Tableau 13.** Variables disponibles pour les 154 chablis « complets ». Les variables qualitatives sont présentées en *italiques*.

système aérien	complexe racines/sol	racines latérales	racines verticales	motte
espèce	typemotte	longmaxraclat	longplusgrosracvert	recegmotte
D130	E1motte	longminraclat	longmoyracfinvert	<i>Orient</i>
Ht	Hmotte	nbgrosraclat1	nbgrosracvert1	AppCail
Hbh	Lmotte	nbgrosraclat2	nbgrosracvert2	AppObst
	Volmotte	<i>santeraclat</i>	densracfinforte	<i>NatObst</i>
	Volprospection		densracfinmoy	
	Surfmotte		densracfinfaible	
			<i>repartracfine</i>	
			<i>santracvert</i>	
			<i>deformracvert</i>	

### 2.1. Comparaison des hêtres et des chênes « complets »

Les hêtres et les chênes « complets » ont des diamètres et des hauteurs de base de houppier comparables. En revanche, les hêtres sont plus grands que les chênes (**tableau 14**). Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus sur l'échantillon « chablis aérien » (voir **tableau 6**).

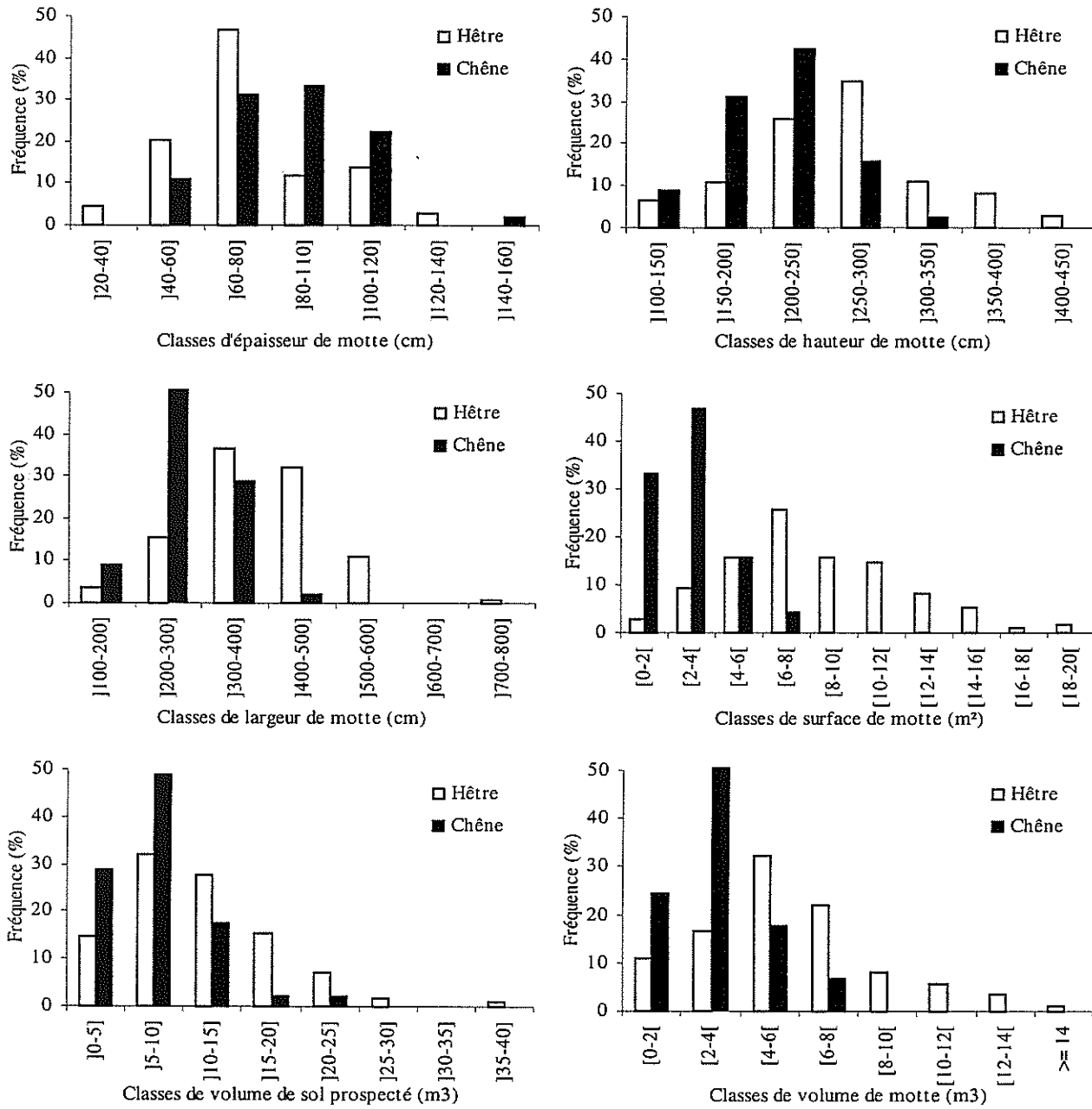
Globalement, les caractéristiques des mottes apparaissent très différentes entre les deux essences. Les hêtres présentent généralement des mottes plates (74%) alors que, pour les chênes, on observe respectivement 56% et 44% de type globuleux et plat. Exceptée l'épaisseur de la motte, tous les autres paramètres quantitatifs ont des valeurs plus élevées pour le hêtre (**tableau 14 et figures 9 et 10**). 73% des hêtres ont une surface de motte supérieure à 6m<sup>2</sup> et 96% des chênes une surface inférieure à 6m<sup>2</sup> ; les surfaces moyennes étant respectivement de 8,3 m<sup>2</sup> et 4,8 m<sup>2</sup>. Pour les volumes de sol prospecté, 53% des hêtres prospecte plus de 10 m<sup>3</sup> alors que seulement 22% des chênes dépassent cette valeur ; les volumes moyens étant respectivement de 11,4 m<sup>3</sup> et 7,5 m<sup>3</sup>.

En moyenne, il n'apparaît pas de différences entre les caractéristiques des racines latérales (**tableau 14 et figure 10**). En revanche, pour les racines verticales des différences sont observables. Pour 45% des chênes, la plus grosse racine verticale dépasse 50 cm contre seulement 28% pour les hêtres (**figure 10**). 40% des hêtres ne présentent aucune grosse racine verticale (> 20 mm) contre seulement 13% pour les chênes. Enfin, 60% des chênes ont entre 1 et 9 grosses racines verticales contre seulement 37% pour le hêtre.

En ce qui concerne les racines fines, le hêtre présente une plus forte proportion de densité forte (**tableau 14**).

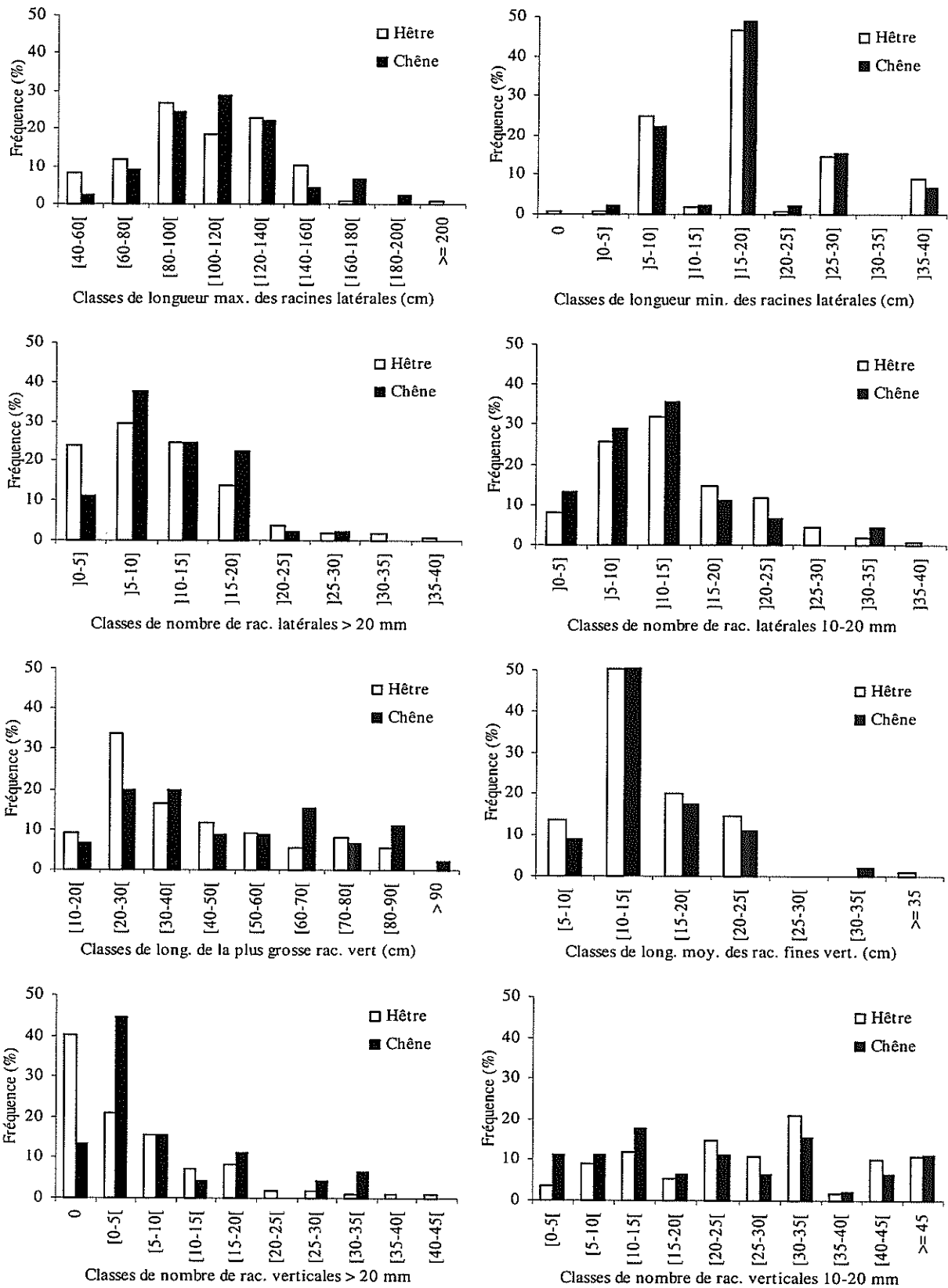
**Tableau 14.** Caractéristiques moyennes (EcT= écart-type) des compartiments aériens et souterrains des **hêtres** et des **chênes « complets »** pour l'ensemble des forêts. Les différences significatives sont signalées en gras.

	Hêtre (N=109)		Chênes (N=45)		p
	Moy.	EcT	Moy.	EcT	
<b>Partie aérienne</b>					
Diamètre (cm)	47.0	14.3	48.2	11.7	0.602
Hauteur totale (m)	26.8	5.0	24.4	4.7	<b>0.007</b>
Hauteur de la base du houppier (m)	13.2	4.3	13.0	4.1	0.715
<b>Motte</b>					
Epaisseur (cm)	75.1	22.3	85.2	23.3	<b>0.013</b>
Hauteur (cm)	268.3	68.2	217.6	43.5	<b>0.000</b>
Largeur (cm)	375.1	98.8	274.0	57.3	<b>0.000</b>
Surface (m <sup>2</sup> )	8.3	3.8	4.8	1.7	<b>0.000</b>
Volume (m <sup>3</sup> )	5.7	3.4	3.1	1.5	<b>0.000</b>
Vol. prospecté (m <sup>3</sup> )	11.4	6.4	7.5	3.8	<b>0.000</b>
<b>Racines latérales</b>					
Long. Maximale (cm)	98.5	32.6	106.2	29.9	0.172
Long. Minimale (cm)	20.4	9.1	20.3	8.5	0.942
Nb racines > 20 mm de dia.	10.2	8.0	10.9	5.4	0.613
Nb racines 10-20 mm de dia.	12.8	7.5	11.0	6.5	0.167
<b>Racines verticales</b>					
Long. de la plus grosse (cm)	36.2	19.7	45.6	27.0	<b>0.018</b>
Long. moy. des racines fines (cm)	12.1	5.2	12.0	4.8	0.983
Nb racines > 20 mm de dia.	9.7	10.8	12.4	9.4	0.155
Nb racines 10-20 mm de dia.	25.6	14.3	22.0	15.3	0.165
<b>Densité racines fines</b>					
% de densité forte (>5 racines/dm <sup>2</sup> )	10.8	19.3	0.9	6.0	<b>0.001</b>
% de densité moyenne (1-5 racines/dm <sup>2</sup> )	6.1	10.1	4.9	10.0	0.516
% de densité faible (< 1 racine/dm <sup>2</sup> )	2.4	3.6	4.2	3.5	<b>0.008</b>



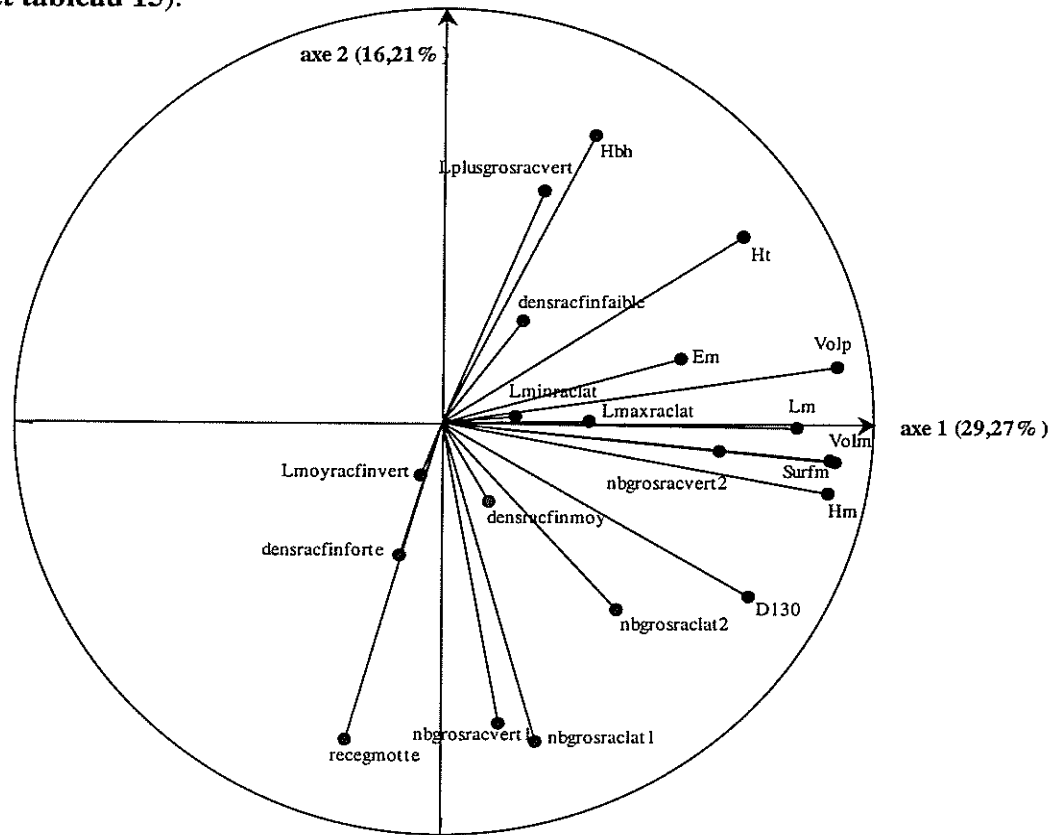
**Figure 9.** Répartition des hêtres et des chênes « complets » par classes des différents paramètres caractérisant les mottes (N=109 hêtres et 45 chênes ; toutes forêts).





**Figure 10.** Répartition des hêtres et des chênes « complets » par classes des différents paramètres caractérisant les racines dépassant des mottes (N=109 hêtres et 45 chênes ; toutes forêts).

Afin de préciser les corrélations entre les compartiments aériens et souterrains, des ACP ont été effectuées. La distribution des variables dans le plan factoriel 1-2 révèle une structuration le long de l'axe 1 (29,27% de la variance totale) liée à l'importance des mottes et prend en compte simultanément les variations de largeur, de hauteur, d'épaisseur, de surface et de volume (figure 11 et tableau 15).



Variable	Axe 1	Variable	Axe 2
Volp	1337	nbgrostraclat1	1758
Surfm	1321	recegmotte	1731
Volm	1273	nbgrosvacvert1	1562
Hm	1263	Hbh	1402
Lm	1068	Lplusgrosvacvert	911
D130	796	nbgrostraclat2	608
Ht	763	Ht	583
nbgrosvacvert2	653	D130	527
Em	481	densracfinforte	304
nbgrostraclat2	260	densracfinfaible	176
Hbh	195	densracfinmoy	110
Lmaxraclat	183	Hm	85
Lplusgrosvacvert	85	Em	70
recegmotte	79	Volp	50
nbgrostraclat1	73	Lmoyracfinvert	48
densracfinfaible	53	Surfm	27
Lminraclat	46	Volm	24
nbgrosvacvert1	26	nbgrosvacvert2	14
densracfinmoy	17	Lm	0
densracfinforte	14	Lmaxraclat	0
Lmoyracfinvert	3	Lminraclat	0

**Figure 11 .** Répartition des 21 variables caractérisant les systèmes aérien et souterrain dans le plan factoriel 1-2 de l'ACP sur matrice de corrélation (N=154 arbres ; 5 sites). Les contributions des variables à la définition des axes sont présentées dans le tableau ci-contre (données classées par ordre décroissant).

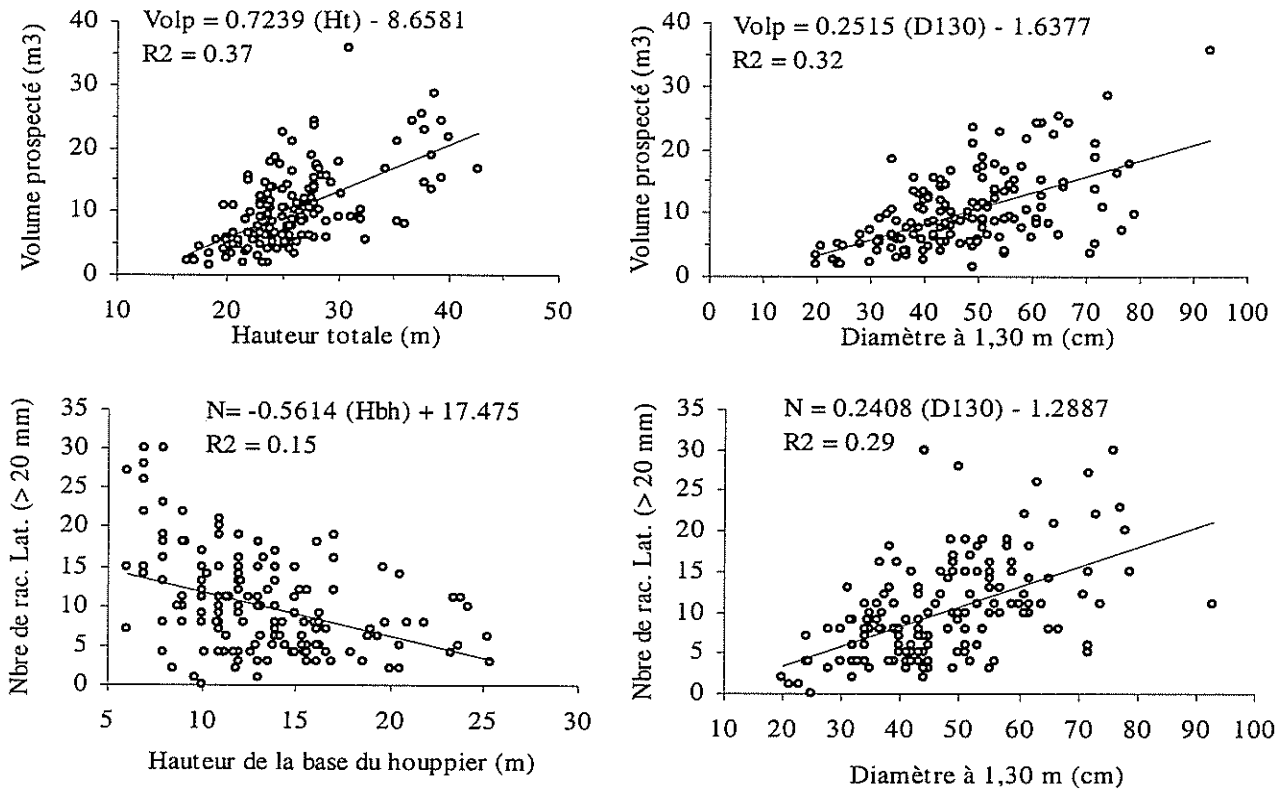
**Tableau 15.** Matrice des corrélations entre les 21 variables quantitatives caractérisant les 154 arbres chablis (109 hêtres, 45 chênes ; 5 forêts). Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.

	Partie aérienne			Dimension des mottes				Racines latérales					
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT	0.335	1.000											
HBH		0.736	1.000										
Ep	0.433	0.562	0.397	1.000									
Haut	0.655	0.525	0.194	0.424	1.000								
Larg	0.481	0.448			0.728	1.000							
Vol	0.619	0.483	0.170	0.390	0.820	0.814	1.000						
Volp	0.569	0.608	0.323	0.420	0.754	0.786	0.898	1.000					
Surf	0.606	0.502	0.170	0.289	0.911	0.926	0.896	0.837	1.000				
Lmax	0.287	0.177		0.251	0.215		0.166	0.339	0.167	1.000			
Lmin										0.291	1.000		
Nb > 20 mm	0.534		-0.357		0.304				0.192			1.000	
Nb 10-20 mm	0.368	0.182			0.365	0.281	0.269	0.244	0.332		0.172	0.529	1.000
Lplusgrosse		0.448	0.425	0.292				0.396					-0.240
Lmoyracfin													
Nb > 20 mm	0.472		-0.326									0.621	0.286
Nb 10-20 mm	0.383	0.330		0.370	0.549	0.480	0.524	0.506	0.531	0.246			0.314
forte		-0.165	-0.182										
moy			-0.162									-0.230	
faible	0.167		0.207					0.171		0.195			
recegmotte	0.237	-0.422	-0.486	-0.172		-0.246	-0.132	-0.284	-0.160			0.481	0.208

	Racines verticales			Densité racines fines				
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible	recegmotte
D130								
HT								
HBH								
Ep								
Haut								
Larg								
Vol								
Volp								
Surf								
Lmax								
Lmin								
Nb > 20 mm								
Nb 10-20 mm								
Lplusgrosse	1.000							
Lmoyracfin	0.206	1.000						
Nb > 20 mm	-0.224	0.171	1.000					
Nb 10-20 mm				1.000				
forte	-0.267	0.203			1.000			
moy					0.257	-0.263	1.000	
faible					-0.375	-0.460	1.000	
recegmotte	-0.399	0.177	0.569	-0.178	0.225			1.000

*L'importance des mottes est également fortement corrélée aux dimensions des arbres (tableau 15 et figure 12). Les arbres les plus gros prospectent les volumes de sol les plus importants. Globalement, un arbre de 30 m prospecte deux fois plus de sol qu'un arbre de 20 m (13 m<sup>3</sup> contre 6 m<sup>3</sup>). De la même façon, un arbre de 50 cm de diamètre prospecte deux fois plus de sol qu'un arbre de 30 cm (10,9 m<sup>3</sup> contre 5,9 m<sup>3</sup>).*



**Figure 12.** Relation entre le volume de sol prospecté (m<sup>3</sup>), le nombre de grosses racines latérales et les dimensions des arbres (n=154 arbres ; tous sites et espèces confondus).

La structuration le long de l'axe 2 (16,21% de la variance) est liée aux caractéristiques des racines dépassant de la motte et prend en compte également en compte les dimensions des arbres (figure 11). Les arbres les plus gros ou avec une hauteur de base de houppier la plus faible présentent le plus grand nombre de racines latérales et verticales ; les corrélations les plus fortes étant observées pour les racines de plus gros diamètres (> 20 mm) (tableau 15 et figure 12). Les corrélations avec les longueurs des racines sont moins fortes voire absentes. Ceci peut s'expliquer en grande partie par le fait que les longueurs maximales des racines latérales observées ne reflètent qu'une faible partie de l'extension réelle. On peut également imaginer que cette longueur exprime essentiellement la zone de « fragilité » du système horizontal à l'arrachement. Ainsi, à partir d'une certaine longueur, le diamètre des racines latérales diminuant, il dépasse un « seuil » de résistance. Sous l'effet de traction très forte, les racines cassent à cet endroit. Les longueurs observées n'ont alors aucune raison d'être fortement corrélées avec les caractéristiques aériennes car elles expriment indirectement un « diamètre seuil » de résistance à l'arrachement.

Le volume de sol prospecté est donc étroitement corrélé aux caractéristiques dendrométriques des arbres. Le modèle élaboré à partir du diamètre (D130) et de la hauteur totale (Ht) explique plus de 50% de la variabilité du volume de sol prospecté (Volprosp) (tableaux ci-dessous et figure 13).

*Analyse de Variance* (N=154 arbres ; 109 hêtres et 45 chênes , 5 sites)

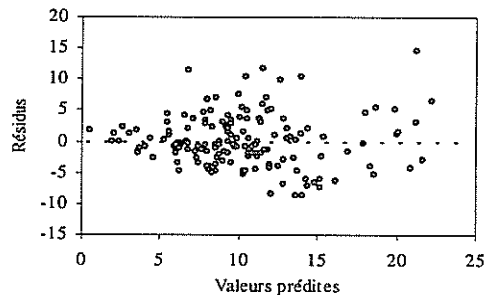
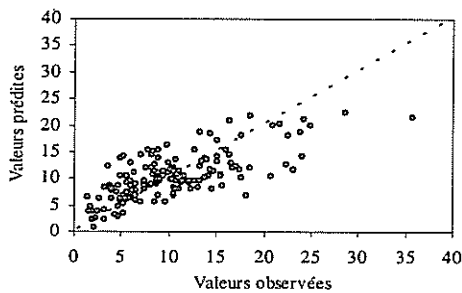
	$\Sigma$ Carrés	dl	Carrés moyens	F	niveau p
Régress.	2862.9	2	1431.4	81.9	0.0000
Résidus	2640.4	151	17.5		
Total	5503.3				

*Synthèse Régression* de la Var. Dépendante : Volprosp

R= .721 ; R<sup>2</sup>= .52 ; R<sup>2</sup> Ajusté= .514

F(2,151)=81.861 p<.00000 Err-Type de l'Estim.: 4.182

	Err-Type		Err-Type			niveau p	Corrél. Part.
	BETA	de BETA	B	de B	t(151)		
OrdOrig.			-12.9794	1.893	-6.856	0.0000	
HT	0.4706	0.0598	0.55999	0.0712	7.866	0.0000	0.539
D130	0.4113	0.0598	0.18183	0.0264	6.875	0.0000	0.488



### Conclusions (tout milieu – hêtre et chênes confondus)

L'augmentation de la taille de l'arbre se traduit par :

- une motte plus grosse ;
- un volume de sol prospecté plus important ;
- un plus grand nombre de racines latérales et verticales (surtout celles de diamètre supérieur à 20 mm).

Classe de D130 (cm)	Ht	Taille de la motte						Nb Rac. latérales		Nb Rac. verticales	
		Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	> 20 mm	10-20 mm	> 20 mm	10-20 mm
< 30 cm (23,8 ; n=11)	22.2	52.5	163.6	247.7	1.6	3.6	3.3	3.3	5.7	3.9	13.2
[30-40[ (35,1 ; n=35)	24.5	73.7	216.8	292.7	3.4	7.5	5.1	8.3	10.8	7.9	19.2
[40-50[ (44,3 ; n=44)	26.6	75.6	241.0	346.7	4.6	9.7	6.7	8.5	11.0	7.0	25.4
[50-60[ (53,8 ; n=37)	26.7	82.5	285.1	367.0	5.7	11.9	8.4	12.1	14.3	12.4	25.6
[60-70[ (63,1 ; n=15)	28.1	91.1	323.6	442.3	7.8	15.0	11.6	17.1	18.1	16.4	34.4

## 2.2. Analyse discriminante des effets inter-sites et intra-sites

Afin de préciser l'importance respective des effets site et espèce (=intra-site), des analyses discriminantes et des analyses de variances ont été effectuées. Pour chacun des effets étudiés, l'analyse discriminante inter-classes permet de mettre en évidence l'effet de la variable étudiée et l'analyse intra-classes d'étudier l'origine des variations dans chaque classe. Par exemple, si l'analyse inter-site met en évidence une discrimination des relevés selon ce paramètre, l'analyse intra-classe conjointe peut mettre en évidence un effet espèce pour chacun des sites (et réciproquement pour l'effet espèce). Les modalités dans chacune des classes sont présentées ci dessous :

Effet site				Effet espèce			
Numéro de la classe	Site	Nb d'arbres	Fréq (%)	Numéro de la classe	Espèce	Nb d'arbres	Fréq (%)
1	Amance	31	20,1	1	Hêtre	109	71
2	Brin	20	13	2	Chênes	45	29
3	Chapitre	66	42,9				
4	Haye	20	13				
5	Poirier	17	11				

### a) Analyse inter-sites

Avant de décrire des différences éventuelles entre les sites, on peut s'interroger sur la signification statistique de la variabilité inter-sites. Le test mis en œuvre calcule pour chaque répartition aléatoire des individus (154 arbres) dans les 6 groupes l'inertie inter-site totale (Test de permutation multivarié de Romesburg). La proportion de valeurs calculées (simulées) inférieures ou supérieures à la valeur d'inertie observée permet de conclure quant à la validité de l'analyse. Si la grande majorité des valeurs simulées est inférieure à la valeur observée ceci indique une ressemblance globalement plus forte entre individus d'un même site et justifie la description des différences par l'analyse discriminante. Le test est hautement significatif. Il existe donc bien forte une variabilité entre les sites.

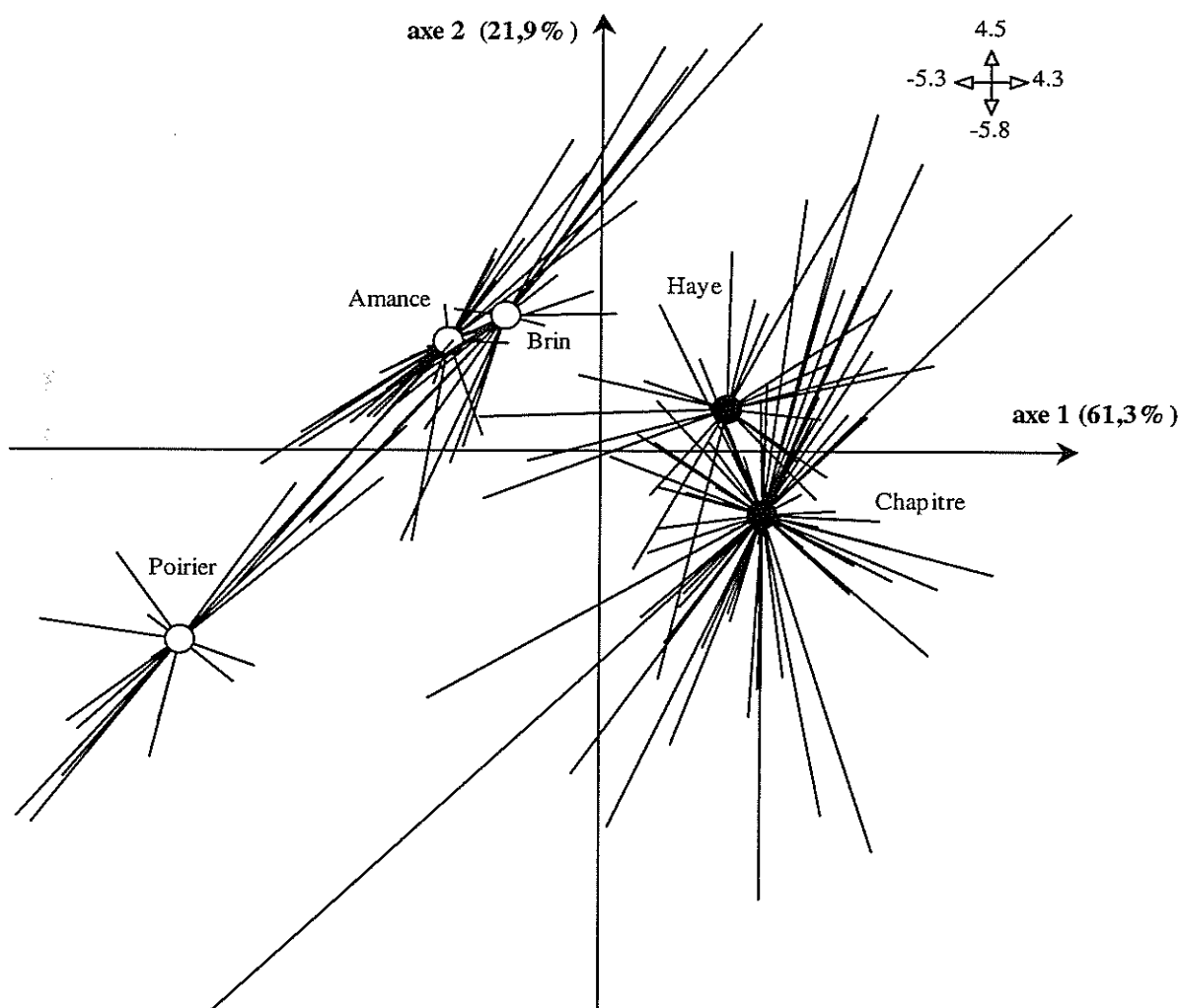
Nombre de permutations aléatoires : 1000	Inertie inter-classes observée (obs) : 5,1238
Valeurs calculées minimum : 0,2663	maximum : 5,1258
Nombre de simulations $X < \text{obs}$ : 1000	(fréquence : 1.00)
Nombre de simulations $X \geq \text{obs}$ : 0	(fréquence : 0.00)

L'inertie **inter-site** vaut 5,12 (soit **24,4 %** de l'inertie totale qui vaut 21) dont 83% s'exprime sur les deux premiers axes (somme des deux valeurs propres = 4,26).

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	3,1423	0,6133	0,6133
2	1,1211	0,2188	0,8321
3	0,5988	0,1169	0,9490

*L'analyse inter-site* met en évidence un effet site significatif (**figure 14**). Le premier axe discrimine nettement les forêts de Haye et le Bois du Chapitre à la parcelle du Beau-Poirier ; les forêts de Brin-Amance étant intermédiaires et très proches l'une de l'autre. Le second axe oppose les deux massifs du plateau lorrain aux trois forêts du plateau calcaire ; la parcelle du Beau-Poirier ayant toujours une position extrême. La matrice des distances entre les différents sites au sens de la métrique de Mahalanobis (inverse de la matrice de covariances intra-classes) est présentée dans la tableau suivant. Ces distances fournissent une image globale de la configuration des poids moyens.

	Amance	Brin	Chapitre	Haye	Poirier
Amance	0				
Brin	5.50	0			
Chapitre	29.37	24.97	0		
Haye	36.85	32.14	16.55	0	
Poirier	29.65	30.34	56.82	49.96	0



**Figure 14.** Répartition des 5 sites dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante inter-site réalisée après l'ACP sur matrice de corrélation. Les 154 arbres, figurées par des lignes, sont positionnés par des codes de variance 1 optimisant la variance inter-site. Le rond représente le centre de gravité pour chaque site.

**La discrimination entre les sites s'explique par les variations des caractéristiques dendrométriques.** Ainsi, la hauteur totale, la hauteur de la base du houppier et le diamètre participent respectivement à 65,8% , 56,9% et 26,8% à l'inertie totale (**tableaux 16a et 16b**). Concernant **le système racinaire, le recouvrement des éléments grossiers** dans la motte participe à plus de 70% de l'inertie totale. Les grosses racines verticales (nombre et longueur) et latérales (nombre) ainsi que le volume prospecté participent chacun à plus de 25% de l'inertie totale. Ainsi, les forêts de Haye et du Chapitre du plateau calcaire de lorraine se distinguent du Beau-Poirier (même région) et du plateau lorrain par un recouvrement en éléments grossiers important, un nombre de grosses racines verticales plus important et par des arbres moins hauts. Le Beau-Poirier (Hêtraie régulière) se distingue des autres massifs par les hauteurs et les diamètres des arbres et les volumes de sol prospectés les plus importants.

**Tableau 16a.** Comparaisons inter-sites des variables dendrométriques et du volume de sol prospecté (hêtre et chênes confondus). Une lettre différente indique une différence significative au seuil de 5% (test LSD)

	D(130) Moy		Ht Moy		Hbh Moy		Volprosp Moy				
Haye	36.5	A	Chapitre	23.4	A	Chapitre	10.5	A	Haye	6.7	A
Brin	39.5	A	Brin	25.8	B	Brin	13.1	B	Chapitre	8.8	A
Amance	42.6	A	Amance	26.0	B	Haye	13.4	B	Brin	9.2	A
Chapitre	53.1	B	Haye	26.5	B	Amance	14.3	B	Amance	12.4	B
Poirier	55.3	B	Poirier	37.1	C	Poirier	21.0	C	Poirier	17.4	C

**Tableau 16b.** Décomposition du poids (en % de l'inertie totale) de chaque variable dans l'analyse discriminante de l'effet site (réalisée après l'ACP). L'inertie inter-site représente 24,4% de l'inertie totale et l'intra-site 75,6%.

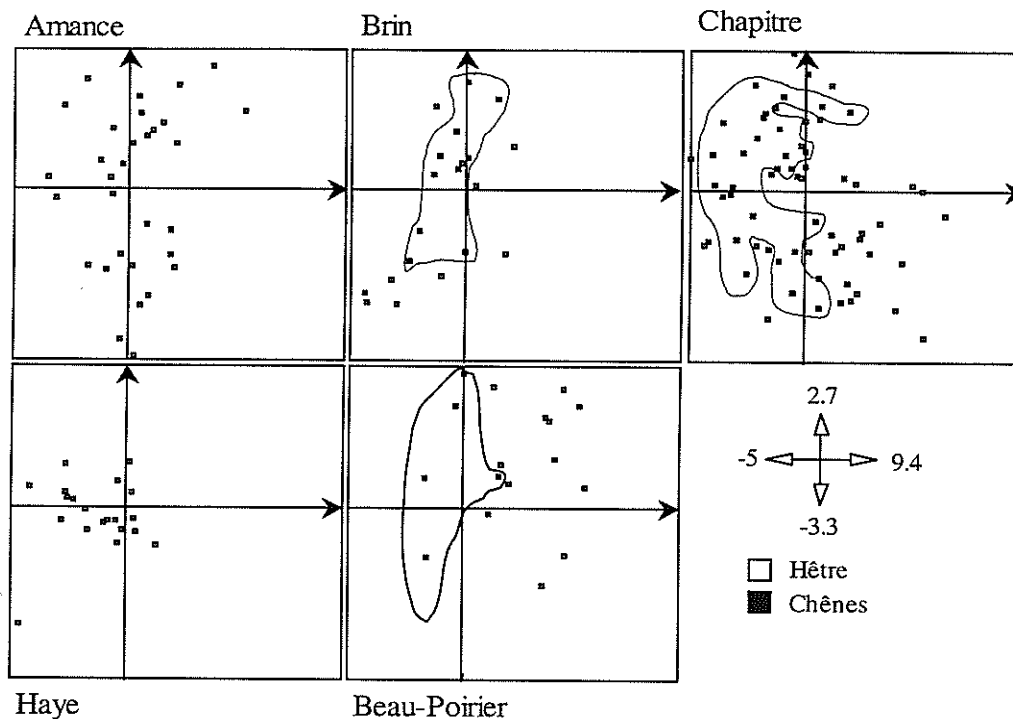
	Inter-site	Intra-site		Inter-site	Intra-site
D130	26.8%	73.2%	nbgrostraclat2	3.7%	96.3%
Ht	65.8%	34.2%	Lplusgrostracvert	40.8%	59.2%
Hbh	56.9%	43.1%	Lmoyracfinvert	11.0%	89.0%
Em	23.6%	76.4%	Nbgrostracvert1	34.7%	65.3%
Hm	13.8%	86.2%	Nbgrostracvert2	12.4%	87.6%
Lm	15.1%	84.9%	Densracfinforte	17.6%	82.4%
Volm	10.2%	89.8%	Densracfinmoy	6.3%	93.7%
Volp	25.7%	74.3%	Densracfinfaible	15.0%	85.0%
Surfm	14.8%	85.2%	recegmotte	72.1%	27.9%
Lmaxraclat	12.3%	87.7%			
Lminraclat	7.4%	92.6%			
nbgrostraclat1	26.1%	73.9%			



b) *Analyse intra-sites*

L'inertie **intra-site** vaut 15,88 (soit **75,6 %** de l'inertie totale qui vaut 21) dont 42,7% s'exprime sur les deux premiers axes (somme des deux valeurs propres = 6,774) (**figure 15**).

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	5,098	0,3211	0,3211
2	1,676	0,1055	0,4266
3	1,459	0,0919	0,5185



**Figure 15.** Répartition des arbres de chaque espèce dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante **intra-site** réalisée après l'ACP sur matrice de corrélation. Le nuage est projeté sur le plan optimisant la variance moyenne par groupe de coordonnées (chênes entourés).

Pour les sites présentant les deux espèces, l'analyse intra-site tend à regrouper les arbres par essence (**figure 15**). Pour le bois du Chapitre et la forêt de Brin, l'axe 2 oppose les chênes (pôle positif) du hêtre. Pour un même site, la discrimination entre les arbres apparaît fortement liée aux racines latérales (Lmin, Lmax, nombre (< 20 mm)), aux racines fines (densité, longueur), au volume de la motte... (**tableau 16b**). Pour un même site, les hauteurs interviennent peu contrairement au diamètre (D130 = 73% de l'inertie totale).

c) *Décomposition de la variance*

En considérant que l'inertie totale du tableau initial de données (154 arbres et 21 variables) est la somme de l'inertie inter-sites et de l'inertie intra-sites, on peut appliquer l'équation suivante pour « quantifier » les deux effets :

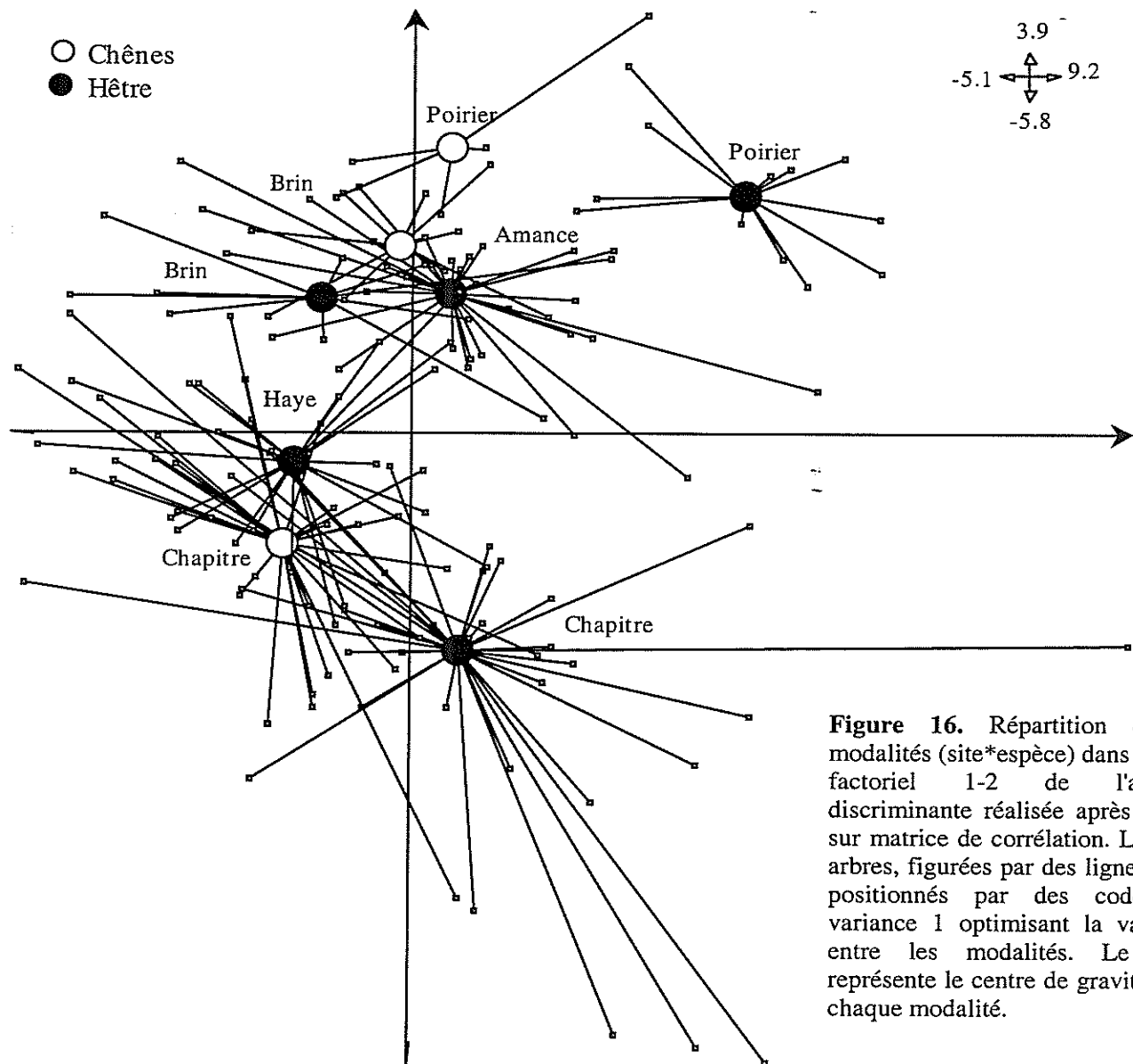
Inertie totale	Inertie inter-sites	Inter intra-sites
21 =	5,12	+ 15,88

La majeure partie de cette variabilité est prise en compte par la première valeur propre de chaque analyse :

Analyse	Valeur propre du premier axe
(1) ACP initiale	6.2721
(2) Inter-sites	3.1423
(3) Intra-sites	5.098

L'analyse de ces valeurs propres montre que l'effet intra-site a un poids plus important que l'effet entre-sites. Par rapport à la valeur de l'ACP initiale (1), on perd plus de variabilité en éliminant l'effet intra-site (3) que l'effet inter-site (2) (valeurs propres plus faibles).

Les analyses effectuées sans prendre en compte les caractéristiques dendrométriques (ACP sur les 18 variables racines) aboutissent à la même discrimination entre les sites. Les variables les plus discriminantes restent les volumes prospectés, les caractéristiques des grosses racines et le recouvrement en éléments grossiers. Le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante sépare nettement les forêts du bois de Chapitre et des Haye aux arbres du Beau-Poirier ; les placettes de Brin et d'Amance occupant une situation intermédiaire. De la même façon, la prise en compte simultanée du site et de l'espèce discrimine nettement à la fois les sites et les espèces (**figure 16**). Pour le bois du Chapitre et le Beau-Poirier et Brin, chêne et hêtre se distinguent dans la plan factoriel.



**Figure 16.** Répartition des 8 modalités (site\*espèce) dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante réalisée après l'ACP sur matrice de corrélation. Les 154 arbres, figurés par des lignes, sont positionnés par des codes de variance 1 optimisant la variance entre les modalités. Le rond représente le centre de gravité pour chaque modalité.

### 2.3. Analyse de variance des effets site x espèce

L'analyse de variance des effets site et espèce porte sur 3 sites et 134 arbres. La décomposition de la variance des effets site et espèce sur les variables dendrométriques (D130 et Ht) et le volume de sol prospecté est présenté dans les tableaux ci-dessous.

Site	Nb d'arbres	Nb CHS	Nb HET
Amance et Brin	51	10	41
Chapitre	66	30	36
Poirier	17	5	13
	134	45	90

L'analyse de variance confirme la prépondérance de l'effet site sur les variables dendrométriques avec un effet plus important sur la hauteur que sur le diamètre. Pour les deux variables, l'interaction site x espèce est significative. En ce qui concerne le volume de sol prospecté, l'effet espèce apparaît plus important que l'effet site, l'interaction entre les deux sources de variation étant non significative.

#### *Diamètre à 1,30 m (D130)*

F(2, 128) = 9,58 p < 0.000

Source de variation	ddl	Carrés moyens	F	Pr > F
Effet site	2	1374.047	9.576	0.0001
Effet espèce	1	832.611	5.803	0.0174
Site x espèce	2	419.441	2.923	0.0574

#### *Hauteur totale (Ht)*

F(2, 128) = 128,8 p < 0.000

Source de variation	ddl	Carrés moyens	F	Pr > F
Effet site	2	987.6562	128.818	0.0000
Effet espèce	1	66.4672	8.669	0.0038
Site x espèce	2	38.7390	5.053	0.0077

#### *Volume de sol prospecté (m<sup>3</sup>)*

F(2, 128) = 11,38 p < 0.000

Source de variation	ddl	Carrés moyens	F	Pr > F
Effet site	2	290.324	11.328	0.0000
Effet espèce	1	504.075	19.668	0.0000
Site x espèce	2	55.113	2.150	0.1206

### Conclusions

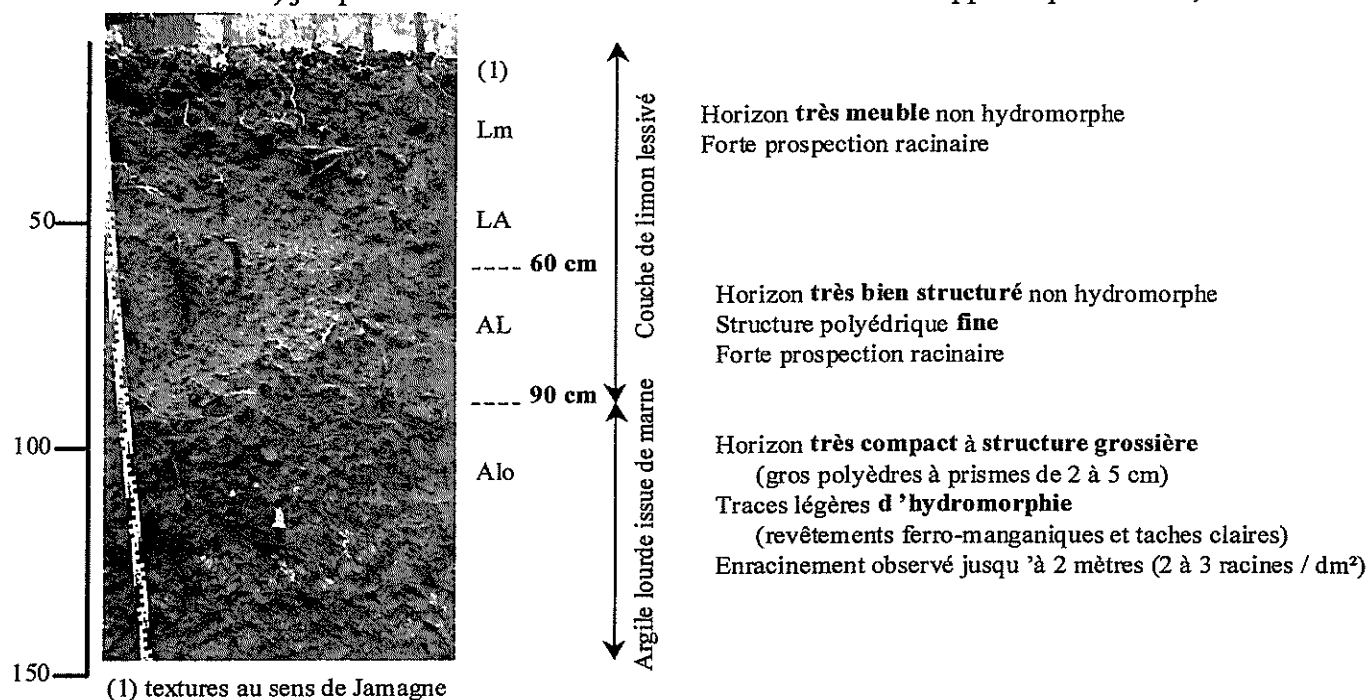
- La variabilité intra-forêt est plus importante que la variabilité entre les forêts ;
- Entre les 5 massifs, les critères les plus discriminants sont d'une part la taille des arbres (hauteurs et diamètre) et, d'autre part, le recouvrement en éléments grossiers dans la motte, le volume prospecté et les caractéristiques des grosses racines verticales et, dans une moindre mesure, latérales ;
- Dans un même site, la discrimination est fortement liée au volume de la motte, au racines moyennes ou fines (densité, longueur). Le diamètre des arbres intervenant également. Pour les sites présentant les deux espèces, hêtre et chênes se distinguent.

## 2.4. Analyse par massif

Cette analyse par massif cherche à préciser les différences de comportement entre les deux espèces étudiées et à mettre en évidence d'une façon plus fine l'effet de la contrainte édaphique et/ou de la gestion sylvicole sur l'expression du « système racinaire ».

### 2.4.1. Forêts d'Amance et de Brin (plateau lorrain)

Les analyses précédentes ont montré que les deux forêts échantillonnées sur le plateau lorrain se distinguent nettement des 3 forêts du plateau calcaire mais sont très proches dans leur comportement. Elles ont donc été regroupées dans la suite de l'analyse. Pour ces futaies mélangées de hêtre et de chêne sessile, le matériau parental est un placage limoneux sur argile lourde et marnes du Lias. Le sol est formé à partir de deux matériaux décrits ci-dessous (d'après une description de L. Bergès (1998) et R. Chevalier). Le profil synthétique du sol est un limon puis une argile limoneuse meubles et bien drainés sur argile lourde à profondeur variable (généralement vers 80 cm) (*Brunisol mésosaturé de limon sur marne*). Les caractères importants pour l'enracinement y sont figurés en gras (Lebourgeois et Jabiol 2002). Etant donné les pH assez élevés (5 à 7 selon la profondeur), l'hydromorphie légère et floue présente dans l'argile lourde peut suffire pour témoigner de conditions temporairement asphyxiantes. Le mauvais drainage vertical de l'eau est aggravé par le caractère gonflant des argiles, ce qui fait disparaître leur porosité en période humide, et par le caractère non drainant de la couche géologique qui empêche les évacuations profondes de l'eau. Les conditions pour les racines sont donc moins favorables dans cet horizon ; cependant, la description de la fosse située au pied d'un chêne indique la présence d'un enracinement fin non négligeable (2 à 3 racines / dm<sup>2</sup>) jusqu'à 2 mètres au moins. La marne carbonatée n'apparaît pas avant 2,30 m.



Le volume moyen des mottes de **hêtre** est d'environ de 8 m<sup>3</sup> (volume prospecté proche de 12 m<sup>3</sup>) et apparaît très fortement corrélé au diamètre des arbres ; la hauteur intervenant dans une moindre mesure (**tableaux 17 et 18 et figures 17 et 18**). Il apparaît également que plus les arbres sont gros et plus le nombre de racines latérales (surtout celles de gros diamètres) est important. Par exemple, *le passage d'un diamètre de 30 cm à 50 cm correspond à une augmentation de 150% du volume de la motte (3 m<sup>3</sup> contre 7,5 m<sup>3</sup>), de 110% du volume prospecté (7 à 15 m<sup>3</sup>) et à un doublement du nombre de grosses racines latérales (4 à 8)*. Il est important de noter que l'augmentation de volume de motte et/ou de volume prospecté apparaît peu liée à une augmentation de l'épaisseur de la motte (c'est-à-dire à une augmentation de l'épaisseur de sol prospecté) mais à une prospection plus importante en surface. Il apparaît par ailleurs que 36 des 41 chablis présentent une motte de type « plat ».

Les volumes de sol prospectés par le **chêne** sont tout à fait comparables à ceux du hêtre (**tableau 17**) (de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>) mais les caractéristiques des mottes apparaissent nettement différentes. Les mottes, de type exclusivement globuleux, sont moins hautes (-17%) et moins larges (-25%) mais nettement plus épaisses (+70%). Pour les racines latérales, les charpentières (> 20 mm) sont plus nombreuses. Pour les racines verticales, l'extension est supérieure de 35% et on observe plus du double de grosses racines (> 20 mm). En revanche, la densité de racines fines tend à être plus faible. Les corrélations entre les différents paramètres sont beaucoup moins fréquentes (**tableau 19**). Ainsi, seul le volume prospecté semble dépendre de la taille des arbres. Il varie de 6 à 12 m<sup>3</sup> pour une augmentation de diamètre de 20 cm (30 à 50 cm). Contrairement au hêtre, c'est l'épaisseur de la motte et non plus la surface qui intervient le plus dans les variations de volume.

**Tableau 17.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des hêtres et des chênes pour les forêts d'Amance et de Brin. Les différences significatives au seuil de 5% sont signalées en gras.

	Hêtre (N=41)		Chênes (N=10)		
	Moy.	EcT	Moy.	EcT	
<b>Partie aérienne</b>					
Diamètre (cm)	41.1	10.1	42.5	8.0	0.695
Hauteur totale (m)	25.8	2.4	26.6	2.0	0.329
Hauteur de la base du houppier (m)	13.6	2.8	15.0	4.3	0.200
<b>Motte</b>					
Epaisseur (cm)	63.9	14.4	109.2	20.4	<b>0.000</b>
Hauteur (cm)	255.7	55.6	213.0	39.4	<b>0.027</b>
Largeur (cm)	392.4	92.2	296.0	41.2	<b>0.002</b>
Surface (m <sup>2</sup> )	8.2	3.4	5.0	1.3	<b>0.006</b>
Volume (m <sup>3</sup> )	5.3	2.7	3.6	1.3	<b>0.062</b>
Vol. prospecté (m <sup>3</sup> )	11.5	5.5	9.5	3.2	0.268
<b>Racines latérales</b>					
Long. Maximale (cm)	98.3	31.6	100.0	29.8	0.878
Long. Minimale (cm)	18.0	9.8	21.0	8.8	0.389
Nb racines > 20 mm de dia.	5.8	3.4	8.3	3.3	<b>0.040</b>
Nb racines 10-20 mm de dia.	10.0	4.5	11.8	2.1	0.237
<b>Racines verticales</b>					
Long. de la plus grosse (cm)	41.5	19.4	65.5	15.7	<b>0.001</b>
Long. moy. des racines fines (cm)	9.4	3.6	11.2	2.8	0.142
Nb racines > 20 mm de dia.	2.1	1.9	5.3	2.7	<b>0.000</b>
Nb racines 10-20 mm de dia.	26.4	9.9	36.0	11.0	<b>0.010</b>
<b>Densité racines fines</b>					
% de densité forte (>5 racines/dm <sup>2</sup> )	0.0	0.0	0.0	0.0	
% de densité moyenne (1-5 racines/dm <sup>2</sup> )	8.9	10.2	3.0	6.3	0.088
% de densité faible (< 1 racine/dm <sup>2</sup> )	3.5	3.9	4.0	3.2	0.686

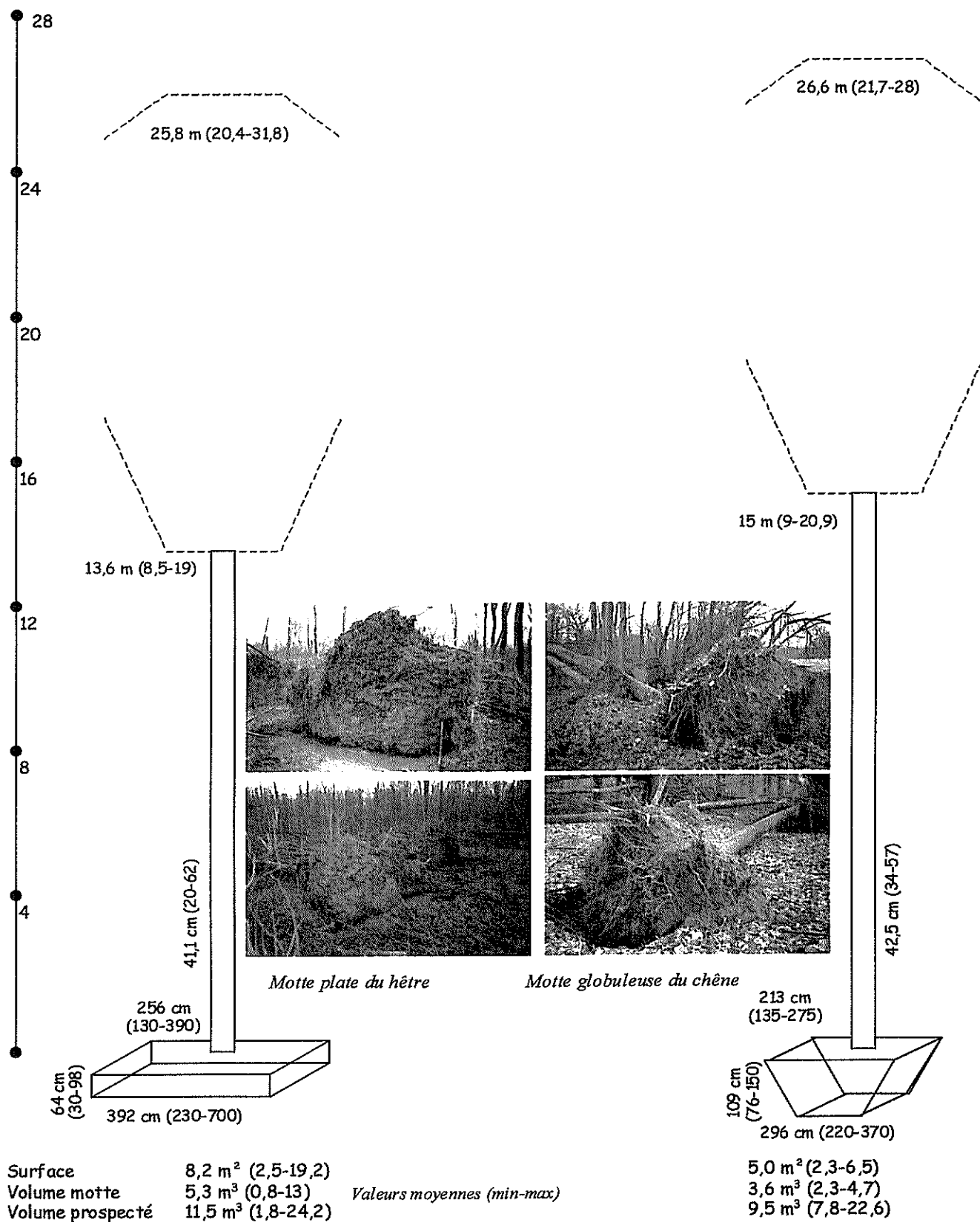
**Tableau 18.** Matrice des corrélations entre les 20 variables quantitatives caractérisant les 41 hêtres chablis des forêts d'Amance et de Brin. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées. La variable « recegmotte » a été exclue de l'analyse (pas d'éléments grossiers pour ces forêts).

	Partie aérienne			Dimension des mottes						Racines latérales			
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT	0.554	1.000											
HBH		0.576	1.000										
Ep	0.520	0.426		1.000									
Haut	0.794	0.402		0.422	1.000								
Larg	0.681	0.392			0.754	1.000							
Vol	0.780	0.314		0.391	0.892	0.853	1.000						
Volp	0.721	0.404			0.748	0.830	0.861	1.000					
Surf	0.766	0.374			0.905	0.947	0.936	0.838	1.000				
Lmax	0.383				0.312	0.328	0.366	0.495	0.348	1.000			
Lmin	0.355				0.484	0.382	0.442	0.340	0.449	0.408	1.000		
Nb > 20 mm	0.605			0.371	0.579	0.345	0.505	0.323	0.494		0.320	1.000	
Nb 10-20 mm	0.598	0.568		0.469	0.516	0.456	0.506	0.536	0.484			0.313	1.000
Lplusgrosse								0.338					
Lmoyracfin													
Nb > 20 mm		0.411						0.341					
Nb 10-20 mm	0.327				0.535	0.398	0.467	0.459	0.465				0.450
forte													
moy											-0.346		
faible													

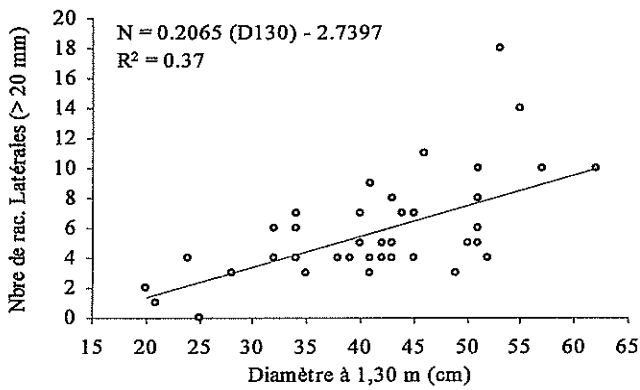
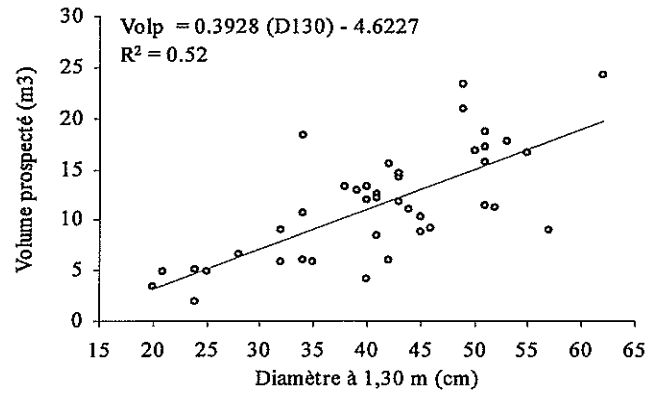
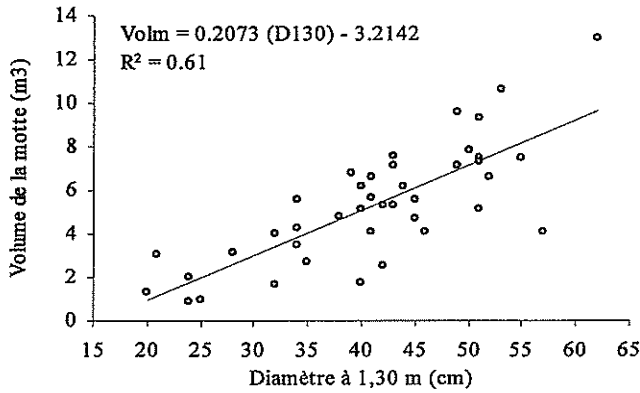
  

	Racines verticales				Densité racines fines		
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible
D130							
HT							
HBH							
Ep							
Haut							
Larg							
Vol							
Volp							
Surf							
Lmax							
Lmin							
Nb > 20 mm							
Nb 10-20 mm							
Lplusgrosse	1.000						
Lmoyracfin	0.734	1.000					
Nb > 20 mm	0.567		1.000				
Nb 10-20 mm				1.000			
forte					1.000		
moy	0.377	0.649				1.000	-
faible		-0.315				-0.803	1.000

**Figure 17.** Représentation du **hêtre** et du **chêne moyen** (caractéristiques dendrométriques et racinaires) pour les deux forêts échantillonnées sur le **plateau lorrain**







**Figure 18.** Relation entre le diamètre à 1,30 m (cm), le volume de la motte (m<sup>3</sup>), le volume prospecté et le nombre de grosses racines latérales pour les hêtres en forêts d'Amance et de Brin (n=41).



Chablis de hêtre en forêt d'Amance (Photos : F. Lebourgeois)

**Tableau 19.** Matrice des corrélations entre les 20 variables quantitatives caractérisant les 10 chênes chablis des forêts de Brin et d'Amance. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées. La variable « recegnotte » a été exclue de l'analyse (pas d'éléments grossiers pour ces forêts).

	Partie aérienne			Dimension des mottes					Racines latérales					
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	
D130	1													
HT		1												
HBH			1											
Ep				1										
Haut					1									
Larg						1								
Vol							1							
Volp	0.699				0.911	0.803		1						
Surf					0.702	0.694	0.646	0.860	1					
Lmax										0.781				
Lmin											0.724	1		
Nb > 20 mm													1	
Nb 10-20 mm														1
Lplusgrosse														
Lmoyracfin					-0.666	-0.666								
Nb > 20 mm														
Nb 10-20 mm														
forte														
moy														
faible							0.692							0.637

	Racines verticales				Densité racines fines		
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible
D130							
HT							
HBH							
Ep							
Haut							
Larg							
Vol							
Volp							
Surf							
Lmax							
Lmin							
Nb > 20 mm							
Nb 10-20 mm							
Lplusgrosse	1						
Lmoyracfin		1					
Nb > 20 mm			1				
Nb 10-20 mm				1			
forte					1		
moy						1	
faible							1

Les résultats concernant les variables qualitatives liées à la santé des racines, à la répartition des racines fines, à la déformation sont présentées dans le tableau ci-dessous. En ce qui concerne les déformations, le système aplati représente des racines très déformées aplaties qui ne dépassent pas de la motte. Elles apparaissent « collées » sur la galette. Le système semi-plongeant représente des racines déformées, plus ou aplaties qui dépassent de quelques centimètres. Le système plongeant représente un système non déformé avec des racines cylindriques à décroissance régulière et dépassant largement de la motte.

En ce qui concerne la répartition des racines fines et la santé des racines latérales, aucune différence nette n'apparaît entre les deux espèces. Pour les deux espèces, toutes les racines latérales sont cassées confirmant bien que les longueurs mesurées ne reflètent en aucun cas l'extension maximale des charpentières. En ce qui concerne le système vertical, le chêne présente des racines cassées non déformées alors que la grande majorité des hêtres ont des racines non cassées mais déformées.

	Hêtre (N=41)	Chêne (N=10)
<b>Répartition des racines fines</b>		
homogène	12 (29%)	
hétérogène	29 (71%)	10 (100%)
<b>Santé des racines latérales</b>		
cassées	41 (100%)	10 (100%)
<b>Santé des racines verticales</b>		
saines	24 (59%)	
cassées	17 (41%)	9 (90%)
pourries et cassées		1 (10%)
<b>Déformation des racines vert.</b>		
plongeant	9 (22%)	8 (80%)
semi-plongeant	25 (61%)	1 (10%)
aplatis	2 (5%)	
tous les types	5 (12%)	1 (10%)

### Conclusions partielles

Même si la taille des arbres joue un rôle majeur dans les caractéristiques du complexe sol-racine, il apparaît une différence nette de comportement entre les deux essences sur ce type de station. Pour le hêtre, l'épaisseur nettement moins grande de la motte (-40 cm en moyenne par rapport au chêne), le nombre plus faible de racines verticales plus courtes, non cassées mais déformées suggèrent que le hêtre rencontre en profondeur une « contrainte » qui empêche une prospection aussi importante que celle du chêne. Le hêtre ne semble pas capable de prospecter les argiles lourdes légèrement hydromorphes présentes entre 60 et 90 cm. En revanche, les mottes plus épaisses avec des racines verticales non déformées mais cassées suggèrent que le chêne prospecte ces horizons. Ceci se traduit par des formes et des volumes de motte différentes : plate pour le hêtre et globuleuse pour le chêne avec un volume près de 2 fois supérieurs chez le hêtre (8 contre 5 m<sup>3</sup>). Les volumes de sol prospecté sont en revanche identiques : le hêtre compense sa moindre prospection en profondeur par une extension horizontale importante.

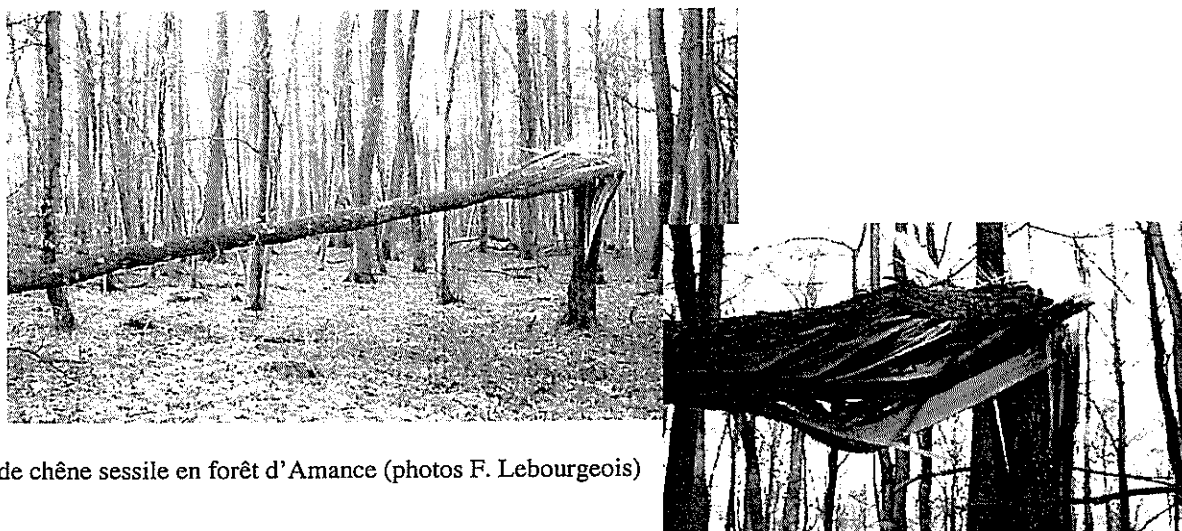
Ces différences peuvent être discutées en terme de conséquences sur l'alimentation hydrique, minérale et sur la stabilité.

*Sur le plan hydrique*, un calcul de réserve utile classique associant la profondeur d'enracinement observée (épaisseur des mottes et extension des racines verticales) et les coefficients de texture des différents horizons (ici limon à argile limoneuse) permet d'estimer à au moins 150 à 200 mm le réservoir du sol (Lebourgeois et Jabiol 2002). Même si ces réserves hydriques apparaissent très « confortables » dans le contexte mésoclimatique lorrain, la différence de prospection observée entre les deux espèces pourrait avoir des conséquences notables en cas d'années ou de succession d'années plus sèches que la moyenne. Ainsi, dans une étude comparative du comportement des chênes (sessile et pédonculé) et du hêtre en forêt domaniale d'Amance, Nieminen (1988) a montré que la chute de croissance pendant les crises hydriques était beaucoup moins importante chez le chêne que chez le hêtre, même si sa récupération était plus lente. Nos observations apportent des éléments d'explication à ces constatations. Le système racinaire du chêne permettrait de maintenir un niveau d'alimentation hydrique meilleur en cas de sécheresse prolongée en puisant dans les réserves profondes. L'enracinement superficiel du hêtre serait un désavantage dans ces conditions (dessèchement intense des horizons de surface) mais la surface plus importante du système racinaire permettrait de « profiter » plus rapidement du retour à de meilleures conditions (réhumectation du sol en surface).

*Sur le plan trophique*, les différences de comportement n'ont aucune conséquence car le milieu est riche en éléments minéraux dès la surface et aucun horizon carbonaté n'apparaît.

*Sur le plan stabilité*, la différence est importante. Le pourcentage de chablis de hêtre s'élève à 46% contre seulement 10% pour le chêne sessile (voir tableau 6).

En conclusion, on peut dire que la « contrainte » est modérée pour le hêtre et nulle pour le chêne. Autécologiquement, le hêtre peut être tout à fait envisagé sur ce type de station. Le choix entre les deux essences, ou sur la composition d'un mélange, dépend des autres contraintes de l'aménagiste, sachant qu'il conviendrait, à l'échelle de la forêt, de vérifier la variabilité de l'épaisseur des limons et de la présence éventuelle d'hydromorphie (souvent fonction de la microtopographie) susceptibles de "gêner" davantage le hêtre.

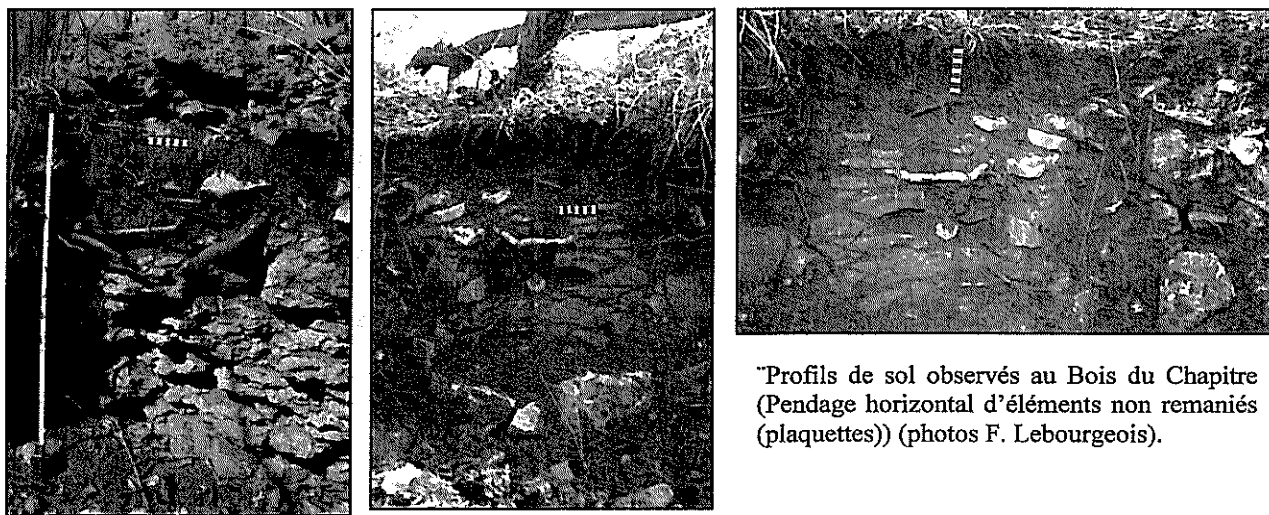


Volis de chêne sessile en forêt d'Amance (photos F. Lebourgeois)

### 2.4.2. Plateau calcaire : Bois du Chapitre, forêts de Haye et du Beau-Poirier

Les sols des plateaux calcaires sont caractérisés par la présence d'une couche d'argile de décarbonatation reposant sur la roche calcaire. La variabilité locale peut y est très grande, conduisant à une forte hétérogénéité des profondeurs prospectables : possibilité de présence d'une couverture limoneuse de surface, épaisseur variable des argiles de décarbonatation avant les premiers cailloux calcaires, et surtout mode de fragmentation de ces calcaires : fragmentation en dalles ou plaquettes pour les faciès oolithiques (calcaires à petit grains ressemblant à des œufs de poisson), fragmentation en boules pour les faciès coralliens. La présence de limon ou l'épaisseur d'argile influencent directement la profondeur prospectée ; leurs qualités physiques sont toujours excellentes et favorables à l'enracinement : les limons sont très meubles (sauf tassements anthropiques) et les argiles extrêmement bien structurées dans ce contexte saturé en calcium. Plus profondément, les faciès des calcaires influencent considérablement les possibilités de prospection dans la roche fragmentée, et leur variabilité est forte et imprévisible.

*Au Bois du Chapitre et en forêt de Haye*, les horizons de surface sont toujours décarbonatés ; ce n'est qu'au niveau de fragmentation de la roche que la terre fine se charge en calcaire fin, entraînant une effervescence à l'acide. Le plus souvent, l'apparition des éléments grossiers est brutale ce qui permet facilement de définir leur profondeur d'apparition. Leur taux passe alors à des valeurs de 50 à plus de 70% en volume avec des formes et disposition variable. L'effervescence à l'acide peut apparaître à ces niveaux. *Pour le Beau-Poirier*, les horizons de surface sont limoneux à limono-argileux avec des caractères de compacité et de structure *a priori* très favorables à l'enracinement (horizon meuble bien structuré et bien drainé). Les pH sont proches de 5 et la charge en éléments grossiers est faible. Au delà de 80 cm, la structure devient plus grossière avec une texture nettement argileuse. Aucune trace d'hydromorphie n'apparaît dans les horizons profonds (Lebourgeois et Jabiol, 2002).

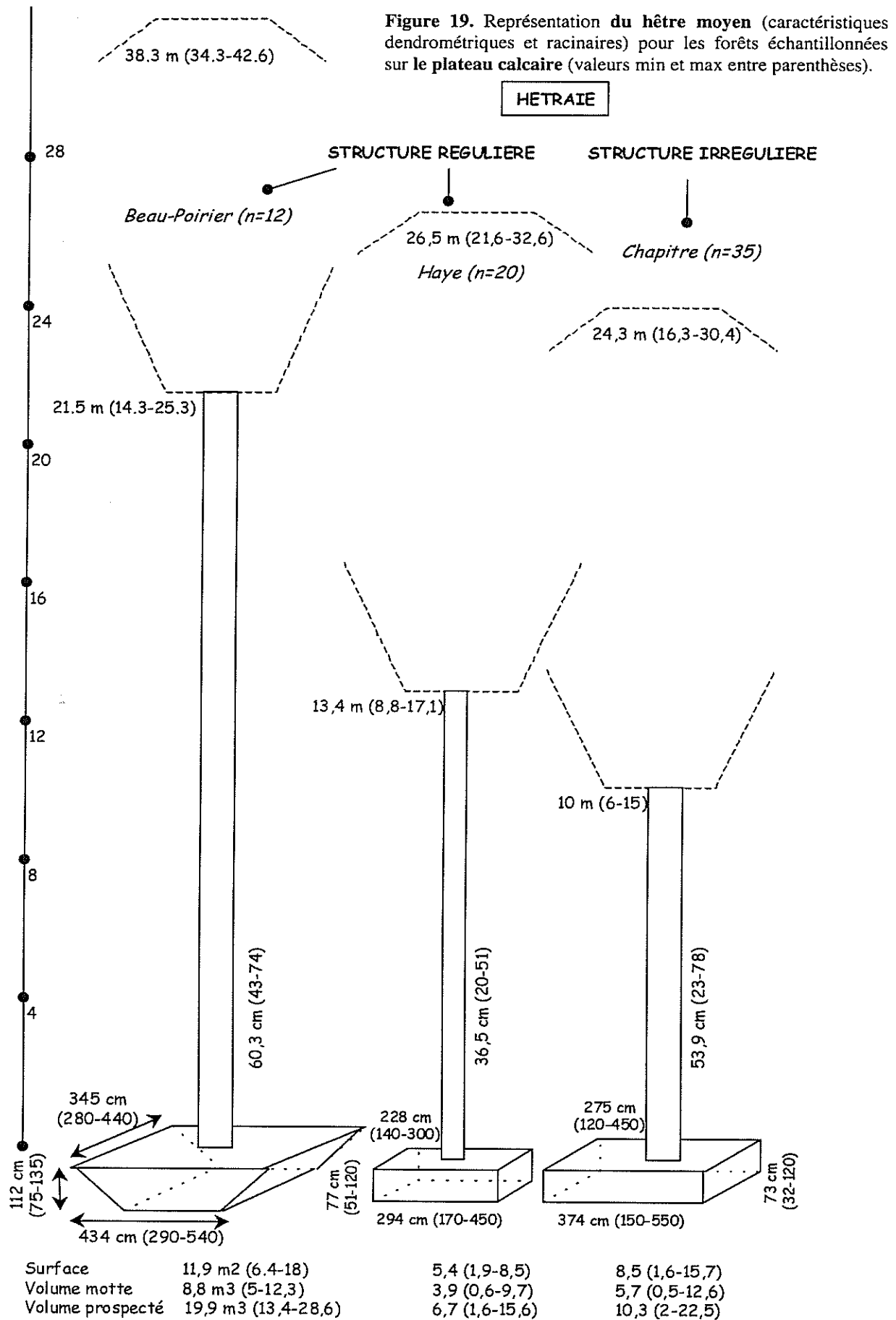


\*Profils de sol observés au Bois du Chapitre (Pendage horizontal d'éléments non remaniés (plaquettes)) (photos F. Lebourgeois).

*Pour le Bois du Chapitre*, les caractéristiques des mottes apparaissent très différentes entre les deux essences pour des caractéristiques dendrométriques comparables (**tableau 20 et figures 19 et 20**). Exceptée l'épaisseur de la motte (environ 75 cm), toutes les autres variables quantitatives ont des valeurs plus importantes pour le hêtre. 70% des hêtres ont une surface de motte supérieure à 7 m<sup>2</sup> et 93% des chênes une surface inférieure à 7 m<sup>2</sup>; les surfaces moyennes étant respectivement de 8,5 m<sup>2</sup> (1,6 à 16 m<sup>2</sup>) et 4,6 m<sup>2</sup> (2 à 10 m<sup>2</sup>). Pour les volumes de sol prospecté, 49% des hêtres prospectent plus de 10 m<sup>3</sup> alors que seulement 13% des chênes dépassent cette valeur; les volumes moyens étant respectivement de 10,3 m<sup>3</sup> (2 à 22,5 m<sup>3</sup>) et 6,3 m<sup>3</sup> (1,5 à 11,2 m<sup>3</sup>). Concernant les racines, seul le nombre de racines verticales et latérales de petit diamètre apparaît supérieur chez le hêtre. En ce qui concerne les racines fines, le hêtre présente une trame racinaire nettement plus développée. *Pour la forêt de Haye*, les hêtres sont de plus faibles diamètres avec des volumes prospectés proches de 7 m<sup>3</sup>. *Pour le Beau-Poirier*, l'effectif faible de chênes de diamètre nettement plus faible rend la comparaison délicate avec le hêtre. Si l'on compare les arbres de diamètres « équivalents » (n=4 pour chaque essence; D130 et Ht = 46 cm et 35,4 m pour les chênes et 49,5 cm et 38,8 m pour les hêtres), les volumes de sol prospecté pour le hêtre sont supérieurs de 30% à ceux du chêne (15,4 m<sup>3</sup> contre 11,9 m<sup>3</sup>). Globalement, les volumes sont proches de 20 m<sup>3</sup> pour le hêtre et supérieurs à 11 m<sup>3</sup> pour le chêne. Pour les deux essences, ils sont donc nettement supérieurs aux deux autres forêts.

**Tableau 20.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des hêtres et des chênes pour les 3 forêts du plateau calcaire. Les différences significatives au seuil de 5% sont signalées en gras.

	Chapitre					Beau-Poirier					Haye	
	Chêne N=30		Hêtre N=35		p	Chêne N=5		Hêtre N=12		p	Hêtre N=20	
	Moy	EcT	Moy	EcT		Moy	EcT	Moy	EcT		Moy	EcT
<b>Partie aérienne</b>												
Diamètre (cm)	51.0	12.5	53.9	13.7	0.380	43.2	7.8	60.3	10.2	<b>0.004</b>	36.5	7.4
Hauteur totale (m)	22.1	2.7	24.3	3.3	<b>0.005</b>	34.3	3.2	38.3	2.2	<b>0.008</b>	26.5	3.2
Hauteur de la base du houppier (m)	11.1	2.5	10.0	2.6	0.070	19.8	1.8	21.5	3.7	0.351	13.4	2.2
<b>Motte</b>												
Epaisseur (cm)	76.4	19.1	73.1	19.0	0.482	89.6	19.4	111.9	15.5	<b>0.023</b>	77.2	19.0
Hauteur (cm)	219.0	46.8	275.0	73.1	<b>0.001</b>	218.0	37.5	345.3	44.5	<b>0.000</b>	227.9	44.4
Largeur (cm)	261.5	61.3	374.7	98.4	<b>0.000</b>	305.0	38.4	434.2	76.9	<b>0.003</b>	293.8	67.9
Surface (m <sup>2</sup> )	4.6	1.9	8.5	3.7	<b>0.000</b>	5.3	1.4	11.9	3.2	<b>0.001</b>	5.4	1.8
Volume (m <sup>3</sup> )	2.9	1.6	5.7	2.9	<b>0.000</b>	3.5	0.8	8.8	2.5	<b>0.000</b>	3.9	2.3
Vol. prospecté (m <sup>3</sup> )	6.3	2.7	10.3	4.6	<b>0.000</b>	11.3	6.3	19.9	4.9	<b>0.008</b>	6.7	3.8
<b>Racines latérales</b>												
Long. Maximale (cm)	107.0	31.7	98.9	31.2	0.302	114.0	18.2	126.7	44.2	0.551	81.3	15.4
Long. Minimale (cm)	19.5	8.4	19.6	7.7	0.972	24.0	8.9	25.3	11.7	0.824	24.0	6.6
Nb racines > 20 mm de dia.	12.5	5.2	16.1	10.5	0.100	6.0	5.6	7.4	3.0	0.504	10.8	4.6
Nb racines 10-20 mm de dia.	10.6	7.8	15.8	9.2	<b>0.018</b>	12.2	3.4	13.7	7.0	0.668	12.5	8.0
<b>Racines verticales</b>												
Long. de la plus grosse (cm)	33.3	17.5	27.0	9.9	0.072	79.0	41.6	65.8	11.6	0.313	24.5	15.6
Long. moy. des racines fines (cm)	12.7	5.5	13.6	4.6	0.475	10.0	0.0	15.0	3.7	<b>0.010</b>	13.0	7.5
Nb racines > 20 mm de dia.	15.6	10.0	17.4	14.4	0.566	7.0	2.1	8.2	3.6	0.509	12.3	5.5
Nb racines 10-20 mm de dia.	15.7	13.1	30.1	18.2	<b>0.001</b>	31.8	12.7	28.8	2.3	0.429	12.6	8.6
<b>Densité racines fines</b>												
% de dens. forte (>5 racines/dm <sup>2</sup> )	1.3	7.3	23.6	25.8	<b>0.000</b>	0.0	0.0	0.0	0.0		17.7	15.9
% de dens. moy. (1-5 racines/dm <sup>2</sup> )	5.8	11.5	7.0	12.3	0.695	3.0	6.7	4.2	7.6	0.771	0.0	0.0
% de dens. faible (< 1 racine/dm <sup>2</sup> )	3.9	3.4	1.5	3.1	<b>0.004</b>	6.0	4.2	5.3	3.8	0.723	0.0	0.0



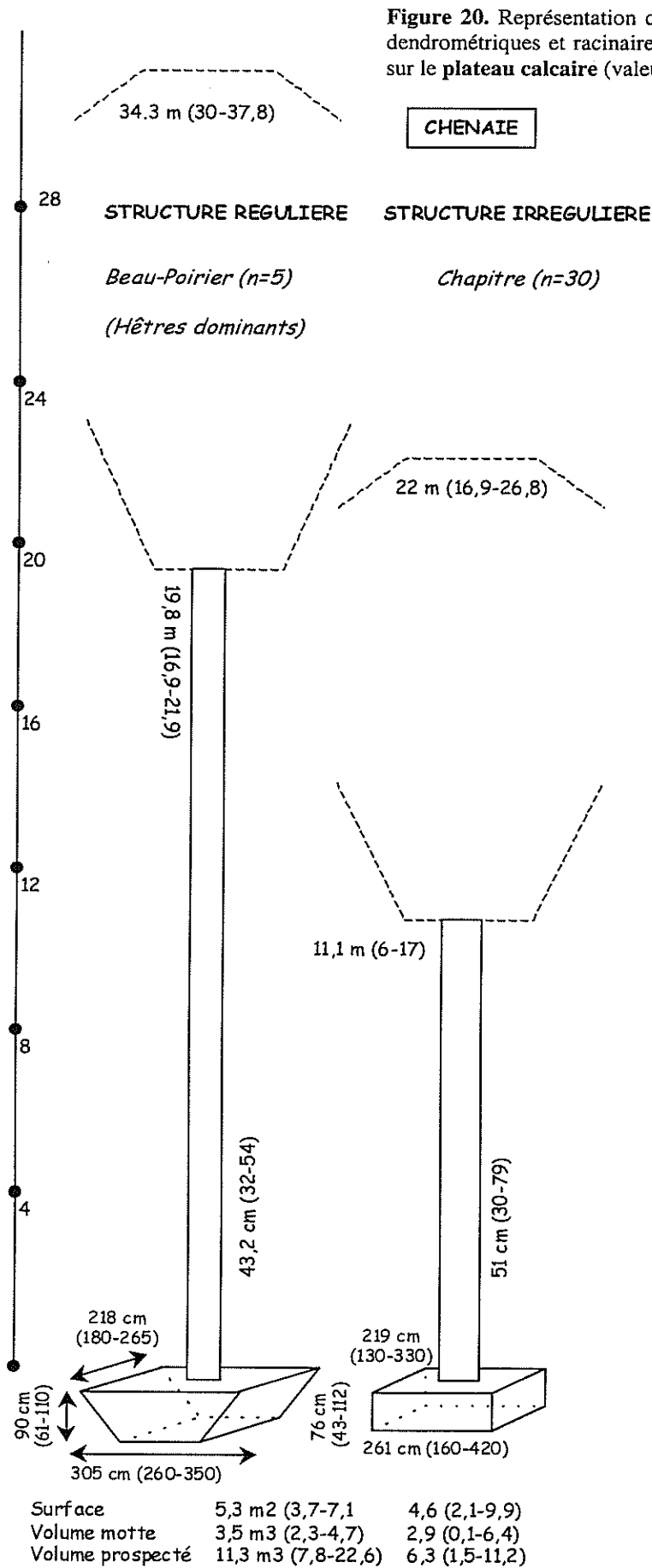
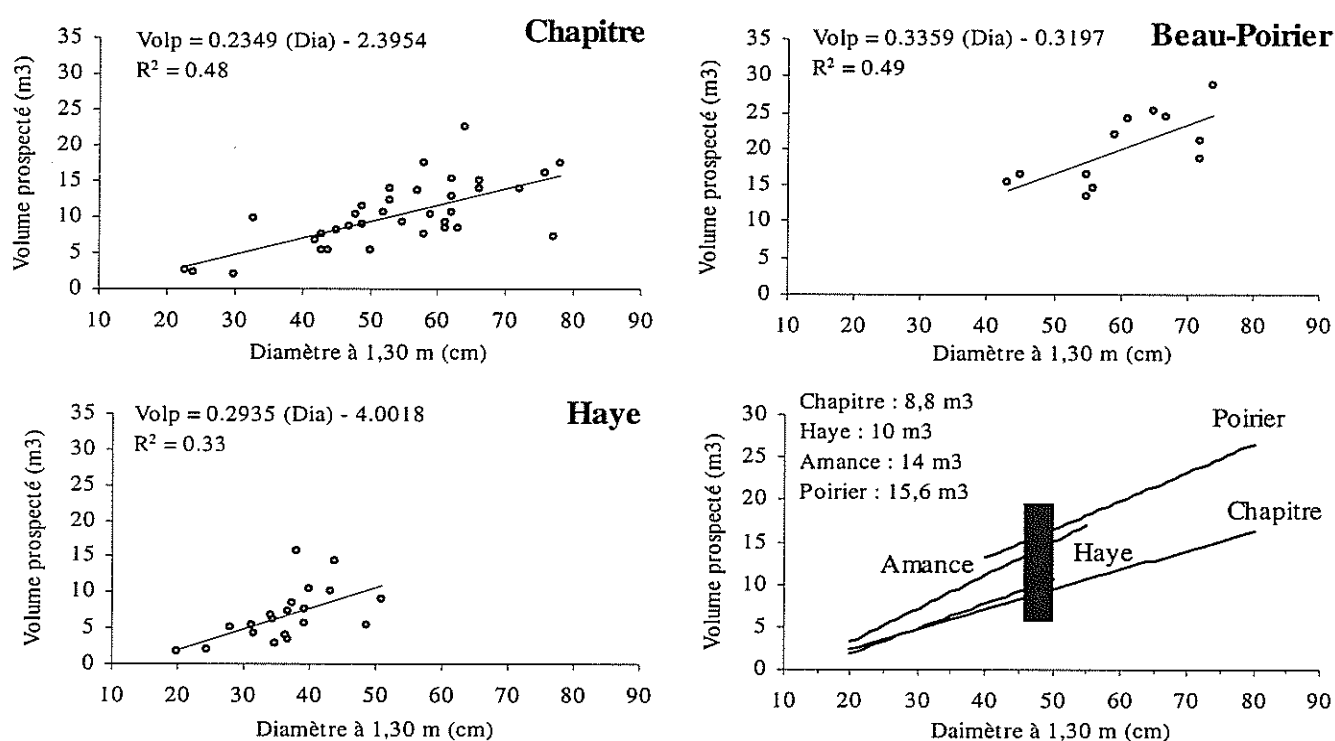


Figure 20. Représentation du **chêne moyen** (caractéristiques dendrométriques et racinaires) pour les forêts échantillonnées sur le **plateau calcaire** (valeurs min et max entre parenthèses).



Les caractéristiques des mottes sont fortement liées à la dimension des arbres ; le diamètre jouant un rôle majeur (**tableaux 21 à 24 et figure 21**). Il apparaît également que plus les arbres sont gros et plus le nombre de racines latérales (surtout celles de gros diamètres) est important. **Pour le Bois du Chapitre**, le passage d'un diamètre de 30 cm à 50 cm correspond à une augmentation de 110% du volume prospecté (4,5 à 9,5 m<sup>3</sup>) et à un doublement du nombre de grosses racines latérales (5 à 14). L'augmentation du volume prospecté apparaît davantage corrélée à une prospection plus importante en surface qu'à une augmentation de l'épaisseur de la motte (c'est-à-dire à une augmentation de l'épaisseur de sol prospecté) (**tableau 21**). Les mêmes observations peuvent être faites pour la forêt de Haye (**tableau 24**). Pour le Beau-Poirier, les corrélations sont moins fréquentes (**tableau 23**). L'épaisseur de motte nettement supérieure à celle observée sur les deux autres massifs ( $\Delta = + 40$  cm) n'est pas corrélée au volume prospecté qui dépend essentiellement de la hauteur de la galette.



**Figure 21.** Relation entre le diamètre à 1,30 m (cm) et le volume prospecté pour les hêtres en forêts de Haye, du Beau-Poirier et le Bois du Chapitre. Le dernier graphique représente les ajustements linéaires du nuage des points. La droite obtenue pour les forêts de Brin et d'Amance a été figurée. Pour chaque massif, les valeurs correspondent au volume moyen prospecté estimé pour la classe de diamètre 45-50 cm.

**Tableau 21.** Matrice des corrélations entre les 21 variables quantitatives caractérisant les 35 hêtres chablis du Bois du Chapitre. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.

	Partie aérienne			Dimension des mottes					Racines latérales				
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT	0.594	1.000											
HBH			1.000										
Ep	0.422	0.548		1.000									
Haut	0.669	0.633		0.530	1.000								
Larg	0.625	0.595		0.360	0.680	1.000							
Vol	0.696	0.570		0.464	0.797	0.810	1.000						
Volp	0.696	0.536		0.431	0.739	0.758	0.964	1.000					
Surf	0.663	0.630		0.489	0.919	0.889	0.885	0.815	1.000				
Lmax										1.000			
Lmin											1.000		
Nb > 20 mm	0.591			0.429				0.393				1.000	
Nb 10-20 mm	0.420			0.382	0.377	0.337	0.418	0.394				0.693	1.000
Lplusgrosse													
Lmoyracfin													
Nb > 20 mm	0.534		-0.406				0.338					0.476	
Nb 10-20 mm	0.583	0.538		0.462	0.650	0.547	0.668	0.597	0.643				0.458
forte													-0.336
moy	0.349												
faible													
recegmotte	0.426			0.376		0.342	0.371					0.415	

	Racines verticales				Densité racines fines			
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible	recegmotte
D130								
HT								
HBH								
Ep								
Haut								
Larg								
Vol								
Volp								
Surf								
Lmax								
Lmin								
Nb > 20 mm								
Nb 10-20 mm								
Lplusgrosse	1.000							
Lmoyracfin		1.000						
Nb > 20 mm			1.000					
Nb 10-20 mm	-0.417		0.393	1.000				
forte					1.000			
moy			0.594	0.493	-0.537	1.000		
faible				-0.348	-0.451		1.000	
recegmotte					-0.435			1.000

**Tableau 22.** Matrice des corrélations entre les 21 variables quantitatives caractérisant les 30 chènes chablis du Bois du Chapitre. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.

	Partie aérienne			Dimension des mottes				Racines latérales					
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT	0.442	1.000											
HBH			1.000										
Ep	0.416	0.561		1.000									
Haut	0.443	0.389		0.540	1.000								
Larg	0.383				0.518	1.000							
Vol	0.362	0.451		0.375	0.684	0.809	1.000						
Volp		0.499			0.574	0.747	0.885	1.000					
Surf	0.465	0.411			0.840	0.888	0.846	0.748	1.000				
Lmax		0.425						0.424		1.000			
Lmin											1.000		
Nb > 20 mm	0.501				0.451			0.362	0.472			1.000	
Nb 10-20 mm			-0.418					0.365		0.362		0.536	1.000
Lplusgrosse					-0.371								
Lmoyracfin													
Nb > 20 mm	0.521					0.392			0.409				0.475
Nb 10-20 mm				0.533	0.512	0.377	0.580	0.466	0.458		-0.377		
forte							0.406						
moy					0.394								0.383
faible													
recegmotte													

	Racines verticales				Densité racines fines			
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible	recegmotte
D130								
HT								
HBH								
Ep								
Haut								
Larg								
Vol								
Volp								
Surf								
Lmax								
Lmin								
Nb > 20 mm								
Nb 10-20 mm								
Lplusgrosse	1.000							
Lmoyracfin	0.458	1.000						
Nb > 20 mm			1.000					
Nb 10-20 mm				1.000				
forte					0.638	1.000		
moy							1.000	
faible				0.418			-0.596	1.000
recegmotte								0.370
								1.000

**Tableau 23.** Matrice des corrélations entre les 21 variables quantitatives caractérisant les 12 hêtres chablis du **Beau-Poirier**. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.

	Partie aérienne			Dimension des mottes					Racines latérales				
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT		1.000											
HBH			1.000										
Ep				1.000									
Haut	0.708				1.000								
Larg	0.582				0.613	1.000							
Vol	0.729				0.707		1.000						
Volp	0.698				0.655		0.890	1.000					
Surf	0.694				0.877	0.913	0.651	0.587	1.000				
Lmax										1.000			
Lmin			0.595								1.000		
Nb > 20 mm								0.580				1.000	
Nb 10-20 mm												-0.644	1.000
Lplusgrosse				0.805									
Lmoyracfin		-0.610				-0.608			-0.588				
Nb > 20 mm													
Nb 10-20 mm													
forte													
moy													
faible													
recegmotte													

	Racines verticales				Densité racines fines			
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible	recegmotte
D130								
HT								
HBH								
Ep								
Haut								
Larg								
Vol								
Volp								
Surf								
Lmax								
Lmin								
Nb > 20 mm								
Nb 10-20 mm								
Lplusgrosse	1.000							
Lmoyracfin		1.000						
Nb > 20 mm			1.000					
Nb 10-20 mm				1.000				
forte					1.000			
moy						1.000		
faible							1.000	
recegmotte								1.000

**Tableau 24.** Matrice des corrélations entre les 21 variables quantitatives caractérisant les 20 hêtres chablis de la forêt de Haye. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.

	Partie aérienne			Dimension des mottes				Racines latérales					
	D130	HT	HBH	Ep	Haut	Larg	Vol	Volp	Surf	Lmax	Lmin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm
D130	1.000												
HT	0.858	1.000											
HBH		0.731	1.000										
Ep	0.737	0.712	0.454	1.000									
Haut	0.828	0.749	0.492	0.681	1.000								
Larg	0.645	0.612		0.481	0.503	1.000							
Vol	0.645	0.625		0.708	0.595	0.859	1.000						
Volp	0.577	0.604	0.470	0.612	0.533	0.829	0.929	1.000					
Surf	0.828	0.787	0.462	0.668	0.812	0.905	0.870	0.819	1.000				
Lmax							-0.469			1.000			
Lmin											1.000		
Nb > 20 mm	0.604	0.529	0.478		0.637							1.000	
Nb 10-20 mm												0.650	1.000
Lplusgrosse								0.519					
Lmoyracfin													
Nb > 20 mm	0.516				0.456							0.701	
Nb 10-20 mm	0.543			0.626	0.569							0.509	0.463
forte													
moy													
faible													
recegmotte	-0.616	-0.655	-0.486	-0.566		-0.484	-0.623	-0.603	-0.522				

	Racines verticales				Densité racines fines			
	Lplusgrosse	Lmoyracfin	Nb > 20 mm	Nb 10-20 mm	forte	moy	faible	recegmotte
D130								
HT								
HBH								
Ep								
Haut								
Larg								
Vol								
Volp								
Surf								
Lmax								
Lmin								
Nb > 20 mm								
Nb 10-20 mm								
Lplusgrosse	1.000							
Lmoyracfin		1.000						
Nb > 20 mm			1.000					
Nb 10-20 mm			0.674	1.000				
forte		0.492			1.000			
moy						1.000		
faible							1.000	
recegmotte					0.472			1.000

Afin d'étudier les corrélations entre les caractéristiques dendrométriques et racinaires et les différents paramètres édaphiques, des analyses en correspondances multiples (ACM) ont été effectuées. Pour ces analyses, les 43 variables initiales ont été transformées en variables qualitatives (**tableau 25**). Pour les variables initialement quantitatives, les bornes des modalités ont été choisies selon un critère d'effectif égal dans chaque catégorie. L'ACM porte sur 161 catégories et 102 individus.

Les rapports de corrélation sont calculés pour chaque modalité de chaque variable et sont utilisés pour mettre en évidence quelle variable est prise en compte par un axe donné (**tableau 26**). Pour chaque variable qualitative, la corrélation est le rapport entre la variance entre les différentes modalités de la variable sur la variance totale.

**Tableau 25.** Liste des variables et catégories utilisées pour l'ACM effectuée sur les trois forêts du plateau calcaire de Lorraine.

Variable	Code	Modalité : 1	Mod : 2	Mod : 3	Mod : 4	Mod : 5	Mod : 6	Mod : 7
Site	site	Chapitre	Haye	Poirier				
Espèce	esp	HET	CHS					
D130	d	<=35 cm	]35-45]	]45-60]	> 60			
Ht	ht	<=22 m	]22-25]	]25-30]	> 30			
Hbh	hbh	<=10 m	]10-15[	>=15				
Emotte	Em	<=60 cm	]60-80[	]80-100[	>= 100			
Hmotte	Hm	<=200 cm	]200-250]	]250-300]	> 300			
Lmotte	Lm	]150-250] cm	]250-300]	]300-400]	> 400			
Smotte	Sm	< 4 m <sup>2</sup>	]4-7[	]7-11[	>=11			
Vmotte	Vm	< 3 m <sup>3</sup>	]3-5[	]5-7[	>= 7			
Vprosp	Vp	<=6 m <sup>3</sup>	]6-10[	]10-15[	>=15			
Type de motte	Ty	globuleux	plat					
Ext. Max rac. Lat.	rlma	40-80 cm	90-110	120-240				
Ext. Min. rac. Lat.	rlmi	4-15 cm	20-25	30-40				
Nb de grosse rac. Lat	rlng	1-9	10-15	16-60				
Nb de petite rac. Lat	rlnp	1-9	10-15	16-50				
Santé des rac. Lat	sanl	cassées	cas-pour.	pourries				
Ext. Max rac. Vert.	rvma	10-20 cm	25-40	45-150				
Ext. Min. rac. Vert	rvmi	5-10 cm	15-45					
Nb de grosse rac. Vert	rvng	3-9	10-20	21-65				
Nb de petite rac. Vert	rvnp	0-10	12-25	26-60				
Rac. Fine dens. forte	def	0 %	2-35	40-70				
Rac. Fine dens. moy	dm	0 %	15-40					
Rac. Fine dens. faible	defa	0 %	1-40					
Rac. Fine répartition	repa	homogène	hétérogène					
Santé des rac. Vert	sanv	cassées	cas-pour.	pourries	saines			
Déformation	defo	aplati	semi-plong	plongeant	a-sp	sp-p	a-sp-p	
Rec. EG dans motte	rec	0-10%	15-35	40-50	60-80			
Taille max des EG	Tma	pas de EG	5-15 cm	20-35	40-60			
Taille min des EG	Tmi	pas de EG	2-8 cm	10-15				
Prof App. Cailloux	ApC	pas de EG	50-90 cm	30-45	15-25	0-10		
Prof App. Obstacle	ApO	pas d'obst.	70-90 cm	50-60	35-45	10-30		
Forme des EG	Feg	plat	globuleux	p + g	g + autres	pas de EG		
Orientation des EG	Orie	horizontale	oblique	toute	pas de EG			
Type d'obstacle	tyob	Dalle seule ou avec 1 élé	Dalle avec 2 élts	Plaquette seule ou avec 1 élé	Grèze seule ou avec 1 élé	Grèze avec 2 élts	Tous	pas de EG
Epaisseur de limon	L	10-12 cm	15	20-25				
Ep. Limon-Argileux	LA	25-30 cm	35-40	45-55	60-90			
Type d'Obst. dans LA	ObLA	dalle	pavé	plaquette	globuleux	pas de EG		
Ep. Argileux-Limon	AL	40-59 cm	60-70	72-86	90-135	pas de AL		
Type d'Obst. dans LA	ObAL	dalle	pavé	plaquette	globuleux	grèze	pas de EG	
Ep. Argile lourde	AL4	sans objet	61-120					
Type d'Obst. AL4	ObAL4	dalle	sans objet	plaquette	globuleux	grèze	autres	Arg. lo
EG Fond de la motte	Fond	Dalle seule ou avec 1 élé	Dalle avec 2 élts	Plaquette seule ou avec 1 élé	Grèze seule ou avec 1 élé	Grèze avec 2 élts	Tous	Argile lourde

**Tableau 26.** Rapport des corrélations entre les variables et les trois axes factoriels retenus. La valeur entre parenthèses indique le % d'inertie de chaque axe (somme des trois premiers = 25,65%). Par exemple, plus de 83% de la variabilité entre les trois catégories de la variable « site » sont pris en compte par l'axe 1.

Variable	Code	Axe 1 (13,24%)	Axe 2 (6,43%)	Axe 3 (5,98%)
Site	site	<b>0.833</b>		0.674
Espèce	esp		0.206	
D130	d			0.482
Ht	ht	<b>0.707</b>	0.373	
Hbh	hbh	<b>0.465</b>		0.179
Emotte	Em	<b>0.492</b>	0.274	
Hmotte	Hm	0.254	<b>0.493</b>	
Lmotte	Lm	0.194	<b>0.404</b>	
Smotte	Sm	0.268	<b>0.522</b>	
Vmotte	Vm	0.223	<b>0.518</b>	
Vprosp	Vp	<b>0.472</b>	0.334	
Type de motte	Ty	0.175		
Ext. Max rac. Lat.	rlma			0.150
Ext. Min. rac. Lat.	rlmi		0.053	
Nb de grosse rac. Lat	rlng		0.167	
Nb de petite rac. Lat	rlnp		0.116	
Santé des rac. Lat	sanl		0.101	
Ext. Max rac. Vert.	rvma	0.380		
Ext. Min. rac. Vert	rvmi	0.019		
Nb de grosse rac. Vert	rvng			0.119
Nb de petite rac. Vert	rvnp		0.312	
Rac. Fine dens. forte	def			0.500
Rac. Fine dens. moy	dm			0.097
Rac. Fine dens. faible	defa		0.265	
Rac. Fine répartition	repa	0.023		
Santé des rac. Vert	sanv		0.131	
Déformation	defo	<b>0.424</b>		0.304
Rec. EG dans motte	rec	<b>0.717</b>	0.172	
Taille max des EG	Tma	<b>0.919</b>	0.142	0.493
Taille min des EG	Tmi	<b>0.919</b>	0.100	0.122
Prof App. Cailloux	ApC	<b>0.930</b>	0.186	
Prof App. Obstacle	ApO	<b>0.933</b>	0.360	
Forme des EG	Feg	<b>0.920</b>		0.258
Orientation des EG	Orie	<b>0.920</b>	0.169	
Type d'obstacle	tyob	<b>0.929</b>	0.296	0.628
Epaisseur de limon	L	0.192		
Ep. Limon-Argileux	LA	0.055		
Type d'Obst. dans LA	ObLA	0.360		
Ep. Argileux-Limon	AL3	<b>0.568</b>	0.124	
Type d'Obst. dans LA	ObAL	<b>0.607</b>		0.491
Ep. Argile lourde	AL4		0.216	
Type d'Obst. AL4	ObLA4		0.233	0.189
EG Fond de la motte	Fond	<b>0.873</b>	0.249	0.551

L'analyse de la répartition des 161 catégories et des 102 individus dans le plan factoriel 1x2 de l'ACM met clairement en évidence une structuration le long de l'axe 1 liée à la présence ou non d'éléments grossiers : *pole négatif*, forêt de Haye et Bois du Chapitre ; *pole positif*, forêt du Beau-Poirier (figure 22 et tableau 26).

*Le pole positif de l'axe 1* regroupe les arbres du Beau-Poirier (*chêne sessile et hêtre confondus* ; n=15) caractérisés par :

- L'absence d'éléments grossiers ou d'obstacles dans la motte ou un très faible recouvrement (< 10%) (pas de contraintes édaphiques) ;
- Une hauteur supérieure à 30 m et une base du houppier supérieure à 15 m ;
- Un volume prospecté supérieur à 15 m<sup>3</sup> et épaisseur de motte supérieure à 1 m ;
- Au moins 25 racines verticales non ou peu déformées de 10 à 20 mm de diamètre s'allongeant sur au moins 40 cm hors de la motte ;
- Une motte de type globuleux.

*Le pole négatif* regroupe les arbres des massifs de Haye et du Bois de Chapitre présentant des hauteurs et diamètres plus faibles, des niveaux de contraintes du sol plus importants (apparition d'éléments grossiers de différents types à différentes profondeurs...), des systèmes racinaires moins développés, plus déformés... La discrimination entre les sites de Haye et du Bois du Chapitre se fait essentiellement le long de l'axe 2.

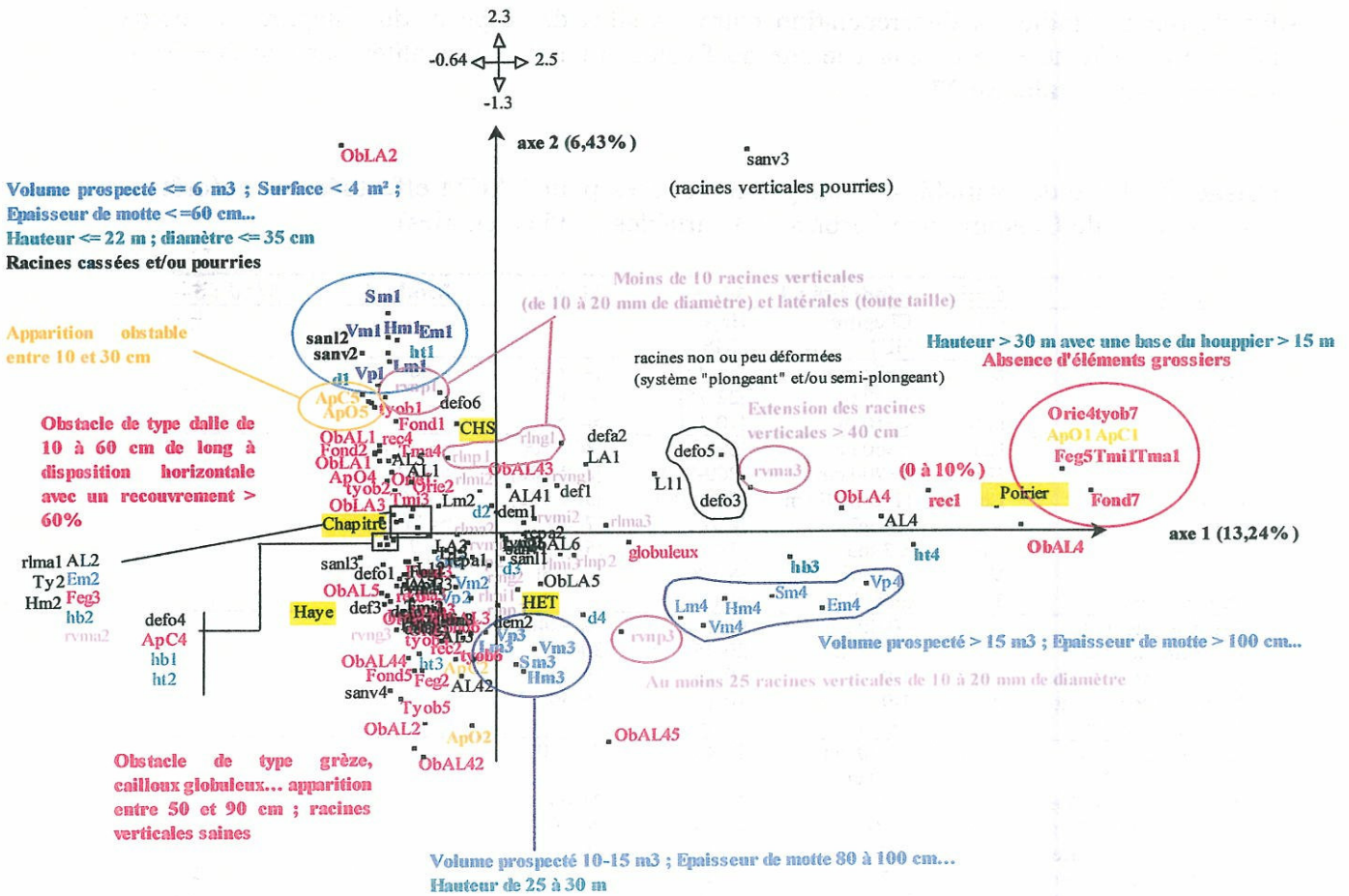
Le côté positif de l'axe 2 discrimine des arbres (essentiellement des chênes) caractérisés par :

- De petites dimensions (hauteur et diamètre inférieurs à 22 m et 35 cm) ;
- Un système racinaire cassé et/ou pourri ;
- Une motte peu épaisse (<= 60 cm) et de petite surface (< 4 m<sup>2</sup>) avec un volume de sol prospecté inférieur ou égal à 6 m<sup>3</sup> ;
- Des obstacles de type dalle (essentiellement) de 10 à 60 cm de long à disposition horizontale recouvrant au moins 60% de la motte et apparaissant entre 10 et 30 cm ;

Le pole négatif de l'axe 2 correspond à des arbres :

- De 25 à 30 m de haut ;
- Prospectant 10 à 15 m<sup>3</sup> de sol avec une épaisseur de motte de 80 à 100 cm et des racines verticales saines ;
- Présentant des obstacles de type grèze, des cailloux globuleux... apparaissant entre 50 et 90 cm





**Figure 22.** Répartition dans le plan factoriel 1x2 de l'ACM des 161 catégories (43 variables et 102 arbres) définies pour les trois massifs échantillonnés dans la région des plateaux calcaires de Lorraine (Forêts de Haye, du Beau-Poirier et le Bois du Chapitre).

Afin de mieux étudier la différenciation entre les sites de Haye et du Chapitre, la même analyse a été effectuée en excluant le site du Beau-Poirier. Les modalités par variables sont présentées dans le **tableau 27**.

**Tableau 27.** Liste des variables et catégories utilisées pour l'ACM effectuée sur la forêt de Haye et le Bois du Chapitre (n=85 arbres ; 43 variables ; 135 catégories)

Variable	Code	Modalité : 1	Mod : 2	Mod : 3	Mod : 4	Mod : 5
Site	site	Chapitre	Haye			
Espèce	esp	HET	CHS			
D130	d	<=35 cm	]35-45]	]45-60]	> 60	
Ht	ht	<=22 m	]22-25]	> 25		
Hbh	hbh	<=10 m	]10-15[	>=15		
Emotte	Em	<=60 cm	]60-80[	]80-100[	>= 100	
Hmotte	Hm	<=200 cm	]200-250]	]250-300]	> 300	
Lmotte	Lm	]150-250] cm	]250-300]	]300-400]	> 400	
Smotte	Sm	< 4 m <sup>2</sup>	]4-7[	]7-11[	>=11	
Vmotte	Vm	< 3 m <sup>3</sup>	]3-5[	]5-7[	>= 7	
Vprosp	Vp	<=6 m <sup>3</sup>	]6-10[	]10-15[	>=15	
Type de motte	Ty	globuleux	plat			
Ext. Max rac. Lat.	rlma	40-80 cm	90-110	120-240		
Ext. Min. rac. Lat.	rlmi	4-15 cm	20-25	30-40		
Nb de grosse rac. Lat	rlng	1-9	10-15	16-60		
Nb de petite rac. Lat	rlnp	1-9	10-15	16-50		
Santé des rac. Lat	sanl	cassées	cas-pour.			
Ext. Max rac. Vert.	rvma	10-20 cm	25-40	45-150		
Ext. Min. rac. Vert	rvmi	5-10 cm	15-45			
Nb de grosse rac. Vert	rvng	3-9	10-20	21-65		
Nb de petite rac. Vert	rvnp	0-10	12-25	26-60		
Rac. Fine dens. forte	def	0 %	2-35	40-70		
Rac. Fine dens. moy	dm	0 %	15-40			
Rac. Fine dens. faible	defa	0 %	1-40			
Rac. Fine répartition	repa	homogène	hétérogène			
Santé des rac. Vert	sanv	cassées-saines	cas-pour.			
Déformation	defo	aplati	sp/sp-p	plongeant	a-sp/a-sp-p	
Rec. EG dans motte	rec	0-35%	40-50	60-80		
Taille max des EG	Tma	0-15 cm	20-35	40-60		
Taille min des EG	Tmi	0-8 cm	10-15			
Prof App. Cailloux	ApC	50-90 cm	30-45	15-25	0-10	
Prof App. Obstacle	ApO	70-90 cm	50-60	35-45	10-30	
Forme des EG	Feg	plat	globuleux	divers		
Orientation des EG	Orie	horizontale	divers			
Type d'obstacle	tyob	Dalle seule ou avec 1 élt	Dalle avec 2 élt	Plaquette seule ou avec 1 élt	Grèze seule ou non	Tous
Epaisseur de limon	L	10-12 cm	15	20-25		
Ep. Limon-Argileux	LA	25-30 cm	35-40	45-55	60-90	
Type d'Obst. dans LA	ObLA	dalle	Plaqq+divers	pas de EG		
Ep. Argileux-Limon	AL	40-59 cm	60-70	72-86	> 90 ou pas AL	
Type d'Obst. dans LA	ObAL	dalle	Plaqq/glob	grèze	pas de EG	
Ep. Argile lourde	AL4	sans objet	61-120			
Type d'Obst. AL4	ObAL4	dalle	sans objet	plaquette	Glob /grèze	
EG Fond de la motte	Fond	Dalle seule ou avec 1 élt	Dalle avec 2 élt	Plaquette seule ou avec 1 élt	Grèze seule ou non	Tous

L'analyse de la répartition des 135 catégories et des 85 individus dans le plan factoriel 1x2 de l'ACM met en évidence une structuration le long de l'axe 1 liée aux caractéristiques des mottes, aux types d'éléments grossiers, à leur profondeur d'apparition, à la hauteur des arbres (tableau 28 et figure 23).

**Le pôle positif de l'axe 1** (inertie : 8,98%) regroupe les arbres (essentiellement des hêtres) caractérisés par :

- Un volume prospecté supérieur à 15 m<sup>3</sup>, une surface de motte supérieure à 11 m<sup>2</sup>, une épaisseur de motte supérieure à 1 m ;
- Au moins 20 racines verticales et latérales de petits et gros diamètres ;
- Des éléments grossiers de tous types ;
- Des EG ou des obstacles apparaissant entre 30 et 60 cm ;
- Des hauteurs et diamètres supérieurs à 25 m et 60 cm respectivement.

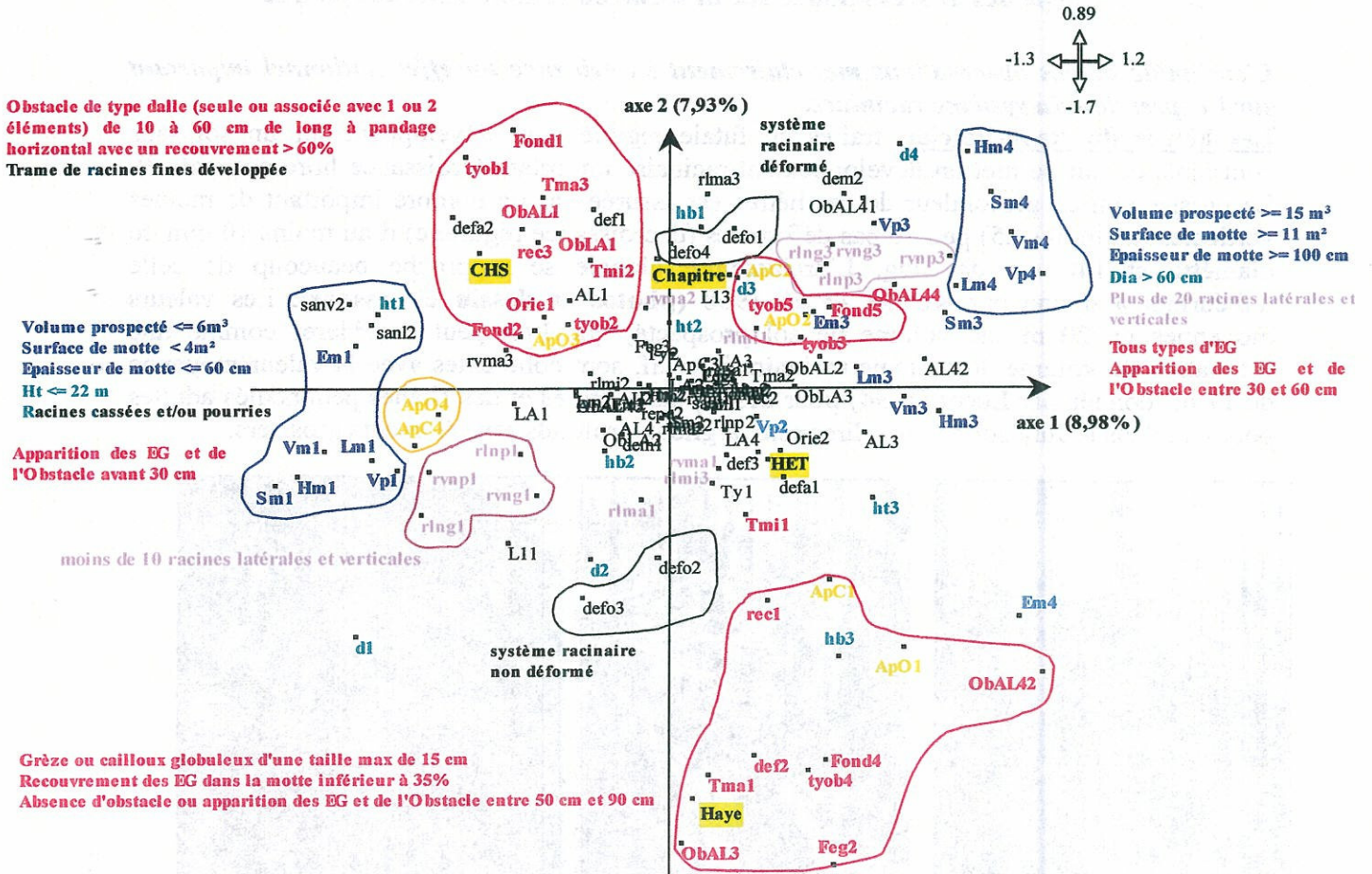
**Le pôle négatif de l'axe 1** (inertie : 8,98%) regroupe les arbres (essentiellement des chênes) caractérisés par :

- De petites dimensions (hauteurs inférieurs à 22 m) ;
- Un système racinaire cassées et/ou pourries ;
- Une motte peu épaisse ( $\leq 60$  cm) et de petite surface ( $< 4$  m<sup>2</sup>) avec un volume de sol prospecté inférieur ou égal à 6 m<sup>3</sup> et moins de 10 racines verticales ou horizontales de petits et gros diamètres ;
- Des obstacles de type dalle (essentiellement) de 10 à 60 cm de long à disposition horizontale recouvrant au moins 60% de la motte et apparaissant entre 10 et 30 cm ;

**Le pôle négatif de l'axe 2** (7,93%) discrimine des arbres présentant un système racinaire peu ou non déformé (système plongeant ou semi-plongeant) avec une absence d'obstacle ou des obstacles et éléments grossiers apparaissant entre 50 et 90 cm. Les éléments grossiers sont de type grèze ou cailloux globuleux d'une taille maximale de 15 cm avec un recouvrement dans la motte inférieur à 35%. Ce pôle regroupe essentiellement le site de Haye. Le côté positif regroupe les arbres du Bois du Chapitre présentant un système racinaire plutôt déformé et des contraintes apparaissant avant 60 cm (voir commentaires sur l'axe 1). L'axe 2 discrimine également les arbres selon leurs caractéristiques dendrométriques. Le pôle négatif correspond aux arbres de petits diamètres ( $< 45$  cm) et de grandes hauteurs ( $> 25$  m) et le pôle positif aux arbres de gros diamètres ( $> 45$  cm) mais de petites hauteurs ( $< 25$  m). Ceci suggère que l'axe 2 reflète non seulement des variations des conditions édaphiques entre les deux massifs mais également du mode de gestion : futaie régulière en forêt de Haye et structure irrégulière issue d'une conversion du TSF au Bois du Chapitre.

**Tableau 28.** Rapport des corrélations entre les variables et les trois axes factoriels retenus. La valeur entre parenthèses indique le % d'inertie de chaque axe (somme des trois premiers = 22,85%). Par exemple, plus de 83% de la variabilité entre les trois catégories de la variable « site » sont pris en compte par l'axe 1.

Variable	Code	Axe 1 (8,98%)	Axe 2 (7,93%)	Axe 3 (5,95%)
Site	site		0.631	
Espèce	esp	0.184		0.188
D130	d	0.310	0.421	
Ht	ht	0.374		
Hbh	hbh		0.235	
Emotte	Em	0.367		0.174
Hmotte	Hm	0.654		0.346
Lmotte	Lm	0.528		0.223
Smotte	Sm	0.672		0.313
Vmotte	Vm	0.677		0.327
Vprosp	Vp	0.479		0.221
Type de motte	Ty			0.179
Ext. Max rac. Lat.	rlma		0.186	
Ext. Min. rac. Lat	rlmi	0.053		
Nb de grosse rac. Lat	rlng	0.274	0.113	
Nb de petite rac. Lat	rlnp	0.161		
Santé des rac. Lat	sanl	0.100		
Ext. Max rac. Vert.	rvma		0.057	
Ext. Min. rac. Vert	rvmi			0.006
Nb de grosse rac. Vert	rvng	0.130		
Nb de petite rac. Vert	rvnp	0.456		
Rac. Fine dens. forte	def		0.585	0.223
Rac. Fine dens. moy	dm		0.110	
Rac. Fine dens. faible	defa	0.245	0.185	0.206
Rac. Fine répartition	repa			0.056
Santé des rac. Vert	sanv	0.075		
Déformation	defo		0.318	0.128
Rec. EG dans motte	rec	0.112	0.251	
Taille max des EG	Tma		0.521	
Taille min des EG	Tmi		0.193	
Prof App. Cailloux	ApC	0.162		0.335
Prof App. Obstacle	ApO	0.297		0.341
Forme des EG	Feg		0.250	
Orientation des EG	Orie	0.136		
Type d'obstacle	tyob	0.211	0.567	
Epaisseur de limon	L	0.066	0.092	
Ep. Limon-Argileux	LA			0.330
Type d'Obst. dans LA	ObLA			0.364
Ep. Argileux-Limon	AL3	0.121		
Type d'Obst. dans LA	ObAL	0.138	0.461	
Ep. Argile lourde	AL4	0.225		0.335
Type d'Obst. AL4	ObLA4	0.239	0.121	0.367
EG Fond de la motte	Fond	0.203	0.495	



**Figure 23.** Répartition dans le plan factoriel 1x2 de l'ACM des 135 catégories (43 variables et 85 arbres) définies pour la forêt de Haye et le Bois du Chapitre.

## 2.5. Typologie des arbres selon le statut social ou la contrainte édaphique

*L'ensemble de ces observations met clairement en évidence un effet stationnel important sur l'expression du système racinaire.*

**Les hêtres du Beau-Poirier**, traités en futaie régulière, se développent sur un sol sans contrainte ce qui permet un développement racinaire important (croissance libre optimale ?). La prospection en profondeur de ces hêtres est assurée par un nombre important de racines verticales (au moins 25) peu ou pas déformées (décroissance régulière) d'au moins 10 mm de diamètre et 140 cm de long. L'architecture globale se rapproche beaucoup de celle « théorique » donnée par Köstler *et al.* 1968 (**photos et dessin ci-dessous**). Les valeurs moyennes de 20 m<sup>3</sup> de volume de sol prospecté, que l'on peut considérer comme une estimation du volume du système racinaire intensif, sont cohérentes avec la valeur moyenne de 17 m<sup>3</sup> donnée par Lucot (1994) pour des sapins pectinés et des chênes pédonculés adultes poussant dans le Jura sur des sols limoneux argileux profonds sans éléments grossiers.



Photos : F. Lebourgeois (dessin de Köstler *et al.* 1968)

### Néoluvisol issu de limons et argile de décarbonatation



Mésomull

A (1) Limon très meuble  
E Lm Enracinement très dense

— 25 cm

AL

BT

Horizons peu compact puis compact (au delà de 50 cm)  
Structure en polyèdres fins très nets  
Aucune trace d'hydromorphie  
Enracinement très dense

à

50 cm

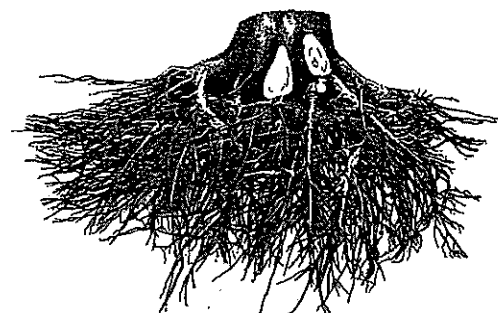
II

BT

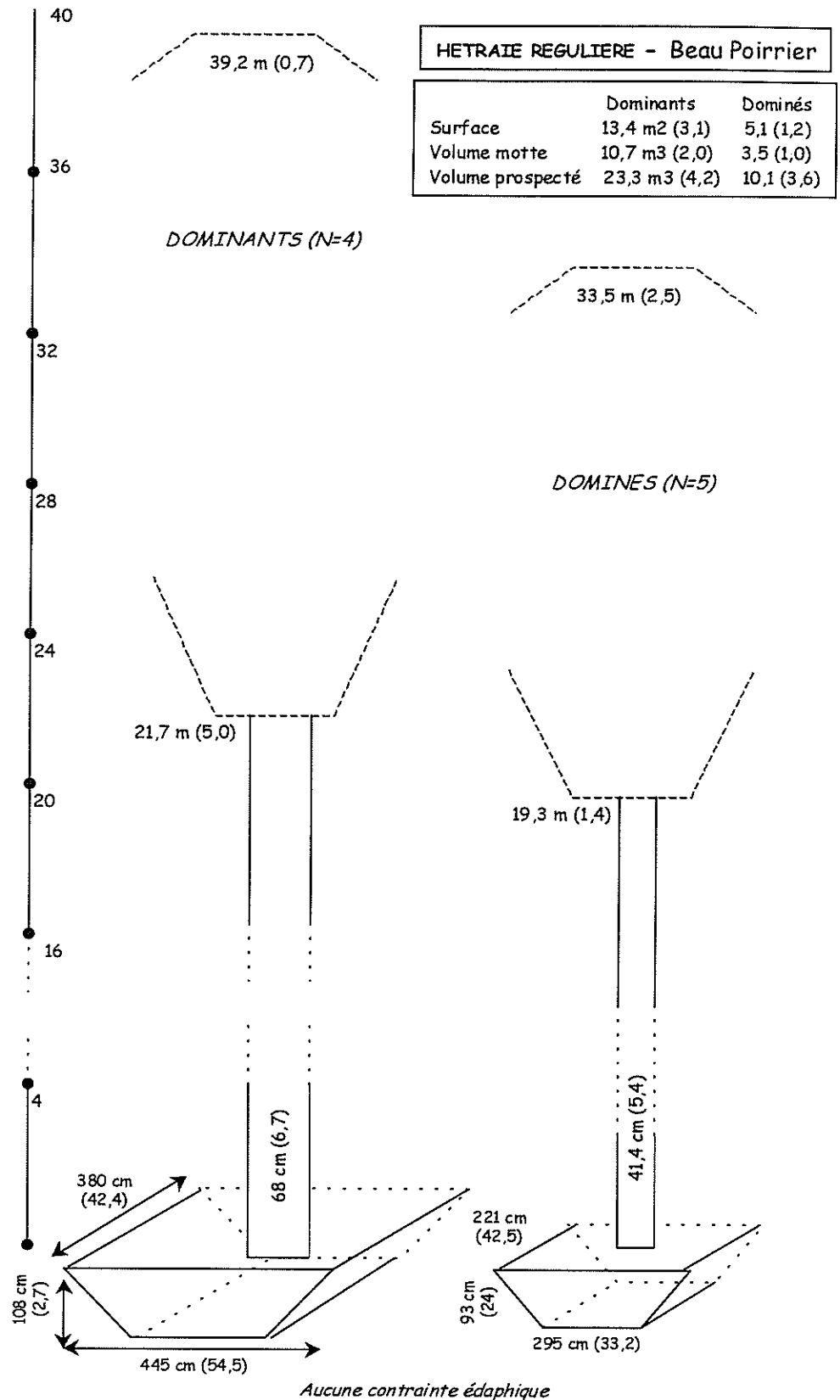
Alo

— 75 cm

Horizon très argileux (> 70%) compact à structure en gros agrégats (1 à 5 cm)  
Aucune trace d'hydromorphie  
Enracinement peu abondant à rare



L'absence de contrainte édaphique au Beau-Poirier permet d'appréhender l'effet de la seule compétition inter-arbre sur le développement racinaire. Ainsi, des hêtres dominés (en hauteur : -15% et en diamètre : -40% , n=5) prospectent près de 60% de moins de sol que des hêtres dominants (n=4) (figure 24). Pour les surfaces et les volumes des mottes, les différences sont respectivement de -60% et -67%. Les caractéristiques des racines verticales et latérales sont en revanche identiques. Il est important d'observer que les chênes dominés présentent les mêmes caractéristiques que les hêtres dominés. Dans ce contexte, il apparaît donc que les deux espèces présentent le même comportement et que c'est le seul effet de la compétition qui réduit le développement racinaire. Cette station ne présente aucune contrainte sur les plans trophiques et hydriques (RUM supérieur à 200 mm). Cette station offre donc une excellente potentialité dans le contexte étudié, ce qui se traduit par des hauteurs totales des arbres supérieures à 35 m.



La présence d'éléments grossiers réduit les possibilités de prospection et de développement racinaire. En comparaison avec les hêtres du Beau-Poirier, les hêtres de Haye, également traités en futaie régulière, présentent des prospections moindres (voir tableau 20, page 48). En considérant seulement les hêtres dominants (à la fois en diamètre et en hauteur), on observe une prospection réduite de plus de 50% pour les hêtres en forêt de Haye ( $10 \text{ m}^3$  contre  $23 \text{ m}^3$ ) (tableau 29). La contrainte édaphique correspond à la présence de grèze associée ou non avec des cailloux plats ou globuleux généralement remaniés (de 5 à 20 cm) apparaissant en moyenne vers 65 cm (15 à 90 cm) et recouvrant environ 20% de la motte (5 à 40%) (voir figure 23, page 63). Il est à noter que, pour la même classe de diamètre (45-50 cm), la différence relative de volume prospecté est de 35% ( $10 \text{ m}^3$  contre  $15,6 \text{ m}^3$ ). Il est intéressant de noter que les hêtres dominés au Beau-Poirier (sol sans contrainte) présentent les mêmes caractéristiques que les hêtres dominants de la forêt de Haye soumis à une contrainte édaphique « moyenne ».

**Tableau 29.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des hêtres dominants (en diamètre et en hauteur) au Beau-Poirier (structure régulière ; pas de contrainte édaphique ; motte globuleuse) et en forêt de Haye (Rte Frouard) (structure régulière ; contrainte moyenne ; motte plate).

	Hêtres dominants				
	Beau-Poirier		Haye		p
	N=4		N=7		
	Moy	EcT	Moy	EcT	5%
<b>Partie aérienne</b>					
Diamètre (cm)	68	6.7	43.5	4.9	<b>0.000</b>
Hauteur totale (m)	39.2	0.7	30.1	1.9	<b>0.000</b>
Hauteur de la base du houppier (m)	21.7	5.0	15.4	1.4	<b>0.010</b>
<b>Motte</b>					
Epaisseur (cm)	108	2.7	94.7	14.2	0.104
Hauteur (cm)	380	42.4	265.7	22.9	<b>0.000</b>
Largeur (cm)	445	54.5	347.1	59.3	<b>0.024</b>
Surface (m <sup>2</sup> )	13.4	3.1	7.2	0.8	<b>0.006</b>
Volume (m <sup>3</sup> )	10.7	2.0	5.8	2.2	<b>0.000</b>
Vol. prospecté (m <sup>3</sup> )	23.3	4.2	10	3.9	<b>0.000</b>
<b>Racines latérales</b>					
Long. Maximale (cm)	122.5	31	80	14.1	<b>0.011</b>
Long. Minimale (cm)	21	16.9	25	8.7	0.609
Nb racines > 20 mm de dia.	9	2.4	13	5.6	0.215
Nb racines 10-20 mm de dia.	10.3	5.5	11	8.9	0.883
<b>Racines verticales</b>					
Long. de la plus grosse (cm)	65	10	31.4	21.9	<b>0.019</b>
Long. moy. des racines fines (cm)	13.8	2.5	12.9	3.9	0.695
Nb racines > 20 mm de dia.	7.8	2.1	15.3	5.6	<b>0.032</b>
Nb racines 10-20 mm de dia.	30	0.0	16.3	11.9	0.051
<b>Densité racines fines</b>					
% de dens. forte (>5 racines/dm <sup>2</sup> )	0	0	10.6	11.7	
% de dens. moy. (1-5 racines/dm <sup>2</sup> )	3.8	7.5	0	0	
% de dens. faible (< 1 racine/dm <sup>2</sup> )	5	4.1	0	0	



**Pour la forêt de Haye,** il est impossible de juger du seul effet de la compétition inter-arbre. En effet, les hêtres de plus petites dimensions (type 2) sont associés, comme les arbres les plus gros (type 1), à des éléments grossiers de type de grèze (associée ou non avec des cailloux plats ou globuleux généralement remaniés de 5 à 20 cm) mais apparaissant en moyenne vers 14 cm (10 à 20 cm) et recouvrant plus de 50% de la motte (40 à 70%) (figure 25). La différence de taille des arbres peut donc résulter à la fois de la gestion sylvicole et des contraintes du sol. Il est également important de rappeler que, pour toutes les forêts, nous n'avons aucune donnée précise sur les âges exacts des arbres étudiés. Ainsi, même si les peuplements échantillonnés sont *à priori* adultes (selon les documents d'aménagement disponibles) des différences d'âge pourraient également expliquer les différences observées en terme de taille des arbres et de volumes prospectés.

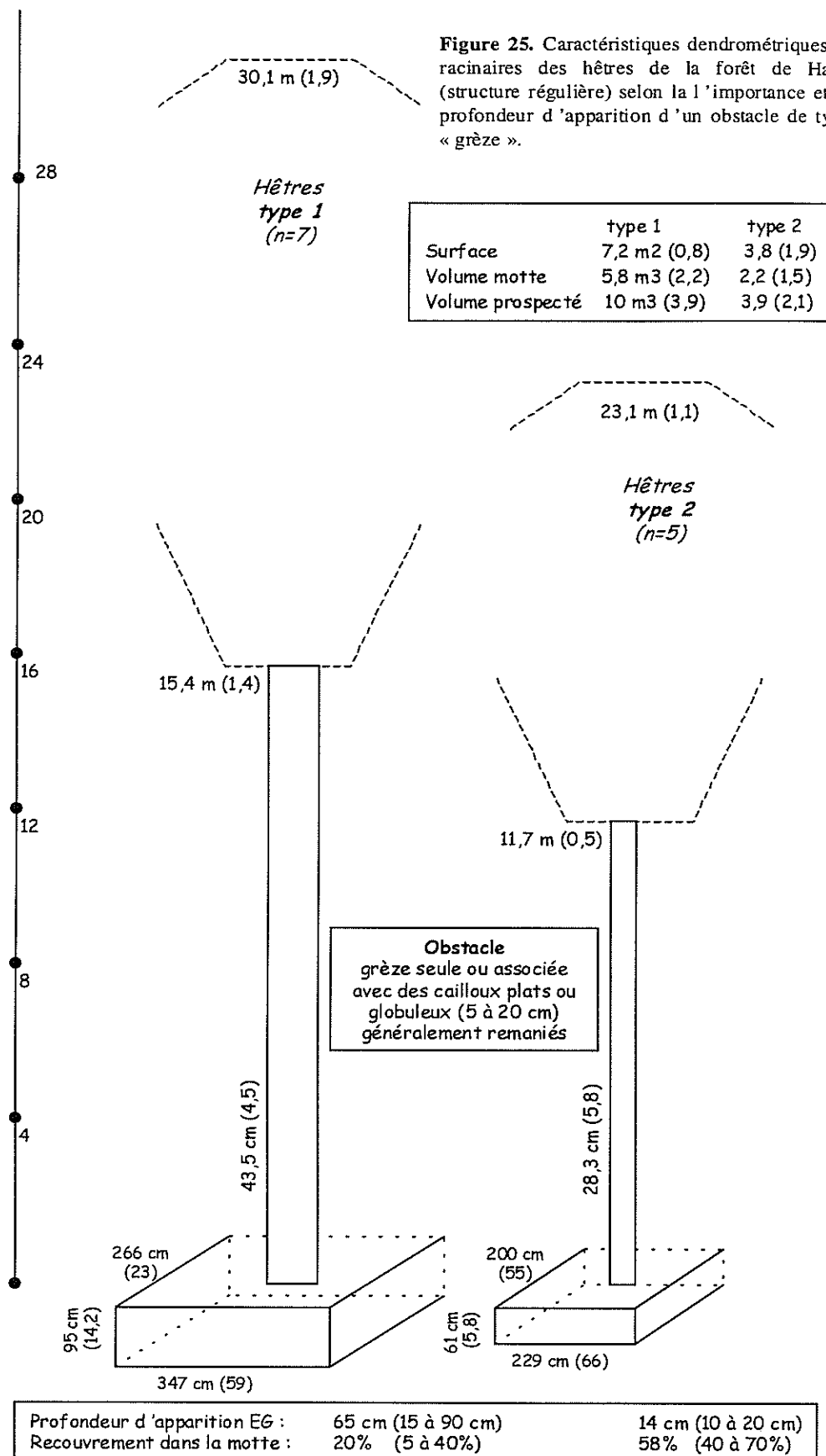


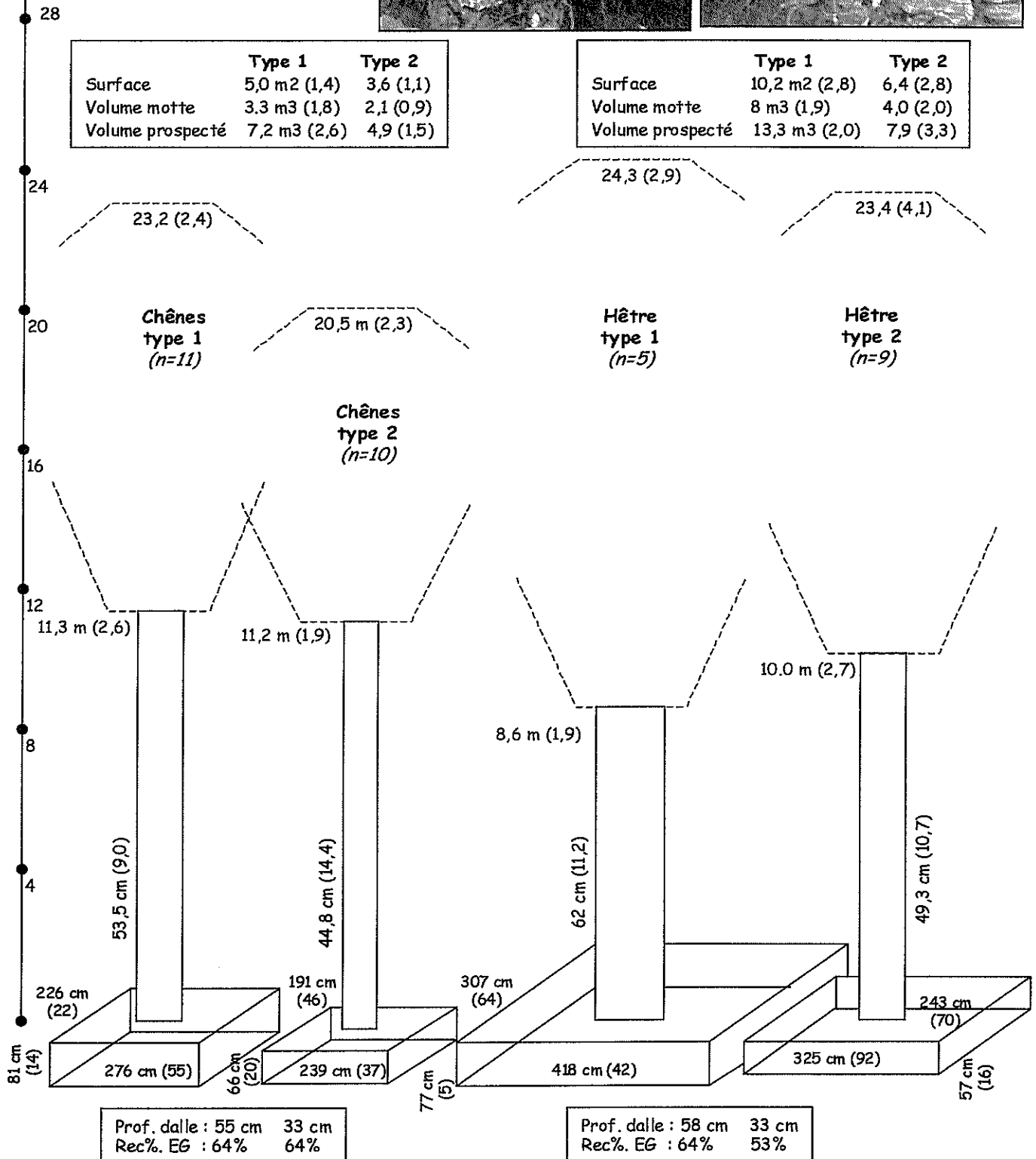
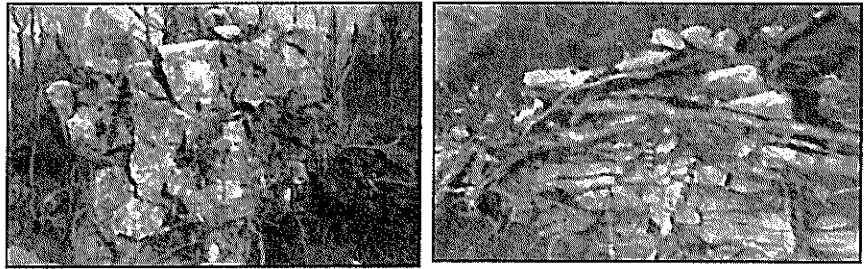
Figure 25. Caractéristiques dendrométriques et racinaires des hêtres de la forêt de Haye (structure régulière) selon la l'importance et la profondeur d'apparition d'un obstacle de type « grèze ».

**Pour le bois du Chapitre**, traité en irrégulier, la contrainte édaphique apparaît nettement plus forte que pour les deux précédentes forêts (**figure 23, page 63**). Selon les résultats de l'ACM, il est possible de différencier plusieurs « types d'arbres » selon le niveau de contrainte édaphique. Ainsi, selon la profondeur d'apparition d'un obstacle de type « dalle » (éléments grossiers de grande taille à pendage horizontal), les caractéristiques dendrométriques et racinaires des chênes et des hêtres varient sensiblement (**tableau 30 et figure 26**).

**Tableau 30.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des **chênes** et des **hêtres** au bois du **Chapitre** selon la profondeur d'apparition d'un obstacle de type « dalle ».

	Chêne				Hêtre			
	N=10		N=11		N=9		N=5	
	Moy	EcT	Moy	EcT	Moy	EcT	Moy	EcT
<b>Eléments grossiers (EG)</b>								
Taille min (min-max) et max (min-max)	5-10	30-60	5-10	20-45	5-10	30-50	8-10	35-50
Rec (%) dans la motte (moy, min-max))	64	40-80	64	50-80	53	25-80	64	50-80
Prof. apparition (moy, min-max)	20	15-40	23	0-50	14	0-40	40	15-60
Prof apparition dalle (moy, min-max)	33	15-40	55	45-70	33	10-40	58	50-60
<b>Partie aérienne</b>								
Diamètre (cm)	44.8	14.4	53.5	9.0	49.3	10.7	62.0	11.2
Hauteur totale (m)	20.5	2.3	23.2	2.4	23.4	4.1	24.3	2.9
Hauteur de la base du houppier (m)	11.2	1.9	11.3	2.6	10.0	2.7	8.6	1.9
<b>Motte</b>								
Epaisseur (cm)	65.5	20.2	80.7	14.0	57.1	15.9	76.8	5.1
Hauteur (cm)	191.0	46.0	225.5	22.1	243.3	70.2	307.0	64.2
Largeur (cm)	239.0	37.0	276.0	55.3	325.1	92.4	418.0	42.1
Surface (m2)	3.6	1.1	5.0	1.4	6.4	2.8	10.2	2.8
Volume (m3)	2.1	0.9	3.3	1.8	4.0	2.0	8.0	1.9
Vol. prospecté (m3)	4.9	1.5	7.2	2.6	7.9	3.3	13.3	2.0
<b>Racines latérales</b>								
Long. Maximale (cm)	97.0	18.9	118.2	38.7	98.9	35.2	106.0	29.7
Long. Minimale (cm)	22.5	6.3	20.5	9.6	17.2	5.7	16.0	8.9
Nb racines > 20 mm de dia.	10.7	3.5	12.7	4.0	14.4	8.2	20.4	7.6
Nb racines 10-20 mm de dia.	6.2	3.9	13.9	8.1	14.0	6.4	14.8	6.1
<b>Racines verticales</b>								
Long. de la plus grosse (cm)	35.5	17.1	32.7	19.5	27.8	7.5	21.0	5.5
Long. moy. des racines fines (cm)	12.5	7.9	12.7	4.7	16.1	4.2	12.0	4.5
Nb racines > 20 mm de dia.	13.6	9.7	18.4	11.7	16.6	13.8	32.2	24.0
Nb racines 10-20 mm de dia.	8.2	4.7	20.1	16.2	19.1	14.3	36.0	16.7

**Figure 26.** Caractéristiques dendrométriques et racinaires des chênes et des hêtres au Bois du Chapitre (structure irrégulière) selon la profondeur d'apparition d'un obstacle de type « dalle ».



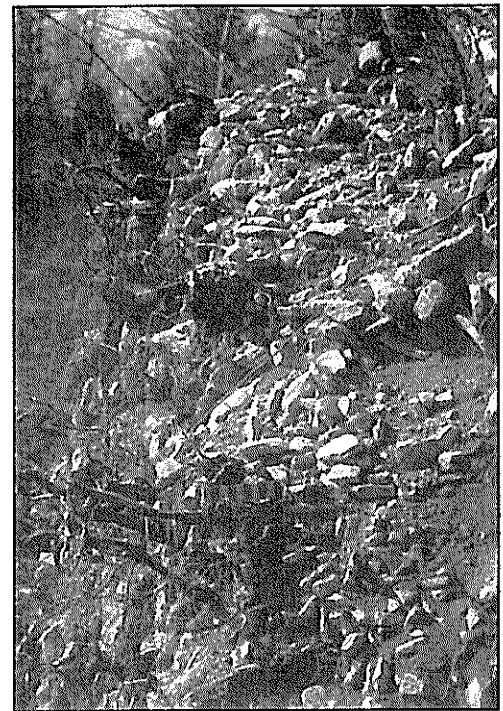
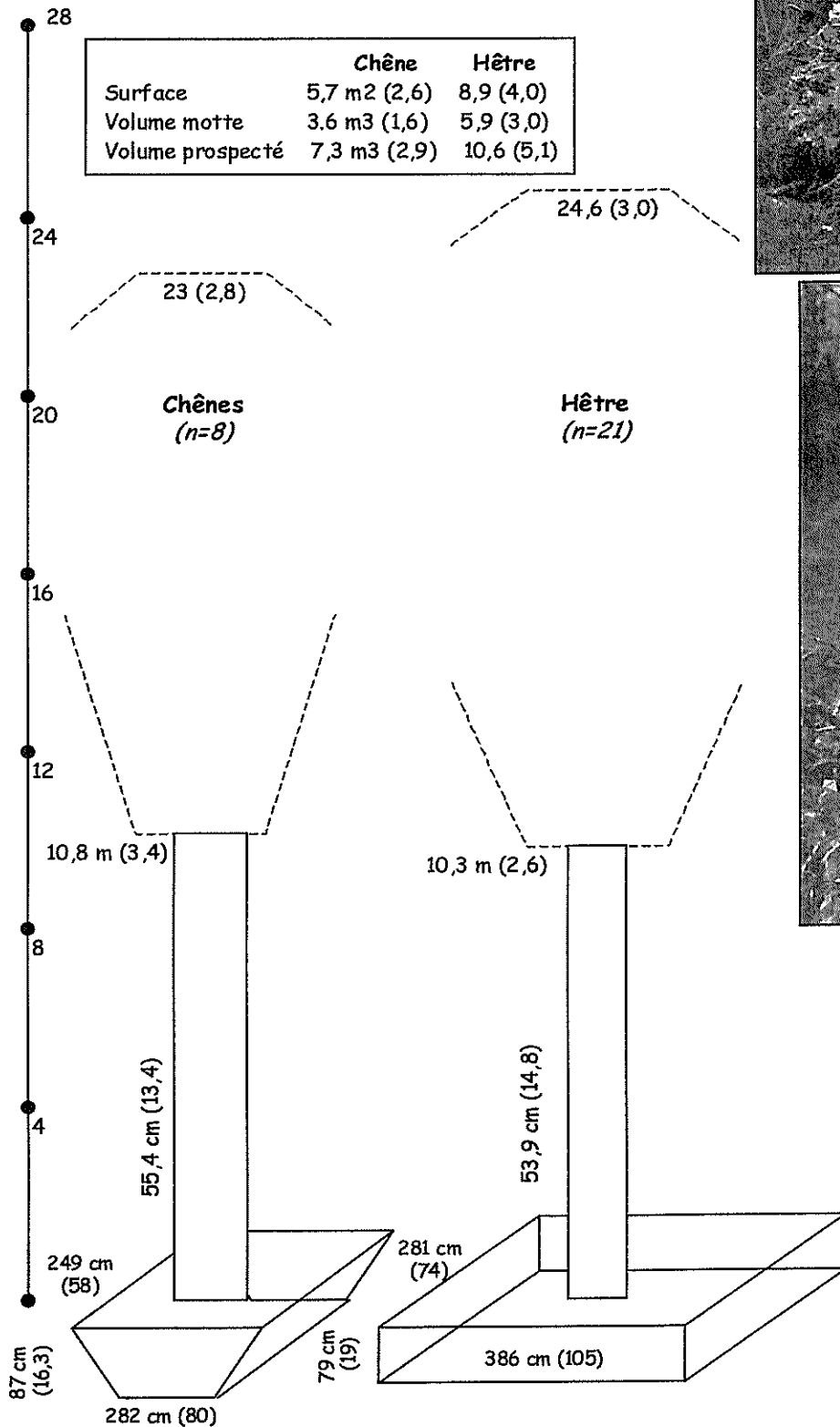
*Pour les deux espèces, plus la dalle est proche de la surface et plus la taille des arbres et du système racinaire est réduit.* Pour tous les hêtres, les mottes sont de type « plat » alors que pour 30% des chênes, le complexe sol-racine est du type « globuleux ». Une dalle superficielle avant 50 cm se traduit par une réduction de plus de 30% du volume prospecté du chêne et de plus de 40% pour le hêtre. Cependant, à contrainte équivalente, le hêtre prospecte davantage que le chêne (environ + 40%) en raison d'un doublement de la surface des mottes. Dans de telles conditions, le hêtre apparaît donc capable de « compenser » l'impossibilité de prospection en profondeur par un développement de son système latérale. Le nombre de charpentières apparaît d'ailleurs nettement plus important chez le hêtre. Pour les deux espèces, les racines verticales sont déformées avec une plus grande fréquence de racines totalement aplaties pour le hêtre que pour le chêne. Pour cette dernière espèce, des « pivots » cassés (parfois pourris) et très déformés sont également observables entre les éléments grossiers.

Pour les chênes, la présence de plaquettes ou d'éléments globuleux remaniés (pas de direction préférentielle au moins en surface) de taille moyenne (5 à 20 cm) recouvrant moins de 50% du fond de la motte et apparaissant vers 30 cm (obstacle vers 55 cm) correspond à une contrainte équivalente à une dalle apparaissant vers 55 cm (**tableau 31 et figure 27**). Les arbres présentent les mêmes dimensions et les volumes prospectés sont de l'ordre de 7 à 8 m<sup>3</sup>. La forme des mottes est cependant différente avec 60% des chênes présentant un complexe sol-racine du type « globuleux » (30% pour un obstacle type dalle). Les racines verticales (entre 15 et 20) sont peu ou pas déformées et généralement cassées. Pour les hêtres, cette même contrainte se traduit par des mottes de type « plat » dans 70% des cas (30% de type « globuleux ») et des tailles des arbres et des volumes prospectés intermédiaires entre ceux observés pour la contrainte du type « dalle ». Les volumes prospectés sont de l'ordre de 10 m<sup>3</sup> contre environ 8 et 13 m<sup>3</sup> en cas d'une dalle superficielle ou plus profonde. Comme précédemment, à taille équivalente, le hêtre prospecte un volume de sol supérieur au chêne (environ + 30%). Les dimensions des charpentières et des racines verticales sont comparables entre les deux espèces mais ces dernières apparaissent nettement plus souvent déformées chez le hêtre.

**Tableau 31.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des **chênes** et des **hêtres** au bois du **Chapitre** pour une contrainte édaphique liée à la présence de plaquettes, d'éléments globuleux de taille moyenne et généralement remaniés. L'obstacle correspond à des très fortes charges en EG, à une disposition horizontale des plaquettes ou des pavés en profondeur....

	Chêne (n=8)		Hêtre (n=21)	
<b>Eléments grossiers (EG)</b>				
Taille min (min-max) et max (min-max)	5-10	15-30	5-10	10-60
Rec (%) dans la motte (moy, min-max)	47	20-70	44	15-80
Prof. apparition (moy, min-max)	32	0-60	20	0-40
Prof apparition Obst (moy, min-max)	54	35-70	45	15-80
	Moy	EcT	Moy	EcT
<b>Partie aérienne</b>				
Diamètre (cm)	55.4	13.4	53.9	14.8
Hauteur totale (m)	23.0	2.8	24.6	3.0
Hauteur de la base du houppier (m)	10.8	3.4	10.3	2.6
<b>Motte</b>				
Epaisseur (cm)	87.5	16.3	79.0	18.7
Hauteur (cm)	248.8	57.7	281.0	74.5
Largeur (cm)	282.5	80.0	385.7	104.8
Surface (m <sup>2</sup> )	5.7	2.6	8.9	4.0
Volume (m <sup>3</sup> )	3.6	1.6	5.9	3.0
Vol. prospecté (m <sup>3</sup> )	7.3	2.9	10.6	5.1
<b>Racines latérales</b>				
Long. Maximale (cm)	106.3	34.6	97.1	31.2
Long. Minimale (cm)	14.4	8.2	21.4	7.9
Nb racines > 20 mm de dia.	14.1	8.0	15.7	12.0
Nb racines 10-20 mm de dia.	12.1	9.2	16.8	10.8
<b>Racines verticales</b>				
Long. de la plus grosse (cm)	33.1	17.7	28.1	11.2
Long. moy. des racines fines (cm)	11.9	2.6	12.9	4.6
Nb racines > 20 mm de dia.	15.3	8.3	14.2	9.7
Nb racines 10-20 mm de dia.	21.1	11.4	33.4	18.7

**Figure 27.** Caractéristiques moyennes des compartiments aériens et souterrains des chênes et des hêtres au bois du Chapitre (structure irrégulière) pour une contrainte édaphique liée à la présence de plaquettes, d'éléments globuleux de taille moyenne et généralement remaniés (photos de mottes globuleuses de chênes)



Sur le plan hydrique, la différence d'enracinement entre les espèces n'apparaît pas devoir entraîner de différence de réservoir hydrique disponible pour les arbres par les méthodes de calcul habituelles. Les calculs sont difficiles (charge en éléments grossiers et hétérogénéité du sol) mais les valeurs calculées sont très généralement faibles. Dans le contexte climatique régional, une interprétation classique nous conduirait à les juger insuffisantes pour le chêne et correctes pour le hêtre de part leur différence de productivité observée dans ces conditions (Becker 1979). Cependant la comparaison des caractéristiques des mottes pour chaque espèce ne peut nous laisser indifférent, car la quantité d'eau disponible dépend bien sûr du volume de terre prospectée, c'est-à-dire aussi de l'extension horizontale : l'utilisation habituelle de la seule profondeur ne prend pas en compte d'éventuelles différences de prospections latérales des deux espèces en peuplements mélangés. Dans quelle mesure la motte du hêtre lui assure-t-elle un réservoir hydrique supérieur à ce que donne un calcul n'utilisant que la notion de profondeur, et expliquerait ainsi sa meilleure croissance par rapport au chêne sur des sols superficiels ? Pour les deux espèces, les contraintes les plus fortes correspondent à des dalles ou plaquettes en place (10 à 40 cm de long ; épaisseur 3 à 10 cm) apparaissant proches de la surface (avant 40 cm), ce qui confirme les résultats de Lucot (1994) obtenus sur des jeunes plants. Les fortes charges en éléments remaniés ne constituent pas une contrainte très forte pour le chêne dont les pivots se développent entre les cailloux et prospectent les horizons profonds. Pour le hêtre, les racines (déformées) se développent entre les cailloux et arrivent à prospecter les horizons profonds. Une trame de racines fines est fréquemment observée au fond de la motte.

La forêt de Haye et le Bois du Chapitre présentent des niveaux de contraintes moyens à très élevés mais très variables spatialement. La contrainte majeure est l'organisation des éléments grossiers proches de la surface ce qui a un effet direct sur la réserve hydrique disponible (faible à moyenne) et sur l'ancrage des arbres. Pour l'aménagiste, le problème est le diagnostic délicat des niveaux de contrainte et le choix d'une gestion limitant la concurrence pour l'eau (spécialement pour le chêne).

### Conclusions partielles

Pour une structure régulière en l'absence de contraintes (Beau-Poirier), les hêtres dominants (Ht > 35 m et Dia > 60 cm) présentent des systèmes racinaires non déformés denses de type en cœur (motte globuleuse) et prospectent plus de 20 m<sup>3</sup> de sol. Le système des hêtres et des chênes dominés (Ht < 35 m et Dia < 40 cm) est comparable mais la prospection est réduite de plus de 50% (10 m<sup>3</sup>). Pour la forêt de Haye (structure régulière) et le Bois du Chapitre (structure irrégulière), la contrainte majeure est l'organisation des différents types d'éléments grossiers (dalles en place à disposition horizontale, plaquettes et/ou cailloux globuleux en place, plaquettes, cailloux globuleux, grèze remaniés...) proches de la surface (avant ou après 40 cm). Par rapport au Beau-Poirier, les volumes de sol prospectés par le hêtre sont réduits de 40 à 70% selon le niveau de la contrainte (4 à 13 m<sup>3</sup>). A dimensions et contraintes équivalentes, le hêtre prospecte 30 à 40% de volume de sol supplémentaire par rapport au chêne en raison d'une augmentation de la surface prospectée. Le hêtre compense donc sa moindre prospection en profondeur par un développement de son système horizontal superficiel.

## CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Cette étude avait pour objectifs d'apporter des éléments d'information sur la réponse du système racinaire du hêtre et du chêne (sessile essentiellement) aux contraintes du sol. Pour ce volet autécologique, deux aspects ont été développés :

- Quel est le développement racinaire du hêtre et du chêne dans une même station ? Le comportement de ces deux espèces est-il comparable ?
- Pour une essence donnée, quel est le développement racinaire dans différentes stations forestières ? La réponse du système racinaire est-elle comparable quelle que soit la contrainte rencontrée ?

Le volet dendrométrique avait pour objectifs d'enrichir les relations allométriques entre les caractéristiques dendrométriques des parties aériennes et des parties souterraines et d'avancer dans la connaissance de l'effet des dimensions des arbres et des structures forestières sur la vulnérabilité aux tempêtes.

L'étude a été menée dans 5 forêts du plateau lorrain (Forêts de Brin et d'Amance, mélange chêne sessile et hêtre) et du plateau calcaire de lorraine (Forêt de Haye : parcelles route Frouard (hêtre pur) et parcelles du Beau-Poirier (hêtres dominants avec quelques chênes sessiles dominés); Bois du Chapitre, mélange chênes et hêtre). Les forêts sont gérées en futaies régulières sauf le Bois du Chapitre traité en irrégulier et présentant une diversité d'essences importante. Les contraintes supposées sont liées à la présence d'argile lourde mal structurée, compacte à mauvais drainage vertical ou à la présence de calcaire à faciès variés (dalle à disposition horizontale plus ou moins superficielle, grèze, plaquettes et cailloux globuleux remaniés ou non). 730 arbres (sains et chablis) et 12 espèces différentes ont été échantillonnés. Le hêtre et les chênes représentent respectivement 43% (n=312) et 24% (n=177) du total. Pour l'étude des relations entre le système racinaire et les paramètres stationnels et dendrométriques mesurés, seuls les chablis « complets » ont été utilisés. Pour le hêtre et le chêne, ces derniers représentent respectivement 35% (n=109) et 26% (n=45) de l'effectif initial disponible.

*Pour les deux espèces*, il apparaît une forte liaison positive entre la hauteur totale l'arbre (Ht) et les hauteurs de base et d'extension maximale des houppiers (Hbh, Heh). La longueur de la grume et la hauteur d'extension maximale du houppier sont d'autant plus grandes que les arbres sont grands. En moyenne, les hêtres chablis sont plus gros et plus hauts que les hêtres sains. Pour les arbres de moins de 25 m, les différences relatives moyennes entre les deux types sont de +11% pour la hauteur totale, +20% pour la hauteur de la base du houppier, +17% pour la hauteur de l'extension maximale du houppier et +28% pour le diamètre. En revanche, pour les chênes, aucune différence significative n'apparaît entre les deux types.

*Toutes stations confondues*, les caractéristiques des mottes apparaissent très différentes entre les deux essences. Les hêtres présentent généralement des mottes plates (74%) alors que pour les chênes, on observe respectivement 56% et 44% de type globuleux et plat. Exceptée l'épaisseur de la motte, toutes les valeurs des autres paramètres quantitatifs sont plus élevées pour le hêtre. 73% des hêtres ont une surface de motte supérieure à 6 m<sup>2</sup> et 96% des chênes une surface inférieure à 6 m<sup>2</sup> ; les surfaces moyennes étant respectivement de 8,3 m<sup>2</sup> et 4,8 m<sup>2</sup>. Pour les volumes de sol prospecté, 53% des hêtres prospectent plus de 10 m<sup>3</sup> alors que seulement 22% des chênes dépassent cette valeur ; les volumes moyens étant respectivement de 11,4 m<sup>3</sup> et 7,5 m<sup>3</sup>. En moyenne, il n'apparaît pas de différences entre les caractéristiques des racines latérales. En revanche, pour les racines verticales des différences sont observables.



Pour 45% des chênes, la plus grosse racine verticale dépasse 50 cm contre seulement 28% pour les hêtres. 40% des hêtres ne présentent aucune grosse racine verticale (> 20 mm) contre seulement 13% pour les chênes. Enfin, 60% des chênes ont entre 1 et 9 grosses racines verticales contre seulement 37% pour le hêtre. En ce qui concerne les racines fines, le hêtre présente une plus forte proportion de densité forte.

*L'enracinement du hêtre réagit plus fortement aux contraintes du sol que celui des chênes.* Un mauvais drainage vertical, une dalle de calcaire en place à faible profondeur... se traduisent par la mise en place d'un système d'autant plus traçant que la ou les contraintes sont fortes (augmentation de la surface du complexe sol-racine) ; le système hors contrainte étant une architecture en cœur très dense associant des racines horizontales et obliques. Ce système est observé dans la parcelle du Beau-Poirier (sol sans contrainte) où les hêtres dominants gérés en futaie régulière prospectent plus de 20 m<sup>3</sup> de sol. Dans ce contexte, les hêtres dominés prospectent moitié moins de sol (10 m<sup>3</sup>) et présentent les mêmes caractéristiques que les chênes de même statut (pas de chênes dominants) (**figure 28**).

Contrairement au chêne sessile, pour les deux forêts du plateau lorrain, le hêtre ne semble pas capable de prospecter les argiles lourdes légèrement hydromorphes présentant entre 60 et 90 cm. Les différences de volumes prospectés sont néanmoins peu importantes (-18%) et ne semblent pas avoir des répercussions fortes sur l'alimentation hydrique (dans le contexte lorrain) et minérale des arbres. En revanche, la stabilité du hêtre apparaît nettement moins bonne que celle du chêne. En terme de gestion, le maintien du hêtre se pose donc dans ce contexte même si écologiquement les deux essences sont tout à fait à leur place. L'organisation des éléments grossiers, leur forme et la profondeur d'apparition modulent nettement l'enracinement des deux essences. Dans le cas d'une hêtraie régulière, la présence de grèze seule ou associée à des cailloux plats ou globuleux généralement remaniés se traduit par une réduction de volume prospecté de 50 à 80% selon la profondeur d'apparition des éléments grossiers et leur recouvrement (comparaison hêtres dominants du Beau-Poirier (sans contrainte) et hêtres de la route de Frouard) (**figure 28**). La présence d'une dalle réduit fortement le volume prospecté et ceci d'autant plus qu'elle apparaît proche de la surface. Pour les deux essences, une dalle à 30 cm se traduit par une réduction de 30 à 40% du volume prospecté (par rapport à une dalle à 60 cm) mais ce dernier reste néanmoins nettement supérieur pour le hêtre par rapport au chêne (+30 à +50%). Ces différences ont des conséquences notables vis-à-vis notamment de l'alimentation hydrique (sol riche chimiquement), surtout pour le chêne plus exigeant quant à la réserve utile en eau du sol dans le contexte mésoclimatique lorrain.

S'il est clair que l'importance des chablis est notamment liée à la structure des peuplements (Dhôte, 2000 ; Armand et Lemarchand, 2001), le lien avec le type de systèmes racinaires (et donc l'essence), le sol et la profondeur d'enracinement l'est encore plus et ne doit pas être oublié par le forestier. Sur un sol très superficiel, même un enracinement à tendance pivotante reste superficiel. Dans notre étude, les conséquences de l'enracinement sur la stabilité différente du hêtre et du chêne ont pu être mises en évidence en forêts d'Amance et de Brin (limon sur argile lourde) où le chêne s'est avéré nettement plus stable. Les limitations et les déformations du système racinaire modifient aussi considérablement les conditions d'alimentation locale en eau, analysée à travers l'estimation du réservoir hydrique (calculée sur la profondeur prospectée). Depuis quelques années, différents travaux ont montré que les arrière-effets des facteurs favorables ou défavorables sont plus importants chez le chêne que chez le hêtre, dont la croissance semble être conditionnée presque totalement par les conditions hydriques de l'année d'élaboration du cerne (Nieminen, 1988 ; Badeau, 1995 ; Granier *et al.*, 1995 ; Lebourgeois, 1999). Des adaptations physiologiques ou anatomiques (architecture hydraulique, régulation stomatique, mobilisation au printemps des réserves

carbonées...) semblent être à l'origine des comportements différents des deux espèces (Bréda 1994 ; Lemoine, 2000). Nos observations suggèrent en outre que la plus grande extension horizontale des racines du hêtre sur sol superficiel pourrait également expliquer ces différences en améliorant le réservoir en eau. Pour le praticien, il n'est bien sûr pas possible de modifier le fonctionnement physiologique des espèces ou le réservoir en eau du sol. En revanche, le gestionnaire peut moduler la structure des peuplements et les régimes d'éclaircies selon les types de stations et de contraintes de façon à « gommer » quelque peu les contrastes naturels entre sites, et à minimiser la compétition pour l'eau lors de périodes à déficits pluviométriques importants.

Les observations de chablis nous ont donc permis d'évaluer le niveau de contrainte représenté par certains caractères du sol pour deux espèces forestières. Confronté à des contraintes de même type le forestier pourra ainsi faire des hypothèses concernant les possibilités d'enracinement de ces espèces, en déduire des conséquences en termes de réservoir en eau disponible et de stabilité, ce qui lui donnera des éléments pour le choix des objectifs. Les matériaux étudiés ne sont en effet pas exceptionnels en Région Lorraine, et les contraintes rencontrées peuvent l'être dans d'autres types de matériaux y compris bien sûr dans d'autres régions. Il est seulement indispensable que le gestionnaire prenne le temps de définir clairement sur le terrain les caractères des sols susceptibles d'influencer les enracinements .

D'autres types de matériaux et de contraintes n'ont pu être pris en compte ici bien que leur étude présente un intérêt certain : nous aurions souhaité comparer également le comportement du chêne et du hêtre sur les sols d'argile lourde dès la surface ou à faible profondeur ; étudier l'enracinement du chêne dans des horizons épais et carbonatés (sols colluviaux plus ou moins riches en éléments grossiers calcaires), etc. La prise en compte d'autres essences dans certains milieux aurait pu également être intéressante : merisier dans des horizons compacts ou plus ou moins hydromorphes, essences de reboisement dans différents contextes, etc. Mais la recherche d'échantillons aurait été sans doute délicate et incompatible avec la rapidité nécessaire pour intervenir avant l'exploitation des chablis sur les parcelles retenues.





## BIBLIOGRAPHIE

- ALDINGER (E.), SEEMANN (D.), KONNERT (V.) - Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurfflächen 1990 in Baden-Württemberg. Mitteilungen Versuchsanstalt Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 38, 1996, p. 11-25.
- ARMAND (G.), LEMARCHAND (F.). – Quels indicateurs de stabilité des hêtraies adultes ? (Résultats d'une étude en Lorraine). - *Forêt-Entreprise*, vol. 139, 2001, pp. 42-45.
- BADEAU (V.). - Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. – Champenoux : INRA, Université de Nancy I Henri Poincaré, 1995. – 280 p. (Thèse de doctorat en Biologie Végétale et Forestière).
- BECKER (M.). - Une étude phyto-écologique sur les plateaux calcaires du Nord-Est (Massif de Haye. 54). Utilisations des correspondances dans la typologie des stations. Relations avec la productivité et la qualité du hêtre et du chêne. - *Annales des Sciences Forestières*, vol. 36, n°2, 1979, pp. 93-124.
- BECKER (M.), LE TACON (F.), TIMBAL (J.) -
- BELGRAND (M.) - Comportement de jeunes plants feuillus (chêne pédonculé, chêne rouge, chêne sessile, hêtre) sur substrat ennoyé. Adaptations racinaires. Application à la mise en valeur forestière des pseudogley. – Champenoux : INRA ; INA Paris-Grignon, 1983. – 188 p. (Thèse de docteur-ingénieur).
- BERGES (L.) – Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relations avec les facteurs écologiques – Nancy : ENGREF, 1998. – 347 p. (Thèse de doctorat en Sciences Forestières).
- BOUCHON (J.) - Etat de la recherche relative aux dégâts forestiers dûs aux tempêtes. *Revue Forestière Française*, XXXIX, 4, 1987, p. 301-312.
- BREDA (N.) - Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. – Champenoux : INRA, Université de Nancy I Henri Poincaré, 1994. – 59 p. + publications (Thèse de doctorat en Biologie Végétale et Forestière).
- COLIN (F.), DANJON (F.), WEHRLÉN (L.) - Etudes racinaires au sein du programme "croissance" de l'INRA (*Quercus petraea* et *Pinus pinaster*). - *Revue Forestière Française*, vol. 47, n° spécial, 1995, pp. 165-172.
- COUTTS (M.P.), NIELSEN (C.C.N.), NICOLL (B.C.) - The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*, 217, 1999, p. 1-15.
- DHOTE (J.F.) - A model of evenaged beech stands productivity with process based interpretations. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 53, 1996, pp. 1-20.
- DHOTE (J.F.) – Composition, structure et résistance des peuplements. In « les écosystèmes forestiers dans les tempêtes ». ECOFOR (eds). J.C. Bergonzini et O. Laroussinie, 2000, 133 pages, 101-116.
- DREXHAGE (M.), CHAUVIERE (M.), COLIN (F.), NIELSEN (C.). - Development of structural root architecture and allometry of *Quercus petraea*. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29, 1999, pp. 600-608.
- DREXHAGE (M.), LEBOURGEOIS (F.), JABIOL (B.), BRUCIAMACCHIE (M.). - La tempête de décembre 1999 : une occasion pour étudier les systèmes racinaires d'arbres adultes. - *Forêt-Entreprise*, 139, 2001, pp. 46-49.

- FIF-ENGREF (2<sup>ème</sup> promotion). – Procès verbal d'aménagement (1994-2009) de la forêt d'établissement public du Bois du Chapitre. ENGREF, 1993, 33 pages + annexes.
- GRANIER (A.), BADEAU (V.), BREDA (N.) - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. - *Revue Forestière Française*, vol. 47, n° spécial, 1995, pp. 59-68.
- GRAF-ENGREF (promotion 1989/90)– Procès verbal d'aménagement (1992-2002) de la forêt d'établissement public de Brin. ENGREF, 1993, 46 pages + annexes.
- KÖSTLER (J.N.), BRÜCKNER (E.), BIBELRIETHER (E.). - Die Wurzeln des Waldbäume. Verlag Paul Parey, Hamburg, Allemagne, 1968 - 284 p.
- LEBOURGEOIS (F.) - Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans le RENECOFOR, Rapport scientifique final, Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, INRA –CEE – Unité d'Ecophysiologie Forestière, 1999, 72 pages.
- LEBOURGEOIS (F.), DREXHAGE (M.), JABIOL (B.), BRUCIAMACCHIE (M.) – Protocole de description des chablis et des systèmes racinaires. Doc interne UMR « Ressources Forêt-Bois », 2001, 6 pages.
- LEMOINE (D). - Fonctionnement hydrique du hêtre : architecture hydraulique et sensibilité à la cavitation. – Champenoux : INRA, Université de Nancy I Henri Poincaré, 2000. – 77 p. + publications (Thèse de doctorat en Biologie Végétale et Forestière).
- LEVY (G.), BECKER (M.), GARREAU (B.). – Comportement expérimental de semis de Chêne pédonculé, Chêne sessile et Hêtre en présence d'une nappe d'eau dans le sol. – *Annales des Sciences Forestières*, vol. 43, n°2, 1986, pp. 131-146.
- LEVY (G.), LEFEVRE (Y.), BECKER (M.), FROCHOT (H.), PICARD (J.F.), WAGNER (P.A). – Les excès d'eau : influence sur la croissance des chênes. - *Revue Forestière Française*, vol. 51, n°2, 1999, pp. 151-161.
- LUCOT (E.). - Influence des caractéristiques de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique des arbres. Application à l'estimation de la valeur des sols forestiers. Thèse de l'université de Franche-Comté, 1994, 101 p.
- LUCOT (E.), GAIFFE (M.). - Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. - *Etude et Gestion des Sols*, vol. 2, n°2, 1995, pp. 91-104.
- NIEMINEN (T.). - Etude dendroécologique du chêne (pédonculé et sessile) et du hêtre dans une forêt de la plaine lorraine. . – Champenoux : INRA, Université de Nancy I, 1988. – 40 p. (DEA de Biologie Végétale et Forestière).
- SCHMIDT-HAAS (P.), BACHOFEN (M.). - Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. Schw. Zeitschrift f. d. Forstwesen, 142, 6, 1991, p. 477-504.
- THIMONIER (A.). – Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990. Rôle possible des apports atmosphériques. Thèse de l'université de Paris-Sud Orsay, 1994, 177 p.

<b>PUBLICATIONS RELATIVES AU PROJET</b>
---

- DE REINACH (M.), - Chablis et peuplements irréguliers feuillus. Analyse statistique et spatiale du phénomène sur le réseau AFI. *Mémoire Mastère Sciences Forestières*, septembre 2001, 48 pages + annexes.
- DREXHAGE (M.), BRUCIAMACCHIE (M.), LEBOURGEOIS (F.), JABIOL (B.), COLIN (F.) - Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Application à l'évaluation de la stabilité et aux bilans carbonés. Projet ECOFOR n° 2000-42, *Rapport Scientifique Intermédiaire*, décembre 2000, 17 p.
- DREXHAGE (M.), LEBOURGEOIS (F.), JABIOL (B.), BRUCIAMACCHIE (M.). - La tempête de décembre 1999 : une occasion pour étudier les systèmes racinaires d'arbres adultes. - *Forêt-Entreprise*, 139, 2001, pp. 46-49.
- LEBOURGEOIS (F.), DREXHAGE (M.), JABIOL (B.), BRUCIAMACCHIE (M.) – Protocole de description des chablis et des systèmes racinaires. Doc interne UMR « Ressources Forêt-Bois », 2001, 6 pages.
- LEBOURGEOIS (F.), JABIOL (B.) - Enracinements comparés du chêne sessile et pédonculé et du hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. – *Revue Forestière Française*, vol. LIV, n°1, 2002, pp. 17-42.
- PERIGNON (L.), - Etude des caractéristiques des arbres chablis. *Rapport de BTS Gestion Forestière*, juin 2001, 33 pages + annexes.





# ENRACINEMENTS COMPARES DU CHENE ET DU HETRE SUR DIFFERENTS MATERIAUX

F. Lebourgeois et B. Jabiol

LERFOB, UMR INRA-ENGREF 1092, Unité Ecosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage, CS 4216, 54 042, Nancy cedex  
e-mail : lebourgeois@engref.fr ; jabiol@engref.fr

## 1. Contexte et objectifs

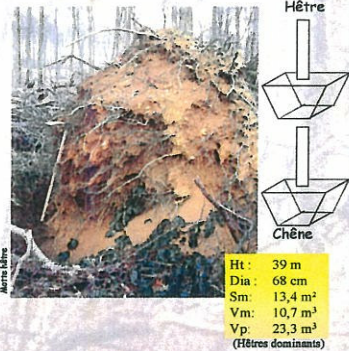
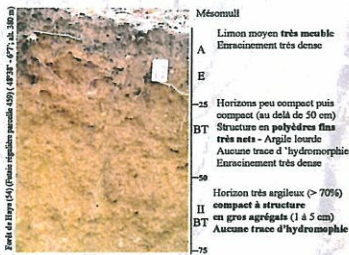
Suite à la tempête de décembre 1999, une étude a été menée afin de comparer la réponse du système racinaire du chêne (sessile essentiellement) et du hêtre aux contraintes du sol. Les conséquences des modifications du système racinaire sont importantes car en dépendent la profondeur prospectée et donc à la fois le réservoir en eau (d'où, en partie, la potentialité de la station), et la stabilité des arbres [1]. Un pronostic sur le développement racinaire est donc primordial pour le gestionnaire forestier lorsqu'il définit des objectifs à long terme sur une parcelle forestière.

## 2. Echantillonnage

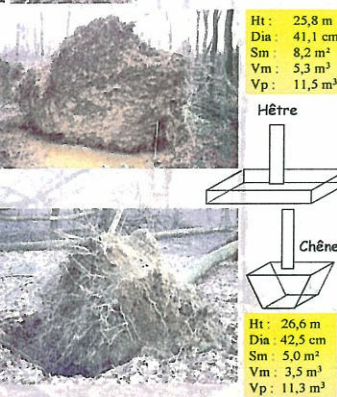
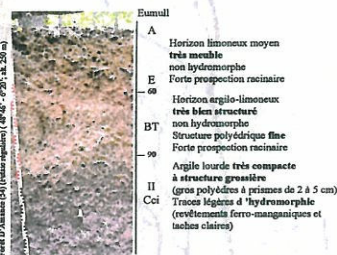
L'étude a été menée dans six hêtraies ou chênaies-hêtraies adultes dans le quart nord-est de la France (à proximité de Nancy). Cinq sont gérées en futaie régulière et une, sur calcaire, est traitée en irrégulier et présente une diversité d'essences plus importante. Des mesures relatives aux parties aériennes (diamètre, hauteur totale...) et aux parties souterraines visibles sur la motte (complexe sol-racine des arbres déracinés) ont été réalisées sur 109 hêtres et 45 chênes.

### 4 stations observées en Lorraine

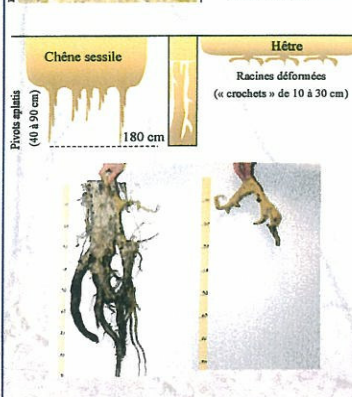
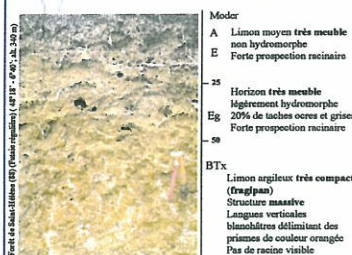
#### Néoluvisol issu de limons et argile de décarbonatation



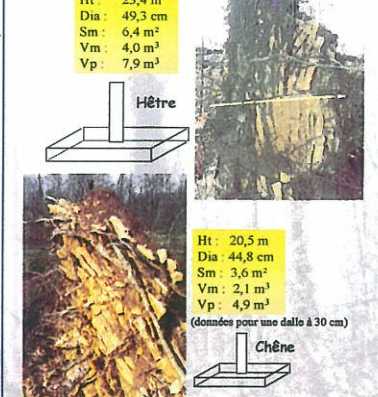
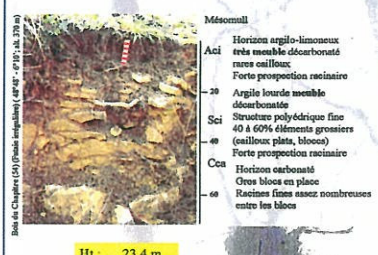
#### Brunisol mésosaturé de limon sur marne



#### Néoluvisol fragique de limon



#### Calsisol de calcaire récifal



#### Contrainte : aucune pour les deux espèces

L'argile lourde compacte est bien structurée et bien drainée et donc parfaitement prospectée par les deux espèces jusqu'à 1m70 au moins. Les hêtres dominants prospectent plus de 20 m<sup>3</sup>.

#### Contrainte : l'argile lourde mal drainée est une contrainte absolue pour le hêtre, nulle pour le chêne

le hêtre compense ce manque de profondeur par une extension latérale considérable : les volumes prospectés sont comparables (11-12 m<sup>3</sup>) mais la stabilité du hêtre plus faible.

#### Contrainte : le fragipan est une contrainte absolue pour le hêtre, relative pour le chêne

Le chêne développe des pivots puissants dans les gloses mais aucune racine fine à l'intérieur des prismes. Le hêtre compense partiellement par une extension latérale plus forte mais son volume prospecté reste plus faible de 50%. Sa stabilité est réduite et le réservoir en eau plus faible.

#### Contrainte : la contrainte « dalle horizontale » est très forte pour les deux espèces

Cependant, l'extension latérale du hêtre étant deux fois supérieure, il dispose d'un volume prospecté et donc d'un réservoir en eau une fois et demi supérieurs.

L'enracinement du hêtre apparaît nettement plus sensible aux contraintes du sol que celui du chêne. A niveau de contrainte équivalente, le hêtre compense à chaque fois un manque de prospection en profondeur par la mise en place d'un système d'autant plus traçant que la ou les contraintes sont fortes.

Ces modifications ont des conséquences importantes sur l'évaluation des réservoirs hydriques et sur la stabilité des arbres [2].

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Lebourgeois (F.), Jabiol (B.). - Enracinements comparés du chêne sessile, du chêne pédonculé et du hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, Vol. 54, n°1, pp. 17-42.  
[2]. Lebourgeois (F.), Archevêque (G.), Brucliacmacchie (M.), Colin (F.), Drexhage (M.), Jabiol (B.). - Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Rapport Scientifique Final, Projet FORBOIS 1420 A. - Nancy : ENGREF-LERFOB, Juin 2002, 72 p.

Cette étude a été soutenue financièrement par la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF) du Ministère de l'Agriculture et de la Région Lorraine

Ht : Hauteur totale en m  
Dia : Diamètre à 1,30 m en cm  
Sm : Surface des molettes (en m<sup>2</sup>)  
Vm : Volume des molettes (en m<sup>3</sup>)  
Vp : Volume de sol prospecté (en m<sup>3</sup>)  
(dimension des molettes = extension horizontale et verticale maximale des racines)

