

Étude architecturale de deux hêtraies vosgiennes¹

Fabienne HORY, Catherine MULLER et J.-Michel N. WALTER*

INTRODUCTION

La structure forestière est définie comme l'organisation spatiale, temporelle et spécifique de la forêt. Les forestiers emploient ce terme, de façon plus restrictive, pour désigner la distribution du nombre d'arbres en classes de diamètres et de hauteurs selon les espèces. L'architecture est une approche morphologique et dynamique de la structure. Elle repose sur l'étude de la forme et du développement des arbres, qui constituent la charpente de la forêt. La perception architecturale de la forêt est fondée sur un mode hiérarchique d'analyse, qui va de l'organe-feuille, fleur, bourgeon, rameau, tige- jusqu'au paysage formé d'une mosaïque de communautés, d'organisation floristique, morphologique et dynamique variée (Oldeman 1990).

Malgré le nombre imposant d'études consacrées aux hêtraies d'Europe moyenne (Ellenberg 1982), notamment en forêt de Fontainebleau (Lemée *et al.* 1986), il existe peu d'analyses architecturales réalisées selon une méthode rigoureuse dans les forêts tempérées naturelles d'Europe (Hoff 1978, Walter 1982, Mayer 1984) ou des États-Unis (Oldeman, in Hallé *et al.* 1978, Oosterhuis *et al.* 1982, Kuiper 1988). Cette méthode permet de représenter de façon réaliste, par un dessin à l'échelle, l'architecture de la forêt comme une image instantanée de sa structure pour en interpréter son évolution temporelle. Nous avons choisi d'étudier deux hêtraies « naturelles » de la forêt communale d'Aubure dans le Haut-Rhin, à 60 km au Sud-Ouest de Strasbourg. Cette analyse consiste en un « état des lieux », susceptible d'un suivi à long terme afin de comprendre l'évolution spontanée d'une forêt soustraite aux interventions sylvicoles ou, au contraire, pour servir à l'élaboration de nouvelles méthodes de gestion, selon des objectifs définis.

L'attention a été attirée sur la forêt communale d'Aubure au début des années 80, en raison de l'observation d'un phénomène de dépérissement qui a alerté les scienti-

¹ Ce travail a fait l'objet d'un Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique (Hory et Muller 1996) à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg

* Université Louis Pasteur — Laboratoire de Botanique et Écologie Végétale
Centre d'Études et de Recherches Éco-Géographiques URA 95-CNRS
28, Rue Goethe - 67000 Strasbourg

fiques, l'opinion publique et les responsables gestionnaires. Cet état touche particulièrement les épicéas, les sapins et les hêtres. Les causes ont été recherchées et sont supposées multiples : climatiques, édaphiques, biotiques et anthropiques (Bonneau et Landmann 1988). Elles ont été identifiées grâce au programme national DEFORPA (Dépérissement des FORêts attribué à la Pollution Atmosphérique), mis en place dès 1985. Ce programme repose sur le travail pluridisciplinaire de nombreuses équipes de recherches et de gestion, qui étudient le système complexe sol-forêt-atmosphère. Des investigations hydro-climatologiques, géochimiques, pédologiques, chimiques, biologiques, sylvicoles et écologiques menées depuis plus de dix ans ont fait l'objet d'innombrables publications et colloques.

Dans ce contexte, l'analyse architecturale des peuplements permettra une meilleure compréhension de leur dynamique et de ses conséquences sur le régime des eaux et du climat dans le massif. Celui-ci fait partie du bassin versant du Strengbach, ruisseau alimentant en eau potable les collectivités locales. Divers types de peuplements sont présents : des pessières, des pineraies, des hêtraies-sapinières et des hêtraies. Si notre attention a été portée tout particulièrement sur les hêtraies, c'est qu'elles font partie des rares surfaces forestières du massif à avoir été affectées depuis des siècles au seul usage du maintien de la forêt, même si leur structure actuelle est quelque peu artificielle. Elles présentent donc, du fait de leur caractère relictuel, un intérêt spécial en tant qu'écosystème originel pour l'étude de la dynamique forestière et pour la préservation de la biodiversité régionale. La présentation du site d'étude et de la méthode sera suivie de l'analyse et de l'interprétation des profils architecturaux réalisés.

SITE D'ETUDES

Le bassin versant du Strengbach appartient à une région montagnarde tempérée située entre 883 m et 1146 m d'altitude (48°12'56" N, 7°12'08" E). De façon générale, l'influence océanique du climat humide et frais à 1000 m d'altitude se traduit par des précipitations moyennes annuelles de 1345 mm (amplitude : 1069–1653 mm) sur la période de 1987–1995 (communication personnelle de Viville, 1996). La température moyenne annuelle a été durant la même période de 5,5°C, avec des moyennes de Juillet de 14°C et des moyennes de Janvier de -1,5°C (com. pers. de Viville, 1996). Les gelées peuvent survenir du 15 Septembre au 15 Juin. La période végétative est donc courte. Des vents d'Ouest, du Nord et des vents locaux influencent le développement de la végétation de façon parfois traumatique (arbres décapités, chablis).

Le bassin du Strengbach appartient aux Vosges cristallines. Le soubassement rocheux est essentiellement le granite à biotite et muscovite du Brézouard. Sur la crête Nordaffleure une série gneissique et le fond du vallon supporte du grès vosgien. Le granite est très pauvre en oxydes de fer, contrairement au gneiss, qui est aussi plus riche en magnésium, en sillimanite et en biotite, lui conférant une teinte rougeâtre par altération. Situé à l'extrémité Est du Brézouard, le bassin possède un relief accentué entre les sommets anciens arrondis, caractéristiques des Hautes-Vosges alsaciennes. Le ruisseau du Strengbach occupe une profonde entaille d'origine tectonique, remaniée par les phénomènes périglaciaires. Au cours de la dernière période du Quaternaire (Würm), la neige s'était accumulée sur la partie sommitale du versant Sud, protégeant celle-ci de l'action du gel. Ailleurs sur le versant Sud, le substrat a évolué par gélifraction. Sur le versant Nord, le substrat était gelé en permanence, mais au cours du temps, la gélifraction a mis en place des éléments fins sur l'ensemble du versant. Les formations superficielles sur les deux versants sont de faible épaisseur, moins de 4 m au Nord, et 10 m au maximum au Sud. Leur texture est plus grossière sur ce versant,

alors que sur le versant Nord, le gneiss fournit des éléments plus fins contenant jusqu'à 20 % d'argile. Les sols y sont particulièrement humides, avec des zones de saturation marquées, donnant naissance à la source du Strengbach. Les bas de pente bénéficient d'apports de matériaux solubles et insolubles, transportés le long des versants par colluvionnement, donnant naissance à des sols bruns colluviaux à mull acide (pH de 4,5). La profondeur du sol meuble est de 61 cm en moyenne sur 60 sondages à la tarière, avec une fourchette de 25-120 cm. Telle est la situation de la parcelle 23 sur gneiss, où est localisée la hêtraie sur flanc Sud. Ailleurs, sur granite, les sols sont de type ocre podzolique ou podzolique, à humus de type moder (pH de 3,7), comme on peut l'observer sous la hêtraie de la parcelle 16 sur flanc Nord. La profondeur du sol meuble y varie de 25-95 cm, avec une moyenne de 52 cm sur 50 sondages. À cette altitude, la formation d'un humus de type mor sur podzol, n'est pas exceptionnelle (Asaël 1990 ; Biron 1994).

La végétation vosgienne caractéristique de l'étage montagnard moyen est représentée par la hêtraie-sapinière jusqu'à 950 m, relayée par la hêtraie d'altitude au-delà de 1000 m, avec leurs cortèges d'espèces de sous-bois. La pineraie sur grès, peu représentée dans le massif, caractérise certains versants Ouest. La flore de la strate herbacée comprend des espèces du domaine eurasiatique : *Athyrium filix-femina*, *Deschampsia flexuosa*, *Milium effusum*, *Anemone nemorosa*, *Oxalis acetosella*. Le caractère montagnard en est souligné par la présence de *Polygonatum verticillatum*, *Solidago virga-aurea*, *Prenanthes purpurea*, *Vaccinium myrtillus*, *Cicerbita plumieri*. On constate également la présence d'espèces liées au domaine subatlantique comme *Senecio fuchsii*, *Asperula odorata*, *Blechnum spicant*, *Galium hercynicum*. Plusieurs espèces sont acidophiles et typiques du moder : *Luzula albidula*, *L. sylvatica*, *Deschampsia flexuosa*, *Vaccinium myrtillus*, *Dryopteris austriaca*. Sur les sols plus riches se développent des espèces du mull, comme *Festuca altissima*, *Milium effusum* et *Asperula odorata*.

Les monocultures de résineux sont majoritaires sur l'ensemble de la forêt. Leur réintroduction au début du XIX^{ème} siècle sur les pâturages abandonnés, suite à l'exode rural, a été systématiquement favorisée par les forestiers au détriment des feuillus (Office National des Forêts, Révision d'Aménagement de la Forêt Communale d'Aubure 1978-1997). La hêtraie exposée au Sud (parcelle 23), à 1000 m d'altitude, est âgée de 160 ans, celle exposée au Nord (parcelle 16), à 1050 m, est âgée de 120 ans, sur des pentes respectivement de 16° et 11°. Ces parcelles, selon l'aménagement actuel de 1978-1997 (ibidem), représentent des futaies régulières, traitées par la méthode du groupe de régénération strict, avec un âge d'exploitation de 120 ans. L'avenir de ces hêtraies, selon le nouveau plan d'aménagement en cours de rédaction, tient compte des préoccupations actuelles en matière de protection de la nature et de l'environnement et de gestion de la biodiversité.

METHODES

La méthode architecturale est basée sur la construction de transects représentés par le profil vertical et par la projection des houppiers et la position des troncs. En élévation verticale, les arbres sont dessinés à l'échelle, avec leur forme individuelle, en respectant leur position réelle dans le peuplement. Il est ainsi possible de visualiser les principales branches, la position de la plus basse branche vivante ou de la fourche, la forme et l'extension des houppiers. Les relations de voisinage des individus apparaîtront clairement sur le dessin architectural. Les potentialités de régénération pourront être détaillées localement, le cas échéant, suivant un échantillonnage approprié. La

position des souches, des arbres morts, est soigneusement indiquée, de même que celle des affleurements rocheux et autres accidents du terrain. L'approche architecturale est à la fois qualitative, car elle s'appuie sur la forme observée et dessinée des arbres, et quantitative, car elle repose sur des mesures dendrométriques, habituellement pratiquées par les forestiers (Oldeman 1979).

Les sites ont été choisis en fonction d'une connaissance préalable du terrain selon des critères de naturalité et de maturité dans la croissance et le développement. La première étape du travail de terrain a consisté à tracer une ligne de base dans une direction donnée et à délimiter une surface rectangulaire, le transect, à l'aide de piquets en bois numérotés. L'un, dans la parcelle 23 (Sud), couvre 1500 m². Il est formé d'une grille de 15 carrés contigus, ou quadrats, ayant chacun 10 m de côté, maille d'échantillonnage très utilisée en forêt. Il forme une unité de 70 sur 20 m, plus un quadrat contigu supplémentaire. L'autre, dans la parcelle 16 (Nord), d'une surface de 1200 m², est représenté par une grille de 12 quadrats de 10 m de côté, soit une placette de 40 sur 30 m. Les quadrats sont matérialisés, le temps d'un relevé, par des rubans de balisage.

Au cours de la deuxième étape, chaque ligneux dont le diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m), est supérieur à 5 cm, a été localisé au dm près par ses coordonnées cartésiennes à l'aide d'un double-décamètre. Le système d'axes défini par la ligne de base et une perpendiculaire à son origine a servi de repère. Chaque arbre a été identifié par le nom du genre, de l'espèce et numéroté suivant son ordre d'apparition dans les quadrats. La circonférence, plus facile à mesurer que le diamètre à l'aide d'un simple ruban métrique de 3 m, a été relevée pour chaque individu, au cm près. La hauteur totale des arbres, la hauteur de la première branche vivante ou de la fourche, ainsi que la hauteur de la branche la plus étendue sur l'horizontale, ont été mesurées à l'aide d'un dendromètre Blume-Leiss, avec une précision variable, de l'ordre du m. Ces mesures de hauteur ont été répétées trois fois par le même observateur à des emplacements différents afin de corriger des erreurs, notamment sur la localisation du sommet des houppiers des arbres. La cartographie des houppiers a été réalisée par visées de l'extrémité des branches à l'aplomb d'un observateur, dans les quatre directions cardinales, et rapportées jusqu'au pied de l'arbre. Une cinquième observation de l'extension maximum du houppier, dans une direction pour laquelle la boussole a été utilisée, a complété les mesures.

La dernière étape du levé de terrain comprend le dessin architectural des arbres réalisé par l'observateur positionné le long de la ligne de base en faisant face au transect, toujours dans la même direction. Ce dessin tracé sur papier millimétré à l'échelle tient compte des mensurations effectuées précédemment. La morphologie de chaque arbre inventorié est reproduite fidèlement, en notant tous les repères architecturaux : inclinaison ou courbure du tronc, présence de fourche, branches maîtresses, secondaires ou mortes, etc., tout indice morphologique susceptible d'une interprétation en termes de croissance et de développement. Il s'agit donc d'un dessin plus élaboré que la simple représentation d'une silhouette d'arbre. Ces éléments graphiques sont repris au laboratoire pour élaborer le profil architectural avec, d'abord, les arbres au premier plan le long de la ligne de base, puis ceux du deuxième plan, enfin ceux du fond. L'aspect tridimensionnel de la forêt est ainsi restitué.

Le relevé de la végétation a été complété par des sondages du tronc des arbres les plus gros de chaque espèce à la tarière de Pressler, pour mesurer les accroissements ligneux dans la perspective d'une étude dendrochronologique future. L'analyse floristique de la strate au sol complète le relevé architectural. Elle repose sur la métho-

de phytosociologique de Braun-Blanquet. Un levé topographique réalisé à l'aide d'un clinomètre, d'un double-décamètre et de trois jalons de 2 m de long, met en évidence la pente et les accidents du terrain. La ligne de base des deux profils architecturaux suit la ligne de plus grande pente des versants.

RESULTATS

Description des peuplements

Hêtraie du versant Sud (parcelle 23).— Quatre espèces ligneuses sont représentées : le hêtre, le sapin, l'érable sycomore, l'épicéa. La densité des tiges est de 247 arbres ha^{-1} dans la placette. Le hêtre représente 59 %, le sapin 20 %, l'érable 14 % et l'épicéa 7 % du nombre total des tiges. La distribution des diamètres des tiges, non analysée ici, est bimodale, ce qui suggère une régénération en deux vagues successives. La taille de l'échantillon est cependant très insuffisante pour pouvoir extrapoler ces résultats au peuplement. La surface terrière dans la placette est de 36 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$. Huit troncs morts ont été la plupart identifiés comme des sapins. L'élimination du sapin, peut-être exacerbée par le forestier dans ce milieu exposé au rayonnement intense du versant Sud, semble naturelle face au haut pouvoir compétitif du hêtre. Cette hêtraie passe progressivement à la hêtraie-sapinière typique, à mesure que l'on monte sur le versant Sud-Est, où le sapin retrouve sa place. Les hêtres ont une hauteur moyenne de 28 m, le plus grand ayant 34 m, le plus petit 18 m. Les érables sycomores forment un groupe bien délimité au bas du profil, dont un individu remarquable de 38 m émerge de la voûte, où il a cicatrisé une ancienne trouée. Les rares épicéas dominés du peuplement semblent mal tolérer la lumière fort tamisée du sous-bois. Ils bénéficient cependant d'un appoint d'éclairage latéral l'après-midi, à partir d'un chablis proche formé en 1990. Ce dernier est en voie de régénération naturelle et par plantations. Les hêtres de la placette les plus exposés en bordure de ce chablis souffrent du « coup de soleil » sur leurs écorces et sont conduits à une mort prochaine. L'architecture de la voûte est homogène, avec des houppiers vigoureux sur des troncs relativement puissants. L'ombrage fourni par la voûte est tel que le sol n'est que faiblement couvert de plantes herbacées, sauf sur le côté Ouest où pénètre la lumière du chablis et par où progresse la régénération. Le Tableau 1 donne un aperçu floristique de la parcelle.

Hêtraie du versant Nord (parcelle 16).— La densité des arbres est plus forte que dans la placette précédente : 583 tiges ha^{-1} . Seules deux espèces ligneuses sont recensées, le hêtre à raison de 95 % des individus et le sapin 5 %. La distribution des diamètres des tiges, non représentée ici, est unimodale symétrique. Elle est le fait, apparemment, d'une régénération unique, mais l'échantillon du transect est beaucoup trop limité pour une interprétation irréfutable. La surface terrière dans la placette est de 42 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$. Les sapins sont dominés. Leur hauteur varie de 7 à 23 m. Ils semblent, à l'altitude de 1050 m et dans les conditions de forte ventilation sous la crête, n'être que peu compétitifs avec le hêtre. Les hêtres ont une hauteur moyenne de 22 m, avec une fourchette de 11 m à 30 m. La répartition spatiale des individus est régulière et le développement des houppiers homogène. Ceux-ci s'accroissent plus en hauteur qu'en largeur, contrairement à la placette du versant Sud. Les troncs ont une allure effilée et droite. Ces caractéristiques sont liées à la densité plus élevée du peuplement. Le sous-étage est inexistant, mais deux petites trouées, probablement issues d'éclaircies, apportent suffisamment de lumière pour permettre le développement d'une importante strate herbacée, relativement riche en fougères (Tableau 1). Cette couverture

herbacée entre en compétition avec les semis d'arbres et freine la régénération qui n'est que diffuse ou très localisée.

Analyse architecturale

Tableau 1. Relevés phytosociologiques de la parcelle 23 (n° 1, 2, 3) et de la parcelle 16 (n°4).				
Relevés n°	1	2	3	4
Altitude, m	1050	1050	1050	1100
Pente, deg.	16	16	16	11
Exposition	SSE	SSE	SSE	NNW
Humus	mull	mull	mull	moder
Surface, m2	300	300	300	1200
STRATE ARBORESCENTE				
Recouvrement, %	85	80	70	75
Hauteur, m	30	30	30	21
<i>Fagus sylvatica</i> L.	4	4	4	5
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	3	4	-	-
<i>Abies alba</i> Mill.	1	+	(+)	3
<i>Picea excelsa</i> Link.	-	-	+	+
STRATE ARBUSTIVE				
Recouvrement, %	0	5	50	1
Hauteur, m	0	1	1	1
<i>Fagus sylvatica</i> L.	-	1	3	-
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	-	+	-	-
<i>Abies alba</i> Mill.	-	-	-	+
STRATE HERBACEE				
Recouvrement, %	15	75	80	85
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	1	2	+	-
<i>Prenanthes purpurea</i> L.	+	1	+	+
<i>Asperula odorata</i> L.	+	+	-	-
<i>Oxalis acetosella</i> L.	+	+	3	1
<i>Festuca altissima</i> All.	1	4	-	-
<i>Luzula albida</i> DC.	+	2	2	2
<i>Dryopteris austriaca</i> (Jacq.) Woyen.	+	2	1	3
<i>Senecio fuchsii</i> C. Gmell.	+	+	+	-

<i>Anemone nemorosa</i> L.	+	-	-	-
<i>Rubus idaeus</i> L.	+	3	3	+
<i>Athyrium filix femina</i> (L.) Triw.	-	2	+	-
<i>Milium effusum</i> L.	-	1	1	-
<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Triw.	-	+	1	3
<i>Poa nemoralis</i> L.	+	+	1	-
<i>Melampyrum silvaticum</i> L.	-	+	+	-
<i>Rubus caesius</i> L.				
<i>Polygonatum verticillatum</i> (L.) All.	-	-	2	1
<i>Carex silvatica</i> Huds.	-	-	+	-
<i>Digitalis purpurea</i> L.	-	-	+	+
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	-	-	+	3
<i>Luzula silvatica</i> Gaud.	-	-	-	3
<i>Galium hercynicum</i> Weig.	-	-	-	+
<i>Blechnum spicant</i> (L.) Roth.	-	-	-	+
<i>Solidago virga-aurea</i> L.	-	-	-	+
<i>Illex aquifolium</i> L.	-	-	-	+
<i>Acer pseudoplatanus</i> (semis)	1	3	4	+
<i>Fagus sylvatica</i> (semis)	1	2	4	3
<i>Picea excelsa</i> (semis)	-	-	1	2
<i>Sorbus aucuparia</i> (semis)	-	-	+	2

d'après Issler *et al.* (1965), Oberdorfer (1979) et Rameau *et al.* (1993).

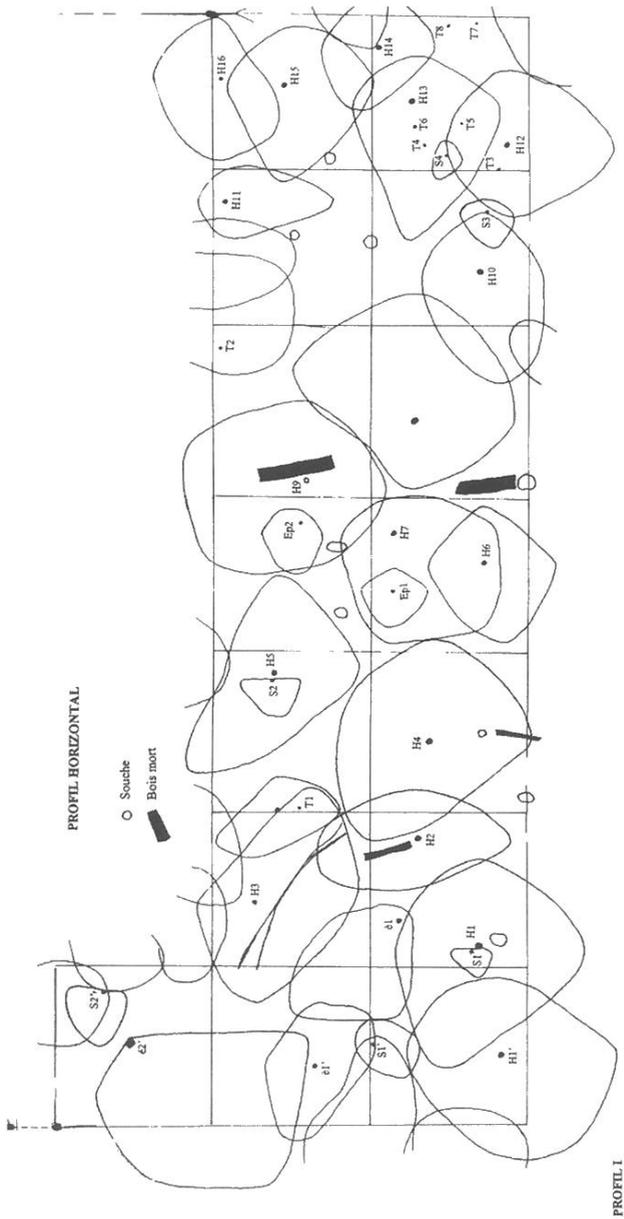
Profil de la voûte et forme des houppiers.— La surface de la voûte par rapport à la pente du terrain peut présenter un profil en marches d'escalier, appelé « imbrication forestière » (Hallé *et al.* 1978). Cette disposition est d'autant plus accentuée que la pente est plus raide. C'est ce qui est observé sur la Figure 1, I : la moitié gauche du profil de la hêtraie au Sud semble plonger sous la moitié plus élevée à droite. Sur la Figure 2, I (transects A–B), la hêtraie au Nord ne présente pas cette imbrication forestière, du fait d'une pente trop faible pour être perceptible. L'imbrication sur pente favorise la pénétration latérale de lumière dans le sous-bois, et donc le développement des régénérations (650 m² dans la placette de la parcelle 23). Elle stimule aussi l'apparition de nombreuses branches basses. Par exemple, dans la parcelle 23, les individus H1, H5et H10, profitant de cet éclaircissement, ont développé des branches basses étendues. Associée à cette imbrication, la forme des houppiers est distinctement asymétrique, la majeure partie étant déjetée vers le bas de la pente. Ceci n'est pas sans conséquences sur la croissance ligneuse et sur la stabilité mécanique de l'arbre, le rendant plus vulnérable au vent. Dans la parcelle 16, au contraire, les houppiers sont peu étendus latéralement et de forme ovoïde. Certains arbres ont poussé dans une « cheminée écologique », trouée suffisamment étroite pour contraindre la croissance de l'arbre en faible éclaircissement (Hallé *et al.* 1978). La lumière provient du zénith et est diffusée par la voûte céleste. Un bel exemple de plasticité morphologique de feuillu liée à la croissance en cheminée écologique est fourni sur la parcelle 23 par le grand érable é2'. Son tronc, d'abord développé en bordure de la trouée, s'est ensuite élan-cé droit à la verticale pour finalement cicatriser la trouée. Dans la parcelle 16, il semble que l'aspect élan-cé des houppiers soit le résultat plus de la compétition entre voisins que d'une croissance en cheminée écologique.

Les profils architecturaux montrent deux espaces verticaux superposés : l'un, ouvert, formé de troncs et l'autre, dense, constitué de houppiers. La limite entre ces deux espaces est une surface fictive, une interface plus ou moins régulière, dont la position en hauteur sera considérée plus loin. Dans la hêtraie au Nord, cette surface est assez régulière, ce qui est en accord avec une forte compétition et un éclaircissement homogène, essentiellement diffus en raison de l'exposition. Dans la hêtraie au Sud, la surface est plus irrégulière, reflétant une structure plus hétérogène et surtout l'influence de la pente. Les arbres possédant une fourche basse (par exemple H1, H8, H12) ont bénéficié lors de leur développement de conditions de croissance supra-optimales — libération de la compétition à la suite de coupe d'arbres proches ou apport d'un supplément de lumière.

Cartographie des houppiers.— Les projections des houppiers sur l'horizontale montrent des différences très nettes entre les deux hêtraies. Les houppiers sont bien dimensionnés dans la parcelle 23 (Figure 1, II), où leur surface planimétrée moyenne est de 53 m². Ceux de la parcelle 16 (Figure 2, II) sont plus jointifs et ramassés, avec une surface moyenne planimétrée de 20 m². Si l'on rapporte la surface totale planimétrée des houppiers à la surface de référence au sol, on obtient un « indice de projection des cimes ». Il vaut 1 pour la hêtraie au Sud et 0,95 pour la hêtraie au Nord, qui paraît ainsi plus ouverte. Cependant, ces valeurs sont bien éloignées de celles trouvées par Lemée (1987) en Forêt de Fontainebleau où l'indice de projection des cimes est de 2,3. Cette différence peut s'expliquer par l'absence d'hétérogénéité verticale dans les deux hêtraies vosgiennes, qui est le résultat de la gestion en futaie régulière. Comparées avec une structure naturelle caractéristique des hêtraies de la Réserve de la Tillaie en Forêt de Fontainebleau, les deux hêtraies vosgiennes ne présentent quasiment pas de superpositions de houppiers.

La structure du peuplement ligneux en forêt aménagée est en grande partie déterminée par le sylviculteur. Les arbres parvenus à leur limite d'exploitabilité et ceux subissant des attaques parasitaires sont coupés, laissant des vides dans la voûte. Des coups de vent trop violents peuvent également être à l'origine d'un chablis. Les trouées ainsi formées sont le siège d'une dynamique active de cicatrization, à laquelle contribuent inégalement les arbres périphériques, par extension latérale de houppiers libérés (H2, H3, H5 dans la parcelle 23 et H34, H37, H42, H45–H47, dans la parcelle 16) et par le développement de semis issus des graines déjà présentes ou arrivées postérieurement à l'ouverture. Ces processus donnent naissance à une disposition des individus en couronne, bien reconnaissable sur le plan de la projection des houppiers (par exemple, la trouée centrée sur les coordonnées $x = 30$ m, $y = 10$ m (Figure 2, II). La hêtraie de la parcelle 23 possède une trouée de 650 m², soit 43 % de la surface totale de la placette, le restant de la surface étant très fermé. Dans la parcelle 16, seulement 8 % de la surface totale de la placette est en trouée, sur environ 100 m², mais mieux répartie sur l'ensemble du peuplement, donnant visuellement une impression de plus grande ouverture.

Dans les trouées, les nouvelles générations d'arbres apparaissent sous forme de taches de semis plus ou moins développés. Le chablis de 1990 a favorisé dans la parcelle 23 l'expansion en dôme de semis préexistants, provenant en majorité d'espèces tolérantes à l'ombre : le hêtre (70 % de recouvrement) et l'érable sycomore (20 %), le reste étant occupé par des ronces. Dans la parcelle 16, la végétation réagit différemment à l'ouverture de la voûte. Les arbres étant plus serrés, la disparition d'un arbre n'ouvre pas une grande surface. De plus, la faible pente et l'orientation vers le Nord restreignent la pénétration de la lumière, qui est massivement filtrée par le feuillage et surtout diffuse. Les semis de hêtre sont localisés sous le cercle des arbres bordant la trouée. La partie centrale est couverte d'un tapis de luzules. Dans les deux hêtraies

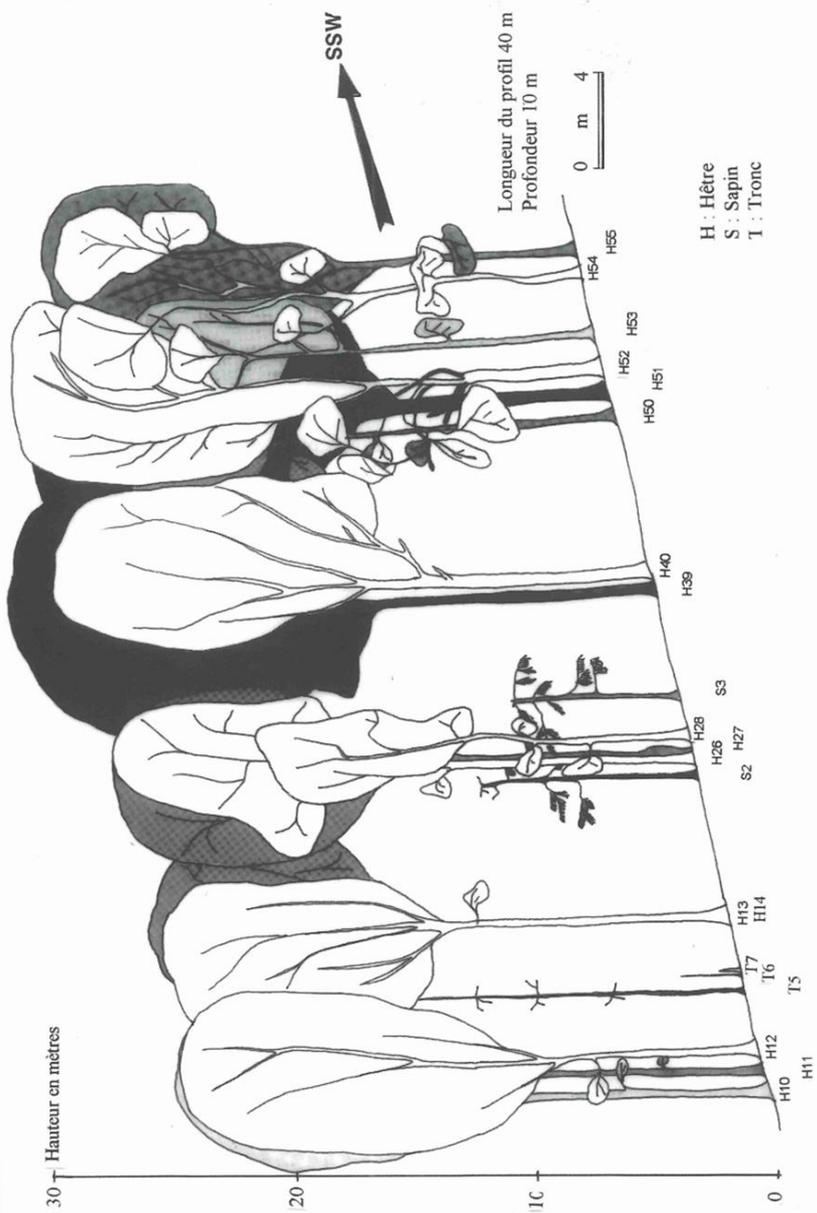


I. — Transect A HÊTRAIE D'ALTITUDE (NORD) — FORÊT COMMUNALE D'AUBURE

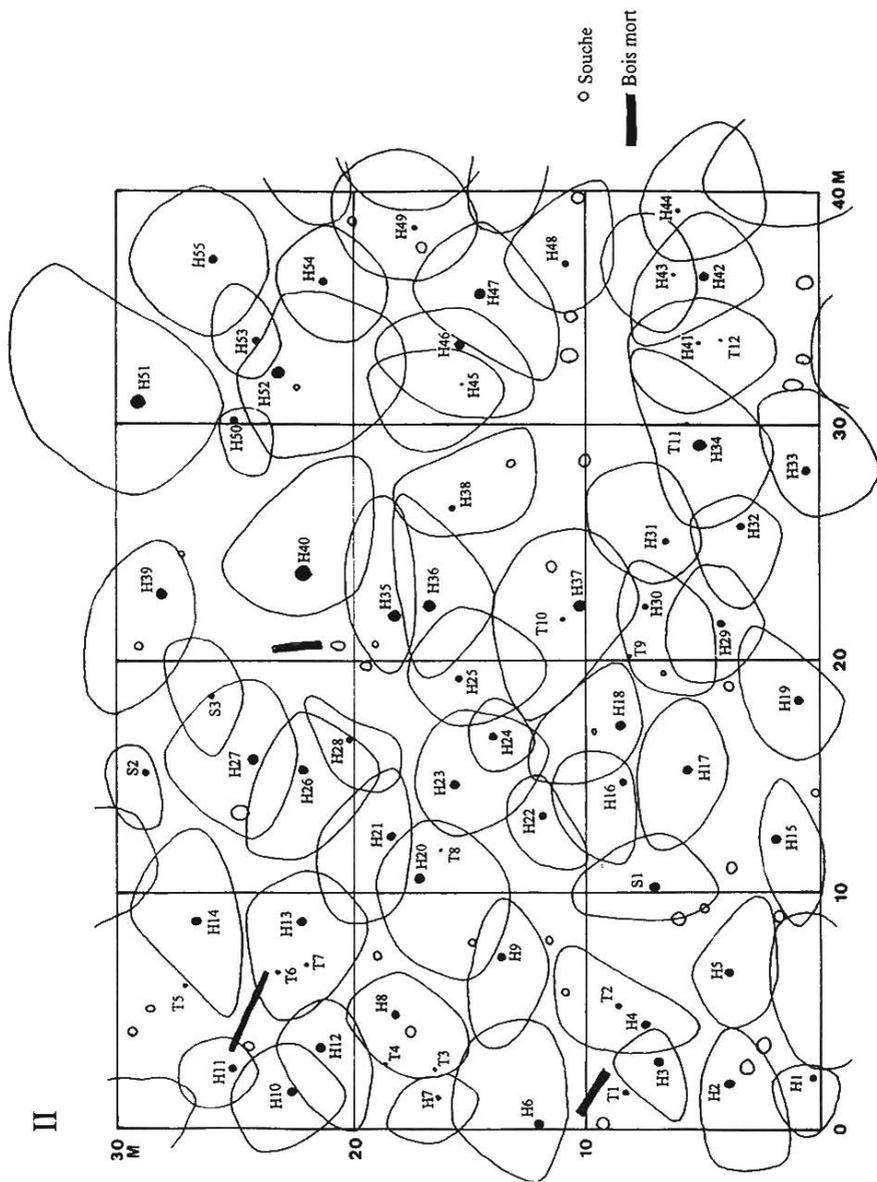


Figure 2 — Profil architectural de la hêtraie du versant Nord (parcelle 16) I : élévation verticale, Transect A bande de 20 m de profondeur partant de la ligne de base. Transect B bande de 10 m de profondeur en arrière du Transect A. II : projection sur l'horizontale des houppiers et des troncs

I.— Transect B



II



étudiées, la dimension des trouées est beaucoup trop faible pour accueillir des espèces pionnières comme le bouleau, le saule marsault ou le tremble. Cette même dynamique a été décrite en Forêt de Fontainebleau par Faille et al. (1984) où la faiblesse des surfaces ouvertes implique de la part des végétaux trois stratégies de cicatrization : la régénération par des semis d'espèces tolérantes à l'ombre, l'extension des houppiers sur la bordure des trouées et le développement des tiges du sous-étage libérées par l'ouverture de la voûte.

La présence et la localisation des bois morts, particulièrement des souches, revêt une importance à la fois d'ordre écologique pour ce qui est du recyclage de la matière organique dans l'écosystème et d'ordre dynamique en ce qui concerne l'ouverture de la voûte et ses conséquences sur la régénération. Dans les deux hêtraies, le bois mort est très faiblement représenté, sauf dans la parcelle 23, mais en dehors de la placette d'études. Dans la hêtraie au Sud, en effet, quelques arbres sont morts sur pied et l'on trouve des traces de troncs pourrissants. Dans la placette, une dizaine de souches, d'un diamètre moyen de 50 cm, a été inventoriée Elle correspond aux dernières coupes d'arbres qui avaient atteint l'âge d'exploitabilité. Dans la parcelle 16, aucun arbre sec de stature conséquente n'a été observé. Par contre, une trentaine de souches, de diamètre moyen de 40 cm et fortement décomposées, est présente sur le profil. Cette observation montre l'importance de l'éclaircie sur une si petite surface et souligne le caractère artificiel de la structure actuelle.

Analyse dimensionnelle des arbres. — Deux relations quantitatives permettent de synthétiser la morphologie et les dimensions des arbres : la relation H/d et la relation h/H , où H est la hauteur totale des arbres, h est la hauteur sous le houppier et d le diamètre du tronc à 1,30 m. Ces relations sont exprimées graphiquement sur les Figures 3 et 4.

La relation H/d a connu un regain d'intérêt grâce aux travaux d'Oldeman (1990). En effet, cet auteur a observé dans les forêts de la Guyane française que les arbres possédant un potentiel de croissance avaient une hauteur totale égale à environ cent fois leur diamètre Ceci peut s'exprimer sous la forme $H = a d$ où a prenait régulièrement la valeur de 100. Ces « arbres d'avenir », sont groupés en un « ensemble d'avenir ». Cette relation a été généralisée dans ce milieu tropical sous la forme $H \geq 100 d$, à la fois pour les arbres d'avenir et ceux qui ont poussé dans des cheminées écologiques.

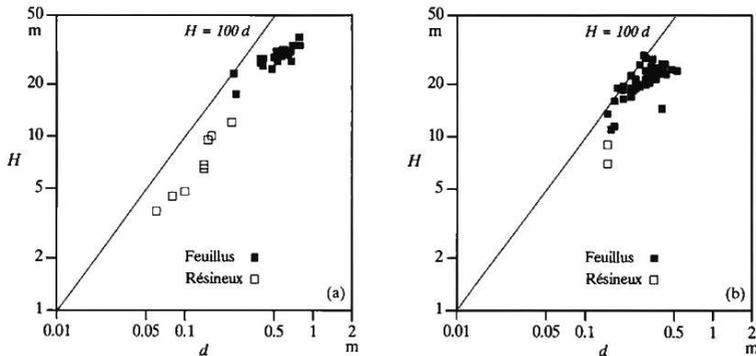


Figure 3 — Relation de la hauteur totale H sur le diamètre d du tronc à 1,30 m. (a) : hêtraie du versant Sud (parcelle 23) (b) hêtraie du versant Nord (parcelle 16) Chaque point représente un arbre. Coordonnées logarithmiques. Pour la droite $H = 100 d$, voir texte

Dans ce cas, un excédant de croissance en hauteur s'observe pour un diamètre donné et $H > 100 d$. Les arbres ne poussant plus en hauteur mais seulement en épaisseur montrent une relation $H < 100 d$. Ils ont atteint leur maturité. Ce sont les « arbres du présent ». Ils forment un « ensemble du présent » qui structure la voûte forestière. L'ensemble du présent est subdivisé en « ensembles structuraux III, II et I, ainsi identifiés du haut en bas de la voûte, correspondent respectivement aux arbres de première et seconde grandeur et aux arbustes. Ils sont distincts des arbres d'avenir et des « arbres du passé », qui occupent les espaces vacants entre les précédents. Les arbres du passé, décapités, sénescents ou malades, pour lesquels $H \ll 100 d$, constituent l'« ensemble du passé ».

La droite de la Figure 3 considère le paramètre a comme égal à 100. Bien que cette valeur ait été établie sous les Tropiques, elle est conservée dans nos observations à titre de repère, sans pour autant lui accorder une signification décisive. Le cas des résineux (Conifères) et celui des feuillus Dicotylédones doit, sous ce rapport, être considéré séparément, mais il n'est pas analysé ici. Dans la parcelle 23 (Figure 3 a), la majorité des points, dont chacun représente un arbre, est située à droite de cette ligne de référence et correspond bien à la situation d'un peuplement arrivé à maturité. Celui-ci est constitué d'un ensemble du présent (feuillus : un seul ensemble structural III formant la haute futaie) et d'un ensemble du passé (résineux), l'ensemble d'avenir n'étant pas pris en compte dans l'analyse, car non représenté dans la limite diamétrique choisie. Dans la parcelle 16 (Figure 3 b), le nuage de points est très concentré, proche de la droite de référence et avec un certain nombre de points situés sur cette droite. Il exprime une grande homogénéité du peuplement et traduit une forte compétition pour la lumière et, peut-être, pour quelques individus, une croissance en cheminée écologique. Cette hypothèse nécessiterait une analyse dendrométrique fine et une étude démographique appropriées. Les résineux, relégués dans l'ensemble du passé, se distinguent nettement des feuillus, comme dans la parcelle 23.

La relation h/H traduit le statut énergétique des arbres au cours de leur croissance et de leur développement (Figure 4). La position des points correspondant aux valeurs mesurées pour chaque arbre se réfère à la droite $h = H/2$. Les arbres dont la hauteur sous le houppier est supérieure à la mi-hauteur totale ($h > H/2$) se sont développés soit dans une cheminée écologique, soit dans des conditions de compétition très ser-

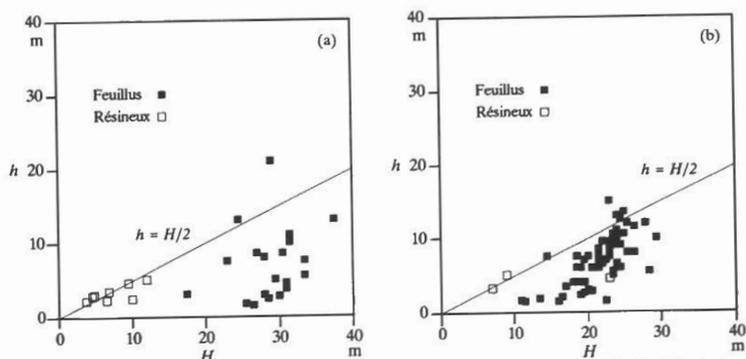


Figure 4.— Relation de la hauteur du tronc sous le houppier h sur la hauteur totale H . (a) : hêtre du versant Sud (parcelle 23). (b) : hêtre du versant Nord (parcelle 16). Chaque point représente un arbre. Pour la droite $h = H/2$, voir texte.

rée. Au contraire, les individus dont la hauteur sous le houppier est inférieure ou égale à la mi-hauteur totale ($h > H/2$) ont bénéficié au cours de leur développement d'un surcroît d'énergie radiative ou (et) d'une libération de la compétition avec les voisins. Dans la parcelle 23 (Figure 4 a), les résineux se distinguent nettement des feuillus : leurs houppiers ont la même profondeur que leur tronc libre de branches. Les feuillus possèdent des houppiers sur-développés par rapport à leur hauteur totale. Le nuage de points de la Figure 4 a se situe nettement au-dessous de la droite $h = H/2$. Le rapport h/H est égal à 0,25 en moyenne dans cette placette pour les seuls feuillus ($n = 21$, minimum = 0,06, maximum = 0,72, médiane = 0,22, avec un coefficient de variation de 66 %). Ces arbres ont donc été dégagés précocement de la compétition et ont pu bénéficier d'un important apport radiatif. Cependant, deux individus se détachent de cet ensemble : le hêtre H2 et l'érable É1 présentent une naissance de houppier à 21 m sur 29 m de hauteur totale et à 13 m sur 25 m de hauteur totale, respectivement. Leurs points représentatifs sur la Figure 4 a sont situés au-dessus de la droite $h = H/2$. Ces arbres apparaissent de ce fait plus élancés que tous les autres. Leur croissance semble correspondre à des conditions de cheminée écologique. Dans la parcelle 16 (Figure 4 b), le nuage de points est plus homogène et plus proche de la droite de référence. Le rapport h/H est égal à 0,32 en moyenne dans cette placette pour les seuls feuillus ($n = 55$, minimum = 0,07, maximum = 0,65, médiane = 0,32, avec un coefficient de variation de 42 %). Un test statistique de comparaison des moyennes de h/H , non détaillé ici, a montré une différence significative au seuil de 5 % entre les deux peuplements ($P = 0,022$). Donc, la hauteur moyenne sous houppier est supérieure dans la parcelle 16 en comparaison avec celle de la parcelle 23. Dans la hêtraie au Nord, les arbres présentent également moins de fourches. On peut se demander si cette différence est le résultat de conditions de croissance variées ou s'il n'intervient pas aussi une composante génétique liée à l'évolution divergente des populations séparées par la barrière des peuplements résineux.

CONCLUSION

Les deux hêtraies se caractérisent par un peuplement relativement fermé, sans sous-étage et dont la structure globale est homogène, basée sur un très petit nombre d'espèces ligneuses. Cependant, dans le détail, des niveaux d'hétérogénéité apparaissent, relevés par l'analyse architecturale. Ce constat découle des contraintes de la gestion en futaie régulière, qui ne sélectionne qu'une ou deux espèces d'arbres dominants pour un même type de peuplement. À cet appauvrissement de la diversité forestière s'ajoute une importante simplification structurale, liée aux formations équiennes monospécifiques et à la forte compétitivité du hêtre. Ces caractéristiques ont une conséquence directement observable sur le terrain : la pauvreté de la faune vertébrée. La hêtraie au Nord est un désert faunistique, où seuls les mulots peuplent le sous-bois. La hêtraie au Sud est plus diversifiée, en raison sans doute d'un climat local plus hospitalier, mais aussi par la présence d'une strate herbacée et d'une tache de régénération qui augmentent la diversité du milieu : on peut y observer couramment le geai, le pic noir et même la chouette de Tengmalm.

Cette étude a permis d'apporter un éclairage s'éloignant quelque peu des études écologiques traditionnelles menées sur les forêts de la région. La procédure utilisée paraît certainement lourde, mais pour un groupe de trois personnes expérimentées, un travail de terrain d'une journée est suffisant pour construire un profil architectural dans un milieu forestier à structure aussi simple. Une telle approche se justifie dans le cadre de recherches pluridisciplinaires, où de nombreux paramètres et variables de la

structure de la végétation interviennent dans l'interprétation des mesures physico-chimiques ou biologiques et de leur modélisation. Par exemple, l'indice foliaire, surface foliaire par unité de surface de sol, dont le rôle dans de nombreux modèles bio-géochimiques, hydro-climatologiques et atmosphérique n'est plus à démontrer, est directement lié à l'organisation architecturale de la forêt. Les données de l'analyse architecturale peuvent servir ultérieurement dans la validation de modèles de dynamique forestière à long terme. De tels modèles sont le seul moyen de « compréhension » des processus forestiers complexes régissant l'évolution de la communauté sur des durées et des espaces hors d'atteinte à l'échelle humaine (Wissel 1991).

Les représentations architecturales de la végétation sont un bon moyen de visualiser de façon rigoureuse l'aspect naturel ou anthropisé des forêts. Elles peuvent, par conséquent, fournir un outil de communication scientifique efficace dans le domaine de la gestion conservatoire des richesses naturelles. Il est à espérer que la gestion sylvicole puisse bénéficier d'une telle expérimentation, mais que puisse également en résulter une meilleure conservation des reliquats de forêts anciennes du massif vosgien, y compris la création de réserves forestières intégrales dans les milieux les plus représentatifs du massif et sur des surfaces suffisamment étendues, comme vient de le proposer un récent colloque sur la naturalité des forêts européennes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Office National des Forêts de Ribeaupville, et tout particulièrement M. Schall, ainsi que M. Wassmer, de l'UFR de Géographie de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, pour leur aide sur le terrain et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

REFERENCES

- ASAEEL S., 1990. Analyse structurale de quelques peuplements forestiers du bassin versant du Strengbach à Aubure (Haut-Rhin). Mémoire du Diplôme d'Études Approfondies de Biologie Forestière, Université de Nancy-ENGREF, 151 p.
- BIRON P., 1994. Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne. flux de sève et bilans hydriques stationnels (bassin versant du Strengbach à Aubure, Hautes Vosges). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 244 p.
- BONNEAU M et LANDMANN G, 1988. Le dépérissement des forêts en Europe. *La Recherche* 19, 1553-1556
- ELLENBERG H. 1982. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen* Ulmer, Stuttgart, 989 p.
- FAILLE A., LEMÉE G. et PONTAILLER J -Y, 1984. Dynamique des clairières d'une forêt inexploitée (réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau) I. Origine et état actuel des ouvertures. II. Fermeture des clairières actuelles. *Acta Oecologica Oecologia Generalis* 5-1, 35-51, 5-2, 181-199.
- HALLÉ F. et OLDEMAN RAA, 1970. *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Masson, Paris, 178 p.
- HALLÉ F. OLDEMAN RAA and TOMLINSON PB, 1978. *Tropical Trees and Forests An Architectural Analysis* Springer, Heidelberg, 441 p
- HOFF M, 1978. Succession et sylvigénèse dans deux séries de végétation en Alsace. Thèse de Doctorat de Spécialité en Sciences Biologiques, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 165 p.
- HORY F. et MULLER C, 1996. Étude structurale de deux hêtraies montagnardes en forêt d'Aubure (Vosges). Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, 66 p. + annexes.

- ISSLER E., LOYSON E. et WALTER E, 1965 *Flore d'Alsace*. Société d'Étude de la Flore d'Alsace, Strasbourg, 637 p.
- KUIPER LC. 1988. The structure of natural Douglas-fir forests in Western Washington and Western Oregon. *Agricultural University Wageningen Papers* 88-5, 47 p.
- LEMÉE G. 1987. Dynamique de fermeture par régénération et évolution morphométrique du hêtre dans les vides d'une forêt non exploitée (Réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau). *Bulletin d'Écologie* 18-1, 1-11.
- LEMÉE G., FAILLE A. et PONTAILLER JY, 1986. Dynamique de cicatrization des ouvertures naturelles dans les réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau (Environs de Paris). In Fanta J (ed.). *Forest dynamics research in Western and Central Europe*. Pudoc, Wageningen, p. 170-183.
- MAYER H, 1984. *Wälder Europas*. Gustav Fisher, Stuttgart, 691 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DIRECTION DES FORÊTS, 1983. Forêt Communale d'Aubure. Révision d'Aménagement 1978-1997. Paris, 106 p.
- OBERDORFER E, 1979. *Pflanzensoziologische Exkursions Flora*. Ulmer, Stuttgart, 997 p.
- OLDEMAN RAA, 1979. *Scale-drawing and architectural analysis of vegetations*. Field Guide for the Research Group. Department of Silviculture, Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 42 p.
- OLDEMAN RAA, 1990. *Forests. Elements of Silvology*. Springer, Heidelberg, 624 p.
- OOSTERHUIS L., OLDEMAN RAA and SHARIK TL, 1982. Architectural approach to analysis of North American temperate deciduous forests. *Journal canadien de la recherche forestière* 12-4, 835-847.
- RAMEAU JC., MANSION D et DUMÉ G, 1993 *Flore forestière française. Guide écologique illustré. 2. Montagnes*. Institut pour le développement forestier-ENGREF, Nancy, 2421 p.
- WALTER J-M N, 1982. Architectural profiles of flood-forests in Alsace. In : Dierschke H (ed.). *Struktur und Dynamik von Wäldern*. Cramer, Vaduz, p. 187-234.
- WISSEL C, 1991. A Model for the Mosaic-Cycle Concept. In : Remmert H (ed.). *The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems*. Springer, Heidelberg, p. 22-45.