

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES  
AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

*Conception d'un catalogue des stations dans le  
cadre de la gestion intégrée des forêts hydrophiles :  
application à l'aulne glutineux (Alnus glutinosa  
(L.) Gaertn.) en Région wallonne.*

---

*Hugues CLAESSENS*

*Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de  
docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique*

*Promoteur : Professeur J. Rondeux*

**1999**



COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES  
AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

*Conception d'un catalogue des stations dans le  
cadre de la gestion intégrée des forêts hydrophiles :  
application à l'aulne glutineux (Alnus glutinosa  
(L.) Gaertn.) en Région wallonne.*

---

*Hugues CLAESSENS*

*Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de  
docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique*

*Promoteur : Professeur J. Rondeux*

**1999**

© Aux termes de la loi belge du 22 mars 1886 sur le droit d'auteur, seul l'auteur a le droit de reproduire cet ouvrage ou d'en autoriser la reproduction de quelque manière ou sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous une autre forme est donc faite en violation de la loi.

CLAESSENS Hugues [1999] - *Conception d'un catalogue des stations dans le cadre de la gestion intégrée des forêts hydrophiles : application à l'aulne glutineux (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.) en Région wallonne.* B-5030 Gembloux, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, 302 p, 83 tableaux, 76 figures, 4 annexes.

### ***Résumé***

L'objectif de la présente étude est de mettre au point un catalogue des stations qui contienne l'essentiel des informations nécessaires à la gestion intégrée des forêts. Elle a pour cadre les forêts hydrophiles de la Wallonie et s'attache plus particulièrement à l'aulne glutineux, essence indigène spécifique à ces milieux mais peu connue et sous-valorisée.

Après une abondante bibliographie concernant les aspects écologiques et sylvicoles de l'aulne glutineux, nous avons largement développé l'état de l'art en matière de classifications écologiques des stations, d'estimation de la productivité et d'étude de la relation station x production.

Nous nous sommes alors attelé à la caractérisation écologique d'un échantillon de 166 aulnaies par des descripteurs spécifiques aux milieux humides, et notamment par leur régime phréatique. Ces descriptions fouillées nous ont permis d'établir une typologie des stations des forêts hydrophiles à aulne.

Parallèlement, à partir de mesures dendrométriques récoltées dans 106 des stations, nous avons construit des courbes de fertilité, évalué la productivité des peuplements et analysé l'évolution de leur circonférence dominante à hauteur d'homme afin d'établir les potentialités sylvicoles de l'essence.

Nous appuyant sur ces 2 études, nous avons ensuite analysé la relation station x production, ce qui nous a permis d'une part, d'évaluer les potentialités sylvicoles de chaque type de station et, d'autre part, d'apporter notre contribution à la connaissance de l'autécologie de l'aulne en Wallonie.

En guise d'application, la dernière partie de ce travail développe alors de manière plus approfondie un catalogue des stations hydrophiles du massif ardennais. Grâce aux informations qu'il rassemble, concernant la description des types de station, leurs fonctions écologiques et leurs potentialités sylvicoles, ce catalogue constitue un outil adapté à la gestion moderne des forêts dans le respect de leurs multiples fonctions.

CLAESSENS Hugues [1999] - *Conception of a site Classification for humid forests integrated management : application to black alder (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.) in the wallonian region (Southern Belgium)*. B-5030 Gembloux, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, 302 p, 83 tableaux, 76 figures, 4 annexes.

## **Summary**

The present study aims at conception of a site classification wich contains most of the usefull information for forest integrated management. It has been applied to humid forests of Wallonia, specially related to black alder, indigenous tree of those sites, but slightly known and under-valorized.

After the presentation of some ecological and silvicultural aspects of black alder related in the litterature, we proceed to review site classification, productivity estimation and site productivity evaluation methods.

Then, we relate the ecological characterization of the 166 alder sites of the sampling, with humid sites specific variables, espacially in relation to the phreatic water. Those descriptions allow us to establish a site-classification of the humid forest sites with alder.

In the same time, we proceed to the elaboration of site index curves, to the stands productivity estimation and to the analyse of the dominant girth evolution from dendrometric data collected on 106 of the alder sites. Those analysis allow us to evaluate the black alder silvicultural potentialities.

Using the results of the 2 studies, we analyse the site productivity in order to evaluate silvicultural potentialities of each site type of the classification, and to contribue to the knowledge of alder autecology in Wallonia.

In the last chapter, we develop a practical application for the humid forests of the Arden : the « site types catalogue » wich presents ecological fonctions, and silvicultural potentialities for each site type. This constitue a modern tool of integrated management tacking account of all fonctions and services produced by the forest.

## *Remerciements*

Mes remerciements vont en premier lieu à Monsieur le Professeur J. RONDEUX, promoteur de ce travail qui a assuré un suivi régulier, soutenu et encourageant tout au long de ma recherche.

Ma respectueuse gratitude s'adresse aux membres de ma commission d'évaluation qui ont suivi mon travail et m'ont conseillé durant plus de 2 ans : Messieurs les Professeurs L. BOCK, W. DELVINGT, J.P. LAMBOTTE, P. LEJEUNE et F. MALAISSE ainsi que Monsieur J. STEIN de la Division Nature et Forêts et, en particulier, Monsieur le Professeur A. FRANC, de l'Ecole Nationale du Génie rural et des Eaux et Forêts (ENGREF – Paris) qui a consacré une grande partie de son temps à m'apporter un éclairage méthodologique qui s'est avéré indispensable et déterminant.

Il m'est agréable de remercier toute l'ancienne équipe du Centre de Recherche et de Promotion forestières (Ecologie) financé par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA) au sein de laquelle j'ai pu développer cette recherche dans une incomparable convivialité. J'ai ainsi pu profiter de la longue expérience de terrain de Messieurs J.P. MORIMONT et M. DELISÉE, des compétences scientifiques de Monsieur A. THIBAUT, qui m'a été d'une aide précieuse pour les développements mathématiques et de Monsieur F. DELECOUR en matière de pédologie forestière.

Ce travail a aussi bénéficié des contacts permanents avec mes collègues de l'Unité de Gestion et Economie forestières que je tiens à remercier et particulièrement Madame D. PAUWELS et Monsieur T. CAVELIER.

Je suis aussi reconnaissant envers les nombreux propriétaires et gestionnaires forestiers privés ou publics qui ont mis leur forêt à ma disposition, quitte à y perdre l'un ou l'autre arbre.

Il m'est agréable de souligner le travail rapide soigné et efficace de Madame M. EVRARD, qui a assuré la dactylographie et la mise en page de ce travail : je l'en remercie chaleureusement.

Enfin, le moment est venu de célébrer le soutien tant matériel que moral de Fabienne et la patience de mes 3 loustics, guettant sans relâche les courts instants de disponibilité de leur père.

## Table des matières

|  |     |
|--|-----|
| Introduction .....   | 1   |
| Chapitre 1 - L'aulne glutineux et les forêts hydrophiles.....  | 7   |
| 1.1. Introduction.....   | 7   |
| 1.2. Biologie de l'aulne glutineux.....  | 9   |
| 1.3. L'aulne en forêt wallonne .....   | 34  |
| 1.4. Fonctions écologiques de l'aulne glutineux et de ses forêts.....  | 41  |
| 1.5. Valorisation de la production de bois.....  | 50  |
| 1.6. Conclusions.....  | 65  |
| Chapitre 2 - Classifications écologiques des stations et productivité<br>stationnelle : approches méthodologiques..... | 67  |
| 2.1. Introduction.....   | 67  |
| 2.2. Historique de l'étude des stations et de la productivité stationnelle.....  | 67  |
| 2.3. Concepts et méthodes de la classification écologique des stations.....  | 71  |
| 2.4. Méthodes d'estimation de la productivité des peuplements .....  | 91  |
| 2.5. Méthodologie des études de la relation station x production.....  | 94  |
| 2.6. Les grandes lignes de la méthodologie adoptée .....   | 99  |
| Chapitre 3 - Matériel d'étude .....  | 105 |
| 3.1. Introduction.....   | 105 |
| 3.2. Description écologique de la zone d'étude.....  | 105 |
| 3.3. Réseau d'observations .....   | 111 |
| Chapitre 4 - Caractérisation des stations .....  | 117 |
| 4.1. Introduction.....   | 117 |
| 4.2. Revue bibliographique des principaux descripteurs des stations.....   | 118 |
| 4.3. Récolte des données de base.....  | 131 |
| 4.4. Etude particulière des régimes phréatiques .....  | 150 |
| 4.5. Conclusions.....  | 166 |



|  |     |
|--|-----|
| Chapitre 5 - Estimation de la productivité et des potentialités sylvicoles<br>de l'aulne glutineux .....             | 169 |
| 5.1. Introduction .....  | 169 |
| 5.2. Estimation de la productivité des peuplements d'aulne glutineux.....  | 170 |
| 5.3. Evaluation du potentiel sylvicole de l'aulne .....  | 182 |
| 5.4. Première approche de la productivité.....   | 195 |
| 5.5. Conclusions .....   | 202 |
| Chapitre 6 : Typologie des stations et productivité stationnelle.....  | 203 |
| 6.1. Introduction .....  | 203 |
| 6.2. Matériel d'étude.....   | 204 |
| 6.3. Méthodologie adoptée .....  | 206 |
| 6.4. Elaboration de la typologie des stations .....  | 208 |
| 6.5. Analyse de la productivité stationnelle.....  | 228 |
| 6.6. Interprétation des résultats en termes de potentialités sylvicoles<br>des stations .....                        | 239 |
| 6.7. Interprétation des résultats en terme d'autécologie de l'aulne glutineux ..                                     | 240 |
| 6.8. Discussion : apport de notre analyse<br>à la connaissance et à la gestion de l'aulne et des forêts humides..... | 246 |
| 6.9. Conclusions .....   | 252 |
| Chapitre 7: Développement du catalogue des stations ardennaises .....  | 255 |
| 7.1. Introduction .....  | 255 |
| 7.2. Démarche méthodologique.....  | 256 |
| 7.3. Description approfondie et comparée des types de station ardennais.....   | 258 |
| 7.4. Présentation synthétique du catalogue.....  | 269 |
| 7.5. Types de station et gestion forestière .....  | 271 |
| 7.6. Conclusions .....   | 278 |
| Conclusions générales et perspectives.....   | 283 |
| Références bibliographiques .....  | 285 |
| Annexes.....   | i   |

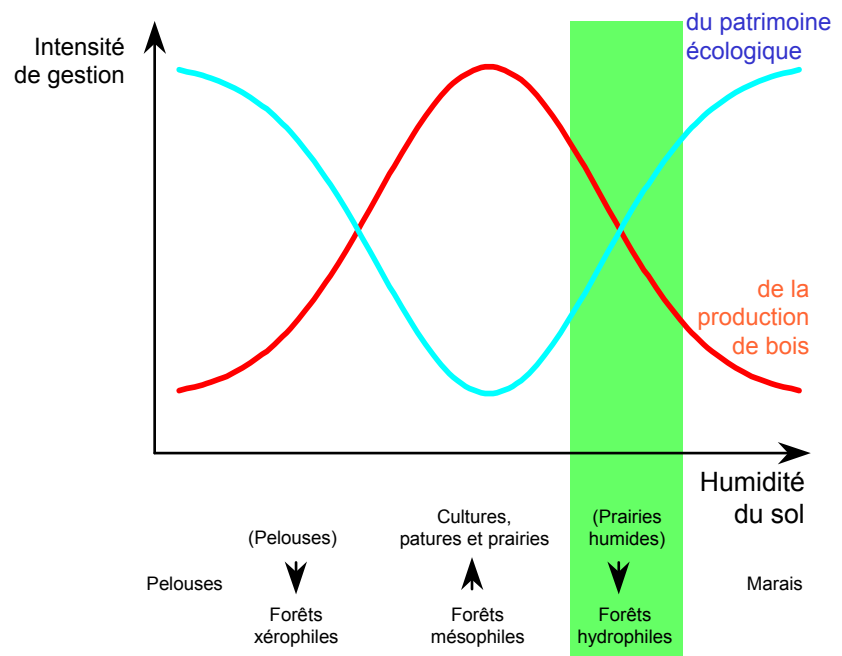


Figure 1. - Présentation schématique de l'intensité de gestion de la production et du patrimoine écologique en fonction de l'humidité du sol.

---

## *Introduction générale*

---

### *Contexte*

Parmi les études préalables à la mise en oeuvre d'une gestion forestière<sup>(1)</sup>, l'évaluation des conditions stationnelles est primordiale. En effet, avec d'autres facteurs d'ordre sylvicultural, technique ou socio-économique, celles-ci déterminent les orientations possibles de la gestion. Ainsi, les forestiers ont développé, depuis le siècle passé, divers systèmes d'évaluation et de classification écologique des stations, selon différentes approches, adaptées aux échelles de travail, aux régions concernées et aux divers objectifs poursuivis.

En raison de la concentration des activités de production dans les sols les plus aptes à l'intensification, les classifications mises au point par les forestiers ont principalement concerné les milieux de culture des grandes essences de production, rejetant en bloc dans une même classe (« à drainer ») l'ensemble des sols trop humides pour convenir à la sylviculture des espèces les plus hydro-tolérantes (frêne, chêne pédonculé, épicéa). Ce phénomène, qui concerne tant l'agriculture que la sylviculture, a pour conséquence que la gestion économique des milieux mésiques<sup>(2)</sup> repose sur une base de connaissances non négligeable, alors qu'à l'opposé, les milieux très humides (marais, forêts marécageuses) ou xériques (pelouses, forêts xérophiiles), qui ont perdu leur intérêt direct dans le contexte économique actuel, n'ont pas été considérés de la même manière. Par contre, en raison de leur marginalité, ces derniers milieux ont été plus intensément étudiés dans leurs aspects biologiques, écologiques, voire historiques.

---

<sup>(1)</sup> Gestion forestière : terme général qui désigne la gestion au sens large de l'ensemble des biens et services que peut produire la forêt.

<sup>(2)</sup> Mésique : niveau hydrique d'un sol, se situant entre les sols frais et les sols à tendance xérique (traduction du terme anglais *mesic*).

Ainsi, comme le montre la figure 1, les forêts hydrophiles se situent à une zone charnière où co-existent les intérêts patrimoniaux<sup>(3)</sup> et économiques sans véritablement s'intégrer. Parallèlement, les connaissances concernant ces forêts, bien que développées, sont plutôt dispersées et lacunaires. Pour ne citer qu'un exemple, les potentialités des milieux forestiers humides vis-à-vis de la sylviculture d'essences indigènes telles que l'aulne glutineux, les bouleaux ou le saule blanc, n'ont encore jamais été définies.

Or, c'est spécialement dans les forêts hydrophiles que l'on observe enfin, de manière significative, une volonté de se diriger vers une gestion intégrée<sup>(4)</sup> plus ambitieuse des ressources et de l'environnement. Il est donc opportun d'approfondir et de rassembler les connaissances multidisciplinaires relatives à ces écosystèmes complexes et sensibles. Plus particulièrement, une attention accrue doit être accordée à l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) qui, en tant qu'essence commerciale, spécifique et parfois exclusive des forêts hydrophiles, est de plus en plus amenée à jouer un rôle déterminant dans la fixation des orientations de la gestion forestière en milieux humides.

## **Objectifs**

Partant de ces considérations, notre thèse propose de rassembler, de compléter et d'organiser les informations écologiques et sylvicoles nécessaires à la gestion intégrée des forêts hydrophiles au sein d'une classification écologique des stations. Celle-ci dépassera donc le cadre typologique et descriptif des catalogues des stations habituels.

Comme le montre la figure 2, l'objectif majeur de notre recherche est donc de concevoir le catalogue des stations forestières humides. Celui-ci s'appuiera sur une caractérisation approfondie des stations à partir de descripteurs écologiques spécifiques aux milieux humides. Parallèlement, nous évaluerons la productivité et les potentialités sylvicoles des aulnaies et nous les mettrons en relation avec la

---

<sup>(3)</sup> Patrimoine : dans leur diversité, les définitions du patrimoine font état d'une relation entre des éléments matériels ou immatériels et des êtres ou des groupes d'êtres, leurs *titulaires patrimoniaux*. Elles font référence à la globalité, à l'indivisibilité du patrimoine, à l'universalité de ses rôles pour le titulaire, et à sa transmissibilité dans le temps de génération en génération [OLLAGNON, 1990]

<sup>(4)</sup> Gestion forestière intégrée : gestion prenant en considération l'ensemble des fonctions susceptibles d'être attribuées à l'espace forestier, mais aussi l'ensemble des avis des acteurs impliqués dans la gestion forestière.

typologie et les caractéristiques écologiques des stations, pour préciser l'autécologie et la productivité stationnelle de l'aulne.

Autour de ce catalogue, nous rassemblerons alors une série d'informations originales ou bibliographiques constituées de nos résultats relatifs aux potentialités sylvicoles de l'aulne, de la phytosociologie des forêts humides que nous avons adaptée, ainsi que des connaissances relatives aux fonctions écologiques, aux sensibilités particulières de ces forêts, et aux mesures de gestion qui leur conviennent.

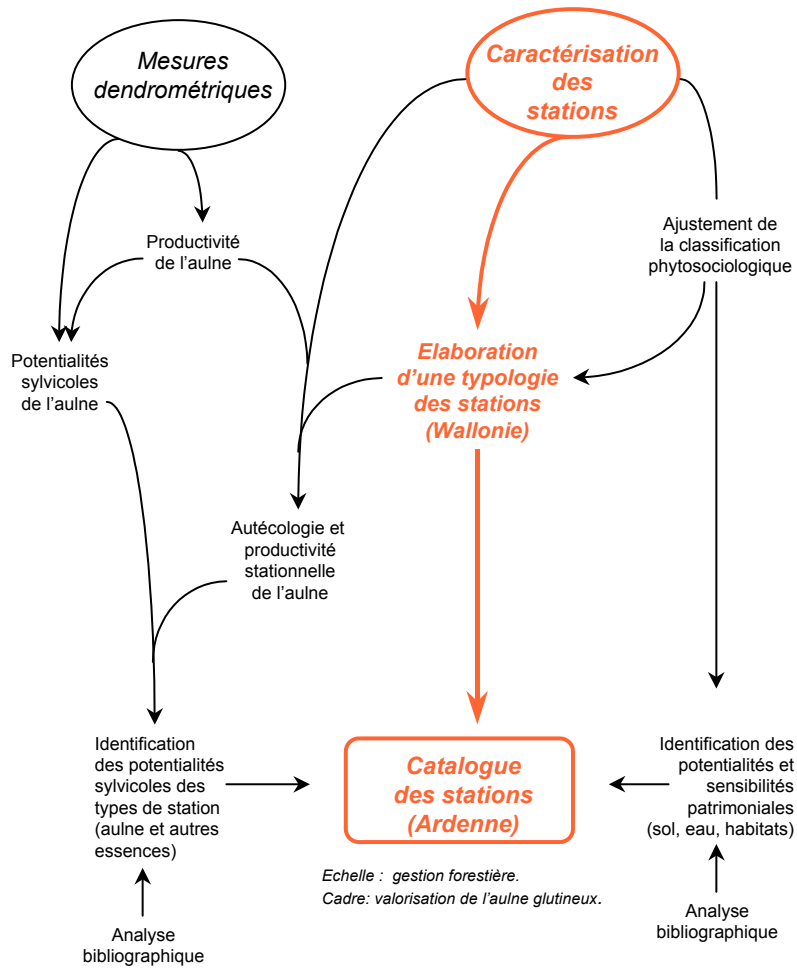


Figure 2. - Organisation générale de l'étude, construite autour de l'objectif principal que constitue le catalogue des stations (filère rouge).

## ***Cadre géographique***

L'étude des forêts à aulne glutineux a été entreprise à deux échelles. La productivité et l'autécologie de l'aulne ont été envisagées sur l'ensemble de la forêt wallonne, tandis que le catalogue des stations n'a concerné que le massif ardennais.

En effet, les études de la productivité et de l'autécologie des essences sont de nature à bénéficier de conditions stationnelles contrastées. Dans le cas qui nous concerne, l'analyse du comportement de l'aulne glutineux le long d'un gradient écologique suffisamment prononcé est susceptible de mettre en évidence, sinon des facteurs limitants, au moins des conditions stationnelles qui auraient un impact sur la croissance ou la répartition de l'essence. Ainsi, pour ce volet de l'étude, la zone géographique envisagée correspond à la *Wallonie*, qui s'étale de la plaine de la Haine, à 20 mètres d'altitude, au haut-plateau ardennais, culminant à près de 700 mètres. Cette option permet aussi de présenter des résultats d'une portée plus générale.

Par contre, selon BECKER [1985], les catalogues de stations doivent être élaborés au sein de « petites régions naturelles » caractérisées par la plus grande homogénéité possible des conditions écologiques générales (contexte climatique, géologique, influences phytogéographiques,...). En Wallonie, nous avons considéré que le *massif ardennais* remplissait ces conditions. De surcroît, l'Ardenne, quoique moins pourvue en aulne que les autres régions, comme le montrera le paragraphe 1.3.3, comporte de l'ordre de 15% de sols hydromorphes [TAVERNIER et MARECHAL, 1958] qui, selon les critères du fichier écologique des essences [MRW, 1991], sont aptes à la sylviculture de l'aulne glutineux, mais dont l'affectation actuelle relève essentiellement de la pessière et des prairies humides. Or, dans les contextes économique et de politique environnementale actuels, ces types d'exploitation des sols hydromorphes sont largement remis en cause, sans pour autant que des solutions alternatives aient fait l'objet d'analyses objectives. Cela pose alors le problème de la ré-affectation de ces sols, et par là même, démontre l'intérêt d'appliquer spécifiquement notre étude aux sols hydromorphes ardennais.

## ***Plan du texte***

La présentation du texte s'ordonne en 7 chapitres successivement consacrés à :

- une large présentation des aspects écologiques et sylvicoles de l'aulne glutineux et des fonctions écologiques des forêts hydrophiles (chapitre 1) ;

- une étude bibliographique approfondie destinée à dégager une approche méthodologique pertinente de la productivité stationnelle et des classifications écologiques des stations, en particulier des catalogues de stations (chapitre 2) ;
- la description de la région d'étude, ainsi que des placettes d'aulne qui font l'objet de notre réseau d'observations (chapitre 3) ;
- la caractérisation des stations, par l'intermédiaire de méthodes spécifiques adaptées aux milieux humides (chapitre 4) ;
- l'évaluation de la productivité des aulnaies et à l'établissement de courbes de fertilité, permettant de définir les potentialités sylvicoles de l'essence (chapitre 5) ;
- l'élaboration de la typologie des stations de l'aulne en Wallonie, aussi destinée à mieux analyser l'autécologie et la productivité stationnelle de l'essence (chapitre 6) ;
- l'élaboration du catalogue proprement dit des stations ardennaises, et au rassemblement, par types de station, des différentes informations d'ordre écologique et sylvicole (chapitre 7).

Enfin, les conclusions générales feront le point sur l'apport de notre étude à la connaissance des forêts à aulne glutineux et à la valorisation de cette essence dans le cadre de la gestion des forêts humides.

Notre volonté de faire largement le point sur les aspects écologiques et sylvicoles de l'aulne glutineux (chapitre 1) et sur les méthodologies que nous avons utilisées (chapitre 2) nous a amené à présenter un texte volumineux. Nous avons cependant prévu un itinéraire de lecture écourté. Ainsi, en ce qui concerne ces 2 premiers chapitres, on peut envisager de ne s'attacher qu'aux paragraphes suivants :

- *paragraphe 1.2.8 : phytosociologie des forêts de l'aulne ;*
- *paragraphe 1.4 : fonctions écologiques de l'aulne et de ses forêts ;*
- *paragraphe 1.6 : conclusions ;*
- *paragraphe 2.6 : les grandes lignes de la méthodologie adoptée.*

Lorsque nous avons estimé que d'autres notions de ces 2 chapitres étaient ponctuellement nécessaires, nous avons renvoyé le lecteur aux paragraphes concernés.

## *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.

### Caractères diagnostiques

- tronc droit ; houppier pyramidal à conique, aux branches marquées retombantes ;
- écorce d'abord lisse, gris-vert, ponctuée de lenticelles, puis gris foncé se desquamant en écailles rectangulaires ;
- 1. - jeunes rameaux anguleux, brun verdâtre, ponctués de lenticelles, pourpres à l'automne ;
- 2. - bourgeons longuement pédonculés (3 mm), gros, violacés ;
- 3. - feuilles alternes, arrondies, tronquées au sommet, en coin à la base (5 à 9 cm, entières), irrégulièrement dentées, glabres, vert foncé dessus, plus claires dessous, vertes jusqu'à leur chute ;
- 4. - fleurs mâles en longs chatons pendants ;
- 5. - fleurs femelles en courts chatons dressés, pourpres ;
- 6. - petits cônes (strobiles) ligneux verts, puis noirs à maturité, long de 10-30 mm ; samares très petites, à aile circulaire.

Figure 1.1. - Principaux caractères botaniques diagnostiques de l'aulne glutineux (adapté d'après la flore forestière française [RAMEAU et al., 1989]).



---

# Chapitre 1

## *L'aulne glutineux et les forêts hydrophiles*

---

### *1.1. Introduction*

L'étude entreprise s'inscrit dans le cadre général de la gestion multifonctionnelle des forêts hydrophiles, au sein desquelles l'aulne glutineux joue un rôle de premier plan.

Aussi, nous avons jugé opportun de présenter largement cette essence forestière peu connue et sous-valorisée, tant sur le plan sylvicole qu'environnemental. En outre, il nous a paru essentiel de bien positionner notre étude par rapport au concept de gestion multifonctionnelle, dont la mise en oeuvre est souvent laborieuse, a fortiori dans le cas de la valorisation de milieux aussi complexes que ceux qui seront abordés.

Nous avons donc organisé ce premier chapitre en 4 paragraphes successivement consacrés :

- aux aspects biologiques de l'aulne glutineux, sur une base principalement bibliographique (paragraphe 1.2) ;
- à la description des forêts comportant de l'aulne sur base des données de l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie (paragraphe 1.3) ;
- aux fonctions écologiques de l'aulne glutineux et des forêts hydrophiles (paragraphe 1.4) ;
- aux aspects relatifs à la valorisation de la production d'aulne en milieu forestier (paragraphe 1.5).

Tableau 1.1. - Systématique du genre *Alnus* (d'après ANONYME, 1983).

| ■ Chatons mâles et femelles à l'aisselle des feuilles   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <b>mâles et femelles ensemble</b><br><br>Sous-genre<br><b>CREMASTOGYNE</b> (Winkl) Schnd<br>- <i>A. cremastogyne</i> Burkill<br>- <i>A. lanata</i> Duthie   | <b>non ainsi</b><br><b>10-15 longs chatons en bouquet</b><br>Sous-genre<br><b>CLETHROPSIS</b> (Spach) Regel<br>- <i>A. nitida</i> Endl.<br>- <i>A. nepalensis</i> D. Don.  |   |  |
| ■ Chatons non ainsi   |  |   |  |
| <b>Fleurs hivernant en bourgeons ;<br/>bourgeons sessiles</b><br><br>Sous-genre<br><b>ALNASTER</b> (Spach) Endl<br><br>- <i>A. firma</i> Sieb & Zucc.<br>- <i>A. pendula</i> Matsum.<br>- <i>A. viridis</i> D.C.<br>- <i>A. crispa</i> (Ait) Pursch.<br>- <i>A. sinuata</i> (Rez) Rydb.<br>- <i>A. fruticosa</i> Rupr.<br>- <i>A. maximowiczii</i> Call.  | <b>Chatons apparents l'hiver ;<br/>bourgeons pédonculés</b><br>Sous-genre<br><b>GYMNOTHYRSUS</b> (Spach) Regel.  |   |  |
|   | <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <b>Feuilles lobées, à nervures droites, plissées dans le bourgeon</b><br/><br/>           - <i>serrulata</i> (Ait) Wild.<br/>           - <i>x ashersoniana</i> (= serr. x inc.)<br/>           - <i>x silesiaca</i> (= serr. x glu.)<br/>           - <i>glutinosa</i> (L.) Gaertn.<br/>           - <i>x pubescens</i> (= glu. X inc.)<br/>           - <i>tenuifolia</i> Nutt.<br/>           - <i>gorullensis</i> H.B.K.<br/>           - <i>rhombofolia</i> Nutt.<br/>           - <i>oblongifolia</i> Torr.<br/>           - <i>rubra</i> Bong.<br/>           - <i>hirsuta</i> (Spach) Rupr.<br/>           - <i>matsumurae</i> Call.<br/>           - <i>incana</i> (L.) Moench.<br/>           - <i>rugosa</i> (Du Roi) Speng.<br/>           - <i>purpusii</i> (= rug. x ten. ?)         </td> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <b>Feuilles non ainsi, vaguement et irrégulièrement dentées</b><br/><br/>           - <i>cordata</i> (Laisel) Desf.<br/>           - <i>x elliptica</i> (= cor ? x glu.)<br/>           - <i>subcordata</i> C.A. Mey.<br/>           - <i>x koehnei</i> (= inc. X subc.)<br/>           - <i>x spaethii</i> (= jap. X subc.)<br/>           - <i>orientalis</i> Dcne.<br/>           - <i>japonica</i> (Thumb) Stend.<br/>           - <i>x spectabilis</i> (= inc. X jap.)<br/>           - <i>trabeculosa</i> Hand-Mazz.<br/>           - <i>maritima</i> (Marsh) Muhl.         </td> </tr> </table> | <b>Feuilles lobées, à nervures droites, plissées dans le bourgeon</b><br><br>- <i>serrulata</i> (Ait) Wild.<br>- <i>x ashersoniana</i> (= serr. x inc.)<br>- <i>x silesiaca</i> (= serr. x glu.)<br>- <i>glutinosa</i> (L.) Gaertn.<br>- <i>x pubescens</i> (= glu. X inc.)<br>- <i>tenuifolia</i> Nutt.<br>- <i>gorullensis</i> H.B.K.<br>- <i>rhombofolia</i> Nutt.<br>- <i>oblongifolia</i> Torr.<br>- <i>rubra</i> Bong.<br>- <i>hirsuta</i> (Spach) Rupr.<br>- <i>matsumurae</i> Call.<br>- <i>incana</i> (L.) Moench.<br>- <i>rugosa</i> (Du Roi) Speng.<br>- <i>purpusii</i> (= rug. x ten. ?) | <b>Feuilles non ainsi, vaguement et irrégulièrement dentées</b><br><br>- <i>cordata</i> (Laisel) Desf.<br>- <i>x elliptica</i> (= cor ? x glu.)<br>- <i>subcordata</i> C.A. Mey.<br>- <i>x koehnei</i> (= inc. X subc.)<br>- <i>x spaethii</i> (= jap. X subc.)<br>- <i>orientalis</i> Dcne.<br>- <i>japonica</i> (Thumb) Stend.<br>- <i>x spectabilis</i> (= inc. X jap.)<br>- <i>trabeculosa</i> Hand-Mazz.<br>- <i>maritima</i> (Marsh) Muhl. |
| <b>Feuilles lobées, à nervures droites, plissées dans le bourgeon</b><br><br>- <i>serrulata</i> (Ait) Wild.<br>- <i>x ashersoniana</i> (= serr. x inc.)<br>- <i>x silesiaca</i> (= serr. x glu.)<br>- <i>glutinosa</i> (L.) Gaertn.<br>- <i>x pubescens</i> (= glu. X inc.)<br>- <i>tenuifolia</i> Nutt.<br>- <i>gorullensis</i> H.B.K.<br>- <i>rhombofolia</i> Nutt.<br>- <i>oblongifolia</i> Torr.<br>- <i>rubra</i> Bong.<br>- <i>hirsuta</i> (Spach) Rupr.<br>- <i>matsumurae</i> Call.<br>- <i>incana</i> (L.) Moench.<br>- <i>rugosa</i> (Du Roi) Speng.<br>- <i>purpusii</i> (= rug. x ten. ?) | <b>Feuilles non ainsi, vaguement et irrégulièrement dentées</b><br><br>- <i>cordata</i> (Laisel) Desf.<br>- <i>x elliptica</i> (= cor ? x glu.)<br>- <i>subcordata</i> C.A. Mey.<br>- <i>x koehnei</i> (= inc. X subc.)<br>- <i>x spaethii</i> (= jap. X subc.)<br>- <i>orientalis</i> Dcne.<br>- <i>japonica</i> (Thumb) Stend.<br>- <i>x spectabilis</i> (= inc. X jap.)<br>- <i>trabeculosa</i> Hand-Mazz.<br>- <i>maritima</i> (Marsh) Muhl.   |   |  |

## 1.2. Biologie de l'aulne glutineux

### 1.2.1. Taxonomie et caractères botaniques

L'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), aussi appelé verne, appartient à la famille des *Betulaceae* de l'ordre des Fagales. Le genre est composé de 29 espèces (tableau 1.1), principalement distribuées dans les régions tempérées ou froides de l'hémisphère Nord [ANONYME, 1983]. En Belgique, outre l'aulne glutineux, l'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench), d'indigénat incertain, se rencontre assez fréquemment dans les forêts mésophiles et mésotrophes. L'aulne de Corse (*Alnus cordata* (Laisel) Desf.), d'origine méditerranéenne (Corse, Italie), est occasionnellement planté, principalement pour la réhabilitation des sites industriels ou remaniés. L'aulne rouge (*Alnus rubra* Bong.), essence commerciale de l'Ouest américain a aussi été introduit en France [HIBBS *et al.*, 1994]. De nombreuses hybridations ont été réalisées entre diverses espèces du genre, mais elles sont manifestement peu fréquentes en conditions naturelles [GEYSENS et STEENACKERS, 1985].

L'aulne glutineux est généralement considéré comme un arbre de seconde grandeur. Dans de bonnes conditions de croissance, il peut toutefois atteindre 35 m de haut et plus de 3 m de circonférence [BECKER *et al.*, 1982]. Ses principaux caractères botaniques diagnostiques sont illustrés dans la figure 1.1 adaptée de la Flore Forestière Française [RAMEAU *et al.*, 1989]. Sa longévité varie selon les conditions écologiques : de moins de 100 ans en Finlande, à 150 ans en Europe centrale [GLAVAC, 1972 ; LONGAUER et HOFFMANN, 1996]. Pour nos régions, MARTIN [1985] l'estime à 120 ans.

### 1.2.2. Particularités du système racinaire

#### 1° Structure

L'aulne glutineux développe un enracinement de type vertical, formé par des racines latérales qui s'incurvent rapidement (figure 1.2) capable de s'enfoncer très profondément le cas échéant, jusqu'à la nappe phréatique permanente [SCHMIDT-VOGT, 1971 ; LIEPE, 1990] ; KOSTLER [1968] signale la profondeur de 3,8 m. Ce système racinaire se distingue surtout par deux particularités étonnantes : son *adaptation à l'asphyxie* des sols humides et sa *symbiose racinaire*.

Figure 1.2. - Structure du système racinaire de l'aulne glutineux [extrait de LIEPE, 1990].

## 2° Adaptation à l'asphyxie

L'aulne résiste à l'inondation prolongée, et son enracinement peut traverser les horizons asphyxiques [KOSTLER, 1968 ; SCHMIDT-VOGT, 1971], car ses adaptations d'ordre physiologique et métabolique sont très poussées :

- **adaptation anatomique** : en période d'inondation du système racinaire, une hypertrophie des lenticelles permet un apport d'air par les parties aériennes [GILL, 1975]. L'exceptionnelle quantité d'aérenchyme présente dans les racines (la densité des racines principales est de l'ordre de 0,3 g/cm<sup>3</sup>) assure la bonne diffusion de l'oxygène [LIEPE, 1990]. L'aulne peut aussi former des racines adventives au départ des lenticelles du tronc [GILL, 1975].
- **adaptation métabolique** : les métabolites produits en phase anaérobie ont une faible toxicité [GILL, 1970] et nuisent moins au bon fonctionnement du métabolisme, d'autant plus qu'ils sont rapidement évacués grâce à l'abondant aérenchyme [CRAWFORD, 1992]. En outre, toujours selon le même auteur, l'aulne peut absorber l'azote sous forme ammoniacale, fréquente en sols acides et humides.

### 3° *Symbiose racinaire*

Les aulnes développent des nodosités racinaires comparables, au sens large, à celles des légumineuses. Il s'agit d'une symbiose avec des actinomycètes du genre *Frankia*, mise en évidence par BOND *et al.* [1954], qui permet de fixer entre 45 et 450 kg d'azote atmosphérique/ha/an selon l'âge des aulnes [MOIROUD, 1991] et les conditions d'expérimentation présentées dans la littérature [CLAESSENS, 1990]. D'après HENDRICKSON *et al.* [1993], elle augmente de 25 à 33 % la production de bois des aulnes. Nous verrons que de nombreuses plantations mélangées ont été installées pour tirer parti de cette fixation symbiotique d'azote.

## 1.2.3. Cycle de reproduction<sup>(1)</sup>

### 1° *Floraison et fécondation*

L'aulne glutineux arrive à maturité sexuelle très tôt, à un âge compris entre 3 et 30 ans selon les écotypes [LIEPE, 1990] et l'« ambiance forestière » [SUSZKA *et al.*, 1994]. Pendant l'hiver, les fleurs mâles et femelles unisexuées se trouvent préformées et apparentes sur le même rameau (espèce monoïque). La floraison est provoquée par des températures supérieures à 10 - 13 °C dès la fin de février, le plus souvent simultanément pour les deux sexes. MAC VEAN [1956] signale 12 % de protandrie, parfois responsables d'arbres entièrement allogames. Les fleurs sont peu sensibles au gel ; elles ne sont pas affectées jusqu'à - 6 °C.

L'aulne est anémogame. Après la dispersion du pollen, la fécondation n'a lieu qu'en été [SUSZKA *et al.*, 1994]. Une période d'humidité la favorise en stimulant la formation du tube pollinique. Certains aulnes produisent du pollen qui ne germe qu'après traitement à l'humidité [BENSIMON, 1985]. Cela pourrait expliquer en partie la grande variabilité du taux de germination des récoltes de graines d'une année à l'autre.

---

<sup>(1)</sup> Sauf indication contraire, l'essentiel des informations concernant le cycle de reproduction de l'aulne provient de 2 synthèses majeures, dues à MAC VEAN [MAC VEAN, 1953, 1956] et DETHIOUX [1974].

## **2° Fructification et dissémination**

Des petits fruits ovoïdes verts, de 8 à 15 mm, se forment dès le mois de juillet. Ils deviennent ensuite ligneux, bruns à maturité, ressemblant à de petits cônes de 10 à 30 mm (les strobiles). Ils contiennent environ 60 samares de 1 à 2 mm, munies de petits flotteurs de liège. Un arbre mûr porte environ en moyenne 4.000 cônes. On dénombre environ 500 à 800.000 graines par kg [SUSZKA *et al.*, 1994].

La dissémination par l'eau (hydrochorie) est la plus importante : la graine est capable de flotter plus d'un an sans perdre son pouvoir germinatif. Elle peut être transportée sur de grandes distances et se disperser dans le lit majeur des cours d'eau (la dissémination a généralement lieu en période de hautes eaux). Nous avons pu observer que l'anémochorie (dissémination par le vent) permet aussi à l'aulne de coloniser les plateaux hydromorphes, à des distances considérables des semenciers. En Thiérache française, notamment, l'aulne contribue, avec le bouleau verruqueux et le frêne, à la recolonisation forestière sur le plateau.

La zoochorie joue manifestement un rôle marginal : la graine est digérée par ses consommateurs et ne présente pas de dispositif particulier pour s'accrocher dans les plumes et les poils des animaux.

## **3° Germination et développement**

La germination des graines est généralement sous la dépendance des conditions de température, d'humidité et d'oxygénation. Ensuite, une mise en lumière et une alimentation minérale adaptée sont nécessaires au bon développement des plantules.

Lorsque toutes ces conditions sont réunies pour permettre le développement de l'aulne, la pousse annuelle atteint 1 m dès la troisième année et culmine 5 à 6 ans entre 1 m et 1,5 m [MARTIN, 1985] de telle sorte qu'en bonnes stations, l'aulne s'extrait rapidement de la végétation concurrente pour atteindre 10 m vers 10 ans. Par la suite, la croissance n'est pas soutenue ; la pousse annuelle est de l'ordre de 50 cm vers 20 ans, comme le montre la courbe de croissance en hauteur (figure 1.3) [MARTIN, 1985].

### **• Température**

La graine de l'aulne peut germer entre 7 et 36 °C, mais l'optimum se situe vers 25 °C. Au moment de sa dissémination, la graine est en dormance et ne peut germer qu'à partir de 20 °C [MARTIN, 1985]. Toutefois, une période de froid d'une

durée de 6 semaines appliquée à des graines humides permet de lever cette dormance.

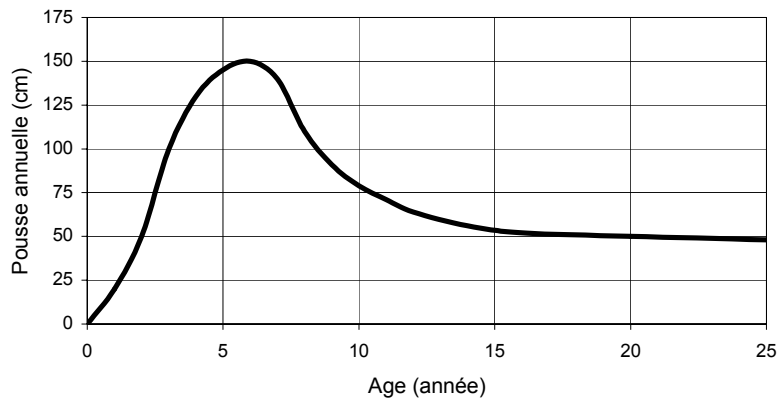


Figure 1.3. – Rythme de croissance en hauteur de l'aulne glutineux (d'après les indications de MARTIN, 1985).

#### • **Humidité**

L'humidité doit être élevée et constante, tant dans le sol qu'au niveau de l'air. Une humidité relative de l'air de moins de 50 % empêche toute germination, même en sol humide. Ainsi, excepté lors d'années à printemps particulièrement humide, dans les régions à faible pluviosité (500 à 650 mm), les semis d'aulne ne s'établissent que sur sols constamment mouillés. De surcroît, après la germination, ce niveau d'humidité doit rester constant pendant environ 1 mois pour assurer la survie du semis. L'humidité semble être la clef de la distribution stationnelle de l'aulne glutineux.

#### • **Oxygénation**

Le semis n'arrive à lever que si la graine se situe à la surface du sol. Dès 5 mm de profondeur, le semis ne lève que si le sol qui le couvre est ressuyé, et au-delà du cm, il n'est plus capable de lever.

- **Lumière**

Selon SUSZKA *et al.* [1994], la germination de la graine ne se fait qu'à la lumière. Par la suite le semis est très exigeant : dès la deuxième année, sa survie exige déjà un éclairage relatif de 20 %, seuil d'ailleurs encore trop faible pour assurer la croissance.

- **Richesse chimique**

La germination des graines est possible dans une gamme de pH comprise entre 3,5 et 7,5. Toutefois, le développement ultérieur de l'arbre nécessite des sols moins acides, caractérisés par un pH supérieur à 4,0 ce qui correspond à la nodulation optimale (5,5 à 7,2 selon GRIFFITHS et MAC CORMICK [1984]) et à la meilleure croissance des plants nodulés (4,2 à 5,4 selon BOND *et al.* [1954]). A l'intérieur de ces valeurs limites, la germination et le développement de l'aulne sont peu influencés par la richesse chimique du sol.

#### 1.2.4. Tempérament

Les caractéristiques du cycle de reproduction de l'aulne glutineux démontrent le haut niveau d'adaptation de l'espèce aux milieux humides et son tempérament colonisateur, par ailleurs mis en évidence par FREMSTAD [1983] dans son étude des successions de végétation en milieu humide.

En effet, la fécondation anémogame et la dissémination hydro- ou anémochore ne font pas appel à la faune ; la germination et les premières phases de développement du semis ne se font qu'en milieu humide. La croissance initiale est très rapide, et se satisfait d'un substrat minéral même oligotrophe. Enfin, l'essence ne se régénère pas sous son couvert car, d'une part, son héliophilie est très marquée et, d'autre part, la litière d'aulne n'est pas favorable au développement racinaire des semis.

De surcroît, en raison de ses besoins en lumière et de sa croissance non soutenue, l'aulne résiste très mal à la concurrence des autres arbres (frêne, chêne, érable). Ainsi, il ne forme une forêt climacique (*Alnetea*) que dans des conditions d'humidité du sol très prononcées où aucune des grandes essences forestières ne peut se développer pleinement [LHOTE, 1985].



## 1.2.5. Pathologies et consommateurs

Jusqu'il y a peu, l'aulne pouvait être globalement considéré comme un arbre sain, en dépit des nombreuses pathologies et divers dégâts dus à des consommateurs qui lui ont été reconnus. Mais à l'heure actuelle, une vague de dépérissement prend de l'ampleur en Europe. Elle est due à un champignon très agressif, *Phytophthora alni*, qui provoque la mort des arbres en 2 à 3 ans [GIBBS, 1996]. Pour notre région, nous avons principalement identifié des défoliations (*Agelastica alni*), des dégâts au collet (*Zeuzera pyrina*), et des dégâts d'abroutissement et de frottis dus au grand gibier.

### 1° Insectes

Trois insectes sont fréquemment cités :

- *Agelastica alni* L., petit coléoptère bleu métallisé, est un défoliateur redoutable, qui peut consommer totalement le feuillage des aulnes. Ses attaques, souvent généralisées, se produisent avec une périodicité de 3 à 5 ans.
- *Zeuzera pyrina* L., *Cossus cossus* L. (lépidoptères) et *Cryptorrhynchus lapathi* L. (curculionidés) creusent des galeries dans le collet des jeunes arbres, créant une entrée possible pour les parasites et fragilisant les troncs.

La littérature cite d'autres défoliateurs parmi les papillons (*Xyllina furcifera*, *Earias clorona* L., *Epinotia* sp., ...) et les chrysomèles (*Byctiscus* sp., *Phylladecta* sp., *Lochmaea caprea* L., ...) [MORRIS, 1983 ; GEYSENS et STEENACKERS, 1985], ainsi que 3 espèces de pucerons, dont *Pterocallis alni* L. parfois mis à profit pour attirer les prédateurs de pucerons [LATTEUR, communication personnelle].

### 2° Maladies cryptogamiques

Depuis le siècle passé, des dépérissements d'aulne ont été signalés en Europe occidentale, notamment en Allemagne dans les années 1920 et 1930 (« erlensterben »). Les plus importants ont été attribués à *Valsa oxystoma* (champignon) et à l'utilisation de provenances non adaptées [SCHMIDT-VOGT, 1971 ; GEYSENS et STEENACKERS, 1983 ; LIEPE, 1990 ; FRANKE, 1994]. Notamment, une origine flamande largement cultivée (variété à forte croissance initiale et à fructification précoce mais à courte longévité, à mauvaise forme et à croissance non

soutenue) a été incriminée. En raison de l'organisation du commerce des graines, l'Europe occidentale a longtemps été fournie en plants forestiers à partir de cette seule variété locale [FRANKE, 1994].

Récemment, *Phytophthora alni*, un nouveau champignon pathogène a été identifié et est responsable d'une nouvelle vague de dépérissement de grande ampleur [GIBBS, 1994].

- ***Valsa oxystoma***

*Valsa oxystoma* est le parasite le plus cité dans la littérature [MORRIS, 1983 ; GEYSENS et STEENACKERS, 1985 ; FRANKE, 1994]. Il peut provoquer la mort des jeunes arbres (12 à 20 ans) sur de grandes étendues, mais est manifestement un parasite secondaire [SCHMIDT-VOGT, 1971].

- ***Phytophthora alni***

Un *Phytophthora* d'une espèce proche de *cambivora* a été isolé pour la première fois en 1993 sur des aulnes dépérissants en Grande-Bretagne [GIBBS, 1994]. Selon BRASIER *et al.* [1995], il s'agit probablement d'une nouvelle espèce de *Phytophthora* spécifique à l'aulne : *Phytophthora alni*. Son impact en Grande-Bretagne est considérable : environ 6 % des aulnes riverains sont fortement affectés, soit 31.000 arbres, dont 35 % sont morts [GIBBS et LONSDALE, 1996]. Pendant la même période, des cas similaires ont été signalés en Europe continentale [HARTMANN, 1995 ; THINGGAARD, 1996 ; GIBBS, 1996 ; SCAILLEREZ, 1997]. La progression de la maladie est préoccupante : en Grande-Bretagne, selon GIBBS et LONSDALE [1996], la maladie a progressé en 1995 (+ 12 % d'arbres atteints). Elle n'affecte à l'heure actuelle que les arbres des cordons rivulaires car les spores sont véhiculés par l'eau. Les infections ont lieu dans la zone du tronc qui est soumise aux inondations ; le champignon y attaque le cambium et annelle l'arbre en 2 ou 3 ans.

## 1.2.6. Aire naturelle

### *1° Distribution géographique*

L'aulne glutineux est une composante des forêts humides planitiales et collinéennes de pratiquement toute l'Europe (figure 1.5). Vers le Nord, sa distribution géographique s'étend jusqu'au Sud de la Finlande, où, selon MAC VEAN

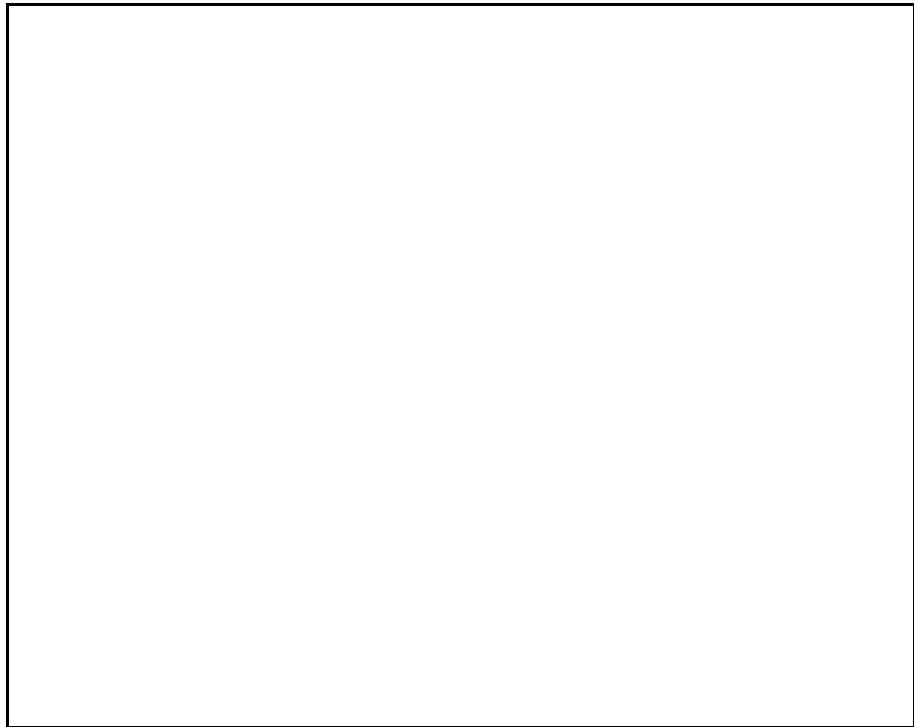
[1953], il résiste au froid jusqu'à  $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$  et n'est exclu que lorsque la période de gel continu dépasse 6 mois. Vers le Sud, il atteint la région méditerranéenne où il se raréfie [SUSZKA *et al.*, 1994] et occupe exclusivement les stations humides. A la faveur de microclimats vallicoles, l'aulne possède aussi quelques localités marginales résiduelles dans l'Atlas tellien [ROISIN, 1986]. Vers l'Est et le Sud-Est, son expansion dépasse légèrement l'Oural et atteint le Caucase, en évitant les plaines de l'Ukraine et du Kazakhstan, suivant ainsi assez fidèlement l'isoyète de 500 mm de précipitations annuelles. Dans la zone steppique, l'aulne est toutefois présent le long des cours d'eau majeurs (Volga, Don et leurs principaux affluents).

*Figure 1.5. - Distribution de l'aulne glutineux en Europe d'après JALAS et SUOMINEN [1976].  
L'espèce est aussi présente dans le Nord de la Turquie, le Caucase, et très localement dans quelques vallées du Maghreb [MEUSEL et al., 1965].*

En altitude, il est observé jusqu'à 1200 m dans les Pyrénées [BECKER *et al.*, 1982], voire 1800 m en Europe centrale [MARTIN, 1985] et orientale [GLAVAC,

1972], mais sa croissance est déjà affectée à partir de 500 m d'altitude sur les hauts-plateaux ardennais [CLAESSENS et THIBAUT, 1994], ce qui accrédite sa préférence pour les plaines et collines.

En Belgique, selon l'Atlas de la flore belge et luxembourgeoise [VAN ROMPAEY et DELVOSALLE, 1972], l'aulne glutineux, bien que présent sur tout le territoire (figure 1.6), se raréfie sur le plateau ardennais et n'est pas observé sur les hauts plateaux de l'Est. Par ailleurs, il est absent de la Hesbaye proprement dite, où l'occupation des terres se partage entre l'agriculture et la populiculture. Il n'est pas non plus présent dans la région de l'estuaire de l'Escaut.



*Figure 1.6. - Distribution de l'aulne glutineux en Belgique selon l'Atlas de la flore belge et luxembourgeoise [VAN ROMPAEY et DELVOSALLE, 1972].*

## ***2° Optimum de dispersion***

Si l'aire de l'aulne est étendue, il faut cependant observer que celui-ci est très souvent disséminé et, dans beaucoup de pays (Grande Bretagne, Belgique,

France, Espagne,...), il n'est présent que dans moins de 1% de la forêt [TUROK *et al.*, 1996].

Toutefois, dans les plaines du Nord de l'Europe centrale (Nord de l'Allemagne, de la Pologne, Biélorussie, Lituanie, Lettonie), des peuplements d'aulne s'étendent sur de grandes surfaces [GLAVAC, 1972] et représentent de l'ordre de 5 % de la surface forestière<sup>(2)</sup> [TUROK *et al.*, 1996]. C'est dans ces plaines que GLAVAC [1972] identifie l'optimum de dispersion de l'espèce.

D'après les données de ROISIN et THILL [1972] et TUROK *et al.* [1996], on peut identifier une deuxième zone moins vaste de forte concentration d'aulne dans les plaines de la Drave et de la Save (Slovénie, Croatie), deux pays où le volume d'aulne sur pied est estimé à quelque 4,4 millions de m<sup>3</sup>.

Compte tenu de l'importance de l'action humaine sur les forêts (agriculture, endiguement, drainage, ...) [NOIRFALISE *et al.*, 1984] et particulièrement sur les forêts alluviales, il n'est pas exclu que la localisation de ces aires de dispersion maximale résulte autant d'actions anthropiques sur l'environnement forestier que d'une réelle prédilection de l'aulne pour les conditions écologiques de ces régions.

### **3° *Optimum de croissance***

L'aulne glutineux n'échappe pas à la règle mise en évidence par les premiers biogéographes : sa productivité augmente globalement du Nord (à la limite du domaine boréal) vers le Sud. Ainsi, les tables de production et les études existantes [GLAVAC, 1972 ; SOPP, 1974 ; SCHOBBER, 1975] montrent que la productivité moyenne s'élève du Nord vers le Sud<sup>(3)</sup>. Dans le même sens, LHOPE [1985] précise qu'en France, c'est dans les Cévennes, les Pyrénées et en Corse que l'aulne atteint les plus grandes dimensions.

### **4° *Différenciation phénotypique***

En considérant l'étendue de l'aire de dispersion de l'aulne, chevauchant les domaines méditerranéen, atlantique et médioeuropéen, on peut s'attendre à l'existence de races géographiques plus ou moins différenciées, adaptées à des conditions climatiques contrastées. D'après la littérature, il apparaît que par rapport

---

<sup>(2)</sup> A titre de comparaison, en Wallonie, selon les données de l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie, les forêts à base d'aulne ne représentent que 0,2% de la surface forestière.

<sup>(3)</sup> On observe toutefois des irrégularités qui, selon GLAVAC [1972], seraient d'origine génétique (génotype adapté).

aux aulnes de l'aire optimale de dispersion, on puisse identifier au moins 3 tendances à la différenciation, assez marquées en termes de croissance et de forme des arbres :

- un écotype Nord-atlantique de Basse Belgique et des Pays-Bas [NOIRFALISE, 1969a ; SCHMIDT-VOGT, 1971 ; LIEPE, 1990 ; FRANKE, 1994] à fructification précoce, à croissance rapide dans le jeune âge mais peu soutenue, et à forme relativement tortueuse,
- un écotype nordique, adapté aux jours longs et aux faibles températures, permettant une bonne croissance dans le climat scandinave [GLAVAC, 1972],
- un écotype méridional, adapté aux conditions de croissance des plaines de la Drave et de la Save, et se caractérisant par une productivité élevée, produisant des aulnes dépassant largement les 30 mètres à pleine maturité [GLAVAC, 1972 ; SOPP, 1974].

Par ailleurs, on peut facilement imaginer que les aulnes du Caucase, de l'Atlas ou de la péninsule ibérique aient aussi pu se différencier. Outre ces races géographiques, SCHMIDT-VOGT [1971] et LIEPE [1990] mettent aussi en évidence, au sein de plantations comparatives, des écotypes édaphiques caractérisés par des structures d'enracinement différentes selon les sols de provenance.

### 1.2.7. Exigences stationnelles

On peut considérer que la croissance des arbres est conditionnée par la disponibilité en chaleur, en eau, en éléments minéraux et, particulièrement dans le cas des sols humides qui nous préoccupent, en oxygène. En ce qui concerne les exigences stationnelles de l'aulne, nous avons recensé dans la littérature les principales indications qui font l'objet des paragraphes suivants.

#### *1° Chaleur*

LHOTE [1985] constate une meilleure croissance dans les climats doux, ce que confirment CLAESSENS et THIBAUT [1994] le long du gradient de température de la Wallonie. Toutefois, compte tenu de ce qui a été vu précédemment concernant l'aire de dispersion, l'optimum de croissance et les écotypes (paragraphe 1.2.6), l'aulne peut être considéré comme peu exigeant en chaleur. MAC VEAN [1953] attribue sa limite de dispersion vers le nord à l'effet de six mois de gel continu. GLAVAC [1972] attire aussi l'attention sur l'existence d'un phénotype finlandais bien adapté aux hautes latitudes.

## **2° Eau**

L'abondance de l'eau dans le sol est considérée comme l'élément clef de la distribution de l'aulne glutineux au sein de son aire naturelle [MAC VEAN, 1953 ; GLAVAC, 1972]. BECKER *et al.* [1982] précisent que la présence de l'aulne est liée aux nappes phréatiques avec lesquelles ses racines doivent être en contact. Selon CLAESSENS et THIBAUT [1994], l'aulne peut aussi se développer en sols à nappe phréatique temporaire, mais avec une croissance ralentie. Dans le même ordre d'idées, LHOTE [1985] note que l'aulne peut avoir un comportement mésophile dans son optimum climatique (doux et humide : Pyrénées atlantiques) et édaphique (acidocline), et dans la partie la plus humide des îles britanniques (où la somme des précipitations annuelles est supérieure à 1000 mm), MAC VEAN [1953] constate qu'une absence de nappe phréatique peut être compensée par la pluviosité élevée.

Quoi qu'il en soit, selon LHOTE [1985], c'est en sols marécageux que l'aulne glutineux, grâce à sa tolérance vis-à-vis des sols asphyxiques, est le plus compétitif et forme fréquemment des peuplements purs. Son optimum de croissance se situe toutefois en sols ressuyés en surface pendant la période de végétation (de type alluvial) dans lesquels CLAESSENS et THIBAUT [1994] observent les meilleures croissances. Ces considérations confirment une certaine sensibilité à l'aération du sol, peu citée dans la littérature, mais qui apparaît déterminante.

## **3° Eléments minéraux**

LANIER [1986] considère l'aulne indifférent à la richesse chimique des sols. Selon divers auteurs [MAC VEAN, 1953 ; NOIRFALISE, 1984 ; MRW, 1991], il est présent sur une gamme d'acidité des sols s'étalant sur des pH de 4,5 à 7,5 de même que sur des humus de type mull à moder, anmoor [RAMEAU *et al.*, 1993], voire tourbe oligotrophe [NOIRFALISE *et al.*, 1971].

Constatant que sa plus grande expansion se situe en sols plutôt acides, BECKER *et al.* [1982] et LHOTE [1985] le rangent plutôt parmi les essences acidoclines. C'est aussi dans ces conditions que BOND *et al.* [1954] constatent la nodulation la plus efficace. En Slovénie, PAVLE *et al.* [1996] l'observent toutefois indifféremment avec des fréquences comparables sur substrat calcaire ou siliceux.

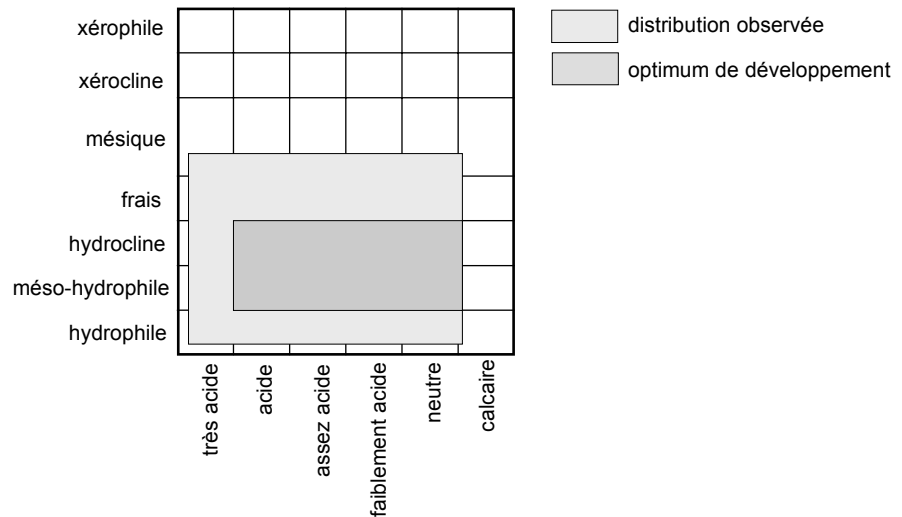


Figure 1.7. - Distribution de l'aulne glutineux selon les niveaux hydrique et trophique des sols (d'après la flore forestière française [RAMEAU et al., 1989]).

#### 4° Synthèse

En guise de synthèse, la figure 1.7, adaptée de la flore française, présente la dispersion de l'aulne glutineux dans l'espace défini par les niveaux hydriques et trophiques du sol (zone grisée). La zone optimale de développement est figurée en plus foncée.

#### 1.2.8. Phytosociologie des forêts de l'aulne

En Europe, la syntaxonomie des forêts de l'aulne glutineux, établie selon les théories de l'école de BRAUN-BLANQUET, fait l'objet d'un très large consensus. Toutefois, au niveau local, nous avons recensé plusieurs propositions de syntaxonomie [SOUGNEZ, 1973, 1978 ; STEIN, 1980 ; NOIRFALISE, 1984]. Ce paragraphe examine chacune d'entre elles et établit, pour la Wallonie, justifications à l'appui, la classification que nous avons adoptée tout au long de notre étude.



### **1° Principaux syntaxons en Europe**

L'aulne est présent dans la majorité des forêts humides de son aire géographique. Dans les systématiques phytosociologiques, il est considéré comme une espèce caractéristique des aulnaies marécageuses et des forêts alluviales, mais il transgresse dans de nombreuses autres associations dont il est une composante des groupes différentiels, notamment au sein des chênaies-charmaies.

Le présent paragraphe ne s'intéresse qu'aux forêts dans lesquelles il est abondant, voire exclusif, dans les domaines phytogéographiques atlantique et médio-européen.

#### **• Alliances**

Les principales synthèses phytosociologiques qui concernent l'aulnaie [BODEUX 1955 ; NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1961 ; YON et TENDRON, 1981 ; RAMEAU, 1995 ; STORTELDER *et al.*, 1998] s'accordent pour distribuer les forêts où l'aulne est dominant dans deux alliances: l'*Alnion glutinosae* [MALCUIT 1929] MÜLL et GÖRS 1958 et l'*Alno-Padion* KNAPP 1942. Il est aussi présent dans d'autres alliances (*Betulion*, *Quercion*, *Carpinion*,...), mais en proportion plus faible.

#### *L'Alnion glutinosae* [MALCUIT 1929] MÜLL et GÖRS 1958

L'*Alnion* est l'alliance dont relèvent les aulnaies proprement dites qui se développent dans des sols marécageux noyés la plupart de l'année par la nappe phréatique. La flore caractéristique est composée, selon le niveau trophique, des groupes de *Cirsium oleraceum* (eutrophe), de *Iris pseudacorus* (mésotrophe) et de *Blechnum spicant* (oligotrophe). Des espèces du groupe des sources de *Cardamine amara*, ainsi que de l'*Alno-Padion* peuvent aussi lui être associées (tableau 1.2) en proportion variable selon les conditions d'humidité.

#### *L'Alno-Padion* KNAPP 1942

L'*Alno-Padion* est l'alliance des forêts alluviales à bois dur à base de frêne, d'ormes et d'aulne, développées sur des sols alluvionnaires, au contact de la nappe phréatique, mais ressuyés en surface pendant la période de végétation. La flore caractéristique de l'alliance est composée du groupe de *Stellaria nemorum* et parfois du groupe neutrophile de *Geum rivale*, auxquels s'associent le groupe nitrophile de *Urtica dioica* et de nombreuses espèces des *Fagetalia*, particulièrement abondantes

dans les ormaies-frênaies (tableau 1.3). Dans les syntaxons les plus hydrophiles, la flore de l'*Alnion* peut aussi s'associer à celle de l'*Alno-Padion*.

Tableau 1.2. - Espèces caractéristiques de l'*Alnion glutinosae* et espèces compagnes fréquemment associées [adapté d'après NOIRFALISE, 1984].

| Espèces caractéristiques                        |   |  | Espèces compagnes                               |
|---|---|--|---|
| neutrophiles<br>( <i>Macrophorbio-Alnetum</i> ) | neutroclines à<br>acidoclines<br>( <i>Carici elongatae-</i><br><i>Alnetum</i> ) | acidophiles<br>( <i>Carici laevigatae-</i><br><i>Alnetum</i> ) | rhéophiles<br>( <i>Carici remotae-Alnetum</i> ) |
| <i>Cirsium oleraceum</i>                        | <i>Iris pseudacorus</i>   | <i>Blechnum spicant</i>  | <i>Cardamine amara</i>                          |
| <i>Equisetum telmateia</i>                      | <i>Lycopus europaeus</i>  | <i>Carex laevigata</i>   | <i>Carex remota</i>                             |
| <i>Carex acutiformis</i>                        | <i>Caltha palustris</i>   | <i>Valeriana dioica</i>  | <i>Chrysosplenium oppos.</i>                    |
|   | <i>Filipendula ulmaria</i>  | <i>Scutellaria minor</i>                                       | <i>Glyceria fluitans</i>                        |
|   | <i>Phalaris arundinacea</i>   | <i>Viola palustris</i>   | <i>Mentha aquatica</i>                          |
|   | <i>Angelica sylvestris</i>  | <i>Equisetum sylvaticum</i>                                    | <i>Ranunculus flammula</i>                      |
|   | <i>Scutellaria galericulata</i>   | <i>Lysimachia vulgaris</i>                                     | <i>Ranunculus repens</i>                        |
|   |   | <i>Osmunda regalis</i>   |   |
|   |   | <i>Sphagnum palustre</i>                                       |   |

Tableau 1.3. - Espèces caractéristiques de l'*Alno-Padion*, et espèces compagnes fréquemment associées [adapté d'après NOIRFALISE, 1984].

| Espèces caractéristiques |                               | Espèces compagnes            |                                 |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| neutrophiles             | constantes                    | nitrophiles                  | mésophiles ( <i>Fagetalia</i> ) |
| <i>Geum rivale</i>       | <i>Stellaria nemorum</i>      | <i>Urtica dioica</i>         | <i>Ranunculus ficaria</i>       |
| <i>Humulus lupulus</i>   | <i>Impatiens noli-tangere</i> | <i>Galium aparine</i>        | <i>Primula elatior</i>          |
| <i>Aconitum vulparia</i> | <i>Carex pendula</i>          | <i>Allaria petiolata</i>     | <i>Glechoma hederacea</i>       |
| <i>Rubus caesius</i>     | <i>Prunus padus</i>           | <i>Geranium robertianum</i>  | <i>Stachys sylvatica</i>        |
| <i>Ribes nigrum</i>      |                               | <i>Aegopodium podagraria</i> | <i>Lamium galeobdolon</i>       |
|                          |                               | <i>Symphytum officinale</i>  | <i>Anemone nemorosa</i>         |
|                          |                               |                              | <i>Oxalis acetosella</i>        |

#### • Associations

Au niveau européen, il serait inapproprié de détailler ici les divisions en associations car celles-ci sont établies à des échelles régionales, voire locales. En ce qui concerne les domaines atlantique et médio-européen, on peut toutefois citer les principales constantes pour lesquelles il semble y avoir un consensus général qui n'a

pas été fondamentalement remis en cause depuis plusieurs décennies [BODEUX, 1955 ; MÖLLER, 1970 ; NOIRFALISE, 1984 ; RAMEAU, 1995].

En ce qui concerne les aulnaies marécageuses (*Alnion*) :

- le *Carici laevigatae-Alnetum* BODEUX 1955 acidophile et atlantique,
- le *Carici elongatae-Alnetum* KOCH 1926 ex TX 1931 acidocline et médioeuropéen,
- le *Macrophorbio-Alnetum* LEMEE 1937 eutrophe<sup>(4)</sup>.

En ce qui concerne les aulnaies-frênaies alluviales (*Alno-Padion*) :

- le *Stellario-Alnetum* LOHMEYER 1957 des petits cours d'eau rapides,
- le *Carici remotae-Fraxinetum* KOCH 1925 des sources et petits cours d'eau en zone calcaire,
- le *Pruno-Fraxinetum* OBERDORFER 1953 (médioeuropéen) et
- l'*Ulmo-Fraxinetum* NOIRFALISE 1984 (atlantique) des plaines alluviales.

## 2° Classification phytosociologique des forêts de l'aulne en Wallonie

On peut considérer que la classification de NOIRFALISE [1984] constitue la base de la systématique phytosociologique en Belgique. Nous la suivrons intégralement pour l'*Alnion* et l'*Alno-Padion*. Toutefois, la syntaxonomie proposée pour les forêts à humidité moins marquée, relevant du *Carpinion* et du *Quercion*, et qui se situent souvent en périphérie des forêts hydrophiles, mérite des ajustements. En affinant ainsi la classification au sein des forêts humides on peut améliorer son adéquation avec les caractéristiques pédologiques et hydrologiques des stations. Elle est ainsi mieux adaptée à l'objectif de notre étude.

En effet, STEIN [1980] et DUMONT [1984] constatent la difficulté de décrire la végétation du plateau hydromorphe ardennais à l'aide de la classification établie par NOIRFALISE ; aussi STEIN [1980] propose-t-il diverses adaptations. D'autre part THILL *et al.* [1988], CLAESSENS *et al.* [1994] et de TILLESSE et DEVILLEZ [1995] reviennent à la classification de SOUGNEZ [1973, 1978] en ce qui concerne les chênaies-charmaies.

Tout au long de notre campagne de mesures, nous avons pu apprécier la pertinence et l'utilité de ces modifications que nous commenterons dans les lignes qui suivent.

---

<sup>(4)</sup> Ou, pour un meilleur respect des règles de syntaxe : *Cirsio Oleracei-Alnetum* NOIRFALISE et SOUGNEZ 1961.

• **Systématique des aulnaies marécageuses (*Alnion glutinosae*) en Wallonie selon NOIRFALISE [1984]**

Outre les 3 associations présentées succinctement au paragraphe 1°, et qui s'ordonnent principalement selon un gradient trophique, NOIRFALISE [1984] distingue aussi une association liée aux sources et aux eaux vives relativement bien oxygénées : le *Carici remotae-Alnetum*, qui s'individualise par la fréquence des espèces du groupe des sources de *Cardamine amara*, et du groupe de *Stellaria nemorum*, transgressant des forêts alluviales avec lesquelles l'aulnaie à *Carex remota* assure la transition. FREMSTAD [1983] en Norvège et STORTELDER *et al.* [1998] aux Pays-Bas font les mêmes observations. RAMEAU [1995] rattache cette association intermédiaire à l'*Alno-Padion*, par analogie au *Carici remotae-Fraxinetum*.

On peut ainsi construire le diagramme systématique de l'*Alnion glutinosae* de la manière suivante (figure 1.8).

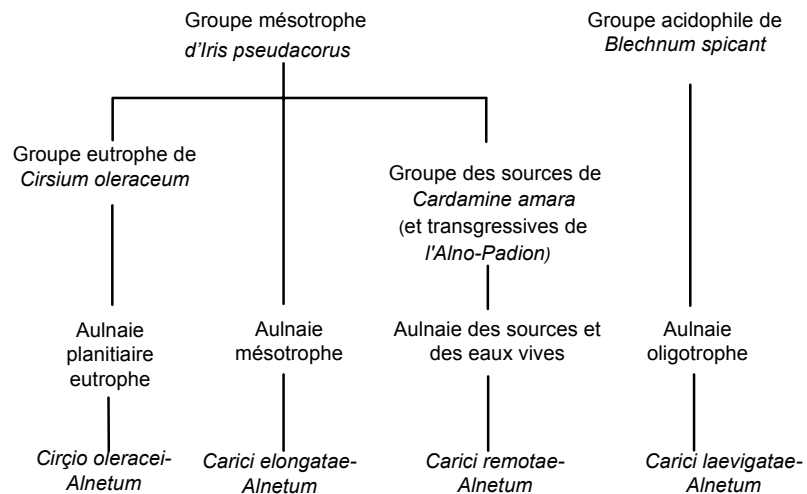


Figure 1.8. - Diagramme systématique de l'*Alnion glutinosae* [d'après NOIRFALISE, 1984].

On notera que NOIRFALISE a choisi d'ordonner ces associations selon un gradient trophique, alors qu'à l'origine, BODEUX [1955] avait défini les aulnaies à *Carex laevigata* et à *C. elongata* en Europe à partir de leurs affinités respectivement atlantique et méditerranéenne. Il est encore suivi dans cette voie par RAMEAU

[1995]. Mais les particularités géomorphologiques et phyto-géographiques de la Belgique ont justifié que NOIRFALISE suggère cette adaptation.

• ***Systématique des forêts alluviales (Alno-Padion) en Wallonie selon NOIRFALISE [1984]***

Au sein de l'*Alno-Padion*, la classification proposée par NOIRFALISE [1984] correspond à la systématique reconnue en Europe. NOIRFALISE a toutefois marqué une différence en définissant l'*Ulmo-Fraxinetum*, association à caractère atlantique, vicariante du *Pruno-Fraxinetum* décrit en Europe méditerranéenne. Nous suivrons rigoureusement cette proposition de classification (paragraphe 1°).

• ***Modifications apportées par STEIN [1980] pour l'écotone chênaie pédonculée - aulnaie acidophile du plateau ardennais***

En ce qui concerne les forêts humides du plateau ardennais, NOIRFALISE [1984] propose, outre l'aulnaie oligotrophe à *Carex laevigata* et les boulaies tourbeuses à aulne, deux associations relevant du *Quercion* : la chênaie pédonculée boréo-montagnarde à trientale (*Trientalo-Quercetum roboris*) et la chênaie sessiflore à luzule, sous-association à fougères (*Luzulo-Quercetum dryopteris-detosum*). Il considère la première comme l'association de l'écotone aulnaie - boulaie pubescente - chênaie acidophile, et la deuxième comme une forêt de substitution de la hêtraie.

Toutefois, en consultant le tableau phytosociologique du *Trientalo-Quercetum* que propose NOIRFALISE, on ne trouve pas de relevé à forte présence d'hydrophiles. L'aulne lui-même n'est présent que dans 10 % des relevés. En fait, comme le constatent DUMONT [1984] et STEIN [1980], on ne peut classer les aulnaies - boulaies ou chênaies - aulnaies qui s'observent sur le plateau ardennais et dont l'aulne est une composante habituelle parmi les syntaxons proposés. Nous avons donc préféré la classification de STEIN [1980], qui couvre mieux l'écotone chênaie - aulnaie (figure 1.9). Celle-ci propose les associations suivantes, qui s'ordonnent selon une humidité du sol décroissante :

- aulnaie acidophile à *Carex laevigata* (*Carici laevigatae - Alnetum*)
- aulnaies-chênaies pédonculées (*Alno glutinosae - Quercetum roboris* STEIN)
- chênaies pédonculées à bouleau pubescent (*Betulo pubescentis - Quercetum roboris* STEIN)

- chênaie sessiflore à luzule (*Luzulo - Quercetum dryopteridetosum*) (substitution des hêtraies humides).

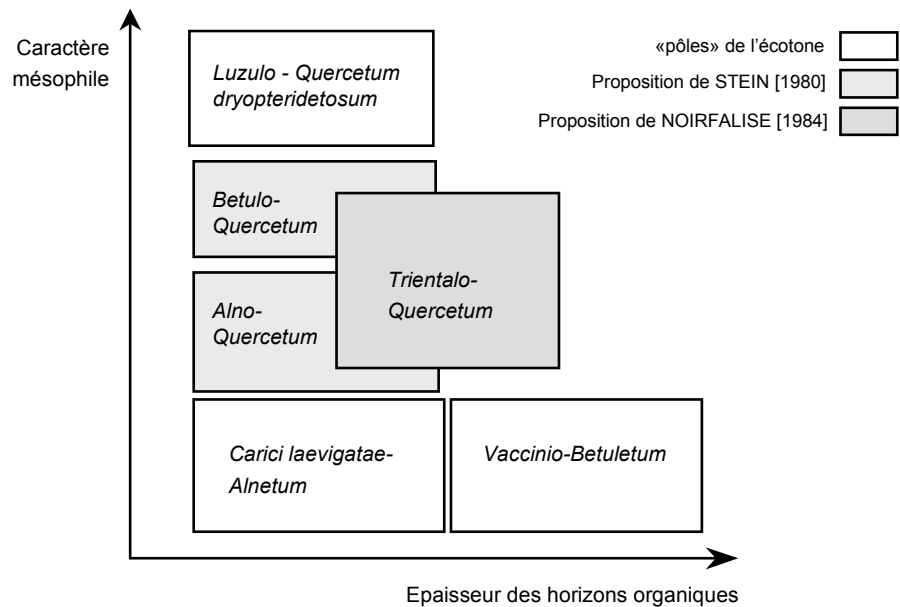


Figure 1.9. - Diagramme écologique des associations forestières de l'écotone « aulnaie - boulaie pubescente - chênaie pédonculée ».

L'auteur précité crée ainsi deux associations caractérisées par le chêne pédonculé et le bouleau pubescent, qui apparaissent comme des forêts climaciques des sols humides oligotrophes du plateau ardennais, non liées à la série régressive de la hêtraie comme c'était le cas dans la classification de NOIRFALISE [1984]. Ce sont en quelque sorte des associations vicariantes du *Querco-Betuletum* de plaine, sans pour autant posséder d'office le caractère boréo-montagnard accusé de la chênaie à trientale que propose NOIRFALISE.

• **Classification de SOUGNEZ [1973, 1978] et NOIRFALISE [1969] pour les chênaies - charmaies (Carpinion)**

Dans l'alliance des chênaies - charmaies, nous avons aussi adopté une systématique différente de celle de NOIRFALISE (tableau 1.4). Elle répond au souci



En guise de synthèse, les figures 1.10 et les tableaux 1.5 et 1.6 présentent la classification phytosociologique que nous avons retenue pour notre étude. La première figure (figure 1.10) situe les alliances existant en Belgique au sein de la classification générale européenne adoptée par NOIRFALISE [1984]. Ensuite les tableaux 1.5 et 1.6 concernent exclusivement les alliances contenant de l'aulne, dont ils énumèrent, pour la Wallonie, les associations. Le premier de ces tableaux est consacré aux alliances dont l'aulne est une espèce du cortège normatif (*Alnion* et *Alno-Padion*), tandis que l'autre contient 3 alliances dans lesquelles l'aulne peut transgresser pour y apparaître comme espèce différentielle (*Betulion*, *Quercion*, *Carpinion*).

#### ***4° Distribution de l'aulne glutineux dans la classification phytosociologique adoptée***

A partir de 435 relevés contenant de l'aulne recensés dans les différentes publications du Centre de Cartographie Phytosociologique [NOIRFALISE, 1952, 1969b ; NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1961 ; NOIRFALISE *et al.*, 1971 ; SOUGNEZ, 1973, 1974, 1978], nous avons établi la distribution de l'aulne glutineux (tableau 1.7) au sein de la classification phytosociologique adoptée (mise à jour du tableau de DETHIOUX, 1974).

On peut observer dans ce tableau que l'aulne est un élément constant des aulnaies marécageuses et des forêts alluviales, et qu'il est en outre présent dans les variantes les plus humides des chênaies-charmaies, et dans les variantes les moins oligotrophes des chênaies acidophiles humides et des boulaies pubescentes.



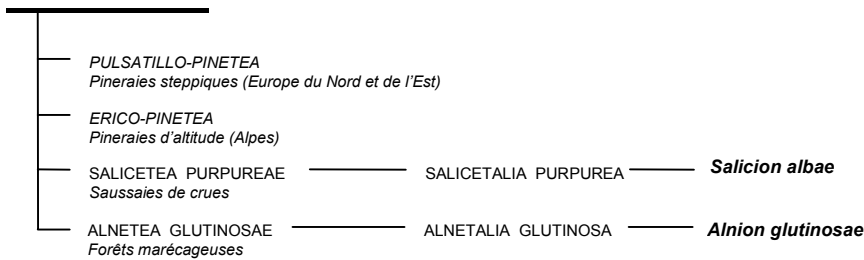
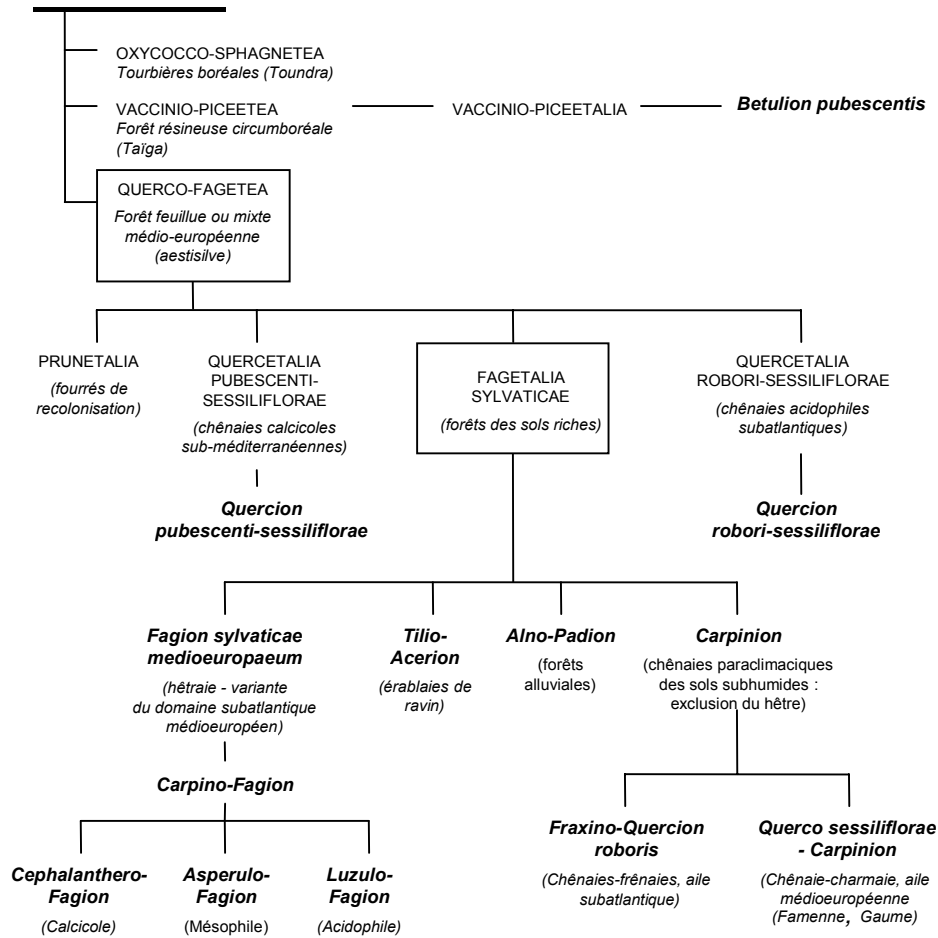
**Classes azonales****Classes zonales**

Figure 1.10. - Classification des alliances phytosociologiques forestières belges selon NOIRFALISE [1984] (alliances du Carpinion selon SOUGNEZ [1978]).

Tableau 1.5. - Association des forêts marécageuses (Alnion et Betulion) et alluviales (Alno-Padion) selon NOIRFALISE [1984].

|   |
|---|
| <p><b>Alnion glutinosae</b> [MALCUIT 1929] MÜLL et GÖRS 1958<br/>(Aulnaies marécageuses)</p> <p>— <i>Cirsio oleracei-Alnetum</i> NOIRFALISE et SOUGNEZ 1961<br/>(aulnaies eutrophes)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>typicum</i></li> <li>. <i>symphytetosum</i></li> <li>. <i>cardaminetosum</i> *</li> </ul> </p> <p>— <i>Carici elongatae-Alnetum</i> KOCH 1926 ex Tx 1931<br/>(aulnaies mésotrophes)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>iridetosum</i></li> <li>. <i>betuletosum</i></li> </ul> </p> <p>— <i>Carici laevigatae-Alnetum</i> BODEUX 1955<br/>(aulnaies oligotrophes)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>typicum</i></li> <li>. <i>valerianetosum</i> *</li> </ul> </p> <p>— <i>Carici remotae-Alnetum</i> LEMEE 1937<br/>(aulnaies fontinales ou à caractère alluvial)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>athyrietosum</i></li> <li>. <i>chrysosplenietosum</i> *</li> <li>. <i>equisetosum</i></li> <li>. <i>stachyetosum</i></li> </ul> </p> |
| <p><b>Alno-Padion</b> KNAPP 1942<br/>(forêts alluviales « à bois dur »)</p> <p>— <i>Ulmo-Fraxinetum</i> NOIRFALISE 1984<br/>(terrasses alluviales élevées des grandes rivières)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>salicetosum</i></li> <li>. <i>aceretosum</i></li> <li>. <i>corydaletosum</i></li> </ul> </p> <p>— <i>Stellario-Alnetum</i> LOHMEYER 1957<br/>(terrasses alluviales des petites rivières)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>athyrietosum</i></li> <li>. <i>aegopodietosum</i></li> </ul> </p> <p>— <i>Carici remotae-Fraxinetum</i> KOCH 1925<br/>(zones de sources neutrophiles)<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>. <i>caricetosum</i></li> <li>. <i>chrysosplenietosum</i></li> <li>. <i>cirsietosum</i></li> </ul> </p>  |

*Alnion stricto sensu* \* Sous-associations fontinales.

Tableau 1.6. - Associations des boulaies tourbeuses (*Betulion pubescentis*), des chênaies acidophiles (*Quercion*) et des chênaies-charmaies (*Carpinion*).

|   |
|---|
| <p><b><i>Betulion pubescentis</i></b><br/>(boulaies tourbeuses)</p> <p>└─ <i>Vaccinio uliginosi-Betuletum pubescentis</i> Tx 1937<br/>(boulaies tourbeuses)<br/>    . <i>typicum</i><br/>    . <i>alnetosum</i><br/>    . <i>eriphoretosum</i></p>  |
| <p><b><i>Quercion robori-sesiliflorae</i></b><br/>(chênaies acidophiles)</p> <p>└─ <i>Betulo pubescentis - Quercetum-roboris</i> STEIN 1980<br/>(chênaies – boulaies pubescentes du plateau hydromorphe ardennais)</p> <p>└─ <i>Alno-Quercetum</i> STEIN 1980<br/>(aulnaies-chênaies pédonculées du plateau hydromorphe ardennais)<br/>    . <i>typicum</i><br/>    . <i>sphagnetosum</i></p>   |
| <p><b><i>Carpinion</i></b><br/>(chênaies-charmaies)<br/>Sauf indication contraire, 3 niveaux d'humidité* :</p> <p>    . <i>méso-hydrocline</i><br/>    . <i>hydrocline</i><br/>    . <i>méso-hydrophile</i></p> <p>└─ <i>Endymio-Carpinetum</i> NOIRFALISE 1969<br/>limons éoliens, domaine atlantique</p> <p>└─ <i>Stellario-Carpinetum</i> SOUGNEZ 1978<br/>limons éoliens, limons caillouteux, acidocline</p> <p>└─ <i>Fraxino-Quercetum roboris</i> SOUGNEZ 1978<br/>limons, neutrocline à neutrophile</p> <p>└─ <i>Pulmonario-Carpinetum</i> SOUGNEZ 1978<br/>argiles et marnes, domaine méditerranéen</p> <p>└─ <i>Polygono bistortae-Quercetum roboris</i> SOUGNEZ 1973<br/>terrasses alluviales hautes des rivières ardennaises, caractère montagnard<br/>    . <i>vaccinietosum</i><br/>    . <i>typicum</i><br/>    . <i>ficarietosum</i></p> |

\* Ces trois niveaux correspondent soit à des sous-associations (cas des 3 premières associations) ou à des variantes (cas du *Pulmonario-Carpinetum*).

Tableau 1.7. - Distribution de l'aulne glutineux au sein des associations forestières belges (modifié d'après DETHIOUX [1974]).

| <i>Association forestière</i>                      | <i>Fréquence de l'aulne parmi les relevés (%)</i> | <i>Recouvrement moyen de l'aulne (%)</i> |
|--|---|--|
| <i>Carpinion</i> (chênaies-charmaies)              |   |  |
| . variantes fraîches (à <i>Athyrium</i> )          | 55  | 3  |
| . variantes humides (à <i>Filipendula</i> )        | 70  | 17                                       |
| <i>Alno - Padion</i> (forêts alluviales)           |   |  |
| - <i>Carici remotae-Fraxinetum</i>                 | 73  | 31                                       |
| - <i>Ulmo-Fraxinetum</i>                           | 78  | 15                                       |
| - <i>Stellario-Alnetum</i>                         | 100   | 50                                       |
| <i>Alnion</i> (aulnaies marécageuses)              | 100   | 49                                       |
| <i>Betulion pubescentis</i> (boulaies pubescentes) |   |  |
| - <i>Vaccinio-Betuletum pubescentis alnetosum</i>  | 24  | 8  |
| <i>Quercion</i> (chênaies acidophiles)             |   |  |
| - <i>Querco-Betuletum alnetosum</i>                | 32  | 6  |
| - <i>Betulo-Quercetum</i> et <i>Alno-Quercetum</i> | 30  | 4  |

### **1.3. L'aulne en forêt wallonne**

Autant dans les paysages agricoles que forestiers, l'aulne glutineux est un élément constant des cours d'eau dont il colonise les berges, formant ainsi des alignements caractéristiques (populations linéaires de crue, MAC VEAN [1956]). Bien que ce type de peuplement ait un rôle important à jouer dans la gestion des écosystèmes alluviaux [HUMBERT et NAJJAR, 1992], notre analyse s'intéresse exclusivement aux aulnes du domaine forestier.

On peut se forger une idée des forêts de l'aulne quant à leur importance, leur composition, leur distribution et leur sylviculture, à partir des données de l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie qui a été mis en œuvre au début des années '80 par la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux [RONDEUX, 1983]. Parmi les quelques 11000 placettes d'échantillonnage qui ont été installées selon un maillage systématique en forêt wallonne (1 placette par 50 ha), les 196 qui contenaient au moins un aulne glutineux ont été analysées en détail, tant en ce qui concerne les peuplements que les stations. Elles sont à la base des considérations qui font l'objet de ce paragraphe.

#### **1.3.1. Importance de l'aulne en forêt wallonne**

En termes de surface et plus encore de volume, l'aulne glutineux est à ranger au nombre des essences secondaires de la forêt wallonne. Les résultats de l'inventaire forestier régional<sup>(5)</sup> montrent que l'aulne est présent sur environ 10.000 ha, soit un peu moins de 2 % de la surface forestière totale, et encore, dans la plupart des cas, dans un mélange où il est minoritaire (moins de 33 % en surface terrière). En termes de volume bois fort tige<sup>(6)</sup>, il représente, avec 300 000 m<sup>3</sup>, 0,3 % du volume de bois sur pied (soit aussi 0,7 % des feuillus). La carte de la figure 1.11 présente, par région forestière, la distribution des placettes de l'inventaire régional comportant de l'aulne glutineux.

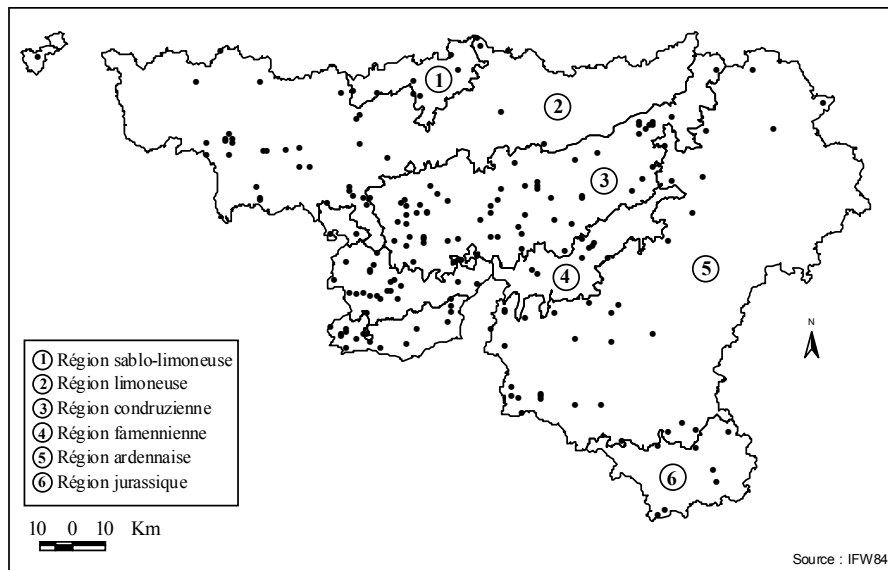


Figure 1.11. - Carte de distribution des placettes de l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie (1984) comportant de l'aulne glutineux, au sein des régions forestières définies par l'inventaire.

<sup>(5)</sup> En raison du petit nombre de points considérés (196), les valeurs chiffrées sont indicatives ; faute d'autres informations, elles permettent toutefois de situer l'aulne parmi les autres essences de la forêt wallonne.

<sup>(6)</sup> Volume bois fort tige : volume jusqu'à la découpe de 22 cm de circonférence.

### 1.3.2. Composition des forêts à aulne

L'aulne est une essence nettement disséminée au sein de peuplements généralement composés de 2 à 5 essences (82 % des cas). A l'échelle des placettes dont la surface varie de 2 à 10 ares, seulement 12 % des peuplements répertoriés sont purs<sup>(7)</sup>, soit 0,2 % des forêts, alors que dans 77 % des cas, l'aulne se présente dans un mélange au sein duquel il est minoritaire.

Selon le tableau 1.8, ses compagnons les plus fréquents sont les chênes et les bouleaux, qui l'accompagnent une fois sur deux, puis le frêne et l'érable sycomore (présents 1 fois sur 3). Ces essences apparaissent 2 à 5 fois plus fréquemment au sein des placettes d'aulne que dans le reste de la forêt wallonne.

Ce tableau montre toutefois que ces observations globales doivent être nuancées selon le régime. L'aulne apparaît nettement moins mélangé en taillis (où il intervient en moyenne pour 42 % de la surface terrière) qu'en futaie (en moyenne 11% de la surface terrière), avec comme corollaire qu'il est plus souvent dominant et n'est généralement mélangé qu'à une à trois essences (79 % des cas). Alors qu'en futaie, l'aulne apparaît le plus souvent au sein de chênaies et de chênaies-frênaies (59 % des cas), en taillis il se rencontre principalement au sein d'aulnaies, d'aulnaies-frênaies, et surtout de boulaies-aulnaies (66 % des cas).

Tableau 1.8. - Fréquence (en %) et importance moyenne (en % de la surface terrière [G] de la placette) des espèces compagnes dans les placettes comportant de l'aulne.

| Espèces<br>compagnes | Fréquence (%)<br>avec aulne |        |       | dans la<br>forêt | Importance<br>moyenne en aulnaie<br>(% G) |        |
|----------------------|-----------------------------|--------|-------|------------------|---|--------|
|                      | taillis                     | futaie | total |                  | taillis                                   | futaie |
| Chênes*              | 19                          | 75     | 53    | 38               | 18  | 50     |
| Bouleaux*            | 53                          | 42     | 46    | 11               | 35  | 41     |
| Erable sycomore      | 30                          | 42     | 38    | 7                | 30  | 15     |
| Frêne                | 19                          | 42     | 33    | 17               | 38  | 9      |
| Hêtre                | 4                           | 22     | 15    | 21               | 11  | 22     |
| Charme               | 15                          | 11     | 12    | 4                | 50  | 7      |
| Tremble              | 8                           | 15     | 12    | 1                | 18  | 9      |

- Sans distinction des espèces.

<sup>(7)</sup> Au sens de l'inventaire régional, un peuplement est considéré comme pur si au moins 67 % de la surface terrière est occupée par une seule essence.

### 1.3.3. Distribution régionale

L'aulne est nettement plus fréquent<sup>(8)</sup> en basse et moyenne Belgique, et particulièrement en plaine, mais surtout, il se raréfie sur le plateau ardennais. Tout comme la carte de la figure 1.11, sa distribution altitudinale le confirme très nettement (tableau 1.9).

Tableau 1.9. - Proportion de forêts feuillues à aulne selon les régions forestières et les classes d'altitude.

| Région forestière         | Fréquence de l'aulne (%) | Classe d'altitude (m) | Fréquence de l'aulne (%) |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Basse et moyenne Belgique | 8,5                      | < 100                 | 11,7                     |
| Condroz                   | 5,6                      | 100 - 199             | 4,5                      |
| Fagne et Famenne          | 3,8                      | 200 - 299             | 6,0                      |
| Basse Ardenne             | 3,1                      | 300 - 399             | 1,4                      |
| Moyenne et haute Ardenne  | 1,6                      | 400 - 499             | 1,5                      |
| Lorraine belge            | 2,0                      | > 500                 | 0,6                      |
| Moyenne                   | 4,0                      | Moyenne               | 4,0                      |

### 1.3.4. Distribution pédologique

L'aulne est deux fois mieux représenté dans les stations caractérisées par une texture limoneuse que sur les autres textures ; 75 % des aulnaies occupent un sol profond et près de la moitié des aulnaies se situent sur des sols alluvionnaires caractérisés par l'absence de développement de profil. En particulier, l'aulne est surtout abondant sur les sols humides comme en témoigne le tableau 1.10. Seuls 22 % des sols qui accueillent l'aulne ne contiennent pas d'indication d'humidité (absence d'hydromorphie, d'horizon B textural, sol peu profond) et ne se situent pas en situation topographique favorable aux apports d'eau par drainage latéral.

<sup>(8)</sup> Pour une caractéristique donnée (par exemple « altitude<100m »), la fréquence de l'aulne correspond au rapport entre le nombre de points contenant de l'aulne avec « altitude<100m » et le nombre de points situés en forêt feuillue avec « altitude<100m ». En ne considérant que les feuillus, on accorde la priorité aux forêts « subnaturelles ». De cette manière, les quelques résultats synthétiques proposés sont certainement utiles à prendre en compte dans la démarche visant à mieux cerner l'autécologie de l'aulne.

Tableau 1.10. - Distribution de l'aulne selon les classes de drainage.

| Classe de drainage*    |                   |       | Fréquence |    |
|------------------------|-------------------|-------|-----------|----|
| sols sans hydromorphie | drainage excessif | a     | 0         | 1  |
|                        | bon drainage      | b     | 1         |    |
| sols à pseudogley      | au delà de 80 cm  | c     | 13        | 6  |
|                        | entre 50 et 80 cm | d     | 13        |    |
|                        | entre 30 et 50 cm | h     | 3         |    |
|                        | avant 30 cm       | i     | 2         |    |
| sols à gley            | sous pseudogley   | e + f | 57        | 29 |
|                        | dès la surface    | g     | 8         |    |

\* selon la classification de la carte des sols de la Belgique (IRSIA).

### 1.3.5. Structure et sylviculture des peuplements

#### 1° Structure

Selon l'inventaire régional, les 9 800 hectares de forêts à aulne se répartissent en 4 150 ha de taillis sous futaie (42 %), 4 000 ha de taillis simples (41 %) et 1 650 ha de futaie (17 %) (figure 1.12).

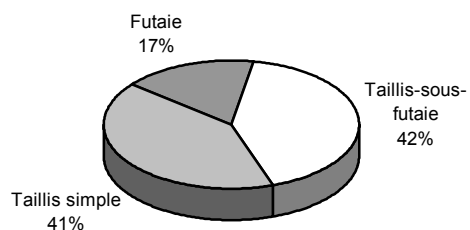


Figure 1.12. - Répartition des forêts à aulne selon les régimes.

Le volume total des aulnes est estimé à 300 000 m<sup>3</sup> de bois fort, qui se répartissent en 200 000 m<sup>3</sup> de taillis (taillis simple et taillis du taillis sous futaie confondus) et 100 000 m<sup>3</sup> de futaie (futaie et réserve du taillis sous futaie confondus).



Si l'on considère la répartition des volumes par catégories de circonférence moyenne (figures 1.13 et 1.14), on constate que les bois de plus de 120 cm de circonférence, qui correspondent au minimum actuellement requis pour figurer dans les catégories commerciales de valeur (tranchage, sciage) ne représentent que 13 % du volume des bois de futaie et 3 % du volume total d'aulne (futaie + taillis). La circonférence moyenne générale des aulnes est de l'ordre de 50 cm. On s'aperçoit ainsi que les aulnes de valeur commerciale sont pratiquement inexistantes au sein de la forêt wallonne.

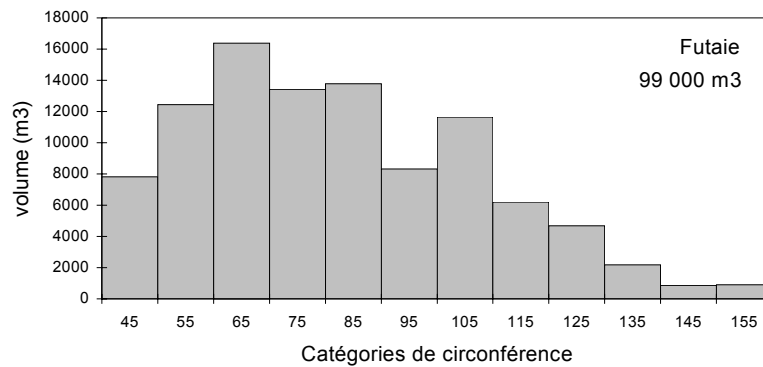


Figure 1.13. - Répartition du volume bois fort tige d'aulne de futaie (en m<sup>3</sup>) selon les classes de circonférence à 1,5 m au-dessus du niveau du sol (en cm).

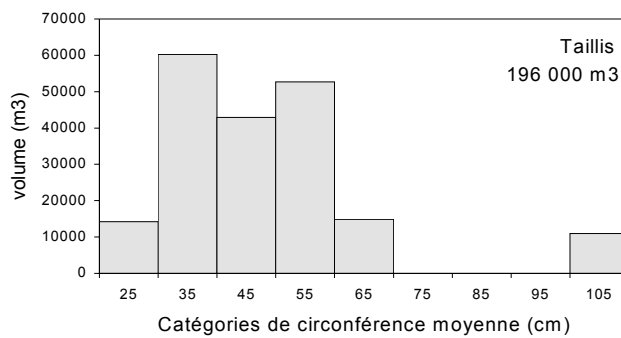


Figure 1.14. - Répartition du volume bois fort tige d'aulne de taillis (en m<sup>3</sup>) selon les classes de circonférence à 1,5 m au-dessus du niveau du sol (en cm).

## 2° Sylviculture

La structure actuelle de l'aulnaie est largement conditionnée par l'absence de sylviculture adaptée à l'essence. En effet, jusqu'aux années '90, l'aulne a rarement fait l'objet d'interventions visant à le mettre en valeur et, très souvent, il se rencontre en futaie dense ou en taillis vieillissant non éclairci, tandis qu'au sein des taillis sous futaie, il se présente rarement sous forme d'arbre dominant à cime bien développée.

Dans une minorité de peuplements, parmi les plus accessibles, on observe occasionnellement des interventions sylvicoles telles que le *balivage intensif* (au sens de HUBERT [1983]<sup>(9)</sup>) visant à convertir les taillis, ou les éclaircies fortes dans le cadre de la *futaie claire* (au sens de BOUDRU [1968]). Des dépressages ont parfois lieu dans les régénérations et les jeunes peuplements, mais ils sont généralement trop tardifs et mal adaptés au rythme de croissance de l'espèce.

Plus localement, une étude régionale réalisée en basse et moyenne Ardenne [CLAESSENS, 1987<sub>a</sub>] révèle que l'état actuel des peuplements n'est pas adapté à l'objectif de production de bois de qualité. Seulement 5 % des aulnaies sont traitées en futaie et 25 % des taillis sont en phase de conversion. Dans cette région, la production d'aulne est donc dirigée vers des filières de qualité inférieure, non spécifiques et peu valorisantes (papier, bois de feu, caisserie,...).

Toutefois, suite à l'actuel regain d'intérêt pour les essences alternatives (selon LECOMTE *et al.* [1997], les surfaces de forêts de feuillus mélangés, quelles qu'en soient les essences, sont en augmentation de l'ordre de 24 % au cours de ces 10 dernières années), nous avons observé qu'une rapide modification des pratiques est en cours. De nombreuses plantations sont installées dans toute la région, au sein desquelles des éclaircies mieux adaptées sont programmées. L'aulne se range en effet en quatrième position parmi les essence feuillue faisant l'objet de demandes de subvention à la plantation auprès de la DNF<sup>(10)</sup> [LAURENT, communication orale].

---

<sup>(9)</sup>Balivage intensif : Au sens de HUBERT [1983], le balivage intensif est une opération destinée à convertir un taillis en futaie dense en 2 ou 3 interventions. Son principe est de réserver un très grand nombre de pieds et d'éclaircir ensuite délicatement le peuplement résultant, contrairement au balivage « traditionnel » qui consiste en une seule opération de très forte intensité.

<sup>(10)</sup> DNF : Division Nature et Forêts (Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement).

## ***1.4. Fonctions écologiques de l'aulne glutineux et de ses forêts***

Comme nous l'avons précisé en introduction, les forêts de l'aulne ont la particularité de constituer l'interface entre les écosystèmes terrestres et aquatiques ou subaquatiques. Par cette position, elles jouent un rôle fondamental dans la vie aquatique, la régulation des crues ou la protection des nappes phréatiques.

Par ailleurs, les faibles surfaces encore couvertes par les forêts humides ont une importance particulière en matière d'habitat et de biodiversité.

Enfin, dans certaines situations, l'apport d'azote, le drainage biologique et le « travail » racinaire que fournit particulièrement l'aulne jouent un rôle fondamental dans la fertilité des stations.

Toutes ces fonctions, qui font l'objet des paragraphes suivants, sont à prendre en compte dans le cadre de la gestion intégrée des forêts humides. Ainsi, dans le dernier chapitre (chapitre 7), ces fonctions écologiques seront envisagées plus localement dans le cadre du catalogue des stations que nous avons mis au point.

### **1.4.1. Contribution à la biodiversité**

#### ***1° Diversification et optimisation de l'utilisation du milieu***

En forêt wallonne, l'ensemble des essences indigènes autres que le hêtre et les chênes ne représentent que 7 % du volume de bois sur pied [RONDEUX *et al.*, 1986]. Elles ont pourtant leurs spécificités qu'il est intéressant de valoriser [ROISIN, 1986 ; THILL, 1988], et peuvent représenter une alternative aux grandes « monocultures forestières » [THILL et MATHY, 1980 ; CLAESSENS, 1995]. Parmi ces essences, l'aulne glutineux, par ses adaptations physiologiques [GILL, 1970 et 1975 ; LIEPE, 1990 ; CRAWFORD, 1992], exploite de manière optimale le créneau des sols humides [THILL, 1982 ; CLAESSENS et THIBAUT, 1994].

#### ***2° Habitats et biodiversité***

Les forêts humides, et principalement alluviales, sont caractérisées par des gradients écologiques importants. Il n'est plus à démontrer que cela se traduit par un grand potentiel de diversité d'habitats et d'espèces spécifiques dont beaucoup sont devenues rares [DUVIGNEAUD et SAINTENOY-SIMON, 1995]. Selon SCHNITZLER et

CARBIENER [1993], les forêts alluviales du Rhin comportent 51 espèces ligneuses spontanées ; leur indice de SHANNON<sup>(11)</sup> est environ 5 fois plus élevé que celui des forêts de terre ferme du même territoire biogéographique.

Mais, en raison de la productivité des milieux alluviaux, l'agriculture est entrée en concurrence avec la forêt. Par le drainage et le contrôle des crues, l'utilisation humaine des plaines a fondamentalement modifié l'équilibre écologique des forêts riveraines, qui ont dérivé vers des formes banalisées plus proches des chênaies-charmaies [NOIRFALISE, 1984]. Les rares entités relictuelles qui subsistent encore constituent alors des refuges pour toutes les espèces qui leur sont liées ; les plus fidèles d'entre-elles étant devenues rares ou étant en régression.

### ***3° Implications sylvicoles***

Dans les forêts de haute qualité biologique, il y a lieu d'envisager des interventions sylvicoles extensives respectant notamment la structure et l'évolution spontanée des peuplements. Les modifications du milieu physique, qui entraînent une banalisation des écosystèmes telles que le drainage ou la modification des cours d'eau sont à proscrire.

Dans le même ordre d'idées, il serait opportun, d'un point de vue écologique et scientifique, de soustraire une partie de ces zones sensibles (ZHIB, réserves naturelles) de toute intervention sylvicole.

Par ailleurs la restauration de forêts humides ou alluviales dégradées doit aussi s'envisager par l'intermédiaire d'aménagements forestiers et par la mise au point d'« itinéraires sylvicoles » susceptibles de motiver les propriétaires à l'utilisation des espèces indigènes et des forêts « subnaturelles ».

On notera que les politiques environnementales actuelles vont dans ces sens : elles sont axées sur le maintien de la biodiversité et de la dynamique qui caractérisent ces forêts, voire sur l'augmentation de leurs surfaces. Ainsi, les directives européenne (directive « habitat ») et régionale (sectorialisation de la forêt wallonne) attribuent un statut de conservation aux forêts marécageuses et alluviales (*Alnion*, *Alno-Padion*, *Betulion*, *Alno-Quercetum*, ...).

---

<sup>(11)</sup> L'indice de SHANNON est couramment utilisé pour définir le niveau de complexité atteint par une communauté. Il tient compte du nombre total d'espèces, mais aussi de la fréquence de chacune.

## 1.4.2. Amélioration du sol

### *1° Apport d'azote*

Nous avons vu que les aulnes développent des nodosités racinaires fixatrices d'azote atmosphérique. Après la chute des feuilles, cet azote est restitué au sol, et ce d'autant plus facilement que la feuille d'aulne, en raison de sa haute teneur en azote, est très rapidement dégradée [DELECOUR, 1989 ; SCHÜTZ, 1990]. Ainsi, en conditions forestières, de l'ordre de 30 à 130 kg d'azote/ha/an sont annuellement restitués au sol [MOIROUD, 1991] et se concentrent principalement dans l'horizon humifère [SWANSTON et MYLORD, 1997].

Par son effet direct, cette fertilisation « biologique » permet d'accroître significativement le potentiel de production des stations [SCHLESINGER et WILLIAMS, 1984], mais aussi, indirectement, l'apport d'azote nitrique améliore la disponibilité du potassium [COTE et CAMIRE, 1987], du phosphore [GIARDANA *et al.*, 1995] et des cations bivalents [HOMANN *et al.*, 1994], tandis que les feuilles des essences mélangées à l'aulne sont aussi enrichies en azote, ce qui facilite leur décomposition [MOIROUD, 1991].

### *2° Structuration du sol et drainage biologique*

La puissance et la profondeur de l'enracinement structurent le sol et donnent accès à des réserves nutritives profondes qui sont susceptibles d'enrichir les horizons superficiels en éléments minéraux. Allié à une consommation d'eau supérieure à la moyenne [BRAUN, 1974], l'important développement du système racinaire dans les sols humides réalise un drainage « biologique » non négligeable [LEVY, 1982].

### *3° Implications sylvicoles*

L'aulne glutineux présente donc un indéniable intérêt dans les sols humides oligotrophes. Nous verrons qu'il est opportun de tirer parti de son introduction en forêt au sein de certaines stations ardennaises dont il a pourtant presque disparu.

### 1.4.3. Filtration et épuration des eaux de surface

#### *1° L'action des forêts humides*

En tant qu'élément essentiel des forêts humides, et particulièrement des zones de sources et des forêts alluviales, l'aulne participe à la filtration et à l'épuration des eaux, notamment en ce qui concerne les matières en suspension, les phosphates et les nitrates des écoulements de surface et des nappes alluviales.

De nombreux auteurs ont mesuré le pouvoir épurateur des ripisylves [PETERJOHN et CORREL, 1984 ; PINAY et LABROUE, 1986 ; FUSTEC, 1992 ; SCHNITZLER et CARBIENER, 1993 ; DECONCHAT et BALENT, 1996]. De leurs travaux, il ressort que :

- les forêts alluviales interceptent les particules solides et éléments dissous transportés par les eaux de ruissellement et les écoulements souterrains. Ces dépositions sont maximales après quelques dizaines de mètres de parcours ;
- les forêts rivulaires sont le siège d'une importante dénitrification : 30 à 50 m de forêt suffisent pour que 75 à 100 % des nitrates soient dénitrifiés. Cette fonction n'est pleinement réalisée que dans des conditions anaérobiques (forte imbibition du sol), et perd donc de son efficacité en cas de drainage du sol [STOUT et SCHNABEL, 1997].
- les phosphates sont piégés dans le sol avec les particules solides [WALL *et al.*, 1996], de même que, selon WIEBE *et al.* [1996], les pesticides.

PETERJOHN et CORREL [1984] ont mis en évidence que cette fonction d'épuration est aussi remplie par les prairies alluviales, mais avec une efficacité nettement moindre, comme le montrent aussi les travaux de FUSTEC *et al.* [1991] et STOUT et SCHNABEL [1997]. En effet, selon FUSTEC *et al.* [1991], l'efficacité de la fonction de filtre dépend de la réduction de la vitesse des écoulements superficiels et de l'augmentation du temps de résidence des eaux de ruissellement et souterraines. La végétation forestière naturelle des zones riveraines remplit au mieux ces rôles car l'exploration du sol par les racines y est optimale et la végétation herbacée et arbustive y est dense [ADAM *et al.*, à paraître].

## **2° Implications sylvicoles**

Il est donc d'un grand intérêt de maintenir et développer les surfaces de forêts humides, particulièrement dans les zones de sources ou en contact avec les cours d'eau. L'efficacité de ces forêts dépendra toutefois de leur intégrité. Ainsi, dans toute intervention sylvicole, il est important :

- de respecter la structure et la composition de ces forêts, aptes à jouer le meilleur rôle d'interception des polluants ;
- de maintenir leur caractère humide ou marécageux, gage du bon fonctionnement de la dénitrification, en évitant de drainer le sol ou de créer des axes drainants par une exploitation mécanisée mal adaptée.

Dans un objectif de protection des sols, les opérations sylvicoles devront être mécanisées de manière adéquate (matériel léger, cablage, traction chevaline, ...), afin de ne pas détruire, par tassement, la structure des sols, particulièrement fragile en cas d'hydromorphie [DELECOUR, 1987].

### **1.4.4. Régulation du régime hydrologique des cours d'eau**

La forêt joue un rôle sur la régulation des débits des cours d'eau, d'une part en interceptant les eaux de pluie et en favorisant leur infiltration dans le sol (pouvoir de rétention) et, d'autre part, en freinant la vitesse d'écoulement des eaux, spécialement lors des crues (« écrêtage » des pics de crue).

#### **1° Pouvoir de rétention des forêts**

Selon HUMBERT et NAJJAR [1992], les arbres interviennent de différentes manières sur le régime hydrologique des cours d'eau :

- interception des précipitations, variable selon les essences, les saisons et les caractéristiques des pluies ;
- consommation d'eau, variable selon les essences et les saisons ;
- influence, par les effets de l'enracinement, sur la capacité de rétention d'eau des sols et sur la circulation de l'eau (meilleure porosité, taux de matière organique plus élevé), variable selon les essences et les caractéristiques géologiques et pédologiques des bassins versants.

L'impact de la forêt est donc variable et doit être raisonné en fonction des essences, des saisons et des caractéristiques des pluies et des bassins versants. Néanmoins, les auteurs s'accordent pour considérer que dans les régions tempérées, les forêts feuillues permettent une meilleure recharge des nappes, diminuent les débits moyens hivernaux, tandis que leur effet sur le niveau d'étiage est moins évident. Ils s'accordent aussi pour considérer que les boisements d'épicéa, par leur plus forte interception des pluies et leur colonisation racinaire superficielle accentuent les étiages et ne régulent pas les crues hivernales. Aux USA, WIEBE *et al.* [1996], reconnaissent le rôle positif des forêts dans la recharge des nappes et les écoulements hypodermiques et considèrent que les forêts humides atténuent les pics de crue. Ainsi, ils attribuent l'importance des récentes crues du Mississippi (1993, notamment) à la déforestation des zones humides du bassin versant, qui s'est élevée à plus de 500 000 ha de 1954 à 1992.

### ***2° Ecrétage des crues***

Le rôle des forêts alluviales dans la rétention de l'eau est d'un grand intérêt dans la régulation des crues [MEROT et REYNE, 1996]. L'inondation du lit majeur des cours d'eau permet d'étaler les pics de crue. Ainsi, les forêts alluviales humides et marécageuses, constituées d'essences supportant l'inondation temporaire, pourraient alors jouer le rôle de bassin d'écrétage, diminuant fortement les amplitudes et la vitesse de transfert des ondes de crue. Par le caractère épurateur de la forêt, ces bassins auraient aussi une fonction de reconstitution des réserves d'eau souterraine de qualité [SCHNITZLER et CARBIENER, 1993].

### ***3° Implications sylvicoles***

Les rôles de régulation des eaux et d'écrétage des crues sont manifestement les mieux assurés par la structure et la composition de la forêt feuillue spontanée. Les interventions sylvicoles devront donc respecter ces 2 caractéristiques, en s'appuyant, dans les zones inondables, sur les essences supportant l'inondation temporaire du sol, en particulier l'aulne glutineux.



### 1.4.5. Relation avec l'écosystème aquatique<sup>(12)</sup>

Les forêts rivulaires, par leur contact avec les cours d'eau, assurent plusieurs fonctions dans l'écosystème rivière :

- leur couvert régule la luminosité parvenant à la rivière ;
- les retombées organiques (insectes, déjections, feuilles, bois, etc...) constituent une source nutritionnelle très importante dans certains tronçons de la rivière ;
- l'enracinement des arbres sur la berge, et principalement celui de l'aulne, procure des abris à la faune aquatique, mais surtout, par son action mécanique, fixe les berges et ralentit localement le courant.

#### *1° Couvert, luminosité et température de l'eau*

Le couvert des strates ligneuses détermine la luminosité parvenant à la berge et dans le cours d'eau. Or cette luminosité joue un rôle déterminant dans l'écosystème rivière :

- elle permet le développement de la végétation ripariante et aquatique ;
- lorsque l'approvisionnement en matières minérales est satisfaisant, elle détermine la productivité primaire de la rivière ; celle-ci atteint son maximum dès 10 à 20 % d'éclairement relatif. A l'opposé, si les conditions trophiques le permettent, un fort éclairement peut être responsable d'une prolifération excessive de végétaux (callitriches, renoncules, ...).

D'autre part, le couvert tamponne le régime thermique du cours d'eau, limitant les écarts thermiques journaliers et l'élévation de la température dont dépendent de nombreux paramètres fondamentaux (teneur en oxygène, toxicité des métaux lourds, développement des organismes, multiplication des pathogènes, ...).

Le contrôle du couvert est donc fondamental pour l'équilibre de la rivière et doit s'envisager en fonction de la largeur du cours d'eau, de son niveau trophique et selon les zones piscicoles.

---

<sup>(12)</sup> D'après l'étude de MASON *et al.* [1984] et la synthèse bibliographique de BAAR *et al.* [1996].

## **2° Enracinement, habitats et protection des berges**

Les arbres enracinés sur les berges remplissent principalement 2 fonctions vis-à-vis du cours d'eau : ils participent à la *dynamique des cours d'eau* et procurent des *habitats* ou sont source de refuge.

### **• Dynamique des cours d'eau**

Il a été mis en évidence que la dynamique du recouplement des méandres dépend de la végétation des berges et du lit majeur. A ce titre, une forêt rivulaire « spontanée » assure une certaine stabilité du chenal. En effet, l'enracinement augmente le coefficient de rugosité des berges, diminuant ainsi la vitesse du courant, tandis que, lors des inondations, la végétation du lit majeur freine le courant de la même manière.

### **• Habitats**

Les sous-berges créées par l'enracinement des aulnes sont autant de refuges à disposition de la faune piscicole et particulièrement de la loutre (*Lutra lutra* L.). Dans un autre cadre, les déracinements et chablis provoquent des modifications des lignes de courant et des dépôts, participant à la différenciation et à la multiplicité des habitats.

## **3° Galerie forestière et apports nutritionnels**

Dans les parties supérieures des rivières, les apports nutritifs en provenance de la galerie forestière peuvent dépasser la production primaire du cours d'eau. Ils sont donc fondamentaux. Ils sont constitués de retombées de matières organiques diverses sous forme de feuilles, de bois, d'insectes, de leurs déjections, etc... dont la qualité varie selon les types de végétation. En particulier, la décomposabilité des fanes, proportionnelle à leur rapport C/N, ainsi que leur composition chimique (présence de substances toxiques) sont déterminantes. Ici encore, les essences de la forêt alluviale « spontanée » (aulne, frêne, érable, charme) ont la meilleure qualité nutritionnelle.

#### **4° Implications sylvicoles**

En bordure du cours d'eau, la sylviculture des peuplements doit s'adapter aux fonctions primordiales que remplissent les galeries forestières au sein des écosystèmes rivière.

D'une part, les feuillus des forêts alluviales spontanées doivent avoir un rôle prépondérant en raison de leur couvert léger et de la qualité nutritionnelle de leur fane, et en particulier l'aulne glutineux, dont l'enracinement, en se développant sous le niveau des eaux, assure une bonne stabilité des berges. On notera que cette mesure est déjà partiellement respectée en raison des dispositions légales en vigueur (loi du 12/7/1973 sur la conservation de la nature).

D'autre part, la pérennité des galeries doit préférentiellement s'envisager à partir de la régénération naturelle, qui assure la variété des espèces et des couverts, ainsi qu'un peuplement discontinu, multipliant ainsi la diversité des habitats.

Pour disposer d'écosystèmes rivière de haute qualité, il serait idéal d'envisager des zones protégées où le vieillissement des arbres des berges amènerait des chablis importants, modifiant régulièrement les lignes de courant et la topographie du lit. De telles mesures seraient toutefois à envisager dans le contexte hydrologique d'un bassin versant afin de bien évaluer les risques que représenteraient ces embacles au cours des crues. On notera toutefois que les 2 mesures précédentes assurent la réversibilité des galeries forestières « entretenues » vers des conditions « naturelles ».

#### **1.4.6. Synthèse**

En guise de synthèse, nous pouvons établir le tableau 1.12 présentant les principales fonctions écologiques des forêts humides.

Ces fonctions ne peuvent être assurées par la gestion forestière que si un certain nombre de « contraintes de gestion » sont respectées, se traduisant par l'application de mesures sylvicoles ou d'aménagement.

Le tableau 1.13 montre les multiples relations existant entre les principales mesures sylvicoles ou d'aménagement et les fonctions écologiques des forêts humides. Il montre aussi que les mesures évoquées sont de 3 ordres (choix des essences, sylviculture et fonctionnalité des sols) et servent parfois de nombreuses fonctions. Toutefois, nous ne pouvons appréhender plus précisément les mesures sylvicoles

adéquates qu'à partir d'une analyse plus locale des fonctions écologiques compatibles avec les différents types de stations humides. Ainsi, nous reviendrons sur cette analyse au sein du catalogue de stations ardennaises (chapitre 7).

*Tableau 1.12. – Principales fonctions écologiques remplies par les forêts humides « spontanées » et par l'aulne glutineux en particulier.*

| <b>Domaines</b>    | <b>Fonctions</b>   |
|--------------------|--|
| Biodiversité       | . Spécificité et diversité des espèces et des habitats   |
| Sols               | . Fertilisation (azote) et accélération du turn-over<br>. Structuration du sol (enracinement)<br>. Drainage biologique (enracinement et transpiration) |
| Hydrologie         | . Régulation des régimes hydrologiques<br>. Compatibilité avec l'expansion des eaux de crues dans le lit majeur  |
| Qualité des eaux   | . Dénitrification<br>. Filtration  |
| Ecosystème rivière | . Régulation de la luminosité<br>. Source nutritionnelle<br>. Fixation des berges  |

## ***1.5. Valorisation de la production de bois***

### **1.5.1. Croissance et production**

Les données existantes concernant la production proviennent de régions biogéographiques différentes de celle à laquelle notre étude se réfère, mais où l'aulne glutineux est abondant en peuplements étendus : bassin du Danube et plaines du Nord de l'Europe centrale. Ces données permettent toutefois de se faire une idée de la croissance de l'aulne. Ainsi, le tableau 1.14 présente les principales tables de production de l'aulne, l'une se rapportant aux aulnaies de l'Allemagne du Nord [SCHOBER, 1975], l'autre aux peuplements de la plaine du Danube [SOPP, 1974]. Ces tables sont présentées dans leur intégralité dans l'annexe 3.

Par ailleurs, en se référant aux tables allemandes compilées par SCHOBER [1975] pour les différentes essences, nous pouvons comparer la croissance de

Tableau 1.13. - Principales mesures sylvicoles liées aux fonctions écologiques des forêts humides.

| <i>Fonctions écologiques</i>           | <i>Liens</i> | <i>Mesures sylvicoles</i>   |                         |
|--|--------------|---|-------------------------|
| Amélioration de la biodiversité        |              | Mélange d'espèces héliophiles assurant la diversité des formes d'enracinement           | Choix des essences      |
| Amélioration des sols                  |              | Présence de l'aulne glutineux (résistance à l'inondation et enracinement en sols à gey) |                         |
| Protection des sols                    |              | Mélange de strates et de stades évolutifs   | Sylviculture            |
| Régulation hydrologique                |              | Vieillessement de la forêt  |                         |
| Filtration et épuration des eaux       |              | Absence de fertilisation  | Travaux et exploitation |
| Fonctionnement de l'écosystème rivière |              | Absence de drainage artificiel  |                         |
|  |              | Mécanisation « légère » de l'exploitation (sans orniérage ou compactage)                |                         |

Tableau 1.14. – Tables de production hongroises [SOPP, 1974] et allemandes [MITSCHERLICH, in : SCHÖBER, 1975].

| Tables de production de l'aulne glutineux |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
|---|------|----------------------|---------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Age                                       | N    | Peuplement principal |                           |        |                           | Eclaircies                |                              | Peuplement total             |                              |                              |
|   |      | Hmoy<br>(m)          | G<br>(m <sup>2</sup> /ha) | D (cm) | V<br>(m <sup>3</sup> /ha) | V<br>(m <sup>3</sup> /ha) | Vtot<br>(m <sup>3</sup> /ha) | Vtot<br>(m <sup>3</sup> /ha) | AAMv<br>(m <sup>3</sup> /ha) | AACv<br>(m <sup>3</sup> /ha) |
| <b>MITSCHERLICH, Allemagne</b>            |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| Classe 1                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 20  | 1578 | 15,1                 | 16,4                      | 11,5   | 110                       | -                         | -                            | 110                          | 5,5                          | -                            |
| 40  | 665  | 20,8                 | 22,6                      | 20,8   | 228                       | 29                        | 106                          | 334                          | 8,4                          | 9,8                          |
| 60  | 363  | 29,0                 | 23,9                      | 29,0   | 283                       | 29                        | 224                          | 513                          | 8,6                          | 9,0                          |
| 90  | 190  | 40,1                 | 24,0                      | 40,1   | 325                       | 26                        | 393                          | 718                          | 8,0                          | 6,4                          |
| Classe 2                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 20  | 1698 | 11,1                 | 14,7                      | 10,5   | 68                        | -                         | -                            | 68                           | 3,4                          | -                            |
| 40  | 723  | 17,1                 | 20,5                      | 19,0   | 171                       | 22                        | 76                           | 247                          | 6,2                          | 6,0                          |
| 60  | 395  | 20,7                 | 21,5                      | 26,3   | 216                       | 24                        | 172                          | 388                          | 6,5                          | 5,1                          |
| 90  | 203  | 24,5                 | 21,5                      | 36,7   | 249                       | 22                        | 308                          | 557                          | 6,2                          | 3,8                          |
| Classe 3                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 20  | 2587 | 8,6                  | 13,0                      | 8,0    | 39                        |                           |                              | 39                           | 2,0                          | -                            |
| 40  | 989  | 13,5                 | 18,4                      | 15,4   | 133                       | 15                        | 50                           | 163                          | 4,1                          | 8,2                          |
| 60  | 523  | 16,7                 | 19,0                      | 21,5   | 156                       | 17                        | 116                          | 272                          | 4,5                          | 6,5                          |
| 90  | 272  | 20,2                 | 19,0                      | 29,8   | 186                       | 16                        | 219                          | 405                          | 4,5                          | 5,1                          |
| <b>SOPP, Hongrie</b>                      |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| Classe 1                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 5   | 2900 | 6,8                  | 11,2                      | 6,9    | 50                        | 12                        | 12                           | 62                           | 12,4                         | -                            |
| 20  | 960  | 17,8                 | 23,3                      | 17,7   | 210                       | 25                        | 79                           | 289                          | 14,4                         | 15,4                         |
| 40  | 530  | 24,4                 | 32,1                      | 27,7   | 390                       | 27                        | 186                          | 576                          | 14,4                         | 13,4                         |
| 60  | 385  | 28,3                 | 37,6                      | 35,2   | 525                       | 21                        | 281                          | 806                          | 13,4                         | 10,2                         |
| 90  | 306  | 31,0                 | 42,4                      | 42,0   | 652                       | 12                        | 371                          | 1023                         | 11,3                         | 5,4                          |
| Classe 3                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 5   | 4100 | 4,2                  | 7,7                       | 4,7    | 24                        | 6                         | 6                            | 30                           | 6,0                          | -                            |
| 20  | 1420 | 12,6                 | 17,5                      | 12,5   | 118                       | 14                        | 43                           | 161                          | 8,1                          | 9,2                          |
| 40  | 735  | 18,8                 | 24,6                      | 20,6   | 236                       | 18                        | 109                          | 345                          | 8,6                          | 9,0                          |
| 60  | 480  | 22,3                 | 29,0                      | 27,7   | 324                       | 14                        | 171                          | 495                          | 8,3                          | 6,6                          |
| 90  | 340  | 24,8                 | 32,4                      | 34,08  | 401                       | 8                         | 234                          | 635                          | 7,1                          | 3,4                          |
| Classe 5                                  |      |                      |                           |        |                           |                           |                              |                              |                              |                              |
| 5   | 5400 | 2,4                  | 4,9                       | 3,2    | 9                         | 2                         | 2                            | 11                           | 2,2                          | -                            |
| 20  | 2010 | 8,8                  | 12,6                      | 8,9    | 64                        | 7                         | 19                           | 83                           | 4,1                          | 5,4                          |
| 40  | 1010 | 14,4                 | 18,6                      | 15,3   | 138                       | 10                        | 53                           | 191                          | 4,8                          | 5,4                          |
| 60  | 635  | 17,5                 | 22,2                      | 21,1   | 196                       | 11                        | 97                           | 293                          | 4,9                          | 4,8                          |
| 90  | 413  | 19,9                 | 24,6                      | 27,6   | 247                       | 4                         | 141                          | 388                          | 4,3                          | 2,0                          |

l'aulne à celle des autres essences mieux connues (figures 1.15 et 1.16), et ainsi fixer quelques repères qui situent bien l'aulne parmi les autres essences <sup>(13)</sup>.

### 1° Rythme de croissance

La croissance en hauteur est très précoce, surtout dans les bonnes classes de productivité, mais non soutenue ; la hauteur atteinte vers 20 ans vaut la moitié de celle atteinte à maturité vers 100 ans (figure 1.15). La précocité de cette croissance n'est dépassée que par celle du peuplier (cv. robusta), tant en ce qui concerne la hauteur que le volume. Par contre, respectivement vers 25, 35 et 45 ans, l'épicéa, le frêne puis le hêtre deviennent plus productifs que l'aulne (figure 1.16).

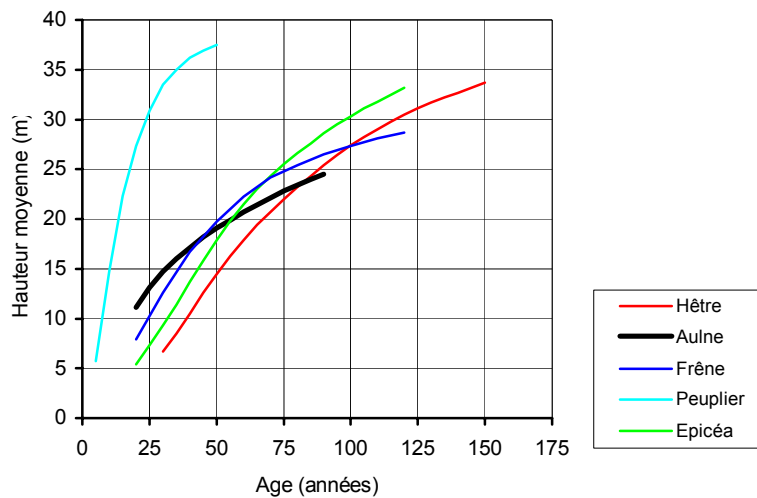


Figure 1.15. – Comparaison de la croissance en hauteur moyenne des peuplements de peuplier, aulne, frêne, épicéa et hêtre (d'après les tables de SCHOBBER [1975]).

<sup>(13)</sup> Les comparaisons ont été effectuées sur base des tables allemandes de SCHOBBER [1975], en sélectionnant pour chaque essence la table de fertilité moyenne.

## 2° Productivité

Sur l'ensemble des 2 tables, le maximum d'accroissement annuel moyen en volume fluctue entre 4 et 14 m<sup>3</sup> de bois fort/ha/an; il est toujours atteint avant 60 ans.

Quelques mesures effectuées en basse Ardenne [CLAESSENS, 1990] situent la productivité des meilleures aulnaies ardennaises au niveau de la première classe de fertilité allemande, affichant 8 à 9 m<sup>3</sup>/ha/an. vers 60 ans, avec, en l'absence d'éclaircie, un volume de bois sur pied de l'ordre de 400 à 500 m<sup>3</sup>/ha.

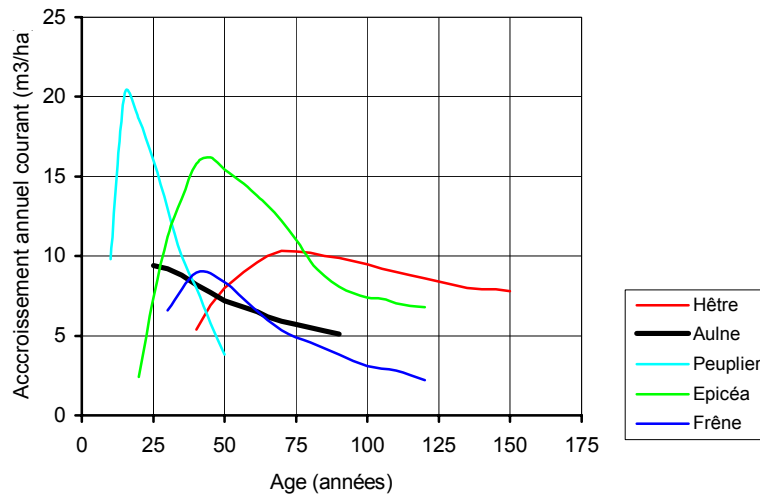


Figure 1.16. - Comparaison de l'accroissement en volume des peuplements de peuplier, aulne, frêne, épicéa et hêtre (d'après les tables de SCHÖBER [1975]).

## 1.5.2. Caractéristiques technologiques et utilisations du bois<sup>(14)</sup>

### 1° Aspect

Le bois d'aulne est blanc rosé clair, mais, en s'oxydant rapidement à l'air, il prend sa couleur caractéristique brun-orange. Il ne contient pas de duramen

<sup>(14)</sup> Le présent paragraphe présente principalement le bois d'aulne en relation avec ses usages actuels et potentiels. Plus de détails sont disponibles dans la synthèse bibliographique consacrée au bois d'aulne de CLAESSENS [1987<sub>b</sub>].



différencié. C'est un bois homogène à pores diffus mais à plus forte concentration de pores dans la zone initiale, à grain fin, à fins rayons ; la limite des cernes est visible et sinueuse [JACQUIOT, 1973 ; VENET et KELLER, 1986].

## 2° Aptitudes technologiques

Les aptitudes technologiques du bois d'aulne (tableau 1.16) se déduisent de ses caractéristiques mécaniques (tableau 1.15) et visuelles. Ce dernier tableau montre que l'aulne est un bois peu dense, mi-dur, à rétractabilité moyenne, et dont les cotes de résistance sont faibles en général, en particulier sa résistance en flexion statique.

Tableau 1.15. – Principales caractéristiques mécaniques du bois d'aulne (d'après KOLLMANN [1955] et VORREITER [1949]).

| Caractéristiques                          | KOLLMANN<br>(12 % humidité) | VORREITER<br>(15 % humidité) |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| Densité (g/cm <sup>3</sup> )              | 0,53*                       | 0,54                         |
| Dureté Janka (kg/cm <sup>2</sup> )        | 440                         | 440                          |
| Retraits (%)                              |                             |                              |
| tangential                                | 7,3                         | 9,3                          |
| radial                                    | 4,4                         | 4,3                          |
| longitudinal                              | 0,5                         | 0,5                          |
| volumique                                 | 12,6                        | 13,6                         |
| Module d'élasticité (kg/cm <sup>2</sup> ) | 77000                       | 117000                       |
| Résistance (kg/cm <sup>2</sup> )          |                             |                              |
| en flexion statique                       | 850                         | 970                          |
| au choc                                   | 0,50                        | 0,54                         |
| en compression radiale                    | 65                          | -                            |
| en compression axiale                     | 470                         | 540                          |
| en traction perpendiculaire               | 20                          | 20                           |
| au cisaillement                           | 45                          | 45                           |

## 3° Usages du bois

### • Ameublement

L'usage le plus rémunérateur du bois d'aulne est la menuiserie et l'ébénisterie fines qui valorisent ses qualités intrinsèques, et notamment en plaquage fin (< 0,5 mm) auquel il est particulièrement apte [BOHME *et al.*, 1983]. On le

retrouve ainsi dans l'ameublement, en plaqué ou massif, ainsi qu'en restauration, pour ses qualités d'usinage. Il est fréquemment coloré (acajou, ébène, merisier, ...).

### • *Bardage*

Le bardage, ou bardage d'aulne est une pratique courante en Thiérache pour couvrir les murs ou construire les granges. Les lattes sont posées vertes et ne doivent pas être traitées. Dans cette région, une scierie spécialisée ne produit que des planches de bardage [CRAVE, 1990].

Tableau 1.16. – Principales aptitudes technologiques du bois d'aulne.

|  |   |  |
|--|---|--|
| - Bois homogène à pores diffus, petits vaisseaux à parois minces ; rayons médullaires petits et nombreux<br><i>Grain fin et régulier</i>   | → | <b>Tranchage fin</b><br><b>Déroulage</b>                               |
| - Le bois ne forme pas de thylles au séchage (KORYTAROVA et CHOVANEC, 1985)<br><i>Bois très perméable</i>  | → | <b>Imprégnation aisée</b><br><b>(teintures, collage, préservation)</b> |
| - Densité = 0,53 g/cm <sup>3</sup> ; dureté Janka = 440 kg/cm <sup>2</sup> ; rétractibilité volumique = 12,6 %<br><i>Bois mi-dur et peu nerveux</i>  | → | <b>Tournage, modelage</b><br><b>Usinage, vissage aisés</b>             |
| - Résistances faibles en général<br><i>Bois peu résistant</i>  | → | <b>Pas d'emploi à forte sollicitation</b>                              |
| - Le bois conserve sa dureté à l'immersion dans l'eau [KRAUSS et RACSKOWSKI, 1985]   | → | <b>Travaux hydrauliques</b>  |
| - Le bois d'aulne brûle vite avec une flamme calme ; il dégage peu de fumée et laisse peu de charbon de bois ; sa capacité calorifique de 4700 cal/g est une des plus élevées des feuillus | → | <b>Production d'énergie</b>  |

### • *Travaux hydrauliques*

Si cet usage n'est plus répandu, il mérite d'être cité tant son utilisation a été généralisée comme pilotis et palplanches [KRAUSS et RACSKOWSKI, 1985].

### • *Autres usages du bois massif ou déroulé*

D'autres usages particuliers ou de moindre spécificité sont aussi cités (parquets [CHANTURIYA, 1985], bois modifié [JOZWIAK, 1976], palettes, caisserie, ...); ainsi que des usages anciens exploitant les qualités spécifiques de l'espèce (sabots, bibelots, robinets, corps de pompe, drains, ...).

Abattu à la fin de l'été entre le 15 août et le 8 septembre (« *entre les 2 Notre-Dame* » selon la tradition), le bois d'aulne acquiert une dureté et des cotes de résistance supérieures au chêne [CLAESSENS, 1987<sub>b</sub>]. Dans ces conditions, il était autrefois utilisé en charpente.

#### • *Fibre*

Le *papier* d'aulne a de bonnes caractéristiques [LETHONEN *et al.*, 1978] notamment grâce à des fibres d'environ 0,9 mm [HAARLAA et KARKKAINEN, 1982 ; VURDU et BENSEND, 1979]. Toutefois l'oxydation du bois, qui donne une couleur rouge aux plaquettes et au papier est très difficile à éliminer. Les plaquettes doivent donc être produites au fur et à mesure.

De nombreux auteurs citent l'aulne comme excellent bois pour la fabrication de *panneaux*.

#### • *Energie*

Le bois de feu est l'usage le plus répandu de l'aulne en Wallonie. C'est un bois qui brûle très vite en dégageant beaucoup de chaleur. Pour cette raison, il était autrefois recherché pour les fours de boulangerie et de verrerie. La production d'électricité a aussi été envisagée à partir d'une ligniculture industrielle en taillis à courte rotation [PODGE, 1983].

#### • *Divers*

On reconnaît d'autres emplois au bois d'aulne, notamment en tannerie (l'écorce contient 16,5 % de tanins), fumerie, pharmacie [FONTNOIRE, 1974].

### 1.5.3. Le marché du bois sur pied

#### *1° Organisation du marché du bois d'aulne*

Nous avons vu que les débouchés de l'aulne les plus rémunérateurs sont l'ébénisterie et la menuiserie d'intérieur, pour lesquels l'aulne est tout indiqué, en raison de ses qualités intrinsèques. Ce créneau exige des grumes de 3 à 6 m, sans nœuds, de bonne rectitude et de circonférence minimum de 120 cm à 1,3 m.

Parallèlement, et c'est, en volume, le marché le plus important, l'aulne se retrouve aussi dans des filières générales et de faible valeur (papier, panneaux, industrie, ...). Localement, des filières spécifiques peuvent aussi exister pour des bois de qualité et de dimensions moyennes (bauchage, petits sciages).

Mais, pour bien valoriser le créneau des bois de haute qualité, qui est aussi celui des feuillus précieux (frêne, érable, merisier, ...), il est fondamental de proposer des lots de gros bois de qualité homogène et de volume suffisant. Cette condition est le plus grand obstacle au marché de l'aulne. En effet, dans notre pays, la qualité de l'aulne ne correspond que rarement aux exigences du marché, ce qui implique que les fûts de qualité sont généralement disséminés en forêt. Ainsi HUBERT [1985] propose :

- d'organiser des coupes « en recherche » sur de plus grandes surfaces que les coupes de l'aménagement, en vue de proposer aux exploitants des lots homogènes quant à l'essence et la qualité des grumes ;
- de mettre au point les techniques de sylviculture adaptées afin d'augmenter la qualité des bois produits ;
- d'informer les utilisateurs et les producteurs sur les potentialités du bois d'aulne.

#### *2° Prix de vente en forêt*

##### **• Prix pratiqués en Belgique**

L'information sur les prix n'est pas aisée à récolter car l'aulne se vend rarement en lots et est discrètement valorisé dans des filières commerciales spécialisées. Dans ces conditions, les prix sont généralement fixés par l'acheteur. En fonction du marché de seconde transformation dont celui-ci a connaissance, les prix d'achat en forêt sont différents. A partir d'une enquête régionale auprès de scieurs [CLAESSENS, 1987<sub>b</sub>], de contacts informels que nous avons eu dans les milieux forestiers (propriétaires, DNF, gestionnaires, négociants, scieurs, ...) et des quelques

ventes de lots d'aulne, nous pouvons faire état des prix suivants pour les bois de sciage de bonne qualité (tableau 1.17).

Les bois de moindre qualité sont fortement pénalisés et leurs prix varient de 300 à 1 000 BEF/m<sup>3</sup> selon les dimensions et la qualité ; le prix du bois de chauffage, dépendant de marchés locaux et surtout du caractère marécageux de la station, varie de 0 à 200 BEF/stère.

Tableau 1.17. – Prix moyens au m<sup>3</sup> sur pied pratiqués actuellement en Belgique pour l'achat de bois de qualité (sciage de première qualité au moins) – période 1990-1997.

| Catégorie de circonférence (cm) | Prix moyens (BEF/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 90 – 120                        | 800 – 1 200                       |
| 120 – 150                       | 1 500 – 3 000                     |
| 150 – 180                       | 3 000 - 7 000                     |

#### • Prix pratiqués en Allemagne

L'Allemagne, en raison de ses surfaces d'aulnaies, possède un marché de l'aulne qui influence les prix pratiqués en Belgique. Dans les 3 länders les plus riches en aulne (Niedersachsen, Hessen, Baden-Württemberg) celui-ci représente 13 % du volume abattu de feuillus secondaires et occupe ainsi la troisième place immédiatement après le frêne et l'érable [KROPF, 1985]. Certaines scieries ne produisent que de l'aulne.

Les aulnes sont classés en 3 catégories de qualité :

A : tranchage,

B : sciages d'ébénisterie et de menuiserie,

C : industrie et pâte (catégorie contenant la plupart des « aulnes de ruisseau »).

D'après différentes sources d'information, nous pouvons établir le tableau des prix selon la qualité (tableau 1.18).

Tableau 1.18. – Prix moyens indicatifs pratiqués en Allemagne, au m<sup>3</sup> à route, pour l'achat d'aulne, selon les classes de qualité (grumes de 150 cm de circonférence et plus) – période 1985 – 1995.

| Classe de qualité | Prix indicatifs (F/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|-------------------------------------|
| A                 | 15 000 – 25 000                     |
| B                 | 1 700 – 4 500                       |
| C                 | 1 200 - 3 000                       |

- **Potentialités du marché belge**

Sachant que les plus beaux lots sont achetés par des commerçants ou exploitants allemands, l'aulne wallon possède un potentiel non négligeable. Mais il faut constater la rareté, voire l'inexistence, des lots d'aulnes de qualité. Or, les prix des grumes peuvent varier d'un facteur dix en fonction de la seule qualité du bois (tableau 1.18). Quelques ventes isolées sont toutefois encourageantes, lorsqu'un lot d'aulnes de qualité est proposé. Ainsi pour mieux fixer les idées nous avons isolé 3 exemples de vente (tableau 1.19).

Tableau 1.19. – 3 exemples de vente de lots d'aulne de première qualité (tranchage), entre 1990 et 1997 en Wallonie et en Thiérache française.

| Catégories de circonférence (cm) | Volume du lot (m <sup>3</sup> ) | Prix (F/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| . 130/150                        | 6                               | 6 000 à route            |
| . 160/200                        | 5                               | 7 500 sur pied           |
| . 150/200                        | ± 50                            | 20 000 à route           |

Les deux premiers lots étaient destinés au tranchage en Belgique et le troisième au commerce allemand.

Ces prix que peut espérer le producteur de bois de qualité, sont toutefois sujets à fluctuations. En effet, le marché de l'aulne est plutôt sous la dépendance des volumes de bois en provenance d'Allemagne, d'Autriche et de Slovénie. D'autre part, l'aulne rouge (*Alnus rubra* Bong.), essence commerciale des forêts de l'Ouest américain, occupe aussi le créneau de l'ameublement en Europe.

#### 1.5.4. Culture de l'aulne

##### *1° Sylviculture à titre d'essence principale*

- **Principes de la sylviculture de l'aulne**

Nous avons vu qu'il n'existe pas dans nos régions de sylviculture spécifique de l'aulne, adaptée aux exigences actuelles du marché (paragraphe 1.3.5), à savoir la production de grumes de plus de 150 cm de circonférence à 1,5 m, droites et pratiquement sans nœud. On peut toutefois déduire les fondements « d'itinéraires

sylvicoles » à partir du rythme de croissance et du tempérament de l'essence, qui ont été mis en évidence dans les paragraphes précédents (tableau 1.20).

Tableau 1.20. – Implications des caractéristiques de croissance et du tempérament de l'aulne sur la sylviculture.

|   |   |  |
|---|---|--|
| Maximum d'accroissement annuel courant en volume (bonne station) :<br>de l'ordre de 10 à 15 m <sup>3</sup> /ha entre 15 et 20 ans | → | <i>Eclaircies précoces</i><br><i>Courte rotation</i>                 |
| Espèce héliophile   | → | <i>Eclaircies fortes, par le haut</i>                                |
| Croissance non soutenue :   | → | <i>Révolution courte</i><br><i>Rotations plus longues avec l'âge</i> |

#### • Scénarios sylvicoles existants

A partir des grands principes identifiés ci-avant, on peut analyser les tables de production et les orientations sylvicoles qui ont été préconisées avant 1970 (Slovénie [ROISIN et THILL, 1972], tables hongroises [SOPP, 1974], tables allemandes [MITSCHERLICH, 1954 *in* : SCHOBER, 1975]) ou plus récemment en fonction du marché actuel (Landes [VAAST et BILLAC, 1996]). Sans entrer dans le détail de l'analyse, nous pouvons en faire ressortir les principaux éléments abordés dans les paragraphes suivants.

Même dans les sylvicultures anciennes traduites par les tables, on peut remarquer la précocité des interventions. Elles sont réalisées dès 5 ans dans les tables hongroises et dès 4 ans (nettoisement) et 8 ans (éclaircie) dans la sylviculture slovène relatée par ROISIN et THILL [1978]. Les propositions récentes de CLAESSENS [1995] et de VAAST et BILLAC [1996] vont aussi en ce sens.

Quant à la périodicité et à l'intensité des éclaircies, les sylvicultures plus anciennes divergent de celles proposées actuellement. En effet, elles étaient conçues pour un marché de petits bois et bois moyens [ROISIN et THILL, 1972] qui n'est plus un créneau valorisant depuis quelques années [THILL et MATHY, 1980]. Les propositions récentes [VAAST et BILLAC, 1996], axées sur la production de plus gros

bois, sont donc assez radicalement différentes. Pour s'en convaincre, il suffit de consulter le tableau 1.21 qui compare les propositions slovène et landaise toutes deux établies dans l'optimum climatique de l'essence.

Tableau 1.21. – *Quelques caractéristiques de 2 scénarios sylvicoles pour des peuplements de la meilleure classe de productivité (d'après les données de ROISIN et THILL [1972] et les propositions de VAAST et BILLAC [1996]).*

| Interventions sylvicoles   | Slovénie (observations)<br>[ROISIN et THILL, 1972] |      |         | Landes (proposition)<br>[VAAST et BILLAC, 1996] |     |      |
|----------------------------|--|------|---------|---|-----|------|
|                            | Age  | N(*) | C130(*) | Age   | N   | C130 |
|                            | 4  | 8000 | -       | 5   | 900 |      |
|                            | 13   | 2500 | -       | 10  | 500 |      |
|                            | 20   | 1800 | 45      | 15  | 300 |      |
|                            | 30   | 1200 | 60      | 30  | 300 | 120  |
|                            | 60   | 550  | 100     |   |     |      |
| 1 <sup>er</sup> nettoyage  | 4 ans  |      |         | 5 ans   |     |      |
| 1 <sup>ère</sup> éclaircie | 8 ans  |      |         | 10 ans  |     |      |
| Rotation                   | 4 ans < 30 ans                                     |      |         | 1 x 5 ans                                       |     |      |
|                            | 10 ans > 30 ans                                    |      |         | 1 x 15 ans                                      |     |      |
| Prédésignation             | 16 ans, 250 tiges                                  |      |         | -   |     |      |
| Désignation                | ?, 150 tiges                                       |      |         | 10 ans, 300 tiges                               |     |      |
| Objectif                   | 60 ans, 100 cm                                     |      |         | 30 ans, 120 cm                                  |     |      |

(\*) N = nombre de tiges à l'hectare ; C130 = circonférence à 1,30 m du sol (en cm).

#### • Futaie claire

Intuitivement, pour notre région, de climat plus frais, nous pouvons envisager, pour les meilleures stations, la solution intermédiaire présentée dans le tableau 1.22 qui, comme nous le verrons, correspond bien au potentiel de croissance mis en évidence par les mesures que nous avons effectuées en forêt (chapitre 5).

Cette norme correspond à la futaie claire au sens de BOUDRU [1968], avec une surface terrière de l'ordre de 15 m<sup>2</sup>/ha, si ce n'est en fin de révolution, lorsqu'une augmentation de  $\pm 20$  % de surface terrière présente un intérêt économique [BOULET-GERCOURT, 1997]. Cette sylviculture s'applique parfaitement aux aulnes en peuplements mélangés, situation la plus fréquente en Wallonie (paragraphe 1.3.2). La règle est d'éclaircir les aulnes de manière à ce que leurs houppiers n'entrent pas en concurrence directe avec ceux des arbres voisins [BOUDRU, 1989]. L'aulne résiste en effet très mal à la concurrence des autres essences et seule la futaie claire peut lui convenir lorsqu'il est mélangé.



HUBERT [1983] propose un coefficient d'élanement<sup>(15)</sup> limite au-delà duquel les arbres sont en état de déséquilibre physiologique se traduisant par l'apparition de gourmands. Selon CLAESSENS [1990], dans nos conditions, ce seuil varie de 120 pour les jeunes arbres à 80 pour les vieux arbres.

Tableau 1.22. – Proposition de guide sylvicole pour les meilleures stations wallonnes.

| <i>Wallonie, stations optimales</i> |                    |              |
|-------------------------------------|--------------------|--------------|
| Age<br>(années)                     | Nombre de<br>tiges | C130<br>(cm) |
| 5 ans                               | 1000               | 30           |
| 15 ans                              | 600                | 50           |
| 25 ans                              | 300                | 80           |
| 60 ans                              | 100                | 150          |

Désignation : 15 ans, 100 bois  
 Rotation : 3/5/10 ans  
 Exploitation : 60 ans

#### • *Taillis et futaies denses*

En dehors des jeunes plantations pour lesquelles il est possible d'appliquer un scénario sylvicole idéal, les aulnes se présentent le plus souvent en taillis ou en futaie très dense et généralement en « retard d'éclaircie ». Dans ces conditions, l'élaboration de normes est plus complexe.

Différents auteurs présentent quelques scénarios alternatifs. VACHER [1991] considère qu'une période de 15 ans sans intervention oriente la sylviculture vers le balivage intensif au sens de HUBERT [1983]. ROISIN et THILL [1972] rapportent que « *les aulnes compressés ne réagissent plus positivement aux éclaircies dès 45 ans* ». Si des scénarios « de rattrapage » existent, ils se caractérisent tous par une perte de temps, de qualité et par une prise de risque [CLAESSENS, 1995].

Tant que les peuplements n'ont pas encore dépassé des seuils d'âge et de coefficient d'élanement qui restent encore à définir précisément, les éclaircies fréquentes de faible intensité dans les futaies denses (ou balivage intensif dans les taillis) sont toutefois les seules solutions envisageables.

#### **2° Sylviculture à titre d'essence compagne**

<sup>(15)</sup> Coefficient d'élanement : Hauteur totale de l'arbre / Circonférence à 1,3 m.

**• Fixation symbiotique d'azote atmosphérique**

De nombreuses plantations d'aulnes mélangés à du frêne, du noyer, du peuplier, de l'érable, du douglas ou de l'épicéa ont été installées pour tirer profit de la fertilisation biologique amenée par l'aulne. Une très abondante littérature cite des augmentations de production de l'ordre de 50 à 100 % dans les meilleurs des cas, ainsi qu'une interaction favorable aux deux espèces [MARTIN, 1985 ; COTE et CAMIRE, 1987 ; MOIROUD, 1991 ; HIBBS *et al.*, 1993 ; GIARDINA *et al.*, 1995]. SCHLESINGER et WILLIAMS [1984] précisent toutefois que le mélange ne se justifie que dans les situations où l'essence principale n'est pas dans son optimum écologique.

**• Drainage biologique**

WEISSEN et VAN PRAAG [1983] proposent la plantation mélangée d'aulne et d'épicéa sur les sols humides du plateau ardennais. En effet l'impact positif du drainage biologique de l'aulne sur la croissance et la survie d'épicéas plantés en sol humide a été démontré expérimentalement par LEVY [1982].

**• Essence d'abri**

Pour son caractère pionnier, l'aulne est aussi installé en pré-boisement pour enrichir le sol et procurer un abri à des essences plus délicates pouvant souffrir d'une exposition totale à l'ensoleillement ou de gelées hors-saison [CASTANER, 1991]. A ce titre, il est souvent planté lors de boisements de terres agricoles.

**3° Ligniculture**

Dans les années '80, la ligniculture a été envisagée dans l'optique de production d'électricité [PODGE, 1980]. Des programmes de production industrielle de biomasse ont alors été mis au point à partir de taillis à courte rotation (maximum 8 ans) utilisant le peuplier et différents aulnes hybrides sélectionnés pour leur production. L'aulne y était utilisé en raison de sa production précoce, de son aptitude au recépage, de sa frugalité, de la fertilisation « biologique » qu'il apporte, ainsi que de la très haute capacité calorifique de son bois.

## ***1.6. Conclusions***

La présentation générale de l'aulne glutineux a mis en évidence les spécificités biologiques de l'essence (enracinement, fixation symbiotique d'azote, résistance à l'inondation, rythme de croissance, autécologie et phytosociologie). Celles-ci ont déterminé la place et les fonctions de l'aulne dans les écosystèmes forestiers et aquatiques.

Parallèlement, en analysant les informations existantes dans les domaines relatifs à la sylviculture et au marché du bois, il apparaît qu'il est d'un grand intérêt de développer des schémas sylvicoles qui sont adaptés à l'aulne.

Toutefois, en dépit des nombreuses fonctions écologiques (apport à la biodiversité, amélioration du sol, de la qualité des eaux, régulation du régime hydrologique) et économiques (production de bois de qualité) auxquelles l'aulne participe, l'analyse des données de l'inventaire forestier régional a montré le peu d'intérêt manifesté pour cette essence. Cela se traduit notamment par une méconnaissance des potentialités sylvicoles de l'aulne dans les conditions forestières de la Wallonie. Quels services l'aulne glutineux peut-il rendre dans le cadre de la gestion forestière ? Quelles sont les stations qui conviennent le mieux à sa sylviculture ? Quelles sont les sensibilités de ces stations ? L'analyse de la littérature ne permet que d'entrevoir des voies de réponse globales (données autécologiques, fonctions écologiques de l'aulnaie, propositions de normes sylvicoles, ...) à caractère relativement théorique.

En étudiant l'aulne dans ses stations de Wallonie, puis avec plus de précision, en Ardenne, nous nous proposons de mieux connaître les potentialités sylvicoles et « environnementales » de cette espèce en fonction des stations qu'elle peut être amenée à occuper. Nous présenterons ces résultats dans le canevas d'un catalogue des stations où chaque type correspond à une unité de gestion intégrée des ressources forestières.

## ***Quelques définitions utiles dans ce chapitre***

### ***Le facteur écologique***

Le facteur écologique est une variable stationnelle susceptible d'agir directement sur la croissance de l'essence. Cette définition élimine des éléments tels que l'altitude ou la profondeur de sol qui interviennent indirectement sur la croissance, l'un par la température, l'autre par l'alimentation en eau qu'il détermine. Un facteur écologique joue le rôle de **facteur limitant** lorsque, par son niveau ou son absence, il limite la croissance de l'essence [DAJOZ, 1996].

### ***Groupe écologique***

Selon DUVIGNEAUD [1974], « le groupe écologique est un ensemble d'espèces ayant entre elles une affinité sociologique plus ou moins grande, marquée par une tendance à se rassembler dans un biotope déterminé, c'est-à-dire dans des conditions de milieu déterminées ». Dans une acceptation moins restrictive, on utilise la notion de groupes écologiques statistiques [DELPECH *et al.*, 1985] dans laquelle les liens sociologiques entre espèces du groupe ne sont pas considérés. Par leur relation avec les caractéristiques du milieu, les groupes écologiques sont des **indicateurs floristiques** des conditions stationnelles.

### ***La station***

La station est une étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (mésoclimat, topographie, composition floristique et structure de la végétation, sol) [DELPECH *et al.*, 1985].

### ***La typologie***

La typologie est la mise en évidence et l'étude de types. Le **type** est un modèle synthétique réunissant les caractères essentiels de tous les êtres ou objets de même nature.

### ***La variable écologique ou stationnelle***

La variable écologique ou variable du milieu ou encore variable stationnelle est une variable utilisée pour caractériser la station. Il peut s'agir d'une **variable brute** qui désigne une grandeur ou une caractéristique écologique de la station qui est mesurée ou observée sur le terrain (exemple : l'inclinaison de la pente ou le type d'humus) ou d'une **variable synthétique** [LE TACON, 1973], c'est-à-dire construite à partir de variables brutes (exemple : l'indice d'aération, calculé à partir de la texture, de l'hydromorphie et de la pente du sol). On distingue les **variables abiotiques** concernant les caractéristiques physiques de la station, des **variables biotiques** relatives aux caractéristiques biologiques (ex : un groupe écologique) [DAJOZ, 1996].

## Chapitre 1

### *L'aulne glutineux et les forêts hydrophiles*

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Introduction .....  | 7  |
| 1.2. Biologie de l'aulne glutineux .....                               | 9  |
| 1.2.1. Taxonomie et caractères botaniques .....                        | 9  |
| 1.2.2. Particularités du système racinaire .....                       | 9  |
| 1.2.3. Cycle de reproduction() .....                                   | 11 |
| 1.2.4. Tempérament .....   | 14 |
| 1.2.5. Pathologies et consommateurs .....                              | 15 |
| 1.2.6. Aire naturelle .....  | 16 |
| 1.2.7. Exigences stationnelles .....                                   | 20 |
| 1.2.8. Phytosociologie des forêts de l'aulne .....                     | 22 |
| 1.3. L'aulne en forêt wallonne .....                                   | 34 |
| 1.3.1. Importance de l'aulne en forêt wallonne .....                   | 34 |
| 1.3.2. Composition des forêts à aulne .....                            | 36 |
| 1.3.3. Distribution régionale .....                                    | 37 |
| 1.3.4. Distribution pédologique .....                                  | 37 |
| 1.3.5. Structure et sylviculture des peuplements .....                 | 38 |
| 1.4. Fonctions écologiques de l'aulne glutineux et de ses forêts ..... | 41 |
| 1.4.1. Contribution à la biodiversité .....                            | 41 |
| 1.4.2. Amélioration du sol .....                                       | 43 |
| 1.4.3. Filtration et épuration des eaux de surface .....               | 44 |
| 1.4.4. Régulation du régime hydrologique des cours d'eau .....         | 45 |
| 1.4.5. Relation avec l'écosystème aquatique() .....                    | 47 |
| 1.4.6. Synthèse .....  | 49 |
| 1.5. Valorisation de la production de bois .....                       | 50 |
| 1.5.1. Croissance et production .....                                  | 50 |
| 1.5.2. Caractéristiques technologiques et utilisations du bois() ..... | 54 |
| 1.5.3. Le marché du bois sur pied .....                                | 58 |
| 1.5.4. Culture de l'aulne .....  | 60 |
| 1.6. Conclusions .....   | 65 |

---

## Chapitre 2

### *Classifications écologiques des stations et productivité stationnelle : approches méthodologiques*

---

#### **2.1. Introduction**

Ce chapitre présente largement le contexte méthodologique dans lequel s'inscrit l'étude de la productivité stationnelle et l'élaboration de la typologie des stations. Il est structuré en 4 paragraphes présentant successivement :

- l'évolution des classifications écologiques des stations depuis le siècle passé (paragraphe 2.2),
- le concept et les méthodes actuelles de classification écologique des stations (paragraphe 2.3),
- les méthodes dendrométriques d'estimation de la productivité (paragraphe 2.4),
- la méthodes d'analyse de la relation station x production (paragraphe 2.5) ;
- à la suite desquels nous avons identifié les grandes lignes de la méthode de travail qui a été retenue pour répondre aux objectifs de l'étude (paragraphe 2.6).

#### **2.2. Historique de l'étude des stations et de la productivité stationnelle**

Par essence, l'homme dépend de la productivité de son milieu. Aussi loin que l'on trouve des traces d'écriture, on y décèle cette préoccupation. TESCH [1981] indique que THEOPHRASTUS (370-285BC) avait relaté des différences de phénologie et de croissance selon le régime hydrique des stations. Par ailleurs, il suffit d'observer l'étonnante correspondance entre les limites de parcelles forestières, agricoles et pastorales, à l'époque de la carte de FERRARIS (années 1770) et la carte

des sols, pour se rendre compte qu'à l'époque, les connaissances empiriques en écologie atteignaient déjà un degré de précision élevé.

Dès le début du siècle dernier, les recherches ont commencé par la voie la plus logique, qui consiste à identifier les paramètres physiques du milieu qui influencent la production. Fréquemment, ces études consistent en la construction de modèles de productivité, dont HAIG, en 1929, fut l'un des pionniers [JONES, 1969]. Dans ces modèles, la productivité est estimée par un indice de fertilité qui est, le plus souvent, la hauteur dominante des peuplements à un âge donné [CARMEAN, 1975, 1996], concept déjà utilisé par HUBER en 1824 [TESCH, 1981], tandis que les variables du milieu sont incorporées telles que mesurées [GREEN *et al.*, 1989 ; MONSERUD *et al.*, 1990 ; MAC NAB, 1993 ; TYLER *et al.*, 1995], ou, de manière synthétique, sous la forme de bilans ou d'indices climatiques, topographiques, hydriques, trophiques, etc. [LEVY *et al.*, 1992 ; BRAIS et CAMIRE, 1992 ; MAC NAB, 1993 ; WANG et KLINKA, 1996]. La plupart de ces modèles construits sur bases mathématiques prévoient ainsi la productivité à partir d'un nombre réduit de variables écologiques, avec une erreur généralement inférieure à la classe de fertilité [HARRINGTON, 1986 ; MONSERUD *et al.*, 1990 ; WORRELL et MALCOLM, 1990 ; CLAESSENS *et al.*, 1993 ; GILBERT, 1995 ; BOISSEAU, 1996].

Mais si prévoir grossièrement la productivité d'une station est une tâche relativement aisée, par contre, l'explication de cette productivité par une approche fonctionnelle est plus complexe et ne peut se satisfaire des seules variables écologiques brutes. En effet, la croissance des arbres est contrôlée par des bilans complexes qu'il est impossible de mesurer directement, car issus d'interactions et de compensations entre les variables écologiques [DUCHAUFOUR, 1986 ; FRANC, 1989 ; GERARDIN et DUCRUC, 1990 ; BRAIS et CAMIRE, 1992]. Ainsi, dans le domaine de la gestion forestière, on est amené à se satisfaire, en première approximation, de l'évaluation des trois bilans thermique, hydrique et trophique qui contrôlent l'essentiel de la croissance [FRANC, 1989] et auxquels il peut être jugé nécessaire d'adjoindre un bilan d'aération du sol [CLAESSENS *et al.*, 1996 ; WANG et KLINKA, 1996]. Mais quelle que soit la méthode, il n'est pas envisageable de mettre à jour clairement les facteurs écologiques de production d'une essence par une analyse statistique, aussi élaborée soit-elle, des relations entre les caractéristiques stationnelles et la croissance des arbres. La véritable compréhension des relations autécologiques ne peut se passer des études écophysiologicals expérimentales [LE TACON, 1973]. Ainsi, les études autécologiques actuelles bénéficient de l'important

développement des modèles écophysologiques [DELEUZE, 1995 ; LE GOFF *et al.*, 1995].

Les études station x production ont ainsi rapidement démontré la grande complexité des relations existant entre les variables écologiques mesurables (relatives au climat, à la topographie, au sol, ...) et la productivité des essences, à tel point que CAJANDER [1926, in : JONES, 1969] estime qu'une approche de type factoriel est hasardeuse. Il préfère alors relier la productivité à des « types de forêts » considérés comme des « boîtes noires », et se base dès lors sur la notion de « formation forestière » qu'il considère comme étant le reflet fidèle de l'ensemble des conditions écologiques régnant au sein d'une station, et de leurs interactions. Il établit ainsi l'une des premières classifications écologiques des stations. Lors de l'étude de la productivité des hêtraies ardennaises, DAGNELIE [1957] confirme, par l'utilisation simultanée des deux méthodes, la nette supériorité de l'approche typologique (en l'occurrence, phytosociologique) sur l'approche purement factorielle (à partir des variables du milieu).

Parallèlement c'est dès le 19<sup>ème</sup> siècle que les grands concepts de l'étude des communautés végétales se sont développés dans un foisonnement d'idées. Dès 1807, HUMBOLDT décrit la végétation de manière systématique et utilise pour la première fois le concept d'« association d'espèces » [MUELLER-DOMBOIS et ELLENBERG, 1974]. GRISEBACH [1838, in : BRAQUE, 1988] définit la notion de « formation », grandes unités physiologiques de végétation, notion largement développée par CLEMENTS [WHITTAKER, 1962] et COWLES [1899 in : WHITTAKER, 1973] développe la théorie des séries évolutives. Sur ces bases, de très nombreuses écoles voient le jour dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle, défendant chacune une méthodologie de classification des communautés végétales adaptée à ses objectifs, à son échelle et à son environnement forestier. La typologie des communautés végétales prend alors son véritable essor et s'affirme comme une discipline à part entière. Parmi les différentes écoles, dont les théories ont été largement présentées par WHITTAKER [1962], les « types forestiers » de CAJANDER, les « dominance-types » de CLEMENTS et TRANSLEY, les « synusies » de DAUBENMIRE, les « phylum » de GAUSSEN, la systématique phytosociologique de BRAUN-BLANQUET et les groupes écologiques de DUVIGNEAUD [1974] reçoivent le plus large écho, et font l'objet d'applications sur de vastes territoires [WHITTAKER, 1962 ; DUVIGNEAUD, 1974 ; MUELLER-DOMBOIS et ELLENBERG, 1974 ; ROISIN, 1984]. Actuellement, en Europe, la méthode phytosociologique de BRAUN-BLANQUET est la plus utilisée. Elle constitue une référence largement acceptée et standardisée pour



l'étude des phytocénoses. Aux Etats-Unis, c'est plutôt le concept de « dominance-types » qui s'est développé [PFISTER et ARNO, 1980 ; COOK, 1996].

La plupart de ces classifications, établies en priorité pour décrire la végétation, sont ensuite mises en relation avec les caractéristiques stationnelles ; notamment, les unités typologiques de CAJANDER et celles de SUKACHEV sont ordonnées selon des gradients écologiques [WHITTAKER, 1962]. Toutefois, les classifications mises au point, s'appuyant principalement sur la description des communautés végétales, sont difficilement applicables aux forêts fortement modifiées, et *a fortiori*, aux zones agricoles [BECKER, 1986 ; FRANC, 1989 ; CLAESSENS, 1997]. Pour y remédier, des classifications abiotiques se développent : définition de « territoires écologiques » [DELVAUX et GALOUX, 1962] ou « d'écorégions » [HÄGGLUND, 1981], d'unités « géomorphopédologiques » [MATHIEU, 1977], et plus localement, de typologies abiotiques des stations [FRANC, 1989 ; CLAESSENS *et al.*, 1994]. Certains auteurs proposent aussi des « matrices de référence » permettant de caractériser les stations selon leurs niveaux des principaux facteurs écologiques, évalués selon des échelles empiriques [FRANC, 1989 ; WEISSEN *et al.*, 1994 ; PYATT, 1995].

Jusqu'aux années '60, les classifications des milieux et des végétations coexistent et se développent plus ou moins indépendamment, sans véritable relation, avant que ne s'effectue un rapprochement entre les deux approches [ROWE, 1956 ; DAGNELIE, 1962, 1973]. En France, suite aux travaux de DUCHAUFOUR [1960] et de BECKER [1971], les catalogues de stations, dont la méthode de construction utilise autant la flore que les caractéristiques physiques de la station, se multiplient [BRETHES, 1989 ; DRAPIER, 1989], tandis qu'aux USA, la classification des types d'habitats forestiers suit le même objectif selon une approche différente [COOK, 1996] influencée par les théories de CLEMENTS et DAUBENMIRE. Cette évolution coïncide avec le développement important des analyses statistiques multivariées appliquées à l'écologie [BECKER, 1971 ; DAGNELIE, 1973 ; GEGOUT et HOULLIER, 1993] qui ont largement contribué à démontrer de manière évidente les relations entre la flore, les phytocénoses, et les facteurs abiotiques. Les années '90 confirment ensuite cette évolution en élargissant la fonction des classifications écologiques des stations, qui sont de plus en plus appelées à être utilisées dans le contexte d'une gestion globale de l'écosystème forestier [MASHIMO et ARIMITSU, 1986 ; SIMS *et al.*, 1996]. En effet, divers objectifs de la gestion forestière, autrefois considérés comme secondaires ou implicitement remplis par la forêt (protection des eaux, biodiversité, loisirs, ...), prennent actuellement de l'ampleur dans le cadre du « partage de la

ressource » [SINGLETON *et al.*, 1994]. Cette nouvelle approche engage alors les gestionnaires vers une réflexion approfondie quant à leur prise en compte par une gestion qualifiée pour la circonstance d'intégrée.

### ***2.3. Concepts et méthodes de la classification écologique des stations***

#### **2.3.1. Concept et objectif des classifications écologiques des stations**

Nous avons vu que la description et surtout le fonctionnement d'une station sont complexes car les facteurs à prendre en compte sont nombreux, souvent difficiles à quantifier et, surtout, plus ou moins fortement liés les uns aux autres. Dès lors, beaucoup d'utilisateurs du milieu préfèrent considérer les stations comme des « boîtes noires », et établissent des systèmes de classification adaptés à leurs objectifs et aux échelles auxquelles ils raisonnent. Ils élaborent ainsi leur propre référence de travail qui facilite l'analyse de la réalité complexe qu'est la station.

Quel qu'il soit, le système utilisé présentera toujours au moins deux inconvénients. D'une part, la simplification, parfois abusive, de la réalité, peut amener à des erreurs d'appréciation et, d'autre part, le fait de distribuer les stations observées dans un nombre arrêté de classes est en contradiction avec la variation continue et progressive du milieu. Les classifications écologiques des stations sont donc en quelque sorte des *vues de l'esprit*, comme le révèle l'affirmation lourde de sens de PFISTER et ARNO [1980] : *op. cit.* « *classification can create order out of apparent chaos* ». Leur applicabilité dépendra du compromis réalisé entre la simplification à l'avantage de l'utilisateur et la représentation la plus conforme possible de la réalité.

#### **2.3.2. Familles de classifications écologiques des stations**

Schématiquement, selon la méthode d'interprétation du milieu, on peut distinguer deux grandes approches :

- les classifications *factorielles*, classant les stations par leur position au sein d'une « matrice de référence » établie a priori et dont les axes sont définis par les niveaux de facteurs écologiques ;
- les classifications *typologiques*, classant les stations par rapport à un éventail de stations-type censé représenter la variabilité réelle des stations observées.

Chacune de ces classifications peut être divisée selon que les descripteurs qu'elle utilise sont de type floristique ou abiotique (figure 2.1).

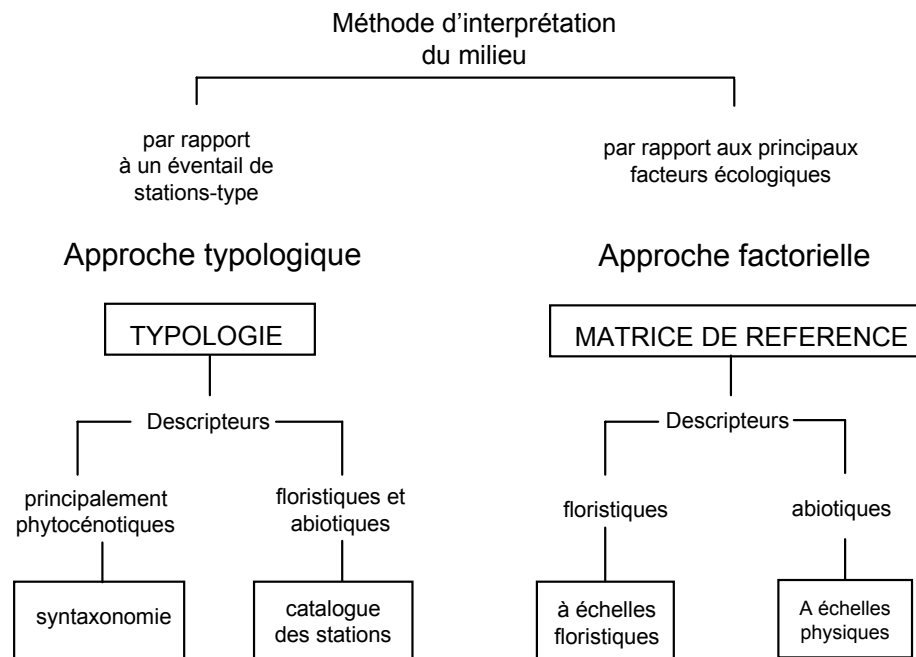


Figure 2.1. - Principales familles de systèmes de classification écologique des stations.

### 2.3.3. Classifications factorielles

#### *1° Principe*

Les classifications factorielles, ou matrices de référence, consistent en un espace ordonné selon un système d'axes écologiques. Chaque axe est défini a priori par les niveaux que peut prendre une variable écologique, généralement synthétique (figure 2.2).

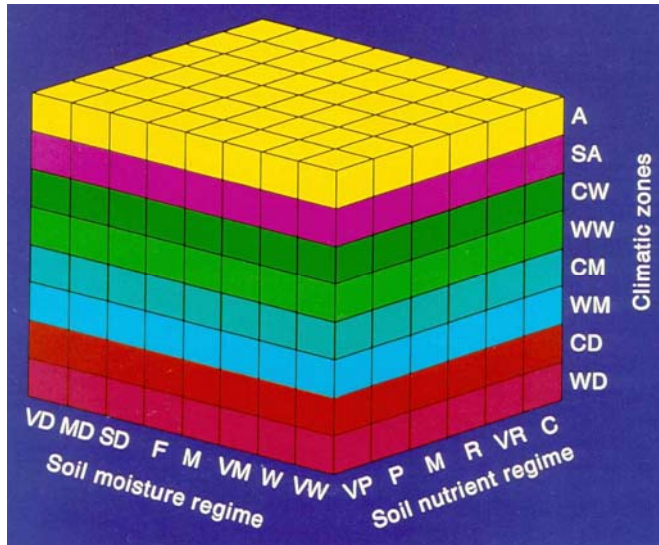


Figure 2.2. - Matrice de référence de PYATT [1995].

La construction des matrices de référence nécessite d'identifier les axes qui sont responsables de la variabilité du milieu, puis de définir une échelle pour chacun d'eux. Les méthodes, essentiellement empiriques, aboutissent généralement à retenir 3 axes représentant respectivement le climat, l'humidité de la station et la richesse chimique du sol [FRANC, 1989 ; WEISSEN *et al.*, 1994 ; PYATT, 1995]. Cela conduit à la définition de quelques centaines à quelques milliers d'unités, dont certaines peuvent ne pas se retrouver dans la réalité du terrain. Chaque station observée peut alors être caractérisée par sa position dans cette matrice.

Dans la définition des échelles, on peut distinguer deux approches selon que les variables utilisées sont de nature abiotique ou floristique.

#### • Echelles abiotiques

Les conditions de température et de précipitation sont généralement envisagées par un axe climatologique (territoires écologiques [WEISSEN *et al.*, 1994] ou « zones climatiques » [PYATT, 1995]), voire par 2 axes (région climatique et étage de végétation [FRANC, 1989]). Ensuite, les échelles trophique et hydrique sont définies à partir de variables pédologiques et topographiques (figures 2.3 et 4.3).

*Figure 2.3. - Définition des niveaux de l'échelle hydrique de Weissen et al. [1994].*

- ***Echelles floristiques***

BARTOLI [1992] propose une matrice de référence dont la définition des 2 axes hydrique et trophique fait appel à la notion de « groupe écologique

statistique<sup>(1)</sup> ». Chaque niveau des échelles hydrique et trophique est défini par une association de groupes écologiques. Ces groupes sont construits à partir de la Flore Forestière Française [RAMEAU *et al.*, 1989] ; le caractère indicateur des espèces étant lui-même défini dans cette flore au sein d'une matrice de référence à deux axes abiotiques.

## 2° Utilisation

Les matrices de référence sont surtout appliquées au choix des essences. Dans cet objectif, FRANC [1989] et WEISSEN *et al.* [1994] évaluent, pour chaque unité de la matrice de référence, l'aptitude des principales essences cultivées, créant ainsi une « matrice d'aptitude ».

### 2.3.4. Classifications typologiques

Plutôt que de présenter une matrice de référence au sein de laquelle l'utilisateur positionnera la station observée selon 2 ou 3 paramètres écologiques, la typologie propose un éventail d'unités (« types de sol », « types de station », « Forest Habitats Types », « associations phytosociologiques », ...) qui représentent chacune un « milieu moyen » identifié dans la réalité, et défini par une combinaison unique de caractéristiques floristiques et/ou abiotiques. La station observée est alors définie par rapport à l'unité à laquelle elle s'identifie le mieux par ses caractéristiques.

Selon que les variables utilisées pour définir les unités typologiques sont de nature essentiellement abiotique ou phytocénotique, on a affaire à des *typologies de station* ou à des *typologies des communautés végétales*. A l'heure actuelle, la plupart des typologies à vocation forestière ont bénéficié d'un brassage des acquis et des méthodologies des différentes écoles de classification des stations et ont évolué vers des typologies mixtes associant judicieusement l'ensemble des variables pour donner lieu à des *catalogues de stations*.

---

<sup>(1)</sup> Le groupe écologique statistique au sens de DELPECH *et al.* [1985] est un groupe de plantes rassemblant des espèces qui ont un comportement semblable vis-à-vis d'un paramètre du milieu, qu'il s'agisse ou non de plantes qui peuvent se rencontrer ensemble. La notion de groupes floristiques indicateurs sera abordée au chapitre 4.

### ***1° Typologies abiotiques des stations***

Les typologies abiotiques des stations sont établies à partir des seules caractéristiques physiques des stations : climat, géomorphologie, géologie, pédologie. Le territoire étudié est découpé en unités homogènes (dont la taille et l'homogénéité sont fonction des objectifs sous-jacents) qui correspondent à des combinaisons données des variables abiotiques.

A l'échelle d'un pays, la détermination de « régions naturelles » ou « écorégions » que nous avons déjà évoquée, est l'exemple le plus fréquent de typologie abiotique. Pour le Sud-Est de la Wallonie, DELVAUX et GALOUX [1962] ont établi de manière empirique les « territoires écologiques », qui ont été complétés plus tard par ONCLINCK *et al.* [1987], à l'aide d'analyses à caractère plus statistique. Ces territoires sont présentés dans le paragraphe 3.2.2.

L'approche géomorphologique [MATHIEU, 1977] intervient à l'échelle d'une région ; elle définit des types de station à partir de leurs caractéristiques pédologiques, topographiques et géologiques ; cette approche envisage de surcroît le contexte pédogénétique de chaque unité.

Plus localement encore, les familles de sols au sens de la classification FAO ou de la carte des sols de la Belgique [AVRIL, 1987] sont aussi des formes de typologie abiotique des stations.

Les codifications très précises comme celles de la carte des sols de la Belgique, ou comme celles du système de description des stations de FRANC [1989], se situent à la limite entre les classifications factorielles et typologiques. En effet, ces systèmes de classification définissent un très grand nombre d'unités dont certaines ne sont pas forcément existantes dans la réalité du terrain. Ils constituent plutôt un système organisé de codification des caractéristiques écologiques de la station.

## 2° *Typologie des communautés végétales*<sup>(2)</sup>

### • *Méthodes*

Comme nous l'avons vu, la classification des communautés végétales trouve ses racines dans les premiers travaux de HUMBOLDT et GRIESEBACH au début du 19<sup>ème</sup> siècle. A partir des premiers concepts émis, différentes écoles ont établi de nombreux systèmes de classification adaptés aux objectifs poursuivis, aux échelles d'analyse et à la nature des végétations concernées.

Pour ces raisons, les unités typologiques de ces systèmes sont définies selon différentes approches, à partir de :

- la physionomie de la végétation (formations : Clements [1905] ; phylums : Gaussen [1933]) ;
- d'espèces dominantes de la strate arborescente (« dominance-type » : Tansley [1911]) ;
- de groupes d'espèces du sous-bois (types forestiers : Cajander [1909]) ou des différentes strates ou de toutes les strates (sociations : Du Rietz [1917] et synusies : Daubenmire [1952]) ;
- de la composition floristique complète [Braun-Blanquet, 1928], ...

Elles sont ordonnées en séries évolutives vers un climax (Clements) ou selon des gradients écologiques (Cajander, Sukachev) ou en une systématique linéenne ou syntaxonomie (Braun-Blanquet).

L'évolution des principaux concepts de l'étude de la végétation est présentée en encart, tandis que la figure 2.4 présente les caractéristiques de la végétation qui sont prises en compte par les principales écoles de classification.

---

<sup>(2)</sup> Ce paragraphe est élaboré à partir de l'analyse de quelques ouvrages principaux ou de synthèses, notamment ceux de JONES [1969], DUVIGNEAUD [1974], TESCH [1981], KENT et COOKER [1996], COOK [1996] et principalement les études de WHITTAKER [1962, 1973]. Pour ne pas alourdir le texte, les références apparaissant en lettres minuscules dans ce paragraphe ont été citées dans ces ouvrages mais ne figurent pas parmi la bibliographie de la thèse.



## **PRINCIPAUX CONCEPTS DE L'ETUDE DE LA VEGETATION**

### NAISSANCE DES CONCEPTS

- . HUMBOLDT, 1807 : notion " d'association " d'espèces.
- . GRIESEBACH, 1838 : notion de " formation " : grande unité de végétation de physionomie homogène et indépendante de sa composition floristique (définition actuelle selon OZENDA [1994]).
- . COWLES, 1899 : notion de " série " : ensemble des biocénoses qui se succèdent à partir de la colonisation d'un espace " vide " jusqu'à l'obtention d'une végétation stable ou climax (définition actuelle SELON DAJOZ [1996]).

### PREMIERES CLASSIFICATIONS

- . CLEMENTS [USA, 1905], TANSLEY [UK, 1911] : " Dominance-types " : grandes unités (correspondant à la formation actuelle) définies par quelques espèces dominantes de la strate arborescente. Ces unités comprennent tous les stades climaciques de la série évolutive et sont décrites et identifiées par rapport à leur climax.
- . CAJANDER [Finlande, 1909] : " Forest-types " : unités définies par des petits groupes d'espèces du sous-bois. Elles rassemblent des forêts de physiologies différentes, mais caractérisées par les mêmes groupes d'espèces du sous-bois. SUKACHEV [Russie, 1928] développe une classification très proche dans son principe.

### PRINCIPALES EVOLUTIONS

- . DAUBENMIRE [USA, 1952]  
Les unités sont des " sociations ", définies par une superposition de " synusies ". Dans cette acceptation, les synusies sont *op. cit.* des " petits groupes d'espèces étroitement semblables dans leur écologie ". Conformément à CLEMENTS, ces unités sont décrites par leur forêt climacique. Ce concept de série progressive vers un climax unique sera de plus en plus contesté [COOK, 1996].
- . BRAUN-BLANQUET [Europe, 1928]  
Les unités sont des " associations " définies à partir de l'ensemble de la composition floristique de la communauté par un cortège " d'espèces caractéristiques " qui leur sont fidèles (cortège normatif).  
Les unités (les Syntaxons) sont ordonnées dans une systématique linéenne dans laquelle chaque niveau est défini par son cortège normatif.  
Une description synthétique de la théorie de BRAUN-BLANQUET est présentée en l'encart.

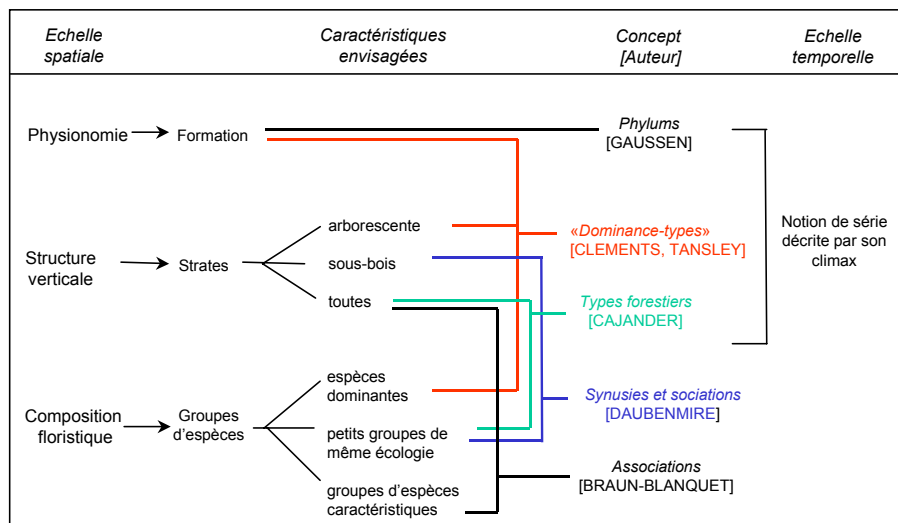


Figure 2.4. - Eléments pris en compte par les principales écoles de classification des communautés végétales.

• **Convergence des classifications**

Avec le recul d'un siècle, on constate que beaucoup de ces méthodes ne s'excluent pas forcément mutuellement, mais qu'elles ont plutôt évolué en profitant du foisonnement et de la confrontation de théories régulièrement remises en cause et adaptées.

En effet, sur le terrain, au-delà des méthodes, il existe des convergences : WHITTAKER [1962] observe que des formations décrites par Du Rietz [1954] correspondent à des classes de BRAUN-BLANQUET, tandis qu'à une échelle plus locale, il peut y avoir correspondance entre les unités inférieures des 2 écoles. De même, aux USA, différents auteurs, comme DAUBENMIRE, influencés par l'école de BRAUN-BLANQUET, prennent en compte toute la flore, tout en s'inscrivant au sein de la classification en « dominance-types » de TANSLEY ou CLEMETS.

## CLASSIFICATION PHYTOSOCIOLOGIQUE DE BRAUN-BLANQUET

### CONCEPT

- Systématique de type linéenne, dont l'unité de base est l'association. Ces associations sont rassemblées dans des unités supérieures (tableau ci-contre).
- L'association est définie par un groupe d'espèces caractéristiques, c'est-à-dire qui y trouvent leur optimum de développement (espèces exclusives, électives, voire préférentielles). Ce groupe est mis en évidence au sein d'un tableau phytosociologique (= tableau des relevés). Des groupes d'espèces différentielles définissent des sous-associations et variantes.
- Chaque niveau systématique est défini par un groupe d'espèces caractéristiques (figure ci-contre).

| Systématique |                    |
|--------------|--------------------|
| Suffixe      | Niveau du syntaxon |
| - ETEA       | Classe             |
| - ETALIA     | Ordre              |
| - ION        | Alliance           |
| - ETUM       | Association        |
| - ETOSUM     | Sous-association   |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
|                             | <p><b>Espèces diagnostiques le long d'un gradient d'humidité</b></p> <p>Espèces 1 et 2 : caractéristiques de l'association B.<br/>           Espèces 3 et 4 : caractéristiques de l'association A.<br/>           Espèce 5 : caractéristique de l'association C.<br/>           Espèces 4 et 6 : différentielles de la sous-association a de B.<br/>           Espèces 7 et 8 : différentielles de la sous-association c de B.<br/>           Espèce 9 : compagnon des associations B et C et caractéristique d'un syntaxon de rang supérieur comprenant les associations B et C (ex : alliance).</p> |
| Extrait de WHITTAKER [1973] |   |

### LE RELEVÉ PHYTOSOCIOLOGIQUE

- Liste des espèces visibles sur la station. La liste, datée, est ventilée par strate et les coefficients d'abondance-dominance et de sociabilité sont estimés pour chaque espèce.
- Le relevé s'effectue au sein d'une station homogène, sur une surface soit prédéterminée, soit correspondant à l'aire minimale (surface contenant 95 % des espèces de la station). Cette dernière varie selon les communautés végétales considérées, de 1 à 10.000 m<sup>2</sup> (200 à 500 m<sup>2</sup> pour les forêts tempérées).

| Abondance – dominance |                    |              | Sociabilité |                                |
|-----------------------|--------------------|--------------|-------------|--------------------------------|
| Code                  | Abondance          | Dominance    | Code        | Signification                  |
| i                     | Individu unique    | Insignifiant | 0           | Plantation                     |
| +                     | Individus rares    | < 5 %        | 1           | Distribués au hasard           |
| 1                     | Individus nombreux | < 5 %        | 2           | Touffes, coussinets, cépées    |
| 2                     | Nombre quelconque  | 5-25 %       | 3           | Plages, groupes                |
| 3                     | Nombre quelconque  | 26-50 %      | 4           | Tapis ou peuplement interrompu |
| 4                     | Nombre quelconque  | 51-75 %      | 5           | Tapis ou peuplement continu    |
| 5                     | Nombre quelconque  | > 75 %       |             |                                |

Un autre point de convergence de beaucoup d'études et de classifications des communautés végétales est l'utilisation de « groupes écologiques », dans leur acceptation moderne de groupes socio-écologiques<sup>(3)</sup> au sens de DUVIGNEAUD [1974] ou de groupes écologiques statistiques au sens de DELPECH *et al.* [1985]. Cette notion est en effet latente dans la majorité des classifications (CAJANDER, DU RIETZ, SUKACHEV, DAUBENMIRE, BRAUN-BLANQUET, ...), même si, comme c'est le cas pour les communautés végétales, la notion n'a pas exactement la même signification dans toutes les classifications. En effet, certains écologues les conçoivent comme des unités de base invariables (« organismic concept » de Clements [1916]), et d'autres, comme une réunion locale d'espèces à la faveur de conditions écologiques qui leur conviennent et s'inscrivant dans un continuum (« individualistic concept » de Gleason [1917]).

• **Relation avec les caractéristiques stationnelles**

Pour le forestier, le défaut majeur des classifications, établies en priorité pour décrire la végétation, provient des difficultés de typer et donc d'évaluer les milieux qui ne sont pas en équilibre « naturel » (agro- et sylvo-faciès) [FRANC, 1989], même si des séries, régressives ou progressives, ont été définies. Toutefois, dans la majorité des typologies de végétation, une relation est établie, de manière plus ou moins approfondie, entre les unités de végétation et le milieu abiotique : Cajander [1909] et surtout Sukachev [1928] ordonnent leurs unités selon des gradients écologiques [FREY, 1973 ; WHITTAKER, 1973], et beaucoup de phytosociologues de l'école de BRAUN-BLANQUET rattachent leurs associations à des conditions écologiques précises [NOIRFALISE, 1952 ; SOUGNEZ, 1973]. Cette démarche élargit fortement l'utilisation de l'outil phytosociologique, le rapprochant des catalogues de stations.

---

<sup>(3)</sup> Le groupe socio-écologique est *op. cit.* « un ensemble d'espèces ayant entre elles une affinité sociologique plus ou moins grande, marquée par une tendance à se rassembler dans un biotope déterminé, c'est-à-dire dans des conditions de milieu déterminées » [DUVIGNEAUD, 1974].

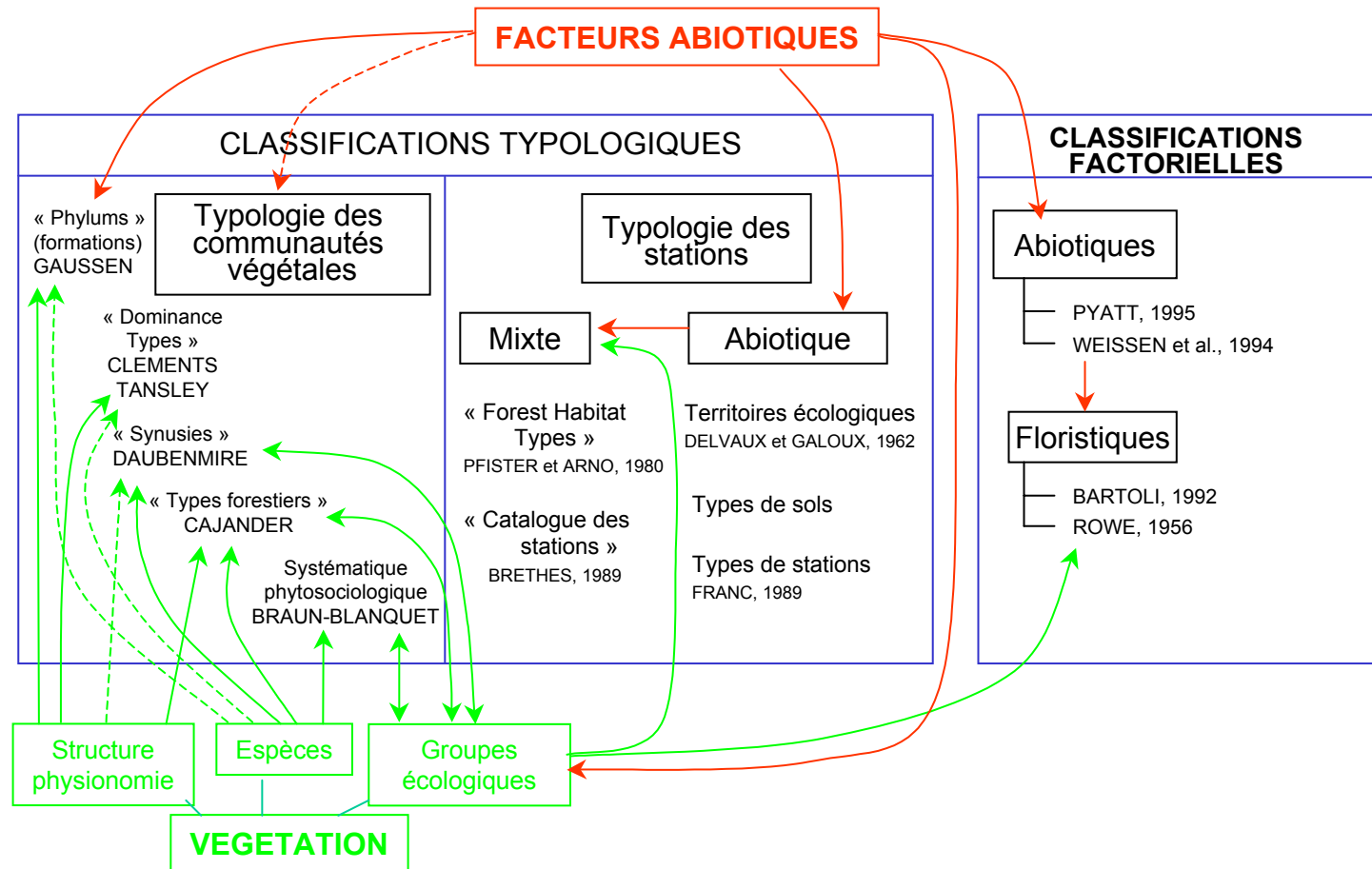


Figure 2.5. – Type d'information utilisée dans les différentes classifications des stations et position des catalogues de station parmi ces classifications (flux d'informations floristiques en vert et abiotique en rouge).

### 3° *Catalogues de stations*

Parmi les classifications de stations, le concept de catalogue de stations date de la fin des années '60. Il a ainsi hérité d'un niveau de connaissances du milieu considérable, tant en ce qui concerne l'étude des communautés végétales que du milieu abiotique. Les catalogues de stations ont formalisé et développé les liens entre ces disciplines, au grand bénéfice des descriptions stationnelles (figure 2.5).

Aux USA, DAUBENMIRE [1968, *in* : COOK, 1996] a développé le « Habitat Type Classification System », largement utilisé actuellement, tandis qu'en France, les catalogues de stations ont été initiés sur la lancée des travaux de DUCHAUFOR [1954, 1960] et BECKER [1971] et étaient au nombre de 157 en 1994 [DUME, 1995].

Selon FRANC [1989], les catalogues de stations *op. cit.* « fournissent au forestier une description du milieu qui, couplée avec une connaissance de la sylviculture, lui permettra de prendre la meilleure décision ». Ils sont largement utilisés en France comme aide à l'aménagement forestier. Conçus au départ essentiellement pour définir le choix des essences, ils servent de plus en plus de support pour les études autécologiques et sylvicoles, voire à l'heure actuelle, pour évaluer la valeur patrimoniale des forêts [DUME, 1995].

Un catalogue des stations se présente sous la forme d'un éventail de stations-types, censé représenter l'ensemble des situations existant dans une région forestière. Pour chacun de ces types, le catalogue fournit une fiche descriptive contenant des informations sur la topographie, le sol et la végétation, et une clef de détermination permet de rattacher la station observée à une unité typologique définie [BRETHES, 1989]. Les plus élaborés fournissent aussi des informations supplémentaires relatives à la productivité des essences ou proposent une analyse ciblée de la station, comme c'est le cas du catalogue présenté dans la figure 2.7, qui a été développé à la demande de compagnies forestières. A titre d'exemple et pour mieux fixer les idées, les figures 2.6 et 2.7 présentent respectivement la clef de détermination des types de station du frêne en Condroz [CLAESSENS *et al.*, 1994] et un cas concret de fiche descriptive extrait du catalogue des stations forestières de la Haute Côte-Nord au Québec [CAUBOUE et TREMBLAY, 1993].

*Figure 2.7. – Exemple de fiche descriptive d'un type de station (stations forestières de la Haute Côte-Nord au Québec [CAUBOUE et TREMBLAY, 1993]) – sur 2 pages.*





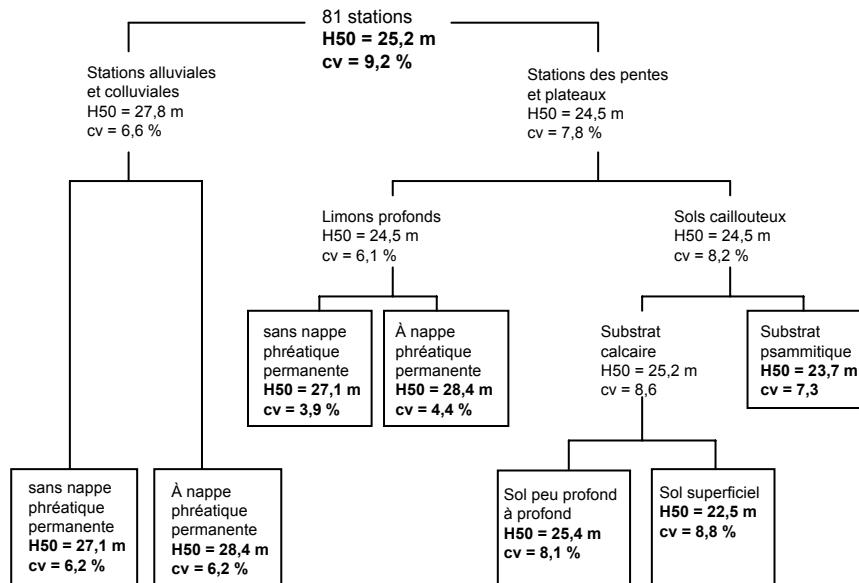


Figure 2.6. - Clef de détermination des types de station du frêne en Condroz [CLAESSENS et al., 1994] ; H50 = indice de fertilité (m) ; cv = coefficient de variation de l'indice de fertilité.

### • Méthodologie

#### Les catalogues français

Le « groupe de travail sur la typologie des stations forestières » conseille une méthodologie relativement précise pour l'élaboration des catalogues de stations, dont BRETHERS [1989] propose les quelques grandes lignes suivantes :

- l'élaboration du catalogue de stations s'appuie sur un échantillonnage, stratifié ou par transects, de relevés phyto-écologiques de terrain (variables physiques, relevé phytosociologique) représentatifs de la variabilité écologique d'une « petite région naturelle » donnée ;
- la première étape du traitement de ces données consiste à définir des groupes écologiques ou socio-écologiques à l'aide des analyses statistiques multivariées (Analyse factorielle des Correspondances, Classification hiérarchique) et leur signification écologique est évaluée a posteriori (variables supplémentaires de l'AFC). GEGOUT et HOULLIER [1993] proposent aussi l'AFC sur variables

instrumentales, qui prend en compte conjointement les variables floristiques et abiotiques pour établir des groupes écologiques plus cohérents.

- la définition des types de station s’opère ensuite par regroupement des stations semblables selon des critères d’homogénéité géomorphologique, pédologique et floristique (en ne considérant plus, à ce stade, que les groupes écologiques). Selon DUCHAUFOR [1986], cette homogénéité doit être définie par rapport aux potentialités forestières. L’appréciation de ces regroupements ne suit pas de méthodologie particulière. Elle peut notamment bénéficier des méthodes de classification numérique [MAC NAB, 1996]. La démarche varie selon l’expérience du typologue qui, selon ses affinités et les spécificités de la région considérée, donne une connotation plus ou moins phytosociologique au catalogue. Ainsi, au même moment JULVE [1989] établit un catalogue essentiellement phytosociologique, peu praticable en forêt modifiée, tandis que DRAPIER [1989] conçoit un catalogue plus souple d’utilisation selon l’approche du « groupe de travail ».

Tableau 2.3. - Aperçu synthétique du catalogue des stations de l’Ardenne primaire française [DRAPIER, 1989].

| TOPOGRAPHIE   | PLATEAU ET FAIBLE PENTE                       |                               | VERSANT                                 | VALLON                       |
|---|---|-------------------------------|---|------------------------------|
|   | Sol hydromorphe<br>taches d’oxydation < 70 cm | sol non hydromorphe           |   |                              |
| neurohygrophile (1)<br><i>(reine des prés, cardamine amère)</i> |   |                               |   |                              |
| hygrosciaphile (2)<br><i>(fougère à aiguillons)</i>             |   |                               | hygroneutrosiaphile<br>de versant frais |                              |
| neutrophile (3)<br><i>(Lamier jaune, mélique uniflore)</i>      | hydroneutrophile<br>de plateau                | neutrophile<br>de plateau     | neutrophile<br>de versant               | neutrophile<br>de vallon     |
| neuroacidocline (4)<br><i>(anémone, sceau de salomon)</i>       | hydroneuroacidocline<br>de plateau            | neuroacidocline<br>de plateau | neuroacidocline<br>de versant           |                              |
| neuroacidosciaphile (5)<br><i>(fétuque des bois)</i>            |   |                               | neuroacidosciaphile<br>de versant frais |                              |
| acidocline (6)<br><i>(ronce, stellaire holostée)</i>            | hydroacidocline<br>de plateau                 | acidocline<br>de plateau      | acidocline<br>de versant                |                              |
| mésacidophile (7)<br><i>(luzule blanche, houlque)</i>           | hydromésacidophile<br>de plateau              | mésacidophile<br>de plateau   | mésacidophile<br>de versant             |                              |
| acidophile (8)<br><i>(canche flexueuse, myrtille)</i>           | hydroacidophile<br>de plateau                 | acidophile<br>de plateau      | acidophile<br>de versant                |                              |
| xéroacidophile (9)<br><i>(leucobryum, callune)</i>              |   |                               | xéroacidophile<br>de versant            |                              |
| acidohygrophile (0)<br><i>(molinie, sphaigne)</i>               | acidohyrophile<br>de plateau                  |                               |   | acidohygrophile<br>de vallon |

A titre d'exemple, le tableau 2.3 présente la clef de détermination des 22 stations forestières de DRAPIER [1989], mettant à jour les facteurs considérés lors de la construction du catalogue, à savoir :

- la position topographique (plateau/versant/vallon),
- la présence d'hydromorphie avant 70 cm de profondeur,
- une échelle de 10 groupes écologiques.

#### *Habitat Types Classification System (USA)*

Depuis les années '60, la typologie des stations s'est aussi développée aux Etats-Unis selon le concept des types d'habitats « Habitat Types » [DAUBENMIRE, 1968, *in* : PFISTER et ARNO, 1980]. Le principe, héritier des théories de CLEMENTS, est toutefois proche de celui des catalogues français, mais il est adapté à de plus grandes étendues à caractère « naturel » de l'Ouest américain, constituées de peuplements et de formations variés, en pleine dynamique forestière. Ainsi, la classification prend en compte toutes les étapes de la succession forestière et les types d'habitat sont décrits par leur végétation climacique.

La différence méthodologique majeure réside dans l'implication très importante de l'expérience de terrain des équipes opérationnelles dans l'élaboration des types d'habitat. Cette implication est explicitement un souci constant dès la prise de données.

#### • *Quelques limitations des catalogues de stations*

De l'aveu de leurs auteurs, les catalogues français, tels qu'ils sont généralement conçus, soulèvent quelques questions délicates :

- Comment assurer un choix de variables descriptives pertinentes et leur codification adéquate [BECKER et LE GOFF, 1988 ; GEGOUT et HOULLIER, 1993] ?
- La gamme d'utilisation des catalogues s'élargissant et s'éloignant des objectifs originels, ne risquent-ils pas d'avoir une efficacité limitée, notamment en ce qui concerne les études de productivité [FRANC, 1989] ?
- Les catalogues sont peu précis en ce qui concerne les milieux humides car ils n'utilisent pas la méthodologie assez lourde nécessaire aux études de tels milieux [DRAPIER, 1989].

Ponctuellement, certaines solutions ont cependant été proposées : l'utilisation de variables synthétiques construites à partir des variables descriptives (réserve en eau, niveau trophique [FRANC, 1989]) ; l'élaboration de catalogues spécifiques à une essence [NOUALS et BOISSEAU, 1991 ; CLAESSENS *et al.*, 1994 ;

GILBERT, 1995] ; l'étude du régime phréatique pour discriminer les types de station [GIRAULT, 1990].

- *Catalogue spécifique à une essence*

Les catalogues sont essentiellement descriptifs. Pourtant, ils sont souvent utilisés pour différents objectifs auxquels ils ne sont pas forcément adaptés, notamment en ce qui concerne la prévision des potentialités forestières. Pour y remédier, GILBERT [1995] effectue des regroupements de types de station afin que le catalogue soit mieux adapté à l'étude de productivité qu'il mène concernant le douglas. NOUALS et BOISSEAU [1991] et CLAESSENS *et al.* [1994] proposent, quant à eux, un catalogue dont la construction a pris en compte la productivité d'une essence parmi les critères de définition des types de station. La figure 2.6 montre, dans le cas du frêne, que la démarche choisie tente de minimiser la variation de la productivité au sein des unités typologiques.

### **2.3.5. Classifications écologiques des stations forestières humides en Wallonie**

En Wallonie, il existe deux principales classifications écologiques des stations. L'une, typologique, consiste en une syntaxonomie des forêts belges [NOIRFALISE, 1984] ; l'autre, factorielle, s'identifie à la matrice de référence du guide du boisement [WEISSEN *et al.*, 1994]. Localement en Ardenne occidentale, on peut aussi utiliser le catalogue français des stations de l'Ardenne primaire [DRAPIER, 1989].

#### ***1° Matrice de référence du guide du boisement***

WEISSEN *et al.* [1994] ont conçu une matrice à 3 échelles relatives à l'humidité de la station (échelle hydrique à 15 niveaux), à la richesse chimique du sol (échelle trophique à 6 niveaux) et aux territoires écologiques (27 territoires). Ensemble, ces échelles définissent donc 2430 combinaisons ou classes, toutes n'étant évidemment pas représentées dans la réalité du terrain.

Pour les 2 premières échelles, les niveaux sont définis à partir de variables pédologiques et topographiques cartographiées (carte des sols de la Belgique au 1:20000, carte topographique au 1:25000). La définition des niveaux est présentée dans les figures 2.3 et 4.3 extraites du guide du boisement. La construction de la troisième échelle est plus complexe. Les 27 territoires écologiques ont été définis

par ONCLINCK *et al.* [1987] à partir de données climatiques, physiographiques et géologiques, selon la méthode développée par DELVAUX et GALOUX [1962]. En ce qui concerne plus particulièrement les forêts humides, seule une partie de la matrice de référence est utile : celle qui est caractérisée par des valeurs négatives de l'échelle hydrique (niveaux inférieurs à 0), soit, au total, 1296 classes.

## **2° *Syntaxonomie des forêts belges***

Durant les années '50 et '60, le Centre de Cartographie Phytosociologique (IRSIA), a décrit systématiquement la végétation de la Belgique selon la méthode de BRAUN-BLANQUET. Sa définition des unités taxonomiques a été guidée par les nombreux travaux des phytosociologues contemporains de manière à intégrer les associations reconnues en Belgique dans une classification européenne.

Dans leur méthodologie, la notion de station a toujours été importante, au même titre que le territoire phytogéographique, comme en témoignent les descriptions de SOUGNEZ [1973, 1978]. Ainsi, dans la synthèse générale de la classification phytosociologique des forêts belges, NOIRFALISE [1984] utilise le vocable de « type stationnel ». Les associations phytosociologiques étant en bonne relation avec les caractères stationnels, cette conception de la phytosociologie apporte un outil efficace au forestier, comparable à un catalogue des stations.

Les syntaxons ont été définis par leurs groupes caractéristiques ; ceux-ci étant considérés comme des groupes socio-écologiques [NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1961]. Ces groupes ne sont toutefois pas identiques pour toutes les associations, et ne sont donc pas issus de la même méthodologie de conception que les groupes socio-écologiques au sens de DUVIGNEAUD [1974]. Pourtant, par la suite, NOIRFALISE [1984] établira une liste de 30 groupes socio-écologiques à partir des espèces caractéristiques des différents syntaxons, qui correspond assez bien aux groupes socio-écologiques de DUVIGNEAUD, présentés par DULIERE *et al.* [1995].

La systématique phytosociologique belge repose donc sur ces travaux, même si, comme nous l'avons montré dans le premier chapitre, plusieurs auteurs y ont apporté des modifications [STEIN, 1980] ou ont proposé le retour à des conceptions plus anciennes mais plus précises [THILL *et al.*, 1988 ; CLAESSENS *et al.*, 1994 ; DE TILLESSE et DEVILLEZ, 1995]. Les tableaux 1.5 et 1.6 présentent cette classification en ce qui concerne les forêts hydrophiles.

## ***2.4. Méthodes d'estimation de la productivité des peuplements***

### **2.4.1. Productivité des peuplements et indice de fertilité**

Selon DUVIGNEAUD [1974], la productivité d'une forêt correspond à la vitesse de production de biomasse. Dans la pratique forestière, en relation avec l'objectif le plus fréquent de la sylviculture et des aménagements, on remplace généralement la notion de biomasse par celle de volume total, voire de bois fort<sup>(4)</sup> qui lui est corrélé [RONDEUX, 1993]. On exprime alors la productivité par l'accroissement en volume de bois.

Même si un volume de bois fort n'est pas en soi difficile à évaluer, la mesure de la productivité n'est toutefois pas simple. Elle exige des mesures répétées pour estimer l'accroissement en volume, mais surtout, le volume dépend largement du stade de développement de la forêt, de son âge, de sa structure, de sa densité, etc [CARMEAN, 1975 ; SCHMOLDT *et al.*, 1985 ; LEJEUNE, 1994], de telle sorte que la mesure de l'accroissement ne reflète pas forcément le potentiel de la station. D'autre part, il faut être en mesure de pouvoir comptabiliser les bois disparus par mortalité naturelle ou du fait d'interventions sylvicoles ou d'accidents [RONDEUX, 1993].

Très vite, les forestiers se sont donc tournés vers des indicateurs de cette productivité qui seraient d'une part, plus facilement estimés, et d'autre part, indépendants de l'état de la forêt [CARMEAN, 1975]. On parle alors d'estimation indirecte de la productivité, qui peut s'appuyer sur des critères dendrométriques et/ou écologiques [RONDEUX, 1993]. Ce paragraphe ne concerne que les estimations dendrométriques.

### **2.4.2. Méthodes basées sur la hauteur dominante**

#### ***1° Définition de l'indice de fertilité***

##### **• *Au sein de la futaie pure équiennne***

Dans le cadre de la futaie pure équiennne, l' indice de fertilité le plus fréquemment utilisé est la hauteur dominante à un âge de référence fixé (indice de fertilité, ou *site index*), déjà défini par HUBER en 1824 [TESCH, 1981] et presque

---

<sup>(4)</sup> Volume jusqu'à la recoupe à une circonférence de 22 cm.

exclusivement utilisé depuis près de deux siècles dans les études station x production [TESCH, 1981 ; CARMEAN, 1996]. En effet, au sein des futaies pures équiennes, on peut considérer que, selon la loi D'EICHHORN élargie, à une hauteur dominante<sup>(5)</sup> fixée correspond une production en volume donnée [RONDEUX, 1993]. Par conséquent, la hauteur dominante à un âge fixé est un bon estimateur de la productivité.

#### • *Au sein des autres structures*

Par contre, au sein des autres structures forestières, la relation entre la hauteur dominante et la production totale n'est plus univoque et varie en fonction des régimes et de la concurrence inter-spécifique [LE GOFF, 1984 ; WAGEMANS, 1994]. Ces deux auteurs ont clairement mis en évidence des différences d'évolution de la hauteur des arbres dominants selon les traitements sylvicoles. Dans ces conditions, la relation hauteur-âge perd sa signification [MONSERUD, 1988 ; LEJEUNE, 1994].

Au sein des taillis sous futaie, LE GOFF [1984] propose une correction de l'indice de fertilité en fonction de la proportion de houppier, tandis qu'au sein de futaies d'âges multiples, OTOUL [1978], VANESSE [1993], HUANG et TITUS [1993] adaptent alors la notion d'indice de fertilité, en remplaçant l'âge de référence par un diamètre dominant de référence. Mais pour les mêmes raisons, cet indice n'est utilisable que pour une structure forestière précise, au sein de laquelle la pression de concurrence qui affecte les arbres dominants est comparable, car les 2 variables dendrométriques (circonférence, hauteur) sont intimement liées à la croissance individuelle des arbres [SCHÜTZ, 1969]. Aucun indice ne s'est avéré généralisable à toutes les structures, l'âge restant un paramètre-clé à connaître.

### **2° *Courbes de fertilité***

Dans le contexte de la futaie équienne, l'indice de fertilité est généralement mesuré par la hauteur dominante du peuplement à un âge fixé. Il se réfère à un faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante, aussi appelé courbes de fertilité, qui répond à l'équation générale :

$$H_{\text{dom}} = f(\text{Age}, H_{\text{réf}})$$

où :  $H_{\text{dom}}$  = hauteur dominante

---

<sup>(5)</sup> Hauteur dominante : hauteur moyenne des arbres dominants du peuplement, généralement les 100 plus gros bois à l'hectare.

$H_{ref}$  = niveau de fertilité à l'âge de référence.

Ces courbes de fertilité sont établies par ajustement mathématique d'un faisceau de courbes à un ensemble de données expérimentales qui peuvent être de plusieurs types :

- des mesures ponctuelles au sein de placettes temporaires (couples hauteur dominante x âge [DAGNELIE *et al.*, 1988]),
- des mesures d'accroissements en hauteur dominante au sein de placettes permanentes (portions de courbes [LAURENT *et al.*, 1988]),
- la combinaison de ces deux types de données [RONDEUX et THIBAUT, 1996],
- des analyses de tiges (courbes observées à partir du comptage de l'âge à différentes hauteurs sur des arbres dominants) [HUBER, 1824 *in* TESCH, 1981 ; LE GOFF et LEVY, 1984 ; MONSERUD, 1984 ; DUPLAT et TRAN-HA, 1986 ; PAUWELS *et al.*, 1999 ; CLAESSENS *et al.*, à paraître].
- la combinaison de ces trois types de données [THIBAUT *et al.*, 1992].

Selon DUPLAT et TRAN-HA [1997], les courbes de fertilité ajustées sur des mesures ponctuelles risquent de sous-estimer la croissance des peuplements âgés. En effet, selon THIBAUT *et al.* [1992], en frênaie, sur les stations fertiles, l'exploitation des peuplements s'opère plus tôt en raison d'une croissance plus rapide, ce qui se traduit dans l'échantillon de placettes par un biais dû à la sur-représentation de peuplements à faible croissance en hauteur dans les classes d'âge supérieures.

Ainsi, on peut considérer que le recours aux analyses de tige permet de mieux évaluer la croissance en hauteur dominante des peuplements. Mais il faut rappeler que les analyses de tige concernent des arbres actuellement dominants. S'ils ont acquis ce statut tardivement, on risque de surestimer la croissance lors des dernières années. En chênaies, tout en faisant l'hypothèse que les arbres puissent croître par paliers, DUPLAT et TRAN-HA [1997] estiment cependant que les chênes acquièrent généralement assez tôt leur statut de dominant.

### 2.4.3. Méthode basée sur les “ inter-verticilles ”

La croissance en hauteur étant en bonne relation avec la productivité, la longueur de la pousse annuelle peut aussi être considérée comme un bon indicateur de la productivité. Ainsi, selon HAGGLUND [1981], pour les espèces verticillées, la productivité peut être estimée par la distance séparant 2 verticilles (figure 2.8).



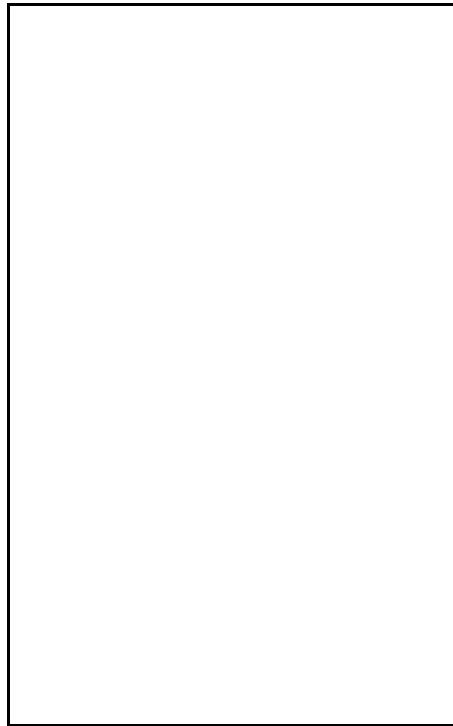


Figure 2.8.- *Indice de fertilité défini par la distance séparant 2 verticilles déterminés [extrait de CARMEAN, 1996].*

### ***2.5. Méthodologie des études de la relation station x production***

La relation station x production est une information fondamentale pour la gestion agricole ou forestière. Aussi, comme nous l'avons vu, elle a retenu très tôt l'attention des scientifiques. On peut identifier 3 principales approches méthodologiques correspondant à autant d'objectifs :

- les analyses « expérimentales » [LE TACON, 1973], qui tentent de rechercher les facteurs écologiques de production de l'essence et de comprendre la nature de la relation station x production. Elles font appel à l'expérimentation et aux études écophysiologicals ;

- les analyses « comparatives » [LE TACON, 1973], qui tentent de dégager les grandes lignes de l'autécologie des essences à partir des relations statistiques existant entre les variables abiotiques et la productivité des essences ;
- les modèles de fertilité, qui ont été développés dans le seul objectif de prévoir la productivité stationnelle sans envisager d'explication causale de la relation station x production. Cette approche est particulièrement développée dans les pays de culture anglo-saxone [CARMEAN, 1975, 1996].

Les paragraphes suivants ne développent que les méthodes reposant sur des analyses comparatives et des modèles de fertilité, car nous avons considéré que les analyses expérimentales sont trop lourdes à mener dans le cadre de notre étude.

### **2.5.1. Les analyses comparatives**

Les analyses comparatives sont fondées sur la mise en évidence de relations statistiques entre les variables écologiques et la productivité. Toutefois, même si ces relations n'impliquent pas forcément un lien de causalité au sens biologique [DAGNELIE, 1973 ; LE TACON, 1973], on peut considérer que la multiplicité des techniques d'analyse et de caractérisation des stations, ainsi que l'expertise de leur utilisateur, permettent actuellement de dégager les grandes lignes de l'autécologie des essences par l'analyse comparative.

#### ***1° Caractérisation des stations***

Il est important de caractériser les stations par des variables pertinentes [BECKER et LE GOFF, 1988] et correctement appréhendées [GEGOUT et HOULLIER, 1993]. Nous verrons dans le chapitre 4 que l'on peut définir des variables écologiques synthétiques ou des groupes écologiques qui sont en relation assez étroite avec les principaux facteurs écologiques. Par ailleurs, les types de station ou de végétation peuvent aussi être des variables synthétiques contenant une grande quantité d'informations.

#### ***2° Techniques d'analyse***

Les analyses comparatives progressent généralement par étapes.

La première consiste en une série d'analyses univariées destinées à évaluer la relation statistique entre chacune des variables et l'indice de fertilité (analyse de la variance à 1 critère de classification ou analyses de corrélations).

La seconde étape consiste en analyses multivariées : la régression multiple de type  $H50 = f$  (variables écologiques), l'analyse de la variance, de la covariance, ou des analyses du jeu de variables dans la perspective d'y trouver une structure (analyse en composantes principales, analyse factorielle des correspondances, classifications numériques, ...) qui pourrait être mise en relation avec la productivité. Dans ces derniers cas, on rejoint alors de l'élaboration des typologies de station et des modèles typologiques [GILBERT, 1995].

*In fine*, les résultats proviennent de l'interprétation et de la confrontation des résultats des différentes analyses et font appel à l'expérience stationnelle de l'analyste [PFISTER et ARNO, 1980].

Cette démarche, qui se caractérise par l'importance de l'interprétation, nécessite une bonne expertise du milieu ; mais il n'est toutefois pas toujours possible de démêler les relations entre variables et entre celles-ci et la croissance des peuplements. Dans cette optique, la qualité des résultats dépend largement de la structure de l'échantillon de stations et des gradients écologiques qu'il contient.

Par ailleurs, quelle que soit la méthode retenue, les résultats dépendent aussi de la qualité de l'estimation de la productivité.

## 2.5.2. Les modèles de fertilité

### 1° Modèles factoriels

Les modèles prédictifs de la productivité se présentent le plus souvent sous la forme d'une équation mathématique :  $I = f$  (variables écologiques), où  $I$  est l'indice de fertilité, soit, généralement, la hauteur dominante des peuplements à un âge de référence et les variables écologiques sont des caractéristiques facilement mesurables ou appréciables sur le terrain, qu'il s'agisse ou non de véritables facteurs écologiques [RONDEUX, 1993].

Ces modèles sont construits par régression multiple [HÄGGLUND, 1981 ; LE GOFF et LEVY, 1984 ; GREEN *et al.*, 1989 ; MONSERUD *et al.*, 1990 ; WORREL et MALCOLM, 1990 ; CLAESSENS *et al.*, 1993 ; BARY *et al.*, 1995] et expliquent généralement entre 50 et 80 % de la variabilité de l'indice de fertilité, selon les essences étudiées et les zones d'étude concernées.

Au lieu d'une seule relation établie sur l'ensemble des données, certains auteurs [SCHMIDT et CARMEAN, 1987 ; LAVALLEY, 1991 in : CARMEAN, 1996] construisent une série de modèles spécifiques aux principaux sous-ensembles de stations reconnus dans le jeu de données (tableau 2.4). Ces méthodes s'orientent alors insensiblement vers des modèles factoriels plus sophistiqués qui utilisent déjà la notion de typologie.

Tableau 2.4. – Prédiction de l'indice de fertilité des peuplements de *Pinus banksiana* à partir d'un modèle établi par une série de 4 régressions multiples (extrait de CARMEAN [1987]).

| Soil group                                | Nb of plots   | Equation   | Adj R <sup>2</sup> | SEE (m) |
|---|---|--|--------------------|---------|
| Shallow (< 1 m) to bedrock morainal soils | 20  | SI = 9.416 + 0.1125 DBR – 0.0006 (DBR x CoFrag A)                      | 0.83               | 1.28    |
| Deep (> 1 m) morainal soils               | 30  | SI = 18.536 + 0.00051 [DRL x (100 – CoFrag C)] – 0.378 CIA             | 0.65               | 1.26    |
| Glaciofluvial sands                       | 31  | SI = 17.558 + 0.1030 DRL – 0.7268 Slope – 0.00441 [DRL x (20 – Slope)] | 0.65               | 1.26    |
| Lacustrine clays                          | 18  | SI = 25.380 + 0.0180 (ThA) <sup>2</sup> - 0.243 (pH BC) <sup>2</sup>   | 0.75               | 1.07    |
| where :                                   |   |  |                    |         |
| SI  | Site index (SI <sub>BH50</sub> ) is total height (m) of dominant and co-dominant trees at 50 years breast-height age ;    |  |                    |         |
| DBR                                       | Depth to bedrock (cm) ;   |  |                    |         |
| DRL                                       | Depth to root restricting layer (cm) (i.e. coarse sandy subsoil, mottles, gley, water table, carbonates, or basal till) ; |  |                    |         |
| ThA                                       | Thickness of A horizon (cm)   |  |                    |         |
| CoFragA                                   | Coarse fragments in A horizon (%) ;   |  |                    |         |
| CoFragC                                   | Coarse fragments in C horizon (%) ;   |  |                    |         |
| CIA                                       | Clay content of A horizon (%) ;   |  |                    |         |
| pHBC                                      | pH of BC horizon ;  |  |                    |         |
| Slope                                     | Slope steepness (%)   |  |                    |         |

## 2° Modèles typologiques

Les typologies de station peuvent aussi être des outils adéquats pour prévoir l'indice de fertilité [CARMEAN, 1996]. Ils ont en tous cas l'avantage d'être pratiques puisque les typologies sont généralement conçues, à l'heure actuelle, à l'échelle de l'aménagement forestier. Ainsi, comme CAJANDER en avait déjà montré l'utilité, DAGNELIE [1957], LA ROI *et al.* [1988], GILBERT [1995] utilisent directement l'indice de fertilité moyen observé comme estimateur de la fertilité du type de station ou de végétation (figure 2.9). Dans le cadre d'un catalogue de station, GILBERT *et al.* [1996] regroupent même les types de station écologiquement proches et ayant un indice comparable pour proposer une typologie simplifiée et spécifique à l'essence étudiée.

DRAPIER [1993] remarque toutefois que *op. cit* « l'efficacité de la démarche dépend de la façon dont les facteurs écologiques ont été pris en compte ou non dans la réalisation du catalogue. Par exemple, l'étude des relations station x production dans le cas des sols hydromorphes doit généralement être faite indépendamment des catalogues car ceux-ci n'utilisent pas la méthodologie assez lourde nécessaire aux études de tels milieux ».

Dans un autre ordre d'idées, GREEN *et al.* [1989] font le lien entre les 2 méthodes en utilisant les types de station parmi les variables explicatives d'un modèle prédictif factoriel.

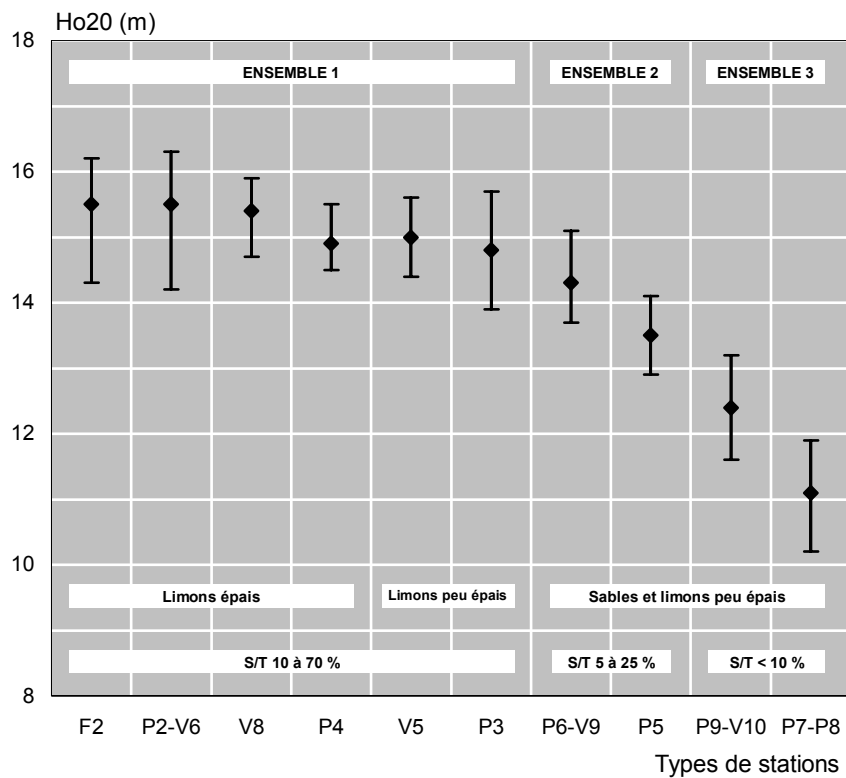


Figure 2.9. – Valeurs de l'indice de fertilité des peuplements de douglas selon les types de station du catalogue régional [extrait de GILBERT, 1995].

## ***2.6. Les grandes lignes de la méthodologie adoptée***

Pour rappel, comme cela a été présenté en introduction (figure 2), l'objectif de cette étude et d'améliorer les connaissances concernant les stations forestières à aulne glutineux, ainsi que de déterminer ses potentialités forestières, afin d'envisager la gestion intégrée des forêts hydrophiles sur une base scientifique. Pour répondre à ces objectifs, nous avons donc entrepris, au niveau de la Wallonie :

- l'étude de la productivité et des potentialités sylvicoles de l'aulne ;
- l'étude des stations de l'aulne, aboutissant à l'élaboration d'un catalogue des stations ;
- l'étude de la relation station x production.

Ensuite, pour présenter ces résultats de manière concrète, en relation avec la gestion forestière, nous avons affiné le catalogue pour la région ardennaise, et nous y avons relié notre étude autécologique, ainsi que les données existantes concernant la gestion de ces milieux.

### **2.6.1. Récolte des données écologiques**

#### ***1° Adaptation à la zone d'étude***

Nous avons choisi une zone d'étude définie à la fois par un cadre géographique (région wallonne) et par une contrainte pédologique (sols humides). La caractérisation des stations y sera forcément adaptée, notamment en ce qui concerne l'estimation de l'humidité et de l'aération des sols.

Par ailleurs, la zone d'étude a déjà fait l'objet d'études stationnelles, et le niveau des connaissances y est assez élevé, notamment en ce qui concerne la phytosociologie (syntaxonomie [NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1961 ; STEIN, 1980 ; DUMONT, 1984], groupes écologiques [NOIRFALISE et DETHIOUX, 1970 ; GODART, 1989]), ce qui nous permettra souvent d'utiliser les communautés végétales a posteriori, comme indicateurs, et non comme descripteurs. Cela devrait permettre d'augmenter l'efficacité de la typologie, en la rendant indépendante de la dynamique de la végétation ou de ses dégradations [FRANC et VALADAS, 1990 ; GEGOUT et HOULLIER, 1993].

Toutes ces études phytosociologiques se sont appuyées sur les méthodes de l'école de BRAUN-BLANQUET ; pour bénéficier de cet acquis, et parce que cette

méthode convient bien à l'échelle de notre étude, nous l'adopterons donc aussi. Une présentation synthétique en a été dans le paragraphe 2.3.4.

## ***2° Spécificité du catalogue et choix des variables***

Nous avons vu que la qualité d'un catalogue dépend de sa validité vis-à-vis d'utilisations spécifiques et de la pertinence du choix des variables descriptives. Ainsi, nous déterminerons les descripteurs écologiques des stations en fonction de :

- leur adaptation aux conditions écologiques particulières de la zone d'étude ;
- leur adaptation aux objectifs d'utilisation du catalogue ;
- leur capacité à expliquer le « fonctionnement » des stations et leurs relations avec la productivité de l'aulne.

## **2.6.2. Estimation de la productivité et des potentialités sylvicoles de l'aulne**

### ***1° Choix de l'indice de fertilité***

Pour estimer la productivité de l'aulne, nous avons eu recours à un indice dendrométrique : la hauteur dominante des peuplements à l'âge de référence de 50 ans. En effet, en raison du caractère colonisateur de l'aulne, ses groupes ou peuplements forestiers, bien que peu étendus, sont généralement denses, pratiquement monospécifiques et équiennes, de sorte que l'on peut raisonnablement faire l'hypothèse, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.2, que les conditions d'application de la loi d'EICHHORN élargie sont remplies.

L'âge de référence de 50 ans nous a paru le mieux adapté car :

- il est proche de l'âge d'exploitabilité envisageable pour l'essence ;
- l'étalement des hauteurs dominantes y afférant est important ;
- il permet de prendre en compte un grand nombre d'aulnaies, âgées de 30 à 80 ans, en ayant le moins souvent possible recours à des extrapolations hasardeuses de la hauteur dominante dès que la période dépasse 20 ans [CARMEAN, 1996].

## **2° Construction des courbes de fertilité**

La détermination de cet indice de fertilité nécessite alors de disposer d'un faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante. La littérature étrangère présente quelques tables de production [SOPP, 1974 ; SCHOBER, 1975], mais, conformément aux recommandations de DECOURT [1964], nous avons préféré nous diriger vers la construction de courbes locales, établies pour la région étudiée, et de surcroît, construites au sein d'un sous-échantillon de placettes issues du réseau d'observations.

En ce qui concerne la construction proprement dite des courbes, nous avons adopté la méthode de DUPLAT et TRAN-HA [1986], basée sur des analyses de tige, qui nous a déjà donné satisfaction lors de l'étude de la croissance de l'érable sycomore et du merisier [CLAESSENS *et al.*, à paraître]. Les analyses de tige ont été réalisées au sein de placettes du réseau d'observations chaque fois que les conditions d'application du protocole expérimental de la méthode adoptée étaient remplies. Ces conditions ont toutefois été adaptées aux caractéristiques de nos placettes d'aulne.

## **3° Evaluation du potentiel sylvicole de l'aulne glutineux**

### **• Potentiel de production**

Pour mieux appréhender la signification de l'indice de fertilité en termes de potentiel de production, nous avons procédé de 2 manières :

- nous avons comparé graphiquement les courbes de fertilité que nous avons établies avec les courbes hongroises et allemandes extraites des tables de production ;
- nous avons estimé les accroissements courants en volume observés pour les différentes classes d'âge et de productivité à partir des placettes de production qui ont été mesurées à 2 reprises et nous les avons comparés à ceux qui sont renseignés dans les tables.

### **• Objectifs sylvicoles**

Nous avons défini le potentiel sylvicole de l'aulne par référence au temps nécessaire pour produire un « arbre-objectif » caractérisé par une bille de pied de 6 à 8 m de hauteur, et de 150 cm de circonférence à 1,3 m du sol (paragraphe 1.5.4). Ce temps a été estimé à partir de l'évolution observée de la circonférence dominante dans l'ensemble des placettes dendrométriques, en relation avec les conditions de concurrence régnant au sein des placettes. Ces conditions de concurrence ont été



évaluées par la surface terrière et le nombre de pieds à l'hectare (placettes de production) ou de manière subjective (points de mesure).

#### ***4° Construction de modèles de productivité stationnelle***

L'indice de fertilité et les caractéristiques écologiques étant connus pour chaque placette, nous avons élaboré des modèles d'estimation non dendrométrique de la productivité des stations, de type factoriel et typologique, selon les méthodes développées au paragraphe 2.5.2. Le modèle typologique fait référence à la syntaxonomie des forêts à aulne.

### **2.6.3. Typologie des stations**

#### ***1° Objectif***

L'objectif de la construction de la typologie des stations wallonnes est double. D'une part, il tient lieu d'étude préliminaire pour le catalogue de l'Ardenne et, d'autre part, il permet de structurer le jeu de données écologiques, afin d'envisager une étude plus approfondie de la relation station x production en mettant cette structure à profit.

#### ***2° Méthode***

Dans un premier temps, nous avons mis à jour la structure du jeu de données abiotiques par des analyses multivariées. L'analyse en composantes principales, outil d'analyse des tableaux de données [PALM, 1993], nous a permis d'identifier les principaux axes de variation du jeu de données par rapport auxquels les stations observées ont alors été comparées entre elles. Ensuite, nous avons eu recours à la classification numérique, méthode statistique permettant de subdiviser un ensemble d'observations en un certain nombre de classes [PALM, 1996], et qui rejoint donc l'objectif des typologies. Cette analyse nous a permis d'identifier les possibilités de regroupement de stations, que nous avons évaluées dans l'espace des composantes principales. A ce stade, la typologie résultante peut être qualifiée « d'abiotique ».

Ensuite, nous avons confronté la typologie obtenue à la classification phytosociologique existante et à notre expérience de terrain, pour déterminer les principales familles de stations de l'aulne glutineux en Région wallonne.

### ***3° Analyse de la productivité de l'aulne au sein du catalogue***

La typologie et l'espace factoriel défini par l'analyse en composantes principales effectuée pour établir le catalogue constituent un nouvel espace pour l'analyse de la relation station x production ; nous avons donc observé comment y évoluait l'indice de fertilité pour en déduire des informations sur l'autécologie et les potentialités sylvicoles de l'aulne glutineux en Wallonie.

#### **2.6.4. Le catalogue de la région ardennaise**

L'objectif du catalogue est de présenter sous une forme synthétique et pour la seule région ardennaise, l'ensemble des résultats de notre étude.

Nous avons pris comme base la typologie des stations wallonnes (établie au chapitre 6). Ensuite, sur les seules données relatives à l'Ardenne, nous avons utilisé l'ensemble des critères stationnels (détaillés au chapitre 4), ainsi que des critères relatifs aux potentialités sylvicoles de l'aulne (mises en évidence au chapitre 5) et aux contraintes de gestion (recensées au chapitre 1) pour définir 12 types de station relativement homogènes, qui pourront faire l'objet d'une gestion différenciée.

Comme PFISTER et ARNO [1980] le recommandent, cette deuxième phase a très largement bénéficié de l'expertise acquise en parcourant le réseau d'observations à de nombreuses reprises, au cours de plusieurs années, lors de la récolte des données.

## Chapitre 2

### *Classifications écologiques des stations et productivité stationnelle : approches méthodologiques*

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1. Introduction .....  | 67        |
| 2.2. Historique de l'étude des stations et de la productivité stationnelle ....          | 67        |
| 2.3. Concepts et méthodes de la classification écologique des stations .....             | 71        |
| 2.3.1. Concept et objectif des classifications écologiques des stations ....             | 71        |
| 2.3.2. Familles de classifications écologiques des stations .....                        | 71        |
| 2.3.3. Classifications factorielles .....  | 72        |
| 2.3.4. Classifications typologiques .....  | 75        |
| <b>PRINCIPAUX CONCEPTS DE L'ETUDE DE LA VEGETATION .....</b>                             | <b>78</b> |
| 2.3.5. Classifications écologiques des stations forestières humides en<br>Wallonie ..... | 89        |
| 2.4. Méthodes d'estimation de la productivité des peuplements .....                      | 91        |
| 2.4.1. Productivité des peuplements et indice de fertilité .....                         | 91        |
| 2.4.2. Méthodes basées sur la hauteur dominante .....                                    | 91        |
| 2.4.3. Méthode basée sur les " inter-verticilles " .....                                 | 93        |
| 2.5. Méthodologie des études de la relation station x production .....                   | 94        |
| 2.5.1. Les analyses comparatives .....   | 95        |
| 2.5.2. Les modèles de fertilité .....  | 96        |
| 2.6. Les grandes lignes de la méthodologie adoptée .....                                 | 99        |
| 2.6.1. Récolte des données écologiques .....   | 99        |
| 2.6.2. Estimation de la productivité et des potentialités sylvicoles de<br>l'aulne ..... | 100       |
| 2.6.3. Typologie des stations .....  | 102       |
| 2.6.4. Le catalogue de la région ardennaise .....  | 103       |

---

## **Chapitre 3**

### *Matériel d'étude*

---

#### ***3.1. Introduction***

Au sein de la forêt wallonne, nous avons établi un « réseau d'observations » qui se compose de 166 placettes distribuées dans l'ensemble des régions naturelles, et particulièrement au sein du massif ardennais (63 % des placettes). Ce chapitre se compose de 2 paragraphes respectivement consacrés à :

- la description de la région concernée à partir de ses principales caractéristiques écologiques (paragraphe 3.2) ;
- la présentation des modalités d'installation du réseau d'observations et de ses placettes, renvoyant la description des données proprement dites dans les chapitres consacrés à leur analyse.

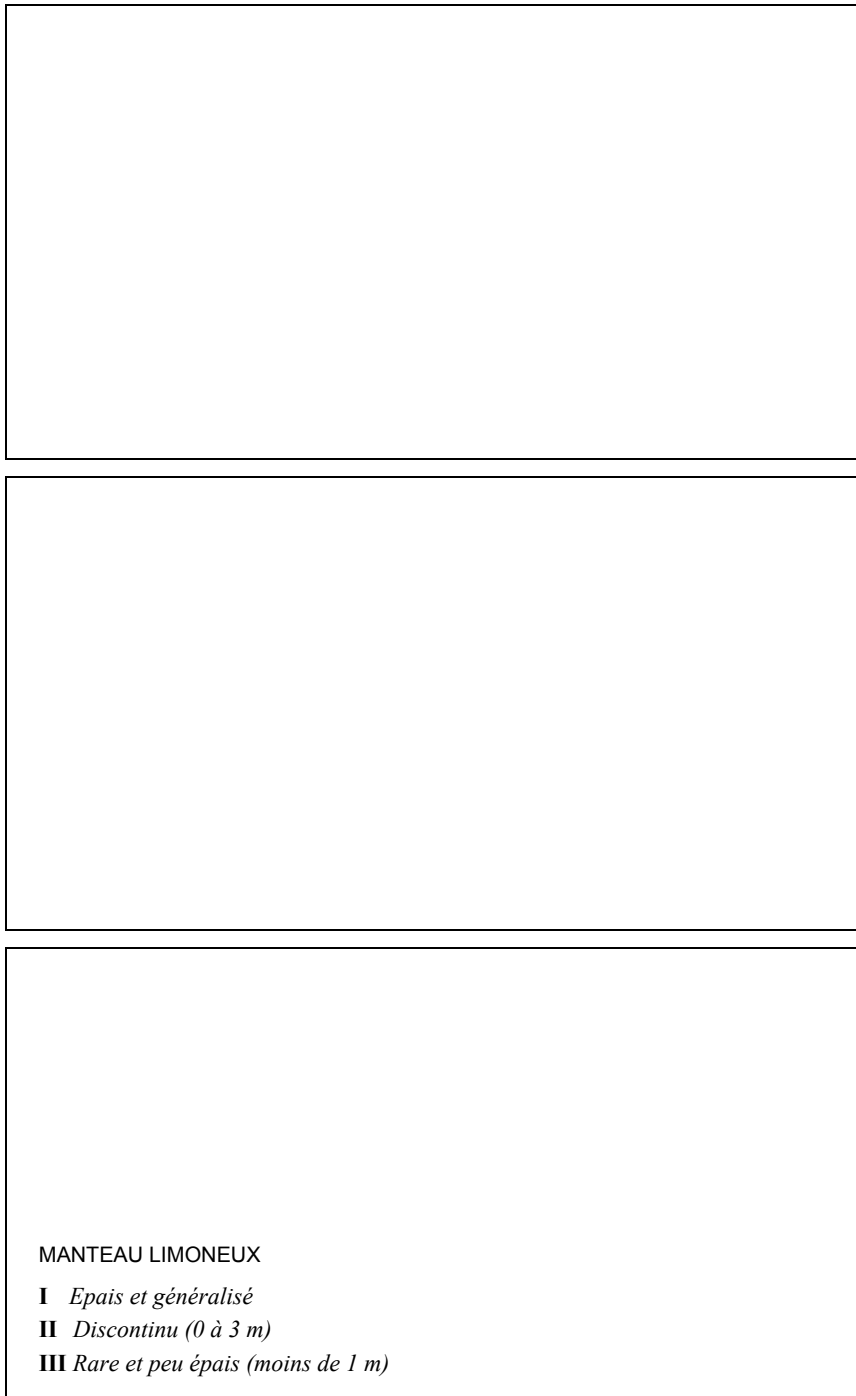
#### ***3.2. Description écologique de la zone d'étude***

Nous avons entrepris notre étude sur l'ensemble de la Wallonie (figure 3.1). En raison de sa géomorphologie, cette région possède une diversité écologique considérable eu égard à son étendue. Afin de bien situer notre étude dans son environnement physique, il est opportun d'envisager les gradients écologiques qui caractérisent le territoire et qui ont notamment été étudiés par DELVAUX et GALOUX [1962] et, plus récemment, par DUFRENE et LEGENDRE [1991].

##### **3.2.1. Gradients écologiques de la Wallonie**

La géomorphologie de la Wallonie est telle que plusieurs gradients écologiques sont disposés d'O-NO en E-SE. En effet, l'extrémité Ouest de la région se situe, à 20 m d'altitude, à 50 km de la Mer du Nord, alors qu'à l'Est, à 200 km de la mer, le plateau ardennais culmine à près de 700 m (figure 3.1). Ce massif, disposé

*Figure 3.1. – Carte oro-hydrographique de la zone d'étude [TILMONT et al.] (limites en trait noir épais)*



*Figure 3.2. – Illustration des principaux gradients climatiques et trophique présents dans la zone d'étude [MANTNIEKS, 1955 ; TILMONT et al., 1981]*

plus ou moins à l'encontre des vents dominants, intercepte les précipitations et, en raison de son altitude, est aussi plus frais d'environ 3°C. De surcroît, ce plateau est constitué de roches particulièrement acides.

### 1° Gradient climatique

Le tableau 3.1 et la figure 3.2 mettent en parallèle les gradients climatiques avec le gradient altitudinal existant en Wallonie.

Tableau 3.1. - *Caractéristiques climatiques pour 3 régions situées le long du gradient climatique de la Wallonie.*

| <i>Caractéristiques écologiques</i>                 | <i>Plaine de l'Escaut</i> | <i>Plateau du Condroz</i> | <i>Haut-plateau ardennais</i> |
|---|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Altitude (m)  | 20                        | 280                       | 600                           |
| Moyenne annuelle des précipitations (mm)            | 700                       | 850                       | 1400                          |
| Moyenne des précipitations de mai à septembre (mm)  | 320                       | 370                       | 610                           |
| Moyenne annuelle des températures (°C)              | 9,5                       | 8,5                       | 6,5                           |
| Température moyenne du mois le plus froid (°C)      | 3,0                       | 1,5                       | -0,5                          |
| Température moyenne du mois le plus chaud (°C)      | 17,5                      | 16,5                      | 14,5                          |
| Nombre de jours de gelées                           | 60                        | 85                        | 120                           |
| Longueur de la période de végétation (10°C) (jours) | 175                       | 160                       | 130                           |

### 2° Gradient trophique

La Wallonie est caractérisée par une grande diversité lithologique qui détermine une large gamme de richesse chimique des sols. En effet, comme l'illustre la figure 3.2, d'Ouest en Est, se rencontrent successivement des assises recouvertes d'une épaisse couche de limon (au Nord du sillon Sambre et Meuse), des sols calcaires, psammitiques puis schisteux, parfois enrichis de limon (plateau mosan), puis des sols siliceux, dont l'évolution, largement conditionnée par la fraîcheur du climat, n'est pas favorable aux cycles biologiques (plateau ardennais). Ces conditions déterminent un gradient global de fertilité chimique prononcé.

### 3.2.2. Territoires écologiques

En schématisant la situation, on peut considérer que 3 facteurs écologiques fondamentaux évoluent graduellement le long du même axe qui conduit de la plaine de l'Escaut au sommet du massif ardennais. En effet, de l'O-NO vers l'E-SE :

- la température décroît,
- la pluviosité augmente,
- la richesse chimique du sol décroît globalement.

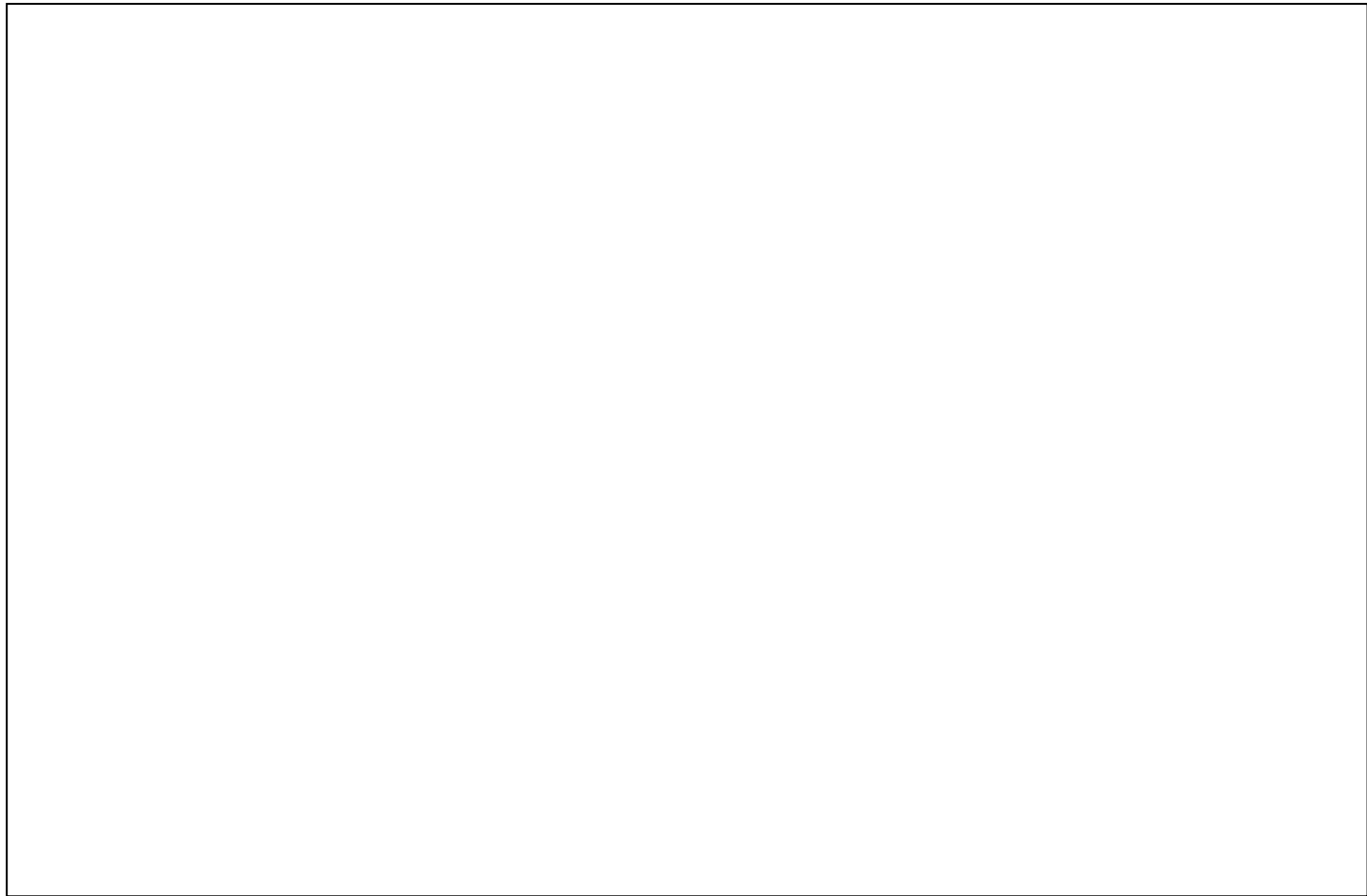
Parallèlement, on observe aussi un gradient de continentalité, quelque peu perturbé par la géomorphologie locale. Il se traduit dans la végétation, déterminant 2 territoires phytogéographiques (figure 3.4) : les domaines atlantique (Ouest) et médio-européen (Est).

Le croisement de ces gradients détermine une gamme de « territoires écologiques » définie et exclut une série de situations écologiques (par exemple : des stations fraîches et peu arrosées ou des stations fertiles et froides). Toutefois, des facteurs de compensation tempèrent cette présentation caricaturale de la situation : la topographie, l'humidité, le caractère alluvial des sols, etc.

Partant de ces considérations, DELVAUX et GALOUX [1962] ont défini une classification hiérarchique des « territoires écologiques » de la Wallonie, d'abord définis par leur climat, leur géomorphologie régionale et la nature de leur roche-mère. La figure 3.4 présente les 26 secteurs qui ont été définis par ces auteurs pour le Sud de la Meuse, puis complété par ONCLINCX *et al.* [1987] pour le reste de la Wallonie. Par la suite, DUFRENE et LEGENDRE [1991] ont montré que ces secteurs sont bien décrits par les gradients écologiques (figure 3.3).

*Figure 3.3. - Secteurs écologiques ordonnés selon les gradients écologiques de la Wallonie (analyse factorielle des correspondances entre les caractéristiques écologiques et les secteurs, DUFRENE et LEGENDRE, [1991])*





*Figure 3.4. - Secteurs écologiques de la Wallonie [MRW, 1991]*

### ***3.3. Réseau d'observations***

Notre étude se base sur un réseau d'observations comprenant 166 placettes de mesures. Ces placettes se répartissent sur l'ensemble de la forêt wallonne, et sont installées au sein de groupes ou peuplements forestiers d'aulne glutineux.

La localisation des groupes et peuplements provient de 4 sources d'informations :

- notre prospection, basée sur l'identification de zones potentielles à partir des cartes topographiques (présence simultanée d'une forêt feuillue et d'une zone humide ou d'un cours d'eau) ;
- les résultats d'une enquête menée auprès de la DNF ;
- l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie ;
- la collaboration spontanée de nombreuses personnes du milieu forestier, intéressées par l'aulne glutineux.

Ces groupes et peuplements ont alors fait l'objet d'une sélection en vue de constituer un matériel d'étude correspondant aux objectifs que nous nous sommes fixés et aux contraintes expérimentales liées à notre méthodologie.

#### **3.3.1. Contraintes et objectifs généraux de l'échantillonnage**

D'une part, le réseau d'observations a été établi en vue de remplir les 3 objectifs suivants :

- étudier les stations de l'aulne et en établir une typologie ;
- estimer la productivité de l'aulne et sa variation selon les stations ;
- évaluer les potentialités sylvicoles de l'aulne dans le cadre de la production de bois d'oeuvre.

D'autre part, il doit aussi satisfaire les nombreuses contraintes expérimentales suivantes :

- être représentatif des conditions écologiques des forêts humides de la Wallonie, avec un effort d'échantillonnage particulier concernant celles qui pourraient s'avérer limitantes ;

- être constitué de placettes homogènes quant aux conditions stationnelles, contrainte non négligeable dans les milieux mosaïqués où se développent les aulnaies ;
- être constitué de placettes adaptées à la taille des aulnaies naturelles, de manière à pouvoir prendre en compte des petits groupes d'aulne de quelques ares ou des peuplements étroits et allongés.

Pour s'assurer de la représentativité des conditions écologiques, nous avons hiérarchisé l'échantillonnage selon les grandes régions forestières (Régions limoneuse et sablo-limoneuse, plateau mosan, basse, moyenne et haute Ardenne, Lorraine belge). Ensuite, nous avons veillé à distribuer équitablement les placettes selon les alliances phytosociologiques de l'aulne (*Alnion*, *Alno-Padion*, *Carpinion*, *Quercion*), tout en tentant d'atteindre un objectif minimum de 5 placettes par unité ainsi définie. Nous avons intensifié l'effort d'échantillonnage au sein de la région ardennaise, spécifiquement concernée par l'élaboration du catalogue des stations.

### 3.3.2. Choix des peuplements

En raison de l'orientation générale de notre étude, qui concerne à la fois les stations et leurs potentialités forestières, ces placettes sont, dans la mesure du possible, installées dans des petits peuplements ou des groupes de futaie riches en aulne, au sein desquels il est plus aisé, d'un point de vue méthodologique, d'évaluer les potentialités sylvicoles.

Le type de peuplement qui a été pris en compte est assez variable, dans la mesure où les aspects écologiques ont prioritairement guidé notre échantillonnage. Dans un premier temps, nous avons limité nos prospections aux groupes ou petits peuplements de futaie (variant de 5 ares à 1 hectare) riches en aulne (au moins 80 % de la surface terrière de l'ensemble des essences présentes au sein de la placette), d'origine naturelle et d'allure équienne. Dans un deuxième temps, pour respecter la contrainte de représentativité des conditions écologiques, nous avons dû étendre l'échantillon à des peuplements issus de taillis ou mélangés, voire même à des peuplements artificiels. Nous verrons plus loin que selon l'objectif recherché, nous utiliserons l'un ou l'autre de ces types de peuplement.

### 3.3.3. Installation des placettes

Nous avons installé 2 types de placettes adaptées à différentes conditions de peuplement et à différents objectifs (tableau 3.2). Leurs caractéristiques communes sont de contenir de l'aulne glutineux et d'être homogènes quant à la station, à l'échelle du groupe d'aulnes.

#### *1° Placettes de production*

Les placettes de production sont circulaires, voire parfois ovales, de surface connue comprise entre 114 et 800 m<sup>2</sup> selon l'âge et l'étendue des aulnaies. Ces placettes permettent donc d'envisager des estimations dendrométriques ramenées à l'unité de surface.

#### *2° Points de mesures*

Fréquemment, la surface et surtout la forme de l'aulnaie, le plus souvent en mosaïque avec d'autres peuplements, ou allongée sur d'étroites banquettes alluviales, ne nous ont pas permis d'installer une placette de production de forme régulière en respectant les critères d'homogénéité de la station et du peuplement. Dans ce cas, nous avons installé un « point de mesure », c'est-à-dire une placette sans surface rigoureusement fixée, centrée sur 2 arbres dominants choisis pour leur caractère de « *leading trees* » [CARMEAN, 1996]. Ce type de placette se rapproche de celles établies par LE GOFF [1982].

Autant que possible, nous avons cependant privilégié l'installation de placettes de production, qui sont les plus polyvalentes ; les points de mesure n'ayant été installés que si les conditions de peuplement ou de station l'imposaient.

Au total, 166 placettes se répartissent entre 80 placettes de production et 86 points de mesure. Le tableau 3.2 présente le nombre de placettes de chaque type en relation avec les contraintes liées au peuplement et les objectifs avec lesquels elles sont compatibles. Ainsi, pour les différents volets de cette étude intégrée, nous avons utilisé différents sous-ensembles de placettes ; ceux-ci sont définis au sein des chapitres correspondants.

Tableau 3.2. – Structure du matériel d'étude (*C130* = circonférence à 1,3 m de hauteur ; *Htot* = hauteur totale).

|                           | <b>Types de placette</b>  |   |
|---------------------------|---|---|
|                           | <b>Placettes de production</b>  | <b>Points de mesure</b>   |
| Conditions d'installation | Petit peuplement ou groupe (> 5 ares)   |   |
|                           | <i>Surface régulière</i> ≥ 10 ares<br>et groupe d'allure équiennne<br>(à 10 % près) riche en aulne (> 80 %<br>en surface terrière)  | <i>Petite surface</i> < 10 ares<br>ou <i>surface irrégulière</i><br>ou <i>peuplement mélangé</i><br>(moins de 80 % en surface terrière) |
| Objectifs compatibles     | - Catalogue des stations<br>- Productivité de stations<br>- Potentialités sylvicoles<br><br>- Mesures de productivité   |   |
| Mesures effectuées        | - Caractérisation des stations<br><br>Tous les arbres :<br>- <i>C130</i><br>- <i>Htot</i><br><br>Arbres dominants : <i>âge</i><br>Sous-échantillon : <i>analyse de tige</i> |   |
|                           | Arbres dominants :<br>- <i>C130</i><br>- <i>Htot</i><br>- <i>âge</i>  |   |
| Nombre                    | 80  | 86  |

### 3.3.4. Mesures et observations collectées

Au sein du réseau, nous avons récolté les différents types de mesures et observations suivants :

- dans les 166 placettes, nous avons rassemblé de nombreuses mesures et observations écologiques destinées à caractériser la station ; elles seront présentées de manière plus détaillée dans le chapitre 4 ;
- de même, nous avons toujours mesuré la hauteur totale, la circonférence à 1,3 m au-dessus du niveau du sol et l'âge des arbres dominants, de manière à estimer l'indice de fertilité des peuplements et/ou l'accroissement en circonférence des arbres dominants ; ces données dendrométriques seront présentées de manière plus détaillée dans le paragraphe 5.2.2.
- au sein des 80 placettes de production, nous avons aussi mesuré la hauteur totale et la circonférence de tous les arbres ;

- au sein de 33 placettes qui étaient installées depuis au moins 3 ans, nous avons pu effectuer un second mesurage, permettant de disposer alors de mesures d'accroissement courant utiles pour l'évaluation des potentialités sylvicoles de l'aulne ;
- au sein d'un sous-échantillon de 10 placettes de production, nous avons aussi sélectionné des arbres destinés à des analyses de tige.

### 3.3.5. Description de l'échantillon

Pour décrire synthétiquement cet échantillon, le tableau 3.2 synthétise la structure du jeu de données, tandis que les figures 3.5 et 3.6 présentent successivement la localisation géographique des placettes sur une carte des régions forestières puis leur distribution au sein des alliances phytosociologiques et des régions forestières. En considérant la distribution des placettes selon ces caractéristiques, on peut estimer que l'amplitude écologique de l'aulne est correctement représentée. Par ailleurs, la région ardennaise, spécifiquement concernée par le développement du catalogue des stations, est largement sur-représentée par rapport à la distribution observée de l'aulne en Wallonie (figure 1.11).

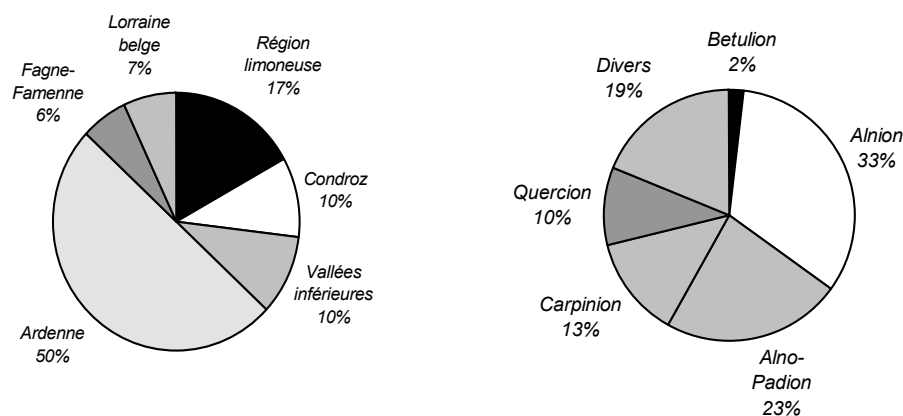


Figure 3.6. - Répartition des placettes d'aulne glutineux du réseau d'observations selon leur appartenance aux régions forestières (à gauche) et aux alliances phytosociologiques (à droite).

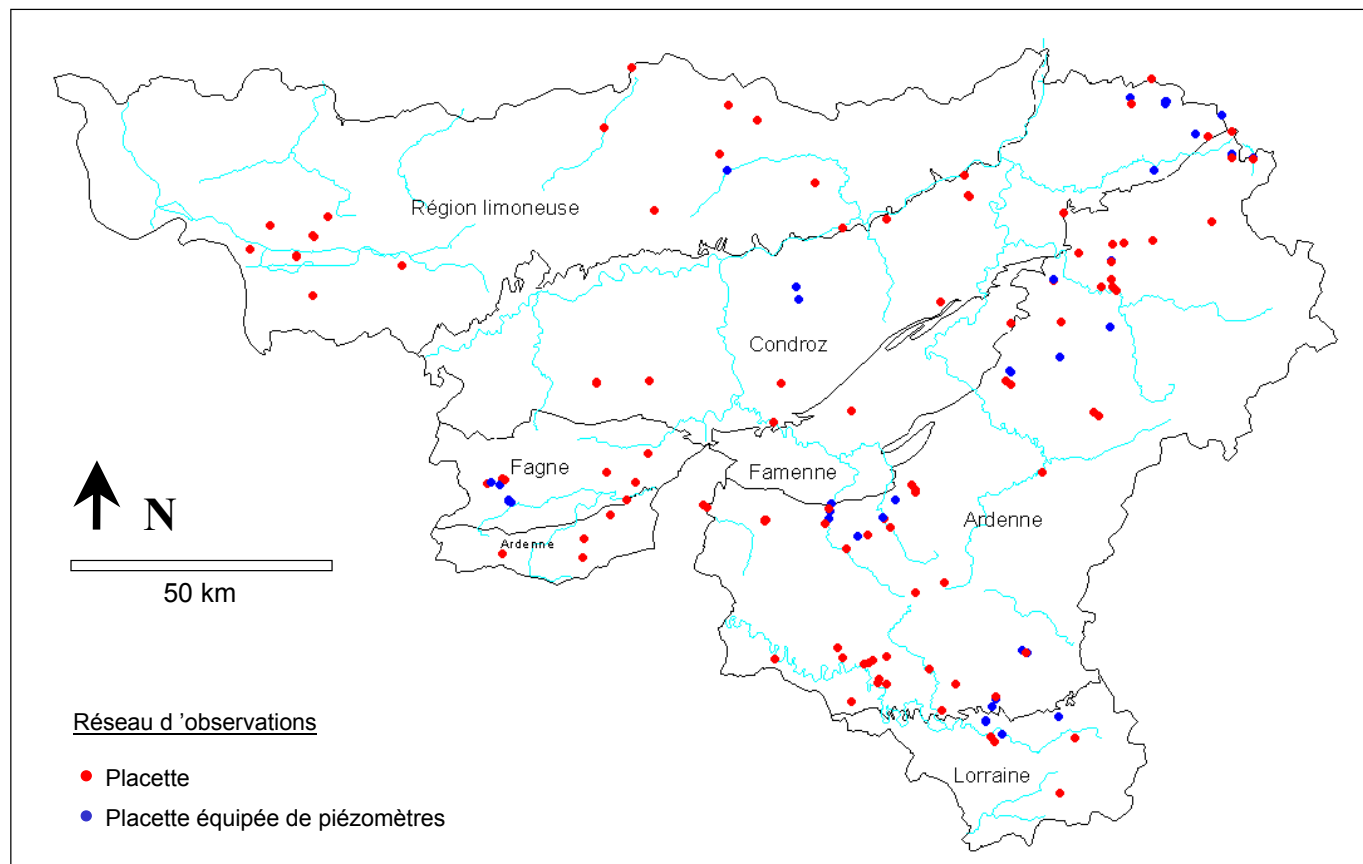


Figure 3.5. : Localisation des placettes d'aulne glutineux du réseau d'observations.

# Chapitre 3

## *Matériel d'étude*

|  |            |
|--|------------|
| 3.1. INTRODUCTION  | 105        |
| 3.2. DESCRIPTION ECOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE   | 105        |
| 3.2.1. Gradients écologiques de la Wallonie .....  | 105        |
| <i>Figure 3.1. – Carte oro-hydrographique de la zone d'étude. ....</i>   | <i>106</i> |
| <i>Figure 3.2. – Illustration des principaux gradients topographiques, climatiques et trophiques présents dans la zone d'étude. ....</i> | <i>107</i> |
| 3.2.2. Territoires écologiques .....   | 108        |
| 3.3. RESEAU D'OBSERVATIONS   | 111        |
| 3.3.1. Contraintes et objectifs généraux de l'échantillonnage.....   | 111        |
| 3.3.2. Choix des peuplements.....  | 112        |
| 3.3.3. Installation des placettes.....   | 113        |
| POINTS DE MESURE   | 114        |
| 3.3.4. Mesures et observations collectées.....   | 114        |
| 3.3.5. Description de l'échantillon.....   | 115        |



---

## Chapitre 4

### *Caractérisation des stations*

---

#### *4.1. Introduction*

La caractérisation écologique du milieu est une étape préalable à toute activité de recherche ou de gestion qui concerne l'écosystème forêt [BIROT, 1996]. Elle fait appel à un système de codification des observations stationnelles, qui varie selon les objectifs poursuivis. Dans le cas qui nous occupe, la qualité de l'analyse autécologique ou du catalogue des stations dépend du choix des caractéristiques du milieu prises en compte, de leur pertinence biologique [GEGOUT et HOULLIER, 1993], et de la manière de les décrire [BECKER et LE GOFF, 1988] : celles-ci doivent être adaptées à l'essence étudiée, à l'échelle de travail, et aux caractéristiques de la région considérée. Ainsi, selon les cas, les variables écologiques retenues peuvent aller de la composition en éléments minéraux du sol et des feuilles [MONSERUD *et al.*, 1990] à une estimation grossière de la profondeur utile du sol [BARY *et al.*, 1995].

Toutefois, les variables qui sont appréhendées sur le terrain ne sont que rarement en relation directe avec la croissance des arbres [LE TACON, 1973 ; FRANC, 1989] ; c'est-à-dire, qu'elles ne sont pas les véritables facteurs écologiques. Beaucoup n'interviennent qu'indirectement par l'intermédiaire de relations souvent complexes. La position topographique en est un bon exemple : dans la plupart des études, elle est étroitement corrélée aux indices de productivité [LE GOFF et LEVY, 1984 ; MAC NAB., 1993 ; WANG et KINKA, 1996], voire même avec la distribution des essences [TAGZIRIA, 1996], mais en réalité les facteurs qui influencent directement la croissance sont les niveaux hydrique, trophique et énergétique qui lui sont liés [FRANC, 1989 ; WAGEMANS, 1994]. Ainsi, de nombreux auteurs ont élaboré des variables synthétiques dans la perspective d'évaluer ces niveaux et ainsi de mieux interpréter le milieu.

C'est l'approche qui correspond le mieux à notre objectif, puisque nous tenterons d'identifier, au sein des stations, les facteurs écologiques de la production forestière, voire leurs niveaux qui en font des facteurs limitants.

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des stations forestières. Il décrit cette étape fondamentale de notre étude au travers de 3 paragraphes.

- le paragraphe 4.2 passe en revue les principaux descripteurs écologiques des stations forestières ;
- le paragraphe 4.3, consacré à la récolte des données en forêt, présente une à une les variables écologiques que nous avons retenues pour caractériser les stations ;
- le paragraphe 4.4 consiste en une analyse approfondie des régimes phréatiques.

## ***4.2. Revue bibliographique des principaux descripteurs des stations***

Ce paragraphe présente un aperçu bibliographique des principales méthodes de description et de caractérisation *in situ* des stations forestières. Il accorde une attention particulière aux variables qui sont en rapport avec les spécificités hydrologique et floristique des stations de l'aulne que nous avons mises en évidence dans le paragraphe 1.2.

Bien que l'on puisse discuter de l'opportunité d'analyser une station selon différentes caractéristiques écologiques considérées de manière indépendante [MAC LEOD et RUNNING, 1988], pour des raisons de clarté, nous traiterons successivement de la manière de caractériser le climat, la topographie, l'humidité et l'aération des sols, la richesse chimique des sols, ainsi que la phytocénose.

### **4.2.1. Climat**

Les études les plus précises se réfèrent aux stations météorologiques les plus proches des sites analysés [LE GOFF et LEVY, 1984 ; WANG et KLINKA, 1996], ou établissent les données climatiques par interpolation entre courbes d'égales valeurs (isohyètes, isothermes, ...) sur des cartes générales [TYLER *et al.*, 1995 ; CLAESSENS *et al.*, 1996] pour en extraire le plus souvent des températures ou pluviosités moyennes (mois, période de végétation, année,...), la longueur de la période de végétation ou des degrés-jours. D'après ces données, différents indices climatiques « classiques » peuvent être calculés (indice d'aridité de DE MARTONNE, quotient pluviothermique d'EMBERGER, indice de WECK, etc...), mais ils sont surtout

valables à une plus petite échelle que celle qui nous intéresse. Par contre, l'indice de déficit hydrique, valable à plus grande échelle, est d'utilisation fréquente dans les études françaises [DUPLAT et TRAN-HA, 1997].

Dans la pratique des analyses autécologiques locales et des catalogues de stations, la majorité des auteurs font plutôt référence à la notion de « territoire écologique » [DELVAUX et GALOUX, 1962], « petite région naturelle » [BECKER, 1985], ou « *ecoregion* » [COOK, 1996], au sein desquels le climat et en particulier le rayonnement solaire sont supposés suffisamment constants dans l'espace pour les analyses envisagées [MRW, 1991 ; NOUALS et BOISSEAU, 1991 ; CLAESSENS *et al.*, 1993].

A plus grande échelle, les facteurs topographiques peuvent évidemment modifier sensiblement le macroclimat. En effet, la pente et l'exposition du terrain influencent directement la quantité de rayonnement et de chaleur reçus, créant ainsi des mésoclimats parfois très nettement différents [DELVAUX et GALOUX, 1962 ; MONSERUD *et al.* 1990 ; MAC NAB, 1993 ; BARY *et al.*, 1995]. En terrain montagneux, RUNNING *et al.* [1987] ont développé un modèle permettant de calculer les corrections de température, de rayonnement et de précipitations par rapport aux valeurs observées dans les vallées.

#### 4.2.2. Topographie

La position topographique est un élément déterminant de la station. En effet, les facteurs thermique et radiatif (ensoleillement), hydrique (circulation d'eau, profondeur de sol et évapotranspiration) et trophique (déplacement d'éléments minéraux par érosion, lessivage et accumulation en bas de pente) sont en relation étroite avec la topographie [MATHIEU, 1977 ; FRANC, 1989]. Ainsi, au sein d'un versant mouvementé, WAGEMANS [1994] montre que 67 % de la variation de hauteur dominante d'un peuplement de chêne est expliquée par des variables exclusivement topographiques. Pour ces raisons, on trouve fréquemment le relief, exprimé selon diverses codifications, au premier plan de toutes les études de potentialités stationnelles et des clefs synthétiques des catalogues de stations.

Une première échelle de description correspond à la position de la station dans la toposéquence. Celle-ci est généralement appréhendée globalement par trois unités (plateau, pente, dépression : CLAESSENS *et al.* [1994] ; GILBERT [1995]), puis de manière plus précise, en redéfinissant chacune de ces unités [BRAIS et CAMIRE, 1992 ; WAGEMANS, 1994], mais toujours sur des bases assez subjectives.

Certains auteurs font une autre analyse du relief, et considèrent la topographie en fonction des apports d'eau potentiels qu'elle détermine [LE GOFF et LEVY, 1984 ; WEISSEN *et al.*, 1994]. Nous y reviendrons dans le paragraphe consacré à l'humidité du sol (paragraphe 2.3).

Cette première description est ensuite précisée par différentes mesures quantitatives de la pente, de l'exposition, voire de la distance à la rupture de pente exprimée en % de la pente [MONSERUD *et al.*, 1990 ; WAGEMANS, 1994] qui sont en relation étroite avec le mésoclimat. De nombreux auteurs ont ainsi tenté de quantifier la topographie de manière objective par des mesures reproductibles [STAGE, 1976 ; MAC NAB, 1993]. Les principales variables issues de cette approche sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. - Principales variables descriptives de la topographie.

| Auteurs   | Variables écologiques mesurées   |
|---|--|
| <i>Echelle du paysage (unités topographiques, plutôt en relation avec le bilan hydrique)</i>      |  |
| (Classique)   | - description subjective   |
| LEVY et al. [1992]  | - description interprétative en fonction des mouvements d'eau (4 classes)                          |
| MAC NAB [1993]  | - moyenne de 8 mesures d'angle vertical vers l'horizon   |
| MONSERUD <i>et al.</i> [1990]   | - distance à la rupture de pente (en % de la pente)  |
| <i>Echelle de la station (exposition, plutôt en relation avec le bilan thermique et radiatif)</i> |  |
| (Classique)   | - pente et orientation   |
| BARY et al. [1995]  | - expopente : indice calculé à partir de la pente, de l'exposition et de la position topographique |
| DELVAUX & GALOUX [1962]   | - pente et orientation traduits en 3 niveaux thermiques et radiatifs                               |
| STAGE [1976]  | - pente et orientation traduits en coefficient correcteur topographique sur la productivité        |

Par ailleurs, la microtopographie à l'échelle de l'are, influence les caractéristiques écologiques des sols [LIECHTY *et al.*, 1997], et notamment dans les milieux très humides, en relation avec l'épaisseur de sol non imbibé.

### 4.2.3. Humidité et aération du sol

De nombreux auteurs ont démontré que, à l'échelle d'un territoire écologique donné, la productivité et les potentialités forestières sont surtout

influencées par le régime hydrique<sup>(1)</sup> du sol [LE GOFF et LEVY, 1984 ; FRANC, 1989 ; WANG et KLINKA, 1996]. Aussi, une grande quantité d'études consacre une place importante à l'estimation de ce facteur, qu'il s'agisse de recherche appliquée [FRANC, 1989 ; CHADOEUF *et al.*, 1988] ou de recherche plus fondamentale [GRANIER *et al.*, 1995].

Par contre, dans les sols humides soumis à des phases prolongées d'imbibition ou d'inondation totale ou partielle du sol, le régime hydrique n'est plus la clef des potentialités forestières. En effet, le bénéfice d'une alimentation en eau régulière qu'apporte un bilan hydrique positif est contrecarré par les inconvénients des conditions anaérobiques qui s'installent dans le sol. Pour la végétation forestière, cela se traduit par une hypoxie racinaire, que les arbres supportent différemment selon les espèces, la durée et l'intensité des phases anaérobiques [GILL, 1970 et 1975 ; LEVY, 1978 ; CRAWFORD, 1992].

Dans ces types de sols, il est donc fondamental d'étudier parallèlement au régime hydrique, le régime phréatique<sup>(2)</sup> [BECKER, 1971 ; GIRAULT, 1988 ; DRAPIER, 1990] ainsi que l'aération du sol.

### ***1° Régime hydrique***

Malgré son importance, la mesure du régime hydrique proprement dit est rarement réalisée en conditions forestières. En effet, en forêt, la structure et la composition des peuplements, la diversité des enracinements, l'hétérogénéité des sols et des stations, sont autant d'éléments peu contrôlables [AUSSENAC et GRANIER, 1979 ; CHADOEUF *et al.*, 1988] qui n'autorisent pas une généralisation des résultats comme c'est le cas dans le domaine agricole.

Les études appliquées s'orientent plutôt vers l'évaluation de la réserve en eau et des apports d'eau potentiels par écoulement latéral. Elles mettent en jeu des variables topographiques et pédologiques [FRANC, 1989 ; LEVY *et al.*, 1992], ou des bilans incluant des estimations de l'évapotranspiration [SPITTLEHOUSE et BLACK, 1981 *in* : WANG et KLINKA, 1996 ; LEVY, 1990].

---

<sup>(1)</sup> Régime hydrique : évolution de la teneur en eau du sol au cours du temps (= économie en eau au sens de DELPECH *et al.* [1985]).

<sup>(2)</sup> Nous avons défini le régime phréatique comme étant l'évolution du niveau de la surface phréatique (= niveau de la nappe) au cours du temps. Dans la suite du texte, par souci de simplification du langage, nous utiliserons aussi le terme « profondeur de la nappe » ou « niveau phréatique » en lieu et place de « profondeur de la surface phréatique ».

Le tableau 4.2 présente, de manière synthétique, quelques unes des variables les plus remarquables. Dans ce tableau on observe que les caractéristiques stationnelles prises en compte concernent l'estimation :

Tableau 4.2. - Principales variables synthétiques utilisées pour caractériser l'humidité des sols.

| Nom de la variable  | Auteur(s)                      | Variables écologiques utilisées  |
|---|--------------------------------|--|
| Réserve en eau<br>(Clef)  | FRANC, 1989                    | - profondeur du sol<br>- nature et altération de la roche-mère<br>- pierrosité<br>- texture de la terre fine<br>- position topographique<br>- exposition   |
| Echelle hydrique<br>(clef)  | WEISSEN <i>et al.</i> , 1994   | mêmes variables, avec en plus :<br>- hydromorphie du sol   |
| Drainage Evaluation Card<br>(Carte statistique)                             | GERARDIN et<br>DUCRUC, 1990    | - position topographique<br>- concavité, convexité<br>- distance au sommet<br>- pente<br>- profondeur de sol<br>- pseudogley (abondance et profondeur)<br>- épaisseur de l'humus<br>- espèce forestière dominante  |
| Soil Moisture Regime<br>(Clef)  | BRAIS et CAMIRE,<br>1992       | mêmes variables, avec en plus :<br>- roche-mère<br>- texture du sol<br>- teneur en cailloux et dimensions  |
| Evapotranspiration estimée<br>(Modèle : Forest Soil Water<br>Balance Model) | SPITTLEHOUSE et<br>BLACK, 1981 | - profondeur du sol<br>- teneur en cailloux<br>- texture du sol<br>- radiation solaire<br>- température<br>- pluviosité  |
| Soil Moisture and Aeration<br>Regime<br>(Clef)                              | WANG et KLINKA,<br>1996        | - pseudogley (présence et profondeur)<br>- gley (présence et profondeur)<br>- nappe phréatique (présence et<br>profondeur)<br>- texture du sol<br>- pente<br>- évapotranspiration potentielle<br>- évapotranspiration estimée<br>(Forest Soil Water Balance Model) |

- du stock d'eau dans le sol en termes de volume de sol disponible pour la réserve utile (profondeur, pierrosité, nature de la roche-mère, texture, ...);
- des apports extérieurs par écoulement latéral (position topographique, pente, présence d'une nappe phréatique, ...);
- des pertes par évapotranspiration et drainage latéral (position topographique, pente, exposition, évapotranspiration potentielle, ...).

Les phénomènes d'oxydo-réduction observés dans le sol (pseudogley, gley) sont aussi considérés dans les démarches avant tout appliquées qui sont plus descriptives que fonctionnelles [GERARDIN et DUCRUC, 1990 ; BRAIS et CAMIRE, 1992 ; WEISSEN *et al.*, 1994].



Signification de la variable

« TOPO » :

1. Pertes latérales d'eau > apports
2. Apports = pertes
3. Apports > pertes
5. Approvisionnement en eau exceptionnel

Figure 4.1. - Profil topographique des stations et valeurs correspondantes de l'indice topographique (TOPO) caractérisant le bilan des apports et pertes d'eau par drainage latéral (d'après LEVY *et al.*, 1992).

Pour mieux cerner les mouvements d'eau, LEVY *et al.* [1992] et WEISSEN *et al.* [1994] interprètent l'influence de la topographie en fonction des apports d'eau, et présentent des clefs empiriques simplifiées traduites au moyen de profils topographiques (figure 4.1).

Les indicateurs floristiques sont également fréquemment utilisés [ROWE, 1956 ; DETHIOUX, 1967 ; NOIRFALISE, 1984 ; GREEN *et al.*, 1989 ; BARTOLI, 1992] car ils ont l'avantage d'intégrer le fonctionnement réel du régime hydrique au cours des saisons pour plusieurs années [BECKER, 1971], contrairement à certaines caractéristiques, comme les traces d'hydromorphie qui peuvent être héritées sans être encore liées au fonctionnement actuel du sol [MATHIEU, 1977].

## ***2° Régime phréatique***

Parmi les mesures ou observations ponctuelles que l'on peut effectuer au sein des stations, certaines ont trait, directement ou non, aux régimes hydrique et phréatique, ainsi qu'à l'aération des sols. Ce sont :

- les observations concernant la topographie, l'évaluation de la permanence d'une nappe phréatique, de ses niveaux de crue et d'étiage, ou le cas échéant, du niveau de son plancher (nappe perchée), et de la fréquence des inondations, à partir de diverses observations ponctuelles relatives au sol et à l'environnement immédiat de la station ;
- les observations pédologiques relatives à la texture, la pierrosité, la profondeur utile, et surtout, à l'hydromorphie du sol (présence et profondeur du pseudogley ou du gley).

Toutefois, l'estimation de la longueur des périodes éventuelles d'inondation, d'imbibition ou de ressuyage du sol, ainsi que l'évaluation indirecte de l'aération des sols, ne sont pas suffisamment fiables sur la seule base de ces observations ponctuelles, et nécessite des mesures périodiques de la profondeur de la nappe par l'intermédiaire de piézomètres.

Plusieurs auteurs ont alors entrepris des campagnes de mesures piézométriques [BECKER, 1971 ; GIRAULT, 1988 ; CHADOEUF *et al.*, 1988 ; LEVY, 1990], principalement au sein de sols à nappe phréatique temporaire, en complément aux mesures de régime hydrique effectuées pendant la période d'assèchement du sol. Le dispositif utilisé consiste en tubes piézométriques classiques [RITZEMA, 1994], dont GIRAULT [1990] présente une adaptation aux conditions forestières, dans le cadre de l'élaboration d'un catalogue des stations.



### **3° Aération du sol**

En l'absence d'imbibition du sol, une bonne estimation de son aération est fournie par sa porosité. Par ailleurs, on peut aussi définir un indice d'aération à partir de variables pédologiques telles que le type d'humus, la texture, la structure et l'hydromorphie de l'horizon humifère [CLAESSENS *et al.*, 1996 ; WANG et KLINKA, 1996].

Par contre, dans les sols humides qui nous concernent, ce sont principalement le drainage latéral, les mouvements de la nappe phréatique, ou la barrière texturale ou structurale à l'origine de cette nappe, qui déterminent l'aération du sol. Ainsi, WANG et KLINKA [1996] définissent un indice d'aération basé sur la texture, la pente, l'hydromorphie et la présence d'une nappe phréatique pendant la période de végétation (tableau 4.3). Cet indice est ensuite couplé à un indice d'humidité du sol (figure 4.2).

*Tableau 4.3. - Classification du régime d'aération des sols  
(Soil Aeration Regime : WANG et KLINKA, 1996).*

Concernant les sols humides, nous n'avons pas identifié d'étude qui ait mesuré l'aération du sol de manière directe. Nous avons tenté, lors de quelques essais préliminaires à l'étude des régimes phréatiques, de mesurer la teneur en oxygène dissous dans l'eau d'imbibition, à différentes profondeurs, mais la matière organique, généralement abondante dans les sols hydromorphes, consomme l'oxygène que pourrait contenir l'eau de la nappe phréatique. STROTELDER [1998] montre pourtant que la teneur de ces nappes en oxygène peut être importante, même dans la zone de contact avec les racines des arbres. DETHIOUX [1991] note effectivement qu'au niveau des sources rhéocrènes, la teneur en oxygène est proche de la saturation, tout comme nous avons pu le mesurer, lors des essais préliminaires, dans certaines nappes alluviales.

#### SOIL MOISTURE AND AERATION REGIMES

|                                     |                           | Soil aeration regime |            |           |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|------------|-----------|
|                                     |                           | adequate             | restricted | deficient |
|                                     |                           | a                    | r          | d         |
| <i>Soil<br/>Moisture<br/>Regime</i> | <b>Excessively dry</b> ED | <b>EDa</b>           |            |           |
|                                     | <b>Very dry</b> VD        | <b>VDa</b>           |            |           |
|                                     | <b>Moderately dry</b> MD  | <b>MDa</b>           | <b>DFa</b> |           |
|                                     | <b>Slightly dry</b> SD    | <b>SDa</b>           |            |           |
|                                     | <b>Fresh</b> F            | <b>Fa</b>            |            |           |
|                                     | <b>Moist</b> M            | <b>Ma</b>            | <b>Mr</b>  |           |
|                                     | <b>Very moist</b> VM      | <b>VMa</b>           |            |           |
|                                     | <b>Wet</b> W              | <b>Wa</b>            | <b>Wr</b>  | <b>Wd</b> |
|                                     | <b>Very wet</b> VW        |                      |            |           |

Figure 4.2. - Matrice de caractérisation des régimes hydriques et de l'aération des sols (Soil Moisture and Aeration Regime : WANG et KLINKA, 1996).

La littérature phytosociologique présente la flore comme étant une bonne expression du niveau d'aération dans le cas des sols fortement humides. Toutes les classifications révèlent l'existence de groupe fontinal bien caractérisé du

*Chrysosplenium oppositifolii* Oberd. et Phil, 1977, lié aux eaux oxygénées [NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1961 ; NOIRFALISE, 1984 ; GODART, 1989 ; RAMEAU *et al.*, 1993 ; STORTELDER *et al.*, 1998], et dont DETHIOUX [1991] confirme le caractère indicateur par des mesures de l'oxygène dissous.

#### 4.2.4. Richesse chimique du sol

La plupart des auteurs s'accordent sur l'utilisation de quelques indicateurs fiables, parmi lesquels la forme d'humus vient en premier lieu [DUCHAUFOR, 1954 ; THILL *et al.*, 1988 ; DELECOUR, 1990 ; GREEN *et al.*, 1993]. En effet, l'humus reflète le dynamisme du turn-over, et, allié à l'acidité de l'horizon humifère (pH) qui entre dans la définition des types d'humus proposés par DELECOUR [1990], il est considéré comme un bon indicateur de la quantité d'éléments minéraux du sol et de leur disponibilité [RAMADE, 1984 ; NOIRFALISE, 1984 ; JABIOL *et al.*, 1995]. Parmi les autres indicateurs de la richesse chimique, on retrouve fréquemment la lithologie et le type de sol [LE GOFF et LEVY, 1984 ; FRANC, 1989], ainsi que des mesures chimiques telles que le rapport C/N, l'acidité (pH), la capacité d'échange cationique (CEC), le taux de saturation en bases [LE GOFF et LEVY, 1984 ; THILL *et al.*, 1988 ; FRANC, 1989 ; WANG, 1997].

Quelques « clefs » plus élaborées ont été mises au point [WEISSEN *et al.*, 1994 ; PYATT, 1995], prenant généralement en compte les variables déjà citées (figure 4.3).

Les indicateurs floristiques sont aussi fréquemment utilisés sous la forme de groupes écologiques [THILL *et al.*, 1988 ; GREEN *et al.*, 1989] ou de taxons phytosociologiques [DE TILLESSE et DEVILLEZ, 1995].

Toutefois, en matière de nutrition, c'est surtout la notion de facteur limitant (loi du minimum de LIEBIG) qui est importante, justifiant la fréquence de l'utilisation des variables brutes que sont les teneurs en éléments totaux ou assimilables [MONSERUD *et al.*, 1990 ; ROBERTS et BAJZAK, 1996 ; WANG et KLINKA, 1996].

*Figure 4.3. - Définition des niveaux trophiques sur l'échelle de WEISSEN et al. [1994].*

#### **4.2.5. Phytocénose**

##### ***1° Description de la flore***

Si plusieurs écoles ont vu le jour pour décrire la végétation, s'appuyant sur des notions de formation [CAJANDER], de phylлум [GAUSSEN], de synusie ou d'association phytosociologique [BRAUN-BLANQUET], on peut toutefois considérer qu'en Europe tempérée au moins, la méthode simple et objective du relevé phytosociologique de BRAUN-BLANQUET rencontre actuellement l'intérêt de la majorité des forestiers européens.

Le relevé phytosociologique consiste en un inventaire total des espèces, ventilé par strate de végétation et sommairement quantifié selon l'« abondance-dominance » et la « sociabilité » de chacune des espèces [encart au paragraphe 2.3.4 (2°)]. Il est systématiquement accompagné d'une description générale de la station (topographie, géologie, pédologie, ...), ce qui confirme l'intérêt de cette approche dans le cadre de l'étude des stations telle que nous l'envisageons.

## 2° Indicateurs floristiques

Les relevés phytosociologiques sont des outils confirmés pour élaborer des indicateurs floristiques des conditions stationnelles. En effet, la présence et le développement de chacune des espèces est sous la dépendance des facteurs écologiques de la station, et renseigne dès lors sur le niveau de ces facteurs. De nombreux auteurs ont ainsi conçu des indicateurs sous différentes formes : les groupes socio-écologiques, les échelles floristiques, voire aussi les associations phytosociologiques.

Il va de soi que l'utilisation de ces indicateurs n'est efficace que dans les situations de relatif équilibre entre la station et sa flore [FRANC et VALADAS, 1990 ; CLAESSENS *et al.*, 1996]. Notamment, les interventions humaines peuvent modifier totalement la flore d'une station pour des décennies avant qu'un nouvel équilibre ne se réinstalle [NOIRFALISE et SOUGNEZ, 1956 ; THILL, 1987 ; CLAESSENS, 1996].

Il est important de préciser aussi que la valeur indicatrice des groupes écologiques est locale. En effet, différents auteurs, cités par DULIERE *et al.* [1995], constatent que la valeur indicatrice des espèces varie selon les régions phytogéographiques, répondant à des compensations édapho-climatiques, avec comme corollaire que la composition des groupes écologiques varie aussi. Par exemple, en Belgique, *Helleborus foetidus* est considérée comme calcicole, tant dans les groupes écologiques de GODART [1989] que de NOIRFALISE [1984] alors qu'en région méditerranéenne, elle possède une plus large amplitude édaphique [BARTOLI, 1992]. En fait, cette espèce est thermophile et, dans le Nord de son aire de dispersion, elle ne trouve suffisamment de chaleur que sur les sols calcaires secs, à bonne conductivité thermique.

### • Groupes socioécologiques

Selon DUVIGNEAUD [1974]., le groupe socioécologique est op. cit. « *un ensemble d'espèces ayant entre elles une affinité sociologique plus ou moins grande, marquée par une tendance à se rassembler dans un biotope déterminé, c'est-à-dire dans des conditions de milieu déterminées* »

C'est l'acceptation du groupe écologique proche du concept de CLEMENTS, qu'utilisent GODART [1989] et DULIERE *et al.* [1995] dans le cadre du fichier écologique des essences [MRW, 1991], et NOIRFALISE [1984] dans sa description des stations forestières. D'un point de vue méthodologique, plusieurs voies sont envisagées pour établir ces groupes. Comme le recommande en France le groupe de travail sur la typologie des stations forestières [BRETHES, 1989], GODART [1989] établit des groupes à partir d'une analyse statistique de la relation entre la présence

des espèces et les caractéristiques écologiques de leurs stations, tandis que NOIRFALISE [1984] arrive à des groupes semblables à partir des cortèges normatifs et des groupes différentiels de sa syntaxonomie, que NOIRFALISE et SOUGNEZ [1961] assimilent à des groupes socio-écologiques.

• **Groupes écologiques statistiques et échelles floristiques**

Les échelles floristiques, ou « *phytometers* » [SPUUR et BARNES, 1980] rassemblent des plantes qui ont un comportement semblable *vis-à-vis d'un paramètre du milieu*, qu'il s'agisse ou non de plantes qui peuvent se rencontrer ensemble. Cette approche moins restrictive des groupes écologiques est surtout d'application dans les pays anglo-saxons [ROWE, 1956]. En Belgique, elle a été appliquée par DETHIOUX [1967], NOIRFALISE et DETHIOUX [1970], CLAESSENS *et al.* [1994]. Cette notion correspond au concept de GLEASON, ou aux « groupes écologiques statistiques » de DELPECH *et al.* [1985], au sens dans lesquels il n'est pas envisagé de liens sociologiques entre espèces du groupe. Les groupes que construit BARTOLI [1992] à partir de l'autécologie de chacune des espèces de la flore forestière française, pour définir des échelles hydrique et trophique, correspondent aussi à ce concept de « *phytometers* ».

• **Typologies de végétation**

Les associations phytosociologiques ou d'autres typologies de végétation sont aussi utilisées comme indicateurs du milieu [de TILLESSE et DEVILLEZ, 1995], notamment dans les études de productivité des essences [DAGNELIE, 1957 ; RONDEUX et THILL, 1989 ; GREEN *et al.*, 1989 ; CLAESSENS *et al.*, 1996] ou de qualité technologique du bois [LECLERCQ, 1975]. Dans ce cas, contrairement aux groupes écologiques qui sont censés renseigner sur les niveaux des facteurs écologiques ou sur l'une ou l'autre de leurs combinaisons, l'unité de végétation se substitue à la station dans son ensemble (cf. chapitre 2). Indirectement, ces unités, parce qu'elles peuvent être référencées dans un espace défini par les facteurs écologiques, renseignent aussi sur les niveaux de ces derniers.

### 4.3. Récolte des données de base

Ce paragraphe, essentiellement descriptif, présente une à une les variables que nous avons définies pour caractériser les conditions stationnelles des placettes de notre réseau d'observations. Il aborde successivement les données régionales, topographiques, pédologiques, phréatiques et phytocénotiques, avant de conclure par un tableau récapitulatif des variables écologiques récoltées.

#### 4.3.1. Données régionales

##### 1° Localisation

Chaque placette a été repérée sur le terrain par rapport aux éléments remarquables du paysage. Elle a ensuite été localisée par ses coordonnées métriques dans le système LAMBERT, et par son altitude (en mètres), pointées sur les cartes topographiques de l'IGN au 1/25000. On peut admettre que la marge d'erreur est de 25 m pour les coordonnées LAMBERT, et de moins de 5 m, pour l'altitude.

|                  |        |
|------------------|--------|
| <b>Longitude</b> | (en m) |
| <b>Latitude</b>  | (en m) |
| <b>Altitude</b>  | (en m) |

##### 2° Bassin versant et connection de la station au réseau hydrographique

Nous avons rattaché les stations analysées aux principaux bassins versants de Wallonie, en considérant au maximum le troisième ordre<sup>(3)</sup>.

Nous avons aussi caractérisé le type de cours d'eau auquel la station est directement reliée, selon la classification adoptée par DETHIOUX [1991], et que nous avons étendue aux sources et aux zones humides (tableau 4.4).

##### 3° Secteur écologique

Le secteur écologique auquel appartient la station a été déterminé sur la carte des secteurs écologiques (paragraphe 3.2.2) numérisée en coordonnées

---

<sup>(3)</sup> Bassin versant du 1<sup>er</sup> ordre : fleuve (ex : Meuse) ; 2<sup>e</sup> ordre : affluent (ex : Lesse) ; 3<sup>e</sup> ordre : affluent (ex : Lomme).

LAMBERT, au 1/100 000<sup>ème</sup>, et confirmé par l'altitude et l'assise géologique en tenant compte de la définition des secteurs établie par DELVAUX et GALOUX [1962] et ONCLINCX *et al.* [1987]. La variable « région forestière », dont les niveaux sont présentés dans le tableau 4.5 a ensuite été obtenue par regroupement de territoires comparables.

Tableau 4.4. - Connexion de la station au réseau hydrographique.

| Code | Connexion au réseau hydrographique                          |
|------|---|
| 10   | Source  |
| 11   | Source rhéocrène  |
| 12   | Source hélocrène  |
| 20   | Cours d'eau   |
| 21   | Drain   |
| 22   | Ruisselet (moins de 1 m de large)                           |
| 23   | Ruisseau (1 à 5 m de large)                                 |
| 24   | Petite rivière (5 à 25 m de large)                          |
| 25   | Grosse rivière (25 à 100 m de large)                        |
| 30   | Etang   |
| 40   |   |
| 41   | Pas de connexion directe                                    |
| 42   | marais, tourbière   |
| 50   | Zone subhumide (argiles blanches, limons hydromorphes, ...) |
|      | Autre   |

#### 4° Climat (chaleur)

Dans le contexte géographique de notre étude, plusieurs considérations nous ont conduits à n'utiliser qu'une seule variable climatique globale :

**Longueur de la période de végétation (>10 degrés centigrades) (en jours/an)**

En effet, on peut considérer qu'en raison de l'humidité constante des sols de l'aulnaie, et du faible déficit hydrique du climat de la région étudiée, les données relatives à la pluviosité ou à l'aridité ne sont pas de nature à influencer significativement la croissance ou la répartition de l'aulne. Par ailleurs,



l'imprécision des données météorologiques ne nous permet pas d'envisager une analyse climatique précise. De surcroît, les aulnaies se situent généralement dans des conditions topographiques particulières responsables de mésoclimats fortement différenciés qu'il n'est pas concevable d'appréhender à partir des données et analyses météorologiques globales existantes. En effet, selon l'étude de DELVAUX et GALOUX [1962], réalisée dans la région qui nous occupe, le mésoclimat des vallées est plus chaud et moins humide que celui des plateaux environnants, tandis que la saison de végétation est plus longue, mais se caractérise par des gelées hors saison. Par ailleurs, sur les plateaux, les aulnes occupent préférentiellement des cuvettes ou dépressions dont le climat est plutôt caractérisé par les gelées hors saison.

Tableau 4.5. - Définition des régions forestières à partir des secteurs écologiques de ONCLINCX et al. [1987].

| Code | Régions forestières                             | Secteur écologique   |
|------|---|--|
| 10   | <i>Basse et moyenne Belgique</i>                |  |
| 11   | Plaines et vallées scaldisiennes                | Plaines et vallées scaldisiennes   |
| 12   | Régions limoneuse et sablo-limoneuse            | Hesbaye<br>Hesbino-brabançon   |
| 13   | (Thiérache française)                           | (néant)  |
| 20   | <i>Condroz</i>                                  |  |
| 21   | Meuse et Sambre                                 | Pays meusien<br>Pays sambrien  |
| 22   | Marlagne et Ardenne condruzienne                | Marlagne et Ardenne condruzienne   |
| 23   | Condroz   | Condroz<br>Sambro-condruzien   |
| 24   | Herve   | Herve  |
| 30   | <i>Fagne-Famenne</i>                            | Fagne atlantique<br>Fagne-Famenne<br>Calestienne<br>Calestienne atlantique |
| 40   | <i>Grandes vallées (&lt; 221 m d'altitude)</i>  | Vallées inférieures du bassin mosan  |
| 50   | <i>Ardenne</i>                                  |  |
| 51   | basse   | Vallées supérieures du bassin mosan<br>Ardenne atlantique<br>Thiérache     |
| 52   | moyenne   | Ardenne méridionale<br>Ardenne occidentale<br>Ardenne centro-orientale     |
| 53   | haute   | Haute Ardenne  |
| 60   | <i>Lorraine belge</i>                           |  |
| 61   | Vallées supérieures de la Semois et de l'Attert | Vallées supérieures de la Semois et de l'Attert                            |
| 62   | Côtes de Florenville                            | Côtes de Florenville   |
| 63   | Côtes d'Éthe                                    | Côtes d'Éthe   |

|    |                     |                     |
|----|---------------------|---------------------|
| 63 | Côtes de la Moselle | Côtes de la Moselle |
|----|---------------------|---------------------|

La longueur de la période de végétation a été déterminée, via un système d'information géographique, par interpolation entre les courbes d'égale longueur de végétation de la carte climatique de PONCELET et MARTIN [1947] numérisée. Il n'a pas été possible de se référer directement aux stations du réseau météorologique belge en raison de leur faible nombre et de leur répartition sur le territoire étudié.

### ***5° Lithologie***

La roche-mère pédologique est fortement marquée par les phénomènes de colluvionnement et d'alluvionnement qui caractérisent la plupart des stations forestières humides, et qui sont responsables de mélanges de matériaux d'origines différentes. Nous avons donc veillé à tenir compte à la fois de la lithologie du bassin versant amont, et de celle renseignée à l'endroit de la station par la carte géologique de la Belgique, modifiée selon ASSELBERGHS [1946] pour les assises de l'étage dévonien inférieur. Le tableau 4.6 présente la classification spécifique que nous avons adoptée. Elle est construite en relation étroite avec les assises de la carte géologique, et hiérarchisée selon le caractère autochtone ou allochtone de la roche-mère pédologique.

### **4.3.2. Données topographiques**

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2.7, l'alimentation en eau joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des stations humides et la croissance de l'aulne. Nous avons donc apporté un soin particulier à définir avec précision la topographie des stations, car elle détermine largement leurs régimes hydrique et phréatique.

Nous avons aussi jugé que seule une information très détaillée, proche d'une description non codifiée, permettra de tirer le meilleur parti de la topographie lors de la construction du catalogue des stations et de l'analyse autécologique de l'aulne. Le cas échéant, cette classification pourra ensuite être codifiée selon les nécessités. Sur le terrain, nous avons donc mis au point la classification descriptive détaillée présentée dans le tableau 4.7 qui, lors de la récolte des données, est toujours accompagnée d'un croquis du relief aux alentours de la placette considérée. On remarque qu'en ce qui concerne les vallées, elle s'apparente assez étroitement avec la notion de type de station (ex : dépression marginale, bourrelet alluvial, vallon).

Tableau 4.6. - Codification adoptée pour la lithologie.

| Code | Lithologie   |   |
|------|--|---|
| 100  | <i>ROCHE MERE = ALLUVIONS</i>                          |   |
| 110  | - « Ardenne oligotrophe »                              |   |
| 120  | - « Ardenne mésotrophe »                               |   |
| 130  | - Lorraine marneuse                                    |   |
| 140  | - Lorraine sableuse                                    |   |
| 150  | - Famenne  |   |
| 160  | - Condroz  |   |
| 170  | - Limons   |   |
| 180  | - Variée   |   |
| 190  | - Autre  |   |
| 200  | <i>ROCHE MERE = ROCHE EN PLACE</i>                     |   |
| 210  | <i>Roches carbonatées</i>                              |   |
| 211  | Calcaires de Calestienne                               | Frasnien, Couvinien et givetien   |
| 212  | Calcaires du Condroz et de Mons                        | Dinantien (Viséen et Tournaisien)   |
| 213  | Calcaire de Lorraine                                   | Bajocien  |
| 214  | Calcschistes (Calestienne)                             | Schistes noduleux, du Frasnien et du Couvinien  |
| 215  | Grès calcaire  | Sinémurien, Virtonien, Hettangien calcaires   |
| 216  | Marnes jurassiques                                     | Keupérien, Hettangien, Sinémurien, Toarcien   |
| 217  | Macignos   | Macignos du Virtonien   |
| 218  | Craies et argiles de Herve                             |   |
| 220  | <i>Roches siliceuses</i>                               |   |
| 221  | « Ardenne oligotrophe »                                | Schistes, grès et quartzites du Cambrien, du Silurien, du Siegenien inférieur, du Gedinnien |
| 222  | « Ardenne mésotrophe »                                 | Schistes, grès et phyllades de l'Emsien et du Siegenien moyen et supérieur                  |
| 223  | Schistes de Famenne                                    | Schistes famenniens   |
| 224  | Schistes d'Ethé  | Schistes d'Ethé (Virtonien)   |
| 225  | Schistes et psammites du Condroz et du bassin houiller | Psammites et schistes famenniens (excepté en Famenne), schistes houillers                   |
| 226  | Dépôts de silex  |   |
| 230  | <i>Sables de basse et moyenne Belgique et de Herve</i> | Sables Yprésiens, Landenniens, Bruxelliens  |
| 240  | <i>Argiles de basse et moyenne Belgique</i>            | Argiles et marne Ladenniennes et Yprésiennes  |
| 250  | Limons éoliens épais                                   | Limons éoliens  |

Tableau 4.7. - Classification descriptive adoptée pour les formes de relief.

| Code | Forme de relief                        |
|------|--|
| 100  | <i>Vallées</i>                         |
| 110  | Dépression géomorphologique            |
| 120  | Vallée                                 |
| 121  | Plaine alluviale                       |
| 122  | Terrasse alluviale homogène            |
| 123  | Bourrelet alluvial, berge, île         |
| 124  | Dépression marginale                   |
| 130  | <i>Vallon</i>                          |
| 200  | <i>Versant</i>                         |
| 210  | A-pic, abrupt, falaise, ligne de crête |
| 220  | Haut de pente, pente convexe           |
| 230  | Pleine pente                           |
| 240  | Replat, terrasse, pente concave        |
| 250  | Bas de pente                           |
| 300  | <i>Plateau</i>                         |
| 310  | Plateau étendu, plane                  |
| 320  | Dôme, sommet, rebord (légère pente)    |
| 330  | Cuvette, dépression du plateau         |

Nous avons ensuite complété cette information par des mesures de la pente et de son orientation (en degrés). La déclivité est mesurée selon la direction de la plus grande pente du terrain à partir du centre de la placette. Ainsi, les 2 variables suivantes complètent la description topographique :

|                                     |                    |
|-------------------------------------|--------------------|
| <b>Pente moyenne de la placette</b> | <i>(en degrés)</i> |
| <b>Orientation de la pente</b>      | <i>(en degrés)</i> |

### 4.3.3. Données pédologiques

#### *1° Protocole d'observation*

Pour collecter l'ensemble des données pédologiques, nous avons effectué des sondages du sol à l'aide d'une sonde pédologique munie d'allonges, de telle sorte que la profondeur maximale de sondage soit portée à 3 m. Ces sondages, au nombre de 2 à 5 par placette, se répartissent dans la station de manière à appréhender au mieux l'hétérogénéité spatiale du sol, généralement prononcée dans

les milieux humides et surtout alluviaux [RITZEMA, 1994]. Ils ont fait l'objet d'une description moyenne, principalement axée sur les caractéristiques suivantes :

- le type d'humus ;
- l'épaisseur, le pH, la texture, la structure, la pierrosité et les traces d'hydromorphie de l'horizon humifère ;
- les modifications de ces caractéristiques avec la profondeur ;
- l'état d'humidité, apprécié par le même opérateur selon une échelle subjective à 5 niveaux (sec, mésique, frais, mouillé, abondance d'eau « circulante ») ;
- la profondeur du sondage, avec la justification de l'arrêt du sondage, et une évaluation de la profondeur utile du sol.

Ainsi, excepté la mesure de l'acidité réalisée à l'aide d'un pH mètre de terrain, aucune analyse chimique ou granulométrique n'a été effectuée ; toutes les données proviennent donc de l'observation des sondages sur le terrain.

Toutes ces descriptions ont ensuite été codifiées selon la méthode de la carte des sols de la Belgique [AVRIL, 1987], de telle sorte que nous avons pu synthétiser l'information par un sigle pédologique, jetant ainsi des ponts entre notre étude et la carte des sols. Lorsque l'hétérogénéité du sol était telle qu'un « sondage moyen » n'avait pas de sens, nous avons procédé à des descriptions individuelles des sondages, et mis en évidence ce qu'elles avaient de commun.

Plusieurs sondages ont été effectués en cours de saison afin d'estimer l'état d'humidité du sol à différentes périodes de l'année, ou, le cas échéant, le niveau de la nappe phréatique. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe 4.5.

Enfin, pour chaque station, nous avons traduit la description du sol en variables écologiques, qui constituent la base de données pour la construction du catalogue des stations et l'étude autécologique de l'aulne glutineux. Les paragraphes qui suivent présentent une à une chacune de ces variables et la manière dont nous les avons appréhendées.

## **2° Variables observées**

### **• Humus**

Nous avons défini le type d'humus selon la classification de DELECOUR [1990], que nous avons élargie aux humus de type anmoor et tourbe. La classification adoptée est présentée dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8. - Classification des types d'humus selon DELECOUR [1990].

| Code <sup>(1)</sup> | Type d'humus                    |
|---------------------|---------------------------------|
| 10*                 | Mull                            |
| 11*                 | - dystrophe                     |
| 12*                 | - oligotrophe      pH < 5       |
| 13*                 | - mésotrophe      5 < pH < 6    |
| 14*                 | - eutrophe      6 < pH < 7,5    |
| 15*                 | - calcique      pH > 7,5        |
| 16*                 | - carbonaté      calcaire actif |
| 20*                 | Moder mulleux                   |
| 30*                 | Moder                           |
| 40*                 | Dysmoder                        |
| 50*                 | Mor                             |
| 601                 | Anmoor                          |
| 611                 | - oligotrophe                   |
| 621                 | - mésotrophe                    |
| 631                 | - eutrophe                      |
| 701                 | Tourbe                          |
| 711                 | - oligotrophe                   |
| 721                 | - mésotrophe                    |
| 731                 | - eutrophe                      |

(1) Le caractère \* prend la valeur 1 ou 0 selon que l'humus est hydromorphe ou non.

#### • Acidité

Nous avons systématiquement procédé à l'estimation du  $pH_{\text{eau}}$  du sol aux 2 niveaux de profondeur suivants :

- au sein de l'horizon humifère, entre 5 et 15 cm, ce qui correspond, dans le cas de l'aulne, à la zone d'absorption maximale des éléments minéraux [MAC VEAN, 1956] ;
- entre 50 et 100 cm selon les caractéristiques des sols, afin de déceler d'éventuelles discontinuités pédologiques importantes, fréquemment rencontrées dans les sols alluviaux caractérisés par différents dépôts d'origine variable au gré des crues.

**Acidité de l'horizon humifère :**  $pH_{\text{eau}}$  (unité, au dixième près)

**Acidité en profondeur :**  $pH_{\text{eau}}$  (unité, au dixième près)

Pour chaque niveau, nous avons effectué 2 prélèvements de terre dont nous avons évalué le pH à l'aide du pH-mètre colorimétrique de terrain HELDIGE<sup>(4)</sup>. Pour le niveau donné, la moyenne des 2 valeurs constitue l'estimation de l'acidité du sol<sup>(5)</sup>.

#### • *Indice trophique*

A partir de l'acidité et du type d'humus, nous avons défini un indice trophique à 4 niveaux selon la clef du tableau 4.9.

Tableau 4.9. - Clef de détermination de l'indice trophique.

| Code | Indice trophique   |
|------|--|
| 1    | Tourbe oligotrophe, mor, dysmoder, moder                     |
| 2    | Moder mulleux, mull dystrophe<br>Mull et anmoor oligotrophes |
| 3    | Mull et anmoor mésotrophes<br>Mull et anmoor eutrophes       |
| 4    | pH ≥ 6,5   |

#### • *Texture*

La texture du sol a été appréciée sur le terrain pour les divers horizons rencontrés. Elle a été codifiée selon le système de la carte des sols de la Belgique, à partir du triangle textural [DELECOUR et KINDERMANS, 1980]. Nous avons toutefois aussi évalué la texture de la terre fine pour la classe des sols caillouteux.

Le tableau 4.10 présente les niveaux de la variable « texture ». Nous l'avons adaptée en ajoutant 2 classes qui se justifient par la fréquence des caractères qu'elles expriment au sein des types de sols rencontrés. Il s'agit des classes 1 (graviers) lorsqu'il n'y a pas de terre fine, et 2 (anmoor) lorsque l'épaisseur de l'anmoor dépasse 40 cm.

<sup>(4)</sup> La valeur de pH estimée par le pH mètre de terrain sous-estime l'acidité mesurée au laboratoire de l'ordre de 8 à 12 %.

<sup>(5)</sup> En cas de forte différence entre les 2 mesures (> 0,5 unité), nous avons effectué une troisième, voire une quatrième observation.

Tableau 4.10. - Classes de la variable « texture ».

| Code | Texture                      |
|------|------------------------------|
| 1    | graviers (pas de terre fine) |
| 2    | Z : sable                    |
| 3    | S : sable limoneux           |
| 4    | P : limon sableux            |
| 5    | L : limon sableux léger      |
| 6    | A : limon, limon argileux    |
| 7    | E : argile légère            |
| 8    | U : argile lourde            |
| 9    | V : tourbe                   |
| 10   | anmoor                       |

### • Structure

DELECOUR et KINDERMANS [1980] ont mis au point une classification des structures. Nous l'avons simplifiée pour obtenir 3 niveaux allant de la structure la plus fine à la plus massive selon le tableau 4.11.

Tableau 4.11. - Classes de la variable « structure du sol ».

| Code | Structure du sol          |
|------|---------------------------|
| 1    | Grumeleuse ou polyédrique |
| 2    | Intermédiaire             |
| 3    | Massive                   |

### • Hydromorphie et classe de drainage

L'hydromorphie du sol a été caractérisée par 2 variables : la profondeur d'apparition du gley et celle du pseudogley. L'information de terrain est toutefois plus explicite et signale la proportion de taches de rouille et la présence de concrétions de manganèse.

|  |
|--|
| <b>Profondeur d'apparition du pseudogley</b> (en cm) |
| <b>Profondeur d'apparition du gley</b> (en cm)       |



Ces 2 mesures permettent de déterminer la « classe de drainage » du sol au sein de la classification empirique de la carte des sols de Belgique, selon le tableau 4.12.

Tableau 4.12. - Classe de drainage selon la classification de la carte des sols de la Belgique [AVRIL, 1987].

| Classe de drainage <sup>(1)</sup> | profondeur d'apparition du |           |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------|
|                                   | pseudogley                 | gley      |
| b                                 | > 12 cm                    | absent    |
| c                                 | 80 - 125 cm                | absent    |
| d                                 | 50 - 80 cm                 | absent    |
| h                                 | 20 - 50 cm                 | absent    |
| i                                 | 0 - 20 cm                  | absent    |
| e                                 | > 30 cm                    | > 80 cm   |
| f                                 | 0 - 30 cm                  | 5 - 80 cm |
| g                                 | absent                     | < 5 cm    |

(1) Clef de détermination des classes simplifiée en raison des caractéristiques des stations du réseau d'observation.

#### • Profondeur de sol

Il est bien connu que la profondeur de sol que l'on peut mesurer à la sonde n'est généralement pas la profondeur utile. En effet, la pénétration de la sonde est souvent entravée par la charge caillouteuse, alors que les racines sont capables de s'infiltrer plus profondément. D'autre part, l'abondance d'eau ne permet pas d'effectuer aisément des observations au sein d'une fosse pédologique. Sachant que l'aulne peut avoir un enracinement très profond, il est donc illusoire d'estimer la profondeur du sol par la profondeur de sondage. En conséquence, nous avons précisé cette information par 2 variables complémentaires : la cause de l'arrêt du sondage et l'estimation de la profondeur utile. Le tableau 4.13 fait l'objet d'une codification appropriée de la cause de l'arrêt du sondage.

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Profondeur utile</b>      | (égale / supérieure à celle du sondage) |
| <b>Profondeur de sondage</b> | (en cm)                                 |

Tableau 4.13. - Codification de la cause de l'arrêt du sondage.

| Code | Cause de l'arrêt du sondage     |
|------|---------------------------------|
| 10   | Sonde enfoncée totalement (3 m) |
| 20   | Obstacle                        |
| 21   | roche-mère cohérente            |
| 22   | roche-mère altérée              |
| 23   | charge caillouteuse importante  |
| 24   | lit de galets                   |
| 25   | argile lourde                   |

#### • *Horizon imperméable*

La présence et la profondeur d'une entrave à l'écoulement vertical de l'eau dans le sol ont été évaluées subjectivement sur le terrain. Nous nous sommes fondés sur les caractéristiques texturales et structurales des horizons pédologiques. Les 3 critères pris en compte ont été les suivants :

- la présence d'un horizon fortement enrichi en argile (B textural),
- la présence d'un substrat argileux,
- la présence d'un fragipan.

La présence d'une roche-mère non fissurée ou colmatée d'argile (Famenne), ainsi que la présence d'une nappe phréatique permanente sont aussi des entraves à l'écoulement vertical. Elles n'ont pas été prises en compte par cette variable.

|   |
|---|
| <b>Profondeur de l'horizon imperméable</b> <i>(en cm)</i> |
|---|

#### 3° *Indice de circulation d'eau*

A partir des données topographiques et pédologiques, nous avons défini un indice de circulation de l'eau, qui apporte une information complémentaire à l'indice que constitue la « classe de drainage » codifiant l'hydromorphie du sol. En effet, des sols hydromorphes relevant de la même classe peuvent être caractérisés par une eau stagnante ou circulante, ce qui peut avoir un impact non négligeable sur l'oxygénation du sol [STORTELDER *et al.*, 1998].

Le tableau 4.14 présente la clef empirique que nous avons définie à partir de l'unité topographique, de la pente du terrain, de la texture du sol et de la présence d'un horizon imperméable.

Tableau 4.14. – Clef de détermination de l'indice de circulation de l'eau.

| Unités topographiques (code)  |                              | Drainage interne du sol <sup>(1)</sup> | Pente | Indice de circulation de l'eau |
|-------------------------------|------------------------------|--|-------|--------------------------------|
| Plateau                       | Sommet (310, 320)            |  |       | 1                              |
|                               |                              |  | Nulle | 2                              |
|                               |                              | Ralenti                                |       | 2                              |
|                               | Dépression (330)             |  | Nulle | 3                              |
|                               |                              |  |       | 2                              |
|                               |                              | Ralenti                                | Nulle | 4                              |
| Versant                       | Concave Terrasse (240)       | Ralenti                                |       | 2                              |
|                               |                              |  |       | 3                              |
|                               | Autres                       | Ralenti                                |       | 1                              |
|                               |                              |  |       | 2                              |
| Vallée                        | Bourrelet (123)              |  |       | 1                              |
|                               | Terrasse homogène (121, 122) |  |       | 2                              |
|                               |                              | Ralenti                                |       | 3                              |
|                               | Dépression marginale (124)   |  |       | 4                              |
| Dépression (110)              |                              |  |       | 3                              |
| (Haine, Semois, Famenne, ...) |                              | Ralenti                                |       | 4                              |

<sup>(1)</sup> Drainage interne ralenti : dans le cas de sols à texture argileuse (code 7) ou tourbeuse (code 9), ou à horizon imperméable.

#### 4.3.4. Données phréatiques

##### *1° Mesures piézométriques périodiques*

###### • *Méthode utilisée*

Nous avons effectué des mesures périodiques du niveau des nappes phréatiques en vue d'établir la courbe piézométrique des stations. Dans cette perspective, compte tenu de la somme de travail que cela représentait, nous avons sélectionné un sous-échantillon de placettes que nous avons équipé de 1 à 3 piézomètres, selon la nature du sol. Ceux-ci sont constitués d'un tuyau de drainage en PVC perforé enfoncé verticalement dans le sol (figure 4.4) selon le protocole expérimental de GIRAULT [1990]. Ces piézomètres, de conception simple et robuste,

sont bien adaptés aux contraintes techniques qu'impose un dispositif applicable à la variété des conditions écologiques et des accidents potentiels rencontrés dans les forêts étudiées (inondations violentes, textures variées, nappes perchées, présence de gibier, accessibilité réduite, etc...) et à la dispersion géographique des stations.

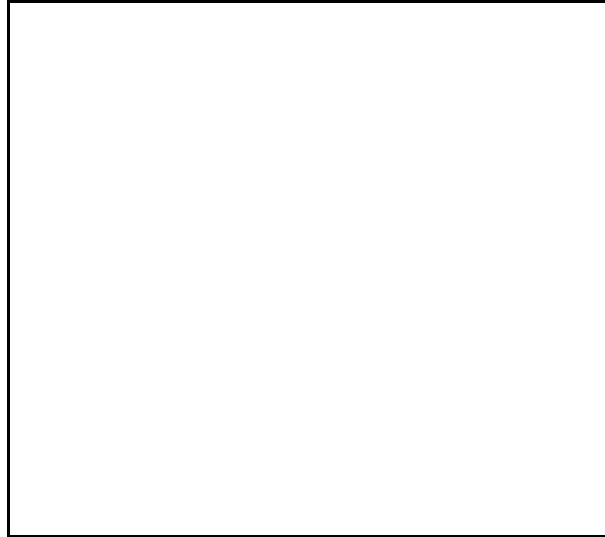


Figure 4.4. - Description du piézomètre utilisé (selon GIRAULT [1990]).

#### • *Choix des placettes*

Le choix des placettes à équiper d'un piézomètre a été déterminé d'après les contraintes et objectifs suivants :

- la recherche d'une bonne distribution des piézomètres selon les principaux types de régime phréatique attendus, faisant l'hypothèse, en se basant sur notre connaissance des placettes, que les 4 grandes familles de régimes phréatiques suivantes étaient à envisager :
  - . régimes liés aux sources,
  - . régimes liés aux nappes alluviales,
  - . régimes liés aux accumulations d'eau temporaires,
  - . régimes liés aux accumulations d'eau permanentes ;
- la nécessité de concentrer les observations pendant la période de temps la plus courte possible, de manière à ce que les différentes observations se réfèrent à la même période météorologique et puissent être comparées entre elles.

En tenant compte de ces contraintes, du temps et des moyens dont nous disposions, et de la distribution géographique des placettes (figure 3.4), nous avons alors fixé à 54 le nombre de stations à équiper de piézomètres, ce qui représente, selon les saisons, 3 à 4 jours consécutifs de mesures, toutes les 3 à 5 semaines.

Pour réaliser cet objectif, nous avons réparti les placettes selon 3 axes (Herve-Spa, Wellin-Arlon, Chimay-Hirson) le long desquels nous avons pu rassembler des stations représentatives du réseau d'observations et des types prévisibles de régime phréatique.

#### • *Installation des piézomètres*

Afin d'installer des piézomètres suffisamment profonds, l'ensemble du réseau a été établi lors de l'étiage de la période de végétation 1996 (juillet à septembre). La profondeur des piézomètres varie de 1 à 3 m, en fonction des horizons rencontrés et de la profondeur des nappes à l'étiage. Comme le recommande RITZEMA [1994] dans le cas de nappes perchées (limons, argiles blanches, ...), nous avons installé 2 piézomètres dont l'un perce l'horizon imperméable ou s'y enfonce profondément. Pour vérifier le caractère imperméable du plancher de la nappe, un troisième tube, non perforé, a été installé et enfoncé à la masse au fond du trou préparé pour le recevoir, de manière à ce qu'aucun échange d'eau ne soit possible autrement que par infiltration à travers le fond du piézomètre.

#### • *Mesures*

Treize campagnes de mesures ont été réalisées au cours de la période allant du 10 janvier au 31 décembre 1997. La périodicité des mesures a donc été en moyenne de 27 jours, mais d'environ 20 jours pendant la période de végétation, à laquelle correspond normalement le retrait des nappes par le fait de l'évapotranspiration (avril à septembre).

La valeur mesurée porte sur la différence (au cm près) entre la surface du sol (niveau 0, matérialisé par un repère) et le niveau de l'eau dans le piézomètre, qui est censé estimer la profondeur de la surface phréatique, ou encore, dans le cas de notre étude, la surface piézométrique<sup>(6)</sup>. Par souci de simplification du langage, nous attribuerons à la valeur mesurée le vocable de « niveau phréatique » ou « niveau de la nappe ». L'ensemble des mesures effectuées dans un piézomètre constitue la courbe piézométrique décrivant le régime phréatique de la station.

---

<sup>(6)</sup> Dans tous les cas observés, les systèmes phréatiques étaient de type non confiné [RITZEMA, 1994].

Dans le cas de sols à structure particulièrement massive et peu perméable, la mesure en piézomètre a été confirmée par des sondages pédologiques aux alentours du piézomètre. En effet, dans les sols imperméables, de l'eau peut rester captive dans le trou, alors que le sol est ressuyé. Le niveau d'eau peut alors être pratiquement constant durant toute la période de végétation, indiquant la profondeur du plancher de la nappe perchée. Ce caractère imperméable du sol a été confirmé, le cas échéant, par un niveau d'eau supérieur dans le tube non perforé.

A titre d'exemple, la figure 4.5 présente la courbe piézométrique d'une station au cours de l'année.

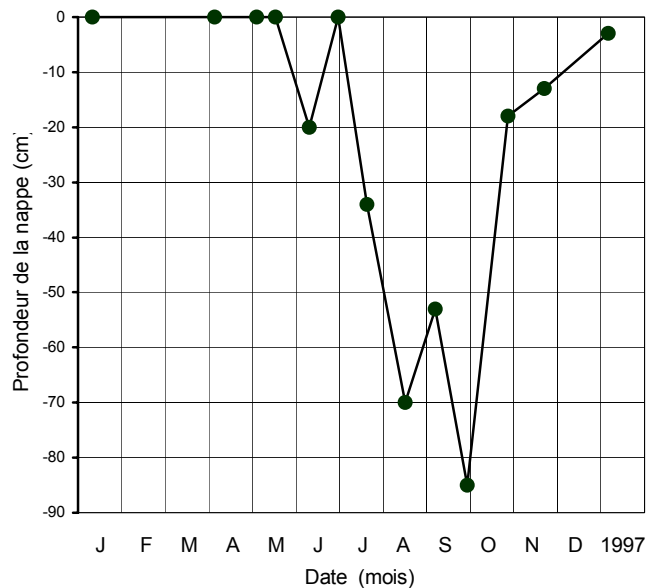


Figure 4.5. - Courbe piézométrique observée représentant l'évolution du niveau phréatique au sein d'une placette au cours de l'année 1997.

## 2° Niveaux phréatiques estimés

Sur l'ensemble des placettes non équipées d'un piézomètre, les niveaux phréatiques à l'étiage et en crue ont été estimés par 2 à 4 sondages à la sonde pédologique<sup>(7)</sup> selon que le sol était respectivement poreux (ex : alluvions

<sup>(7)</sup> Au sondage, nous avons considéré l'existence d'une nappe phréatique dès que de l'eau libre était présente sur l'hélice de la sonde.

grossières) ou compact (ex : marnes, argiles). La date de ces sondages a été déterminée d'après les niveaux phréatiques observés par ailleurs, au sein du réseau de piézomètres.

Ces observations nous permettent de disposer des 3 variables suivantes pour les stations qui ne sont pas équipées de piézomètres :

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>Présence de la nappe phréatique :</b> |                   |
| 0  | <i>absente</i>    |
| 1  | <i>temporaire</i> |
| 2  | <i>permanente</i> |
| <b>Niveau phréatique en crue</b>         | <i>(en cm)</i>    |
| <b>Niveau phréatique à l'étiage</b>      | <i>(en cm)</i>    |

### 3° Alimentation en eau

Sur le terrain, indépendamment des mesures phréatiques, nous avons interprété la topographie et la connexion au réseau hydrographique pour évaluer le type d'alimentation en eau de la station (tableau 4.15).

Tableau 4.15. - Codification du type d'alimentation en eau de la station.

| Code | Alimentation en eau                              |
|------|--|
| 1    | Précipitations                                   |
| 2    | Accumulation (apports                            |
| 3    | latéraux)  |
| 4    | Source rhéocrène ou hélocrène<br>Nappe alluviale |

## 4.3.5. Données phytocénotiques

### 1° Description phytocénotique

Pour caractériser la flore, nous avons suivi la méthode du relevé phytosociologique de BRAUN-BLANQUET. Le relevé a été effectué dans chaque station, sur une surface non pré-déterminée, de 1 à 10 ares, selon la méthode de l'aire minimale. Nous avons pris un soin particulier à effectuer le relevé dans les limites

de la seule station considérée en respectant le mieux possible le critère d'homogénéité. Toutefois, dans les forêts humides, les interpénétrations de phytocénoses sont inévitables en raison de la « micro-hétérogénéité » du milieu [NOIRFALISE, 1984], et du refuge que constituent souvent les empâtements des aulnes pour la flore mésophile.

Les relevés ont été effectués pendant la période la plus favorable à la diversité des espèces du sous-bois, de fin avril à août, plus tôt en stations alluviales qu'en stations marécageuses, en raison des différences de composition floristique observées. Excepté quelques bryophytes indicateurs aisément identifiables et fréquemment utilisés dans la pratique forestière (*Sphagnum*, *Polytrichum*, *Atrichum*, *Thuidium*, *Plagiomnium*), les relevés se sont limités aux phanérogames. La nomenclature botanique adoptée est celle de LAMBINON *et al.* [1992].

**Relevé phytosociologique** (*liste des espèces, abondance-dominance, sociabilité*)

## **2° Diagnostic phytosociologique de la phytocénose**

Parallèlement au relevé, le diagnostic phytosociologique a été établi sur le terrain. La réalisation de tableaux phytosociologiques a ensuite permis de confirmer ou d'affiner les déterminations, notamment par comparaison de nos relevés à ceux publiés dans la littérature.

**Type phytosociologique** (*association, sous-association, variante*)

La classification adoptée a été présentée dans le paragraphe 1.2.8 (tableaux 1.5 et 1.6). Les divisions en sous-associations et en variantes sont celles proposées par les auteurs de chacune des associations. A titre d'information, le tableau 4.15bis montre la distribution des stations du réseau d'observations au sein de la classification phytosociologique retenue.



Tableau 4.15bis. – Ventilation des stations du réseau d'observation au sein de la classification phytosociologique retenue.

| Associations                         | Nbre       | %          |
|--------------------------------------|------------|------------|
| <i>Alnion glutinosae</i>             | 59         | 33         |
| <i>Carici remotae-Alnetum</i>        | 27         |            |
| <i>Carici laevigatae-Alnetum</i>     | 7          |            |
| <i>Carici elongatae-Alnetum</i>      | 15         |            |
| <i>Cirsio oleracei-Alnetum</i>       | 10         |            |
| <i>Alno-Padion</i>                   | 42         | 23         |
| <i>Stellario-Alnetum</i>             | 40         |            |
| <i>Ulmo-Fraxinetum</i>               | 2          |            |
| <i>Carpinion betuli</i>              | 23         | 13         |
| <i>Endymio-Carpinetum</i>            | 2          |            |
| <i>Fraxino-Quercetum</i>             | 5          |            |
| <i>Pulmonario-Carpinetum</i>         | 11         |            |
| <i>Stellario-Carpinetum</i>          | 1          |            |
| <i>Polygono-Quercetum</i>            | 4          |            |
| <i>Quercion robori-sessiliflorae</i> | 19         | 10         |
| <i>Alno-Quercetum</i>                | 16         |            |
| <i>Betulo-Quercetum</i>              | 3          |            |
| <i>Betulion pubescentis</i>          | 3          | 2          |
| <i>Vaccinio-Betuletum</i>            | 3          |            |
| Autres                               | 36         | 19         |
| Végétations prairiales               | 7          |            |
| Sous-bois nitratophiles*             | 7          |            |
| Associations occasionnelles          | 5          |            |
| Indéterminés                         | 17         |            |
| <b>Totaux</b>                        | <b>182</b> | <b>100</b> |

\* Jeunes plantations d'aulne à sous-bois dominé par les nitrophiles (recouvrement supérieur à 90 % ; principalement à base de *Urtica dioïca*, *Galium aparine* et *Galeopsis tetrahit*).

#### ***4.4. Etude particulière des régimes phréatiques***

L'analyse des courbes piézométriques a pour but de définir des types de régimes phréatiques qui seront susceptibles de différencier les stations lors de la construction du catalogue des stations, ou d'intervenir comme variables écologiques explicatives de la productivité de l'aulne.

En effet, dans l'optique d'une typologie des stations, on peut supposer que le régime phréatique est une caractéristique stationnelle discriminante, notamment en raison de son impact sur l'aération des sols, qui, comme nous l'avons vu, apparaît très difficile à estimer par des mesures directes.

En outre, cette étude a aussi été menée dans l'intention d'évaluer le régime phréatique des stations qui n'étaient pas équipées de piézomètres, mais qui avaient cependant fait l'objet de mesures ponctuelles permettant d'évaluer la permanence, la crue et l'étiage de la nappe.

Ainsi, dans ce paragraphe nous analyserons les régimes phréatiques observés, en fonction de leur influence sur le fonctionnement des stations, et par conséquent, sur les potentialités forestières.

Avant d'entamer cette analyse, nous présenterons les données climatiques de l'année dont dépendent les niveaux phréatiques, et nous fournirons un commentaire général sur la relation entre la pluviosité, la végétation et les niveaux d'eau observés.

##### **4.4.1. Données climatiques pour l'année 1997**

Les fluctuations mesurées des niveaux phréatiques n'ont pas une valeur absolue. En effet, elles varient selon les années, et c'est surtout le comportement relatif des nappes observées qui aura un sens dans le cadre d'une typologie des stations. En effet, en raison de l'échelle temporelle de notre étude, il n'est pas envisageable de quantifier l'impact des variables climatiques sur les régimes phréatiques. Toutefois, il est intéressant de rapporter les données piézométriques aux conditions climatiques annuelles dont elles dépendent. Dans ce but, nous avons considéré la pluviosité, qui est responsable des apports d'eau, et la température, qui influence l'évapotranspiration.

Nous avons relié nos mesures piézométriques aux 9 stations du réseau de l'Institut Royal Météorologique (IRM) les plus proches des piézomètres et nous

avons analysé la pluviosité journalière d'après les données publiées mensuellement dans les Bulletins météorologiques<sup>(8)</sup>. Plus globalement, nous avons aussi analysé les résumés climatologiques mensuels.

D'après l'analyse de ces données, les conditions pluviométriques qui ont précédé les premières mesures piézométriques hivernales ont été normales. En effet, nous avons calculé qu'en moyenne, pour les 9 stations et sur l'ensemble des mois d'octobre, novembre et décembre 1996, la pluviosité a été conforme à la normale saisonnière (101 % en moyenne, avec une légère variabilité selon les régions : 94 à 113 %). Cela nous conduit à admettre l'hypothèse qu'au début de la période de mesures, le niveau des nappes reflète probablement une situation normale pour la saison, et ce, pour toutes les stations mesurées.

Ensuite, l'hiver qui a suivi a été anormalement sec, principalement à cause du mois de janvier<sup>(9)</sup>. Sur l'ensemble des mois qui ont précédé la feuillaison du couvert forestier (janvier à mars), la pluviosité n'a été que de 88 % de la normale. En raison de l'absence de pluies pendant la première partie du mois d'avril, on peut donc considérer que l'alimentation des nappes pendant l'hiver a été légèrement inférieure à la normale.

Le diagramme pluviométrique de la figure 4.6 montre que la période de végétation (fin avril à septembre) a ensuite été caractérisée par une alternance de périodes très pluvieuses et de périodes sans pluies. Le printemps a été particulièrement pluvieux : mai et juin ont été excédentaires (150 à 250 %). Août et septembre ont été anormalement secs (50 %) ; le mois d'août a aussi été un mois exceptionnellement chaud<sup>(10)</sup>. Ces accidents climatiques représentent une opportunité inespérée. En effet, le niveau élevé des nappes durant le printemps et l'importance de l'étiage sont des situations peu fréquentes qui nous permettent de bien appréhender les facteurs limitants de la station, car, spécialement dans le domaine forestier, ces valeurs extrêmes conditionnent bien plus les potentialités stationnelles que ne le font les valeurs moyennes.

---

<sup>(8)</sup> Les tableaux et graphiques climatiques synthétiques sont présentés dans l'annexe 1.

<sup>(9)</sup> Le plus sec de l'histoire climatologique de la Belgique (la pluviosité n'a été que de 12 % de la normale).

<sup>(10)</sup> Le plus chaud de l'histoire climatologique de la Belgique (de 4,4° supérieur à la normale, soit de 26 %).

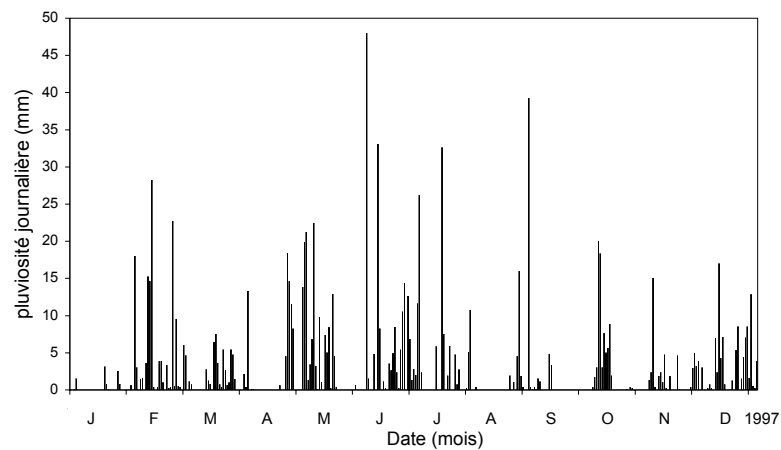


Figure 4.6. – Exemple de diagramme pluviométrique de l'année 1997 pour l'une des stations météorologiques prises en compte (Thimister).

Enfin, l'automne (octobre à décembre) a été normal (pluviosité égale à la normale : 100 %), ce qui laisse supposer que les nappes ont pu se reconstituer.

Dans l'ensemble, les diagrammes pluviométriques des 9 stations sont très proches. Les périodes de pluie sont les mêmes. Toutes proportions gardées, en Lorraine et dans le Sud de l'Ardenne, le total des précipitations a été plus important pendant la période pluvieuse du mois de juin.

On note aussi un pic de précipitations important (de l'ordre de 35 mm le 17 juillet) qui n'intervient pas pour les stations de Thimister et Xhoffrai.

#### 4.4.2. Courbes piézométriques

##### 1° Présentation des courbes piézométriques

Un rapide classement visuel des 54 courbes piézométriques obtenues révèle des allures différentes. Certaines courbes indiquent une nappe permanente peu variable, d'autres sont très irrégulières. Toutes caractérisent des sols à nappe phréatique, même si pour certaines, nous avons mesuré une longue période d'assèchement. La figure 4.7 présente quelques courbes piézométriques d'allures différentes.

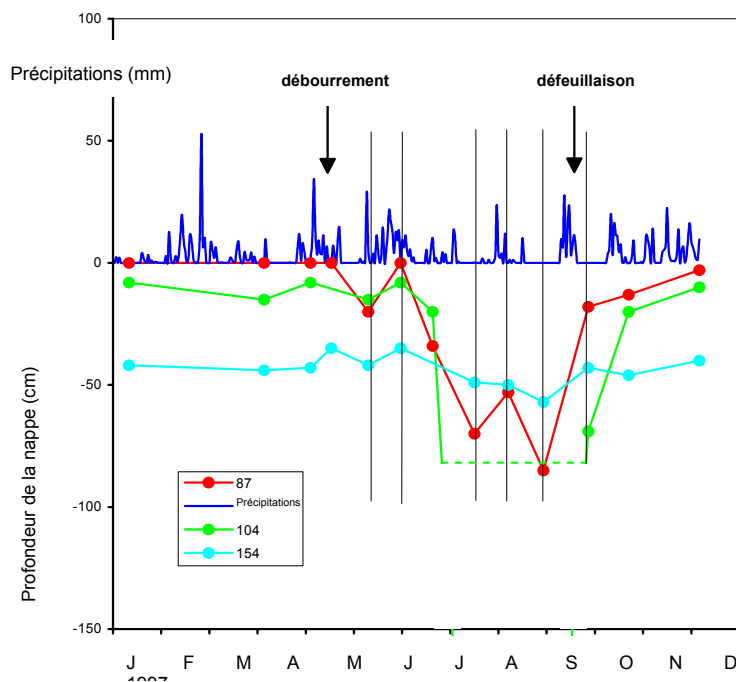


Figure 4.7. - Présentation de 3 courbes piézométriques contrastées en regard de la répartition des précipitations au cours de l'année.

## 2° Relation entre les courbes piézométriques et les conditions météorologiques

Les niveaux phréatiques apparaissent en relation avec les précipitations et l'évapotranspiration.

Comme le montre le figure 4.7, pendant l'hiver, de janvier à avril, les niveaux des nappes sont à leur maximum et ne varient pas fortement avec les précipitations.

Dès la reprise de la végétation, les niveaux ont tendance à baisser même en présence de faibles pluies (ex : juillet). Les périodes sans pluie accélèrent la baisse, tandis qu'il faut des pics de pluie conséquents pour faire remonter les niveaux des nappes.

Dès la chute des feuilles, une période pluvieuse suffit à rétablir les niveaux près de leur maximum.

Il est important de constater qu'il existe des différences de comportement selon les stations, comme le montre clairement la figure 4.7. Nous y reviendrons lors de l'analyse des courbes.

Toutefois, globalement, l'ensemble des nappes évolue selon la même tendance au cours de l'année, suivant le rythme de l'évapotranspiration, comme l'ont déjà démontré de nombreuses études [AUSSENAC et GRANIER, 1979 ; BIDDISCOMBE *et al.*, 1985 ; GIRAULT, 1988 ; LEVY, 1990]. A cet propos, il est utile de rappeler que l'aulne possède un enracinement très profond [KOSTLER, 1968 ; LIEPE, 1990] et qu'il est un grand consommateur d'eau [BRAUN, 1974 ; LEVY, 1978]. A l'occasion de quelques déracinements, nous avons effectivement pu constater que le système racinaire se développe jusqu'au niveau d'étiage de la nappe phréatique où il se redéploie très fortement.

### **4.4.3. Analyse des courbes piézométriques**

#### ***1° Méthode***

Dans une première approche, à l'aide d'une procédure de classification numérique, nous avons procédé au regroupement des courbes piézométriques observées. Nous avons arrêté notre choix sur une série de groupes homogènes qui définissent autant de « types de régime phréatique ». Ceux-ci ont été caractérisés par leur courbe piézométrique moyenne et par les valeurs moyennes des variables descriptives des courbes.

Nous avons ensuite évalué la pertinence des types en les confrontant à des caractéristiques écologiques synthétiques (type d'humus, classe de drainage, syntaxons).

#### ***2° Choix des variables descriptives***

L'analyse des courbes nécessite de réduire l'information à une série de variables qui sont théoriquement en rapport avec les potentialités des stations. Nous avons considéré que les caractéristiques de la nappe les plus importantes sont celles qui concernent l'alimentation en eau des espèces hydrophiles (présence et permanence de la nappe), ainsi que l'aération du sol au cours de l'année et spécialement pendant la période de végétation (niveaux d'eau printanier et estival). Ainsi, dans cette optique, en plus de 5 descripteurs statistiques classiques des

courbes (moyenne, minimum, maximum, écart-type et amplitude du niveau de la nappe), nous avons considéré 6 autres variables pour construire une nouvelle matrice de données à caractère analytique. Il s'agit des variables suivantes :

- la moyenne des niveaux d'eau hivernaux précédant la période de végétation (moyenne des valeurs hivernales : 10 janvier et 10 avril) , qui nous apparaît plus en relation avec le « fonctionnement » des stations que le niveau maximum au sens statistique du terme ;
- la moyenne des niveaux d'eau printaniers (moyenne des 4 valeurs printanières entre le 24 avril et le 23 juin) qui permet d'évaluer grossièrement la profondeur de sol ressuyé à disposition du système racinaire pendant la phase de croissance des aulnes (mai-juin) ;
- le niveau d'eau à l'étiage [valeur qui est la plus basse pour la majorité des nappes : le 25 septembre<sup>(11)</sup>], que nous avons préféré au niveau minimum au sens statistique du terme ;
- la longueur de la période d'assèchement qui nous paraît essentielle par rapport au caractère hydrophile de l'aulne. Le début et la fin de cette période sont respectivement estimés par la date moyenne entre la mesure qui révèle l'absence de nappe et la mesure de niveau d'eau précédente (lors du ressuyage du sol) ou suivante (lors de l'imbibition du sol) ;
- l'indice d'imbibition du sol, que nous avons défini par la différence de niveau entre les 8 et 23 juin, consécutive à une période de fortes pluies ;
- l'indice de drainage du sol<sup>(12)</sup> que nous avons défini comme étant la différence de niveau entre le 16 mai et le 8 juin, consécutive à une phase peu pluvieuse durant la période de végétation. Ces deux derniers indices renseignent sur la capacité de la station à s'imbiber ou, au contraire, à se ressuyer rapidement.

L'ensemble des 11 variables et leurs valeurs observées sont présentés dans le tableau 4.16.

Tableau 4.16. - Variables analytiques du régime phréatique (  $n$  = nombre d'observations ;  $cv$  = coefficient de variation).

| Variables | Valeurs observées |      |      |        |   |
|-----------|-------------------|------|------|--------|---|
|           | Moy.              | Min. | Max. | CV (%) | n |

<sup>(11)</sup> Pour une année normale, l'étiage du mois d'août, qui intervient en cours de la période de végétation, au moment où la consommation d'eau par les arbres est maximale [BRAUN, 1974] aurait probablement été choisi, mais l'excès de pluviosité printanière (jusqu'en juillet) nous a amené à retenir la date du 25 septembre.

<sup>(12)</sup> Drainage « biologique » par évapotranspiration y compris.

|   |     |      |     |     |    |
|---|-----|------|-----|-----|----|
| Descripteurs statistiques   |     |      |     |     |    |
| 1. Moyenne annuelle du niveau d'eau (cm)*                             | -27 | -93  | -1  | 87  | 36 |
| 2. Maximum du niveau d'eau (cm)                                       | -6  | -39  | 0   | 151 | 54 |
| 3. Minimum du niveau d'eau (cm)                                       | -68 | -169 | -5  | 68  | 54 |
| 4. Amplitude de fluctuation annuelle (cm)*                            | 62  | 5    | 169 | 71  | 36 |
| 5. Ecart-type du niveau d'eau (cm)*                                   | 20  | 2    | 64  | 76  | 36 |
| Caractéristiques de la crue et de l'étiage                            |     |      |     |     |    |
| 6. Moyenne des niveaux d'eau hivernaux (cm)                           | -11 | -61  | 0   | 125 | 54 |
| 7. Moyenne des niveaux d'eau printaniers (cm)                         | -20 | -85  | 0   | 96  | 54 |
| 8. Niveau d'étiage (le 25-9) (cm)                                     | -63 | -160 | -5  | 74  | 54 |
| 9. Longueur de la période d'assèchement (jours)**                     | 92  | 47   | 173 | 46  | 18 |
| Caractéristiques de la cinétique de la nappe en période de végétation |     |      |     |     |    |
| 10. Indice d'imbibition : (cm)  | 26  | 0    | 108 | 95  | 54 |
| 11. Indice de drainage : (cm)   | -28 | -108 | 6   | 95  | 54 |

\* Pour les nappes permanentes seulement ; \*\* Pour les nappes temporaires seulement.

### 3° Etablissement des types de régime phréatique

Le jeu de données se compose de 54 séries de 13 mesures du niveau piézométrique (données brutes ou courbes piézométriques) et de 54 séries de 11 variables analytiques qui décrivent les courbes piézométriques.

D'emblée nous avons distribué les 54 courbes en 2 familles nettement différentes, puis nous avons effectué pour chacune d'elles une classification plus précise à l'aide de procédures de classification numérique. Nous avons finalement obtenu 8 types de régime phréatique, définis, en moyenne, par 7 piézomètres que nous avons jugés suffisamment semblables pour être rassemblés dans un même « type de régime phréatique ».

Enfin, nous avons analysé la pertinence de la classification obtenue en la confrontant à d'autres variables écologiques.



### • Régimes temporaires et permanents

Dans une première étape, nous avons regroupé les 52 courbes piézométriques en 2 classes ; l'une caractérisant les stations dont la nappe est temporaire et s'assèche en période de végétation (que nous appellerons « régimes temporaires »), et l'autre caractérisant les stations dont la nappe est permanente (que nous appellerons « régimes permanents »).

Pour se faire une idée de ces régimes phréatiques, le tableau 4.17 présente les valeurs moyennes des variables descriptives des courbes piézométriques. On y observe que ces 2 régimes se différencient non seulement par la longueur de la période d'assèchement, mais aussi par leurs indices d'imbibition et de drainage.

Tableau 4.17. - Valeurs moyennes des variables descriptives des courbes piézométriques pour les régimes temporaire et permanent.

| Variables descriptives <sup>(1)</sup>        | Régime permanent | Régime temporaire |
|--|------------------|-------------------|
| Niveau maximum moyen (cm)                    | -6               | -6                |
| Niveau hivernal moyen (cm)                   | -12              | -11               |
| Niveau printanier moyen (cm)                 | -18              | -33               |
| Niveau de la crue printanière moyenne (cm)   | -11              | -11               |
| Longueur de la période d'assèchement (jours) | 0                | 92                |
| Indice d'imbibition (cm)                     | 18               | 42                |
| Indice de drainage (cm)                      | -18              | -49               |
| Nombre d'observations                        | 36               | 16                |

<sup>(1)</sup> Les autres variables, qui font référence au niveau minimum, n'ont pas de sens dans le cas des régimes temporaires, en raison de l'assèchement des nappes.

### • Classification des régimes temporaires

Au sein des régimes temporaires, la seule analyse visuelle du tableau des 18 séries de données a directement permis l'identification de 2 classes fortement contrastées. Celle-ci est fondée sur les niveaux hivernaux et printaniers, ainsi que sur la longueur de la période d'assèchement (tableau 4.18). Une classe rassemble les stations caractérisées par une longue période d'assèchement et un sol toujours ressuyé en surface (que nous appellerons « ressuyé ») ; l'autre regroupe celles qui se distinguent par un niveau d'eau hivernal et printanier très proche de la surface du sol et une période d'assèchement plus courte (que nous appellerons « noyé »).

Tableau 4.18. - Valeurs moyennes des variables descriptives des courbes piézométriques pour les régimes temporaires de type « ressuyé » et « noyé ».

| Variables descriptives                       | Régime temporaire |      |
|--|-------------------|------|
|  | ressuyé           | noyé |
| Niveau maximum moyen (cm)                    | -13               | 0    |
| Niveau hivernal moyen (cm)                   | -19               | -4   |
| Niveau printanier moyen (cm)                 | -58               | -14  |
| Niveau de la crue printanière moyenne (cm)   | -23               | -1   |
| Longueur de la période d'assèchement (jours) | 132               | 66   |
| Indice d'imbibition (cm)                     | -68               | -40  |
| Indice de drainage (cm)                      | 50                | 39   |
| Nombre d'observations                        | 9                 | 7    |

#### • Classification des régimes permanents

Les 36 régimes phréatiques permanents sont très diversifiés. Ainsi, pour établir des types, nous avons eu recours à des procédures de classification numérique. Nous avons successivement réalisé les 3 classifications suivantes, selon la méthode de WARD :

- sur l'ensemble des données non standardisées,
- sur l'ensemble des données standardisées,
- sur les variables descriptives relatives aux nappes permanentes, standardisées.

Nous avons ensuite analysé les classes issues de ces procédures de classification

- en observant la liste des piézomètres qui les composent,
- en calculant les valeurs moyennes des variables descriptives par classe.

Certaines classes se sont avérées stables, c'est-à-dire composées des mêmes piézomètres quelle que soit la procédure de classification, tandis que d'autres se sont avérées plus variables d'une procédure à l'autre.

Ces analyses objectives ont permis de mettre à jour des possibilités de regroupement assez nettes. Toutefois, le choix des classes est une opération plus subjective [KENT et COKER, 1996].

Les résultats des 3 procédures étant très proches, nous avons considéré la classification effectuée sur les données de base standardisées (figure 4.8) pour déterminer les types de régime phréatique. Le dendrogramme de la classification

(figure 4.8) met en évidence 2 ensembles de régimes dont la structure est différente (séparés par une ligne verticale dans la figure). A gauche sur le dendrogramme, on distingue facilement 4 classes, tandis qu'à droite, la structuration est moins nette. Pour cette raison et pour d'autres, liées à l'identité des régimes phréatiques qui composent ces 2 ensembles, nous avons choisi de les traiter de manière indépendante.

Nous avons finalement défini 6 classes de piézomètres qui se différencient principalement par leurs combinaisons des 3 variables suivantes :

- le niveau hivernal (noyé ou ressuyé),
- le niveau d'étéage,
- l'amplitude de variation (constant, peu variable, variable).

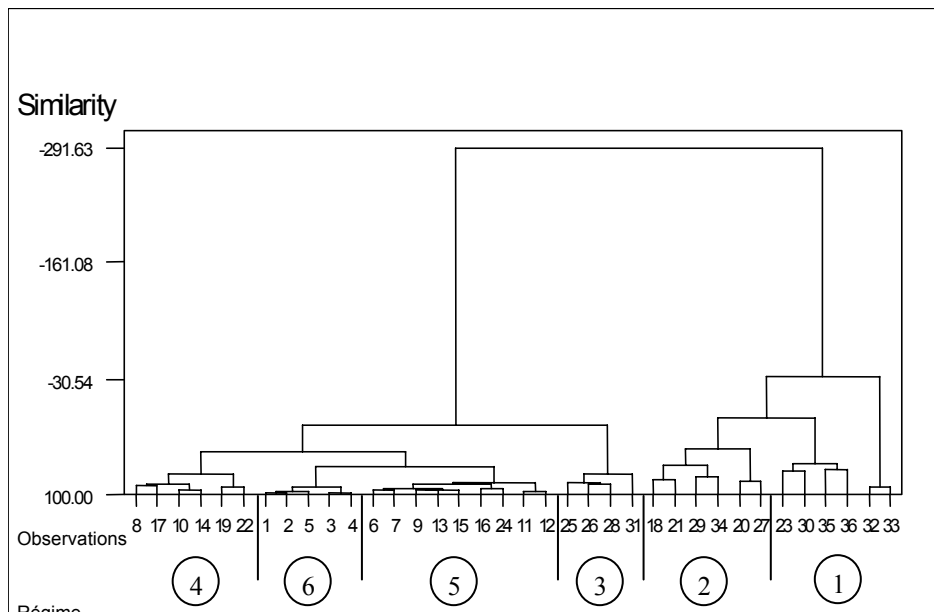


Figure 4.8. - Dendrogramme de la classification numérique des piézomètres relevant des stations à régime permanent (données brutes).

Ces variables définissent 6 types de régime phréatique que nous pouvons caractériser chacun de la manière suivante :

- type 1 : régime permanent ressuyé variable
- type 2 : régime permanent ressuyé constant

- type 3 : régime permanent noyé variable
- type 4 : régime permanent peu noyé peu variable
- type 5 : régime permanent noyé peu variable
- type 6 : régime permanent noyé constant.

Le tableau 4.19 présente les valeurs moyennes des variables descriptives des courbes piézométriques par régime phréatique retenu. Une information plus détaillée est disponible en annexe (annexe 2).

Tableau 4.19. - Valeurs moyennes des variables descriptives des courbes piézométriques pour les 6 régimes phréatiques permanents.

| Variables descriptives        | Régimes phréatiques |     |       |      |      |    |
|-------------------------------|---------------------|-----|-------|------|------|----|
|                               | 1                   | 2   | 3     | 4    | 5    | 6  |
| Niveau moyen (cm)             | -57                 | -41 | -27   | - 17 | - 10 | -3 |
| Niveau minimum (cm)           | - 137               | -67 | - 102 | - 47 | - 34 | -9 |
| Niveau maximum (cm)           | -10                 | -25 | 0     | - 5  | 0    | 0  |
| Ecart-type du niveau (cm)     | 42                  | 12  | 33    | 13   | 12   | 3  |
| Amplitude maximale (cm)       | 127                 | 43  | 102   | 42   | 41   | 9  |
| Niveau hivernal (cm)          | -28                 | -24 | 0     | - 9  | - 1  | -1 |
| Niveau printanier (cm)        | -37                 | -34 | -11   | - 12 | - 5  | -3 |
| Crue de printemps (cm)        | -19                 | -29 | -2    | - 8  | - 1  | -2 |
| Etiage (cm)                   | -128                | -67 | -102  | - 42 | - 33 | -7 |
| Indice d'imbibition (cm)      | 41                  | 12  | 25    | 10   | 10   | -4 |
| Indice de drainage (cm)       | -40                 | -16 | -25   | - 9  | - 12 | -3 |
| Période d'assèchement (jours) | 0                   | 0   | 0     | 0    | 0    | 0  |
| Nombre d'observations         | 8                   | 4   | 4     | 6    | 9    | 5  |

#### 4.4.4. Synthèse

En guise de synthèse, nous pouvons construire la classification générale des régimes phréatiques qui comporte, conformément à la figure récapitulative (figure 4.9), 8 régimes, dont 2 temporaires et 6 permanents. La figure 4.10 présente graphiquement les courbes piézométriques caractéristiques des 8 régimes phréatiques, c'est-à-dire les courbes moyennes d'évolution de la profondeur de la nappe.

Cette figure appelle 2 commentaires : graphiquement, les régimes phréatiques se différencient nettement ; mais avant tout, on constate que les 2 régimes particulièrement noyés (types 5 et 6) sont caractérisés par un étiage au mois d'août,

ce qui correspond à la période durant laquelle la consommation d'eau par la végétation est maximale, en particulier dans le cas de l'aulnaie [BRAUN, 1974], tandis que 3 des 4 autres régimes permanents ont leur étiage plus tard, en meilleure correspondance avec celui des rivières. Nous pouvons conclure que ce critère permet donc de séparer les stations à caractère « alluvial » de celles à caractère « marécageux ».

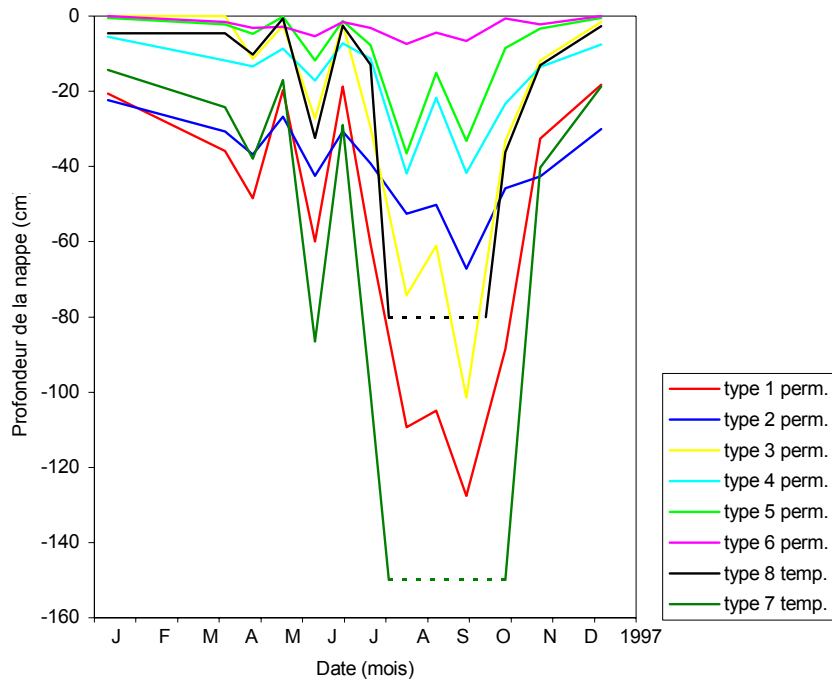


Figure 4.10. - Courbes piézométriques caractéristiques des 8 types de régime phréatique définis (en pointillé : période d'assèchement).

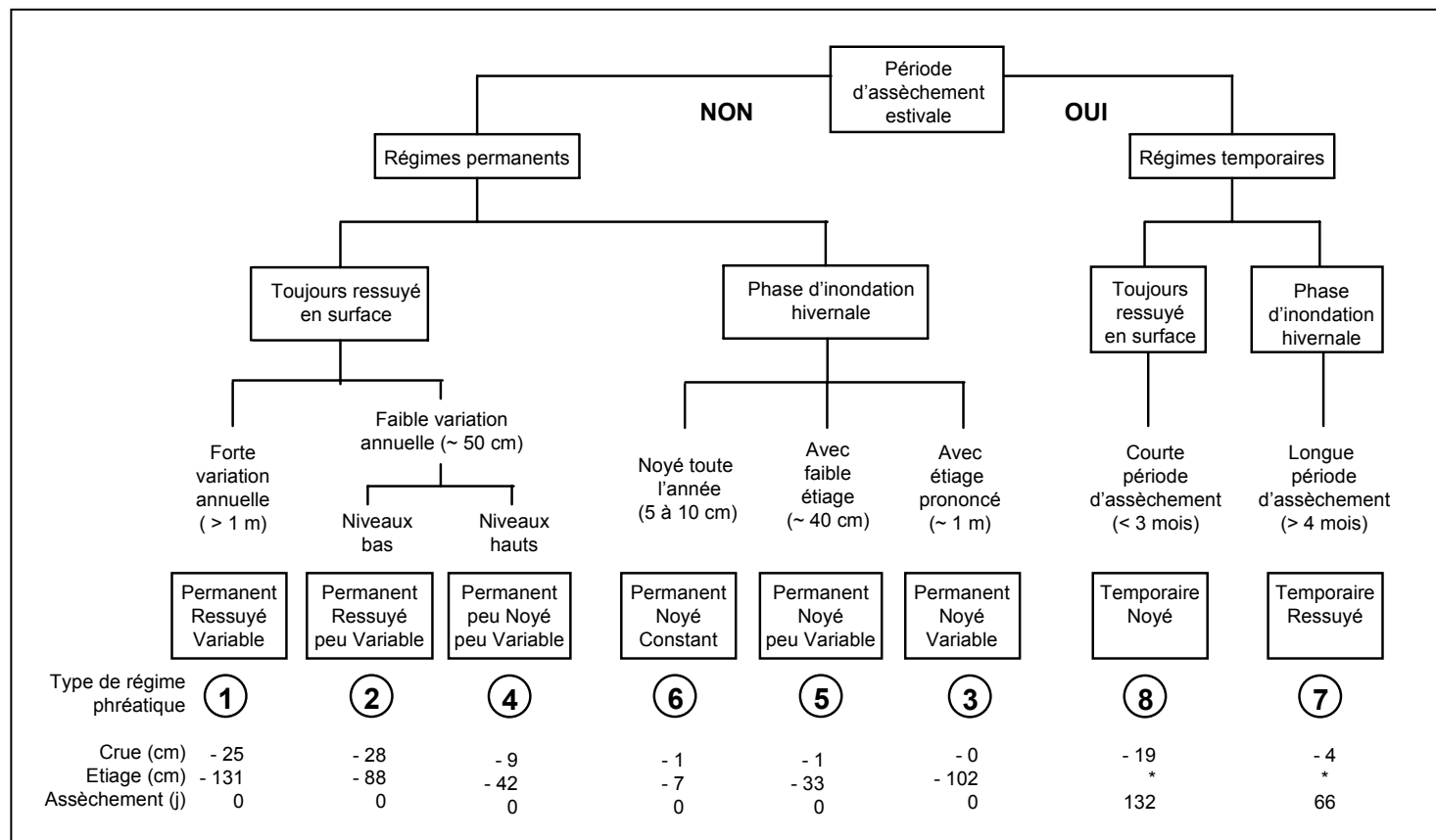


Figure 4.9. - Présentation schématique des 8 régimes phréatiques définis.

### 1° Evaluation de la classification

Sans entrer dans le détail, il est intéressant d'évaluer la pertinence de la classification des régimes phréatiques en la confrontant à quelques autres caractéristiques écologiques des stations. Dans cet but, nous avons choisi 3 variables stationnelles, qui, ensemble, donnent une idée synthétique de la station : la classe de drainage, le type d'humus et l'alliance phytosociologique. Le tableau 4.20 présente les niveaux de ces variables en fonction des régimes phréatiques.

Tableau 4.20. - Niveaux de la classe de drainage, du type d'humus et de l'alliance phytosociologique selon les types de régime phréatique (les niveaux entre parenthèses sont occasionnels - moins de 25 % des cas).

| Régimes phréatiques                     | Classes de drainage | Types d'humus                     | Alliances phytosociologiques           |
|---|---------------------|-----------------------------------|--|
| ① Permanent<br>Ressuyé<br>Variable      | e, f, (i)           | mull<br>(moder)                   | Carpinion<br>Alno-Padion<br>(Quercion) |
| ② Permanent<br>Ressuyé<br>Constant      | f                   | mull                              | Alno-Padion                            |
| ③ Permanent<br>Noyé<br>Variable         | i, f                | mull                              | Carpinion<br>(Alnion)                  |
| ④ Permanent<br>Peu noyé<br>Peu variable | f, g, h, i          | mull<br>moder<br>anmoor<br>tourbe | Quercion<br>Alno-Padion<br>Alnion      |
| ⑤ Permanent<br>Noyé<br>Peu variable     | g (f)               | anmoor                            | Alnion                                 |
| ⑥ Permanent<br>Noyé<br>Constant         | g (f)               | anmoor<br>(tourbe)                | Alnion<br>(Betulion)                   |
| ⑦ Temporaire<br>Ressuyé                 | h (i)               | mull<br>moder                     | Carpinion<br>Quercion                  |
| ⑧ Temporaire<br>Noyé                    | i (h)               | mull                              | Alnion<br>Quercion<br>(Carpinion)      |

### • *Classe de drainage*

On observe dans le tableau 4.20 que les régimes phréatiques sont très logiquement en étroite correspondance avec l'hydromorphie du sol (estimée par la classe de drainage).

Les sols des stations à régime temporaire (types 7 et 8) sont caractérisés par l'absence de gley (classes de drainage h et i) ; les traces de pseudogley apparaissant dès l'horizon humifère (classe i) lorsque le régime est de type « noyé » (type 8).

Les sols des stations à régime permanent sont caractérisés par l'existence d'un gley (classes e, f, g) ; celui-ci apparaissant dès la surface dans les régimes noyés constants ou peu variables (types 5 et 6). Parmi ces régimes permanents, les types 3 et 4 sont les moins bien caractérisés par l'hydromorphie du sol qui, dans certains cas, est uniquement de type « pseudogley ».

### • *Humus*

L'humus est aussi en étroite relation avec les régimes phréatiques : la forme « anmoor » est fidèlement liée aux régimes 5 et 6 et isole ceux-ci des autres types généralement caractérisés par la forme « mull » ou plus rarement « moder » (Ardenne). Ici encore, le type 4 n'est pas bien caractérisé par la forme d'humus.

Tableau 4.21. - Types de régime phréatique nettement caractérisés par les conditions stationnelles.

| Types de régime phréatique                        | Drainage | Humus         | Alliances                           |
|---|----------|---------------|-------------------------------------|
| 2 : Permanent Ressuyé<br>Constant                 | f        | mull          | <i>Alno-Padion</i>                  |
| 5, 6 : Permanent Noyé<br>Constant ou peu variable | g        | anmoor        | <i>Alnion</i>                       |
| 7 : Temporaire Ressuyé                            | h        | mull<br>moder | <i>Carpinion</i><br><i>Quercion</i> |

### • *Type phytosociologique*

On observe schématiquement 4 types fortement individualisés (types 2, 5, 6 et 7 : tableau 4.21) qui déterminent des conditions de croissance différentes, lesquelles se traduisent dans la végétation (alliances phytosociologiques : tableau 4.21). Autour d'eux gravitent des types de transition (types 1, 3, 4 et 8).



Ainsi, par rapport aux descripteurs écologiques des stations, le type permanent ressuyé à niveau variable (type 1) se rapproche des types temporaires, tandis que les types permanents 3 et 4 sont mal caractérisés par les variables écologiques envisagées, mais se différencient nettement des types noyés de façon presque permanente (types 5 et 6). Ces situations intermédiaires montrent qu'il y a convergence vers les alliances du *Carpinion* ou du *Quercion* lorsque la variation annuelle de niveau phréatique est très importante, et ce, que la nappe soit permanente ou temporaire.

#### 4.4.4. Estimation des régimes phréatiques par des mesures ponctuelles de la nappe

La caractérisation des courbes piézométriques observées permet facilement d'attribuer un type de régime phréatique donné à chacune des stations qui n'ont fait l'objet que de quelques mesures ponctuelles mais ciblées du niveau de la nappe. En effet, le tableau 4.22 montre que les types de régime phréatique peuvent être caractérisés en première approximation par les niveaux d'eau hivernal et à l'été.

Tableau 4.22. - Distribution des 8 régimes phréatiques selon les valeurs caractéristiques des niveaux phréatiques.

| Niveaux hivernaux | Niveaux d'été |         |      | sec |
|-------------------|---------------|---------|------|-----|
|                   | < 15          | 20 à 60 | > 80 |     |
| < 5 cm            | 6             | 5       | 3    | 7   |
| 5 - 15            |               | 4       |      |     |
| > 15 cm           |               |         | 2    | 1   |

Ainsi, nous pouvons donc déterminer le régime phréatique des 105 placettes non équipées de piézomètres dans lesquelles nous avons seulement relevé ces niveaux à la sonde pédologique.

Il faut toutefois insister sur le fait que ces valeurs se rapportent à l'année 1997 et doivent être restituées dans le contexte pluviométrique de cette année. Globalement, les tendances seront manifestement les mêmes d'une année à l'autre, mais les valeurs peuvent être différentes.

## 4.5. Conclusions

L'étude que nous avons menée, s'appuyant sur une bibliographie approfondie, a montré la diversité des mesures et des variables écologiques utilisées pour caractériser les stations. Parmi celles-ci, nous avons sélectionné celles qui paraissaient convenir le mieux à l'échelle de notre recherche et aux spécificités de l'aulne glutineux et des forêts humides telles que nous les avons identifiées antérieurement (paragraphe 1.2.7). En particulier, nous avons mis l'accent sur le régime phréatique des stations, qui a fait l'objet d'une étude spécifique portant sur une période de végétation.

Cette étude a permis de mieux appréhender l'évolution des niveaux phréatiques au cours de l'année, ce qui constitue une avancée non négligeable vers la compréhension du « fonctionnement » des stations humides. Nous avons ainsi pu définir quelques variables phréatiques pertinentes dans l'optique de l'élaboration du catalogue analytique et de l'étude de la productivité stationnelle de l'aulne. Parmi ces variables, le type de régime phréatique est d'un grand intérêt, car il permet de caractériser l'évolution annuelle de la profondeur de la nappe dans des stations, sans nécessairement y réaliser un suivi des niveaux piézométriques selon le protocole assez contraignant qui a été appliqué au sein des 54 stations équipées de piézomètres.

En guise de synthèse, les tableaux 4.23 et 4.24 présentent la liste des données écologiques récoltées au sein des stations du réseau d'observations et que nous avons jugées utiles à traiter par la suite, compte tenu de leur importance présumée dans la différenciation des stations.

Tableau 4.23. – Variables écologiques synthétiques élaborées.

| Variable écologique synthétique | Variables brutes considérées                                | Type                 |                   |
|---------------------------------|---|----------------------|-------------------|
|                                 |   | Qualitatif (niveaux) | Echelle (niveaux) |
| Secteur écologique              | Lithologie, climat, géomorphologie                          | 26                   | -                 |
| Indice trophique                | Humus, pH <sub>eau</sub>                                    | -                    | 4                 |
| Indice de drainage              | Forme de relief, pente, texture du sol, horizon imperméable | -                    | 4                 |
| Régime phréatique               | Niveau piézométrique caractéristique                        | 8                    | -                 |
| Syntaxon                        | Espèces, abondance  | 30                   | -                 |

Tableau 4.24. – Variables écologiques brutes récoltées.

| Variable écologique brute                                  | Type                    |                        |
|--|-------------------------|------------------------|
|  | Qualitatif<br>(niveaux) | Quantitatif<br>(unité) |
| <b>Environnement général</b>                               |                         |                        |
| Coordonnées : longitude, latitude, altitude                | -                       | m                      |
| Bassin versant   | 22                      | -                      |
| Connexion au réseau hydrologique                           | 11                      | -                      |
| Longueur de la période de végétation                       | -                       | jour                   |
| Lithologie   | 26                      | -                      |
| Forme de relief  | 15                      | -                      |
| Pente  | -                       | degré                  |
| Orientation  | -                       | degré                  |
| <b>Pédologie</b>   |                         |                        |
| Type d'humus   | 16                      | -                      |
| Acidité pHeau – horizon humifère                           | -                       | unité                  |
| Acidité pHeau – horizon profond                            | -                       | unité                  |
| Texture  | 10                      | -                      |
| Structure  | 3                       | -                      |
| Profondeur de sondage                                      | -                       | cm                     |
| Cause d'arrêt de sondage                                   | 6                       | -                      |
| Profondeur utile   | 2                       | -                      |
| <b>« Hydro-pédologie »</b>                                 |                         |                        |
| Profondeur d'apparition du pseudogley                      | -                       | cm                     |
| Profondeur d'apparition du gley                            | -                       | cm                     |
| Classe de drainage   | 8                       | -                      |
| Profondeur d'apparition d'un horizon<br>imperméable        | -                       | cm                     |
| Type d'alimentation en eau                                 | 4                       | cm                     |
| Niveaux phréatiques<br>(mesures piézoétriques périodiques) | -                       | -                      |
| Présence de la nappe phréatique*                           | 3                       | -                      |
| Niveau phréatique en crue*                                 | -                       | cm                     |
| Niveau phréatique à l'étiage*                              | -                       | cm                     |
| <b>Flore</b>   |                         |                        |
| Relevé phytosociologique                                   | -                       | -                      |

\* Pour les placettes non équipées de piézomètres.



**Chapitre 4*****Caractérisation des stations***

|  |     |
|--|-----|
| 4.1. Introduction .....  | 117 |
| 4.2. Revue bibliographique des principaux descripteurs des stations..... | 118 |
| 4.3. Récolte des données de base .....                                   | 131 |
| 4.4. Etude particulière des régimes phréatiques.....                     | 150 |
| 4.5. Conclusions .....   | 166 |

---

## Chapitre 5

### *Estimation de la productivité et des potentialités sylvicoles de l'aulne glutineux*

---

#### **5.1. Introduction**

Pour évaluer les potentialités sylvicoles des forêts hydrophiles, il est nécessaire de disposer d'informations sur la productivité des essences, ainsi que sur les objectifs de production envisageables. Or, pour la Belgique, il faut constater qu'il n'existe pas de données quantitatives concernant ce type d'approche pour l'aulne glutineux. Les principales études, présentées dans le premier chapitre, concernent l'Allemagne du Nord [SCHOBBER, 1975] ou la plaine du Danube [SOPP, 1974], deux régions biogéographiques différentes de la nôtre dont on peut présumer que leurs caractéristiques climatiques ont un impact non négligeable sur le développement des aulnaies. En effet, selon DECOURT [1964], les études de croissance sont valables au sein de « régions de croissance » correspondant à des territoires écologiques relativement homogènes.

Le présent chapitre a pour objectif de combler cette lacune en évaluant la productivité des aulnaies wallonnes et en identifiant les objectifs sylvicoles compatibles avec les différents niveaux de productivité. Dans la foulée, il envisage rapidement une première analyse de la relation station x production.

Ainsi, le texte qui suit est organisé en 4 paragraphes qui sont consacrés successivement :

- à la construction de courbes de fertilité pour l'aulne glutineux dans la zone d'étude (paragraphe 5.2) ;
- à l'évaluation des potentialités sylvicoles de l'essence (paragraphe 5.3) ;
- à une première approche de l'analyse de la productivité stationnelle (paragraphe 5.4) ;
- à quelques conclusions, montrant l'importance des résultats obtenus pour la suite de l'étude (paragraphe 5.5).

## ***5.2. Estimation de la productivité des peuplements d'aulne glutineux***

### **5.2.1. Méthode retenue**

Comme cela a été développé dans le chapitre 2, nous avons évalué la productivité des aulnaies par un estimateur dendrométrique indirect : la hauteur dominante du groupe ou du peuplement d'aulnes supposée atteinte à l'âge de 50 ans.

Pour déterminer cet indice de fertilité, nous avons établi un faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante valable en forêt wallonne, considérant que les courbes construites dans d'autres pays n'étaient pas transposables. Les données de base proviennent d'analyses de tiges effectuées au sein de 10 placettes du réseau d'observations, selon la méthode de DUPLAT et TRAN-HA [1986], adaptée à nos conditions de travail. Le résultat obtenu a ensuite été confronté visuellement aux mesures ponctuelles du couple [hauteur dominante, âge] effectuées dans les autres placettes.

Enfin, à partir de ces courbes de fertilité, nous avons pu estimer l'indice de fertilité de chaque placette dendrométrique.

### **5.2.2. Matériel d'étude**

#### ***1° Choix des placettes***

##### **• Ensemble des placettes**

Parmi les 166 placettes du réseau d'observations, 106 ont été retenues pour l'étude de la productivité et de l'autécologie de l'aulne. Les peuplements dont elles proviennent répondent aux conditions d'application de l'indice de fertilité. Il s'agit de groupes ou de petits peuplements de futaie pure<sup>(1)</sup> et équienne (à 10 % près) d'aulne glutineux, au sein desquels on peut estimer que le concept de hauteur dominante est applicable. Leur surface varie de 5 ares à 1 hectare. Des futaies issues de taillis par balivage, ou des mélanges intimes de cépées et d'arbres francs de pied ont toutefois été acceptés, pour autant que leur âge atteigne au moins 30 ans. En effet, selon l'étude de GLAVAC [1972], basée sur des analyses de tiges effectuées en

---

<sup>(1)</sup> Un léger mélange d'essences a été accepté dans l'étage dominé ou codominant (jusqu'à 30 % en surface terrière, évalué au cas par cas sur le terrain).

aulnaies, les différences de croissance entre taillis et futaie s'estompent à partir de 20 ans.

Seuls les peuplements naturels ont été sélectionnés car, très souvent, les arbres issus de plantation présentent une allure très différente (forme, fructification, état sanitaire, ...) justifiant leur mise à l'écart. En effet, selon FRANKE [1994], les plantations passées d'Europe occidentale ont généralement été réalisées à partir de provenances à croissance particulièrement non soutenue et à longévité réduite.

Conformément aux recommandations de CARMEAN [1996], la fourchette d'âges des peuplements a été fixée entre 30 et 80 ans, afin de minimiser les erreurs d'estimation de l'indice de fertilité choisi (hauteur dominante théoriquement atteinte à 50 ans). Quelques aulnaies (8 %) dépassent de 10 % ces limites.

#### • *Analyses de tige*

Parmi les placettes, 10 ont été sélectionnées pour la réalisation d'analyses de tige, et répondent aux critères suivants :

- le groupe d'aulne doit être pur, au moins dans son étage dominant, et d'allure équienne ; celle-ci étant vérifiée à l'aide de quelques comptages de cernes (sur des carottes prélevées à la tarière de PRESSLER, ou sur souche) ;
- le groupe d'aulne doit être d'une étendue minimale de l'ordre de 10 à 20 ares, afin que la notion de hauteur dominante en peuplement équienne puisse être appliquée sans restriction ;
- l'âge du groupe doit être le plus élevé possible, au minimum de 50 ans ;
- la répartition des placettes sélectionnées doit couvrir la gamme de hauteurs dominantes rencontrées dans l'ensemble des peuplements âgés du réseau de placettes ;
- ces placettes doivent se répartir équitablement selon les trois alliances phytosociologiques majeures des peuplements ou groupes d'aulne : l'*Alnion*, l'*Alno-Padion* et le *Quercion*.

## 2° Récolte des données

#### • *Ensemble des placettes*

Pour chacune des placettes, la hauteur dominante et l'âge ont été mesurés afin de pouvoir calculer l'indice de fertilité d'après les courbes établies.

L'âge a été obtenu par comptage des cernes au laboratoire, en priorité sur des plateaux (prélevés lors de coupes) ou sur 2 ou 3 carottes prélevées à la tarière de



PRESSLER. Le cas échéant, une confirmation a été recherchée, soit par comptage sur souche en forêt (lors de coupes), soit auprès du gestionnaire.

La hauteur dominante a été estimée, conformément aux recommandations de CARMEAN [1996], par la moyenne des hauteurs des 2 arbres dominants de la placette (arbres-bordures du peuplement non compris), quelle que soit la surface de celle-ci. Sachant que la surface des placettes se situe généralement entre 2 et 5 ares, cette définition est conforme à celle utilisée dans d'autres études relatives aux feuillus secondaires en ce qui concerne le nombre de bois mesurés (moyenne des hauteurs des 10 plus gros bois à l'hectare, avec un minimum de 2 bois, afin de ne jamais estimer la hauteur dominante à partir d'un seul bois [THIBAUT *et al.*, 1992 ; CLAESSENS *et al.*, à paraître]). Les 2 arbres choisis font partie de l'étage dominant, sont droits et sans défaut de croissance apparent (fourche, cime dépérissante ou cassée,...) et ont un houppier bien développé (« *leading tree* »). Généralement, ces 2 arbres se situent parmi les quelques plus gros bois.

Parallèlement à ces mesures, nous avons aussi procédé à une évaluation de facteurs relatifs aux « aspects sylvicoles » du peuplement, soit :

- l'antécédent cultural de la station,
- l'origine sylvicole du peuplement,
- l'« ambiance forestière » entourant le peuplement,
- le traitement sylvicole actuel.

Ces 4 variables, qui ont été codifiées subjectivement (tableau 5.1), ont été récoltées en vue de préciser les conditions de croissance en hauteur dominante des peuplements. En effet, on peut s'attendre à ce que ces variables influencent la dynamique de la croissance en hauteur des arbres, ce qui rendrait caduque l'utilisation de la notion d'indice de fertilité basé sur la croissance en hauteur dominante.

#### • *Analyses de tige*

Pour réaliser les analyses de tige, nous avons sélectionné les arbres dans chaque placette retenue. Ce choix a souvent été conditionné à l'accord du propriétaire et, le cas échéant, a dû porter sur des arbres délivrés lors de coupes. C'est la raison pour laquelle nous avons souvent été contraints à sélectionner d'autres arbres que les 2 bois qui définissent rigoureusement la hauteur dominante. Nous avons alors choisi 2 bois dont la moyenne des hauteurs totales était comparable à la hauteur dominante.

Tableau 5.1. - Codification des 4 variables relatives aux « aspects sylvicoles » de la placette (les niveaux en italiques ont été considérés incompatibles avec la méthode de l'indice de fertilité).

| Antécédent cultural |                 |
|---------------------|-----------------|
| Code                | Dénomination    |
| 10                  | FORET           |
| 11                  | futaie feuillue |
| 12                  | taillis         |
| 13                  | résineux        |
| 14                  | peupliers       |
| 20                  | AGRICULTURE     |
| 21                  | culture         |
| 22                  | prairie         |
| 30                  | LANDES          |
| 31                  | sèche           |
| 32                  | humide, fange   |
| 33                  | marais          |
| 40                  | AUTRES          |

| Ambiance forestière |                        |
|---------------------|------------------------|
| Code                | Dénomination           |
| 10                  | FORESTIER              |
| 11                  | forestier protégé      |
| 12                  | forestier              |
| 13                  | forestier exposé       |
| 20                  | DE LISIERE             |
| 30                  | AGRICOLE               |
| 31                  | agricole protégé       |
| 32                  | agricole               |
| 33                  | <i>agricole exposé</i> |

| Origine sylvicole de l'aulnaie |                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Code                           | Dénomination                          |
| 10                             | <i>PLANTATION</i>                     |
| 11                             | <i>en plein, pur</i>                  |
| 12                             | <i>en plein, mélangé</i>              |
| 13                             | <i>en sous-étage</i>                  |
| 20                             | NATURELLE                             |
| 21                             | semis-naturel                         |
| 22                             | semis naturel + taillis               |
| 23                             | taillis                               |
| 24                             | <i>réserve de taillis sous futaie</i> |
| 25                             | autre                                 |

| Traitement sylvicole actuel |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Code                        | Dénomination            |
| 10                          | PAS DE TRAITEMENT       |
| 11                          | <i>taillis</i>          |
| 12                          | futaie                  |
| 13                          | taillis + franc de pied |
| 20                          | TRAITEMENT VISIBLE      |
| 21                          | taillis balivé          |
| 22                          | futaie dense            |
| 23                          | futaie claire           |
| 24                          | autre                   |

Dans tous les cas, nous avons sélectionné 2 arbres, si ce n'est pour 3 placettes dans lesquelles nous n'avons pu disposer que d'un seul sujet. Au total, nous avons donc abattu 17 arbres destinés aux analyses de tige, provenant de 10 placettes de production.

Chacun de ces arbres a été découpé en billons à la base de chacun desquels nous avons prélevé un plateau (= rondelle de 2 à 5 cm d'épaisseur) destiné au comptage des cernes. Les hauteurs de prélèvement de ces plateaux s'échelonnent en moyenne tous les 2 m, mais cette distance n'est pas fixée précisément et dépend de contraintes telles que :

- disposer d'une rondelle saine et sans noeud ;
- appréhender des niveaux critiques sur la tige (par exemple : avant et après une fourche importante ou l'intersection d'une branche charpentière ; avant et après une très forte réduction de la circonférence...).

3 niveaux ont toutefois été systématiquement respectés :

- le niveau de la souche, dont la hauteur varie de 0 à 30 cm ;
- le niveau 50 cm ;
- le niveau 130 cm.

Le niveau de prélèvement de chaque plateau a été mesuré sur le terrain, de même que la longueur totale de l'arbre. Les plateaux ont ensuite été préparés pour le comptage des cernes au laboratoire ; ils ont été coupés en 2 et finement rabotés, de manière à disposer de 2 rayons complets passant par la moelle (figure 5.1).

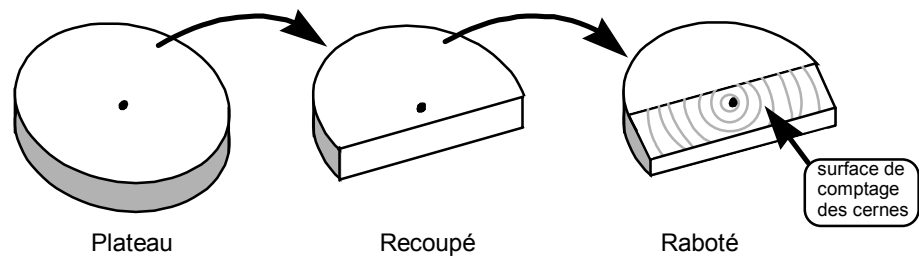


Figure 5.1. - Préparation des plateaux pour le comptage des cernes.

L'âge cambial des plateaux a été déterminé par comptage des cernes au binoculaire. En connaissant les niveaux de prélèvement des plateaux sur la tige, il est ensuite possible de reconstituer la courbe de croissance en hauteur totale de chacun des bois abattus. La figure 5.2 présente l'ensemble des courbes ainsi reconstituées. Un arbre a été rejeté en raison de très nombreuses irrégularités provenant manifestement d'erreurs de comptage des cernes<sup>(2)</sup>.

<sup>(2)</sup> Le bois d'aulne est homogène et, pour certains arbres, la distribution des vaisseaux est très régulière au sein du cerne, tandis que le liseré qui souligne la limite des cernes n'est pas nettement marqué.

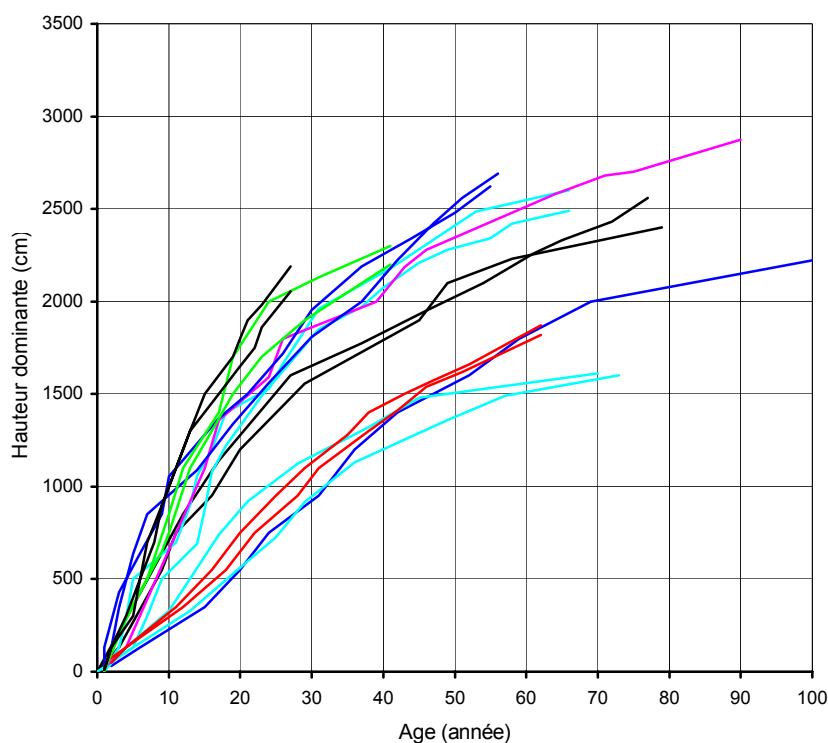


Figure 5.2. - Courbes de croissance en hauteur des arbres dominants retenus.

### 5.2.3. Construction des courbes de fertilité

#### 1° Présentation du jeu de données

La figure 5.2 suggère que l'ensemble des courbes se répartisse en deux faisceaux distincts. L'un, inférieur, contenant 5 courbes bleues et rouges ; l'autre, supérieur, constitué des autres courbes.

D'un point de vue mathématique, nous pouvons ajuster 2 faisceaux de courbes différents. L'analyse montre que cette opération se justifie. Toutefois, l'utilisation de ces faisceaux est problématique. En effet, quel critère déterminera, en pratique, le choix de l'un ou l'autre modèle ? Un élément de réponse pourrait résider dans le type de station correspondant aux peuplements du faisceau inférieur car tous relèvent de stations comparables du plateau ardennais. Mais il existe aussi, au sein

du réseau d'observations, 16 autres placettes dans les mêmes conditions écologiques, dont la moitié se situent au niveau du faisceau supérieur.

Dans ces conditions, nous avons opté pour un modèle général pour l'ensemble du faisceau, tout en étant conscient qu'une étude approfondie pourrait être menée, étayée de nouvelles analyses de tiges, pour déterminer l'influence du type de station sur l'allure de la croissance en hauteur dominante des peuplements. En effet, pour le chêne sessile, DUPLAT et TRAN-HA [1997] ont mis en évidence de telles différences selon les régions de croissance françaises.

## 2° *Elaboration du modèle*

La modélisation d'un faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante s'est inspirée de la méthode de DUPLAT et TRAN-HA [1986].

Les courbes de croissance individuelles des arbres dominants, issues des analyses de tige, ont été homogénéisées pour être constituées d'un ensemble de couples (hauteur x âge) distants de 5 ans, ce qui permet de donner à chaque courbe le même poids lors de l'analyse. Sur base des travaux de DUPLAT et TRAN-HA [1986], nous avons ensuite ajusté à l'ensemble de ces courbes individuelles un modèle contenant 5 paramètres communs à toutes les courbes ( $a_p$ ) et un paramètre libre spécifique à chaque courbe (b).

L'expression mathématique de ce modèle est :

$$HT = (a_1 \text{ Age} + b) \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{\text{Age}}{a_2} \right)^{a_3} \right) \right]^{a_4} + a_5 \text{ Age}$$

où : HT = hauteur totale de l'arbre dominant,  
 $a_p$  = paramètres fixant la forme des courbes, et communs à l'ensemble de celles-ci,  
 b = paramètre libre qui prend une valeur propre pour chaque courbe afin de rendre compte de son niveau dans le faisceau.

Le modèle a été ajusté en une fois à l'ensemble des points des courbes en utilisant une procédure de régression non linéaire, et à l'aide de variables muettes auxiliaires. Le tableau 5.2 montre le résultat de l'ajustement dont le tableau 5.3 évalue la qualité, à l'aide du coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la moyenne des résidus (Rma), de l'écart-type de ces résidus (ECT), et de 2 tests statistiques appelés à vérifier si la moyenne des résidus est nulle (test t) et si la répartition des résidus ne dépend pas de l'âge (test  $\chi^2$ ).

Tableau 5.2. - Valeurs des paramètres  $a_p$  et du paramètre  $b$  pour une hauteur dominante de 19,56 m (moyenne observée).

| Paramètre | Valeur    |
|-----------|-----------|
| $a_1$     | 0,97347   |
| $a_2$     | 8,88479   |
| $a_3$     | 0,80924   |
| $a_4$     | 1,47890   |
| $a_5$     | - 0,86971 |
| $b$       | 16,03653  |

Tableau 5.3. - Valeur des paramètres et des tests statistiques utilisés pour juger de la qualité du modèle.

| Paramètre statistique | Signification  | Valeur |
|-----------------------|--|--------|
| $R^2$                 | Coefficient de détermination   | 0,99   |
| Rma                   | Moyenne des résidus absolus (m)  | 0,02   |
| ECT                   | Ecart-type observé de ces résidus (m)  | 0,80   |
| t                     | Test « t » de conformité à l'hypothèse nulle : $H_0 : Rma = 0$   | n.s    |
| $\chi^2$              | Test $\chi^2$ d'indépendance de la répartition des signes (+ ou -) des résidus au sein des classes d'âge (de 5 en 5 ans) | n.s    |

n.s = non significatif au niveau  $\alpha = 0,005$ .

On peut considérer que les valeurs prises par ces paramètres témoignent d'un bon ajustement, dont on peut par ailleurs aussi évaluer la validité en surimposant les courbes de fertilité obtenues à celles relatives aux analyses de tige, et à l'ensemble des points [hauteur dominante, âge] correspondant aux placettes dendrométriques (figure 5.3). On notera toutefois que ces courbes ne sont valables que jusqu'à l'âge de 80 ans, les données étant trop rares et donc peu significatives au-delà de cette limite (2 analyses de tige).

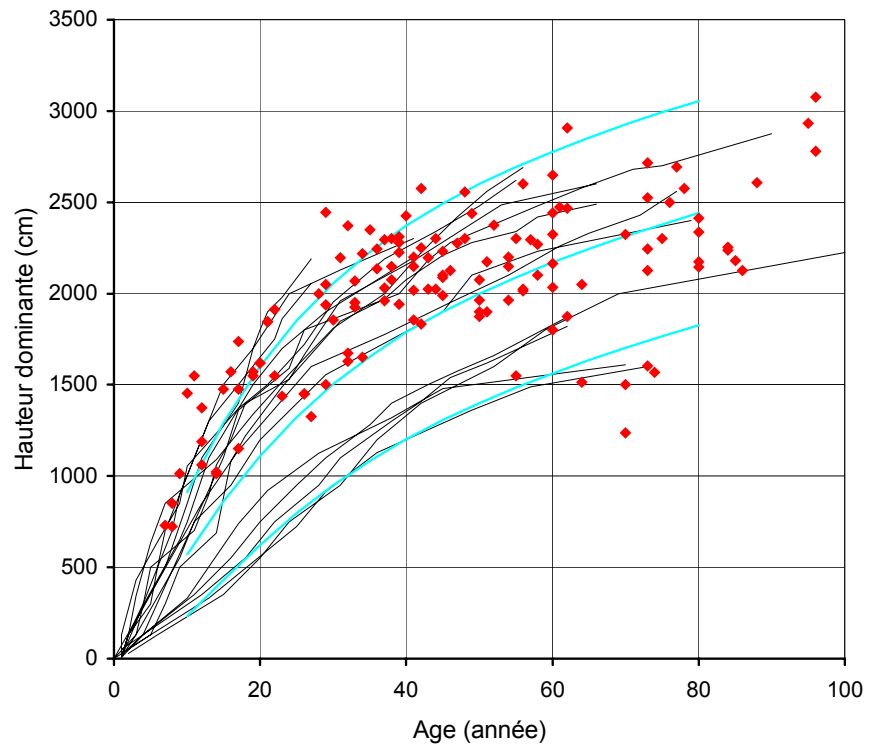


Figure 5.3. - Analyses de tige et couples [hauteur dominante - âge] (points rouges) issus des placettes dendrométriques, avec, en surimposition (traits bleus), les courbes de fertilité extrêmes et moyenne.

#### 5.2.4. Présentation des courbes de fertilité

L'évolution de la hauteur dominante (HDOM) des peuplements d'aulne, représentée par ses arbres dominants, peut s'exprimer au moyen de la relation suivante :

$$\text{HDOM} = (a_1 \text{ Age} + b) \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{\text{Age}}{a_2} \right)^{a_3} \right) \right]^{a_4} + a_5 \text{ Age} .$$

où les coefficients «  $a_p$  » prennent les valeurs du tableau 5.2, et  $b$  prend les valeurs en fonction des hauteurs dominantes fixées à un âge de référence de 50 ans ( $H_{50}$ ), à partir de l'expression suivante :

$$b = \frac{H_{50} - a_5 \text{ Ag } 50}{\left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{50}{a_2}\right)^{a_3}\right)\right]^{a_4}} - a_1 \cdot 50.$$

La figure 5.4 et le tableau 5.4 présentent ces courbes de fertilité, respectivement sous forme graphique et tabulée.

Tableau 5.4. - Evolution de la hauteur dominante des peuplements d'aulne pour des indices de fertilité de 14 et 26 m par pas de 3 m.

| Age<br>(année) | Hauteur dominante (m)            |                                  |                                  |                                  |                                  |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                | classe 5<br>H <sub>50</sub> = 14 | classe 4<br>H <sub>50</sub> = 17 | classe 3<br>H <sub>50</sub> = 20 | classe 2<br>H <sub>50</sub> = 23 | classe 1<br>H <sub>50</sub> = 26 |
| 5              | 0,6                              | 1,6                              | 2,6                              | 3,6                              | 4,6                              |
| 10             | 2,3                              | 4,0                              | 5,7                              | 7,4                              | 9,1                              |
| 15             | 4,3                              | 6,5                              | 8,6                              | 10,8                             | 12,9                             |
| 20             | 6,2                              | 8,7                              | 11,1                             | 13,5                             | 16,0                             |
| 25             | 8,0                              | 10,6                             | 13,2                             | 15,9                             | 18,5                             |
| 30             | 9,5                              | 12,3                             | 15,0                             | 17,8                             | 20,6                             |
| 35             | 10,8                             | 13,7                             | 16,6                             | 19,4                             | 22,3                             |
| 40             | 12,0                             | 14,9                             | 17,9                             | 20,8                             | 23,7                             |
| 45             | 13,1                             | 16,0                             | 19,0                             | 22,0                             | 24,9                             |
| 50             | <b>14,0</b>                      | <b>17,0</b>                      | <b>20,0</b>                      | <b>23,0</b>                      | <b>26,0</b>                      |
| 55             | 14,8                             | 17,9                             | 20,9                             | 23,9                             | 26,9                             |
| 60             | 15,6                             | 18,7                             | 21,7                             | 24,7                             | 27,8                             |
| 65             | 16,3                             | 19,4                             | 22,4                             | 25,5                             | 28,5                             |
| 70             | 17,0                             | 20,1                             | 23,1                             | 26,2                             | 29,2                             |
| 75             | 17,7                             | 20,7                             | 23,8                             | 26,9                             | 29,9                             |
| 80             | 18,3                             | 21,3                             | 24,4                             | 27,5                             | 30,5                             |



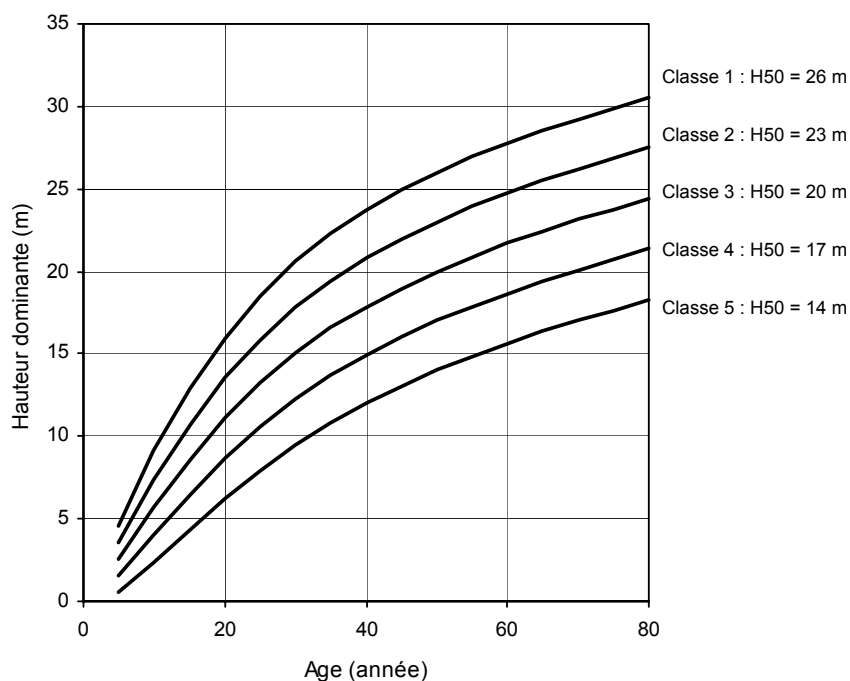


Figure 5.4. - Courbes de fertilité pour les peuplements d'aulne glutineux (5 classes de fertilité caractérisées par des indices  $H_{50}$  de 14 à 26 m de hauteur dominante à 50 ans, par pas de 3 m)

### 5.2.5. Estimation de l'indice de fertilité des placettes d'aulne glutineux

#### 1° Indices de fertilité observés

Les courbes de fertilité étant établies, nous avons pu estimer l'indice de fertilité de chaque placette. Comme le montre le tableau 5.5, la moyenne générale de l'indice de fertilité ( $H_{50}$ ) vaut 21,9 m, mais est fortement variable : les valeurs extrêmes observées sont de 9,4 et 30,9 m (amplitude de 21,5 m) et la moyenne est affectée d'un coefficient de variation de 16 %. Néanmoins, 89 % des peuplements relèvent des classes de fertilité de 1 à 4, soit de 15,5 à 27,5 m de  $H_{50}$  (figure 5.5). On peut donc considérer que les classes 0 (5 % de l'ensemble) et < 4 (6 % de l'ensemble) sont exceptionnelles.

Tableau 5.5. - Statistique descriptive relative à l'indice de fertilité ( $H_{50}$ ) au sein du réseau d'observations.

| Caractéristiques             | Valeur |
|------------------------------|--------|
| Nombre de placettes          | 106    |
| $H_{50}$ moyen (m)           | 21,9   |
| $H_{50}$ minimum (m)         | 9,4    |
| $H_{50}$ maximum (m)         | 30,9   |
| Ecart-type de $H_{50}$ (m)   | 3,5    |
| Coefficient de variation (%) | 15,9   |

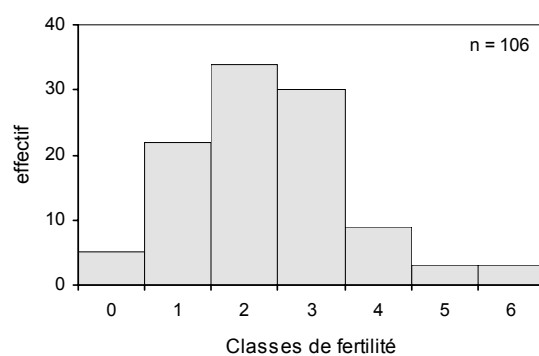


Figure 5.5. - Distribution des placettes selon leur classe de fertilité.

## 2° Validité de l'indice de fertilité

Nous avons effectué une série d'analyses de la variance (tableau 5.6) qui a montré que l'indice de fertilité ne varie pas significativement avec l'état de massif, l'antécédent culturel, l'origine et le traitement sylvicole du peuplement, ce qui tend à confirmer que cet indice est une expression tout à fait acceptable du potentiel de production intrinsèque.

Tableau 5.6. - Influence des variables sylvicoles sur l'indice de fertilité, évaluée par l'analyse de la variance à 1 critère de classification.

| Variables            | Niveau de signification ( $\alpha$ ) |
|----------------------|--------------------------------------|
| Antécédent culturel  | 0,51                                 |
| Ambiance forestière  | 0,12                                 |
| Origine sylvicole    | 0,10                                 |
| Traitement sylvicole | 0,22                                 |

### 5.3. Evaluation du potentiel sylvicole de l'aulne

#### 5.3.1. Méthode retenue

##### 1° La notion de potentiel sylvicole

Afin d'envisager la sylviculture de l'aulne, il convient notamment de déterminer sa *capacité de production* et le *type de produit* s'insérant dans les créneaux valorisateurs du marché du bois.

Le premier chapitre a montré que les produits recherchés sont des grumes de qualité, façonnées individuellement par le sylviculteur (sylviculture « d'arbres ») par un traitement en futaie claire. Les objectifs sylvicoles ont donc tout intérêt à être définis en termes d'« arbres-objectif ».

Par contre, nous ne connaissons pas la capacité de production de l'aulne. En effet, si les courbes de fertilité permettent de classer les stations selon leur niveau de productivité, elles ne renseignent pas directement sur la productivité elle-même tant que l'indice de fertilité n'a pas été relié à des valeurs observées de productivité (table de production ou l'équivalent exprimant un volume total produit ou un accroissement annuel moyen en volume). Mais, pour envisager la construction d'un modèle de production, nous ne possédons pas suffisamment de données dendrométriques car les peuplements d'aulne qui répondent aux conditions d'application d'une telle méthode sont peu fréquents en raison de la rareté et de l'hétérogénéité globale des aulnaies (station, étendue, pureté). A défaut et avec la prudence qui s'impose, nous avons néanmoins entrepris de comparer aux valeurs présentées dans les tables étrangères les quelques mesures de productivité que nous avons réalisées au sein de 33 placettes de production.

Le concept de potentiel sylvicole que nous utiliserons rassemble ces 2 notions. Il est défini à la fois par le volume de bois qu'il est possible de produire (capacité de production) et par le temps nécessaire à l'obtention de grumes de qualité dans le cadre de la futaie claire (objectif sylvicole). En raison des exigences actuelles du marché, nous avons fixé la circonférence des grumes de qualité à 150 cm à 1,3 m du sol.

Ainsi, pour évaluer le potentiel sylvicole de l'aulne, nous avons procédé conjointement à 2 analyses visant à évaluer respectivement sa *capacité de production* et les *objectifs sylvicoles* raisonnablement envisageables.

## **2° Capacité de production**

L'évaluation de la capacité de production de l'aulne a consisté à :

- estimer sa productivité en termes d'accroissements courants en volume bois fort tige<sup>(3)</sup> (faute de disposer d'accroissements annuels moyens), calculés à partir des 33 placettes de production pour lesquelles nous disposons de 2 mesurages espacés de 3 à 6 ans ;
- évaluer, par comparaison, la validité des tables étrangères pour nos peuplements, à partir des caractéristiques dendrométriques observées dans nos placettes (accroissements en circonférence, en surface terrière, en volume, courbes de croissance en hauteur dominante, ...).

## **3° Objectifs sylvicoles**

La définition des objectifs sylvicoles compatibles avec les différents niveaux de fertilité des stations s'est basée sur les accroissements en circonférence dominante observés dans les placettes. En étudiant l'évolution de ces accroissements en fonction de l'indice de fertilité et des conditions de concurrence régnant au sein des placettes, nous avons pu déterminer, par classe de fertilité, le temps minimum nécessaire à la production d'une grume de 150 cm de circonférence à 1,3 m de hauteur. Nous avons considéré que ce temps constituait une évaluation de l'objectif sylvicole envisageable.

### **5.3.2. Evaluation du potentiel de production**

#### **1° Comparaison des courbes de fertilité wallonne et étrangères**

Nous avons consulté les 2 tables de production de l'aulne glutineux établies dans les grandes zones de son aire de distribution (paragraphe 1.2.6) : celle de SOPP [1974] pour la Hongrie et celle de MITSCHERLICH [*in* : SCHOBBER, 1975] pour l'Allemagne du Nord (tableau 1.14 et annexe 3). Pour juger de leur capacité à décrire les peuplements de notre zone d'étude, nous avons comparé graphiquement les modèles de croissance en hauteur des tables avec celui que nous proposons pour la Wallonie. Le modèle que nous avons établi, ainsi que la table de SOPP,

---

<sup>(3)</sup> Dans la suite du texte, les volumes dont il est question sont toujours les volumes bois fort tige (recoupe de 22 cm de circonférence).

considèrent la hauteur dominante, tandis que la table de MITSCHERLICH prend en compte la hauteur moyenne. Pour permettre la comparaison, nous avons effectué une correction, calculée à partir de la relation entre ces 2 hauteurs présentes dans la table de SOPP et validée par des mesures au sein de nos placettes de production.

La figure 5.6 montre clairement que les 3 courbes sont très proches, surtout dans la période 20 - 70 ans. Dans le jeune âge, les courbes wallonnes sont inférieures aux autres, tandis qu'au-delà de 70 ans, les courbes hongroises s'infléchissent plus fortement et s'écartent des 2 autres. Dans la gamme d'utilisation des courbes de fertilité (30 à 80 ans), on peut raisonnablement faire l'hypothèse que la table de production allemande est applicable en Wallonie, au moins pour décrire la croissance en hauteur des aulnaies.

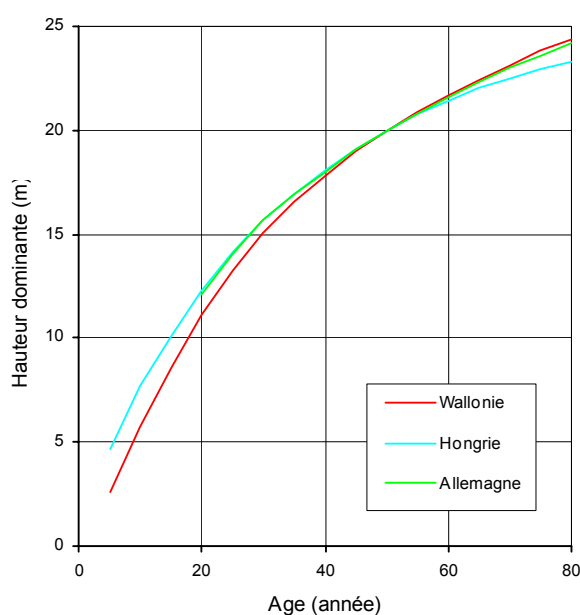


Figure 5.6. - Courbes de croissance en hauteur dominante pour la Wallonie, la Hongrie et l'Allemagne (courbes de fertilité moyennes, caractérisées par des  $H_{50}$  de 20 m).

En ce qui concerne la gamme d'indices de productivité observée, la figure 5.7 montre que :

- les indices de fertilité de la classe centrale de chacun de ces 3 faisceaux de courbes sont très proches ;

- le faisceau hongrois est le plus élevé ; la première classe étant caractérisée par une hauteur dominante de 27,5 m, contre 26,0 et 23,9 m, respectivement pour la Wallonie et l'Allemagne ;
- l'amplitude du faisceau allemand est la plus faible, avec 3 classes de fertilité correspondant à des hauteurs dominantes de 16,2 à 23,9 m à 50 ans.

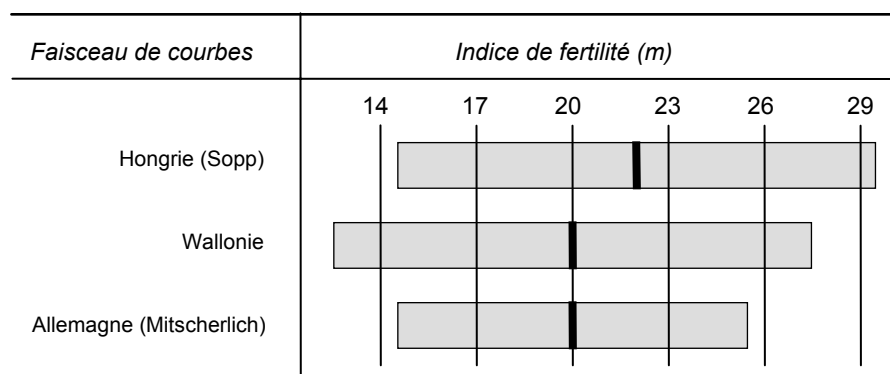


Figure 5.7. - Gammes d'indices de fertilité observées pour les faisceaux de courbes hongrois, wallon et allemand (trait gras : la valeur de  $H_{50}$  pour la classe de fertilité centrale).

## 2° Estimation des accroissements courants en volume des aulnaies wallonnes

Pour estimer les accroissements courants en volume des aulnaies, nous avons rassemblé les données dendrométriques issues des 33 placettes de production que nous avons mesurées 2 fois à 6 ans d'intervalle, voire à 3 ans seulement dans certains cas. Les mesures effectuées dans ces placettes permettent d'estimer le volume à l'hectare lors de chaque inventaire. Pour ce faire, nous avons utilisé le tarif de cubage à une entrée [circonférence à 1,3 m de hauteur<sup>(4)</sup>] de THIBAUT *et al.* [1998], construit pour la Wallonie (annexe 4). Par différence, nous avons obtenu les accroissements périodiques en volume, que nous avons divisés par la longueur de la période pour obtenir les accroissements annuels courants.

<sup>(4)</sup> En ne recourant pas aux tarifs qui prennent en compte la hauteur des arbres, nous éliminons l'erreur due à l'estimation de l'accroissement en hauteur et qui, dans le cas de courtes périodes ou d'arbres très âgés, peut être supérieure à l'accroissement lui-même.

Ces accroissements ont ensuite été ventilés par classe d'âge et par classe de fertilité (tableau 5.7) ce qui permet de se faire une idée plus précise de la productivité de l'aulne dans la zone d'étude.

Tableau 5.7. – Valeurs de l'accroissement annuel courant en volume (en m<sup>3</sup> de bois fort tige/ha/an) observées au sein des 33 placettes de production et présentées en fonction des classes d'âge et de fertilité (les données soulignées ne se basent que sur une seule observation ; les autres sur 2 à 4 observations).

| Classe d'âge (année) | H <sub>50</sub> = 26 m | H <sub>50</sub> = 23 m | H <sub>50</sub> = 20 m |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| < 10                 | 21,0                   | 15,4                   | -                      |
| 10-19                | 16,5                   | 13,9                   | 13,9                   |
| 20-29                | 14,5                   | -                      | -                      |
| 30-39                | <u>11,8</u>            | 10,2                   | -                      |
| 40-49                | <u>8,7</u>             | 9,4                    | 8,1                    |
| 50-59                | -                      | 7,6                    | 6,4                    |
| 60-69                | -                      | 7,6                    | 7,8                    |
| 70-79                | -                      | -                      | 8,1                    |
| > 80                 | -                      | <u>6,1</u>             | -                      |

### 3° Comparaison avec les tables étrangères

Toutefois, pour évaluer les potentialités sylvicoles de l'aulne glutineux, il est d'un grand intérêt de déterminer l'accroissement annuel moyen atteint par les aulnaies à l'âge d'exploitabilité ; ce dernier dépendant lui-même de la fertilité de la station. Nos observations, portant sur 33 placettes réparties dans toutes les classes d'âge et de fertilité étant insuffisantes pour construire les relations nécessaires, nous avons alors eu recours aux tables étrangères.

Pour évaluer la validité de ces tables pour la Wallonie, nous avons mis nos observations en parallèle avec les valeurs correspondantes issues des tables (tableau 5.8). Nous pouvons ainsi comparer, pour les mêmes indices de fertilité (H<sub>50</sub>), les accroissements annuels courants en volume observés à ceux des tables étrangères<sup>(5)</sup>.

Tableau 5.8. - Accroissements annuels courants en volume (en m<sup>3</sup> de bois fort tige/ha/an) selon l'âge et la classe de fertilité des peuplements: comparaison entre nos observations (en rouge) et les valeurs issues des tables hongroise (en bleu) et

<sup>(5)</sup> Les accroissements renseignés dans les tables étrangères ont été obtenus par interpolation entre les classes de fertilité afin de disposer des valeurs correspondant aux indices H<sub>50</sub> de 26, 23 et 20 m.

*allemande (en noir)*. Les valeurs soulignées ne se basent que sur une seule observation ; les autres sur 2 à 4 observations.

| Classes d'âge<br>(année) | Classes de fertilité   |             |                        |            |                         |           |
|--------------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------|-------------------------|-----------|
|                          | H <sub>50</sub> = 26 m |             | H <sub>50</sub> = 23 m |            | H <sub>50</sub> = 20 m  |           |
|                          | I Sopp*                | I Wall.     | II Sopp*<br>I Mitsch.  | II Wall.   | III Sopp*<br>II Mitsch. | III Wall. |
| 10 - 19                  | 13,7<br>-              | 16,5        | 10,5<br>-              | 13,9       | 7,9<br>-                | 13,9      |
| 20 - 29                  | 13,5<br>15,4           | 14,5        | 10,6<br>12,4           | -          | 8,4<br>9,4              | -         |
| 30 - 39                  | 12,7<br>11,2           | <u>11,8</u> | 10,3<br>10,0           | 10,2       | 8,2<br>8,8              | -         |
| 40 - 49                  | 11,5<br>10,1           | <u>8,7</u>  | 9,5<br>8,9             | 9,4        | 7,6<br>7,7              | 8,1       |
| 50 - 59                  | 10,3<br>9,2            | -           | 8,3<br>8,0             | 7,6        | 6,6<br>6,8              | 6,4       |
| 60 - 69                  | 8,5<br>8,4             | -           | 6,9<br>7,3             | 7,6        | 5,5<br>6,2              | 7,8       |
| 70 - 79                  | 6,8<br>7,7             | -           | 5,5<br>6,8             | -          | 4,5<br>5,7              | 8,1       |
| > 80                     | 4,9<br>7,0             | -           | 3,9<br>6,1             | <u>6,1</u> | 3,0<br>5,1              | -         |

\* Les volumes renseignés par SOPP comptabilisent le bois jusqu'à 5 cm de diamètre

Parallèlement, la figure 5.8 propose une représentation graphique de l'évolution de l'accroissement courant en fonction de l'âge pour la classe de fertilité centrale (classe II, la mieux pourvue en observations), avec, en surimposition, l'évolution théorique que proposent les tables allemande et hongroise.

Le tableau 5.8, lacunaire en ce qui concerne les données wallonnes, et la figure 5.8 suscitent 3 commentaires :

- l'accroissement annuel courant en volume suit la même allure dans les 3 régions : le maximum est atteint avant 20 ans, puis la diminution est rapide, surtout dans la table hongroise ;



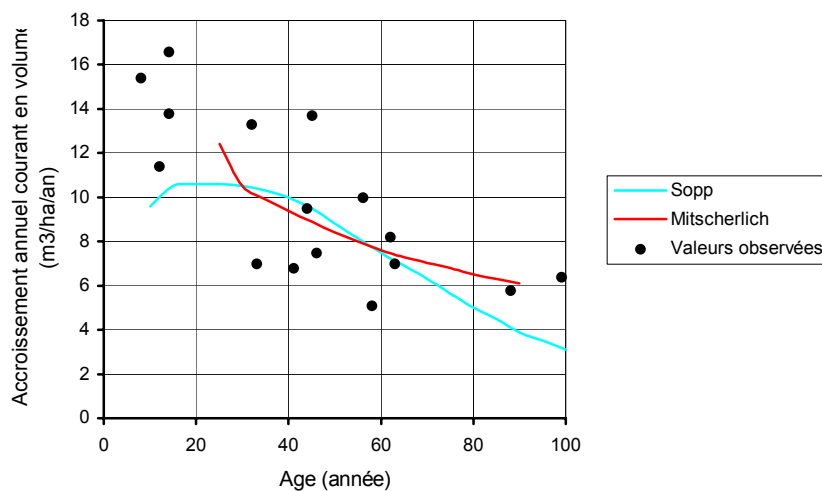


Figure 5.8. – Valeurs observées de l'accroissement annuel courant en volume en fonction de l'âge pour la deuxième classe de fertilité (●) et courbes théoriques correspondantes issues des tables de production existantes.

- comme le montre la figure 5.8, les valeurs des tables allemandes sont les plus proches des valeurs wallonnes, car les tables hongroises donnent des valeurs moins élevées avant 30 ans et après 60 ans ;
- au sein d'une classe d'âge et de fertilité, la variabilité de l'accroissement courant en volume est très importante (figure 5.8), alors que les conditions sylvicoles sont comparables dans toutes les placettes, si l'on se réfère aux surfaces terrières observées et à l'absence presque généralisée d'éclaircies dans les peuplements dans lesquels sont installées les placettes de production.

On peut rechercher une explication à cette variabilité dans la petite taille des placettes de production (1,5 à 3 ares pour la plupart) que nous avons installées dans des petits groupes d'aulne, et qui sont pourtant de la taille maximale qui était envisageable en respectant les conditions d'installation de telles placettes (pureté, absence de bordures, forme régulière, ...). Pour évaluer les caractéristiques dendrométriques ramenées à l'hectare, nous multiplions des valeurs somme toute très ponctuelles par un facteur de l'ordre de 33 à 67, qui amplifie les surdensités ou sous-densités, voire les erreurs de mesure et de comptage.

#### 4° Productivité des aulnaies wallonnes

Tant les courbes de croissance en hauteur dominante que l'évolution de l'accroissement annuel courant en volume permettent d'établir la validité des tables allemandes pour évaluer la productivité des aulnaies wallonnes. Nous pouvons ainsi associer les productivités renseignées par les tables allemandes aux courbes de fertilité que nous avons établies pour la Wallonie (tableau 5.9).

Tableau 5.9. - Productivité des aulnaies wallonnes selon les classes de fertilité, évaluée par l'accroissement annuel moyen en volume à l'âge de 50 ans [AAMvol(50)].

| Classe de fertilité | Indice de fertilité (m) | AAMvol (50) (m <sup>3</sup> /ha.an) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1                   | 26                      | 9,2                                 |
| 2                   | 23                      | 7,8                                 |
| 3                   | 20                      | 6,4                                 |
| 4                   | 17                      | 4,8                                 |
| 5                   | 14                      | 3,3                                 |

### 5.3.3. Objectifs sylvicoles

#### 1° Définition de l'objectif sylvicole

Nous avons vu que le créneau valorisateur de l'aulne est la production de grumes de qualité de 150 cm de circonférence. Cela représente donc l'objectif à atteindre pour la sylviculture de l'essence. Cet objectif sera atteint plus ou moins rapidement, voire jamais, selon la fertilité des stations. Ainsi, nous avons considéré que *l'objectif sylvicole compatible avec une station peut être défini par le temps mis par les aulnes pour atteindre la circonférence moyenne de 150 cm* et ce, dans le cadre d'une sylviculture adaptée telle que nous l'avons définie précédemment : la futaie claire avec des interventions précoces (paragraphe 1.5.4, tableau 1.20).

#### 2° Principe de l'analyse

La définition des objectifs sylvicoles compatibles avec la productivité des stations n'est pas directe. En effet, les peuplements existants n'ayant généralement pas bénéficié d'une sylviculture adéquate, nous ne pouvons nous déterminer directement à partir des mesures récoltées au sein des placettes de production. Dans beaucoup de cas, l'arbre-objectif de 150 cm de circonférence ne sera jamais atteint

car dans les aulnaies équiennes à forte densité (surface terrière > 35 m<sup>2</sup>/ha), nous avons observé que la strate dominante est très homogène et ne favorise pas l'émergence d'arbres super-dominants susceptibles de se développer avec une moindre pression de concurrence. Dans ces conditions, sachant que la croissance en circonférence des dominants est freinée par cette concurrence, les dimensions maximales que les fûts peuvent atteindre avant la limite d'âge de 120 ans, imposée par la faible longévité de l'aulne, sont relativement faibles. Tant nos mesures que les tables de production hongroises, caractérisées par de fortes surfaces terrières, mettent cette particularité des aulnes en évidence.

Pour se forger une idée des accroissements en circonférence potentiels dans le cadre d'une sylviculture adaptée au rythme de croissance de l'aulne et au marché du bois actuel, nous avons dû émettre l'hypothèse suivante :

*Si les peuplements d'aulne observés avaient fait l'objet dès le départ d'une sylviculture adaptée à leur rythme de croissance (interventions précoces en futaie claire) leur circonférence moyenne serait comparable à celle des arbres dominants mesurés dans les peuplements les moins denses du réseau d'observations.*

Ainsi, nous avons pu définir l'objectif sylvicole par le temps mis par les arbres dominants mesurés dans les peuplements les plus clairs pour atteindre 150 cm de circonférence. Nous avons alors étudié l'accroissement en circonférence dominante en fonction des classes de fertilité et des conditions de concurrence. Pour ce faire, nous avons déterminé, pour chaque placette dendrométrique :

- la circonférence dominante [CDOM] ;
- la classe de fertilité [CLASSEFERT] ;
- le « statut de concurrence » des arbres dominants [CONCUR], défini à partir de l'état de concurrence global régnant au sein de la placette et évalué, conformément au tableau 5.10, soit à partir de la surface terrière et de l'âge (dans le cas des 33 placettes de production), soit par une estimation visuelle (dans le cas des points de mesure sans estimation de la surface terrière).

A l'aide d'une régression multiple pas à pas, nous avons ainsi pu établir le modèle suivant, qui montre que la circonférence dominante des arbres [CDOM] dépend essentiellement, par ordre décroissant d'importance :

- de leur âge [AGE],

- de leur statut de concurrence [CONCUR variant de 1 à 4],
- de la classe de fertilité de la station [CLASSEFERT, variant de 1 à 5].

$$\text{CDOM (cm)} = 104,27 + 1,140 \text{ AGE} - 13,64 \text{ CONCUR} - 8,73 \text{ CLASSEFERT}$$

$$R^2 = 0,83$$

$$\text{écart-type résiduel} = 10,8$$

$$n = 191$$

Tableau 5.10. - Critères d'évaluation du statut de concurrence des peuplements [CONCUR].

| Statut de concurrence<br>CONCUR | Critère quantitatif :<br>Surface terrière<br>(m <sup>2</sup> /ha)* | Critères qualitatifs<br>(estimation visuelle) |
|---------------------------------|--|---|
| 1                               | -  | arbres en croissance libre (houppier isolé)   |
| 2                               | < 20   | futaie claire au sens de BOUDRU [1968]        |
| 3                               | 20 - 35  | futaie dense avec traces d'éclaircie          |
| 4                               | > 35   | conditions d'auto-éclaircie**                 |

\* Pour les placettes dendrométriques dans les peuplements de plus de 20 ans.

\*\* auto-éclaircie : éclaircie par mort naturelle des arbres et résultant de la seule concurrence.

### 3° Analyse

Malgré la construction d'un modèle d'estimation de la circonférence dominante relativement précis, nous n'avons pas jugé opportun de l'utiliser pour définir les objectifs sylvicoles, en l'occurrence « Age<sub>150</sub> ». En effet, plusieurs modèles d'une qualité équivalente (R<sup>2</sup> et écart-type résiduel comparables) ont été testés, et chacun donne des valeurs de « Age<sub>150</sub> » nettement différentes.

Nous avons donc procédé à une analyse essentiellement graphique au sein des différentes classes de fertilité.

#### • Evolution générale de la circonférence dominante

Dans un premier temps, nous avons représenté la circonférence dominante des placettes en fonction de l'âge et de l'indice de fertilité (figure 5.9). Dans ce graphique, il apparaît que :

- à un âge donné, l'amplitude des circonférences observées est importante ;
- au sein de chaque classe de fertilité, cette amplitude reste élevée, de telle sorte qu'une même circonférence dominante peut être atteinte au même âge pour des classes de fertilité différentes.

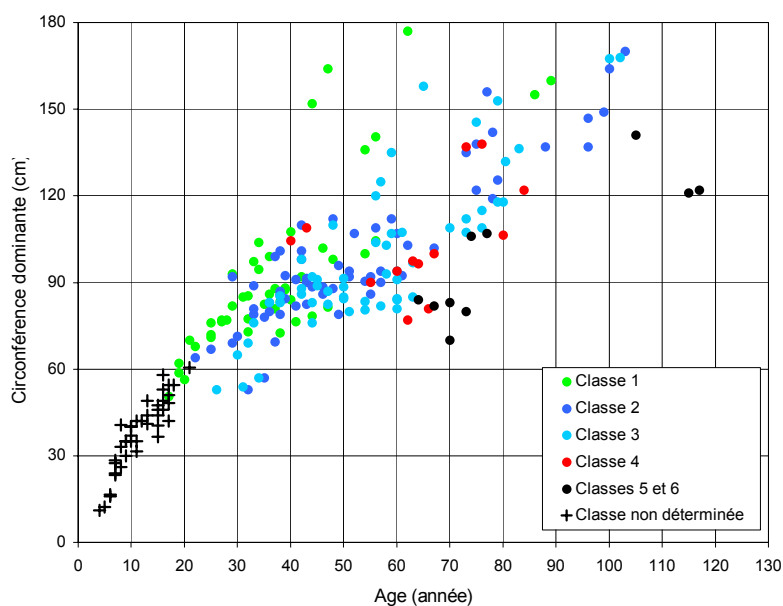


Figure 5.9. – Croissance des aulnaies en circonférence dominante selon les classes de fertilité.

#### • Influence de la concurrence sur la circonférence dominante

Nous avons ensuite analysé la variation de la croissance en circonférence dominante au sein de chacune des classes de fertilité. La figure 5.10, établie à partir des seules placettes de la troisième classe de fertilité, montre de manière évidente que la circonférence dominante atteinte à un âge donné est fortement liée à l'indice de concurrence. Le tableau 5.11 analyse plus en détail la variation de la circonférence dominante au sein de la classe d'âge de 54 à 65 ans, en fonction du statut de concurrence. Il concerne le transect de placettes encadré dans la figure 5.10. On y remarque que, pour des âges comparables, la circonférence dominante varie de 81 à 158 cm.

#### • Détermination des objectifs sylvicoles

Pour déterminer les objectifs sylvicoles compatibles avec chaque classe de fertilité, nous avons alors admis l'hypothèse que l'évolution de la circonférence des arbres de futaie claire [CONCUR = 2] correspond à un objectif envisageable pour la

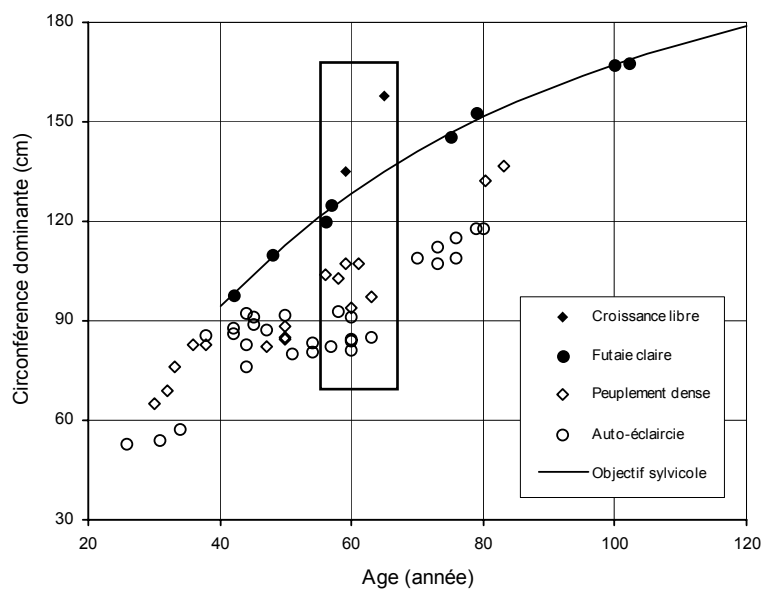


Figure 5.10. - Croissance en circonférence dominante des aulnaies de classe de fertilité 3 selon l'indice de concurrence et évaluation de l'objectif sylvicole (les placettes encadrées sont analysées plus en détail dans le tableau 5.11).

Tableau 5.11. - Circonférences dominantes observées en classe de fertilité 3 pour la classe d'âge de 54 à 65 ans, en fonction du statut de concurrence des arbres dominants.

| Placette | Statut de concurrence | Age (année) | Cdom (cm) | N*   | Gha* (m <sup>2</sup> /ha) |
|----------|-----------------------|-------------|-----------|------|---------------------------|
| 145      | croissance libre      | 65          | 158       | -    | -                         |
| 118      | croissance libre      | 59          | 135       | -    | -                         |
| 70       | futaie claire         | 57          | 125       | -    | -                         |
| 59       | futaie claire         | 56          | 120       | -    | -                         |
| 122      | peuplement dense      | 58          | 103       | -    | -                         |
| 104      | peuplement dense      | 60          | 94        | 700  | 35                        |
| 183      | peuplement dense      | 58          | 93        | -    | -                         |
| 45       | auto-éclaircie        | 54          | 85        | 1250 | 39                        |
| 46       | auto-éclaircie        | 54          | 81        | 1652 | 48                        |
| 103      | auto-éclaircie        | 60          | 81        | 1300 | 36                        |

\* L'absence de valeur correspond à un point de mesure (placette sans surface déterminée).

circonférence moyenne de peuplements éclaircis de manière adéquate. Nous avons établi graphiquement, pour chaque classe de fertilité considérée indépendamment, une courbe de croissance en circonférence dominante à partir des seuls peuplements de futaie claire [CONCUR = 2], qui correspond, selon notre hypothèse, à l'évolution « potentielle » de la circonférence moyenne de peuplements éclaircis dans le cadre d'une sylviculture intensive.

La courbe de la figure 5.10 présente cette démarche dans le cas de la troisième classe de fertilité. Toutefois, les données de base n'étant pas représentées de manière aussi équilibrée pour toutes les classes de fertilité, nous n'avons pas pu construire aussi clairement ce type de courbe pour chacune des classes. Nous avons alors déterminé l'« Age<sub>150</sub> » caractéristique de chaque classe en procédant par comparaison, tout en restant dans les limites imposées par les différents modèles testés. Les objectifs sylvicoles ainsi obtenus sont présentés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12. - Objectifs sylvicoles compatibles avec les classes de fertilité, définis par le temps mis pour obtenir une bille de 150 cm de circonférence à 1,3 m de hauteur dans les conditions de concurrence de la futaie claire [AGE<sub>150</sub>].

| Classes de fertilité | AGE <sub>150</sub> (années) |
|----------------------|-----------------------------|
| 1                    | 55                          |
| 2                    | 65                          |
| 3                    | 80                          |
| 4                    | 100                         |
| 5                    | -                           |

### 5.3.4. Potentiel sylvicole

Si l'on considère l'aulne glutineux en tant qu'essence-objectif de la production de bois, nous pouvons maintenant fixer son potentiel sylvicole. Ainsi, le tableau 5.13 présente, par classe de fertilité, la productivité attendue et le temps de production d'une bille de 150 cm de circonférence à 1,3 m de hauteur, définissant ainsi 3 zones de potentialité :

- la zone A : **production de qualité en cycle court**, où il est possible de produire des grumes de valeur dans un délai de l'ordre de 60 ans et avec une productivité de l'ordre de 8 à 9 m<sup>3</sup>/ha/an ;
- la zone B : **production de qualité en cycle long**, où il est possible de produire ces mêmes grumes en environ 90 ans, avec une productivité de l'ordre de 5 à 6 m<sup>3</sup>/ha/an ;

- la zone C : **production de qualité non envisageable**, où la production de grumes de haute valeur n'est pas réalisable et de surcroît, où la productivité n'est que de l'ordre de 3 m<sup>3</sup>/ha/an.

Tableau 5.13. - Potentialités sylvicoles de l'aulne selon les classes de fertilité, en termes de productivité [accroissements annuels moyens en volume : AAMvol] et d'objectifs sylvicoles [Age150].

| Classes de fertilité | Indices de fertilité H <sub>50</sub> (m) | AAMvol à 50 ans (m <sup>3</sup> /ha/an) | Age150 (années) | AAMvol à 150 cm (m <sup>3</sup> /ha/an) | Zone de potentialités sylvicoles |
|----------------------|--|---|-----------------|---|----------------------------------|
| 1                    | 26                                       | 9,2                                     | 55              | 9,2                                     | A                                |
| 2                    | 23                                       | 7,8                                     | 65              | 7,8                                     | A                                |
| 3                    | 20                                       | 6,4                                     | 80              | 6,3                                     | B                                |
| 4                    | 17                                       | 4,8                                     | 100             | 4,8                                     | B                                |
| 5                    | 14                                       | 3,3                                     | -               | -                                       | C                                |

Ces résultats constituent une des informations que nous avons mises en relation avec les types de station du catalogue. Avec d'autres critères, ils seront à la base du choix des objectifs d'aménagement intégré des forêts hydrophiles.

#### 5.4. Première approche de la productivité stationnelle de l'aulne

##### 5.4.1. Méthode retenue

Le prolongement logique d'une étude de productivité consiste à expliquer l'indice de fertilité et donc les potentialités sylvicoles, à partir des caractéristiques écologiques des stations. A ce stade de notre recherche, nous avons envisagé un modèle factoriel établi par régression multiple dont les variables explicatives sont des variables abiotiques décrivant les stations. Nous avons procédé en 2 étapes.

La première étape, à caractère prospectif, évalue la relation statistique existant entre chaque variable écologique et l'indice de fertilité. Nous avons appliqué l'analyse de la variance à un critère de classification aux variables qualitatives, tandis que nous avons estimé le coefficient de corrélation des variables quantitatives avec l'indice de fertilité.



La deuxième étape a consisté en la construction des modèles proprement dits. Ceux-ci ont été établis par des régressions multiples pas à pas du type :

$$H_{50} = f(\text{variables écologiques}).$$

Afin de prendre en compte le maximum de facteurs explicatifs, nous avons construit des variables binaires à partir des variables qualitatives relatives à la forme d'humus, la texture du sol, le régime phréatique, le système d'alimentation en eau et la classe de drainage. Outre la variable FAM01 qui prend la valeur 1 pour la région famennienne, les variables binaires sont présentées dans le tableau 5.14.

Tableau 5.14. - Définition des variables binaires.

| Variables qualitatives (Code)        | Variables binaires (effectif) |                    |                   |                  |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| <b>Système d'alimentation en eau</b> | <b>AlluE01 (47)</b>           | <b>Sce01 (22)</b>  |                   |                  |
| Pluie (1)                            | 0                             | 0                  |                   |                  |
| Accumulation (2)                     | 0                             | 0                  |                   |                  |
| Source (3)                           | 0                             | 1                  |                   |                  |
| Nappe alluviale (4)                  | 1                             | 0                  |                   |                  |
| <b>Régime phréatique</b>             | <b>Rpper (83)</b>             | <b>Rpress (28)</b> | <b>Rpvar (14)</b> | <b>Rpct (41)</b> |
| Temporaire 7                         | 0                             | 0                  | 1                 | 0                |
| Temporaire 8                         | 0                             | 1                  | 1                 | 0                |
| Permanent 1                          | 1                             | 1                  | 1                 | 0                |
| Permanent 2                          | 1                             | 1                  | 0                 | 0                |
| Permanent 3                          | 1                             | 0                  | 1                 | 0                |
| Permanent 4                          | 1                             | 0                  | 1                 | 1                |
| Permanent 5 et 6                     | 1                             | 0                  | 0                 | 1                |
| <b>Texture du sol</b>                | <b>Sab01 (14)</b>             |                    | <b>Arg01 (20)</b> |                  |
| Sable à limon sableux (1 à 5)        | 1                             |                    | 0                 |                  |
| Argile, argile lourde (7 et 8)       | 0                             |                    | 1                 |                  |
| Autres                               | 0                             |                    | 0                 |                  |
| <b>Classe de drainage</b>            | <b>DREF (32)</b>              |                    | <b>DRG (29)</b>   |                  |
| pseudogley seul (c, d, h, i) (1 à 3) | 0                             |                    | 0                 |                  |
| gley + pseudogley (e, f) (4, 5)      | 1                             |                    | 0                 |                  |
| gley seul (g) (6)                    | 0                             |                    | 1                 |                  |
| <b>Forme d'humus</b>                 | <b>Mull01 (68)</b>            | <b>Anm01 (22)</b>  | <b>Tour01 (4)</b> |                  |
| Mull (100)                           | 1                             | 0                  | 0                 |                  |
| Anmoor (600)                         | 0                             | 1                  | 0                 |                  |
| Tourbe (700)                         | 0                             | 0                  | 1                 |                  |
| Mor, moder, mull moder (200 à 500)   | 0                             | 0                  | 0                 |                  |

## 5.4.2. Résultats

### *1° Analyse prospective*

L'analyse prospective nous a permis d'identifier les variables les plus discriminantes vis-à-vis de la productivité. Parmi les variables quantitatives, l'altitude, la longueur de la période de végétation, l'indice trophique et le pH sont fortement corrélés à l'indice de fertilité (tableau 5.15). Par contre, la profondeur de sol et les variables phréatiques (niveau de crue, d'étiage, battement et permanence de la nappe) n'apparaissent pas en relation (directe) avec l'indice de fertilité.

Tableau 5.15. - Variables continues corrélées à l'indice de fertilité ( $H_{50}$ ). Coefficients de corrélation supérieurs à 0,20 uniquement.

| Variables écologiques | Corrélation avec $H_{50}$ |
|-----------------------|---------------------------|
| Altitude              | - 0,73                    |
| Indice trophique      | 0,65                      |
| Période de végétation | 0,51                      |
| pH                    | 0,46                      |
| Indice de stagnation  | - 0,21                    |

L'analyse de la variance à un critère de classification a aussi mis en évidence la liaison de plusieurs variables avec l'indice de fertilité (tableau 5.16).

Encore une fois, le régime phréatique n'apparaît pas en relation directe avec l'indice de fertilité. Toutefois, des variables qui déterminent ce régime (type de relief, alimentation en eau, texture du sol) ou qui l'indiquent (classe de drainage, type d'humus) sont en bonne relation avec l'indice de fertilité. La matrice de corrélation des variables écologiques (tableau 5.17) permet de se faire une meilleure idée de l'importance de ces corrélations entre variables quantitatives ou binaires. D'autres relations sont aussi évidentes entre variables qualitatives.

Tableau 5.16. - Variables qualitatives en relation avec l'indice de fertilité.

| Variables écologiques      | Rapport de corrélation | Différence maximale entre les moyennes d'indice de fertilité (cm) |
|----------------------------|------------------------|---|
| Région forestière          | 0,66                   | 1486  |
| Type d'humus               | 0,55                   | 1096  |
| Type de relief             | 0,32                   | 522   |
| Géologie du bassin versant | 0,34                   | 598   |
| Classe de drainage         | 0,23                   | 435   |
| Texture du sol (AH)        | 0,18                   | 337   |
| Alimentation en eau        | 0,14                   | 349   |

Tableau 5.17. - Matrice de corrélation des variables écologiques (en gras : corrélations supérieures à 0,25 ; en italiques : corrélations provenant de la construction des variables).

|         | PV10         | fam01       | Altit        | Itroph       | mull01       | anm01        | tourb01      | pH          |
|---------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| fam01   | 0.23         |             |              |              |              |              |              |             |
| Altit   | <b>-0.78</b> | -0.15       |              |              |              |              |              |             |
| Itroph  | <b>0.48</b>  | -0.04       | <b>-0.67</b> |              |              |              |              |             |
| mull01  | 0.23         | 0.10        | <b>-0.35</b> | <b>0.35</b>  |              |              |              |             |
| anm01   | 0.04         | -0.03       | -0.02        | 0.18         | <b>-0.66</b> |              |              |             |
| tourb01 | -0.19        | -0.05       | 0.26         | <b>-0.33</b> | <b>-0.27</b> | -0.10        |              |             |
| pH      | <b>0.47</b>  | -0.03       | <b>-0.56</b> | <b>0.80</b>  | 0.09         | 0.19         | -0.15        |             |
| sable01 | 0.06         | -0.10       | -0.14        | -0.02        | 0.23         | -0.13        | -0.08        | -0.13       |
| argil01 | -0.04        | <b>0.30</b> | 0.18         | -0.18        | 0.11         | <b>-0.25</b> | -0.10        | -0.13       |
| RPperm  | -0.05        | -0.14       | -0.08        | <b>0.25</b>  | -0.02        | 0.18         | 0.09         | 0.20        |
| RPress  | -0.01        | -0.04       | -0.05        | -0.08        | 0.24         | <b>-0.33</b> | -0.13        | -0.14       |
| RPct56  | -0.03        | -0.10       | 0.01         | 0.16         | <b>-0.39</b> | <b>0.57</b>  | 0.24         | <b>0.25</b> |
| RPvar13 | 0.05         | 0.17        | -0.07        | 0.08         | 0.18         | -0.21        | -0.08        | -0.03       |
| Idrain  | 0.07         | 0.20        | 0.02         | 0.04         | -0.24        | 0.21         | 0.20         | 0.15        |
| SystEau | 0.10         | -0.12       | <b>-0.28</b> | <b>0.26</b>  | <b>0.26</b>  | 0.02         | -0.11        | 0.13        |
| alluEau | 0.16         | -0.06       | <b>-0.35</b> | 0.23         | <b>0.43</b>  | -0.19        | -0.18        | 0.14        |
|         | sable01      | argil01     | Rpper        | Rpress       | RPct56       | Rpvar13      | Idrain       | SystEau     |
| argil01 | -0.19        |             |              |              |              |              |              |             |
| RPperm  | 0.11         | -0.13       |              |              |              |              |              |             |
| RPress  | 0.13         | -0.05       | -0.15        |              |              |              |              |             |
| RPct56  | -0.22        | -0.18       | <b>0.37</b>  | <b>-0.53</b> |              |              |              |             |
| RPvar13 | 0.00         | 0.18        | 0.18         | <b>0.32</b>  | <b>-0.34</b> |              |              |             |
| Idrain  | <b>-0.33</b> | 0.12        | -0.23        | <b>-0.35</b> | <b>0.34</b>  | -0.00        |              |             |
| SystEau | 0.19         | -0.15       | <b>0.70</b>  | 0.03         | 0.12         | 0.08         | <b>-0.41</b> |             |
| alluEau | <b>0.27</b>  | -0.10       | <b>0.36</b>  | 0.25         | -0.13        | 0.10         | <b>-0.35</b> | <b>0.82</b> |

## 2° Modèles de productivité stationnelle

Les modèles de productivité stationnelle de type factoriel ont été établis par une régression multiple pas à pas. Le meilleur résultat, « expliquant » 75 % de la variation de l'indice de fertilité à partir de 4 variables, a été obtenu avec la relation suivante :

$$H_{50} = 2498 - 0,00351(\text{Altitude})^2 - 425 \text{ tour01} - 432 \text{ Fam01} + 125 \text{ Mull01}$$

MODELE 1

$R^2 = 0,75$

*Ecart-type résiduel = 197 cm*

où « tour01 », « mull01 » et « fam01 » sont 3 variables binaires qui valent 1 respectivement lorsque l'humus est de type « tourbe », « mull » ou que la placette se situe en Famenne.

Dans cette régression l'altitude, intervenant au carré, explique déjà à elle seule 61 % de la variation de l'indice de fertilité. Nous avons ensuite éliminé l'altitude, de manière à permettre à d'autres variables qui lui sont corrélées d'être sélectionnées. On obtient alors la relation suivante, qui explique encore 66 % de la variation à partir de 6 variables :

$$H_{50} = 136 + 126 \text{ Itroph} + 223 \text{ Mull01} - 486 \text{ tour01} + 11,2 \text{ PV10} \\ - 313 \text{ Fam01} - 149 \text{ Arg01}$$

MODELE 2

$R^2 = 0,66$

*Ecart-type résiduel = 232 cm*

où, outre les variables déjà retenues dans le modèle 1, « Itroph » est l'indice trophique, « PV10 » est la longueur de la période de végétation, et « Arg01 » est une variable binaire qui vaut 1 lorsque la texture de l'horizon humifère est argileuse.

Le retrait de la variable altitude permet donc l'introduction d'une variable climatique et de 2 variables pédologiques qui étaient « masquées » dans le premier modèle par le caractère intégrateur de la variable « altitude », mais qui sont en relation plus directe avec 2 facteurs écologiques (chaleur et alimentation minérale) fortement corrélés à l'altitude (paragraphe 3.2.1).

### 5.4.3. Discussion

Comme cela a été démontré au paragraphe 3.2.1, dans le contexte écologique et spécialement géomorphologique de la Wallonie, les gradients trophique et climatique sont en étroite relation avec le gradient d'altitude. De surcroît, à une échelle plus locale, l'altitude, indicatrice de la position de la station dans la toposéquence, renseigne aussi sur la disponibilité en eau des stations. En clair, de manière schématique, tant à l'échelle régionale qu'à celle d'un bassin versant, lorsque l'altitude augmente :

- la température et la longueur de la période de végétation diminuent ;
- la richesse chimique des sols diminue ;
- l'apport d'eau est moins régulier, en dépit d'une pluviosité plus élevée.

Les modèles factoriels de productivité et l'analyse prospective [notamment, la matrice de corrélation des variables écologiques (tableau 5.17)] permettent bien de se rendre compte de ces interactions. De surcroît, parmi l'infinité théorique de combinaisons de variables écologiques possibles, le territoire étudié, en raison de sa géomorphologie et de sa lithologie, n'en présente qu'une partie. Pour ne citer que quelques exemples, il n'existe pas, en Wallonie, de stations à la fois froides et de richesse chimique élevée ou à la fois alluviales et de haute altitude. L'échantillonnage des stations que nous avons pu réaliser ne peut donc répondre à un plan expérimental équilibré. Dans ces conditions, il ne nous paraît pas réaliste d'identifier les facteurs écologiques directement responsables de la productivité des aulnaies, même en utilisant des régressions plus sophistiquées prenant en compte les interactions entre variables.

En se référant aux articles de LEVY [1973] et surtout de DUFRENE et LEGENDRE [1991], cette constatation n'a pas de quoi surprendre. Toutefois, dans le contexte très local des stations de l'aulnaie, caractérisées par des conditions d'aération du sol très contrastées, dont l'impact déterminant sur la croissance de l'aulne a été mis en évidence par des études expérimentales [GILL, 1975 ; CRAWFORD, 1995], on peut s'étonner de ne pas trouver aisément une relation plus directe entre les régimes phréatiques et la productivité.

Ces considérations nous ont donc amenés à mettre à jour la *structure* des relations entre variables écologiques. Nous ne pourrions en effet analyser la productivité qu'au sein de cette structure, que nous concrétiserons par la construction d'une typologie des stations. Ainsi, à l'issue du chapitre consacré à

cette typologie (chapitre 6), nous reviendrons sur la notion de productivité stationnelle, dans ce nouveau cadre.

Bien que nous ne disposons pas d'un catalogue des stations au sens propre, nous pouvons présager des résultats d'une telle approche en estimant l'indice de fertilité au sein de la classification phytosociologique des forêts belges. Comme le propose GILBERT [1995], nous avons estimé l'indice des différentes unités typologiques par la moyenne des indices observés. En appliquant cette démarche à nos observations, on peut obtenir le modèle typologique suivant (figure 5.11) issu de l'analyse de la variance de l'indice de fertilité selon les associations phytosociologiques de l'aulnaie.

#### *Analysis of Variance on $H_{50}$*

| Source      | DF | SS       | MS     | F     | p     |
|-------------|----|----------|--------|-------|-------|
| association | 8  | 7635386  | 954423 | 12.38 | 0.000 |
| Error       | 89 | 6860507  | 77084  |       |       |
| Total       | 97 | 14495893 |        |       |       |

| Level           | N  | Mean   | StDev | Individual 95% CIs For Mean<br>Based on Pooled StDev |
|-----------------|----|--------|-------|--|
| Betuletum       | 3  | 1201.3 | 262.0 | (---*---)  |
| Alno-Quercet.13 | 13 | 1820.1 | 296.1 | (-*---)  |
| C l Alnetum     | 9  | 2002.2 | 294.3 | (---*---)  |
| Carpinion h     | 5  | 2019.4 | 232.9 | (---*---)  |
| C e Alnetum     | 8  | 2108.3 | 236.6 | (---*---)  |
| C o-Alnetum     | 9  | 2258.6 | 257.7 | (---*---)  |
| C r-Alnetum     | 19 | 2283.6 | 303.4 | (---*---)  |
| Stell-Alnet. 25 | 25 | 2423.3 | 278.9 | (*--)  |
| Carpinion m     | 7  | 2536.3 | 229.0 | (---*---)  |

|                |       |      |      |      |      |
|----------------|-------|------|------|------|------|
| Pooled StDev = | 277.6 | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 |
|----------------|-------|------|------|------|------|

Figure 5.11. - Indice de fertilité selon les associations phytosociologiques.

Le rapport de corrélation est de 52,7 %, tandis que l'écart-type résiduel vaut 278 cm. Cette valeur est à comparer à celle du coefficient de détermination de la relation entre l'altitude et l'indice de fertilité, valant 53,3 %. Ici encore, il apparaît que la typologie phytosociologique est en relation étroite avec l'altitude. En effet, la régression multiple du type :

$$H_{50} = f(\text{altitude, syntaxons}),$$

est caractérisée par un coefficient de détermination de 66,3 %.

## 5.5. Conclusions

L'élaboration de courbes de fertilité locales et l'estimation des accroissements courants en volume au sein des différentes placettes de notre réseau d'observations nous ont permis de mieux connaître l'aulne glutineux et surtout d'évaluer ses potentialités en termes de production de bois.

D'après nos estimations, basées sur l'analyse des accroissements en volume observés dans 33 placettes de production, il s'avère que la productivité des aulnaies wallonnes peut être correctement estimée par les tables de production allemandes. Ainsi, dans les meilleures stations, l'accroissement annuel moyen de l'aulne est de l'ordre de 8 à 9 m<sup>3</sup> de bois fort / ha/an à l'âge d'exploitabilité.

Ensuite, à partir de l'analyse de l'évolution de la circonférence dominante des peuplements, nous avons montré qu'en appliquant aux aulnes une sylviculture adaptée à leur rythme de croissance et à leur tempérament héliophile, il est possible d'envisager la production de grumes de 150 cm de circonférence vers 60 ans. Cet objectif ambitieux par rapport à la situation sylvicole actuelle, mise en évidence par l'inventaire des ressources ligneuses de Wallonie, n'est toutefois pas envisageable dans les stations de moindre fertilité, qui représentent près de la moitié des aulnaies de notre échantillon. Il est donc fondamental d'élaborer les outils qui permettront de déterminer la fertilité des stations.

Nous avons alors proposé des modèles de productivité stationnelle en mettant en relation les indices de fertilité avec les variables du milieu. Ceux-ci ont permis, d'un point de vue pratique, de mettre en évidence la forte influence (indirecte) de l'altitude sur la productivité, mais surtout, d'un point de vue méthodologique, d'attirer l'attention sur la complexité des relations reliant les variables écologiques entre elles et avec l'indice de fertilité. Ainsi, l'interprétation des résultats obtenus a montré l'intérêt d'une analyse plus approfondie de la productivité stationnelle au sein de la structure du jeu de données écologiques qui peut être matérialisée par la construction d'une typologie des stations. Cette étape fait l'objet du chapitre 6.

## Chapitre 5 - Estimation de la productivité et des potentialités sylvicoles de l'aulne glutineux

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Introduction .....                                 | 169 |
| 5.2. Estimation de la productivité des peuplements..... | 170 |
| d'aulne glutineux.....                                  | 170 |
| 5.3. Evaluation du potentiel sylvicole de l'aulne ..... | 182 |
| 5.4. Première approche de la productivité.....          | 195 |
| 5.5. Conclusions .....                                  | 202 |



---

## Chapitre 6

### *Typologie des stations et productivité stationnelle*

---

#### **6.1. Introduction**

L'élaboration de la typologie des stations de l'aulne répond à 2 objectifs majeurs.

Le premier objectif est d'élaborer un outil pratique pour référencer la gestion forestière aux stations. Cet outil se doit donc d'être précis et chargé d'informations pertinentes pour guider les choix des gestionnaires : c'est le catalogue des stations, qui a été développé exclusivement pour l'Ardenne. Il fait l'objet du chapitre suivant (chapitre 7).

Le deuxième objectif est d'élaborer un meilleur support à l'analyse des stations et de la productivité stationnelle de l'aulne glutineux, afin de mieux définir l'autécologie et les potentialités sylvicoles de l'espèce sur l'ensemble de la Wallonie. En effet, nous avons démontré dans le paragraphe 5.4.3 l'intérêt de la démarche typologique dans l'étude de la relation entre les stations et la productivité de l'aulne.

Le texte qui suit est organisé en 7 paragraphes successivement consacrés :

- à la description du matériel d'étude (paragraphe 6.2) ;
- à la méthodologie adoptée pour l'élaboration de la typologie des stations et l'analyse de la productivité stationnelle (paragraphe 6.3) ;
- aux résultats obtenus en termes de typologie (paragraphe 6.4) ;
- à l'évaluation de la productivité stationnelle (paragraphe 6.5) ;
- à l'interprétation des résultats en termes de potentialités sylvicoles des stations (paragraphe 6.6) ;
- à l'interprétation des résultats en termes de facteurs écologiques et d'autécologie de l'aulne glutineux (paragraphe 6.7) ;
- à une discussion relative à l'apport de notre étude à la connaissance et à la gestion de l'aulne et des forêts humides (paragraphe 6.8) ;
- à la conclusion (paragraphe 6.9).

## 6.2. Matériel d'étude

### 6.2.1. Sélection des variables écologiques

Les données de base se composent de 166 placettes qui sont décrites par les 30 variables écologiques présentées dans le paragraphe 4.3 et dans les tableaux 4.22 et 4.23. Cela représente une matrice de 4830 données.

Comme nous l'avons vu, ces 30 variables définissent une infinité de combinaisons possibles, en regard desquelles les 166 stations pourraient paraître dérisoires. Toutefois, il faut tenir compte des considérations suivantes :

- certaines variables sont redondantes, tant elles sont corrélées aux autres ;
- certaines variables n'apportent qu'une information descriptive qui ne nous paraît pas déterminante pour la phase de construction du catalogue ;
- les variables ne sont pas agencées de manière aléatoire ; la géomorphologie et la géologie du territoire étudié limitent les possibilités de combinaisons, comme cela a été discuté au chapitre 3 et au paragraphe 5.4.3.

Les différents traitements préliminaires réalisés dans le cadre de l'analyse de la productivité stationnelle (paragraphe 5.4), ainsi que notre expérience du terrain acquise lors de la récolte des données, nous ont permis d'effectuer des choix de variables ciblés sur la construction du catalogue, et donc de limiter le nombre de variables considérées. Nous avons finalement retenu les 17 variables du tableau 6.1, dont 14 sont des variables binaires relatives à 6 descripteurs du milieu. Ainsi, les données stationnelles prises en compte se distribuent à parts égales entre des descripteurs d'ordre régional, pédologique et hydrologique.

Bien que n'intervenant pas directement dans l'analyse statistique, les autres caractéristiques stationnelles sont aussi considérées car elles sont nécessaires dans la phase ultérieure d'interprétation des résultats. Dans cette phase, la classification phytosociologique qui, par nature, constitue une typologie des stations, sera d'un intérêt particulier.

Tableau 6.1. - Variables retenues pour l'élaboration du catalogue des stations (plus de détails sur ces variables sont disponibles dans le paragraphe 5.4).

| Descripteurs écologiques  | Variables  | Signification  |
|---|--|--|
| <b>Données régionales</b><br>- Altitude<br>- Période de végétation  | ALTIT<br>PV10  | Altitude (m)<br>Période de végétation (jours)  |
| <b>Données locales</b><br><u>. Pédologiques</u><br>- Type d'humus<br><br>- Type d'humus<br>- Acidité (pH)<br><br>- Hydromorphie<br><br>- Texture du sol | MULL01<br>ANM01<br>TOUR01<br><br>ITROPH<br><br>DRG<br>DREF<br>SAB01<br>ARG01 | Mull = 1<br>Anmoor = 1<br>Tourbe = 1<br><br>Indice trophique<br><br>Gley dès la surface = 1<br>Gley plus pseudogley = 1<br>Texture sableuse = 1<br>Texture argileuse = 1 |
| <u>. Hydrologiques</u><br>- Alimentation en eau<br><br>- Texture du sol<br>- Type de relief<br>- Pente<br>- Régime phréatique                           | ALLUE01<br>SCE01<br><br>IDRAIN<br><br>RPTMP<br>RPRESS<br>RPCT<br>RPVAR       | Nappe alluviale = 1<br>Source = 1<br><br>Indice de drainage<br><br>Régimes temporaires = 1<br>Régimes ressuyés = 1<br>Régimes constants = 1<br>Régimes variables = 1     |

## 6.2.2. Sélection des placettes

Pour l'élaboration du catalogue, il est essentiel que chacune des placettes décrites corresponde exactement à une seule station et que chaque station soit caractérisée avec précision par l'ensemble des variables écologiques retenues. D'autre part, nous n'avons pas souhaité inclure dans notre typologie des stations exceptionnelles et artificielles, ainsi que les stations qui sortent totalement du cadre des milieux humides.

Nous avons donc exclu 31 placettes pour les principales raisons suivantes :

- placettes faisant double emploi car établies sur des stations identiques ;
- placettes établies dans des conditions artificielles : plantations sur remblais, boue de dragage, carrières, ... ;
- placettes dont les données stationnelles sont incomplètes ou imprécises, notamment en raison de l'hétérogénéité de la station.

Les données de base sélectionnées pour l'élaboration de la typologie des stations se composent donc de 135 stations décrites par 17 variables qualitatives et quantitatives, soit d'une matrice de 2 295 éléments. Toutefois les autres données, rejetées à ce stade de l'analyse, trouveront leur intérêt lors de l'interprétation des résultats.

### ***6.3. Méthodologie adoptée***

Dans une première étape, afin d'élaborer la typologie, nous avons recherché les possibilités de regroupement des stations par la classification numérique. Ensuite, nous avons fait ressortir la structure du jeu de données par une analyse en composantes principales. Ainsi, les groupes obtenus par la classification ont été décrits et évalués aussi bien à partir des variables initiales que dans l'espace factoriel défini par l'analyse en composantes principales.

Cette évaluation a permis d'arrêter une typologie des stations.

Dans une seconde étape, afin de mieux définir l'autécologie de l'espèce, nous avons analysé la variation de l'indice de fertilité de l'aulne dans les plans factoriels de l'analyse en composantes principales, ainsi qu'au sein de la typologie.

#### **6.3.1. La classification numérique**

Nous avons utilisé la méthode classique de WARD, en progressant par étapes successives, analysant des partitions de plus en plus fines, avant de fixer un nombre de classes définitif de la typologie. Les données, différentes par leurs unités et amplitudes, ont été préalablement standardisées.

### **6.3.2. L'analyse en composantes principales**

L'analyse en composantes principales permet de substituer aux variables écologiques initiales, autant de nouvelles variables indépendantes les unes des autres (les axes factoriels de l'ACP), définies à partir des variables initiales. Généralement, cette transformation permet de condenser la majorité de l'information dans quelques composantes. Cette analyse permet une nouvelle interprétation des données à partir de la relation entre les axes factoriels, que l'on peut considérer comme des nouvelles variables écologiques synthétiques, et les variables écologiques initiales. La position des observations sur les axes factoriels ou encore la proximité des observations entre elles dans l'espace factoriel permettent aussi une analyse nouvelle des données.

### **6.3.3. Interprétation des résultats et définition des types de station**

Cette combinaison des 2 analyses multivariées a été envisagée très tôt dans le cadre de la typologie des stations [BECKER, 1971]. Depuis, elle est couramment appliquée aux catalogues des stations français [BRETHERS, 1989] ou aux types d'habitat américains [MAC NAB, 1996]. En effet, tout l'intérêt de ces méthodes statistiques provient de leur confrontation entre elles et avec l'expérience de terrain.

Ainsi pour construire le catalogue des stations, nous avons observé quelles stations font partie des classes proposées par la classification numérique, quelles sont les caractéristiques moyennes des classes, comment se répartissent les classes dans l'espace des observations défini par les axes factoriels de l'analyse en composantes principales. Puis nous avons comparé les classes obtenues à la typologie existante : la classification phytosociologique.

L'ensemble de ces résultats et de leurs interprétations, confrontés aux hypothèses émises lors de la phase de récolte des données, ont ensuite permis de fixer un nombre de classes déterminé, définies par une série de caractéristiques communes, et représentant des entités cohérentes identifiables sur le terrain : les types de station.

### **6.3.4. Analyse de la productivité stationnelle**

Le chapitre précédent a montré les limites de l'analyse de la productivité stationnelle par une approche factorielle simple. Nous avons donc ré-étudié la

variation de l'indice de fertilité en nous référant à l'espace factoriel défini par l'ACP et aux types de station que nous avons mis en évidence.

## ***6.4. Elaboration de la typologie des stations***

### **6.4.1. Classification numérique**

Afin d'évaluer les possibilités de regroupement des stations, nous avons appliqué la procédure de classification numérique à notre jeu de données. La figure 6.1 présente le dendrogramme de la classification numérique.

Pour arrêter un nombre déterminé de classes, nous avons alors analysé plusieurs partitions. En effet le nombre optimal de classes résulte d'un compromis entre la perte d'information due au regroupement d'observations et la possibilité d'interpréter et de décrire clairement les classes. Dans le cas qui nous concerne, nous avons aussi tenu compte des hypothèses émises sur le terrain lors de la récolte des données.

#### ***1° Partition en 7 classes***

Dans un premier temps, nous avons analysé une partition en 7 classes en nous appuyant sur l'ensemble des 30 variables écologiques (paragraphe 4.5, tableaux 4.22 et 4.23), y compris celles qui n'ont pas participé à la procédure de classification (description topographique complète, assise géologique, etc...). Ainsi, il a été aisé d'interpréter la signification de chacune des classes, que nous avons identifiées par quelques mots clefs évocateurs. Nous avons distingué de cette manière :

- les tourbières oligotrophes (Itroph = 1), situées sur le plateau ardennais (altitude moyenne = 459 m), dans les zones d'apport d'eau mal drainées (Idrain = 3,5) ;
- les marais à anmoor, dont le sol, imbibé d'eau la plus grande partie de l'année avec un très faible étiage (régime phréatique [R.P.] 5 ou 6), est gleyifié jusqu'en surface (classe de drainage g) ;
- les marais à mull, dont le sol un peu mieux ressuyé pendant la période de végétation (R.P. 5) est moins fortement gleyifié (classe de drainage f) ;

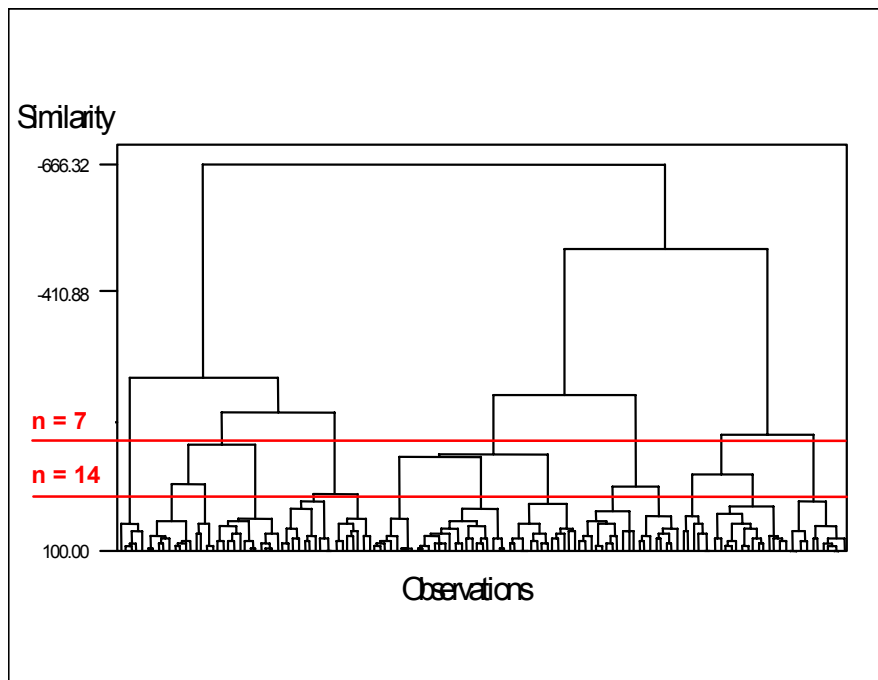


Figure 6.1. – Dendrogramme de la classification numérique (les lignes rouges correspondent aux partitions analysées, respectivement en 7 et 14 classes).

- les alluvions à régime phréatique constant (R.P. 2, 4 voire 5), constitués de terrasses alluviales toujours humides et bien drainées par le cours d'eau (Idrain = 1,8) ;
- les alluvions à étiage prononcé (R.P. 1 ou 3), à texture fréquemment argileuse ;
- les limons éoliens hydromorphes des plateaux limoneux, à régime phréatique temporaire ;
- les « argiles blanches »<sup>(1)</sup>, oligotrophes (Itroph = 1,4) du plateau ardennais (altitude = 419 m), à humus de type mor à mull oligotrophe, et à régime phréatique souvent temporaire.

<sup>(1)</sup> Le terme « argiles blanches » est couramment utilisé pour définir les sols peu structurés, oligotrophes et fortement hydromorphes à horizon blanchi du plateau ardennais. Les argiles blanches sont généralement codées Gix sur la carte des sols de la Belgique.

Tableau 6.2. – Caractéristiques écologiques déterminantes des types de station et syntaxons correspondants.

| Type de station                        | PV 10 (jours) | Altitude moyenne (m) | Alimentation en eau                          | Idrain (1 = drainé) | Itroph (1 = oligotr.) | Type d'humus                | Texture du sol                      | Classe de drainage             | Régime phréatique                    | Syntaxons   |
|--|---------------|----------------------|--|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|
| Tourbière acide                        | 139           | 459                  | Apport 75 %<br>Source 25 %                   | 3,5                 | 1,0                   | Tourbe 100 %                | -                                   | g                              | 6 60 %<br>5 40 %                     | 60 % Vaccinio-Betuletum<br>20 % Alno-Quercetum<br>20 % C.r. - Alnetum   |
| Marais à anmoor                        | 152           | 274                  | Source 48 %<br>Alluv. 32 %<br>Apport 20 %    | 2,7                 | 2,8                   | Anmoor 100 %                | -                                   | g 92 %<br>ef 8 %               | 6 24 %<br>5 64 %<br>4 12 %           | 100 % Alnion (toutes assoc.)  |
| Marais à mull                          | 146           | 283                  | Alluv. 53 %<br>Source 35 %<br>Apport 12 %    | 2,9                 | 3,0                   | Mull 82 %<br>Anmoor 18 %    | lim 76 %<br>argile 24 %             | f 76 %<br>g 24 %               | 5 50 %<br>4 6 %                      | 6 % Cl. Alnetum<br>17 % Stellario-Alnetum<br>6 % Fraxino-Quercetum<br>71 % C.r. + C.e. + C.o. - Alnetum           |
| Alluvions à régime phréatique constant | 154           | 231                  | Alluv. 100 %                                 | 1,8                 | 2,7                   | Mull 100 %                  | lim. 58 %<br>sab 34 %<br>arg. 8 %.  | e, f 89 %<br>b, c, d 11 %      | 2 50 %<br>4 37 %<br>5 13 %           | 66 % Stellario-Alnetum (ttes.sa)<br>18 % Alnion (67 % C.r. - Aln.)<br>10 % Carpinion divers<br>3 % Alno-Quercetum |
| Alluvions à étiage prononcé            | 146           | 282                  | Alluv. 73 %<br>Apport 16 %<br>Source 11 %    | 2,9                 | 3,0                   | Mull 100 %                  | lim 42 %<br>arg. 42 %<br>sabl. 16 % | e, f 53 %<br>h, i 47 %         | 1 63 %<br>3 37 %                     | 54 % Carpinion<br>32 % Stellario-Alnetum<br>7 % Ulmo-Fraxinetum<br>7 % C.e. - Alnetum                             |
| Limons hydromorphes                    | 161           | 218                  | Apport 73 %<br>Précipit. 27 %                | 2,9                 | 2,9                   | Mull 100 %                  | lim 73 %<br>arg. 27 %               | h, i 100 %                     | 7 74 %<br>8 36 %                     | 73 % Carpinion divers<br>18 % Alnion divers<br>9 % Alno-Quercetum   |
| Argiles blanches                       | 141           | 419                  | Apport 70 %<br>Source 20 %<br>Précipit. 10 % | 2,7                 | 1,4                   | Moder mor 65 %<br>Mull 35 % | lim 55 %<br>arg. 35 %<br>sabl. 10 % | h, i 90 %<br>e, f 5 %<br>g 5 % | 7 40 %<br>8 30 %<br>4 20 %<br>1 10 % | 73 % Alno-Quercetum<br>11 % Betulo-Quercetum<br>11 % C.l. - Alnetum<br>5 % C.e. - Alnetum                         |



Le tableau 6.2 présente les caractéristiques écologiques déterminantes des types de station, ainsi que leur caractérisation phytosociologique.

Ces types, qui correspondent à autant de grandes unités écologiques reconnues, sont notamment en bonne concordance, confirmée par le test  $\chi^2$ , avec les syntaxons de niveau supérieur de la classification phytosociologique (tableau 6.3).

Tableau 6.3. – Correspondance entre les types de station et les alliances phytosociologiques, évaluée par la fréquence des alliances (en %) au sein des types.

| Type de station             | Betulion  | Alnion     | Alno –<br>Padion | Carpinion | Quercion  |
|-----------------------------|-----------|------------|------------------|-----------|-----------|
| Tourbière acide             | <b>60</b> | 20         | -                | -         | 20        |
| Marais à anmoor             | -         | <b>100</b> | -                | -         | -         |
| Marais à mull               | -         | <b>77</b>  | 17               | 6         | -         |
| Alluvions à RP constant     | -         | 18         | <b>66</b>        | 10        | 7         |
| Alluvions à étiage prononcé | -         | 7          | <b>39</b>        | <b>54</b> | -         |
| Limons hydromorphes         | -         | 18         | -                | <b>73</b> | 9         |
| Argiles blanches            | -         | 16         | -                | -         | <b>84</b> |

## 2° Partition en 14 classes

Pour procéder à une analyse plus fine, nous avons ensuite envisagé une partition en 14 classes. Analysée de la même manière, celle-ci donne des résultats plus satisfaisants, mettant à jour des entités homogènes bien individualisées qui nous paraissent importantes à décrire dans le cadre d'une typologie des stations. Ainsi, le tableau 6.4 montre que lors du passage de 7 à 14 classes :

- 2 classes n'ont pas été modifiées (tourbières et limons hydromorphes),
- les stations fontinales ont été isolées des autres marais, et ce dans les 2 types de marais,
- parmi les argiles blanches, les stations à nappe temporaire sont séparées de celles à nappe permanente,
- les 2 classes alluviales ont donné lieu à 5 classes différentes, qui se différencient notamment par leurs régimes phréatiques, mais aussi par d'autres caractéristiques écologiques.

La figure 6.3 montre le schéma d'interprétation de la classification, suivant pas à pas les étapes de la procédure de classification pour obtenir les 14 classes. Dans ce même schéma, la classification en 7 classes est représentée par 7 couleurs différentes.

Tableau 6.4. – Partition en 14 classes définie à partir de la partition en 7 classes et mise en relation avec la classification phytosociologique.

| Typologie 7 classes                    | Typologie 14 classes       | Caractéristiques discriminantes                            | Associations  |
|--|----------------------------|--|---|
| Tourbières acides                      |                            |  | 60 % Vaccinio-Betuletum<br>20 % Alnion<br>20 % Alno-Quercetum   |
| Marais à anmoor                        | Hautes altitudes (> 200 m) | IDRAIN = 3,4<br>(Cuvettes, dépressions marginales)         | 67 % C. elongatae–Alnetum<br>11 % C. oleracei–Alnetum<br>22 % C. remotae–Alnetum  |
|  | Basses altitudes (< 100 m) |  | 100 % Alnion sensus-stricto   |
|  | Sources à anmoor           | IDRAIN = 2,0   | 60 % C. laevigatae–Alnetum<br>40 % C. remotae–Alnetum   |
| Marais à mull                          | Sources à mull             | IDRAIN = 1,8<br>(Petites zones de source en versant)       | 40 % C. remotae–A chrysospleinetosum<br>20 % C. laevigatae–A. valerianetosum<br>20 % C. elongatae–Alnetum<br>20 % Fraxino-Quercetum |
|  | Marais à mull              | IDRAIN = 3,3<br>(zones planes non drainées)                | 46 % C. remotae–Alnetum<br>31 % C. laevigatae + C. olerae–Alnetum<br>23 % Stellario–Alnetum   |
| Alluvions à régime phréatique constant | Alluvions humides          | Basse altitude ( $\leq$ 200 m)<br>RP = 5,4                 | 54 % Alnion divers<br>31 % Alno-Padion divers<br>15 % Carpinion   |
|  | Petites rivières           | RP = 4 (2)<br>texture sableuse<br>(hautes vallées)         | 87 % Stellario-Alnetum athyrietosum<br>13 % Polygono-Quercetum  |
|  | Terrasses basses           | RP = 2 (4)<br>(basses vallées)                             | 82 % Stellario-Alnetum (ttes sous-ass.)<br>18 % Carpinion + Alno-Quercetum  |
| Alluvions à étiage prononcé            | Terrasses hautes           | RP = 1<br>(basses vallées)                                 | 50 % Stellario-Alnetum (ttes sous-ass.)<br>13 % Ulmo-fraxinetum<br>37 % Carpinion   |
|  | Plaines argileuses         | Texture argileuse; RP = 3<br>(plaines de Gaume et Famenne) | 80 % Pulmonario-Carpinetum<br>20 % Carici elongatae- Alnetum  |
| Limons hydromorphes                    |                            |  | 83 % Carpinion (toutes sous-assoc.)<br>17 % Alnion  |
| Argiles blanches                       | à nappe temporaire         | RP = 7 ou 8  | 73 % Alno-Quercetum<br>18 % Betulo-Quercetum<br>9 % C. elongatae-Alnetum  |
|  | à nappe permanente         | RP = 4   | 67 % Alno-Quercetum<br>33 % C. laevigatae-Alnetum   |

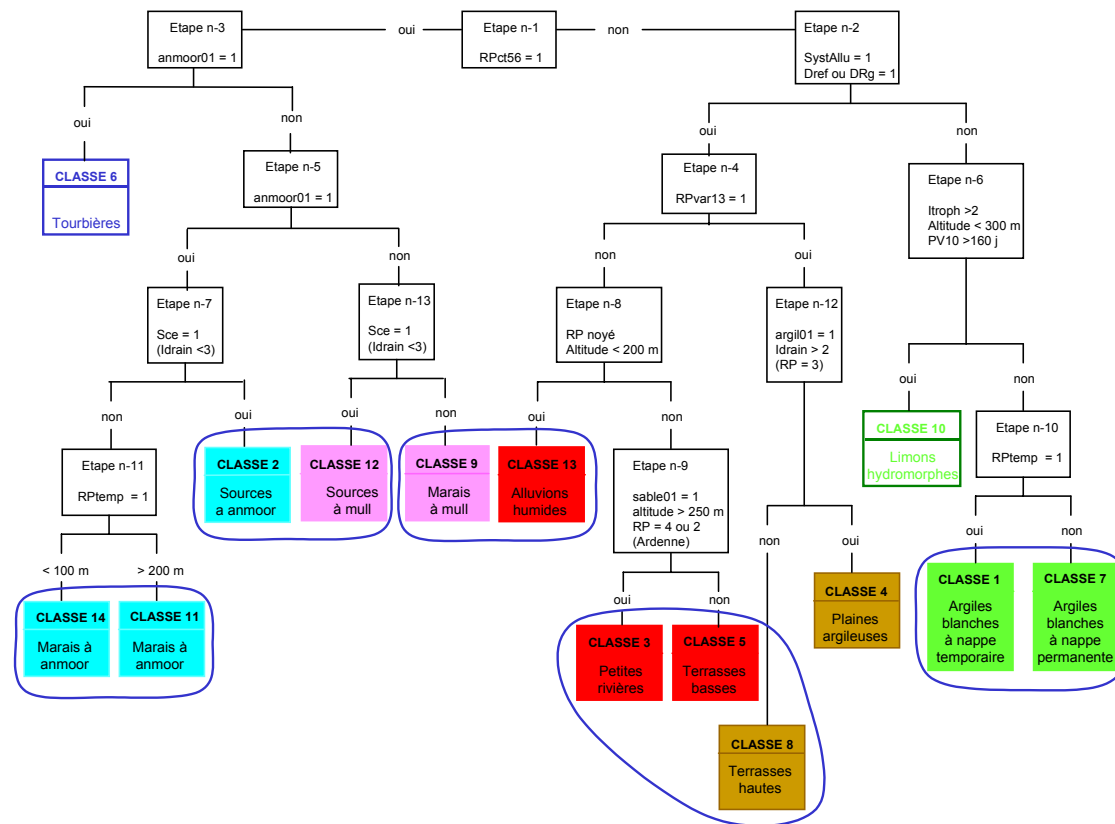


Figure 6.3. – Schéma d'interprétation de la procédure de classification en 14 classes. Les classes de même couleur étaient regroupées lors de la partition en 7 classes ; les classes rassemblées dans un même ensemble ont des caractéristiques écologiques très proches.

Comme le montre le tableau 6.5, cette répartition en 14 classes est aussi en meilleure correspondance avec les niveaux hiérarchiques inférieurs de la classification phytosociologique. Pour cette analyse, nous avons considéré le niveau de la sous-association, puis, au sein de l'*Alnion*, nous avons opéré des regroupements de la manière suivante :

- *Alnion stricto sensu* : sous-associations typiques du
  - *Carici laevigatae* – *Alnetum*,
  - *Carici elongatae* – *Alnetum*,
  - *Cirsio oleracei* – *Alnetum*.
- Sous-associations à tendance alluviale :
  - *Carici remotae* – *Alnetum athyrietosum*,
  - *Cirsio oleracei* – *Alnetum symphytetosum*.
- Sous-associations fontinales :
  - *Carici laevigatae* – *Alnetum valerianetosum*,
  - *Cirsio remotae* – *Alnetum chrysosplenietosum*.

Cette nouvelle partition montre aussi des classes convergentes (figure 6.3) qui, pourtant, faisaient partie de classes différentes dans la partition en 7 classes. C'est le cas des stations fontinales et des stations alluviales.

Ainsi, dans le tableau 6.5 et dans la figure 6.3, des classes convergentes sont rassemblées dans le même encart. Cette convergence, confirmée par la typologie phytosociologique, ouvre des perspectives de regroupement en vue de la typologie définitive, que nous ne fixerons que dans le cas de l'Ardenne et après des analyses complémentaires relatives à la position des classes dans l'espace factoriel de l'analyse en composantes principales (paragraphe 6.4.2) et à la productivité stationnelle (paragraphe 6.5).

#### 6.4.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Parallèlement à la classification numérique, nous avons réalisé une ACP sur la matrice des données écologiques. Le tableau 6.6 montre que les 5 premières composantes contiennent près de 70 % de l'information.

Tableau 6.5. – Correspondance entre la typologie « abiotique » et la classification phytosociologique, mesurée par la fréquence des syntaxons (en %) au sein des types.

| Types de station                               | Syntaxons            |                      |                     |                     |                     |           |                  |                  |
|--|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|------------------|------------------|
|  | Vaccinio - Betuletum | Alnion stricto sensu | Alnion « fontinal » | Alnion « alluvial » | Stellario - Alnetum | Carpinion | Betulo-Quercetum | Alno - Quercetum |
| Tourbière acide                                | 60                   | 20                   | -                   | -                   | -                   | -         | -                | 20               |
| Marais à anmoor (alt.)                         | -                    | 78                   | -                   | -                   | -                   | -         | -                | -                |
| Marais à anmoor (plaines)                      | -                    | 100                  | -                   | -                   | -                   | -         | -                | -                |
| Sources à anmoor                               | -                    | 20                   | 70                  | 10                  | -                   | -         | -                | -                |
| Sources à mull                                 | -                    | 20                   | 60                  | -                   | -                   | 20        | -                | -                |
| Marais à mull                                  | -                    | 31                   | -                   | 46                  | 23                  | -         | -                | -                |
| Alluvions humides                              | -                    | 8                    | -                   | 46                  | 31                  | 15        | -                | -                |
| Petites rivières                               | -                    | -                    | -                   | -                   | 87                  | -         | -                | 13               |
| Terrasses basses                               | -                    | -                    | -                   | -                   | 82                  | 9         | -                | 9                |
| Terrasses hautes                               | -                    | -                    | -                   | -                   | 63                  | 37        | -                | -                |
| Plaines argileuses                             | -                    | 20                   | -                   | -                   | -                   | 80        | -                | -                |
| Limons hydromorphes                            | -                    | 18                   | -                   | -                   | -                   | 73        | 9                | -                |
| Argiles blanches à nappe phréatique temporaire | -                    | 9                    | -                   | -                   | -                   | -         | 18               | 73               |
| Argiles blanches à nappe phréatique permanente | -                    | 33                   | -                   | -                   | -                   | -         | -                | 63               |

### 1° Signification écologique des composantes

La signification écologique de ces composantes peut être interprétée par rapport aux variables initiales à partir des coefficients de corrélation entre les composantes et les variables initiales (tableau 6.7). Toutefois, cette opération est d'autant plus difficile que la proportion d'information que comporte la composante est faible. Dans le cas qui nous concerne, nous n'avons trouvé une signification claire que pour 4 des 5 premières composantes, tandis que les suivantes, qui

contiennent chacune moins de 5 % de l'information, sont plus complexes à interpréter.

Tableau 6.6. –Valeur propre de chaque composante principale (ou axes de l'ACP) et proportion d'information qu'elle contient.

| Principal Component Analysis            |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eigenanalysis of the Correlation Matrix |        |        |        |        |        |        |
| Eigenvalue                              | 4.3020 | 2.9880 | 1.7807 | 1.3376 | 1.3017 | 0.9251 |
| Proportion                              | 0.253  | 0.176  | 0.105  | 0.079  | 0.07   | 0.054  |
| Cumulative                              | 0.253  | 0.429  | 0.534  | 0.612  | 0.689  | 0.743  |
| Eigenvalue                              | 0.8741 | 0.8317 | 0.6136 | 0.5400 | 0.3899 | 0.3382 |
| Proportion                              | 0.051  | 0.049  | 0.036  | 0.032  | 0.023  | 0.020  |
| Cumulative                              | 0.795  | 0.844  | 0.880  | 0.911  | 0.934  | 0.954  |
| Eigenvalue                              | 0.2802 | 0.1554 | 0.1421 | 0.1142 | 0.0852 |        |
| Proportion                              | 0.016  | 0.009  | 0.008  | 0.007  | 0.005  |        |
| Cumulative                              | 0.971  | 0.980  | 0.988  | 0.995  | 1.000  |        |

Pour bien visualiser la signification des composantes et la structure de l'espace des variables qu'elles mettent en évidence, nous nous sommes référés aux valeurs des corrélations entre les variables initiales et les axes (tableau 6.7) qui sont graphiquement illustrées par les cercles de corrélation (figures 6.4 et 6.5).

#### • Signification de l'axe 1

Le vecteur des corrélations des variables initiales à l'axe 1 (PC1 dans le tableau 6.7) oppose nettement (corrélations supérieures à 0,6 en valeur absolue) les variables :

- DRg (classe de drainage « g »),
- anmoor01 (humus de type « anmoor »),
- RPct56 (régime phréatique de type permanent, peu variable et noyé) ;

et dans une moindre mesure :

- altitude,
- Sce (alimentation en eau par une source),

qui lui sont négativement corrélées, aux variables :

Tableau 6.7. – Matrice de corrélation des variables initiales aux 5 premiers axes de l'espace factoriel.

| Variable                           | symbole  | Composantes |        |        |        |        |
|------------------------------------|----------|-------------|--------|--------|--------|--------|
|                                    |          | PC1         | PC2    | PC3    | PC4    | PC5    |
| Période de végétation              | PV10     | 0,368       | 0,557  | -0,484 | 0,109  | 0,042  |
| Altitude                           | Altitude | -0,473      | -0,682 | 0,369  | -0,075 | -0,041 |
| Humus de type mull                 | mull01   | 0,803       | -0,072 | -0,076 | -0,101 | -0,030 |
| Humus de type anmoor               | anmoor01 | -0,642      | 0,542  | -0,051 | -0,034 | 0,247  |
| Humus de type tourbe               | tourbe01 | -0,354      | -0,181 | 0,279  | 0,222  | -0,574 |
| Indice trophique (1=oligotrophe)   | ltroph   | 0,341       | 0,651  | -0,308 | -0,223 | 0,158  |
| Classe de drainage « g »           | DRg      | -0,800      | 0,354  | 0,021  | -0,054 | 0,021  |
| Classe de drainage « e ou f »      | Dref     | 0,603       | 0,317  | 0,427  | 0,023  | -0,209 |
| Texture sableuse                   | sable01  | 0,336       | 0,254  | 0,303  | 0,341  | 0,170  |
| Texture argileuse                  | argil01  | 0,100       | -0,397 | -0,285 | -0,543 | -0,181 |
| Alimentation en eau : alluviale    | SystAllu | 0,600       | 0,429  | 0,317  | -0,038 | -0,277 |
| Alimentation en eau : source       | Sce      | -0,542      | 0,012  | 0,217  | -0,380 | 0,489  |
| Indice de drainage (1=bien drainé) | ldrain   | -0,316      | 0,020  | -0,607 | -0,089 | -0,556 |
| Rég. phréat. temporaires           | Rptemp   | 0,026       | -0,582 | -0,596 | 0,426  | 0,193  |
| Rég. phréat. ressuyés              | Rpress   | 0,528       | -0,377 | 0,005  | 0,031  | 0,240  |
| Rég. phréat. de type 5 ou 6        | RPct56   | -0,604      | 0,572  | -0,006 | -0,025 | -0,231 |
| Rég. phréat. de type 1 ou 3        | RPvar13  | 0,345       | -0,135 | 0,047  | -0,677 | -0,060 |

- mull01 (humus de type « mull »),
- Dref (classe de drainage « e » ou « f »),
- SystAllu (alimentation en eau par la nappe alluviale) ;

et dans une moindre mesure :

- RPress (régime phréatique de type «ressuyé»),

qui lui sont corrélées positivement.

On peut donc interpréter le premier axe comme opposant les stations à caractère « alluvial » aux stations « marécageuses », ce qui peut se confirmer en observant les corrélations, plus faibles, des autres variables à cet axe.

#### • Signification de l'axe 2

Le même type d'analyse montre que le deuxième axe oppose le régime phréatique temporaire (Rptemp) et l'altitude qui lui sont corrélés négativement à tout

ce qui est caractéristique des stations à régime phréatique permanent (RPct56, SystAllu, DRg, Dref, anmoor01), ainsi qu'aux longues périodes de végétation (PV10) et aux indices trophiques (Itroph) élevés qui lui sont corrélés positivement.

### • *Signification de l'axe 3*

La signification de l'axe 3 est moins nette, ses corrélations aux variables initiales étant presque toutes inférieures à 0,5 en valeur absolue. Il ressort toutefois qu'il oppose les variables :

- Rptemp (régime phréatique temporaire),
- Idrain (indice de drainage),
- PV10 (longueur de la période de végétation),

et dans une moindre mesure (corrélations de l'ordre de  $-0,3$ )

- Itroph (indice trophique),
- argil01 (texture argileuse),

auxquelles il est corrélé négativement, aux variables :

- Dref (classe de drainage e, f),
- Altitude
- Syst Alluv (alimentation en eau de type « alluvial »)

auxquelles il est corrélé positivement (corrélations de l'ordre de  $-0,4$ ).

Comme l'axe 2, il oppose donc aussi, mais moins nettement, les régimes phréatiques permanents aux temporaires, mais cette fois, la période de végétation et l'indice trophique lui sont corrélés en sens inverse par rapport au cas précédent.

### • *Signification des axes de degré inférieur*

La signification des axes de degré inférieur devient difficile à interpréter, même si des corrélations assez fortes ( $> 0,5$ ) peuvent exister entre ces axes et certaines variables initiales. On peut toutefois observer que l'axe 5 oppose les stations tourbeuses mal drainées aux sources et à l'anmoor.

Dans la suite de notre analyse, nous nous attacherons plus particulièrement aux 4 axes que nous pouvons interpréter aisément (PC 1, 2, 3 et 5) et qui, conformément au tableau 6.6, contiennent 60 % de l'information.

## 2° *Structuration de l'espace factoriel*

Les figures 6.4 et 6.5 permettent de mieux visualiser la structure des données. Elles présentent les cercles de corrélation successivement dans les plans Z1



x Z2 et Z2 x Z3, c'est-à-dire, les corrélations des variables initiales aux axes pris en compte.

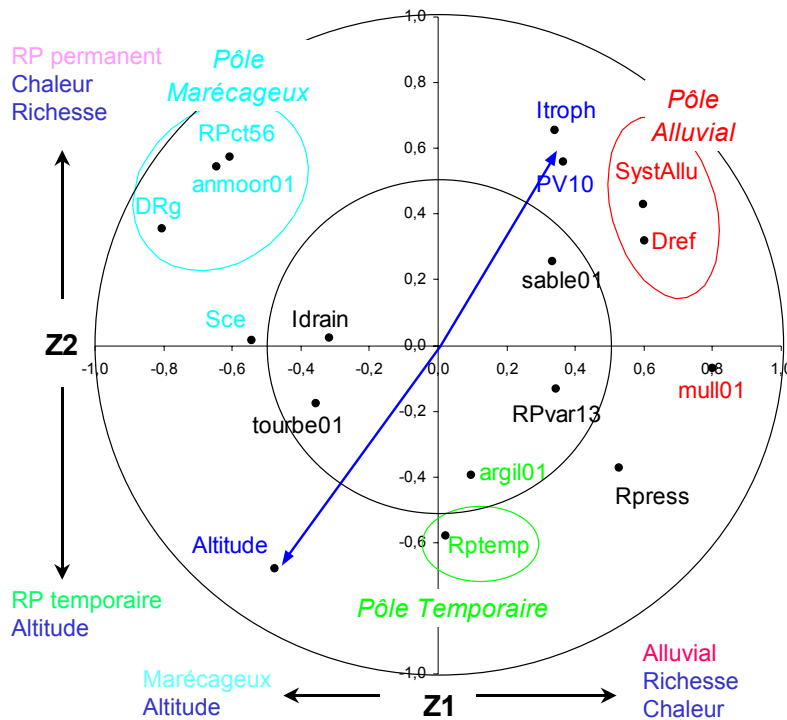


Figure 6.4. – Cercle de corrélation (plan Z1 x Z2).

• Plan Z1 x Z2

Le plan défini par les 2 premiers axes Z1 et Z2 contient 43 % de l'information. L'axe 1 opposant les stations alluviales aux marécageuses et l'axe 2 les régimes permanents aux temporaires, le plan fait nettement apparaître 3 pôles (figure 6.4) :

- le pôle marécageux (en bleu),
- le pôle alluvial (en rouge),
- le pôle temporaire (en vert).

De surcroît, une opposition entre l'altitude et la longueur de la période de végétation se superpose à la structuration de l'espace en 3 pôles. Les stations riches et les longues périodes de végétation seront «attirées» vers les régimes permanents et plus particulièrement vers le pôle alluvial.

### • Plan Z1 x Z3

Une situation comparable est mise en évidence dans le plan Z1 x Z3, à cette différence près que l'opposition entre l'altitude et la longueur de la période de végétation est cette fois inversée : les stations riches, les longues périodes de végétation (et donc les basses altitudes) seront « attirées » vers le pôle temporaire.

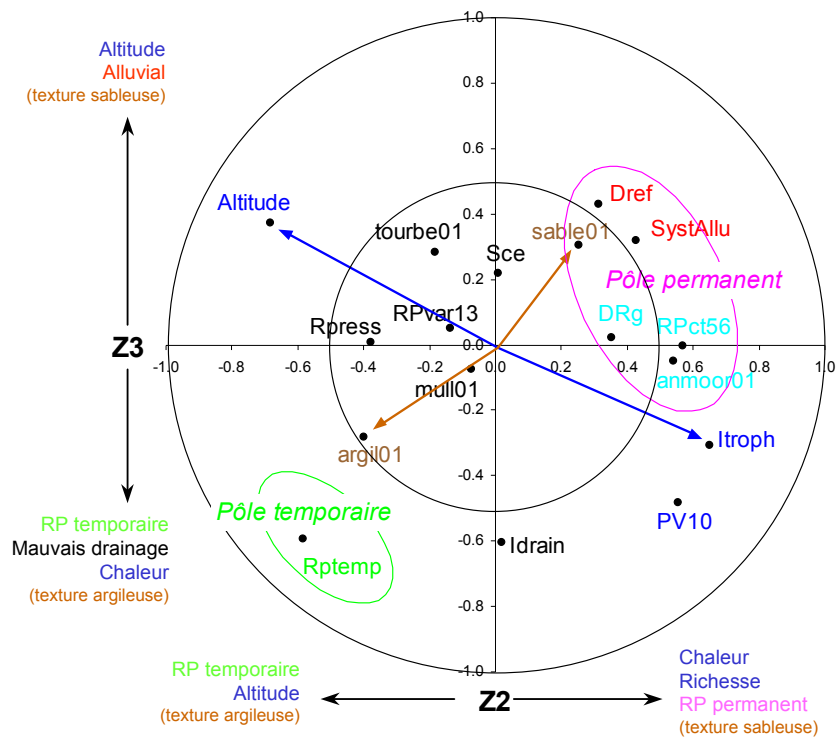


Figure 6.5. – Cercle de corrélation (plan Z2 x Z3).

### • Plan Z2 x Z3

Le plan Z2 x Z3 met en évidence 2 gradients perpendiculaires : les régimes phréatiques temporaires et permanents s'opposent selon une direction, oblique dans le plan Z2 x Z3, tandis que l'altitude et la longueur de la période de végétation s'opposent dans la direction plus ou moins perpendiculaire. C'est aussi dans ce plan que les textures sableuse et argileuse s'opposent le plus nettement (figure 6.5). Le

plan définit ainsi un pôle temporaire et un pôle permanent où se rapprochent les pôles marécageux et alluvial mis en évidence dans le plan Z1 x Z2.

### **6.4.3. Interprétation des analyses**

Sur base de l'ensemble des données, la classification numérique a permis de rassembler les 135 stations en 14 classes plus ou moins homogènes. D'autre part, l'analyse en composantes principales a mis à jour une structure dans l'ensemble des données écologiques, qui constitue une nouvelle base d'interprétation de la signification des groupes.

Nous avons envisagé l'interprétation de ces analyses en 3 étapes. La première a consisté à situer les 7 classes de la typologie dans l'espace factoriel défini par l'ACP. La deuxième a affiné l'analyse en passant aux 14 classes identifiées. La troisième a confronté, toujours au sein de l'espace factoriel, la typologie abiotique obtenue à la classification phytosociologique.

#### ***1° Distribution des stations et des 7 classes dans l'espace factoriel.***

La figure 6.6 représente la projection des stations sur le plan factoriel Z1 x Z2. D'emblée, on peut remarquer 3 zones de concentration de points, qui correspondent aux 3 pôles mis en évidence par l'analyse du cercle de corrélation de la figure 6.4 (pôles temporaire, marécageux et alluvial).

Ensuite, en indiquant pour chaque station son appartenance aux classes de la classification numérique, nous avons visualisé la position des classes au sein du plan factoriel.

Excepté dans le cas des 2 classes alluviales, les classes ne se chevauchent pas. Toutefois, le passage d'un type à l'autre est progressif. La visualisation des étapes du regroupement par la classification numérique (notées n-i sur la figure 6.6) montre que les 3 pôles ne sont rassemblés que lors des 2 dernières étapes au cours desquelles la perte d'information est maximale (figure 6.1).

#### ***2° Cas de la partition en 14 classes***

Les 14 classes de la partition ne sont plus si nettement isolées dans le plan Z1 x Z2. Notamment, au sein du pôle alluvial, les classes 3, 4, 5, 8 et 10 se chevauchent. Nous aurons recours aux autres plans factoriels pour mieux interpréter leur localisation.

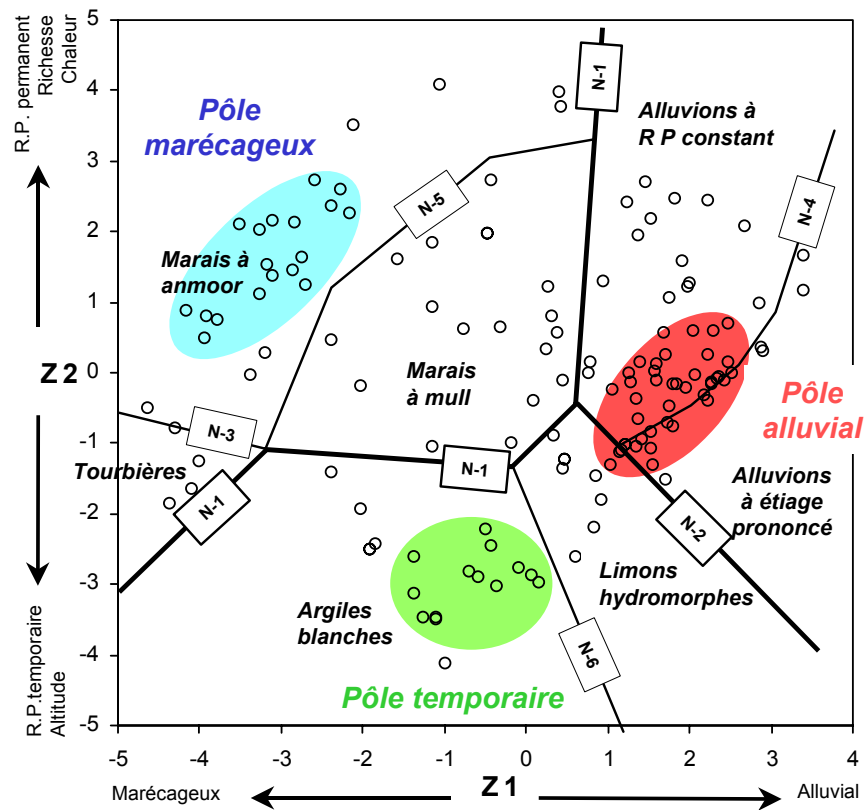


Figure 6.6. – Position des stations (○) et des 7 classes au sein du plan factoriel Z1 x Z2 (explications dans le texte).

• **Observation des stations et des classes dans le plan factoriel Z1 x Z2**

La figure 6.7 montre la structure générale de l'ensemble des observations. Ainsi, on y observe que :

- les classes 2, 6, 11 et 14, caractérisées par un humus de type anmoor ou tourbe, et un régime phréatique de type plus ou moins constamment noyé (régimes phréatiques 5 et 6) occupent le pôle «marécageux» ; elles se distinguent entre elles par le trophisme et l'altitude selon l'axe Z2. Nous étudierons plus en détail le pôle marécageux dans le plan factoriel Z1 x Z5.



• **Observation des stations et des classes dans le plan factoriel Z2 x Z3**

Bien que contenant seulement 28 % de l'information, le plan factoriel Z2 x Z3 permet d'interpréter la signification de quelques classes, notamment parce que ce plan oppose clairement les régimes temporaires aux permanents et les textures argileuses aux sableuses. Ainsi, on y observe que (figure 6.8) :

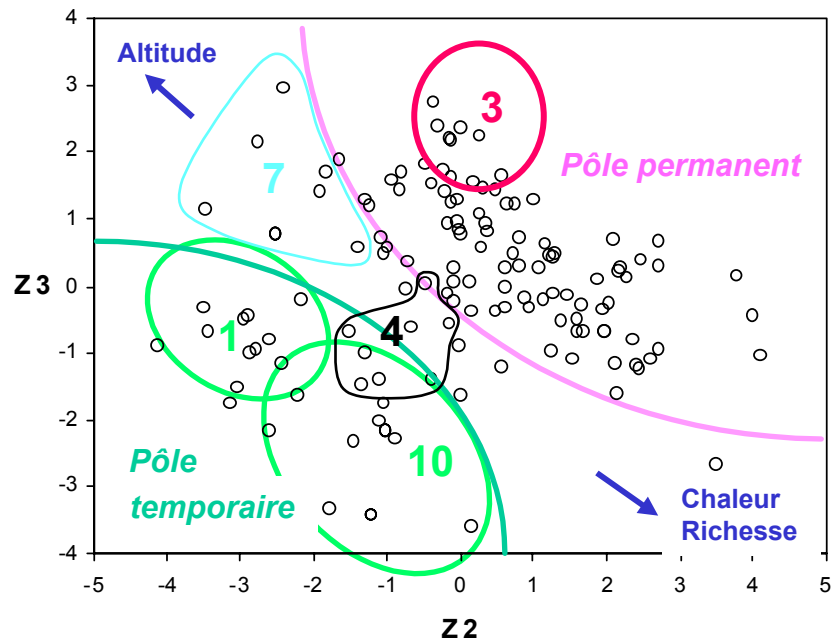


Figure 6.8. – Position des stations et des classes au sein du plan Z2 x Z3.

- les 2 types de station du pôle temporaire se distinguent clairement par leur position par rapport aux gradients trophique et altitudinal.
  - . La classe 1 rassemble les stations plutôt oligotrophes et situées en altitude (les « argiles blanches » à nappe temporaire).
  - . La classe 10, des stations plutôt mésotrophes et de basse altitude (les limons hydromorphes).
- la transition entre les pôles temporaire et permanent est assurée par 2 classes selon ce même gradient « altitudino-trophique » :
  - . la classe 7 (argiles blanches à nappe permanente) du côté des hautes altitudes,

- . la classe 4 (plaines argileuses) du côté des basses altitudes ;
- au sein du pôle permanent, la classe 3 (petites rivières) s'isole des autres classes. Sa position au sein du plan factoriel provient de la conjonction originale de 4 éléments :
  - . l'altitude élevée,
  - . le caractère méso-oligotrophe des stations,
  - . l'alimentation en eau permanente et de type alluvial,
  - . la texture sableuse des sols.

• **Observations des stations et des classes dans le plan Z1 x Z5**

Le plan factoriel Z1 x Z5 permet une bonne analyse du pôle marécageux (figure 6.9). Il sépare en effet très nettement les tourbières acides (classe 6) des sources à anmoor généralement bien drainées (classe 2), isolant ainsi les marais proprement dits (classe 11) mélangés, dans ce plan, aux stations de la classe 7 et à certaines stations de la classe 12.

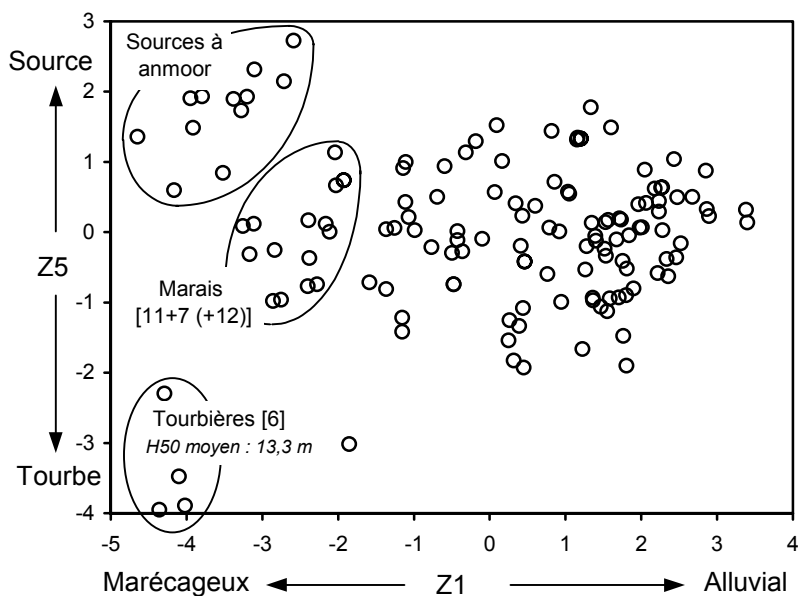


Figure 6.9. – Position des stations et des classes au sein du plan Z1 x Z5.

## 2° Confrontation des classes à la typologie phytosociologique

Les figures 6.10 et 6.11 présentent les stations respectivement dans les espaces factoriels Z1 x Z2 et Z2 x Z3 selon leur appartenance aux syntaxons et aux groupes issus de la classification numérique.

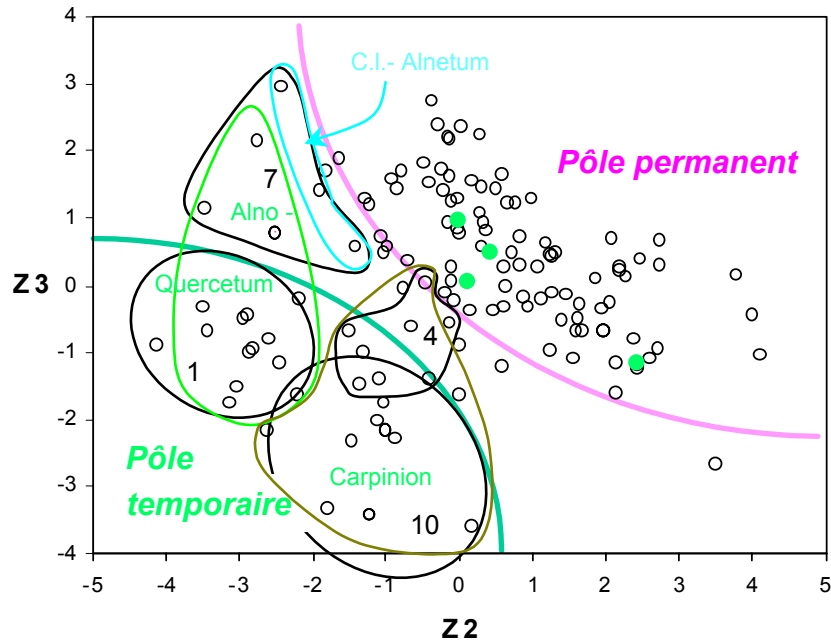


Figure 6.11. – Confrontation entre les classes et les syntaxons dans le plan factoriel Z2 x Z3 (point vert : station du Carpinion en dehors de l'ensemble délimité).

Comme nous l'avons vu lors de la classification numérique (tableaux 6.3 et 6.5), la typologie et la classification phytosociologique sont en bonne correspondance. La représentation des syntaxons dans l'espace factoriel ne fait que confirmer ces considérations. Ces figures suggèrent toutefois 3 commentaires :

- comme le montre sa répartition (figure 6.10), le *Carici remotae-Alnetum* apparaît clairement comme une association de transition entre les pôles alluvial et marécageux ; à la lumière de cette observation, la parenté entre les



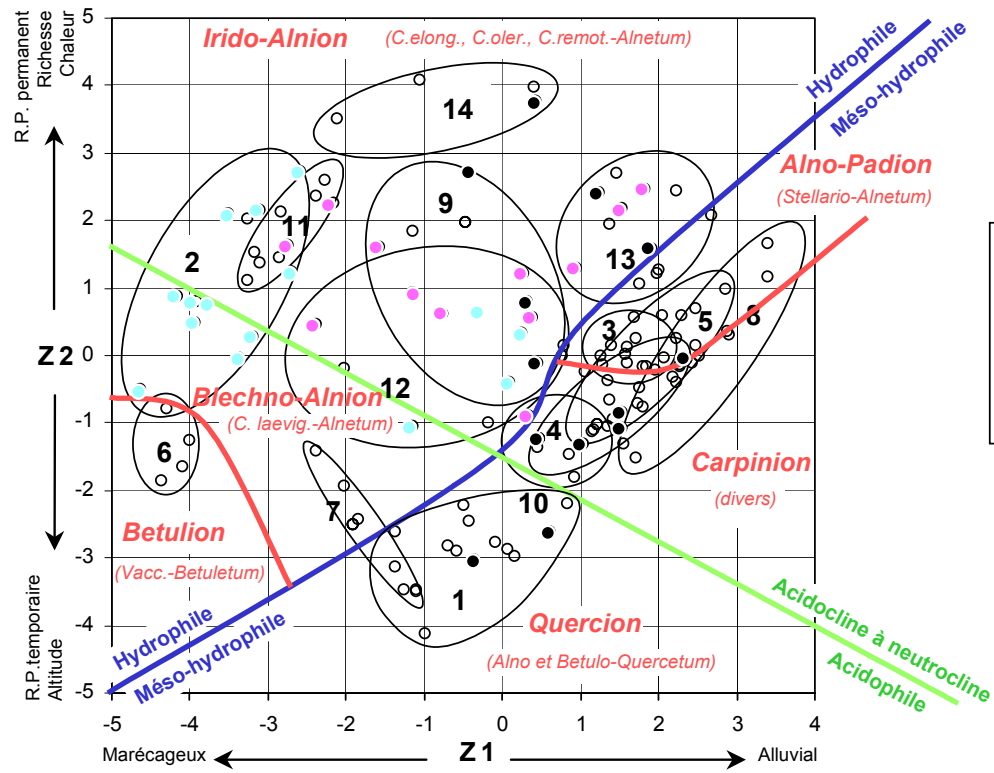


Figure 6.10.  
Confrontation entre les classes et les syntaxons dans le plan factoriel Z1 x Z2

- classes 9 et 13, déjà évoquée précédemment (figure 6.3), est plus nettement extériorisée ;
- la distribution des syntaxons confirme aussi la parenté existant entre les sources à mull (classe 12) et à anmoor (classe 2), représentant les stations exclusives des sous-associations fontinales ;
  - les associations les plus humides du *Carpinion* ont une grande amplitude de distribution, s'étalant dans les sols les plus riches, du pôle temporaire (classe 10) aux terrasses alluviales hautes (classe 8), en passant par les plaines argileuses (classe 4).

#### 6.4.4. Définition des types de stations

Les classifications obtenues par la typologie phytosociologique d'une part, et par la classification établie par voie statistique à partir de variables abiotiques, d'autre part, montrent une grande cohérence. Pour la plupart, les classes de stations sont bien individualisées dans l'espace factoriel, ce qui confirme leur pertinence.

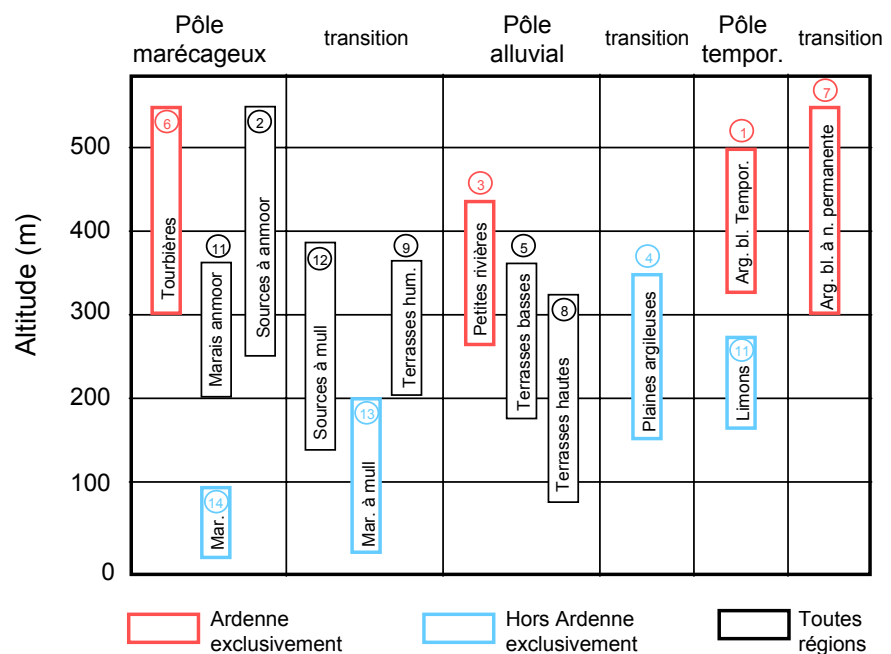


Figure 6.12. – Distribution des 14 types de station selon l'altitude et leur position par rapport aux pôles marécageux, alluvial et temporaire.

A ce stade de l'étude, nous pouvons donc proposer une typologie grossière sur base des 14 classes définies par la classification numérique. Cette typologie, présentée sommairement dans la figure 6.12, a été le fondement de l'étude de la productivité stationnelle abordée dans le paragraphe 6.5.

Par ailleurs, pour la seule région ardennaise, nous affinerons cette typologie en nous appuyant plus nettement sur l'ensemble des critères stationnels, pour aboutir à un catalogue des stations plus précis et utilisable dans le cadre de la gestion forestière courante. Cette étape fera l'objet du chapitre 7.

### 6.5. Analyse de la productivité stationnelle

L'espace factoriel défini par l'ACP ainsi que la typologie des stations constituent un nouveau cadre d'interprétation de la productivité stationnelle. Aussi, nous avons observé l'évolution de l'indice de fertilité selon ces 2 filières (figure 6.13), d'une part, via l'analyse de la variance au sein de la typologie et d'autre part via une régression multiple au sein de l'espace factoriel. Ces 2 filières s'ajoutent à l'analyse de la variation de l'indice de fertilité déjà effectuée à partir des données brutes (paragraphe 5.4).

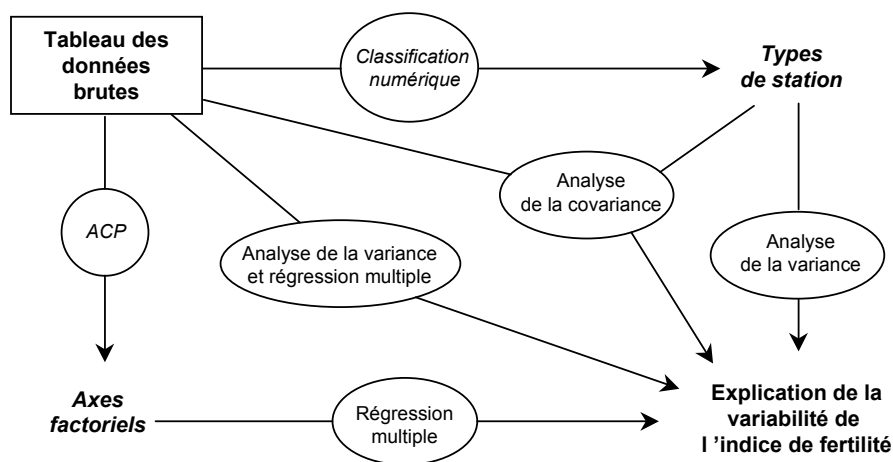


Figure 6.13. – Méthodes d'analyse de la variation de l'indice de fertilité.

### 6.5.1. Evolution de l'indice de fertilité dans l'espace factoriel

Nous avons recherché la relation entre l'indice de fertilité et les axes factoriels à l'aide d'une régression multiple du type  $H50 = f(\text{axes factoriels})$  dont le résultat est présenté dans le tableau 6.8. On remarque dans ce tableau que les 4 axes factoriels (PC1, PC2, PC5 et PC3) expliquent 65 % de la variation de l'indice de fertilité ; les 2 premiers apportant ensemble 56 % de cette explication.

Pour interpréter cette analyse, il est alors nécessaire de retourner à la signification des axes par rapport aux variables initiales, et d'envisager l'évolution de l'indice de fertilité dans les plans factoriels.

Tableau 6.8. – Résultat de la régression multiple du type  $H50 = f(\text{axes factoriels})^{(2)}$

```

MTB > Stepwise 'H50' 'PC1' 'PC2' 'PC3' 'PC4' 'PC5';
SUBC> FEnter 4.0;
SUBC> FRemove 4.0.

```

| Stepwise Regression                           |       |       |       |       |  |
|---|-------|-------|-------|-------|--|
| Response is H50 on 5 predictors, with N = 100 |       |       |       |       |  |
| Step  | 1     | 2     | 3     | 4     |  |
| Constant                                      | 2210  | 2216  | 2216  | 2220  |  |
| PC1   | 98    | 97    | 95    | 95    |  |
| T-Ratio                                       | 6.38  | 7.93  | 8.25  | 8.69  |  |
| PC2   |       | 116   | 117   | 115   |  |
| T-Ratio                                       |       | 7.61  | 8.10  | 8.41  |  |
| PC5   |       |       | 77    | 81    |  |
| T-Ratio                                       |       |       | 3.63  | 4.01  |  |
| PC3   |       |       |       | -58   |  |
| T-Ratio                                       |       |       |       | -3.33 |  |
| S   | 323   | 257   | 242   | 230   |  |
| R-Sq  | 29.36 | 55.76 | 61.11 | 65.17 |  |

<sup>(2)</sup> Les axes factoriels étant orthogonaux, la régression pas à pas n'est pas nécessaire mais donne un résultat aisément lisible.

### ***1° Analyse de la productivité dans le plan factoriel PC1 x PC2***

Le plan factoriel PC1 x PC2 explique 56 % de la variabilité de l'indice de fertilité. Pour analyser cette variabilité, nous avons figuré dans le plan les principaux gradients qu'il contient (figure 6.14), à savoir :

- le caractère alluvial, selon l'axe PC1,
- le caractère temporaire du régime phréatique, selon l'axe PC2,
- le trophisme et la chaleur, dans une direction proche de celle de l'axe PC2 et évoluant dans le même sens,
- l'altitude, opposée aux 2 gradients précédents et symbolisée par la couleur des observations.

Pour visualiser l'évolution de l'indice de fertilité dans ce plan, nous avons alors surimposé les droites d'« équi-fertilité » issues de la régression multiple, certes globalisantes, mais reflétant correctement la distribution des valeurs observées de l'indice de fertilité des stations (écart-type résiduel de 250 cm, soit de l'ordre de la variation de l'indice au sein de la classe).

La figure 6.14 permet les interprétations suivantes :

- On constate d'emblée que le gradient de fertilité correspond au gradient d'altitude. Cela s'observe globalement, mais aussi au sein de chacun des 3 pôles. Il n'est toutefois pas possible de déterminer quelle en est la cause, dans la mesure où 3 gradients écologiques pratiquement parallèles interviennent conjointement (chaleur, richesse chimique et caractère temporaire de la nappe phréatique). Pour cela, il faut envisager l'analyse au sein de types de station dans lesquels 2 de ces niveaux seraient fixés.
- Une comparaison entre les pôles montre aussi que, à altitude égale, l'indice de fertilité des stations du pôle marécageux est inférieur à celui du pôle alluvial d'environ 2 à 4 m. La situation est moins nette en ce qui concerne la comparaison du pôle temporaire avec les autres dans la mesure où la position du pôle dans l'espace factoriel est définie à la fois par 2 gradients différents : le caractère temporaire et l'altitude.

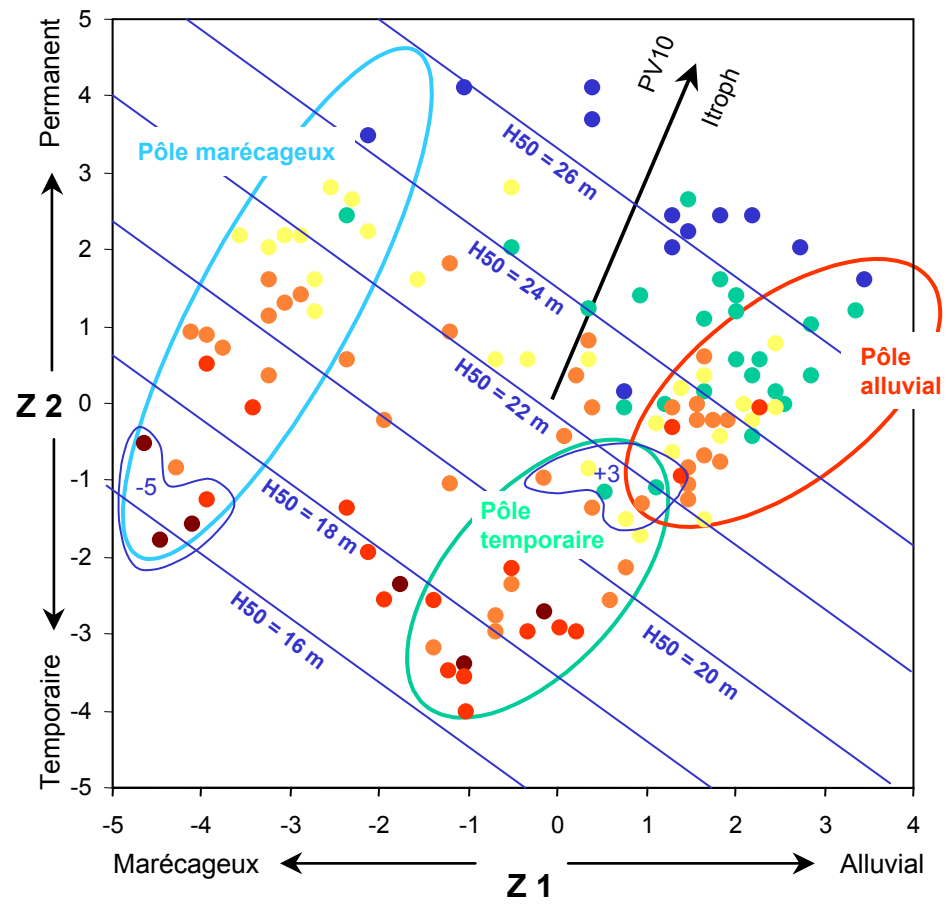


Figure 6.14.- Evolution de l'indice de fertilité dans le plan factoriel Z1 x Z2, avec en surimposition, la localisation des pôles et les principaux gradients écologiques

**Classes d'altitude**

- < 100 m
- 100 - 199 m
- 200 - 299 m
- 300 - 399 m
- 400 - 499 m
- 500 m et +

- Les plus grands écarts d'indices de fertilité entre les prévisions par la régression [ $H50 = f(Z1, Z2)$ ] et les valeurs observées (résidus absolus maximaux) sont situés dans 2 zones matérialisées sur le graphique de la figure 6.14 :

- . une zone est caractérisée par des indices de fertilité en moyenne inférieurs de 5 m aux prévisions du modèle : il s'agit des stations tourbeuses qui, comme nous le verrons (2°), sont principalement responsables de la relation entre l'axe 5 et l'indice de fertilité,
- . une zone est caractérisée par des indices de fertilité en moyenne supérieurs de 3 m : il s'agit de 4 stations sur limons hydromorphes et d'une station alluviale de haute altitude. Les 4 stations sont partiellement responsables de la liaison entre l'axe 3 et l'indice de fertilité.

### ***2° Analyse de l'indice de fertilité selon l'axe factoriel Z5***

L'axe Z5, qui «explique» 6 % de la variabilité de l'indice de fertilité oppose principalement le type tourbeux au reste des observations et en particulier, aux stations sourceuses. Il n'est de surcroît pas corrélé aux variables trophique ou climatique, ni à l'altitude. On peut en conclure que la productivité est plus faible dans les stations tourbeuses, et ce, indépendamment (et en plus) du fait qu'elles se situent plutôt en altitude.

## **6.5.2. Evolution de l'indice de fertilité au sein de la typologie**

L'interprétation de la productivité stationnelle dans les plans factoriels nous amène naturellement à étudier l'indice de fertilité au sein de la typologie des stations.

### ***1° Variation de l'indice de fertilité selon les types de stations***

L'analyse de la variance (tableau 6.9) permet de se faire une idée de l'indice de fertilité selon les types de station. En effet, le rapport de corrélation montre que le type de station «explique» 59 % de la variation de l'indice de fertilité. Toutefois, la variabilité au sein des types est relativement élevée : pour une partie des types, l'indice de fertilité moyen est assorti d'un coefficient de variation de 15 à 20 %.

Tableau 6.9. – Résultat de l'analyse de la variance à un critère de classification de l'indice de fertilité selon les types de stations.

| One-Way Analysis of Variance                         |    |          |        |                               |       |      |
|--|----|----------|--------|-------------------------------|-------|------|
| Analysis of Variance on H50                          |    |          |        |                               |       |      |
| Source   | DF | SS       | MS     | F                             | p     |      |
| type   | 13 | 8582394  | 660184 | 9.38                          | 0.000 |      |
| Error  | 84 | 5913500  | 70399  |                               |       |      |
| Total  | 97 | 14495893 |        |                               |       |      |
| Individual 95% CIs For Mean<br>Based on Pooled StDev |    |          |        |                               |       |      |
| Level  | N  | Mean     | StDev  | -----+-----+-----+-----+----- |       |      |
| Tourbe   | 4  | 1335.0   | 342.4  | (-----*-----)                 |       |      |
| Abl à nappe perm                                     | 6  | 1731.2   | 374.8  | (-----*-----)                 |       |      |
| Abl à nappe temp                                     | 10 | 1935.4   | 195.8  | (-----*-----)                 |       |      |
| Sources à anmoor                                     | 8  | 2004.7   | 355.3  | (-----*-----)                 |       |      |
| Marais à anmoor                                      | 7  | 2044.9   | 185.5  | (-----*-----)                 |       |      |
| Petites rivières                                     | 7  | 2136.6   | 296.1  | (-----*-----)                 |       |      |
| Plaines argileuses                                   | 5  | 2175.0   | 240.9  | (-----*-----)                 |       |      |
| Marais à mull  | 10 | 2230.0   | 201.8  | (-----*-----)                 |       |      |
| Limons hydromorphes                                  | 7  | 2362.3   | 349.8  | (-----*-----)                 |       |      |
| Terrasses basses                                     | 10 | 2368.8   | 203.8  | (-----*-----)                 |       |      |
| Sources à mull                                       | 7  | 2409.3   | 269.4  | (-----*-----)                 |       |      |
| Marais à anmoor                                      | 2  | 2534.0   | 46.7   | (-----*-----)                 |       |      |
| Alluvions humides                                    | 9  | 2571.6   | 247.0  | (-----*-----)                 |       |      |
| Terrasses humides                                    | 6  | 2572.5   | 230.4  | (-----*-----)                 |       |      |
| Pooled StDev =                                       |    |          |        | -----+-----+-----+-----+----- |       |      |
|  |    |          |        | 1500                          | 2000  | 2500 |

Ce tableau d'analyse doit être mis en rapport avec le tableau 6.10 analysant la variabilité de l'altitude selon les types de station. En comparant ces 2 tableaux, on observe une opposition entre l'évolution de l'altitude et de l'indice de fertilité.

## 2° Variation de l'indice de fertilité selon l'altitude au sein des types

Nous venons de voir qu'au sein d'un type, la variabilité de l'indice de fertilité est importante. L'altitude permet d'expliquer une bonne part de cette variabilité. En effet, la figure 6.15 montre la relation entre l'altitude et l'indice de fertilité au sein d'un groupe de stations, en l'occurrence les types alluviaux et marécageux à mull. Dans ce cas précis, le coefficient de corrélation vaut 0,57, signifiant que l'altitude « explique » 33 % de la variation de l'indice de fertilité au sein du groupe. Dans le même ordre d'idées, on peut aussi observer dans la figure 6.16 que ce sont les types dont l'altitude est la plus variable qui ont l'indice de fertilité le plus variable.



Tableau 6.10. – Résultat de l'analyse de la variance à un critère de classification de l'altitude selon les types de stations.

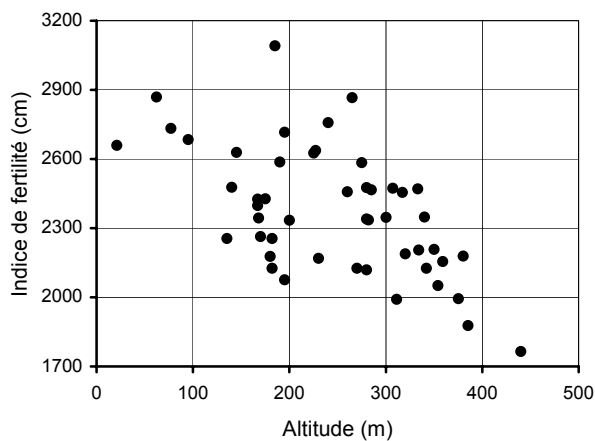
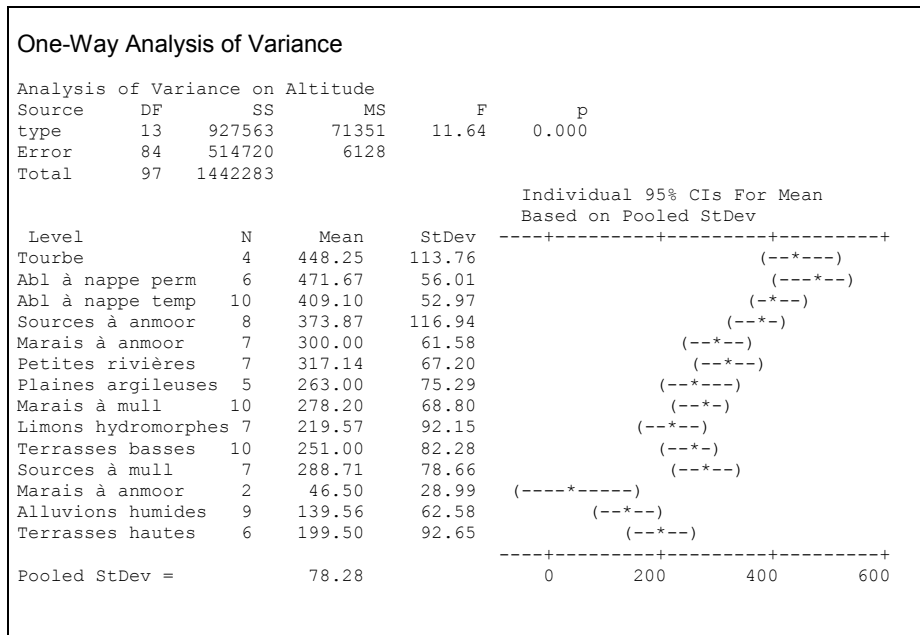


Figure 6.15. – Evolution de l'indice de fertilité en fonction de l'altitude au sein des stations alluviales et des marais à mull.

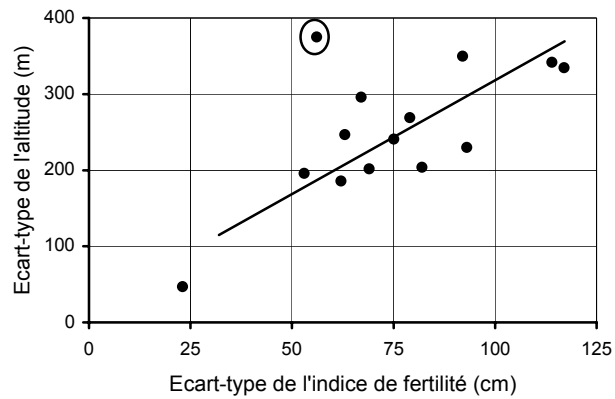


Figure 6.16. – Variabilité de l'indice de fertilité en fonction de la variabilité de l'altitude au sein des types de station, estimée par les écarts-types.

Ces 2 analyses nous amènent logiquement à entreprendre une analyse de la covariance afin de déterminer de quelle(s) variable(s) dépend l'indice de fertilité. Cette analyse (tableau 6.11) montre que l'altitude (*alt 2*) et le type de station (*type*) interviennent conjointement pour expliquer la variabilité de l'indice de fertilité (*H50*).

Tableau 6.11. – Résultat de l'analyse de la covariance à un critère de classification<sup>(3)</sup>.

| Analysis of Covariance (Orthogonal Designs) |           |          |         |       |       |   |   |   |    |
|---|-----------|----------|---------|-------|-------|---|---|---|----|
| Factor                                      | Levels    | Values   |         |       |       |   |   |   |    |
| Type  | 8         | 1        | 2       | 3     | 4     | 5 | 6 | 7 | 10 |
| Analysis of Covariance for H50              |           |          |         |       |       |   |   |   |    |
| Source                                      | DF        | ADJ SS   | MS      | F     | P     |   |   |   |    |
| Covariates                                  | 1         | 3058163  | 3058163 | 60.55 | 0.000 |   |   |   |    |
| Types                                       | 7         | 1185312  | 169330  | 3.35  | 0.003 |   |   |   |    |
| Error                                       | 89        | 4494866  | 50504   |       |       |   |   |   |    |
| Total                                       | 97        | 14495893 |         |       |       |   |   |   |    |
| Covariate                                   | Coeff     | Stdev    | t-value | P     |       |   |   |   |    |
| alt2  | -0.003230 | 0.000415 | -7.782  | 0.000 |       |   |   |   |    |

<sup>(3)</sup> Les 12 types de stations sont regroupés en 8 types selon les modalités présentées au paragraphe 3°.

### 3° Indice de fertilité des types de station

Le tableau 6.12 présente les indices de fertilité moyens ventilés par type de station et par classe d'altitude. Afin de disposer, dans la mesure du possible, de valeurs de H50 se basant au moins sur 2 valeurs de l'indice, nous avons opéré 3 regroupements. Ceux-ci se sont basés à la fois sur les similitudes entre types mises en évidence dans les paragraphes précédents et sur les indices de fertilité dont les évolutions selon l'altitude étaient comparables. De cette manière, nous avons obtenu les 3 groupes suivants :

- sources et marais à anmoor (classes 2, 11, 14),
- sources et marais à mull et alluvions humides (classes 9, 12, 13),
- petites rivières et terrasses alluviales (classes 3, 5, 8).

Tableau 6.12. – Evolution de l'indice de fertilité selon les types de station et les classes d'altitude (toutes valeurs indicatrices ; en bas à droite de chaque case : le nombre de placettes).

| CLASSES D'ALTITUDE (m) | Tourbières (6) | Sources et marais à anmoor (2+11+14) | Sources et marais à mull et alluvions humides(9+12+13) | Petites rivières et terrasses Alluviales (3+5+8) | Plaines argileuses (4) | Limons hydromorphes (10) | Argiles blanches à nappe temporaire (1) | Argiles blanches à nappe perman. (7) | H50 MOYEN (cm) |
|------------------------|----------------|--------------------------------------|--|--|------------------------|--------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
|                        | 600            |                                      | 1294 1   |  |                        |                          |   |                                      |                |
| 550                    |                |                                      |  |  |                        |                          |   |                                      |                |
| 500                    | 1069 2         |                                      |  |  |                        |                          |   | 1180                                 |                |
| 450                    |                |                                      |  |  |                        |                          | 1698 2                                  | 1782                                 |                |
| 400                    | 1466 1         | 2335 1                               |  | 1765 1   |                        |                          | 1997 5                                  | 1816                                 |                |
| 350                    |                | 1992 5                               | 2075 3   | 2017 2   |                        | 2255 1                   | 1962 1                                  | 2060                                 |                |
| 300                    | 1736 1         | 1958 3                               | 2240 6   | 2344   | 2200 2                 |                          | 2006 2                                  | 2082                                 |                |
| 250                    |                | 2139 3                               | 2460 2   | 2408 7   |                        | 2433 1                   |   | 2360                                 |                |
| 150                    |                | 2196 3                               | 2454 10  | 2403 8   | 2082 5                 | 2486 2                   |   | 2324                                 |                |
| 0                      |                | 2534 2                               | 2637 5   | 2562 2   |                        | 2943 1                   |   | 2578                                 |                |
| Altitude (m)           | 448            | 313                                  | 233  | 255  | 246                    | 230                      | 409                                     | 472                                  |                |
| H50 (cm)               | 1335           | 2080                                 | 2379   | 2349   | 2115                   | 2521                     | 1935                                    | 1734                                 |                |

Toutefois, malgré ces regroupements, les différences d'indice de fertilité que l'on peut observer dans ce tableau sont à considérer comme des tendances. En effet, les nombres d'observations et les écarts-types liés aux moyennes ne permettent de confirmer statistiquement ces différences que dans les cas très nets.

Une lecture horizontale du tableau 6.12 permet de comparer les types de station entre eux, à une altitude constante ; une lecture verticale permet d'évaluer l'impact du niveau thermique sur la fertilité du type de station. En effet, au sein d'un type, les niveaux trophique et hydrique sont mieux définis et la variable altitude est alors plus nettement indicatrice du climat et en particulier du niveau thermique.

On observe que l'analyse de l'indice de fertilité des stations permet de confirmer les similitudes qui avaient été évoquées précédemment entre types de station (paragraphe 6.4.1. – 2°).

### 6.5.3. Modèle «typologique» de productivité stationnelle

Parallèlement aux analyses effectuées dans le paragraphe précédent (paragraphe 6.5.2), nous pouvons de nouveau construire des modèles de productivité stationnelle mais, cette fois, à partir de la typologie. Ainsi, par une régression multiple, nous avons obtenu les modèles suivants en attribuant une variable muette à 6 des 8 types de station du tableau 6.12<sup>(4)</sup> :

$$H50 = 2610 - 1,77 \text{ altitude} - 480 \text{ tourbe 01} + 196 \text{ Allu01} + 317 \text{ Limon 01}$$

Modèle 3

$R^2 = 0,70$

Ecart-type résiduel = 213 cm

$$H50 = 2612 - 0,00362 (\text{altitude})^2 - 515 \text{ tourbe 01} - 267 \text{ Pl-Arg01} - 138 \text{ Marais 01}$$

Modèle 4

$R^2 = 0,70$

Ecart-type résiduel = 213 cm

où tourbe 01 vaut 1 pour les stations sur tourbe (6)  
 Allu 01 vaut 1 pour les stations alluviales et les marais de transition (3, 5, 8, 9, 12, 13)  
 Limon 01 vaut 1 pour les stations des limons à régime phréatique temporaire (10)  
 PL-Arg 01 vaut 1 pour les stations des plaines argileuses (4)  
 Marais 01 vaut 1 pour les stations marécageuses (2, 11, 14).

<sup>(4)</sup> Les 2 types sur « argile blanche » sont regroupés, de même que les marais de transition et les alluvions.

La confrontation de ces 2 modèles confirme la hiérarchie entre les stations établie précédemment (paragraphe 6.2.1). Toutefois, dans les argiles blanches, selon les modèles, la diminution de l'indice de fertilité est imputé :

- soit aux caractères intrinsèques de ce type de station (modèle 3, où les argiles blanches sont considérées de même fertilité que les marais ou les plaines argileuses),
- soit à leur altitude (modèle 4, où les argiles blanches sont considérées de même fertilité que les limons ou les alluvions, mais où la diminution de fertilité est imputée au carré de l'altitude).

En raison du faible nombre de stations d'altitude inférieure à 400 m que nous possédons pour les autres types, nous ne disposons pas de moyen de trancher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse. Néanmoins, il est logique de penser que la fertilité des argiles blanches, en raison des caractéristiques pédologiques des sols (mauvaise structure, faibles réserves hydriques) se situe à un niveau inférieur à celle des limons hydromorphes et des stations alluviales.

### **6.6. Interprétation des résultats en termes de potentialités sylvicoles des stations**

A partir des modèles de productivité, et en se référant à l'étude des potentialités sylvicoles de l'aulne (tableau 5.15), on peut construire le tableau 6.13 qui détermine les types de station compatibles avec chacun des objectifs sylvicoles.

*Tableau 6.13. – Stations compatibles avec chacun des 3 objectifs sylvicoles envisagés pour l'aulne.*

| <i>Classe de fertilité</i>              | <i>Objectif sylvicole</i>              | <i>Conditions stationnelles</i>  |
|---|--|--|
| Classes 1 et 2<br>H50 > 21,5 m          | Production de qualité en cycle court   | . Alluvions et marais de transition jusqu'à 350 m d'altitude<br>. Limons hydromorphes<br>. Marais à anmoor de basse altitude (< 200 m) |
| Classe 3 (4)<br>(15,5 m < H50 < 21,5 m) | Production de qualité en cycle long    | . Stations d'altitude comprise entre 350 – 500 m<br>. Marais à anmoor<br>. Plaines argileuses<br>. Argiles blanches                    |
| Classes ≤ 5<br>(H50 < 15,5 m)           | Production de qualité non envisageable | . Tourbières acides<br>. Stations de haute altitude (> 500 m)  |

## 6.7. Interprétation des résultats en terme d'autécologie de l'aulne glutineux

En s'appuyant sur les modèles de productivité, sur la typologie des stations et en faisant appel à l'ensemble des observations, nous pouvons mieux comprendre la relation station x production dans le cas de l'aulne glutineux en Wallonie. Nous l'avons envisagée à partir de 4 principaux facteurs écologiques : la température, l'alimentation en eau, l'aération du sol et l'alimentation minérale dans sa globalité.

Pour rappel, les modèles de productivité stationnelle 1 et 2 établis au paragraphe 5.4.2 sont reproduits ci-après.

$$H_{50} = 2498 - 0,00351(\text{Altitude})^2 - 425 \text{ tour01} - 432 \text{ Fam01} + 125 \text{ Mull01}$$

Modèle 1

$R^2 = 0,75$

*Ecart-type résiduel = 197 cm*

où "tour01", "mull1" et "fam01" sont 3 variables binaires qui valent 1 respectivement lorsque l'humus est de type "tourbe", "mull" ou que la placette se situe en Famenne.

$$H_{50} = 136 + 126 \text{ Itroph} + 223 \text{ Mull01} - 486 \text{ tour01} + 11,2 \text{ PV10} \\ - 313 \text{ Fam01} - 149 \text{ Arg01}$$

Modèle 2

$R^2 = 0,66$

*Ecart-type résiduel = 232 cm*

où "Itroph" est l'indice trophique, "PV10" est la longueur de la période de végétation, et "Arg01" est une variable binaire qui vaut 1 lorsque la texture de l'horizon humifère est argileuse.

### 6.7.1. Température

#### *1° Caractère indicateur de l'altitude*

Nous avons considéré l'altitude comme un indicateur satisfaisant de la chaleur reçue. La période de végétation aurait logiquement été un indicateur plus direct, mais nous ne l'avons pas retenue du fait de la trop faible précision de

l'information liée à la complexité topographique des stations de l'aulne. En effet, les modèles cartographiques attribuent aux vallées encaissées les mêmes longueurs de période de végétation que pour les plateaux environnants culminant 100 ou 200 mètres plus haut. La figure 6.17 montre la répercussion de cette approximation sur la relation entre l'indice de fertilité et la longueur de la période de végétation : la sous-estimation de la longueur de la période de végétation amène une surestimation de l'indice de fertilité (cas des vallées ardennaises en rouge sur la figure 6.17) et l'inverse se produit lorsque la longueur de la période de végétation est surestimée (cas des petits sommets en bleu sur la figure 6.17).

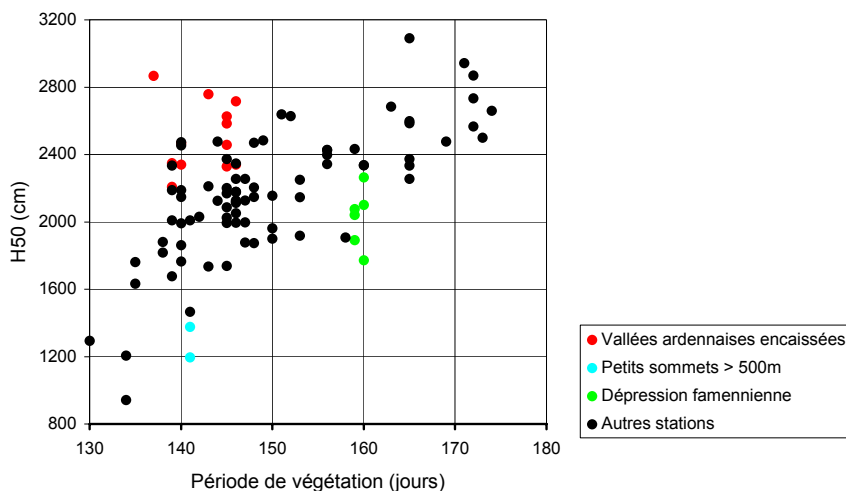


Figure 6.17. – Evolution de l'indice de fertilité en fonction de la longueur de la période de végétation.

### 2° Influence de l'altitude sur l'indice de fertilité

A partir de 350 m (soit en moyenne, une température moyenne annuelle [TMA] de 7,6 °C et une période de végétation [PV10] de 145 jours), les effets du manque de chaleur se traduisent très nettement par une baisse de l'indice de fertilité. Au-delà de 400 m (soit TMA < 7,3 °C et PV10 < 138 jours), les aulnaies ne se situent plus que dans les 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> classes de fertilité et ce, d'après nos modèles,

quelles que soient les autres qualités de la station ; au-delà de 500 m, la productivité chute encore jusqu'à des niveaux dérisoires (1 à 3 m<sup>3</sup>/ha/an) à 50 ans.

A l'inverse, dans les climats doux de la région limoneuse (TMA > 9 °C et PV10 > 160 jours), l'indice de fertilité relève généralement de la classe 1, même dans des conditions pédologiques défavorables (type 14 : marais à anmoor).

### 6.7.2. Alimentation en eau

Même si l'aulne glutineux est considéré comme une espèce méso-hydrophile, l'étude de la distribution de l'aulne a montré qu'une nappe permanente n'est pas une condition nécessaire au développement de l'espèce (paragraphe 1.2.7). L'étude de la productivité stationnelle confirme que l'aulne peut se développer dans des sols à régime phréatique temporaire (argiles blanches, limons hydromorphes : 17 stations concernées), voire même avec une bonne productivité si la réserve utile en eau du sol est importante et les autres conditions stationnelles satisfaites. En effet, en sols limoneux à nappe temporaire, mais à très grande réserve utile et sous le climat favorable de la région limoneuse, l'indice de fertilité observé (4 stations) était de l'ordre de 23 à 26 m (classes de productivité 1 et 2), se situant au niveau de celui des stations alluviales, comme le confirment les modèles de productivité stationnelle 3 et 4.

L'aulne est en effet une composante importante des forêts limoneuses, comme le prouve son abondance dans les îlots résiduels des forêts subnaturelles (tableau 1.7) ou, selon nos observations, dans les forêts secondaires de la Thiérache française où il joue encore un rôle très important dans la dynamique forestière.

### 6.7.3. Aération du sol

L'alimentation en air optimale est celle des sols à texture limoneuse à graveleuse non imbibés d'eau jusqu'en surface. Ce sont les conditions des stations alluviales (types 3, 5 et 8) et des stations sur limons hydromorphes ressuyés (type 10 avec régime phréatique temporaire ressuyé). Les meilleurs indices de fertilité s'observent dans ces stations. Lorsque l'aération est déficiente par manque de porosité (texture argileuse) ou par engorgement du sol (régimes phréatiques noyés), la productivité diminue.



## 1° Déficit d'aération par engorgement du sol

### • Engorgement permanent ou quasi-permanent (« marais à anmoor »)

Dans les stations à régime phréatique caractérisé par un sol noyé durant l'hiver et au début du printemps, avec un bref étiage estival de seulement 15 à 40 cm (régime phréatique 5), l'indice de fertilité des peuplements accuse une diminution significative de l'ordre de 1,5 à 2 m selon les modèles.

Lorsque le régime phréatique est de type 6 (étiage d'environ 5 à 15 cm) l'aulne est exclu, excepté dans les stations de sources (type 2 : source à anmoor, 5 stations), où l'indice de fertilité se maintient au même niveau. Nous avons déjà insisté sur le caractère oxygéné des eaux de source (paragraphe 4.2.3 – 3°), permettant à l'aulne de subsister dans des conditions d'inondations permanentes, qui, dans d'autres cas, ne lui permettent manifestement pas de se maintenir.

### • Engorgement temporaire (« marais à mull »)

Lorsque l'engorgement du sol est temporaire, et qu'il n'est pas total durant le printemps [régime phréatique de type 4 et certains régimes de type 5 à étiage plus prononcé (40-60 cm)], on n'observe pas de diminution significative de l'indice de fertilité. Dans les modèles de productivité 3 et 4, les stations de ce groupe ne sont pas distinguées des stations alluviales.

La distinction entre les régimes à engorgement temporaire (relevant du type de station « marais de transition ») et quasi-permanent (relevant du type de station « marais à anmoor ») n'est pas aisée à opérer. Elle est déterminée par l'épaisseur de sol ressuyé pendant la période de végétation (tableau 6.14), mais aussi, d'après nos observations, par la persistance de l'inondation du sol par la nappe lors des premiers mois de la période de végétation (avril, mai). Ce phénomène peut aussi affecter les autres régimes phréatiques noyés [régimes phréatiques 7 (temporaire) et 3]. L'humus est alors un indicateur précieux. C'est principalement à ce titre que la variable «mull01» intervient dans les modèles 1 et 2.

Tableau 6.14. – Aptitude de l'aulne glutineux selon les conditions d'imbibition du sol.

| Profondeur de la nappe à l'étiage | Régime phréatique | Type d'humus   | Aptitude de l'aulne glutineux      |
|-----------------------------------|-------------------|----------------|------------------------------------|
| < 15 cm                           | 6                 | anmoor, tourbe | Exclusion                          |
|                                   | 5 <i>partim</i>   |                | (sauf source : tolérance)          |
| 15 – 40 cm                        | 5 <i>partim</i>   | anmoor         | Tolérance : baisse de productivité |

|         |        |             |         |
|---------|--------|-------------|---------|
| > 40 cm | autres | mull, moder | Optimum |
|---------|--------|-------------|---------|

### 2° Déficit d'aération par manque de porosité du sol

En l'absence d'excès d'eau, l'aération du sol, déterminée par sa porosité, conditionne la qualité de l'enracinement et de la nutrition. Aussi, sur des sols argileux peu structurés, on peut s'attendre à une diminution de la productivité. Malgré la capacité des aulnes à s'enraciner dans les sols argileux, trois observations convergent pour indiquer une diminution de l'indice de fertilité dans ces sols :

- le modèle 2 traduit une baisse de l'indice de fertilité de l'ordre d'une demi classe lorsque la texture de l'horizon humifère est argileuse ;
- le modèle 3 situe l'indice de fertilité des plaines argileuses au même niveau que celui des marais ou des argiles blanches<sup>(5)</sup>, tandis que le modèle 4 traduit une baisse de la productivité de l'ordre de 1 classe de fertilité dans les plaines argileuses, alors que les niveaux trophique et thermique de ces stations sont satisfaisants et que le régime phréatique permanent assure la présence d'eau en profondeur pendant toute l'année ;
- les modèles 1 et 2 indiquent une baisse de l'indice de fertilité supérieure à 1 classe en région famennienne. Or cette région est caractérisée par des sols argileux mal structurés. Toutefois, le fait que dans le modèle 2, le caractère argileux et la région famennienne interviennent négativement conjointement, indique que d'autres paramètres contribuent à la baisse de fertilité observée dans le tableau 6.15 et dans la figure 6.17 pour la région famennienne. Parmi ces paramètres on peut relever l'influence très marquée des caractéristiques édaphiques sur le régime hydrique qui est très irrégulier même dans les stations alluviales, ainsi que les caractéristiques climatiques locales défavorables (sols froids au printemps, gelées hors-saison fréquentes).

Tableau 6.15. – Impact du territoire écologique famennien sur l'indice de fertilité des types de station (classe altitudinale 150-299 m; 23 stations concernées, dont 6 en Famenne).

| Types de station   | H50 (cm)     |         | Différence <sup>(1)</sup> |
|--------------------|--------------|---------|---------------------------|
|                    | Hors Famenne | Famenne |                           |
| Plaines argileuses | 2276         | 1901    | 375***                    |
| Alluvions          | 2526         | 2171    | 355**                     |
| Marais             | 2181         | 2101    | - <sup>(2)</sup>          |

<sup>(5)</sup> Pour des raisons évoquées précédemment (paragraphe 6.5.2, 4°), nous ne nous attacherons pas à interpréter l'impact du caractère argileux des «argiles blanches» sur l'indice de fertilité.

- (1) \*\* = hautement significatif ; \*\*\* = très hautement significatif.
- (2) Une seule station en Famenne.

#### 6.7.4. Alimentation minérale

L'évaluation de l'influence de la richesse minérale du sol sur la productivité n'est pas aisée : nous avons vu lors de l'ACP qu'au gradient altitudinal correspondait un gradient trophique, parallèle au gradient thermique. Par ailleurs, seules quelques stations d'altitude sont nettement oligotrophes (tourbières et argiles blanches, principalement) mais avec des pH malgré tout compris entre 4,2 et 4,5 dans l'horizon superficiel. En effet, dans les sols acides du plateau ardennais, l'aulne se cantonne dans les zones d'apport d'eau (source ou ruissellement) par nature moins oligotrophes.

Il est probable que même pour l'aulne glutineux, réputé frugal, l'alimentation minérale soit déficiente dans les tourbières acides, ce qui pourrait contribuer à expliquer la forte baisse d'indice de fertilité observée par rapport aux autres marais, mais nous avons aussi vu que le régime phréatique des tourbières est plutôt de type 6 (étiage de moins de 15 cm), excluant l'aulne en l'absence de venues aquifères. Or celles-ci ne sont jamais hyper-oligotrophes. Les « argiles blanches » à moder ou mor pourraient aussi être trop oligotrophes, mais les quelques stations qui sont dans le cas sont localisées au-delà de 450 m d'altitude, ce qui masquerait l'éventuel impact de la richesse chimique sur l'indice de fertilité en raison de l'importante baisse du niveau thermique à ces altitudes.

A l'opposé une comparaison entre stations du même type dans la même classe d'altitude ne montre aucune modification significative de l'indice de fertilité pour les sols neutres ( $\text{pH} \geq 7,0$ ).

On peut donc considérer que dans les limites de notre réseau d'observations ( $\text{pH}$  compris entre 4,2 et 7,5), la richesse chimique du sol n'a pas d'impact sur l'indice de fertilité

## ***6.8. Discussion : apport de notre analyse à la connaissance et à la gestion de l'aulne et des forêts humides***

La typologie abiotique des stations et l'analyse de la productivité stationnelle nous ont permis d'apporter une description des stations forestières humides, de définir leurs potentialités vis-à-vis de l'aulne et de préciser l'autécologie de l'aulne glutineux.

### **6.8.1. Description du milieu**

La typologie abiotique, s'appuyant sur une étude approfondie des caractéristiques écologiques des stations, nous a permis d'apporter une description fine des stations forestières de l'aulne glutineux. Celle-ci peut s'appliquer tant en forêt « subnaturelle » que dans les forêts fortement modifiées (pessières, peupleraies) ou dans les sols humides non forestiers (pâtures, prairies, landes).

Nous avons vu que notre typologie est en très bonne concordance avec la classification phytosociologique belge, établie avec un niveau de précision comparable. Cela nous permet d'utiliser la notion de « végétation naturelle potentielle », au sens de STEIN [1987], pour compléter la définition des types de station.

### **6.8.2. Typologie et potentialités sylvicoles des stations**

Grâce à l'étude et à la typologie des stations, la productivité de l'aulne et ses potentialités sylvicoles, évaluées dans le chapitre 5, peuvent être mises en relation avec les stations.

#### ***1° Modèles de prévision de la productivité stationnelle***

Nous avons pu établir plusieurs modèles de prévision de la productivité stationnelle, de types factoriel et typologique. Ceux-ci permettent globalement d'expliquer 60 à 75 % de la variabilité de l'indice de fertilité (tableau 6.16).

Les typologies abiotique et phytosociologique expliquent donc plus ou moins la même proportion de l'indice de fertilité. Par ailleurs, les typologies plus grossières que nous avons testées en première approche (alliances phytosociologiques ou partition en 7 types) sont nettement moins efficaces, n'expliquant que de l'ordre de 40 % de l'indice de fertilité. Couplées à l'altitude dans une régression multiple, elles ont toutefois la même valeur de prédiction que les typologies plus précises.

Tableau 6.16. – Valeur de prévision des différents modèles de productivité stationnelle.

| <i>Variables explicatives</i>        | <i>Proportion de la variabilité de H50 expliquée<sup>(1)</sup></i> |
|--------------------------------------|--|
| Altitude seule                       | R <sup>2</sup> = 53 %  |
| Typologie seule                      |  |
| <i>abiotique (14 types)</i>          | η = 59 %   |
| <i>phytosociologique (12 assoc.)</i> | η = 51 %   |
| Typologie + altitude                 |  |
| <i>abiotique</i>                     | R <sup>2</sup> = 70 %  |
| <i>phytosociologique</i>             | R <sup>2</sup> = 66 %  |
| Ensemble des variables abiotiques    | R <sup>2</sup> = 75 %  |

(1) R<sup>2</sup> = coefficient de détermination (régressions)  
η = rapport de corrélation (analyses de la variance)

Le tableau 6.16 met aussi en évidence que la typologie, qu'elle soit abiotique ou phytosociologique, est étroitement liée à l'altitude, qui comme nous l'avons vu, est une variable intégratrice du climat, de la richesse chimique (via l'assise géologique) et de la position topographique des aulnaies. En effet, nous avons déjà montré (tableaux 6.10, 6.12) que beaucoup de types de station ont une distribution altitudinale réduite. Pour fixer les idées, le tableau 6.17 confirme cette relation en montrant qu'environ 60 % de la variabilité de l'altitude est « expliquée » par les typologies.

Tableau 6.17. – Relation entre les typologies et l'altitude.

| <i>Variables explicatives</i> | <i>Proportion de la variabilité de l'altitude expliquée par les typologies (η)</i> |
|-------------------------------|--|
| Typologie abiotique           | 64 %   |
| Typologie phytosociologique   | 56 %   |

Il est par ailleurs surprenant de constater que la typologie abiotique, dépendant de l'altitude *par construction* ne soit pas plus nettement liée à l'altitude que la typologie phytosociologique.

### **2° Objectifs sylvicoles différenciés selon les stations**

L'analyse approfondie de ces modèles et de l'évolution de l'indice de fertilité dans l'espace factoriel des variables nous a permis d'établir une hiérarchie dans la fertilité des types de station (tableau 6.9). Ainsi, il est possible, au sein même des forêts humides, de fixer des objectifs sylvicoles différenciés selon les types de station (tableau 6.13).

### **6.8.3. Autécologie de l'aulne glutineux**

L'analyse de la variation de l'indice de fertilité des aulnaies selon les variables écologiques et surtout au sein de la typologie a permis de préciser la relation station x production en Wallonie, en définissant les types de station favorables ou défavorables à l'aulne glutineux.

Toutefois, il est plus difficile de dépasser ce stade descriptif. En effet, quelles que soient les méthodes utilisées, la structure déséquilibrée des données ne permet pas de tirer des conclusions quant à l'impact direct des différents facteurs écologiques sur la croissance et le développement de l'aulne glutineux. En particulier, 2 gradients écologiques évoluent parallèlement : la chaleur et la « fertilité globale » de la station ; les stations les plus froides étant aussi les plus oligotrophes et globalement les moins fertiles (aération du sol, réserve en eau, éléments minéraux), et les stations les plus fertiles étant aussi les plus chaudes.

En nous appuyant à la fois sur la typologie et l'évolution des caractéristiques écologiques au sein des types, nous avons cependant pu dégager les grands traits de l'autécologie de l'aulne glutineux en Wallonie, qui ont été l'occasion d'une proposition d'adaptation du Fichier écologique des Essences. En particulier, nous avons mis en évidence qu'au sein de son « optimum phytosociologique », l'aulne est très sensible au manque de chaleur (dont nous avons quantifié l'effet sur la productivité) et que sa présence dépend du degré d'aération du sol, bien qu'il soit adapté à une certaine apoxie. A ce titre, nous avons pu définir des limites de tolérance à partir de l'étude des régimes phréatiques (tableau 6.14).

#### 6.8.4. Proposition d'actualisation du fichier écologique des essences

L'apport de nouvelles données autécologiques permet d'envisager une actualisation des pages consacrées à l'aulne glutineux dans le fichier écologique des essences.

Toutefois l'opération qui consiste à déterminer l'aptitude de l'aulne vis-à-vis des différentes caractéristiques stationnelles (optimum, tolérance, exclusion) n'est pas si directe qu'on peut l'imaginer. En effet, dans la démarche du fichier écologique, l'interprétation des données autécologiques semble dépendre du statut que l'on attribue aux espèces (essence de production ou d'accompagnement). Ainsi, les chênes indigènes, pourtant naturellement présents jusqu'en haute Ardenne, sont considérés en « tolérance » sur le plateau dès 350 m d'altitude, et même en « exclusion » au-delà de 500 m (haute Ardenne). Par contre, le bouleau pubescent, dont la production est presque nulle dans les tourbières de haute Ardenne y est considéré à l'« optimum », alors que ses stations naturelles du Condroz, où sa productivité est élevée, sont considérées comme relevant de sa zone d'« exclusion ». Les critères phytosociologiques semblent donc prédominants pour le bouleau pubescent, tandis que ce sont les critères sylvicoles qui déterminent l'aptitude des chênes. Face à l'absence de définition claire pour les notions d'exclusion, de tolérance et d'optimum, nous partirons du principe que l'aulne est une essence de production.

##### 1° Secteurs écologiques

| Secteur                     | Aptitude | Limitation   | Compensation |
|-----------------------------|----------|--|--------------|
| 21 Ardenne occidentale      | Toléré   | Durée de la période de végétation et température moyenne durant la période de végétation | Aucune       |
| 22 Ardenne centro-orientale | Toléré   |  | Aucune       |
| 23 Haute Ardenne            | Exclus   |  | Aucune       |
| -- Autres                   | Optimum  | -  | -            |

Une carte de distribution de l'aulne glutineux en Wallonie (figure 1.6) pourrait pondérer cette prise de position montrant que l'aire naturelle de l'aulne comprend des stations de sa zone d'exclusion au sens sylvicole. Pour lever toute équivoque, la même annotation que celle qui a été adoptée pour les chênes sessile et pédonculé pourrait aussi être envisagée en regard de la carte d'aptitude des secteurs écologiques. Celle-ci préciserait que « *les aulnes peuvent être utilisés dans les*



secteurs tolérés ou exclus pour leurs qualités écologiques (rôle cultural). Ils peuvent être maintenus en forêt de protection et dans les réserves ».

### 2° Facteurs climatiques et géomorphologiques

|             |  |
|-------------|--|
| Altitude    | > 500 m → Exclusion<br>400 – 499 m → Tolérance<br>< 400 m → Optimum                              |
| Topographie | Dans le cas des zones de sources, la localisation topographique n'a forcément aucune importance. |

### 3° Facteurs édaphiques

|          |   |
|----------|---|
| Texture  | Z → Optimum   |
| Drainage | Les classes de drainage b, c et d sont fréquentes en fond de vallée, (sigles A-Gbp, A-Gcp ou A-Gdp) ; ces types pédologiques correspondent toutefois à l'optimum de croissance de l'aulne glutineux |
| Profil   | a → Optimum   |
| pHeau    | 7,5 → Optimum<br>7,5 à 8 → Exclusion (mesure de précaution en l'absence d'informations précises et face au risque de toxicité des sols basiques).   |

### 4° Groupes écologiques

Bien que notre étude n'ait pas abordé les groupes écologiques selon la méthodologie du fichier écologique présentée par DULIERE *et al.* [1995], nous proposons toutefois quelques adaptations spécifiques aux milieux humides à partir des groupes différentiels de la syntaxonomie des forêts à aulne. Elles font l'objet de la figure 6.18.

- i) **Le groupe 11 de *Luzula sylvatica***, très souvent au contact du groupe 17 de *Molinia coerulea*, pourrait être décalé vers les stations humides et faire partie de la zone de tolérance de l'aulne, en raison de sa forte présence dans les stations à argile blanche.
- ii) **Le groupe 14 de *Filipendula ulmaria***, constitué d'hydrophiles des types alluvial et marécageux, pourrait être scindé en 2 parties, l'une alluviale (n° 14), dans l'optimum de l'aulne, l'autre marécageuse (n° 18), dans la zone de tolérance.

Le sous-groupe marécageux serait constitué des espèces les plus hydrophiles du groupe de *Filipendula ulmaria* : *Carex acutiformis*, *Cirsium oleraceum*, *Crepis paludosa*, *Galium palustre*, auxquelles seraient ajoutées les 3 espèces fréquentes suivantes : *Caltha palustris*, *Iris pseudacorus*, *Lycopus europaeus*. Il serait identifié comme le **groupe marécageux de l'anmoor (n° 18)** et caractérisé par *Iris* et *Caltha*.

Le sous-groupe alluvial serait ré-identifié comme le **groupe alluvial de l'hydromull (n° 14)** et caractérisé par *Stellaria nemorum* en lieu et place de *Filipendula ulmaria*. En plus des espèces strictement alluviales, il contiendrait aussi une série d'espèces plus « généralistes » des milieux humides qui font partie de l'actuel groupe 14, comme *Filipendula ulmaria*, *Angelica sylvestris*, *Ranunculus repens*, *Valeriana repens*, ... et que l'on retrouve le plus souvent avec l'ensemble des groupes hydrophiles méso- à polytrophes (14, 15, 16 et 18).

| SOLS                | Polytrophes   | Mésotrophes  | Oligo-mésotrophes  | Oligotrophes   |
|---------------------|---|--|--|--|
| Assez secs          | 1<br>Primula veris<br>et Carex digitata   |  | 2 Silene nut.<br>3 Luzula luzuloides                         | 4<br>Deschampsia flexuosa<br>et<br>Vaccinium myrtillus |
| Moyennement humides | 6 Asplenium scolopendrium<br>7 Mercurialis perennis<br>5 Urtica dioica ♦                                  | Anemone nemorosa<br>Milium effusum<br>8<br>8 ♦ Lamium galeobd. | 9 Stellaria holostea<br>10 ♦<br>Oxalis acet.<br>Athyrium f-f | 11<br>Luzula sylvatica                                 |
| Humides             | 12 Ranunculus ficaria   |  | 13 Deschampsia cespitosa                                     |  |
| Très humides        | 14 Stellaria nemorum<br>15 Carex pendula et Equisetum telmatea<br>18 Iris pseudacorus et caltha palustris | 16 Cardamine amara   |  | 17<br>Molinia coerulea<br>et<br>Sphagnum sp.           |

— Zone de développement des espèces du groupe de *Urtica dioica* (voir texte) ♦ Annotation : voir texte

Figure 6.18. - Propositions de modifications du tableau des groupes écologiques compatibles.

(iii) **Le groupe de *Urtica dioica***, dont le développement maximal se situe dans les forêts alluviales pourrait être décalé vers les stations humides. Quant à l'aulne au sein de ce groupe, il pourrait être considéré comme en tolérance, mais avec

l'annotation suivante : « *ce groupe possède son maximum de développement dans les stations optimales de l'aulne, mais possède une plus large amplitude qui lui permet d'être présent dans les forêts plus mésophiles, inaptés à la culture de l'aulne* ».

iv) **Les groupes 8' de *Lamium galeobdolon* et 10 de *Oxalis acetosella* et *Athyrium filix-femina*** méritent l'annotation suivante : « *ce groupe est toujours abondant dans les stations de l'aulne, mais possède une plus large amplitude qui lui permet d'être présent dans les forêts plus mésophiles, inaptés à la culture de l'aulne* ».

### 5° Pathologie principale

| Agent pathogène                                       | Sites d'attaque             | Symptômes, dégâts  | Conditions d'apparition                               |
|---|-----------------------------|--|---|
| <i>Phytophthora alni</i> L.<br>(champignon racinaire) | Base du tronc               | Destruction du cambium :<br>noircissement par taches,<br>exsudats, jaunissement des<br>feuilles, mort de l'arbre | Arbres des berges,<br>au contact de l'eau<br>courante |
| <i>Zeuzera pyrina</i><br>(Zeuzère, papillon)          | Collet des<br>jeunes arbres | 1 ou 2 galerie(s)<br>longitudinale(s) dans le tronc  |   |
| <i>Cossus cossus</i> L.<br>(Gâte-bois,<br>papillon)   |                             | Jeunes arbres affaiblis, risque<br>passager de casse   |   |

## **6.9. Conclusions**

Une comparaison statistique de 135 stations forestières à aulne glutineux sur base de 17 variables écologiques abiotiques a mis en évidence une série de types de station bien individualisés par leurs caractéristiques propres et dont les répartitions géographiques sur le territoire étudié sont, pour la plupart des types, limitées.

Cette typologie abiotique, en bonne concordance avec la typologie phytosociologique existante qui lui est complémentaire, constitue une base fiable pour définir un catalogue de stations à vocation multifonctionnelle.

L'analyse de l'indice de fertilité, envisagée conjointement au sein des types de station et de l'espace factoriel dans lequel nous avons analysé les types, a permis de préciser les potentialités sylvicoles des types ainsi que l'impact des principaux facteurs écologiques (température, alimentation en eau, en air et en éléments minéraux) sur l'indice de fertilité. Ces analyses nous ont ainsi permis de mieux appréhender l'autécologie de l'aulne glutineux dans la zone d'étude.

Ainsi, nous avons démontré qu'au sein des forêts humides, souvent considérées dans leur globalité, il existe des nuances importantes en termes de stations et de potentialités forestières. Il nous reste à extraire l'ensemble des informations qui se rapportent à la région ardennaise pour développer, de manière plus approfondie, le catalogue des stations de l'aulne (chapitre 7).

**Chapitre 6 : Typologie des stations et productivité stationnelle**

|   |            |
|---|------------|
| 6.1. Introduction .....   | 203        |
| 6.2. Matériel d'étude .....   | 204        |
| 6.3. Méthodologie adoptée .....   | 206        |
| 6.4. Elaboration de la typologie des stations .....   | 208        |
| <b>Composantes</b> .....  | <b>217</b> |
| 6.5. Analyse de la productivité stationnelle .....  | 229        |
| 6.6. Interprétation des résultats en termes .....   | 239        |
| de potentialités sylvicoles des stations .....  | 239        |
| 6.7. Interprétation des résultats en terme .....  | 240        |
| d'autécologie de l'aulne glutineux .....  | 240        |
| 6.8. Discussion : apport de notre analyse à la connaissance et à la gestion de l'aulne<br>et des forêts humides ..... | 247        |
| 6.9. Conclusions .....  | 252        |

---

## Chapitre 7

### *Développement du catalogue des stations ardennaises*

---

#### **7.1. Introduction**

Dans les chapitres précédents, nous avons rassemblé les connaissances sur les fonctions écologiques des forêts humides, puis nous avons mis à jour la productivité stationnelle et les potentialités sylvicoles de l'aulne glutineux et enfin nous avons élaboré, pour la Région wallonne, une typologie des stations forestières humides.

Le présent chapitre fait le lien entre toutes ces études en développant un catalogue des stations qui apporte pour chaque type, outre une description « classique » (paramètres physiques et floristiques), une analyse spécifique des principales fonctions et sensibilités écologiques ainsi que des potentialités sylvicoles de l'aulne et plus sommairement des autres essences. De cette manière il fournit au gestionnaire les connaissances utiles à la gestion intégrée des forêts concernées.

D'un point de vue méthodologique, le passage de la typologie des stations, relativement théorique, au catalogue des stations adapté à la gestion forestière, n'est pas une démarche aussi directe qu'elle peut paraître. En effet, les données de base proviennent de descriptions nécessairement ponctuelles à l'échelle de groupes d'arbres, mais il faut en intégrer les résultats dans un espace éminemment plus variable, constitué d'écotones. C'est particulièrement le cas dans les forêts alluviales qui peuvent être constituées d'une mosaïque de sources, de marais, de sols de terre ferme plus ou moins drainés et dans laquelle le passage d'un type de station à l'autre, peut être brutal ou progressif.

Devant l'ampleur de ce travail, nous avons alors limité la démarche synthétique du catalogue au sein d'une seule région naturelle, ce qui permet de ne pas multiplier outre mesure les types de station à envisager. Pour cette raison, nous avons porté notre choix sur les 7 territoires écologiques du massif ardennais, région au sein de laquelle nous avons par ailleurs démontré l'intérêt et les potentialités de l'aulne glutineux.

Le texte qui suit est organisé en 3 paragraphes successivement consacrés :

- à la démarche méthodologique envisagée pour l'élaboration du catalogue spécifique à l'Ardenne (paragraphe 7.2) ;
- à la description approfondie et comparée des types de station ardennais (paragraphe 7.3) ;
- à la présentation synthétique des types du catalogue (paragraphe 7.4) ;
- aux principales orientations de gestion envisageables par type de station (paragraphe 7.5) ;

Les conclusions (paragraphe 7.6) seront accompagnées, à titre d'exemple, d'une fiche descriptive d'un type de station.

## ***7.2. Démarche méthodologique***

La construction du catalogue s'est appuyée sur les types ardennais de la typologie que nous avons élaborée pour la Wallonie<sup>(1)</sup>. Ces types ont été organisés selon les toposéquences pour déterminer leur place dans les principaux écotones humides. Le cas échéant, nous avons défini de nouveaux types pour obtenir un catalogue des stations en meilleure adéquation avec l'ensemble des observations de terrain. Pour ce faire, nous avons eu recours à l'ensemble des données écologiques issues des 83 placettes ardennaises du réseau d'observations et plus particulièrement aux descriptions topographiques précises à différentes échelles et aux syntaxons, descripteurs bien adaptés à l'étude des écotones.

Nous avons ensuite généralisé les résultats de notre étude en nous inspirant de notre expérience de terrain et des différentes études de station menées pendant plusieurs décennies dans le cadre des programmes de recherche conduits par le Centre de Recherche et de Promotion forestières de Gembloux<sup>(2)</sup>.

En approfondissant et en adaptant ainsi la typologie originelle, nous avons pu l'organiser en fonction des principales unités des bassins versants ardennais (plateaux et versants hydromorphes, lit majeur des cours d'eau, zones fontinales),

---

<sup>(1)</sup> Aussi appelée typologie « wallonne » ou « originelle ».

<sup>(2)</sup> Financé par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA).

Tableau 7.1. – Caractéristiques écologiques déterminantes des types de station (celles qui définissent les pôles marécageux, alluvial et temporaire apparaissent respectivement en bleu, rouge et vert).

| Pôle          | Type de station<br>(N° typologie)                  | Altitude<br>moy. (m) | Alimentation en<br>eau           | Idrain<br>(1 : drainé) | Itroph<br>(1 : oligotr.) | Humus                             | Texture                              | Classe de<br>drainage                | Régime<br>phréatique |
|---------------|--|----------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Marécageux    | <b>Tourbières acides (6)</b>                       | 448                  | Apport (75 %)<br>source (25 %)   | 3,5                    | 1,0                      | Tourbe                            | -                                    | g                                    | 6                    |
|               | <b>Marais à anmoor (11)</b>                        | 284                  | alluvial (67 %)<br>apport (33 %) | 3,3                    | 2,3                      | Anmoor                            | -                                    | g                                    | 5                    |
|               | <b>Sources à anmoor (2)</b>                        | 392                  | Source                           | 2,0                    | 2,0                      | Anmoor                            | -                                    | g                                    | 6 (66 %)<br>5 (44 %) |
| (Transitoire) | <b>Sources à mull (12)</b>                         | 320                  | Source                           | 1,8                    | 2,8                      | Mull                              | Limoneuse (60 %)<br>Argileuse (40 %) | f (40 %)<br>g (40 %)<br>h,i (20 %)   | 5                    |
|               | <b>Terrasses humides (9)</b>                       | 268                  | Alluvial                         | 3,3                    | 2,7                      | Mull                              | Limoneuse                            | f (86 %)<br>g (14 %)                 | 5 (86 %)<br>4 (14 %) |
| Alluvial      | <b>Petites rivières (3)</b>                        | 320                  | Alluvial                         | 1,1                    | 2,1                      | Mull                              | Sableuse                             | e,f (88 %)<br>b (12 %)               | 4 (63 %)<br>2 (37 %) |
|               | <b>Terrasses basses (5)</b>                        | 282                  | Alluvial                         | 1,6                    | 2,3                      | Mull                              | Limoneuse                            | e,f (84 %)                           | 2 (67 %)<br>4 (33 %) |
|               | <b>Terrasses hautes (8)</b>                        | 243                  | Alluvial                         | 1,7                    | 3,0                      | Mull                              | Limoneuse (67 %)<br>Sableuse (33 %)  | e,f (50 %)<br>c,d (50 %)             | 1                    |
| Temporaire    | <b>Argiles blanches à<br/>nappe temporaire (1)</b> | 414                  | Apport (86 %)<br>Pluie (14 %)    | 3,0                    | 1,4                      | Mull (45 %)<br>Moder mor (55 %)   | Limoneuse (64 %)<br>Argileuse (36 %) | h,i                                  | 7 (45 %)<br>8 (55 %) |
| (Transitoire) | <b>Argiles blanches à<br/>nappe permanente (7)</b> | 476                  | Source (57 %)<br>Apport (43 %)   | 2,1                    | 1,0                      | Tourbe (14 %)<br>Moder mor (86 %) | Limoneuse (57 %)<br>Argileuse (43 %) | h,i (72 %)<br>e,f (14 %)<br>g (14 %) | 4 (71 %)<br>1 (29 %) |



tout en maintenant sa structure initiale, définie à partir des 3 pôles marécageux, alluvial et temporaire. Les types du catalogue obtenu par cette démarche sont ainsi plus facilement identifiables sur le terrain que ceux de la typologie originelle, à caractère plus théorique, établie sur l'ensemble de la Wallonie.

### ***7.3. Description approfondie et comparée des types de station ardennais***

A partir de la distribution géographique des 14 types de station de la typologie wallonne (figure 6.12), nous avons retenu les 10 types présents en Ardenne, à partir desquels nous avons établi les types du catalogue des stations ardennaises. Le tableau 7.1 présente les caractéristiques écologiques moyennes déterminantes de ces 10 types. Comme le montre ce tableau, ceux-ci peuvent être distribués en fonction des « pôles » écologiques mis en évidence au chapitre précédent.

Les données topographiques montrent que la plupart des types de stations ont une répartition géographique spécifique au sein des bassins versants. Ainsi, d'une manière schématique, on peut distinguer 3 principales localisations pour les stations humides :

- les plateaux et grands versants à pente douce, qui accueillent principalement les tourbières et les zones d'argiles blanches ;
- les replats, bas de versant ou têtes de vallon qui sont le siège de stations marécageuses ou fontinales (sources ponctuelles, zones fontinales) de faible étendue ;
- le lit majeur des cours d'eau, principalement constitué d'une mosaïque de stations alluviales et marécageuses disposées selon la microtopographie.

#### **7.3.1. Ecotones des plateaux et grands versants**

Cinq types de station se rencontrent sur les plateaux et grands versants à pente douce : les tourbières, les marais à anmoor, les argiles blanches à nappe temporaire ou permanente et les sources. Leur disposition est sous la dépendance de

la topographie et de la profondeur de l'horizon pédologique imperméable constitué généralement d'un fragipan ou d'un horizon d'argile lourde.

Sur les versants à faible pente et à sol peu perméable, les précipitations saturent rapidement le sol et, faute de pouvoir s'infiltrer profondément, s'écoulent lentement vers l'aval. C'est la zone *d'argiles blanches*.

Dès que la pente diminue (cuvettes, replats) ou que l'horizon imperméable devient plus superficiel, le volume d'eau sature totalement le sol et peut donner lieu à une zone marécageuse, de type *tourbière* ou *marais à anmoor* selon les conditions trophiques et climatiques.

Ponctuellement, des *sources* peuvent alimenter chacune de ces unités d'une eau mieux minéralisée que celle de la nappe superficielle. Ce sont les zones préférentielles de l'aulne parmi les stations du plateau.

La figure 7.1 symbolise les relations existant entre ces différents types de station du plateau ardennais.

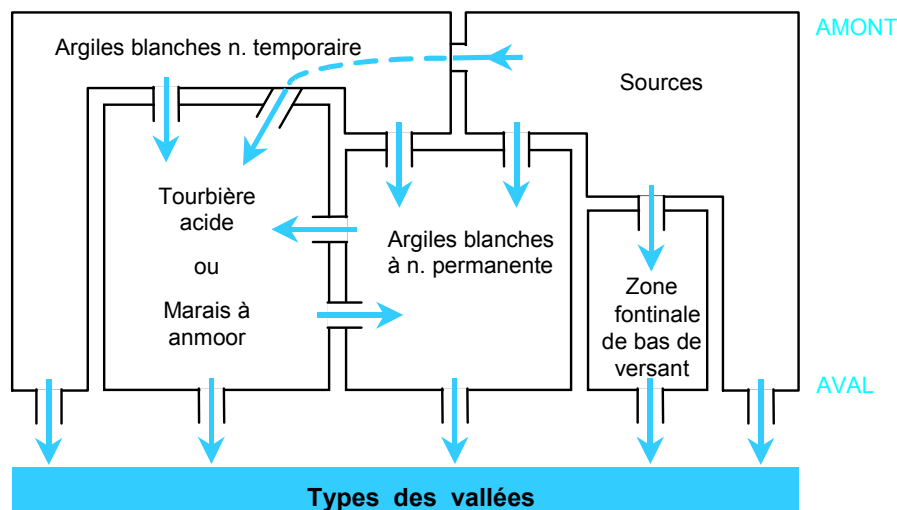


Figure 7.1. – Relations entre les types de station des plateaux et versants (les flèches bleues symbolisent les écoulements hypodermiques d'eau).

### 1° Argiles blanches

Les sols à argiles blanches, imperméables en profondeur, restent généralement imbibés d'eau durant les périodes pluvieuses, particulièrement en hiver. Elles sont alors le siège de conditions anaérobiques, tandis que durant la

période de végétation, l'évapotranspiration et l'interception des pluies par la végétation peuvent dans certains cas faire régner des conditions xériques dans les horizons superficiels.

Selon l'ampleur du phénomène d'imbibition – ressuyage que nous avons mesuré en piézomètres, nous avons divisé les 2 classes d'argiles blanches de la typologie wallonne selon les 3 types suivants :

- à nappe phréatique fugace,
- à nappe phréatique saisonnière,
- à nappe phréatique permanente.

• ***Argiles blanches à nappe fugace***

Les argiles blanches à nappe fugace sont définies par une imbibition du sol en relation étroite avec les épisodes pluvieux, se ressuyant rapidement, même en période hivernale. Ce phénomène, difficilement appréciable par un examen ponctuel du sol<sup>(3)</sup>, se traduit plus nettement dans la végétation, avec la présence, ça et là, de *Pteridium aquilinum*. La végétation potentielle de ce type est une chênaie à bouleau pubescent (*Betulo pubescentis* – *Quercetum roboris*) dans laquelle l'aulne est occasionnel.

• ***Argiles blanches à nappe saisonnière***

Dans ce type de station, l'imbibition du sol est plutôt de type saisonnier, avec un niveau de la nappe élevé durant l'hiver et un ressuyage printanier progressif, ponctué de petites périodes d'imbibition estivale lors de phases très pluvieuses. Ces conditions d'humidité se traduisent dans la végétation par l'abondance d'espèces hydroclines, et notamment des fougères « en corbeille » *Dryopteris dilatata* et *carthusiana*, voire *Athyrium filix-femina* dans les sites à tendance mésotrophe, tandis que *Pteridium aquilinum* disparaît. La végétation forestière potentielle relève alors de l'aulnaie – chênaie pédonculée (*Alno glutinosae* – *Quercetum roboris*) dans sa variante la moins humide.

• ***Argiles blanches à nappe permanente***

En raison de la position topographique de la station ou, le plus souvent, de sa connection avec des sources, une tourbière ou un marais, les argiles blanches à nappe permanente sont alimentées en eau de manière continue. Si,

---

<sup>(3)</sup> Les traces d'hydromorphie, souvent présentes dès la surface, peuvent être le reflet du régime hydrique ancien du sol.

morphologiquement, le sol ne se distingue pas nettement des 2 autres types d'argiles blanches, en revanche, la flore indique nettement l'humidité constante par la présence de sphaignes (*Sphagnum sp.*) et la station relève de l'aulnaie – chênaie dans sa variante la plus humide (*sphagnetosum*) voire de l'aulnaie oligotrophe (*Carici laevigatae-Alnetum*).

### **2° Tourbière acide et marais à anmoor**

La **tourbière**, disposée en zone plane ou en cuvette sur les sols peu perméables du plateau, collecte les eaux de ruissellement et les écoulements hypodermiques, voire les petits écoulements de surface dus aux sources situées en sa périphérie ou en son sein. Les conditions biotiques extrêmes de ces stations (forte humidité, climat froid, oligotrophie prononcée) sont peu favorables à la végétation forestière. Il s'y développe une boulaie pubescente de très faible productivité [PECHEUR, 1995] et ce n'est qu'aux abords des venues aquifères, plus minéralisées, ou en périphérie de la tourbière que se développe l'aulne. Dans les stations observées, l'épaisseur de la tourbe ne dépasse jamais 1 m, tandis que la présence parmi les sphaignes et la molinie de quelques espèces méso-oligotrophes (*Deschampsia cespitosa*, *Ajuga reptans*, *Carex paniculata*, ...) traduit une meilleure alimentation minérale ; ces stations relèvent de la boulaie pubescente à aulne (*Vaccinio-Betuletum pubescentis alnetosum*).

Dans un contexte moins froid (altitudes inférieures à 400 m) et plus riche (Ardenne méso-oligotrophe : assises de l'Emsien et du Siegenien moyen ou supérieur), la tourbière cède généralement la place à un **marais à anmoor**, par ailleurs aussi plus fréquemment lié aux replats du versant et aux zones de sources que les tourbières. Ce type relève de l'aulnaie marécageuse (*Alnion*). Selon son niveau trophique, il s'agit du *Carici laevigatae-Alnetum* (oligotrophe) ou, plus fréquemment, du *Carici elongatae-Alnetum* (mésotrophe) dans leurs variantes typiques.

### **7.3.2. Stations ponctuelles des versants**

De petites zones humides peuvent aussi se développer à l'occasion de replats ou de zones de source au sein de grands versants, reproduisant ainsi, de manière très locale, l'un ou l'autre type de station du plateau (petite zone d'argile blanche à nappe permanente, voire tourbière ou marais localisé). En particulier, dans

les parties inférieures des grands versants, se rencontrent des stations humides très caractéristiques, souvent en contact avec les types de vallées (figure 7.1). Ce sont des zones hétérogènes constituées d'une mosaïque de sources et de sols intercalaires plus ou moins humides : les *zones fontinales*.

La végétation potentielle de ce type de station relève de 2 associations différentes selon le niveau trophique des sols : l'*Alno-Quercetum* (sols oligotrophes) et le *Stellario-Carpinetum* (sols mésotrophes). L'hétérogénéité du régime phréatique de la station se traduit aussi dans la végétation par la coexistence de groupes écologiques à caractère hydrophile et mésophile.

### 7.3.3. Ecotones des vallées

Nous avons reconnu 7 types de station au sein des vallées, dont 5 sont typiquement alluviaux. Ils se répartissent dans le lit majeur selon l'altitude (répartition longitudinale) et selon la distance au lit mineur (répartition transversale).

Comme le montre la figure 7.2, la rivière trouve son origine soit dans un marais, une tourbière ou une zone d'argiles blanches dont elle est le collecteur, soit au sein d'un vallon alimenté par une source ou par des apports d'eau variables provenant des versants. Lorsque ce petit cours d'eau prend de l'importance, il développe des terrasses alluviales, d'abord humides réduites et discontinues, mais qui prennent ensuite de l'ampleur au fur et à mesure que la rivière s'élargit. Ainsi, les basses vallées des grosses rivières ardennaises (Lesse, Semois, Amblève, Ourthe, ...) ont un lit majeur étendu et développé dont la topographie est responsable de la différenciation des types de station des vallées.

Comme le montre la figure 7.3, ces types s'organisent principalement selon un transect perpendiculaire à l'axe du cours d'eau. En effet, schématiquement, la rivière est bordée d'un *bourrelet alluvial*, qui forme une terrasse surélevée par rapport au niveau moyen des eaux et qui est de ce fait bien drainée en surface. En retrait du cours d'eau s'étire une *dépression marginale* baignée par la nappe phréatique alluviale et par les apports d'eau éventuels (sources ou écoulements du versant). Ainsi, le lit majeur des rivières est constitué d'une mosaïque dont l'organisation est déterminée par l'ampleur de la différenciation de ces unités topographiques et par les apports d'eau éventuels en provenance des versants ou des sources.

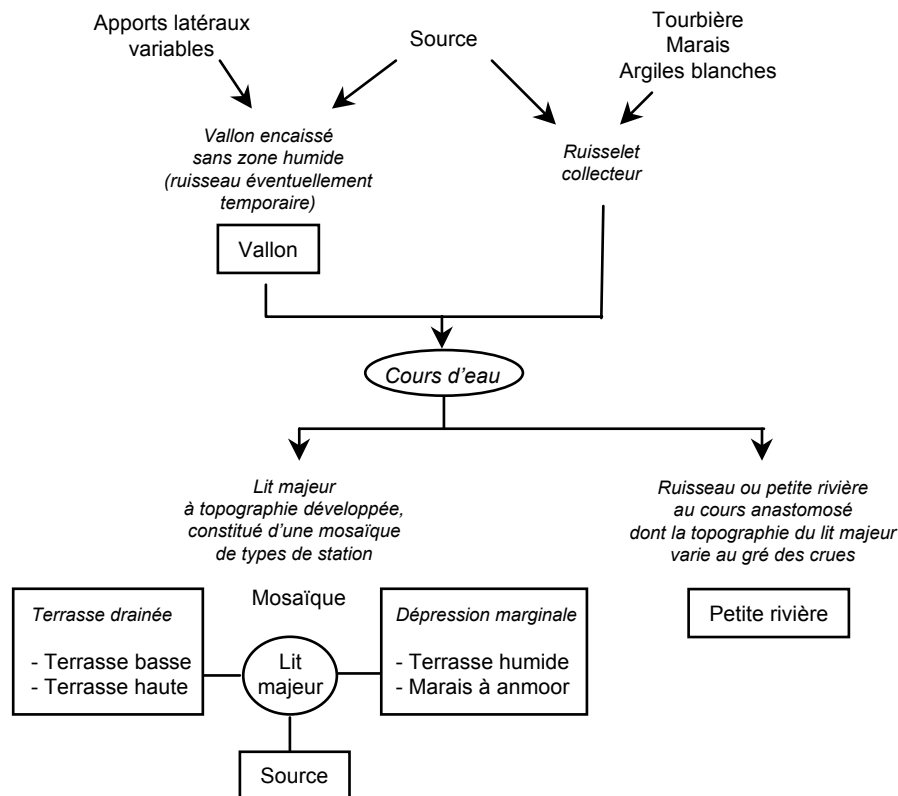


Figure 7.2. – Organisation des types de station des vallées.

### 1° Types de terrasses drainées

Le bourrelet alluvial, zone surélevée du lit majeur et donc bien drainée par le cours d'eau (IDRAIN = 1,6), est constitué d'un matériaux plutôt grossier, sableux à limoneux léger bien aéré en surface. En profondeur, le bourrelet alluvial est baigné par l'eau de la nappe alluviale qui ne l'inonde jamais jusqu'en surface, excepté lors de fortes crues passagères (régimes phréatiques 1, 2 ou 4). D'un point de vue pédologique, il s'agit donc de conditions de croissance idéales pour l'aulne glutineux.

Par extension, nous avons considéré parmi ces types les terrasses surélevées des larges vallées, ne consistant pas en bourrelets alluviaux proprement dits, mais résultant plutôt du creusement du lit mineur par la rivière, et dont les principales

caractéristiques sont comparables (régime phréatique en particulier) à celles des bourrelets alluviaux.

Selon l'épaisseur du sol aéré, qui va généralement de pair avec la fréquence des inondations, nous avons distingué 2 types de station : les *terrasses basses* et les *terrasses hautes*.

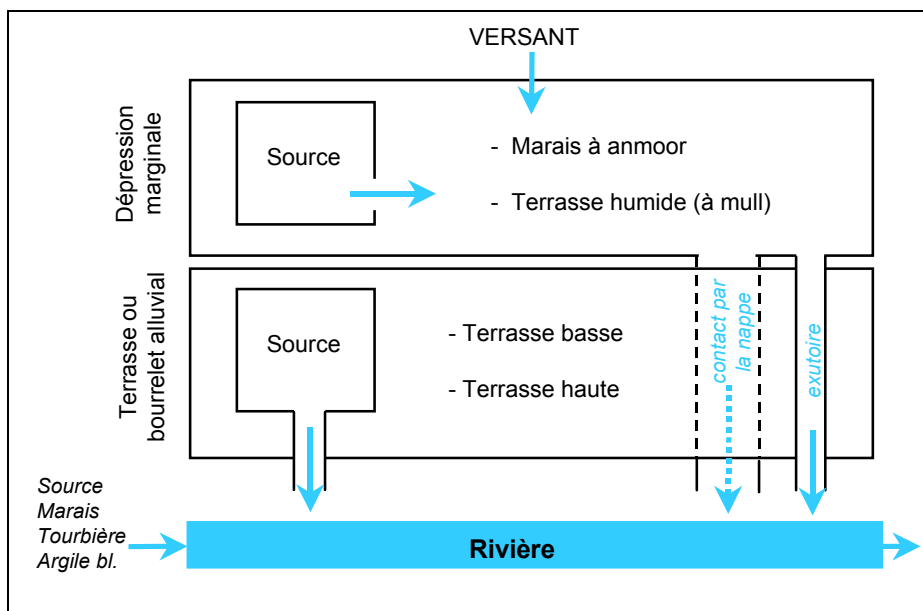


Figure 7.3. - Relations entre les types de station du lit majeur des rivières ardennaises (les flèches bleues symbolisent les écoulements d'eau).

#### • Terrasses basses

Les terrasses basses sont principalement caractérisées par un régime phréatique de type 2, voire 4. Cela signifie que la nappe fluctue entre 15 et 60 cm de profondeur (régime phréatique 2), plus rarement entre 5 et 60 cm (régime phréatique 4). Les inondations passagères de la station surviennent donc assez régulièrement lors des crues, parfois avec un courant assez violent.

Dans les vallées plus développées, caractérisées par des terrasses alluviales étendues, ce type peut aussi se rencontrer à l'écart de la rivière, aux endroits où la terrasse est moins élevée.

L'humidité du sol et la fréquence des crues favorisent la dominance de l'aulne glutineux, de telle sorte que la végétation naturelle potentielle des terrasses

basses relève de l'aulnaie alluviale à stellaire (*Stellario-Alnetum*) dans sa variante ardennaise à *Athyrium*.

#### • *Terrasses hautes*

Les terrasses hautes sont le plus souvent liées aux grosses rivières, et proviennent plutôt du creusement du lit que d'un bourrelet alluvial. Elles peuvent aussi, localement, longer des petits cours d'eau, mais dans ce cas, elles prennent peu d'ampleur et se confondent avec les bas de versant. Ce type est principalement caractérisé par un régime phréatique de type 1, c'est-à-dire que la nappe alluviale fluctue entre 30 et 150 cm de profondeur, laissant la plupart du temps, en période de végétation, près d'un mètre de sol ressuyé en surface. Les inondations sont exceptionnelles, plutôt décennales qu'annuelles.

En raison de leur position basse dans le bassin versant (altitude moyenne de 243 m) liées aux grosses rivières, les terrasses hautes se caractérisent par un sol très épais constitué exclusivement d'alluvions dont le niveau trophique est élevé (ITROPH = 3) et par un climat relativement doux pour l'Ardenne.

Ces conditions écologiques favorables confèrent aux terrasses hautes une très bonne fertilité, permettant la culture des essences les plus exigeantes qui ne seront limitées que par les conditions climatiques (gelées hors-saison surtout).

Ce type de station correspond aux aulnaies alluviales les moins humides (*Stellario-Alnetum athyrietosum*) et à la chênaie pédonculée à renouée bistorte (*Polygono bistortae-Quercetum roboris*).

#### 2° *Types de la dépression marginale*

La position topographique de la dépression marginale est responsable des mauvaises conditions de drainage du sol (IDRAIN = 3,3) qui caractérise les types de station qui lui sont liés. En effet, plusieurs facteurs concourent à l'accumulation d'eau dans les dépressions marginales :

- le bourrelet alluvial ou la terrasse plus haute empêche l'eau de s'écouler rapidement vers le cours d'eau ;
- l'altitude du sol par rapport au niveau de la nappe alluviale est trop faible, de telle sorte que le sol ne peut être ressuyé en surface ;
- souvent située en bordure de terrasse au pied des versants, la dépression marginale accumule les eaux qui s'écoulent du versant (ruissellement ou zones de sources).



Selon l'ampleur de l'accumulation d'eau on distingue les *marais à anmoor* et les *terrasses humides à mull*. Le passage d'un type à l'autre est généralement brutal, dépendant de modifications infimes de la microtopographie de la terrasse. Fréquemment, le marais à anmoor occupe d'anciens chenaux de la rivière, tandis que la terrasse humide apparaît comme une zone de transition vers les terrasses drainées ou le versant. Dans les petites vallées, lorsque les 2 types sont étroitement imbriqués, la végétation arborescente dont le couvert est continu ne prend pied que sur les zones à mull, laissant plutôt la végétation herbacée (*Carex acutiformis*, *Scirpus sylvaticus*, *Filipendula ulmaria*, ...) coloniser densément la zone plus marécageuse.

#### • *Marais à anmoor*

Le marais à anmoor se caractérise par un sol constamment noyé par la nappe (régime phréatique 5, avec un étiage estival de moins de 40 cm) qui est responsable de l'accumulation de la matière organique sous forme d'anmoor.

Ce type est rarement étendu, cédant rapidement la place aux terrasses humides. Contrairement aux marais du plateau, dans les vallées, le marais à anmoor, bien que relevant de l'*Alnion stricto sensus*, et principalement du *Carici elongatae-Alnetum*, possède souvent quelques transgressives du *Carici remotae-Alnetum*, voire de l'*Alno-Padion*.

#### • *Terrasse humide*

La terrasse humide est un type fréquent le long des ruisselets et ruisseaux. En effet, le chenal de ces petits cours d'eau se modifie facilement au gré des crues et des embacles (chablis) et est de ce fait peu profond. La nappe phréatique est donc relativement superficielle dans l'ensemble du lit majeur et le régime phréatique est de type 5 à étiage supérieur à 40 cm, voire de type 4. Ainsi, excepté sur les petits bourrelets alluviaux (terrasses basses), et dans les dépressions les plus profondes souvent liées aux anciens chenaux (marais à anmoor très localisés), le lit majeur relève du type des terrasses humides.

En dehors des conditions topographiques qui viennent d'être décrites, ce type de station se rencontre aussi dans les zones les plus basses des terrasses étendues des grandes vallées.

L'ensemble des conditions écologiques des terrasses humides convient à l'aulne glutineux tout en limitant le développement des autres essences de première grandeur qui ne supportent pas le régime phréatique de type 5. L'aulne glutineux forme ainsi des peuplements purs qui s'intercalent entre les peuplements plus

mélangés des terrasses drainées où le chêne pédonculé, le charme et l'érable sont fréquents.

Le caractère intermédiaire de ce type de station est mis en évidence par la flore relevant typiquement du *Carici remotae-Alnetum* dans sa variante à *Athyrium*.

### 3° Petites rivières

Le type des petites rivières à cours rapide est constitué d'une mosaïque de petits bourrelets alluviaux, de petites dépressions et de chenaux plus ou moins actifs selon le niveau des eaux. Il est à rapprocher des terrasses basses, mais ici, la topographie du lit majeur est plus développée et le chenal principal plus profond. En conséquence, le régime phréatique dominant est de type 4 (ressuyé constant), c'est-à-dire que la nappe fluctue entre 10 et 60 cm de profondeur en relation directe avec le niveau du cours d'eau et se situe généralement au-delà de 40 cm pendant toute la période de végétation. Les inondations sont fréquentes, violentes et de courte durée, remodelant régulièrement la topographie du chenal et du lit majeur.

Le sol, de 30 à 80 cm d'épaisseur, est essentiellement léger, graveleux à limono-sableux, reposant sur le lit de galets dans lequel circule rapidement l'eau de la nappe alluviale ; il est réduit au niveau de l'étiage de la nappe.

La végétation naturelle relève strictement du *Stellario-Alnetum athyrietosum*. La fréquence des inondations violentes favorise largement l'aulne glutineux ; le frêne, l'érable sycomore et le chêne pédonculé étant confinés en bas de versant au contact de l'aulnaie.

### 4° Sources

Des sources hélocrènes d'étendue variable, de quelques dizaines de m<sup>2</sup> à quelques ares se rencontrent fréquemment sur les terrasses alluviales à la base des versants.

Le régime phréatique et les conditions climatiques déterminent le type de source. Le régime phréatique de type 6 (étiage de moins de 15 cm) conduit à un humus de type anmoor, tandis qu'un régime phréatique de type 5 (étiage entre 20 et 60 cm) peut conduire à un humus de type mull ou anmoor selon les conditions trophiques et surtout climatiques.

Ainsi, dans les dépressions marginales, on rencontre le plus fréquemment le type à anmoor, qui peut se mêler au marais à anmoor, tandis qu'en présence d'un exutoire ou d'une pente, l'humus évolue plutôt vers le type à mull, excepté en altitude (au-delà de 350 m).

#### • Sources à mull

Les sources à mull, les plus fréquentes en vallées, sont caractérisées par un hydromull riche en matière organique, baigné par l'eau (régime phréatique 5) sur un sol réduit parfois jusqu'en surface (classes de drainage f ou g).

Il s'agit d'un type relativement localisé (1 ou 2 ares) au sein d'une terrasse drainée, généralement en pente. A cet endroit de la terrasse, se développe la flore caractéristique de la variante fontinale à *Chrysosplenium* du *Carici remotae-Alnetum*, riche en espèces rhéophiles (*Chrysosplenium oppositifolium*, *Cardamine amara*) voire alluviales (*Impatiens noli-tangere*) et dont les plus fidèles de l'*Alnion* sont absentes (*Lycopus europaeus*, *Iris pseudacorus*).

#### • Sources à anmoor

Ce type, beaucoup plus fréquent en versant que dans les vallées, est caractérisé par une épaisse couche d'anmoor (40 à 80 cm) reposant sur un sol totalement réduit. L'eau noie le sol en permanence en raison de l'apport d'eau à débit constant. Les sources à anmoor sont généralement plus étendues que les sources à mull et peuvent baigner totalement une portion de terrasse alluviale. Elles ont de ce fait un caractère plus marécageux.

La flore des sources à anmoor relève du *Carici remotae-Alnetum* ou du *Carici laevigatae-Alnetum*, principalement dans leurs sous-associations fontinales, mais dont le caractère marécageux est bien développé.

### 5° Vallon

Afin de représenter au mieux l'éventail des stations les plus courantes de l'aulne glutineux, nous avons jugé opportun d'adjoindre à la typologie définie par notre analyse ce type de station de l'aulne, qui constitue un élément linéaire assurant la liaison entre les sources des versants et les premiers types de station décrits sur les terrasses des cours d'eau.

En effet, les ruisselets ou petits ruisseaux à forte pente, s'écoulant dans un vallon étroit sans terrasses développées, constituent une station fréquemment occupée par l'aulne, en mélange avec de l'érable ou du frêne en basse altitude, plus ou moins intimement mélangés aux essences des stations mésophiles des versants (hêtre, chêne sessile, charme ou autres essences cultivées).

### 7.4. *Présentation synthétique du catalogue*

A partir de la typologie originelle, enrichie d'une analyse plus locale au sein des bassins versants ardennais, nous avons finalement décrit les 12 types de station qui composent le catalogue. Ces types peuvent être regroupés en 4 familles :

- les **marais et tourbières** (M) occupant des zones planes, mal drainées et donc très humides (régimes phréatiques 5 et 6), localisées sur le plateau ou, dans le cas des marais, également en vallées :

- M1 Tourbière acide
- M2 Marais à anmoor

- les **argiles blanches** (A), stations hydromorphes typiques du plateau ardennais, différenciées par leur régime phréatique :

- A1 Argiles blanches à nappe permanente
- A2 Argiles blanches à nappe saisonnière
- A3 Argiles blanches à nappe fugace

- les **types des vallées** (V), occupant le lit majeur des cours d'eau :

- V1 Vallon
- V2 Petite rivière
- V3 Terrasse humide
- V4 Terrasse basse
- V5 Terrasse haute.

- les **types liés aux sources** (S), dont l'un se situe presque indifféremment dans le bassin versant (source ponctuelle à mull ou à anmoor), tandis que l'autre est plus fréquemment lié aux bas de versant (zone fontinale) :

- S1 Source ponctuelle
- S2 Zone fontinale.

La figure 7.4 présente ces types dans un organigramme qui peut tenir lieu de clef de détermination des types.

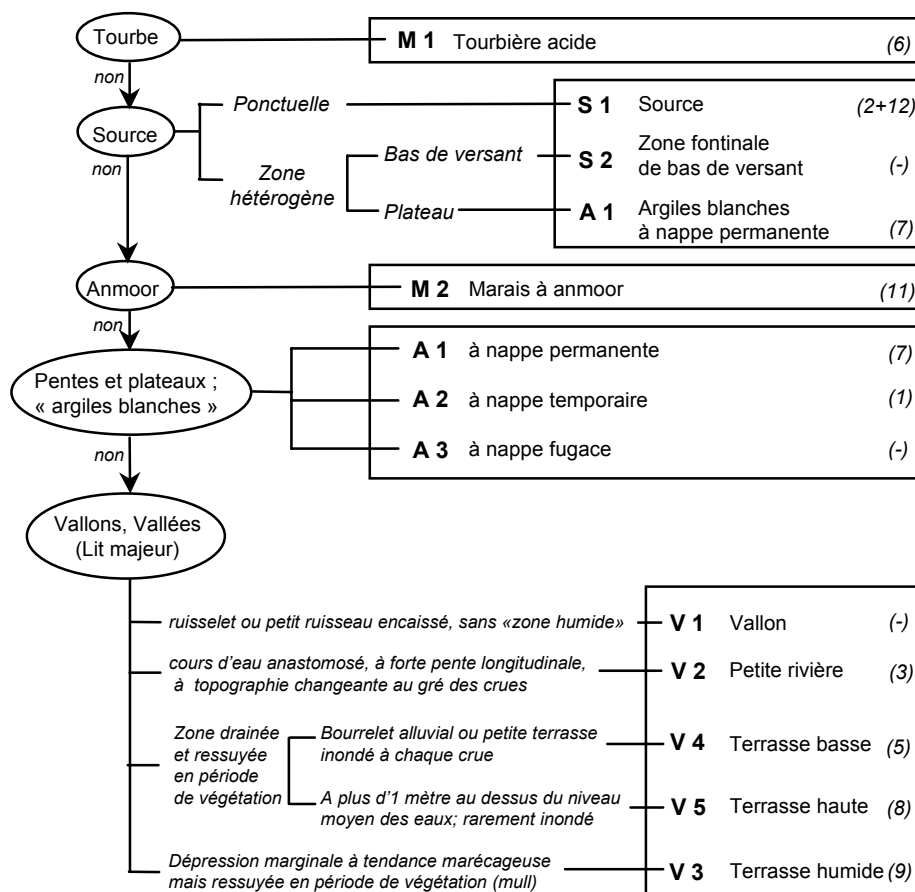


Figure 7.4. – Organigramme du catalogue des stations ardennaises (entre parenthèses et en italique : les numéros des types correspondants dans la typologie wallonne).

On notera, particulièrement dans le cas des vallées et des sources, que sur le terrain, les stations occupent parfois de très petites surfaces et s’imbriquent les unes dans les autres. La notion d’écotone prend alors de l’importance, à tel point que nous avons défini 2 types de station en tant que tel :

- les *petites rivières*, constituées d’une mosaïque serrée de petits bourrelets alluviaux (terrasses basses), de petites dépressions marginales (terrasses humides) et de bras d’eau ;
- les *zones fontinales*, constituées d’une mosaïque de sources, de sols très humides et de sols intercalaires à caractère mésophile.

## 7.5. Types de station et gestion forestière

Dans les chapitres précédents, nous avons envisagé les fonctions écologiques (paragraphe 1.4) et productives (chapitre 5 et paragraphe 6.5) de l'aulne glutineux et de ses forêts. Nous allons maintenant relier ces données aux types de stations du catalogue.

### 7.5.1. Les fonctions écologiques

Le tableau 7.2, reproduit du paragraphe 1.4, énumère les principales fonctions écologiques des forêts humides et particulièrement de l'aulne glutineux.

Tableau 7.2. – Principales fonctions écologiques des forêts humides et de l'aulne glutineux en particulier.

| Domaines           | Fonctions  |
|--------------------|--|
| Biodiversité       | . Spécificité et diversité des espèces et des habitats   |
| Sols               | . Fertilisation (azote) et accélération du turn-over<br>. Structuration du sol (enracinement)<br>. Drainage biologique (enracinement et transpiration) |
| Hydrologie         | . Régulation des régimes hydrologiques<br>. Compatibilité avec l'expansion des eaux de crues dans le lit majeur  |
| Qualité des eaux   | . Dénitrification<br>. Filtration  |
| Ecosystème rivière | . Régulation de la luminosité<br>. Source nutritionnelle<br>. Fixation des berges  |

Pour espérer profiter de ces fonctions de manière optimale, le gestionnaire doit maintenir la fonctionnalité des écosystèmes et donc tenir particulièrement compte de leur sensibilités. Il est ainsi amené à respecter un certain nombre de contraintes sylvicoles. Celles-ci consistent en la limitation de techniques (drainage, fertilisation, ...) ou en l'adaptation des choix et traitements sylvicoles (choix des essences, régimes, révolutions, exploitation, ...).

D'autre part, nous avons vu dans le premier chapitre que certaines de ces fonctions ont une importance variable selon les types de station concernés (tableau 1.13 du paragraphe 1.4).

Le tableau 7.3 établit la correspondance entre les principales familles de stations et leurs principales fonctions et sensibilités potentielles, puis propose une série de techniques à limiter. Ces contraintes fixent ainsi le « cadre sylvicole » général des familles de stations.

### 7.5.2. Fonction de production de bois

Grâce aux analyses que nous avons effectuées (chapitres 5 et 6), nous pouvons associer, pour l'aulne glutineux, des objectifs sylvicoles compatibles à chacun des types de station, ventilés par classe d'altitude (tableau 7.4).

Tableau 7.4. – Objectifs sylvicoles compatibles avec les types de station : cas de l'aulne glutineux (A : production de qualité en cycle court ; B : en cycle long ; C : non envisageable).

| Types de station                     | Classes d'altitude |             |         |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|---------|
|                                      | < 350 m            | 350 à 500 m | > 500 m |
| M1 : Tourbières                      | C                  | C           | C       |
| M2 : Marais à anmoor                 | B                  | C           | C       |
| A1 : Argiles blanches à nappe fugace | -                  | C           | C       |
| A2, A3 : Autres argiles blanches     | -                  | B           | C       |
| V : Types de vallées                 | A                  | B           | -       |
| S1 : Sources ponctuelles             | A / B              | B           | C       |
| S2 : Zones fontinales                | A                  | B           | -       |

Nous ne disposons pas de données aussi précisément référencées pour les autres essences feuillues qui peuvent être cultivées dans les forêts humides. D'après le fichier écologique des essences [MRW, 1991], la production de quelques feuillus est compatible avec certaines forêts de l'aulne ; ces données étant par ailleurs confirmées par leur « distribution phytosociologique » [NOIRFALISE, 1984]. Nous pouvons ainsi établir le tableau 7.5.

Tableau 7.3. – Fonctions écologiques des forêts humides selon les familles de stations et sensibilités particulières susceptibles d'affecter la fonctionnalité des stations.

| <i>Familles de stations</i>     | <i>Fonctions principales de la forêt</i>   | <i>Sensibilités particulières des stations</i>   | <i>Techniques à limiter</i>  |
|---------------------------------|--|--|--|
| Tourbières et marais du plateau | - régulation hydrologique  | - diminution du stock d'eau et du pouvoir tampon   | - drainage du sol  |
| Argiles blanches du plateau     | - amélioration et protection des sols<br>- régulation hydrologique   | - dégradation chimique et physique des sols<br>- diminution du pouvoir tampon  | - intensification de la sylviculture<br>- drainage du sol<br>- simplification de la composition et de la structure de la végétation  |
| Vallées                         | - régulation hydrologique (notion d'écrêtement)<br>- filtration et épuration des eaux<br>- fonctionnement de l'écosystème rivière<br>- protection des sols | - pollution des nappes<br>- modification de l'écosystème rivière (lumière, stabilité des berges, ...)<br>- dégradation de la fonctionnalité des sols | - simplification de la composition et de la structure de la végétation<br>- drainage du sol<br>- exploitation lourde (orniérage, compactage)<br>- maintien d'un couvert dense<br>- fertilisation |
| Sources                         | - filtration et épuration des eaux   | - pollution des eaux   | - cf vallées   |
| Toutes stations                 | - maintien ou amélioration de la biodiversité  | - banalisation de la flore et des habitats   | - drainage du sol<br>- simplification de la structure et de la composition de la végétation<br>- fertilisation   |



Le tableau 7.5 montre qu'en matière de production de bois il n'existe pas beaucoup d'alternatives, parmi les essences feuillues, à la culture de l'aulne glutineux. De surcroît, d'après les quelques données bibliographiques (CLAESSENS *et al.*, 1993 ; PECHEUR, 1993 ; RONDEUX et PAUWELS, 1995 ; ANONYME, 1998), seuls le bouleau verruqueux, le frêne et l'érable sycomore peuvent atteindre, dans les stations les moins humides de la basse Ardenne, des niveaux de productivité et de qualité de la production comparables à l'aulne glutineux.

Tableau 7.5. – *Essences feuillues compatibles avec la production de bois selon les types de station à aulne (entre parenthèses, stations mésotrophes de basse altitude uniquement).*

| Essences feuillues de production | Marais et tourbières |    | Argiles blanches |    |    | Vallées |    |    |     |    | Sources et zones fontinales |     |
|----------------------------------|----------------------|----|------------------|----|----|---------|----|----|-----|----|-----------------------------|-----|
|                                  | M1                   | M2 | A1               | A2 | A3 | V1      | V2 | V3 | V4  | V5 | S1                          | S2  |
| Bouleau pubescent                | X                    | X  |                  | X  | X  |         | X  | X  | X   |    | X                           | X   |
| Bouleau verruqueux               |                      | X  | X                | X  | X  | X       | X  | X  | X   | X  | X                           | X   |
| Chêne pédonculé                  |                      |    | X                | X  | X  | X       | X  | X  | X   | X  |                             | X   |
| Chêne sessile                    |                      |    | X                |    |    | X       |    |    |     | X  |                             |     |
| Frêne                            |                      |    |                  |    |    | X       | X  |    | (X) | X  |                             | (X) |
| Érable sycomore                  |                      |    |                  |    |    | X       | X  |    | (X) | X  |                             | (X) |

Par contre, parmi les résineux, l'épicéa, très fréquemment planté dans les stations de l'aulne, offre une production de bois nettement supérieure dans beaucoup de types de station, même si la stabilité de ses peuplements n'est assurée que dans les stations les moins humides. Pour fixer les idées, nous avons mis en parallèle notre typologie avec celles des pessières humides établies par DAGNELIE *et al.* [1970] et NOIRFALISE et THILL [1975], et au sein de laquelle LAURENT *et al.* [1988] ont évalué les niveaux de productivité (tableau 7.6).

De surcroît, l'impact du climat sur l'indice de fertilité des pessières est nettement moindre. Ainsi, la production de l'épicéa reste remarquablement élevée dans les stations du plateau, notamment dans les argiles blanches.

Dans les stations de l'aulne, il y a donc 2 alternatives de production de bois qui engagent le sylviculteur dans des orientations d'aménagement nettement divergentes : d'une part, la production d'aulne glutineux, voire dans les stations des vallées les plus « mésophiles », d'érable, de frêne ou de chêne et, d'autre part, la production d'épicéa.

Tableau 7.6. – Productivité comparée de l'aulne glutineux et de l'épicéa commun (estimée par l'accroissement annuel moyen en volume à 50 ans) dans les types de station du catalogue.

| Types de station         | Types de pessière correspondants | Productivité moyenne (m <sup>3</sup> /ha/an) |        |
|--------------------------|----------------------------------|--|--------|
|                          |                                  | aulne  | épicéa |
| Argiles blanches A2, A3  | PT1                              | 4-6  | 11,5   |
| Tourbières M1            | PT3                              | 1-3  | 9,2    |
| Marais à anmoor M2       | PH                               | 2-6  | 9,2    |
| Vallées : V1, V2, V4, V5 | Pa                               | 6-8  | 15,4   |

### 7.5.3. Voies générales de gestion forestière

Nous avons vu dans le premier chapitre que la végétation naturelle potentielle, constituée principalement à base d'aulne, de bouleau et de chêne, est celle qui remplit le mieux les fonctions écologiques que l'on peut attendre des forêts humides et en particulier, dans le cas de non-intervention humaine, la fonction de maintien et d'amélioration de la biodiversité.

Selon les types de station et leur altitude, l'aulne y produit de l'ordre de (1)3 à 8 m<sup>3</sup> de bois/ha/an vers 50 ans. En cas d'interventions sylvicoles, une partie de ce bois peut être valorisée dans des filières à haute valeur ajoutée.

A l'opposé, la forêt la plus productive dans les stations de l'aulne est souvent la pessière, qui produit, dans les mêmes délais, 2 à 4 fois plus de bois selon les types de station et leur altitude. Par contre, il est un fait établi que dans les stations humides et surtout alluviales, la pessière, cultivée selon les normes « traditionnelles » en futaie dense équienne, ne remplit absolument pas les fonctions écologiques de la forêt. En effet, de nombreux auteurs ont montré l'impact négatif de la pessière dense sur l'écosystème rivière [HUET, 1951 ; BAILLY, 1981 ; BAAR *et al.*, 1996], sur le régime hydrologique des bassins versants [MBUYU et PETIT, 1995 ; WIEBE *et al.*, 1996], sur la biodiversité des zones humides et sur la qualité des sols acides [NOIRFALISE et VANESSE, 1975 ; ADAM *et al.*, à paraître]. Toutefois, cet impact est à relativiser en fonction des différents types de station et de sylviculture.

Notre objectif n'est pas de prendre position pour l'une ou l'autre alternative, mais bien de rassembler les connaissances nécessaires à une vision

globale de la problématique, et ce pour chaque type de station que nous avons défini. Nous avons donc rassemblé les informations dans un tableau synoptique (tableau 7.7) qui détaille, par type de station, l'importance de chaque fonction écologique et les objectifs sylvicoles envisageables pour les différentes essences compatibles avec le type.

Pour obtenir des objectifs sylvicoles en pessière comparables à ceux qui ont été calculés pour l'aulne, nous avons recherché dans les tables de production de DAGNELIE *et al.* [1988], par niveau de productivité, le temps nécessaire pour obtenir un peuplement de 120 cm de circonférence moyenne (dimension d'exploitabilité la plus fréquemment pratiquée) avec une sylviculture interventionniste (type D des tables de production). Nous avons défini ainsi 3 potentialités, tout en sachant que les productivités associées à ces potentialités sont environ doubles de celles de l'aulne :

- A : moins de 70 ans
- B : 70 à 90 ans
- C : plus de 90 ans.

Pour les essences feuillues, en l'absence de données précises, seules les essences sont citées. En ce qui concerne les chênes, on ne peut envisager qu'un objectif à long terme ( $\geq 150$  ans) ; tandis que pour l'érable sycomore et le frêne, les objectifs sont comparables à ceux de l'aulne.

Le tableau 7.7 met en évidence 2 types de situation :

- i) soit la fonction de production n'est pas envisageable ou est entièrement satisfaite par le type de forêt qui assure les fonctions écologiques.  
C'est le cas de 6 des 12 types décrits :
  - des **tourbières** et des **marais à anmoor** dans lesquels la productivité de toutes les essences est dérisoire et ne peut manifestement rentabiliser financièrement les investissements que représentent les interventions sylvicoles,
  - des **petites rivières**, des **terrasses humides** et des 2 types de **sources** dans lesquels seule une forêt à base de la végétation naturelle potentielle est viable et assure de surcroît une productivité acceptable ;
- ii) soit la fonction de production est la mieux assurée par la culture de l'épicéa, le plus souvent avec des risques importants de chablis par déracinement, mais est incompatible avec les fonctions écologiques des stations humides. Plusieurs alternatives sont alors à envisager au cas par cas, mais aucune ne pourra satisfaire tous les objectifs.

Tableau 7.7. - Importance des fonctions écologiques et objectifs sylvicoles compatibles avec les différents types de station (+ : fonction assurée par la végétation naturelle potentielle (VNP), encadrée quand elle prend une importance prépondérante).

| Type de station         | Fonction écologique                                    |                   |          |                       |                            |                                      |                                  |                                       |                                |   | Fonction de production |                    |            |              |        |
|-------------------------|--|-------------------|----------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|------------------------|--------------------|------------|--------------|--------|
|                         | Maintenance de la fonctionnalité de l'écosystème forêt |                   |          |                       |                            | Maintenance de la fonction. des sols |                                  |                                       | Maintenance de la biodiversité |   | Aulne glutineux        | Autres feuillus(2) | Epicéa (3) |              |        |
|                         | Régulation de la lumière                               | Apports nutritifs | Habitats | Protection des berges | Expansion des eaux de crue | Régulation hydrologique              |                                  | Protection chimique et biol. des sols | Rareté de la VNP               | Spécificité de l'habitat et des espèces |                        |                    |            |              |        |
|                         |  |                   |          |                       |                            | Rétention d'eau                      | Filtration et épuration des eaux |                                       |                                |   |                        |                    |            |              |        |
| <b>Marais</b>           | Tourbière  |                   |          |                       |                            |                                      | +                                |                                       |                                |   | ++                     | ++                 | C          | -            | C +d   |
|                         | Marais à anmoor  |                   |          |                       |                            |                                      | +                                | +                                     |                                |   | ++                     | ++                 | B/C        | -            | C +d   |
| <b>Argiles blanches</b> | n. fugace  |                   |          |                       |                            |                                      | +                                |                                       | +                              |   | +                      |                    | C          | CS, CP, Bo   | B      |
|                         | n. saisonnière   |                   |          |                       |                            |                                      | +                                |                                       | +                              |   | +                      |                    | B/C        | CP, Bo       | (B) +d |
|                         | n. permanente  |                   |          |                       |                            |                                      | +                                |                                       | +                              |   | +                      |                    | B/C        | CP, Bo       | (B) +d |
| <b>Vallées</b>          | Vallons  | +                 | +        | +                     |                            |                                      |                                  |                                       |                                |   |                        |                    | A (B)      | Fr, Er, CP   | A      |
|                         | Petites rivières                                       | ++                | ++       | ++                    |                            | +                                    | +                                | +                                     |                                |   |                        | +                  | A (B)      | -            | (A)    |
|                         | Terrasses humides (1)                                  | (+)               | (+)      | (+)                   |                            | +                                    | +                                | +                                     |                                |   |                        | +                  | A/B        | -            | -      |
|                         | Terrasses basses (1)                                   | (+)               | (+)      | (+)                   | (+)                        | +                                    | +                                | +                                     |                                |   |                        | +                  | A/B        | Er, CP, (Fr) | A      |
|                         | Terrasses hautes (1)                                   | (+)               | (+)      | (+)                   | (+)                        | +                                    | +                                | +                                     |                                |   | +                      | +                  | A          | Er, CP, (Fr) | A      |
| <b>Sources</b>          | Ponctuelles  |                   |          |                       |                            |                                      |                                  |                                       | ++                             |   |                        | +                  | A/B        | -            | (A)    |
|                         | Zones fontinales                                       |                   |          |                       |                            |                                      |                                  |                                       | ++                             |   |                        | +                  | A          | Er, CP, (Fr) | (A)    |

(1) : (+) = zone de la berge

(2) : Autres feuillus : Bo=Bouleaux ; CP=Ch. pédonculé ; CS=Chêne sessile ; Er=Erable sycomore ; Fr=Frêne

(3) : +d = drainage nécessaire ; ( ) = stabilité des peuplements non assurée

Par ailleurs, d'une manière plus générale, nous avons vu dans le paragraphe 7.5.2 (tableau 7.3) que toutes les interventions sylvicoles, qu'elles concernent des forêts subnaturelles ou des futaies résineuses, doivent être adaptées à la qualité biologique et aux contraintes particulières des stations forestières humides.

## **7.6. Conclusions**

Sur base des 83 placettes ardennaises du réseau d'observations, nous avons analysé plus en détail les 10 types ardennais de la typologie wallonne, en les replaçant dans leurs contextes topographique et géomorphologique. En nous appuyant sur notre expérience de terrain et sur les études existantes, nous avons généralisé nos interprétations pour concrétiser le catalogue des stations forestières humides d'Ardenne.

Nous avons ainsi défini 12 types de station qui décrivent avec plus de précision les 4 grands ensembles connus :

- les marais et tourbières,
- les argiles blanches du plateau,
- les stations alluviales,
- les stations fontinales.

Nous avons alors rassemblé autour de ce catalogue l'ensemble des résultats de notre étude, concernant la description des stations, leurs potentialités sylvicoles vis-à-vis de diverses essences forestières commerciales, ainsi que l'essentiel des informations bibliographiques concernant les fonctions et sensibilités écologiques des stations humides.

Nous avons vu que ces renseignements permettent alors d'entamer une réflexion constructive quant aux orientations possibles de la gestion des différents types de forêts humides. A cette occasion, nous avons montré combien il était important de différencier la gestion selon les types de station.

A titre d'illustration, nous présentons ci-après un exemple de fiche de station telle qu'on pourrait l'envisager lors du développement proprement dit d'un catalogue pratique destiné aux gestionnaires forestiers de terrain.



---

|   |     |
|---|-----|
| Développement du catalogue des stations ardennaises .....   | 255 |
| 7.1. Introduction .....   | 255 |
| Les conclusions (paragraphe 7.6) seront accompagnées, à titre d'exemple, d'une<br>fiche descriptive d'un type de station.....                             | 256 |
| 7.2. Démarche méthodologique .....  | 256 |
| 7.3. Description approfondie et comparée .....  | 258 |
| des types de station ardennais .....  | 258 |
| 7.4. Présentation synthétique du catalogue .....  | 269 |
| 7.5. Types de station et gestion forestière .....   | 271 |
| Tableau 7.2. – Principales fonctions écologiques des forêts humides et de l'aulne<br>glutineux en particulier.....  | 271 |
| Domaines .....  | 271 |
| Fonctions.....  | 271 |
| Biodiversité .....  | 271 |
| . Spécificité et diversité des espèces et des habitats .....  | 271 |
| Sols .....  | 271 |
| . Fertilisation (azote) et accélération du turn-over . Structuration du sol<br>(enracinement) . Drainage biologique (enracinement et transpiration) ..... | 271 |
| Hydrologie.....   | 271 |
| . Régulation des régimes hydrologiques . Compatibilité avec l'expansion des<br>eaux de crues dans le lit majeur .....                                     | 271 |
| Qualité des eaux.....   | 271 |
| . Dénitrification . Filtration.....   | 271 |
| Ecosystème rivière .....  | 271 |
| . Régulation de la luminosité . Source nutritionnelle . Fixation des berges   | 271 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 7.6. Conclusions..... | 278 |
| .....                 | 280 |



---

## *Conclusions générales et perspectives*

---

L'objectif de notre étude était de concevoir un catalogue des stations forestières humides de Wallonie qui puisse contenir l'essentiel des informations nécessaires à la gestion intégrée des forêts. Une attention particulière a été accordée à l'aulne glutineux. En effet, une large étude bibliographique a montré, d'une part, l'intérêt de cette essence dans la filière bois et surtout dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers humides et, d'autre part, sa sous-valorisation dans la sylviculture actuelle.

### *Résultats*

Nous nous sommes attelé à la caractérisation écologique d'un échantillon de 166 aulnaies par des descripteurs spécifiques aux milieux humides, notamment par le régime phréatique, qui permet de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes. Ces descriptions fouillées nous ont permis d'élaborer une typologie abiotique des stations forestières à aulne pour la Wallonie, qui a ensuite été approfondie et développée pour le massif ardennais.

Parallèlement, à partir de mesures dendrométriques effectuées dans ces aulnaies, nous avons construit des courbes de fertilité, évalué la productivité et analysé l'évolution de la circonférence dominante des peuplements, afin d'établir les potentialités sylvicoles de l'essence.

Nous appuyant sur ces études, nous avons ensuite analysé la relation station x production, ce qui nous a permis, d'une part, d'évaluer les potentialités sylvicoles de chaque type de station et, d'autre part, d'apporter notre contribution à la connaissance de l'autécologie de l'aulne en Wallonie.

En guise d'application, nous avons ensuite développé de manière plus approfondie le catalogue des stations pour la région ardennaise. Grâce aux informations qu'il rassemble, concernant la description des types, leurs fonctions

écologiques et leurs potentialités sylvicoles, ce catalogue constitue un outil adapté à la gestion moderne des forêts dans le respect de leurs multiples fonctions.

### ***Réflexions***

Notre recherche a mis en évidence une structuration très marquée des stations forestières humides de Wallonie, qui se prête bien au développement d'une typologie des stations. Ainsi, notre typologie abiotique s'est avérée en bonne correspondance avec la syntaxonomie présentée dans la partie bibliographique de notre étude. Pour ces raisons, la prévision des potentialités sylvicoles des stations de l'aulne peut s'envisager indifféremment par l'une ou l'autre typologie avec un degré de précision comparable.

Nous avons aussi montré le caractère spécifique de la production de bois en milieux humides. En effet, dans un certain nombre de cas, il y a une nette opposition entre le respect de la fonctionnalité de l'écosystème et la recherche d'une production maximale. Dans l'optique d'une gestion intégrée des ressources et de l'environnement, les orientations de la politique forestière sont alors déterminantes et il est important qu'elles s'appuient sur une bonne connaissance des stations, pour mettre au point, le cas échéant, des voies nouvelles de sylviculture.

### ***Perspectives***

Notre étude ouvre des perspectives de recherche, au nombre desquelles le développement proprement dit du catalogue des stations humides ardennaises vient en premier lieu.

Dans la foulée, la gestion intégrée des milieux humides bénéficierait d'une étude spécifique des potentialités sylvicoles des vallées pour les essences feuillues indigènes (chênes, frêne, érable, bouleaux, ...). D'autres voies mériteraient d'être développées, comme l'étude approfondie des types de station du plateau hydromorphe ardennais, ou l'établissement d'un lien entre le catalogue abiotique et les végétations non forestières (*Molinion, Filipendulion, ...*).

D'autres recherches, à nos yeux fondamentales, devraient s'atteler à mettre au point des itinéraires sylvicoles spécifiques aux forêts humides et à leurs multiples fonctions. Ceux-ci se baseraient non seulement sur l'aulne glutineux, mais aussi, dans les stations qui le permettent, sur les autres essences sans restriction, afin de proposer aux gestionnaires de véritables alternatives, non dénuées de rentabilité, aux affectations actuelles des sols humides.

|  |     |
|--|-----|
| Conclusions générales et perspectives..... | 283 |
|--|-----|

---

## *Références bibliographiques*

---

- ADAM J.C., HUART O., QUEVY B. [à paraître] - *Forêt et protection du sol*. Namur, Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-DNF.
- ANONYME [1983] - *Description of trees and shrubs of the genus Alnus*. Rijksstation voor Populierenteelt, Geraardsbergen, Belgium, 45 p.
- ANONYME [1998] - *Rapport d'activités du Centre de Recherche et de Promotion forestières*, Section « Ecologie » (IRSIA), Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., 197 p.
- ASSELBERGHS E. [1946] - *L'éodévonien de l'Ardenne et des régions voisines*. Mémoires de l'Institut géologique de l'Université de Louvain 14, 598 p.
- AUSSENAC G., GRANIER A. [1979] - Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. II = Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sci. For.* **36**(4), 265-280.
- AVRIL P. [1987] - *La légende de la carte des sols de Belgique*. Gembloux, Fac. Sci. Agron., Service de Science du Sol, 26 p.
- BAAR F., DE ROOVER B., GIGOUNON P. [1996] - *La forêt et la protection de l'eau*. Namur, Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-DNF, 48 p.
- BAILLY F. [1981] - *Recherches sur l'influence du couvert de l'épicéa commun (Picea abies (L.) KARST) sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques d'un ruisseau ardennais, la Petite Rule*. Gembloux, Fac. Sc. Agron., Travail de fin d'études, 131 p.
- BARTOLI M. [1992] - Utilisation pratique de la flore forestière française pour réaliser un diagnostic écologique. ONF, *Bull. techn.* **23**, 55-72.
- BARY-LENGER A., BOINON M., GUNS A. [1995] - Comment prédire la productivité de l'épicéa commun (*Picea abies* KARST.) dans les forêts ardennaises. *Silva Belgica* **102**(6), 9-16.
- BECKER M. [1971] - *Etude des relations sol – végétation en conditions d'hydromorphie dans une forêt de la plaine lorraine*. Nancy, ENGREF, Thèse de doctorat, 219 p.
- BECKER M. [1985] - Démarche méthodologique préconisée pour la typologie des stations forestières. *Coll. Phyto* **14**, 299-311.
- BECKER M. [1986] - Avantages et limites de l'étude de la végétation spontanée pour la typologie des stations forestières. *Compte rendu des séances de l'Académie d'Agriculture de France* **72**(10), 875-882.
- BECKER M., LE GOFF N. [1988] - Diagnostic stationnel et potentiel de production. *Rev. For. Fr.* **NS**, 29-43.

- BECKER M., PICARD J-F., TIMBAL J. [1982] - *Larousse des arbres, des arbustes et des arbrisseaux de l'Europe occidentale*. Paris, Larousse, 95 p.
- BENSIMON C. [1985] - Male sterility in *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Silvae Genetica* **34** (2-3), 69-72.
- BIDDISCOMBE E., ROGERS A., ALLISON H., LITCHFIELD R. [1985] - Response of groundwater levels to rainfall and to leaf growth of farm plantations near salt seeps. *J. Hydrology* **78**, 19-34.
- BIROT Y. [1996] - La recherche scientifique et la gestion durable des forêts : la contribution française. *Rev. For. Fr.* **48**(NS), 155-168.
- BODEUX A. [1955] - *Alnetum glutinosae*. *Mitt. Florist- soziolog. Arbeitsgemeinschaft* **5**, 24 p.
- BOHME P., LORENZ, WAGENFUHR [1983] - Zum internationale stand der Herstellung und Verarbeitung dünner Furniere. *Holztechnologie* **24**(1), 79.
- BOISSEAU D. [1996] - Ecologie du pin pignon et du pin brutia : détermination d'un indice de fertilité en fonction du milieu. *Rev. For. Fr.* **48**(4), 321-335.
- BOND G., FLETCHER W., FERGUSON T. [1954] - The developpement and fonction of the root nodules of *Alnus*, *Myrica* and *Hippophae*. *Plant and Soil* **5**(4), 309-323.
- BOUDRU M. [1968] - La futaie claire. Gembloux *Bull. Rech. Agron.* **3**(2), 249-253.
- BOUDRU M. [1989] - *Forêt et Sylviculture - Traitement des forêts*. Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 356 p.
- BOULET-GERCOURT B. [1997] - *Le Merisier*. IDF, 128 p.
- BRAIS S., CAMIRE C. [1992] - Keys for soil moisture regime evaluation for Northwestern Quebec. *Can. J. Forest. Res.* **22**, 718-724.
- BRAQUE R. [1988] - *Biogéographie des continents*. Paris, Masson, 470 p.
- BRASIER C., ROSE J., GIBBS J. [1995] - An unusual *Phytophthora* associated with widespread alder mortality in Britain. *Plant Pathology* **44**, 999-1007.
- BRAUN H.J. [1974] - Rhythmus und Grösse von Wachstum, Wasserverbrauch und Produktivität des Wasserverbrauches bei Holzpflanzen. *All. Forst- u. Jagd-Ztg* **145**(5), 81-86.
- BRETHES A. [1984] - *Catalogue des stations du Nord de la Haute Normandie*. Paris, ONF, 433 p.
- BRETHES A. [1989] - La typologie des stations forestières : recommandations méthodologiques. *Rev. For. Fr.* **41**(1), 7-27.
- CARMEAN W. [1975] - Forest Site Quality Evaluation in the United States. *Adv. In Agronomy* **27**, 209-270.

- CARMEAN W. [1996] - *Site-quality evaluation, site-quality maintenance, and site-specific management for forest land in Northwest Ontario*. NWST Technical Report TR-105. Ontario Ministry of Natural Resources, 121 p.
- CASTANER D. [1991] - Un pari tenu et gagné : la revégétalisation des sols stériles de carrières grâce à l'utilisation des plantes fixatrices d'azote. *For.-Entrep.* **75**, 29-33.
- CAUBOUÉ M., TREMBLAY J. [1993] - *Les stations de la Haute Côte-Nord*. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, 169 p.
- CHADOEUF J., AUSSENAC G., GRANIER A. [1988] - Analyse de la variabilité spatio-temporelle et modélisation statistique des variations de stock d'eau du sol en forêt. *Ann. Sci. For.* **45**(4), 323-340.
- CHANTURIYA G. *et al.* [1985] - Use of small diameter alder for parquet manufacture. *Derevoobrabatywayushchaya Promyshlennost* **2**, 15-16.
- CHRISTIE J., LINES R. [1975] - *A comparison of forest productivity in Britain and Europe in relation to climatic factors*. Forestry Commission, 34 p.
- CLAESSENS H. [1987a] - *Contribution à la connaissance de l'aulne glutineux (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.) en Ardenne*. Gembloux, Fac. Sci. agron., Travail de fin d'études, 100 p.
- CLAESSENS H. [1987b] - *Le bois, sa technologie et le marché de l'aulne glutineux (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.)*. Gembloux, Fac. Sci. Agron., Etude bibliographique. 25 p.
- CLAESSENS H. [1990] - L'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) : une essence forestière oubliée. *Silva Belgica* **97**(2), 25-33.
- CLAESSENS H. [1995] - La gestion durable des forêts : application à la réhabilitation des feuillus précieux. *in* : *Rencontres forêts - bois. Nancy (A.F.E.F.)* **5**, 87-95.
- CLAESSENS H. [1996] - Le frêne, un bois noble et précieux. *Forêt Wallonne* **28**, 10-13.
- CLAESSENS H. [1997] - Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. *Cah. For. Gembloux* **20**, 21 p.
- CLAESSENS H., THIBAUT A., RONDEUX J. [1993] - Facteurs écologiques de production du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en Condroz et productivité des stations potentielles. *Cah. For. Gembloux* **11**, 26 p.
- CLAESSENS H., THIBAUT A., LECOMTE H., DELECOUR F., RONDEUX J., THILL A. [1994] - *Le frêne en Condroz : stations et productivité potentielles*. Bruxelles, I.R.S.I.A., 119 p.
- CLAESSENS H., THIBAUT A. [1994] - Où peut-on cultiver l'aulne glutineux avec succès ? *Silva Belgica* **101**(2), 7-12.
- CLAESSENS H., THIBAUT A., RONDEUX J. [1996] - *Le douglas en Belgique*. Bruxelles, I.R.S.I.A., 142 p.
- CLAESSENS H., PAUWELS D., THIBAUT A., RONDEUX J. [à paraître] - Site index curves and autecology of Ash (*Fraxinus excelsior* L.), Sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) and Cherry (*Prunus avium* L.) in Wallonie (Southern Belgium), *Forestry*.

- COOK J. [1996] - Implications of modern successional theory for habitat typing : a review. *Forest Sci.* **42**(1), 67-75.
- COTE B., CAMIRE C. [1987] - Tree growth and nutrient cycling in dense plantings of hybrid poplar and black alder. *Can. J. For. Res.* **17**, 516-523.
- CRAVE M.-F. [1990] - Une essence pleine de ressources : l'aulne glutineux. *For. Entrep.* **69**, 20-28.
- CRAWFORD R. [1992] - Oxygen availability as an ecological limit to plant distribution. *Advances in ecol. res.* **23**, 93-187.
- DAGNELIE P. [1957] - Recherches sur la productivité des hêtraies d'Ardenne en relation avec les types phytosociologiques et les facteurs écologiques. 3ème partie. *Bull. Inst. Agr. Stat. Rech. de Gembloux* **25**(1-2), 44-94.
- DAGNELIE P. [1973] - *Théorie et méthodes statistiques*. Gembloux, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 378 p.
- DAGNELIE P., NIVELLE J.L., RONDEUX J., THILL A. [1970] - *Production de l'épicéa commun dans quelques stations de l'Ardenne centrale*. Gembloux, Centre d'Ecologie forestière, communication 55, 14p.
- DAGNELIE P., PALM R., RONDEUX J., THILL A. [1988] - *Tables de production relatives à l'épicéa commun*. Gembloux, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 122 p.
- DAJOZ R. [1996] - *Précis d'écologie* (6<sup>e</sup> édition). Paris, DUNOD, 551 p.
- de BETUNE P. [1961] - *Atlas de Belgique. Planche 8 : Géologie*. Bruxelles, IGM, 47 p.
- DE TILLESSE M. et DEVILLEZ F. [1995] - Modélisation du niveau trophique des sols forestiers : évaluation du pH en fonction des groupements phytosociologiques. *Ann. Sci. For.* **52**, 353-364.
- DECONCHAT M., BALENT G. [1996] - Le contrôle des polluants par l'aménagement de zones tampons. INRA, *Etud. Rech. Syst. Agraires Dév.* **29**. 101-114.
- DECOURT N. [1964] - Les tables de production. Leurs limites et leur utilité. *Rev. For. Fr.* **16**. 640-657.
- DELECOUR F. [1987] - Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. *Pédologie* **37**(3), 299-320.
- DELECOUR F. [1989] - Champignons et humification. *For. Wallonne* **6**, 3-8.
- DELECOUR F. [1990] - Identification pratique des humus forestiers. *Forêt Wallonne* **8**, 22-26.
- DELECOUR F., KINDERMANS M. [1980] - *Manuel de description des sols*. Gembloux, Fac. Sc. Agron., Sciences du Sol, 118 p.
- DELEUZE C. [1995] - Intégration de concepts écophysiologiques dans les modèles de croissance et de qualité des bois. *Rev. For. Fr.* **44**(NS), 20-26.

- DELPECH R., DUME G., GALMICHE P. [1985] - *Typologie des stations forestières. Vocabulaire*. Paris, IDF, 243 p.
- DELVAUX J., GALOUX A. [1962] - *Les territoires écologiques du Sud-Est belge*. Travaux hors-série, Bruxelles, ULB, Centre d'écologie générale, 2 vol., 311 p.
- DETHIOUX M. [1967] - *Cartographie herbagère du bassin de l'Attert*. Rapport de prospection. Gembloux, Fac. Sci. agron., 83 p.
- DETHIOUX M. [1974] - Quelques éléments de l'écologie du semis de l'aulne glutineux. *Ardenne et Gaume* **24**(3), 118-129.
- DETHIOUX M. [1991] - *Les cours d'eau de Wallonie : caractéristiques physiques, principes et techniques de verduration*. Bruxelles, I.R.S.I.A., 141 p.
- DRAPIER J. [1989] - *Les stations forestières de l'Ardenne primaire*. Nancy, IFN, 167 p.
- DRAPIER J. [1993] - Ecologie de l'Alisier torminal (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz). *Rev. For. Fr.* **55**(3), 229-242.
- DUCHAUFOR P. [1954] - Etude des types de végétation dans une sapinière vosgienne. *Rev. For. Fr.* **3**, 160-178.
- DUCHAUFOR [1960] - Stations types d'humus et groupements écologiques. *Rev. For. Fr.* **12**(7), 484-494.
- DUCHAUFOR [1986] - La typologie des stations forestières : utilisation des données de la pédologie. *Compte rendu des séances de l'Académie d'Agriculture de France* **72**(10), 883-891.
- DUFRENE M., LEGENDRE P. [1991] - Geographic structure and potential ecological factors in Belgium. *J. Biogeography* **18**, 257-266.
- DULIERE J.F., TANGHE M., MALAISSE F. [1995] - *Répertoire des groupes écologiques du fichier écologique des essences*. Namur, Ministère de la Région Wallonne, 319 p.
- DUME G. [1995] - 20 ans de typologie des stations forestières. *For. - Entrep.* **102**, 23-29.
- DUMONT J.M. [1984] - Les forêts de *l'Alnion glutinosae* et de *l'Alnio-Padion* de la région du plateau des Tailles (haute Ardenne belge). *Coll. phytosociologiques* **11**, 259-267.
- DUPLAT P., TRANH-HA M. [1986] - *Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre (dans le massif de l'Aigouel)*. Paris, ONF - Section technique, Document 86.1, 36 p.
- DUPLAT P., TRANH-HA M. [1997] - Modélisation de la croissance en hauteur dominante du chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) en France. Variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959 - 1993). *Ann. Sci. For.* **54**, 611-634.
- DUVIGNEAUD P. [1974] - *La synthèse écologique*. Paris, DOIN, 296 p.
- DUVIGNEAU J., SAINTENOY-SIMON J. [1995] - L'intérêt floristique des sites de la Meuse dinantaise et namuroise. *Bul. Com. Roy. Mon. sites et fouilles* **15**, 62-78.



- FONTNOIRE J. [1974] - Les aulnes. *For. Priv. Fr.* **97**.
- FRANC A. [1989] - Le Massif Central cristallin. Analyse du milieu - Choix des essences. *Etudes Forêt* n°2, CEMAGREF, 102 p.
- FRANC A., VALADAS B. [1990] - Stations forestières et paysages : les granites du Massif central. *Rev. For. Fr.* **42**(4), 403-416.
- FRANKE A. [1994] - Herkunftsprobleme bei Schwarzerle (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) gestern und heute. Stuttgart, *Mitt. Vereins für Forst. Standort. und Forstpfl.* **37**, 67-74.
- FREMSTAD E. [1983] - Role of black alder (*Alnus glutinosa*) in vegetation dynamics in West Norway. *Nord. J. Bot.* **3**(3), 393-410.
- FREY T. [1973] - *The finnish school and Forest Site Types in : Handbook of vegetation science, 5 : Ordination and classification of Communities.* Junk Publishers 403-434.
- FUSTEC E. [1992] - Transfert des contaminants chimiques : rôle des sols et des formations végétales des fonds de vallée. *C.R. Acad. Agric. Fr.* **78**(6), 107-116.
- FUSTEC E., MARIOTTI A., GRILLO X., SAJUS J. [1991] - Nitrate removal by denitrification in alluvial groundwater : role of a former channel. *J. Hydrol.* **123**, 337-354.
- GEGOUT J.Cl., HOULLER F. [1993] - Apports de l'analyse factorielle des correspondances sur variables instrumentales en typologie des stations : illustration sur la plaine de la Lanterne (Haute Saône). *Rev. For. Fr.* **45**(5), 539-547.
- GERARDIN V., DUCRUC J.P. [1990] - An objective approach to evaluating natural drainage on forest mineral soils for nonspecialists. *Vegetatio* **87**, 127-133.
- GEYSENS C., STEENACKERS V. [1985] - *Selectie en Veredeling van elzen.* Intern Gent, Rijksstation voor Populiereenteelt, Rapport, 35 p.
- GIARDINA C., HUFFMANS S., BINKLEY D., CALDWELL B. [1995] - Aldres increase soil phosphorus availability in a Douglas-fir plantation. *Can. J. For. Res.* **25**, 1652-1657.
- GIBBS J. [1994] - *Phytophthora root disease of Common alder.* UK. Forestry Commission, Research Information Note 258. 4 p.
- GIBBS J. [1995] - Phytophthora root disease of alder in Britain. *EPPO Bull.* **25**, 661-664.
- GIBBS J. [1996] - *Report of meeting on Phytophthora Root disease of Alder.* UK, Forestry Commission Research Station Alice Holt Lodge, 8 p.
- GIBBS J., LONSDALE D. [1996] - *Phytophthora disease of alder : the situation in 1995.* UK, Forestry Commission, Research Information, Note 277, 4 p.
- GILBERT J.-M. [1995] - Stations forestières et production du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) dans le pays d'Othe. *Rev. For. Fr.* **47**(4), 343-356.
- GILBERT J.-M., CHEVALLIER R., DUMAS Y. [1996] - Autécologie du pin laricio de Corse dans le secteur ligérien. *Rev. For. Fr.* **48**(3), 201-216.

- GILL C. [1970] - The flooding tolerance of woody species - a review. *Forest. abstracts* **34**(1), 671-678.
- GILL C. [1975] - The ecological significance of adventitious rooting as a response to flooding in woody species, with special reference to *Alnus glutinosa* (L) Gaertn. *Flora* **164**, 85-97.
- GIRAULT D. [1988] - *Les stations forestières de la Puisaye*. Nogent sur Vernisson, CEMAGREF, 246 p.
- GIRAULT D. [1990] - Piezometrical measurements as an aid in establishing a typology of forest communities growing on hydromorphic soils. *Vegetatio* **88**, 131-133.
- GLAVAC V. [1972] - Über Höhenwuchsleistung und Wachstumsoptimum der Schwarzerle auf vergleichbaren Standorten in Nord-, Mittel- und Südeuropa. *Schrift. Forst. Fak. Univ. Göttingen* **45**, 61 p.
- GODART M.F. [1989] - Ecological species groups in forest communities in South Belgium. *Vegetatio* **81**, 127-135.
- GRANIER A., BADEAU V., BRED A N. [1995] - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* **47**(NS), 59-68.
- GREEN R., MARSHALL P., KLINKA K. [1989] - Estimating Site Index of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO.) from ecological variables in South West British Columbia. *Forest Sci.* **35**(1), 50-63.
- GREEN R., TROWBRIDGE R., KLINKA K. [1993] - Towards a taxonomic classification of humus forms. *Forest Sci. Monograph* **29**, 49p.
- GRIFFITHS A., MAC CORMICK L. [1984] - Effects of soil acidity on nodulation of *Alnus glutinosa* and viability of Frankia. *Plant and Soil* **79**, 429-434.
- HAARLAA, KARKKAINEN [1982] - Tervalepa Kuitujen pituus. *Silva Fennica* **16**(4), 343-350.
- HÄGGLUND B. [1981] - Evaluation of forest site productivity. *For. Abs.* **42**(11), 515-527.
- HARRINGTON C. [1986] - A method of site quality evaluation for red alder. *USDA - Forest Service, Gen. techn. Rep.* PNW-192.
- HARTMANN G. [1995] - Wurzelhalsfäule der Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) - eine bisher unbekannte Pilzkrankheit durch *Phytophthora cambivora*. *Forst und Holz* **50**(18), 555-557.
- HENDRICKSON O., BURGESS D., PERINET P., TREMBLAY F., CHATATPAUL L. [1993] - Effects of Frankia on field performance of *Alnus* clones and seedlings *Plant and Soil* **150**, 295-302.
- HIBBS D., TEISSIER DU CROS E., GAUVIN J., POURSAT P. [1994] - L'aulne rouge. Une espèce d'avenir en France. *For. - Entrep.* **93**, 57-62.

- HOMANN P., COLE D., VAN MIEGROET H., COMPTON J. [1994] - Relationship between cation and nitrate concentrations in soil solutions from mature and harvested red alder stands. *Can. J. For. Res.* **24**, 1646-1652.
- HOULLIER F., RITTIE D. [1992] - Eléments sur la ressource en feuillus précieux. *Rev. For. Fr.* **44(NS)**, 13-19.
- HUANG S., TITUS S. [1993] - An index of site productivity for uneven-aged or mixed-species stands. *Can. J. For. Res.* **23**, 558-562.
- HUBERT M. [1983] - *Amélioration des taillis par balivage intensif*. Paris, IDF, 117 p.
- HUBERT M. [1985] - Faut-il s'occuper des bouleaux, des tilleuls, des aulnes et des charmes ? *For. - Entrep.* **26**, 14-31.
- HUET M. [1951] - Nocivité des boisements en épicéa (*Picea excelsa* LINK) pour certains cours d'eau de l'Ardenne belge. *Separatum, Association internationale de limnologie théorique et appliquée* **11**, 189-200.
- HUMBERT J., NAJJAR G. [1992] - *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Une analyse de la littérature francophone*. Strasbourg 1, Centre d'Etudes et de Recherches écogéographiques (CEREG), 85 p.
- JABIOL B., BRETHES A., PONGE J-F., TOUTAIN F., BRUN J-J. [1995] - *L'humus sous toutes ses formes*. Nancy, ENGREF, 63 p.
- JACAMON M. [1988] - Historique des relations entre phytosociologues et forestiers en France. *Coll. phytos.* **14**, 1-9.
- JACQUIOT C., TRENARD Y., DIROL D. [1973] - *Atlas d'anatomie des bois des angiospermes*. (2 vol.). Paris, Centre Technique du Bois, 175 p.
- JALAS J., SUOMINEN J. [1976] - *Atlas Florae Europaeae* ; 3 : Salicaceae to Balanosporaceae. Helsinki, 59 p.
- JONES J.R. [1969] - *Review and Comparison of site Evaluation Methods*. USDA Forest Service Research Paper RM-51, 27 p.
- JOZWIAK H. *et al.* [1976] - *Polymer* **21(8/9)**, 360-363 et 413-415.
- JULVE P. [1989] - *Catalogue des stations forestières de l'Ardenne primaire*. Bailleul, Centre régional de phytosociologie, 122 p.
- KENT M., COKER P. [1996] - *Vegetation description and analysis. A practical approach*. John Wiley & Sons, 363 p.
- KOLLMANN . [1955] - *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Aufl. Berlin, Springer Verlag, 1183 p.
- KORYTAROVA, CHOVANEC [1985] - Zur problematik des Schutzes von Birke und Erle gegen Lagerungsschäden. *Holztechnologie* **26(2)**, 79-80.
- KOSTLER [1968] - *Die Wurzeln der Waldbäume*. Hambourg, Paul Parey, 180-184.

- KRAUSS A., RACSKOWSKI J. [1985] - Resistance of various woody species to the action of sea water substitute. *Holzforschung und Holzerwertung* **37**(4), 71-75.
- KROPF P. [1985] - Die Erle und die Verwendung ihres Holzes. *Holz-Zentralblatt* 125, 146, 154, 156.
- LA ROI G., STRONG W., PLUTH D. [1988] - Understory plant community classifications as predictors of forest site quality for lodgepole pine and white spruce in West-central Alberta. *Can. J. For. Res.* **18**, 875-887.
- LAMBINON J., DE LANGHE J.E., DELVOSALLE L., DUVIGNEAUD J. [1992] - *Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines.* (Ed. 5). Meise, Editions du Patrimoine du Jardin Botanique national de Belgique, 1092 p.
- LANIER L. [1986] - *Précis de sylviculture.* Nancy, ENGREF, 468 p.
- LAURENT C., RONDEUX J., THILL A. [1988] - *Production du chêne rouge d'Amérique (Quercus rubra L.) en Moyenne et Haute Belgique.* Gembloux, Fac. Sci. Agron., Document 2, 37 p.
- LE GOFF N. [1982] - Productivité du frêne en région Nord-Picardie. A. - Courbes de croissance en hauteur. *Ann. Sci. For.* **39**, 259-288.
- LE GOFF N. [1984] - Indice de productivité des taillis sous futaie de chêne dans la région Centre. *Ann. Sci. For.* **41**(1), 1-34.
- LE GOFF N., LEVY G. [1984] - Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie - Etude des relations entre la productivité et les conditions du milieu. *Ann. Sci. For.* **41**(2), 135-170.
- LE GOFF N., GRANIER A., OTTORINI J.M., LE GALL K., PEIFFER M. [1995] - Croissance du frêne, structure de l'appareil photosynthétique et disponibilité en eau. *Rev. For. Fr.* **47**(NS), 156-172.
- LE TACON F. [1973] - Sol, nutrition et production ligneuse. *Ann. Sci. For.* **30**(3), 259-285.
- LECLERCQ A. [1975] - La qualité du bois de frêne. Gembloux *Bull. Rech. Agron.* **10**, 497-526.
- LECOMTE H., FLORKIN P., THIRION M. [1997] - *L'inventaire des massifs forestiers de la Wallonie : aperçu global de la situation en 1996.* Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-DNF, Fiche Technique n° 9, 43 p.
- LEJEUNE P. [1994] - *Modélisation de la croissance et du développement de peuplements forestiers d'âges multiples : application à la hêtraie wallonne.* Gembloux, Fac. Sc. Agron. Thèse de doctorat, 210 p.
- LETHONEN I., PEKKALA O., UUSVAARA O. [1978] - Tervalepän (*Alnus glutinosa*) ja raidan (*Salix capraea*), puu-ja massa teknisiä omniaisuksia. *Folia forestalia* **344**(19).
- LEVY G. [1978] - Nutrition and production of adult Norway Spruce on hydromorphic soils in Lorraine, in connection with site characteristics. *Ann. Sci. For.* **35**(1), 33-53.

- LEVY G. [1982] - Estimation de l'utilité d'une introduction d'aulne glutineux en mélange avec des jeunes plants d'épicéa commun sur sol à hydromorphie temporaire superficielle. *Ann. Sci. For.* **39**(1), 33-40.
- LEVY G. [1990] - Influences possibles d'une coupe à blanc sur la remontée des nappes et la stabilité structurale des sols à hydromorphie temporaire. *Rev. For. Fr.* **42**(5), 517-522.
- LEVY G., LE GOFF N., LEFEVRE Y., GARROS L. [1992] - Les exigences stationnelles du frêne dans le Nord et le Nord-Est de la France. *Rev. For. Fr.* **44**(NS), 20-26.
- LHOTE P. [1985] - *Etude écologique des aulnes dans leur aire naturelle en France*. ENGREF - Franche-Comté, 125 p.
- LIECHTY H., JURGENSEN M., MROZ G., GALE M. [1997] - Pit and mound topography and its influence on storage of carbon, nitrogen and organic matter within an old-growth forest. *Can. J. For. Res.* **27**, 1992-1997.
- LIEPE V. [1990] - Wachstum und Wurzelentwicklung von 30 Jährigen Schwarzerlen (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) eines Herkunftsversuches. *Allg. Forst- u.J.-Ztg.*, **161**(8), 149-154.
- LONGAUER R., HOFFMANN J. [1996] - *Noble Hardwoods in Slovakia - Noble hardwoods Network : report of the first meeting*. Rome, Internat. Plant Genetic Resources Institute, 172 p.
- LOZET J., MATHIEU C. [1997] - *Dictionnaire de Sciences du sol*. Lavoisier Tec. et Doc., 488 p.
- MAC LEOD S.D., RUNNING S.W. [1988] - Comparing site quality indices and productivity in ponderosa pine stands of western Montana. *Can. J. For. Res.* **18**, 346-352.
- MAC NAB W.H. [1993] - A topographic Index to Quantify the Effect of Mesoscale Landform on Site Productivity. *Can. J. For. Res.* **23**, 1100-1107.
- MAC NAB W.H. [1996] - Classification of local – and landscape – scale ecological types in the Southern Appalachian Mountains. *Environ. Monit. Assess.* **39**(1-3), 215-229.
- MAC VEAN D. [1953] - *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *J. Ecol.* **41**, 447-466.
- MAC VEAN D. [1956] - *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *J. Ecol.* **44**, 195-225.
- MADESCLAIRE A. [1986] - *Potentialités des stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine pour l'érable sycomore et le merisier - études des croissances*. Nancy, CRPF Lorraine-Alsace, 55 p.
- MANTNIEKS P. [1955] - *Atlas classique*. Bruxelles, Institut Cartographique Mantnieks, 32 p.
- MARTIN B. [1985] - Les aulnes. *AFOCEL-ARMEF, Info-forêt* **2**, 177-191.
- MASHIMO Y., ARIMITSU K. [1986] - *A site classification for forest land use in Japan*. In : *Forest Site and Productivity*. Gessel S. (Ed.). Nijhoff Publishers, 29-42.

- MASON C., MACDONALD S., HUSSEY A. [1984] - Structure, Management and Conservation Value of the Riparian Woody Plant Community. *Biological Conservation* **29**, 201-216.
- MATHIEU L. [1977] - *La géomorphologie et la géologie quaternaire comme bases fondamentales pour une juste définition et une cartographie rapide des sols et des milieux*. Gembloux, Fac. Sc. Agron., Thèse de Doctorat, 1050 p.
- MBUYU N., PETIT F. [1995] - Comportement hydrologique de 2 bassins versants se différenciant par leur couvert végétal et leur épaisseur de tourbe. *Bull. Soc. Belge Géog.* ?(2), 261-274.
- MEROT P., REYNE S. [1996] - Rôle hydrologique et géochimique des structures linéaires boisées : bilan bibliographique et perspectives d'études. INRA, *Etud. Rech. Syst. Agraires Dév.* **29**, 83-100.
- MEUSEL H., JAGER E., WEINERT E. [1965] - *Vergleichende Chorologie der Zentraleuropäischen Flora*. Jena, Gustav Fisher Verlag, 120 p.
- MOIROUD A. [1991] - La symbiose fixatrice d'azote. *Forêt-Entrep.* **75**, 18-26.
- MÖLLER H. [1970] - *Soziologisch-ökologische Untersuchungen in Erlenwäldern Holsteins*. Kiel, Mitt. Arbeit. Flor. in Schleswig-Holstein und Hamburg **19**, 110 p.
- MONSERUD R. [1984] - Height growth and Site Index curves for inland Douglas-Fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Sci.* **30**(4), 943-965.

- MONSERUD R. [1988] – *Variation on a theme of site index*. Gen. Techn. Rep. NC-120 USDA Forest Service, 419-427.
- MONSERUD R., MOODY U., BREUER D. [1990] - A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. Forest Res.* **20**, 686-695.
- MORRIS R. [1983] - *A survey of potential insect pests, their possible impact and natural controls in Alnus, Salix and Populus energy plantations*. Canada, Ontario, Ministry of Natural Resources, International Energy Agency, 44 p.
- MRW [1991] - *Le fichier écologique des essences*. 2 Vol. Namur, Ministère Région Wallonne, 189 p.
- MUELLER-DOMBOIS D., ELLENBERG H. [1974] - *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New-York, J. Wiley & Sons, 547 p.
- MURRAY, MILLER H. [1977] - The effect of red alder on growth of douglas fir. Utilisation and management of alder. *USDA Forest Service General Technical Report PNW-70*, 283-325.
- NOIRFALISE A. [1952] - *La frênaie à carex* (Cariceto remotae-Alnetum KOCH, 1926). Mémoires de l'IRSNB 122, 156 p.
- NOIRFALISE A. [1969a] - Esquisse d'une classification écologique des forêts belges. *Bull. Soc. Roy. For. Bel.* **76**(12), 485-496.
- NOIRFALISE A. [1969b] - La chênaie mélangée à jacinthe du domaine atlantique de l'Europe (*Endymio-Carpinetum*). *Vegetatio* **17**, 131-150.
- NOIRFALISE A. [1984] - *Forêts et stations forestières en Belgique*. Gembloux, Les Presses agronomiques de Gembloux, 247 p.
- NOIRFALISE A., SOUGNEZ N. [1956] - Les chênaies de l'Ardenne verviétoise. *Pédologie* **28**, 119-143.
- NOIRFALISE A., SOUGNEZ N. [1961] - Les forêts riveraines de Belgique. *Bull. Jard. Bot.* **30**, 199-288.
- NOIRFALISE A., DETHIOUX M. [1970] - *Répertoire écologique des espèces forestières de Belgique*. Gembloux, Fac. Sci. Agron. Centre d'Ecologie forestière. Note technique 10, 28 p.
- NOIRFALISE A., DETHIOUX M., DE ZUTTERE P. [1971] - Le bois de bouleau pubescent en Haute Belgique (*Vaccinio-Betuletum pubescentis*). *Bull. Rech. Agron. Gembloux* **6**(1-2), 203-214.
- NOIRFALISE A., VANESSE R. [1975] - *Conséquence de la monoculture des conifères pour la conservation des sols et pour le bilan hydrologique*. Bruxelles, Association des Espaces verts, 44 p.

- NOIRFALISE A. et THILL A. [1975] - Les boisements d'épicéa et leurs types pédobotaniques en Ardenne (Belgique). *Beitr. naturk. Forsch. Südw.-Dtl* **34**, 251-257.
- NOIRFALISE A., DETHIOUX M. [1980] - Synopsis des forêts alluviales de Belgique. *Coll. Phytos.* **9**, 217-226.
- NOUALS D., BOISSEAU B. [1991] - *Le pin brutia en France continentale*. Aix-en-Provence, CEMAGREF, 85 p.
- OLAGNON H. - *Stratégie patrimoniale pour la gestion des ressources et des milieux naturels - approche intégrée de la gestion du milieu rural*. in : *Actes du colloque Gérer la nature*. Namur, Ministère de la Région wallonne, 195-222
- ONCLINX F., TANGHE M., GALOUX A., WEISSEN F. [1987] - La carte des territoires écologiques de la Wallonie. *Rev. Bel. Géogr.* **111**(1-2), 51-59.
- OTOUL C. [1978] - Contribution à l'étude de la productivité du chêne rouvre en Ardenne (Région de Wellin). *Ann. Gembloux* **84**, 237-248.
- OZENDA P. [1994] - *Végétation du Continent européen*. Delachaux et Niestlé, 271 p.
- PALM R. [1993] - *Les méthodes d'analyse factorielle : principes et applications*. Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., Notes de Statistique et d'Informatique 93(1), 38 p.
- PALM R. [1996] - *La classification numérique : principes et application*. Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., Notes de Statistique et d'Informatique 96(1), 28 p.
- PAUWELS D., THIBAUT A., LEJEUNE P., RONDEUX J. [1999] - Elaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix Kaempferi* (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale. *Ann. For. Sci.* **56**, 27-34.
- PAVLE M., SMOLE J. I., KRAIGHER H., BRUS R. [1996] - *Noble Hardwoods in Slovakia - Noble hardwoods Network : report of the first meeting*. Rome, Internat. Plant Genetic Resources Institute, 172 p.
- PECHEUR H. [1993] - *Contribution à l'étude des potentialités des bouleaux (Betula pubescens Ehrh. et Betula pendula Roth) au sein du territoire écologique de la Haute Ardenne*. Gembloux. Fac. Sc. Agron., Travail de fin d'études, 104 p. + 5 annexes.
- PECHEUR H. [1995] - Réflexions sur les potentialités des bouleaux en Haute Ardenne. *Silva Belgica* **102**, 17-25
- PETERJOHN W., CORRELL D. [1984] - Nutrient dynamics in an agricultural watershed : observations on the role of a riparian forest. *Ecology* **65**(5), 1466-1475.
- PFISTER R., ARNO S. [1980] - Classifying Forest Habitat Types based on Potential Climax Vegetation. *Forest Sci.* **26**(1), 52-70.
- PINAY G., LABROUE L. [1986] - Une station d'épuration naturelle des nitrates transportés par les nappes alluviales : l'aulnaie glutineuse. *C.R. Acad. Sc. Paris* **302**(17), 629-632.
- PODGE H. [1980] - *Compte-rendu de la mission en Irlande*. Nancy, ENGREF, 25 p.



- PONCELET L., MARTIN H. [1947] - *Esquisse climatographique de la Belgique*. Bruxelles, IRM, Mémoires 27, 265 p.
- PYATT G. [1995] - An Ecological Site Classification for forestry in Great Britain. Forestry Commission, *Research Information Note* 260, Farnham, 6 p.
- RAMADE F. [1984] - *Eléments d'écologie : écologie fondamentale*. Mc Graw Hill, 397 p.
- RAMEAU J.C. [1995] - *Typologie phytosociologique des habitats forestiers et associés. Tome 2 : Complexes riverains*. Nancy, ENGREF, 437 p.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G. [1989] - *Flore Forestière Française. Tome I : plaines et collines*. Paris, IDF, 1785 p.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G. [1993] - *Flore Forestière Française. Tome II : Montagnes*. Paris, IDF, 1820 p.
- RITZEMA H. [1994] - *Drainage Principles and Applications*. Wageningen, Internat. Institute for Land Reclamation and Improvement, Publication 16, 1125 p.
- ROBERTS B., BAJZAK D. [1996] - Site characteristics, growth and nutrition of natural red pine stands in Newfoundland. *Environ. Mon. Asses.* **39**, 509-530.
- ROISIN P. [1984] - *Phytosociologie forestière*. Gembloux, Fac. Sci. Agron., Notes de cours. 142 p.
- ROISIN P. [1986] - *Sylviculture spéciale des essences nobles*. Gembloux, Fac. Sci. Agron., Notes de cours. 162 p.
- ROISIN P., THILL A. [1972] - Excursions forestières en Yougoslavie. *Bull. Soc. Roy. For. Belgique* **79**(2), 109-164.
- RONDEUX J. [1977] - Estimation de la productivité forestière : principes et méthodes. *Ann. Gembloux* **83**, 5-17.
- RONDEUX J. [1983] - *Inventaire des ressources forestières wallonnes. Guide méthodologique*. Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., Unité de Gestion et Econ. For. 170 p.
- RONDEUX J. [1993] - *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Les Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- RONDEUX J. et THILL A. [1989] - *L'estimation de la productivité des peuplements d'épicéa commun (Picea abies KARST.) en Ardenne*. Gembloux, Centre de Recherche et de Promotion forestières, I.R.S.I.A., Document 3, 18 p.
- RONDEUX J., LECOMTE H., FAGOT J., LAURENT C., TOUSSAINT A. [1986] - Quelques données statistiques sur la forêt wallonne. *Bull. Soc. Roy. For. Belgique* **93**, 1-22.
- RONDEUX J., PAUWELS D. [1995] - *Production of quality wood from broadleaves : Final report EEC-AIR Contract*. Fac. Univ. Sc. Agron. Gembloux, 21 p.
- RONDEUX J., THIBAUT A. [1996] - *Tables de production relatives au Douglas*. Gembloux, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 154 p.

- ROWE J.S. [1956] - Use of undergrowth plant species in forestry. *Ecology* **37**, 461-473.
- RUFFINONI C., GAZELLE F. [1997] - Ripisylves et forêts alluviales. Restauration et gestion des ripisylves. *For.-Entrep.* **116**, 43-49.
- RUNNING S., NEMANI R., HUNGERFORD D. [1987] - Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Can. J. For. Res.* **17**, 472-483.
- SCAILLEREZ A. [1997] - *Etude des alignements d'aulnes glutineux (Alnus glutinosa (L.) GAERTN.) sur les berges du bassin de l'Oise amont et perspectives d'aménagement.* Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., Travail de fin d'études, 70 p.
- SCHLESINGER R.C., WILLIAMS R.D. [1984] - Growth response of black walnut to interplanted trees. *Plant and Soil* **X**, X-X
- SCHMIDT M., CARMEAN W. [1987] - Jack Pine Site quality in relation to soil and topography in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* **18**, 297-305.
- SCHMIDT-VOGT H. [1971] - Wachstum und Wurzelentwicklung von Schwarzerlen verschiedener Herkunft. *Allg. Forst- u. J-Ztg.* **142**, 149-156.
- SCHMOLDT D., MARTIN G., BOCKHEIM J. [1985] - Yield-based measures of northern hardwood site quality and their correlation with soil-site factors. *Forest Sci.* **31**, 209-219.
- SCHNITZLER A., CARBIENER R. [1993] - Les forêts galeries d'Europe. *La Recherche* **255**, 694-700.
- SCHOBER R. [1952] - *Massentafeln (Gründer Schwappach).* Berlin, Paul Parey, 216 p.
- SCHOBER R. [1975] - *Ertragstafeln Wichtiger Baumarten.* Frankfurt a. m., J. D. Sauerländer's Verlag, 154 p.
- SCHÜTZ J.P. [1969] - *Etude des phénomènes de la croissance en hauteur et en diamètre du sapin (Abies alba MILL.) et de l'épicéa (Picea abies KARST.) dans 2 peuplements jardinés et une forêt vierge.* Zurich, Ecole Polytechnique, Thèse de doctorat, 115 p.
- SCHÜTZ J.P. [1990] - *Sylviculture 1 : principes d'éducation des forêts.* Lausanne, Presses Polytechn. et Univ. Romandes, 243 p.
- SEMENIUK C., SEMENIUK V. [1995] - A geomorphic approach to global classification for inland Wetlands. *Vegetatio* **118**, 103-124.
- SIMS R., CORNS I., KLINKA K. [1996] - Global to local : Ecological Land Classification. *Environ. Monit. and Assess.* **37**, 1-10.
- SINGLETON J., HIGGS B., CAMPBELL J., EDDY A., MURRAY T. [1994] - Actes du symposium sur l'aménagement des zones ripariennes. Service Canadien des forêts, Rapport R&D 9, 141 p.
- SOPP L. [1974] - *Fatömeg - szamitazi tablazatok.* Budapest, Mezőgazdasági Kiado, 419 p.

- SOUGNEZ N. [1973] - La chênaie mélangée à bistorte de l'Ardenne (*Polygono bistortae* - *Quercetum roboris*). *Bull. Jard. Bot. Nat. Belg.* **43**, 37-81.
- SOUGNEZ N. [1974] - Les chênaies silicicoles de Belgique. *Coll. phytos.* **3**, 183-249.
- SOUGNEZ N. [1978] - *Les chênaies-charmaies du district calcaire mosan*. Gembloux, Centre d'Ecologie forestière et rurale, Communication NS 23, 85 p.
- SPUUR S., BARNES B. [1980] - *Forest ecology*. New-York, John Wiley & Sons, 687 p.
- STAGE A. [1976] - An expression for the effect of aspect, slope and habitat type on tree growth. *Fors. Sci.* **22**, 457-460.
- STEIN J. [1980] - *Le rôle et l'intérêt des études écologique et paysagère dans l'aménagement du territoire*. Louvain-la-Neuve, UCL, Thèse de Doctorat, 305 p.
- STEIN J. [1987] - Un intermédiaire écologique adéquat en aménagement du territoire : la végétation naturelle potentielle. *Coll. phytos.* **15**, 569-579.
- STORTELDER A., HOMMEL P., DE WAAL R. [1998] - *Bosecosystemen van Nederland : 1 : Broekbossen*. NL, Utrecht, KNNV Uitgeverij, 216 p.
- STOUT W.L., SCHNABEL R.R. [1997] - Water-use efficiency of perennial raygrass as affected by soil drainage and nitrogen fertilization of two floodplain soils. *J. Soil and Water Cons.* **52**(3), 207-211.
- SUSZKA B., MULLER C., BONNET-MASIMBERT M. [1994] - *Graines des feuillus forestiers de la récolte au semis*. Paris, INRA, 292 p.
- SWANSTON C., MYLORD D. [1997] - Incorporation of Nitrogen from decomposing red alder leaves into plants and soil of a recent clearcut in Oregon. *Can. J. For. Res.* **27**, 1496-1502.
- TAGZIRIA N. [1996] - *Etude des facteurs écologiques déterminant la répartition du merisier (Prunus avium L.) en Wallonie*. Gembloux, Fac. Univ. Sc. Agron., Thèse de DEA, 56 p.
- TAVERNIER R., MARECHAL R. [1958] - Carte des associations de sols de la Belgique. *Pédologie* **8**, 134-182.
- TESCH S.D. [1981] - The evolution of forest yield determination and site classification. *Forest Ecol. Manag.* **3**, 169-182.
- THIBAUT A., CLAESSENS H., RONDEUX J. [1992] - Etablissement de courbes de productivité pour les peuplements de frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région limono-calcaire du Condroz et de l'Entre-Sambre-et-Meuse. *Cah. For. Gembloux* **7**, 20 p.
- THILL A. [1970] - *Le frêne et sa culture*. Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 85 p.
- THILL A. [1982] - *Associations végétales propices à la culture du peuplier*. In: *Mise en valeur des sols humides*. Ath, Centre de populiculture du Hainaut, 20-33.

- THILL A. [1987] - *Exemple de frênaie naturelle en voie d'évolution vers une érablière*. Gembloux, Fac. Sc. Agron., Centre d'Ecologie forestière et rurale, I.R.S.I.A., Note Technique n° 56. 12 p.
- THILL A. [1988] - Perspectives de reboisement dans les terres soustraites à l'agriculture. *Agro* 7(1-2), 47-57.
- THILL A., DETHIOUX M., DELECOUR F. [1988] - *Typologie et potentialités forestières des hêtraies naturelles de l'Ardenne Centrale*. Bruxelles, I.R.S.I.A., 135 p.
- THILL A., MATHY P. [1980] - La culture des essences précieuses en Belgique. *Ann. Gembloux* 86, 1-32.
- THINGGAARD K. [1996] - Svampen Phytophthora i elletraeer. *Skoven* 3, 132-133.
- TUROK J., ERIKSON G., KLEINSCHMIT J., CANGER S. [1996] - *Noble Hardwoods Network. Report of the first meeting*. Rome, International Plant Genetic Resources Institute, 172 p.
- TILMONT L., DE ROECK M., LAMBION J., DEBULPAEP C. [1981] - *Atlas élémentaire*. Namur, Wesmael-Charlier, 62 p.
- TYLER A., MACMILLAN D., DUTCH J. [1995] - Predicting the yield of Douglas fir from site factors on better quality sites in Scotland. *Ann. Sci. For.* 52, 619-634.
- VAAST V., BILLAC J.M. [1996] - Quelle sylviculture pour l'aune glutineux ? *Forêt France* 397, 22-27.
- VACHER P. [1991] - Le vergne : une essence oubliée à valoriser. *Forêt France* 346, 32-35.
- VAN ROMPAEY E., DELVOSALLE L. [1972] - *Atlas de la flore belge et luxembourgeoise. Ptéridophytes et Spermatophytes*. Bruxelles, Jard. Bot. Nat. De Belgique, 280 p.
- VANESSE R. [1993] - *Evaluation bio-économique des forêts du Grand-Duché de Luxembourg. Typologie forestière*. Gembloux, Faculté des Sciences agronomiques, 238 p.
- VENET J., KELLER R. [1986] - *Identification et classement des bois français*. Nancy, ENGREF, 308 p.
- VORREITER L. [1949] - *Holztechnologisches handbuch Band 1*. Wien, Georg Fromme & C°, 646 p.
- VURDU, BENSEND [1979] - Specific gravity and fiber length in European black alder roots, branches and stem. *Wood Science* 12(2), 103.
- WAGEMANS C. [1994] - *Etude de la croissance en hauteur d'un peuplement de chênes sessiles (Quercus petraea (Mattuscka) Lieblein) en relation avec les conditions topographiques*. Gembloux, Fac. Univ. Sci. Agron., Travail de fin d'études, 83 p.
- WALL G.J., BOS A.W., MARSHALL A.H. [1996] - The relationship between phosphorus and suspended sediment loads in Ontario watersheds. *J. Soil and Water Cons.* 51(6), 504-507.

- WANG G. [1997] - Soil Nutrient regime classification for white spruce stands in the Sub-boreal Spruce Zone of British Columbia. *Can. J. For. Res.* **27**, 679-685.
- WANG G., KLINKA K. [1996] - Classification of moisture and aeration regimes in sub-boreal forest soils. *Environ. Monit. Asses.* **39**, 451-469.
- WEISSEN F., VAN PRAAG H. [1983] - Réflexions sur l'exploitation forestière des sols à argile blanche de la haute Ardenne. *Bull. Soc. Roy. For. Belg.* **90**(1), 1-10.
- WEISSEN F., BRONCHART L., PIRET A. [1994] - *Guide du boisement des stations forestières de Wallonie*. Namur, Ministère Région Wallonne, 175 p.
- WESTHOFF V., VAN DER MAAREL E. [1973] - *The Braun Blanquet Approach*. In : *Handbook of Vegetation Science. Part 5 : Ordination and Classification of Communities*. The Hague, Junk Publishers, 617-726.
- WHITTAKER H. [1962] - Classification of natural Communities. *Bot. Rev.* **28**(1), 1-239.
- WHITTAKER R. [1973] - Dominance types. In : *Handbook of Vegetation Science. Part 5 : Ordination and Classification of Communities*. The Hague, Junk Publishers, 387-402.
- WIEBE K.D., HEIMLICH R.E., CLAASSENS R. [1996] - Wetlands potentially exempted and converted under proposed delineation changes. *J. Soil and Water Cons.* **51**(5), 403-407.
- WORRELL R., MALCOLM D.C. [1990] - Productivity of Sitka Spruce in Northern Britain -2 Prediction from site factors. *Forestry* **63**(2), 117-128.
- YON D., TENDRON G. [1981] - *Les forêts alluviales en Europe*. Strasbourg, Conseil de l'Europe, Collection "Sauvegarde de la nature", 76 p.

---

## Annexes

---

1. Analyse globale des données pluviométriques de la saison 1996-97
2. Définition des types de régime phréatique
3. Tables de production de MITSCHERLICH (Allemagne) et de SOPP (Hongrie)
4. Tables de cubage de THIBAUT *et al.* [1998]



## Annexe 1

### *Analyse globale des données pluviométriques de la saison 1996-97*

---

**Sources** : Bulletins mensuels de l'IRM, précipitations journalières

**Traitement** : Comparaison entre les précipitations totales mensuelles observées et les normales correspondantes

**3 tableaux d'analyse :**

- automne 1996
- hiver 1997
- automne 1997

**légende des tableaux**

- obs. = somme des précipitations observées au cours du mois
- norm. = normale correspondante
- quotient = obs./norm.

*Tableau 1. – Précipitations durant l'automne 1996.*

| Précipitations automne 1996 (en mm) |         |       |          |       |          |      |         |       |             |
|-------------------------------------|---------|-------|----------|-------|----------|------|---------|-------|-------------|
|                                     | octobre |       | novembre |       | décembre |      | AUTOMNE |       |             |
| station                             | obs     | norm  | obs      | norm  | obs      | norm | obs     | norm  | quotient    |
| Ernage                              | 60      | 71    | 116      | 65    | 40       | 64   | 216     | 200   | 1,08        |
| Dourbes                             | 50      | 68    | 103      | 67    | 40       | 68   | 193     | 203   | 0,95        |
| Malonne                             | 56      | 64    | 119      | 62    | 41       | 65   | 216     | 191   | 1,13        |
| Rochefort                           | 64      | 70    | 97       | 68    | 33       | 69   | 194     | 207   | 0,94        |
| Thimister                           | 85      | 76    | 88       | 78    | 56       | 89   | 229     | 243   | 0,94        |
| Hockay                              | 123     | 94    | 130      | 92    |          |      |         |       |             |
| Mt Rigi                             | 165     | 121   | 153      | 124   | 68       | 136  | 386     | 381   | 1,01        |
| Libramont                           | 74      | 94    | 162      | 103   | 72       | 115  | 308     | 312   | 0,99        |
| Arlon                               | 88      | 87    | 141      | 95    | 68       | 102  | 297     | 284   | 1,05        |
|                                     |         |       |          |       |          |      |         |       | <b>1,01</b> |
| moyenne                             | 85      | 83    | 123      | 84    | 52       | 89   | 255     | 253   |             |
| quotient                            |         | 1,027 |          | 1,471 |          | 0,59 |         | 1,009 |             |



| Précipitations hiver 1997 (en mm) |         |              |         |       |       |       |       |       |       |      |             |
|-----------------------------------|---------|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
|                                   | janvier |              | février |       | mars  |       | avril |       | hiver |      |             |
| station                           | obs     | norm         | obs     | norm  | obs   | norm  | obs   | norm  | obs   | norm | quot.       |
| Ernage                            | 5,2     | 60           | 109,8   | 50    | 30,7  | 51    | 34,2  | 51    | 179,9 | 212  | 0,85        |
| Dourbes                           | 4,6     | 64           | 99,7    | 52    | 43,7  | 54    | 20,3  | 56    | 168,3 | 226  | 0,74        |
| Malonne                           | 7,4     | 61           | 106,5   | 51    | 42,7  | 53    | 27,5  | 53    | 184,1 | 218  | 0,84        |
| Rochefort                         | 9,8     | 65           | 87,3    | 53    | 50,3  | 55    | 28,4  | 58    | 175,8 | 231  | 0,76        |
| Thimister                         | 8,9     | 90           | 132,9   | 74    | 56,7  | 69    | 73,8  | 62    | 272,3 | 295  | 0,92        |
| Hockay                            | 8,2     | 103          | 125,3   | 86    | 75,2  | 84    | 99,7  | 79    | 308,4 | 352  | 0,88        |
| Mt Rigi                           | 11,9    | 134          | 166,8   | 108   | 97,8  | 101   | 127,1 | 94    | 403,6 | 437  | 0,92        |
| Libramont                         | 16,5    | 110          | 172,4   | 87    | 59,3  | 80    | 42,5  | 72    | 290,7 | 349  | 0,83        |
| Arlon                             | 22,4    | 93           | 169,3   | 72    | 35,8  | 70    | 35,4  | 68    | 262,9 | 303  | 0,87        |
|                                   |         |              |         |       |       |       |       |       |       |      | <b>0,85</b> |
| moyenne                           | 10,54   | 86,67        | 130     | 70,33 | 54,69 | 68,56 | 54,32 | 65,89 |       |      |             |
| quotient                          |         | <b>0,122</b> |         | 1,848 |       | 0,798 |       | 0,824 |       |      |             |

| Précipitations automne 1997 (en mm) |         |       |          |       |          |       |         |       |             |
|-------------------------------------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|-------------|
|                                     | octobre |       | novembre |       | décembre |       | AUTOMNE |       |             |
| station                             | obs     | norm  | obs      | norm  | obs      | norm  | obs     | norm  | quotient    |
| Ernage                              | 86,7    | 71    | 50,5     | 65    | 75,5     | 64    | 212,7   | 200   | 1,06        |
| Dourbes                             | 76,9    | 68    | 64,6     | 67    | 56,8     | 68    | 198,3   | 203   | 0,98        |
| Malonne                             | 66,2    | 64    | 42,9     | 62    | 65,4     | 65    | 174,5   | 191   | 0,91        |
| Rochefort                           | 74,1    | 70    | 59,7     | 68    | 59,4     | 69    | 193,2   | 207   | 0,93        |
| Thimister                           | 75,9    | 76    | 50,8     | 78    | 97,7     | 89    | 224,4   | 243   | 0,92        |
| Hockay                              | 101,9   | 94    | 72,2     | 92    | 133      | 102   | 307,1   | 288   | 1,07        |
| Mt Rigi                             | 107,8   | 121   | 83,6     | 124   | 166,6    | 136   | 358     | 381   | 0,94        |
| Libramont                           | 11,8    | 94    | 126,3    | 103   | 150,7    | 115   | 288,8   | 312   | 0,93        |
| Arlon                               | 88      | 87    | 122,9    | 95    | 152,1    | 102   | 363     | 284   | 1,28        |
|                                     |         |       |          |       |          |       |         |       | <b>1,00</b> |
| moyenne                             | 76,59   | 82,78 | 74,83    | 83,78 | 106,4    | 90    | 257,8   | 256,6 |             |
| quotient                            |         | 0,925 |          | 0,893 |          | 1,182 |         | 1,005 |             |

## **Annexe 2**

### ***Définition des types de régime phréatique***

---

Tableaux détaillant les groupements de placettes en types de régime phréatique, ainsi qu'un tableau synthétique.

#### ***Légende des tableaux.***

|          |   |
|----------|---|
| num :    | numéro de placette  |
| moy. :   | moyenne annuelle du niveau d'eau                              |
| min. :   | minimum mesuré du niveau d'eau                                |
| max. :   | maximum mesuré du niveau d'eau                                |
| std. :   | écart-type du niveau d'eau                                    |
| ampl. :  | amplitude annuelle de variation du niveau d'eau (=  max-min ) |
| hiver :  | niveau d'eau hivernal   |
| prtps :  | niveau d'eau printannier                                      |
| cruep :  | niveau d'eau lors de la crue de printemps                     |
| étiage : | niveau d'eau à l'étiage                                       |
| sec :    | longueur de la période d'assèchement                          |
| I.imb. : | indice d'imbibition   |
| I.dr. :  | indice de drainage  |

| num          | moy        | max        | std       | ampl       | hiver      | prtps      | cruepr     | étiag       | sec      | l.imb     | l.dr       |           |
|--------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------|-----------|------------|-----------|
| <b>30</b>    | -86        | -30        | 30        | 103        | <b>-56</b> | <b>-79</b> | <b>-58</b> | -133        | 0        | 46        | -41        | Type 1    |
| <b>9</b>     | -61        | 0          | 64        | 169        | -11        | -27        | 0          | -160        | 0        | 86        | -86        | permanent |
| <b>157</b>   | -69        | -10        | 56        | 145        | -18        | -30        | -12        | -151        | 0        | 56        | -53        | ressuyé   |
| <b>86</b>    | -56        | -13        | 36        | 107        | -21        | -44        | -27        | -120        | 0        | 35        | -46        | variable  |
| <b>52</b>    | -52        | -5         | 42        | 120        | -22        | -22        | -12        | -69         | 0        | 20        | -6         |           |
| <b>63</b>    | -39        | -3         | 37        | 147        | -25        | -25        | -16        | -150        | 0        | 14        | -16        |           |
| <b>18</b>    | -38        | -10        | 28        | 100        | -45        | -30        | -11        | -110        | 0        | 32        | -34        |           |
| <b>moy</b>   | <b>-57</b> | <b>-10</b> | <b>42</b> | <b>127</b> | <b>-28</b> | <b>-37</b> | <b>-19</b> | <b>-128</b> | <b>0</b> | <b>41</b> | <b>-40</b> |           |
| <b>cv(%)</b> | -27        | -90        | 30        | 19         | -53        | -50        | -90        | -23         |          | 55        | -60        |           |
| <b>14</b>    | -59        | -39        | 16        | 61         | -24        | -52        | -47        | -100        | 0        | 8         | -19        | Type 2    |
| <b>44</b>    | -35        | -16        | 13        | 44         | -22        | -25        | -18        | -60         | 0        | 22        | -18        | Permanent |
| <b>13</b>    | -26        | -9         | 14        | 43         | -10        | -21        | -16        | -52         | 0        | 10        | -19        | ressuyé   |
| <b>154</b>   | -43        | -35        | 6         | 22         | -40        | -39        | -35        | -57         | 0        | 7         | -7         | constant  |
| <b>moy</b>   | <b>-41</b> | <b>-25</b> | <b>12</b> | <b>43</b>  | <b>-24</b> | <b>-34</b> | <b>-29</b> | <b>-67</b>  | <b>0</b> | <b>12</b> | <b>-16</b> |           |
| <b>cv(%)</b> | -29        | -51        | 30        | 33         | -44        | -36        | -44        | -28         |          | 51        | -32        |           |
| <b>105</b>   | -26        | 0          | 40        | 130        | 0          | 0          | 0          | -130        | 0        | 0         | 0          | Type 3    |
| <b>137</b>   | -31        | 0          | 31        | 100        | 0          | -21        | -9         | -100        | 0        | 32        | -30        | permanent |
| <b>55</b>    | -30        | 0          | 33        | 91         | 0          | -17        | 0          | -91         | 0        | 49        | -49        | variable  |
| <b>87</b>    | -23        | 0          | 28        | 85         | 0          | -5         | 0          | -85         | 0        | 20        | -20        | noyé      |
| <b>moy</b>   | <b>-27</b> | <b>0</b>   | <b>33</b> | <b>102</b> | <b>0</b>   | <b>-11</b> | <b>-2</b>  | <b>-102</b> | <b>0</b> | <b>25</b> | <b>-25</b> |           |
| <b>cv(%)</b> | -11        |            | 13        | 17         |            | -79        | -173       | -17         |          | 71        | -71        |           |
| <b>121</b>   | -24        | -8         | 20        | 67         | -13        | -11        | -11        | -60         | 0        | 2         | 4          | Type 4    |
| <b>122</b>   | -20        | -5         | 19        | 63         | -8         | -9         | -10        | -56         | 0        | 3         | 6          | permanent |
| <b>12</b>    | -13        | 0          | 12        | 44         | -6         | -7         | -4         | -44         | 0        | 3         | -6         | peu       |
| <b>100</b>   | -15        | -5         | 9         | 25         | -8         | -12        | -8         | -30         | 0        | 11        | -12        | peu noyé  |
| <b>144</b>   | -15        | -5         | 6         | 20         | -10        | -13        | -5         | -20         | 0        | 20        | -20        |           |
| <b>72</b>    | -18        | -5         | 12        | 35         | -8         | -18        | -11        | -40         | 0        | 21        | -23        |           |
| <b>moy</b>   | <b>-17</b> | <b>-5</b>  | <b>13</b> | <b>42</b>  | <b>-9</b>  | <b>-12</b> | <b>-8</b>  | <b>-42</b>  | <b>0</b> | <b>10</b> | <b>-9</b>  |           |
| <b>cv(%)</b> | -22        | -51        | 38        | 42         | -26        | -28        | -36        | -33         | ####     | 80        | -130       |           |
| <b>7</b>     | -10        | 0          | 15        | 42         | <b>-3</b>  | <b>-2</b>  | <b>0</b>   | -42         | 0        | 0         | 0          | Type 5    |
| <b>141</b>   | -12        | 0          | 14        | 41         | -1         | -8         | -1         | -41         | 0        | 23        | -24        | permanent |
| <b>82</b>    | -12        | 0          | 20        | 70         | 0          | -3         | 0          | -70         | 0        | 13        | -13        | peu       |
| <b>107</b>   | -10        | 0          | 11        | 36         | -1         | -7         | -3         | -36         | 0        | 10        | -15        | noyé      |
| <b>56</b>    | -11        | 0          | 13        | 40         | -1         | -4         | 0          | -31         | 0        | 9         | -9         |           |
| <b>53</b>    | -11        | 0          | 16        | 55         | 0          | -2         | 0          | -31         | 0        | 7         | -7         |           |
| <b>113</b>   | -8         | -2         | 5         | 18         | -4         | -6         | -3         | -14         | 0        | 5         | -7         |           |
| <b>152</b>   | -5         | 0          | 8         | 26         | 0          | -3         | 0          | -14         | 0        | 13        | -13        |           |
| <b>153</b>   | -10        | 0          | 10        | 38         | -3         | -6         | -1         | -20         | 0        | 14        | -16        |           |
| <b>moy</b>   | <b>-10</b> | <b>0</b>   | <b>12</b> | <b>41</b>  | <b>-1</b>  | <b>-5</b>  | <b>-1</b>  | <b>-33</b>  | <b>0</b> | <b>10</b> | <b>-12</b> |           |
| <b>cv(%)</b> | -20        | -283       | 34        | 35         | -95        | -45        | -142       | -49         | ####     | 59        | -56        |           |
| <b>120</b>   | -4         | 0          | 5         | 15         | 0          | -1         | 0          | -11         | 0        | 2         | -2         | Type 6    |
| <b>23</b>    | -5         | 0          | 3         | 10         | -2         | -7         | -5         | -7          | 0        | 6         | -4         | permanent |
| <b>59</b>    | -1         | 0          | 2         | 5          | 0          | 0          | 0          | -5          | 0        | 0         | 0          | constant  |
| <b>73</b>    | -2         | 0          | 2         | 6          | 0          | -3         | -2         | -5          | 0        | 6         | -3         | noyé      |
| <b>190</b>   | -4         | 0          | 2         | 9          | -2         | -6         | -5         | -5          | 0        | 5         | -4         |           |
| <b>moy</b>   | <b>-3</b>  | <b>0</b>   | <b>3</b>  | <b>9</b>   | <b>-1</b>  | <b>-3</b>  | <b>-2</b>  | <b>-7</b>   | <b>0</b> | <b>4</b>  | <b>-3</b>  |           |
| <b>cv(%)</b> | -43        | ####       | 39        | 39         | -122       | -83        | -98        | -35         | ####     | 63        | -58        |           |

## 2° TYPES TEMPORAIRES

| num   |  | max |  | hiver | prtps | cruepr |  | sec | l.imb | l.dr |            |
|-------|--|-----|--|-------|-------|--------|--|-----|-------|------|------------|
| 126   |  | -2  |  | -9    | -12   | -5     |  | 48  | 21    | -21  | Type 7     |
| 128   |  | 0   |  | -9    | -21   | -1     |  | 48  | 63    | -65  | temporaire |
| 46    |  | 0   |  | 0     | -10   | 0      |  | 70  | 36    | -36  | noyé       |
| 47    |  | 0   |  | -3    | -7    | 0      |  | 70  | 14    | -14  |            |
| 104   |  | 0   |  | -12   | -11   | -4     |  | 70  | 7     | -15  |            |
| 118   |  | 0   |  | 0     | -7    | 0      |  | 70  | 28    | -28  |            |
| 129   |  | 0   |  | 0     | -10   | 0      |  | 70  | 35    | -35  |            |
| 130   |  | 0   |  | -5    | -15   | -3     |  | 70  | 35    | -40  |            |
| 20    |  | 0   |  | 0     | -36   | 0      |  | 74  | 108   | -108 |            |
| moy   |  | 0   |  | -4    | -14   | -1     |  | 66  | 39    | -40  |            |
| cv(%) |  | 283 |  | 107   | 61    | 133    |  | 14  | 75    | 70   |            |

|     |  |     |  |     |     |     |  |    |    |     |         |
|-----|--|-----|--|-----|-----|-----|--|----|----|-----|---------|
| 32  |  | 0   |  | -1  | -20 | -8  |  | 97 | 43 | -41 | non     |
| 103 |  | -20 |  | -28 | -38 | -24 |  | 47 | 37 | -45 | classés |

|       |  |     |  |     |     |     |  |     |    |     |            |
|-------|--|-----|--|-----|-----|-----|--|-----|----|-----|------------|
| 57    |  | -10 |  | -15 | -91 | -12 |  | 70  |    |     | Type 8     |
| 65    |  | -15 |  | -34 | -37 | -21 |  | 97  | 34 | -35 | temporaire |
| 97    |  | -18 |  | -27 | -40 | -23 |  | 97  | 41 | -47 | ressuyé    |
| 5     |  | -8  |  | -15 | -95 | -11 |  | 140 |    |     |            |
| 158   |  | -23 |  | -27 | -66 | -61 |  | 173 | 16 | -69 |            |
| 159   |  | -10 |  | -13 | -41 | -19 |  | 173 | 83 | -90 |            |
| 162   |  | -5  |  | -6  | -36 | -16 |  | 173 | 78 | -97 |            |
| Moy   |  | -13 |  | -19 | -58 | -23 |  | 132 | 50 | -68 |            |
| cv(%) |  | 46  |  | 47  | 42  | 69  |  | 31  | 51 | 35  |            |

## TABLEAU SYNTHETIQUE

| type                               | moy | min  | max | std | ampl | hiver | prtps | cruepr | étiag | sec | l.imb | l.dr | n  |
|------------------------------------|-----|------|-----|-----|------|-------|-------|--------|-------|-----|-------|------|----|
| <i>permanent</i>                   |     |      |     |     |      |       |       |        |       |     |       |      |    |
| 1                                  | -57 | -137 | -10 | 42  | 127  | -28   | -37   | -19    | -128  | 0   | 41    | -40  | 7  |
| 2                                  | -41 | -67  | -25 | 12  | 43   | -24   | -34   | -29    | -67   | 0   | 12    | -16  | 4  |
| 3                                  | -27 | -102 | 0   | 33  | 102  | 0     | -11   | -2     | -102  | 0   | 25    | -25  | 4  |
| 4                                  | -17 | -47  | -5  | 13  | 42   | -9    | -12   | -8     | -42   | 0   | 10    | -9   | 6  |
| 5                                  | -10 | -41  | 0   | 12  | 41   | -1    | -5    | -1     | -33   | 0   | 10    | -12  | 9  |
| 6                                  | -3  | -9   | 0   | 3   | 9    | -1    | -3    | -2     | -7    | 0   | 4     | -3   | 5  |
| <i>temporaire</i>                  |     |      |     |     |      |       |       |        |       |     |       |      |    |
| 7                                  |     |      | -13 |     |      | -19   | -58   | -23    |       | 132 | 50    | -68  | 9  |
| 8                                  |     |      | 0   |     |      | -4    | -14   | -1     |       | 66  | 39    | -40  | 7  |
| comparaison permanent / temporaire |     |      |     |     |      |       |       |        |       |     |       |      |    |
| 1 à 6                              |     |      | -6  |     |      | -12   | -18   | -11    |       | 0   | 18    | -18  | 35 |
| 7 et 8                             |     |      | -6  |     |      | -11   | -33   | -11    |       | 92  | 42    | -49  | 16 |



## **Annexe 3**

### *Tables de production pour l'aulne glutineux*

---

1. Tables allemandes  
de MITSCHERLICH [1945] in : SHOBER [1975]

2. Tables hongroises  
de SOPP [1974]

## Tables de SOPP [1975]

### *Signification des colonnes*

1. Age (années)
2. Hauteur dominante (Ht en m)
- 3 à 7. Peuplement principal
  3. Hauteur moyenne (Hm en m)
  4. Diamètre moyen ( $D_{1,3}$  en cm)
  5. Surface terrière (G en  $m^2/ha$ )
  6. Nombre de pied (N)
  7. Volume ( $V\ddot{o}$  en  $m^3/ha$ )
- 8 à 10. Eclaircies
  8. Volume prélevé en éclaircie ( $V\ddot{o}$  en  $m^3/ha$ )
  9. Somme des volumes ( $V\ddot{o}$  en  $m^3/ha$ )
  10. % de la production totale prélevée en éclaircie
- 11 à 14 Peuplement total
  11. Production totale ( $V\ddot{o}$  en  $m^3/ha$ )
  12. Accroissement annuel moyen en volume ( $m^3/ha$ )
  13. Accroissement annuel courant en volume ( $m^3/ha$ )
  14. Age (années)

*Note : les volumes sont estimés jusqu'à une recoupe de 5 cm de diamètre.*





## Annexe 4

### *Tarif de cubage pour l'aulne glutineux en Région wallonne*

[THIBAUT et al., 1998]

---

#### *Liste des abréviations retenues :*

c = circonférence à 1,5 m du sol (en cm) ;

h = hauteur totale (en m) ;

hdom = hauteur dominante (en m),

VBFT = volume du bois fort de la tige (découpe de 22 cm de circonférence), en m<sup>3</sup> ;

V60 = volume jusqu'à une découpe de 60 cm de circonférence, en m<sup>3</sup> ;

V90 = volume jusqu'à une découpe de 90 cm de circonférence, en m<sup>3</sup> ;

V120 = volume jusqu'à une découpe de 120 cm de circonférence, en m<sup>3</sup> ;

V50% = volume jusqu'à une découpe correspondant à la moitié de la circonférence à 1,5 m, en m<sup>3</sup>.

#### *Tarif de cubage à une entrée : VBFT = f(c) et volume pour différentes découpes.*

| c<br>(cm) | VBFT<br>(m <sup>3</sup> ) | V60<br>(m <sup>3</sup> ) | V90<br>(m <sup>3</sup> ) | V120<br>(m <sup>3</sup> ) | V50%<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-----------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 25        | 0,016                     | -                        | -                        | -                         | -                         |
| 35        | 0,068                     | -                        | -                        | -                         | -                         |
| 45        | 0,136                     | -                        | -                        | -                         | 0,133                     |
| 55        | 0,222                     | -                        | -                        | -                         | 0,215                     |
| 65        | 0,325                     | 0,124                    | -                        | -                         | 0,312                     |
| 75        | 0,444                     | 0,276                    | 0,024                    | -                         | 0,425                     |
| 85        | 0,581                     | 0,445                    | 0,092                    | -                         | 0,554                     |
| 95        | 0,735                     | 0,627                    | 0,218                    | -                         | 0,697                     |
| 105       | 0,907                     | 0,820                    | 0,404                    | 0,052                     | 0,856                     |
| 115       | 1,095                     | 1,025                    | 0,642                    | 0,152                     | 1,030                     |
| 125       | 1,300                     | 1,242                    | 0,916                    | 0,308                     | 1,219                     |
| 135       | 1,523                     | 1,472                    | 1,211                    | 0,535                     | 1,424                     |
| 145       | 1,762                     | 1,716                    | 1,513                    | 0,853                     | 1,643                     |
| 155       | 2,019                     | 1,974                    | 1,815                    | 1,285                     | 1,878                     |
| 165       | 2,293                     | 2,247                    | 2,117                    | 1,857                     | 2,127                     |

$$\text{Equation : VBFT} = -0,037047 + 0,000085578 c^2$$

**Tarif à une entrée paramétré : VBFT = f(c, hdom)**

| c<br>(cm) | hdom (m) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 10       | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    |
| 25        | 0,017    | 0,021 | 0,026 | 0,030 | 0,035 | 0,040 | 0,045 | 0,050 | 0,055 | 0,061 | 0,066 |
| 35        | 0,034    | 0,043 | 0,052 | 0,061 | 0,070 | 0,080 | 0,090 | 0,100 | 0,110 | 0,121 | 0,132 |
| 45        | 0,057    | 0,072 | 0,087 | 0,102 | 0,118 | 0,134 | 0,151 | 0,168 | 0,185 | 0,203 | 0,221 |
| 55        | 0,087    | 0,108 | 0,131 | 0,154 | 0,178 | 0,203 | 0,228 | 0,254 | 0,280 | 0,307 | 0,334 |
| 65        | 0,122    | 0,153 | 0,185 | 0,218 | 0,252 | 0,286 | 0,322 | 0,358 | 0,395 | 0,433 | 0,471 |
| 75        | 0,164    | 0,205 | 0,248 | 0,292 | 0,338 | 0,384 | 0,432 | 0,481 | 0,530 | 0,581 | 0,632 |
| 85        | 0,212    | 0,266 | 0,321 | 0,378 | 0,437 | 0,497 | 0,559 | 0,622 | 0,686 | 0,751 | 0,818 |
| 95        | 0,267    | 0,334 | 0,404 | 0,475 | 0,549 | 0,625 | 0,703 | 0,782 | 0,862 | 0,945 | 1,028 |
| 105       | 0,328    | 0,410 | 0,496 | 0,584 | 0,675 | 0,768 | 0,863 | 0,961 | 1,060 | 1,161 | 1,263 |
| 115       | 0,396    | 0,495 | 0,598 | 0,704 | 0,814 | 0,926 | 1,041 | 1,158 | 1,278 | 1,400 | 1,523 |
| 125       | 0,470    | 0,588 | 0,710 | 0,836 | 0,966 | 1,100 | 1,236 | 1,375 | 1,517 | 1,662 | 1,808 |
| 135       | 0,550    | 0,688 | 0,832 | 0,980 | 1,132 | 1,288 | 1,448 | 1,611 | 1,778 | 1,947 | 2,119 |
| 145       | 0,638    | 0,797 | 0,963 | 1,135 | 1,311 | 1,492 | 1,678 | 1,867 | 2,059 | 2,255 | 2,454 |
| 155       | 0,731    | 0,915 | 1,105 | 1,302 | 1,504 | 1,712 | 1,924 | 2,141 | 2,362 | 2,587 | 2,815 |
| 165       | 0,832    | 1,040 | 1,257 | 1,481 | 1,711 | 1,947 | 2,189 | 2,435 | 2,686 | 2,942 | 3,202 |

Equation : VBFT = exp (-13,517484) c<sup>2,058018</sup> hdom<sup>1,226965</sup>

**Tarif de cubage à 2 entrées [VBFT (m³) = f(c, h)].**

| c<br>(cm) | h (m) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    |
| 25        | 0,017 | 0,021 | 0,025 | 0,029 | 0,033 | 0,038 | 0,042 | 0,046 | 0,050 | 0,055 | 0,059 |
| 35        | 0,048 | 0,056 | 0,065 | 0,073 | 0,081 | 0,089 | 0,098 | 0,106 | 0,114 | 0,123 | 0,131 |
| 45        | 0,086 | 0,100 | 0,114 | 0,127 | 0,141 | 0,155 | 0,168 | 0,182 | 0,196 | 0,210 | 0,223 |
| 55        | 0,131 | 0,152 | 0,172 | 0,193 | 0,213 | 0,234 | 0,254 | 0,274 | 0,295 | 0,315 | 0,336 |
| 65        | 0,183 | 0,212 | 0,240 | 0,269 | 0,297 | 0,326 | 0,354 | 0,383 | 0,412 | 0,440 | 0,469 |
| 75        | 0,242 | 0,280 | 0,318 | 0,356 | 0,394 | 0,432 | 0,470 | 0,508 | 0,546 | 0,584 | 0,622 |
| 85        | 0,307 | 0,356 | 0,405 | 0,453 | 0,502 | 0,551 | 0,600 | 0,649 | 0,698 | 0,746 | 0,795 |
| 95        | 0,379 | 0,440 | 0,501 | 0,562 | 0,623 | 0,684 | 0,745 | 0,806 | 0,867 | 0,928 | 0,989 |
| 105       | 0,458 | 0,532 | 0,607 | 0,681 | 0,756 | 0,830 | 0,905 | 0,979 | 1,054 | 1,128 | 1,203 |
| 115       | 0,543 | 0,633 | 0,722 | 0,811 | 0,901 | 0,990 | 1,080 | 1,169 | 1,258 | 1,348 | 1,437 |
| 125       | 0,636 | 0,741 | 0,847 | 0,952 | 1,058 | 1,164 | 1,269 | 1,375 | 1,480 | 1,586 | 1,692 |
| 135       | 0,735 | 0,858 | 0,981 | 1,104 | 1,227 | 1,351 | 1,474 | 1,597 | 1,720 | 1,843 | 1,966 |
| 145       | 0,841 | 0,983 | 1,125 | 1,267 | 1,409 | 1,551 | 1,693 | 1,835 | 1,977 | 2,119 | 2,261 |
| 155       | 0,953 | 1,116 | 1,278 | 1,440 | 1,603 | 1,765 | 1,927 | 2,090 | 2,252 | 2,414 | 2,577 |
| 165       | 1,072 | 1,256 | 1,440 | 1,624 | 1,808 | 1,992 | 2,176 | 2,360 | 2,544 | 2,728 | 2,912 |

Equation : VBFT = -0,032570 + 0,001122 c + 0,000003379 c<sup>2</sup> h

