



**HAL**  
open science

## **AbiAl v1.0 - un simulateur de croissance-production de type arbre indépendant des distances (MAID) pour les peuplements purs et réguliers de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les massifs des Vosges et du Jura**

Jean-Daniel Bontemps, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Vincent Perez,  
Daniel Rittié, Laurent Saint-André, Ingrid Seynave

### ► To cite this version:

Jean-Daniel Bontemps, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Vincent Perez, Daniel Rittié, et al.. AbiAl v1.0 - un simulateur de croissance-production de type arbre indépendant des distances (MAID) pour les peuplements purs et réguliers de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les massifs des Vosges et du Jura. 2009. hal-00820917

**HAL Id: hal-00820917**

**<https://hal.science/hal-00820917>**

Submitted on 13 May 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **AbiAl v1.0 – un simulateur de croissance-production de type arbre indépendant des distances (MAID) pour les peuplements purs et réguliers de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les massifs des Vosges et du Jura.**

## *Rapport de modélisation et de présentation du simulateur*

**Jean-Daniel BONTEMPS<sup>1</sup>, Fleur LONGUETAUD<sup>2</sup>, Frédéric MOTHE<sup>2</sup>, Vincent PEREZ<sup>1</sup>, Daniel RITTIE<sup>2</sup>, Laurent SAINT-ANDRE<sup>3</sup>, Ingrid SEYNAVE<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup>AgroParisTech, Centre de Nancy, UMR 1092 INRA/AgroParisTech LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois), 14 rue Girardet, 54000 Nancy

<sup>2</sup>INRA, Centre de Nancy-Lorraine, UMR 1092 INRA/AgroParisTech LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois), 54280 Champenoux.

<sup>3</sup>INRA, Centre de Nancy-Lorraine, UR 1138 BEF (Biogéochimie des écosystèmes forestiers), 54280 Champenoux.

**Coordonnateur et rédacteur principal : Jean-Daniel BONTEMPS**

## **Introduction**

Le simulateur est conçu suivant une architecture similaire à celle du simulateur Fagacées (Dhôte 1995, Dhôte et Le Moguedec 2005). Cette architecture est fondée sur 5 relations fondamentales : (i) un modèle de croissance en hauteur dominante permet d'apprécier l'indice de fertilité (IF) du peuplement et de prédire ses accroissements à tout âge, (ii) un modèle de loi d'auto-éclaircie permet de calculer un indice de densité relative des peuplements (RDI), (iii) un modèle de loi de productivité du peuplement (loi de Eichhorn) permet de déduire la production brute en surface terrière du peuplement, connaissant son accroissement en hauteur dominante et d'autres caractéristiques du peuplement, (iv) un modèle de relation taille-croissance permet de ventiler la productivité du peuplement sur les individus, en fonction de leur statut social et de caractéristiques du peuplement, (v) un modèle de relation individuelle diamètre-hauteur permet d'attribuer une hauteur à chaque individu. En complément, un assortiment de modèles de cubage d'arbre issus de la littérature et permettant d'estimer divers volumes en fonction des caractéristiques dendrométriques ont été incorporés.

Le simulateur est initialement développé pour les massifs des Vosges et du Jura, à partir d'un matériel dendrométrique issu : (i) du réseau – éteint – de placettes permanentes INRA (PP), (ii) des placettes temporaires de l'INRA (PT), dont certaines ont fait l'objet d'une ou deux remesures (il s'agit dans ce dernier cas de mesures ONF), (iii) des placettes d'analyses de tiges de l'ONF pour le massif des Vosges (AT), (iv) des 3 premiers cycles annuels des données de l'IFN (nouvelle méthode d'inventaire) qui ont joué un rôle exploratoire (PIFN). Les travaux ont été développés indépendamment des références disponibles sur le Jura (Duplat 1980) et les Vosges (Lespagnol 1998, Gallet 1998).

La recherche d'un effet de l'altitude sur les relations statistiques qui composent le simulateur a été systématique.

**AVERTISSEMENT: Du fait de la faible disponibilité du matériel dendrométrique dans le massif du Jura et l'existence de confusions statistiques sur le réseau permanent, cette version du simulateur doit être considérée comme préliminaire par l'utilisateur. Elle reste en diffusion contrôlée par les auteurs tant que son évaluation complète n'est pas terminée. Les incertitudes ou situations qui conduisent à une utilisation du simulateur en extrapolation sont mentionnées au long de ce document.**

## Table des matières

<b>Notations</b>	<b>3</b>
<b>Présentation du matériel dendrométrique</b>	<b>4</b>
0. Localisation des placettes permanentes et temporaires	4
1. Présentation des placettes permanentes de l'INRA	4
2. Présentation des placettes temporaires de l'INRA	10
3. Analyses de tige, données d'accroissement en hauteur pour les Vosges	18
4. Préparation des données, calcul des variables peuplement $N$ , $G$ , $H_0$ – I Seynave	20
<b>Présentation des composants du simulateur</b>	<b>22</b>
1. Modèle de croissance en hauteur dominante – J-D Bontemps	22
2. Modèle de loi d'auto-éclaircie – F Longuetaud et F Mothe	27
3. Modèle de productivité du peuplement (loi de Eichhorn) – J-D Bontemps	29
4. Modèle de relation taille – croissance individuelle – L Saint-André	36
5. Modèle de relation individuelle hauteur–diamètre – F Longuetaud	39
6. Modèles de cubage (littérature)	42
<b>Implémentation du simulateur et adaptations – F Mothe/J-D Bontemps</b>	<b>43</b>
0. Notations	
1. Fonctionnement général du simulateur	43
2. Utilisation et adaptation des modèles	48
3. Organisation des fichiers source	49
<b>Références</b>	<b>50</b>

## Notations

AT : analyse de tige  
PP : placette permanente  
PT : placette temporaire  
PIFN : placette IFN

$ht$  : hauteur totale d'un arbre  
 $c$  : circonférence d'un arbre à 1,30m  
 $d$  : diamètre d'un arbre à 1,30m  
 $v$  : volume total d'un arbre  
 $g$  : surface terrière individuelle

$H_0$  : hauteur dominante du peuplement  
 $N$  : densité du peuplement à l'hectare  
 $G$  : surface terrière du peuplement  
 $GT$  : production totale en surface terrière du peuplement  
 $C_g, D_g$  : circonférence ou diamètre quadratique moyen(ne) du peuplement  
 $C_0, D_0$  : circonférence ou diamètre dominant(e) du peuplement

$IF$  : indice de fertilité, défini à 100 ans (âge à 1,30m de hauteur)  
 $RDI$  : Indice de densité relative

$\Delta$  : indique un accroissement si placé devant une variable peuplement.

# Présentation du matériel dendrométrique

## 0. Localisation des placettes permanentes et temporaires

L'altitude étant un facteur étudié, sa documentation était nécessaire pour l'ensemble des placettes. Le réseau permanent a fait l'objet d'un géo-référencement récent par GPS. Les coordonnées géographiques et l'altitude sont exactes. La localisation des placettes temporaires est plus approximative, avec une mention de commune et de forêt dans une majorité de cas dans les archives (parfois la parcelle). Une localisation moyenne de la forêt leur a donc été attribuée par pointage sur carte au 1/25000<sup>e</sup> (IGN, [www.geoportail.fr](http://www.geoportail.fr)). Une altitude a ensuite été extraite d'un modèle numérique de terrain au pas de 50m. Afin de tenir compte de l'incertitude sur la localisation, une altitude moyenne dans un rayon de 2km a été calculée. On disposait également d'un sous-échantillon de placettes temporaires pour lesquelles l'altitude était consignée dans les fiches d'inventaires de terrain. La **figure 1** montre une bonne préservation du gradient d'altitude entre "archive" et moyenne "2km", permettant d'utiliser l'information.

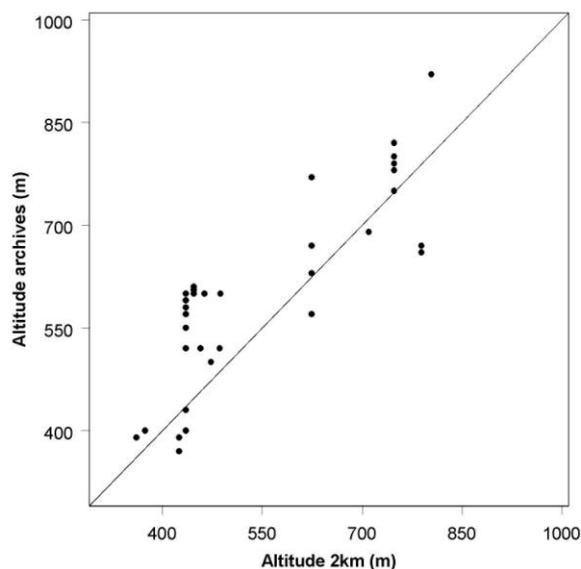


Figure 1. Correspondance entre l'altitude moyenne dans un rayon de 2km et l'altitude issue des archives des placettes temporaires.

## 1. Présentation des placettes permanentes de l'INRA

### *Opportunité*

Les placettes permanentes permettent un suivi dendrométrique longitudinal des peuplements, avec un contrôle et une documentation quantitative de la sylviculture. Elles fournissent donc des accroissements individuels et du peuplement (accroissement brut) en surface terrière. Des échantillons diamètre-hauteur individuels sont de plus constitués à l'occasion des inventaires ou éclaircies. Les hauteurs individuelles et du peuplement ne sont pas mesurées. Elles sont donc classiquement reconstituées par des relations diamètre-hauteur, fondées sur les échantillons. Ces données sont donc utiles pour : l'établissement des modèles de relation

diamètre-hauteur, de croissance en hauteur dominante, de loi de productivité du peuplement, de relation taille-croissance. Les inventaires diamètre-hauteur n'étant pas réalisés à toutes les dates d'inventaires, l'effectif des accroissements en hauteur dominante est plus faible que celui des accroissements en surface terrière. La hauteur dominante est donc reconstituée aux dates déficientes par un modèle de croissance en hauteur dominante, aux fins d'ajustement des relations précédentes.

### *Caractéristiques du réseau*

Les principales caractéristiques du réseau permanent INRA pour les Vosges et le Jura sont reportées dans le **tableau 1**.

Le réseau comprend un total de 22 placettes permanentes d'une surface en général comprise entre 0,5 et 2ha: 15 placettes réparties sur 7 expériences et 4 massifs dans les Vosges, et plus modestement 7 placettes réparties sur 3 expériences dans un seul massif dans le Jura (voir localisation sur la **figure 2**). Les altitudes s'étendent de 427 à 774m.

**Le réseau n'est plus actif.** Les placettes ont été installées à 2 périodes : à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et dans les années 1930. Il a été arrêté dans les années 1960, et au plus tard dans les années 1980 dans le Jura. **On ne dispose donc pas d'information sur le comportement récent des accroissements du Sapin.** Ceci constitue une faiblesse importante, dans le contexte des dépérissements observés dans les années 1980. De fait, le sapin pectiné est une des rares essences de la ressource à avoir montré un déclin de croissance radiale dans les dernières décennies (Becker 1989).

**L'âge ne fait pas partie des facteurs croisés dans le plan d'expérience.** Les placettes ont majoritairement été installées à des âges allant de 60 à 80 ans, et plus rarement au delà de 100 ans. **On ne dispose donc pas d'information sur le comportement des accroissements du Sapin aux jeunes ages**, ce qui constitue une seconde faiblesse du dispositif.

L'analyse du dispositif est poursuivie dans les **figures 3 à 8**. Elle permet d'observer :

- qu'en dépit des traitements sylvicoles qualitatifs apparemment contrastés (**tableau 1**), **la majorité des points d'inventaire se situe dans une gamme de RDI supérieure à 0,5**, qui ne décline que dans la phase de renouvellement des peuplements (**figure 3**). Il n'y a donc pas expérimentation de sylvicultures dynamiques à proprement parler, ce qui ce conçoit étant donné l'âge du réseau. Cette limite est importante car **elle empêche d'évaluer les pertes de production et la réaction de la croissance individuelle à de faibles niveaux de densité**,
- **qu'il existe une liaison marquée entre la fertilité (IF) et la sylviculture (RDI moyen, figure 4)**, les peuplements les plus denses étant situés dans les meilleures fertilités. Ce défaut est majeur pour une expérience sylvicole, mais correspond à une pratique explicitée pour l'époque. Les gammes de fertilité sont par ailleurs modérées,
- qu'il n'existe pas de confusion entre l'âge et la fertilité (**figure 5**),

Le positionnement des facteurs expérimentaux par rapport à l'altitude est par ailleurs analysé dans les **figures 6 à 8**. Il permet d'observer une **confusion entre le massif et l'altitude (figure 6)**. Il y a en revanche un **bon équilibre entre altitude d'une part et fertilité (figure 7) ou densité (figure 8) d'autre part**.

Massif	Dpt	Forêt	Expérience	Placette	Alt (m)	Date Initiale	Date Finale	Age Initial	Age Final	Traitement	RDI	IF (m)
Vosges	67	Haslach	Nideck	1	589	1934	1962	83	111	Eclaircie faible	0,96	33,6
Vosges	67	Haslach	Nideck	2	589	1934	1962	83	111	Eclaircie forte	0,96	34,5
Vosges	88	CellesSurPlaine	CellesSurPlaine	1	427	1893	1957	75	139	Non decrit	0,49	31,3
Vosges	88	CellesSurPlaine	CellesSurPlaine	2A	427	1893	1957	75	139	Non decrit	0,84	31,7
Vosges	88	CellesSurPlaine	CellesSurPlaine	2B	427	1893	1957	75	139	Non decrit	0,72	30,9
Vosges	88	CellesSurPlaine	CellesSurPlaine	3	427	1893	1957	75	139	Non decrit	0,50	27,1
Vosges	88	CellesSurPlaine	CellesSurPlaine	4	427	1893	1957	75	139	Non decrit	0,76	33,9
Vosges	88	Rambervillers	BasseGuidot	1	450	1884	1949	90	155	Non decrit	0,71	32,4
Vosges	88	Rambervillers	BasseGuidot	2	450	1884	1949	90	155	Non decrit	0,75	23,9
Vosges	88	ValAjol	Bosson	1	636	1931	1965	76	110	Non decrit	0,79	33,0
Vosges	88	ValAjol	ChanotDuMoncel	1	534	1931	1965	62	96	Eclaircie faible	0,86	34,9
Vosges	88	ValAjol	ChanotDuMoncel	2	534	1931	1965	62	96	Eclaircie forte	0,76	35,3
Vosges	88	ValAjol	Layol	1	599	1931	1965	46	80	Eclaircie forte	0,68	33,1
Vosges	88	ValAjol	Layol	2	599	1931	1965	46	80	Eclaircie faible	0,68	35,7
Vosges	88	ValAjol	Thiebe	1	566	1932	1955	142	165	Non decrit	0,31	19,7
Jura	39	LaJoux	Bagage	1	737	1928	1955	129	156	Non decrit	0,48	30,1
Jura	39	LaJoux	LesSources	1	730	1928	1979	83	134	Eclaircie forte, rotation 5 ans	0,79	31,5
Jura	39	LaJoux	LesSources	2	730	1928	1979	83	134	Eclaircie forte, rotation 10 ans	0,81	31,7
Jura	39	LaJoux	LesSources	3	730	1928	1979	83	134	Eclaircie faible, rotation 5 ans	0,82	32,9
Jura	39	LaJoux	LesSources	4	730	1928	1979	83	134	Eclaircie faible, rotation 10 ans	0,91	33,4
Jura	39	LaJoux	PetitsCherards	1	774	1928	1977	113	162	Eclaircie faible	0,66	29,3
Jura	39	LaJoux	PetitsCherards	2	774	1928	1977	113	162	Eclaircie forte	0,70	30,8

**Tableau 1. Principales caractéristiques du réseau permanent INRA de Sapin pectiné dans les Vosges et le Jura.**

Les valeurs de *RDI* ont été calculées par la relation fournie dans la section 2 de la partie modélisation. Les valeurs d'*IF* ont été calculées avec les références fournies dans la section 1. Les ages sont évalués depuis l'origine du peuplement.

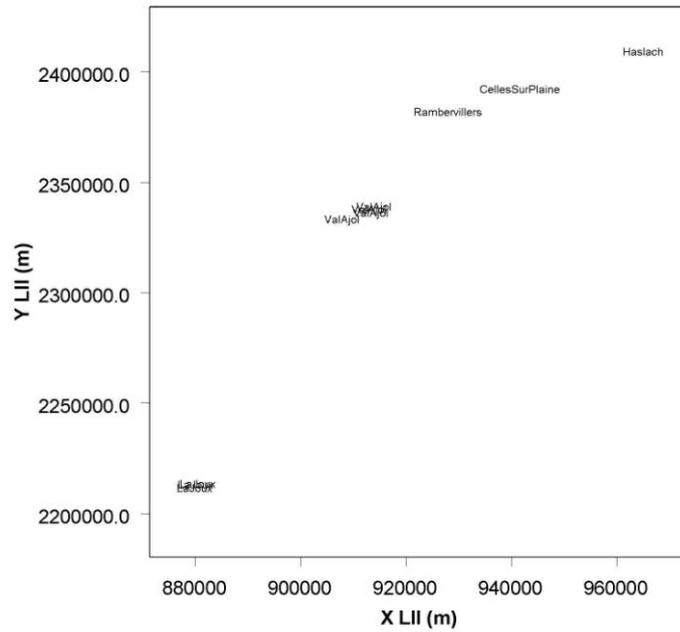


Figure 2. Localisation des expériences des placettes permanentes.

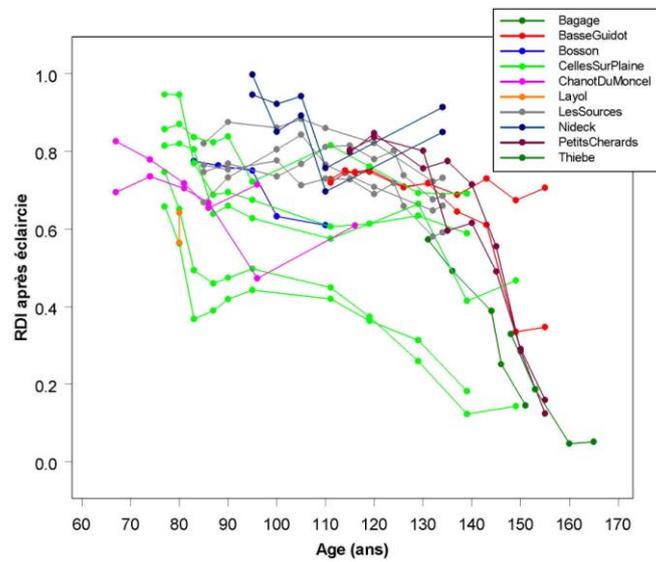
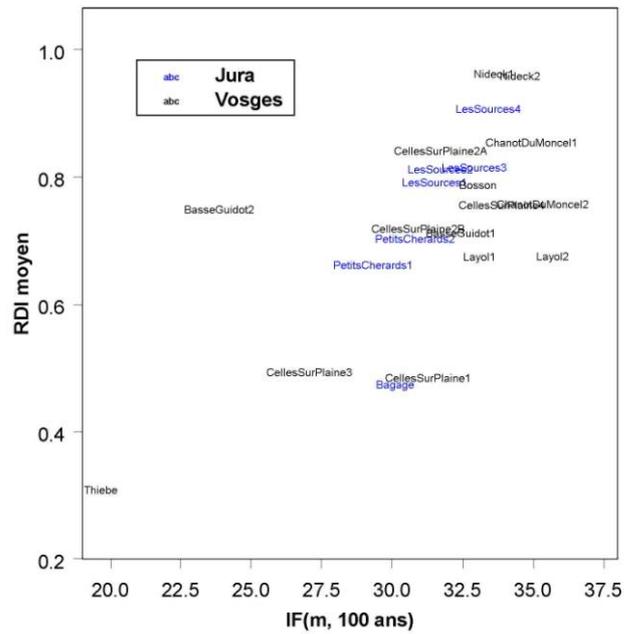
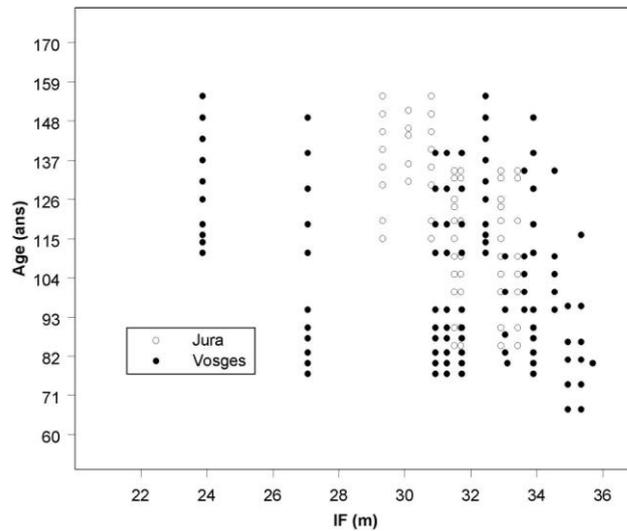


Figure 3. Trajectoires âge – RDI des placettes permanentes, regroupées par expérience.



**Figure 4. Représentation du réseau permanent dans un plan fertilité – sylviculture.**  
Le RDI moyen a été calculé avec une pondération par la durée inter-inventaire.



**Figure 5. Représentation du réseau permanent dans un plan fertilité – âge.**

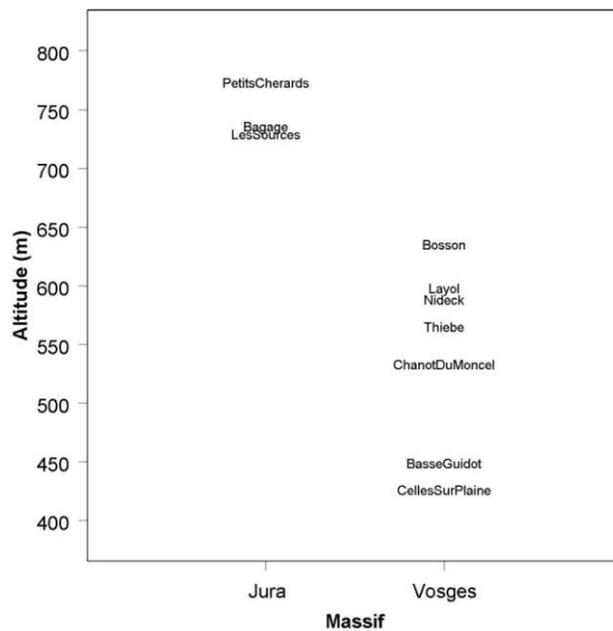


Figure 6. Gradient d'altitude couvert par le réseau permanent décliné par massif.

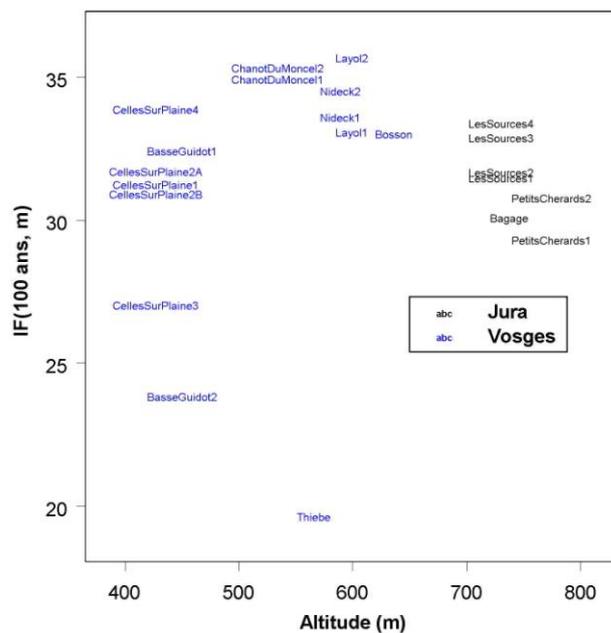


Figure 7. Représentation du réseau permanent dans un plan altitude – fertilité.

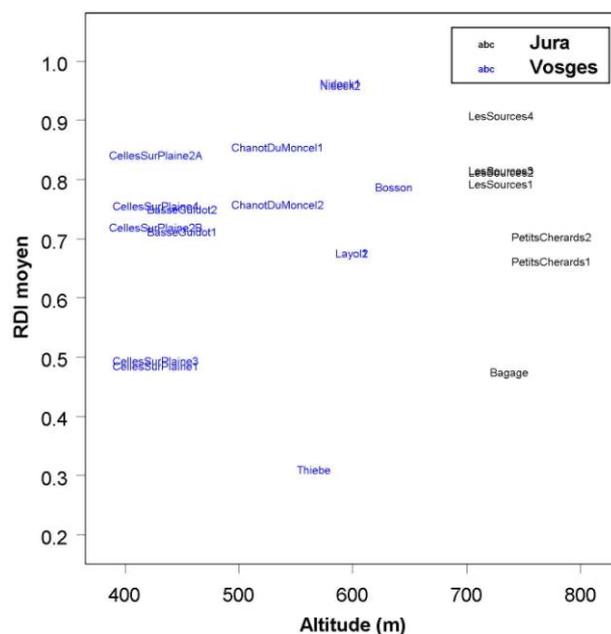


Figure 8. Représentation du réseau permanent dans un plan altitude – sylviculture.

## 2. Présentation des placettes temporaires de l'INRA

### *Opportunité*

Les placettes temporaires se fondent sur le protocole Décourt (Décourt 1973). Elles font l'objet d'un inventaire exhaustif du peuplement par classe de diamètre de 5 cm, et de la mesure d'un échantillon diamètre-hauteur. Un faible nombre a fait l'objet d'un ou deux cycles de remesures, à intervalle de temps d'une quinzaine d'années. En revanche, les éclaircies ne sont pas documentées. Dans ces conditions les placettes temporaires sont utiles pour l'établissement de relations diamètre-hauteur, et pour accéder à des accroissements reconstitués en hauteur dominante dans le cas des placettes à remesure. Les inventaires par classe ont été utilisés pour générer la distribution initiale des diamètres dans le peuplement. Concernant les relations diamètre-hauteur, le grand nombre de placettes doit permettre de décorrélérer avantagement l'âge, le RDI, la fertilité et l'altitude, qui peuvent influencer la forme de ces relations.

### *Caractéristiques du réseau*

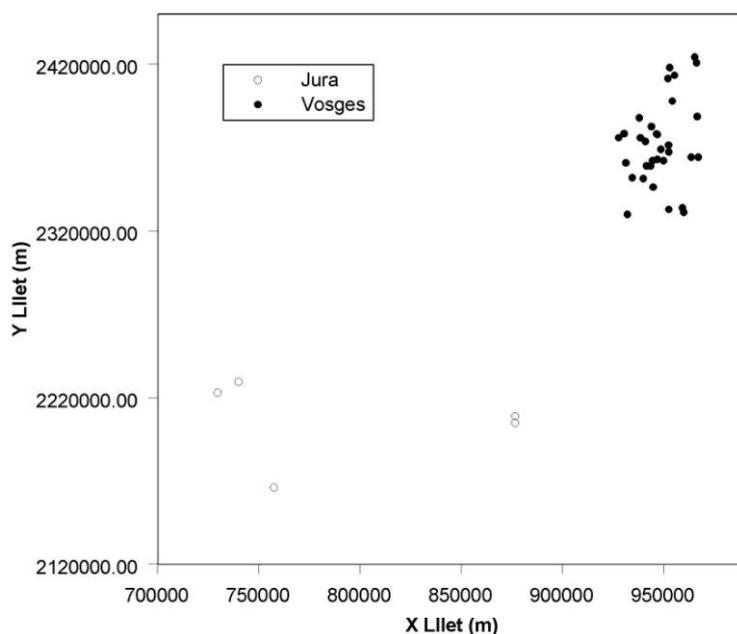
98 placettes temporaires ont été numérisées, avec l'objectif de couvrir au mieux les massifs des Vosges et du Jura. Leurs caractéristiques sont reportées dans le **tableau 2**.

A nouveau, le massif des Vosges est bien mieux couvert (87 placettes) que le Jura (11 placettes, voir **figure 9**). Les placettes ont fait l'objet d'une première série de mesures dans les années 1970-72, et les années 1960 dans le Jura. Certaines ont été remesurées dans les années 1984-85. Un nouveau cycle de mesure a été opéré en 1996 par l'ONF. Ces dernières données ont été mobilisées pour les seuls accroissements en hauteur dominante (données fournies par l'ONF).

La présentation du réseau est poursuivie dans les **figures 10 à 15**. Elle permet d'observer :

- une extension générale des gradients couverts par le réseau permanent, incluant **un gradient d'altitude de 340 à 1020m (figure 10)**, **une gamme d'âge de 50-160 ans (figure 11)**, **des fertilités allant de 20 à 35m (figure 11)**, et **une gamme semblable de RDI (0,6 à 1,1, figure 12)**,

- **l'absence de confusion entre la fertilité et la densité, de même qu'entre l'altitude d'une part et la fertilité et la densité d'autre part (figures 13 à 15)**.



**Figure 9. Localisation des placettes temporaires de l'INRA.**

**Tableau 2. Principales caractéristiques du réseau temporaire INRA de Sapin pectiné dans les Vosges et le Jura.**

Placette	Massif	Commune	Forêt	Alt 2km (m)	Surface (ares)	Date	Age	RDI	IF (m)
88112	Vosges	Saint-Dié	HospicesDeNancy	379	36,97	1970	111	0,70	30,7
88113	Vosges	Saint-Dié	HospicesDeNancy	379	32,40	1970	116	0,93	28,4
88114	Vosges	Saint-Dié	HospicesDeNancy	379	17,70	1970	91	0,81	26,9
88115	Vosges	Saint-Dié	HospicesDeNancy	379	16,03	1970	113	0,88	21,3
88115	Vosges	Saint-Dié	HospicesDeNancy	379	16,03	1985	128	0,82	22,7
88116	Vosges	Plainfaing	FC Plainfaing	591	30,22	1970	96	0,86	27,1
88117	Vosges	Plainfaing	FC Plainfaing	591	18,59	1970	84	0,83	27,7
88117	Vosges	Plainfaing	FC Plainfaing	591	19,59	1985	98	0,81	28,7
88118	Vosges	Ban de Laveline	FP Mme Bastien	524	22,19	1970	79	0,74	32,7
88119	Vosges	Gerardmer	FD Gerardmer	787	32,52	1970	75	0,71	32,3
88119	Vosges	Gerardmer	FD Gerardmer	787	32,52	1985	90	0,63	32,4
88120	Vosges	Aumontzey	FC Aumontzey	572	37,08	1970	76	0,75	29,7
88120	Vosges	Aumontzey	FC Aumontzey	572	37,08	1985	91	0,74	31,1
88121	Vosges	Aumontzey	FC Aumontzey	572	12,18	1970	56	0,67	30,2
88121	Vosges	Aumontzey	FC Aumontzey	572	12,18	1985	71	0,65	30,4
88122	Vosges	Gerardmer	FD Gerardmer	787	8,23	1970	48	0,95	31,7
88123	Vosges	Gerbepal	FC Gerbepal	735	24,08	1970	140	0,80	28,1
88124	Vosges	Le Thillot	FC Le Thillot	577	41,17	1970	101	0,89	27,5
88124	Vosges	Le Thillot	FC Le Thillot	577	41,17	1985	116	0,76	26,6
88125	Vosges	La Bresse	FC La Bresse	1022	26,56	1970	121	1,04	24,5
88131	Vosges	Clefcy	FC Clefcy	606	29,43	1972	103	1,01	28,3
88132	Vosges	Clefcy	FC Clefcy	606	16,41	1972	78	0,96	27,8
88133	Vosges	Ban sur Meurthe	Ban sur Meurthe	749	46,07	1972	163	0,64	23,1
88134	Vosges	Ban sur Meurthe	Ban sur Meurthe	749	20,93	1972	144	0,88	25,6
88135	Vosges	Plainfaing	Plainfaing Barançon	809	39,20	1972	132	1,07	31,5
88135	Vosges	Plainfaing	Plainfaing Barançon	809	39,20	1985	145	1,02	32,7
88136	Vosges	Plainfaing		591	28,48	1971	93	1,07	27,8
88136	Vosges	Plainfaing		591	28,48	1984	106	0,95	28,2
88138	Vosges	La croix aux Mines		559	15,66	1972	81	0,86	31,2

Placette	Massif	Commune	Forêt	Alt 2km (m)	Surface (ares)	Date	Age	RDI	IF (m)
88139	Vosges	La croix aux Mines	HospicesDePompey	780	40,26	1972	118	0,93	30,4
88140	Vosges	La croix aux Mines	HospicesDePompey	780	23,68	1972	158	0,71	26,8
88141	Vosges	Ban de Laveline	BanDeLavelineDevantStDie	524	29,29	1972	120	0,98	29,6
88145	Vosges	Le Boulay	LaBoulay		28,38	1972	76	0,77	33,6
88147	Vosges	Gerardmer	FD Gerardmer	787	25,59	1972	76	0,91	34,5
88148	Vosges	Gerardmer	FC Gerardmer	804	21,45	1971	97	0,86	27,8
88148	Vosges	Gerardmer	FC Gerardmer	804	21,45	1984	110	0,78	28,6
88150	Vosges	Ormont Robache	FD OrmontRobache	624	29,96	1972	144	0,68	19,5
88151	Vosges	Ban de Sapt	FC BanDeSapt	487	14,52	1972	85	0,77	27,6
88153	Vosges	Ormont Robache	OrmontRobache	624	26,23	1972	91	0,82	24,9
88154	Vosges	Saint-Dié	FC SaintDie	463	31,63	1971	115	0,62	25,1
88155	Vosges	Nayemont les fosses	FD NayemontLesFosses	486	14,51	1971	70	0,76	27,9
88155	Vosges	Nayemont les fosses	FD NayemontLesFosses	486	14,51	1985	84	0,71	27,6
88156	Vosges	Ormont Robache	OrmontRobache	624	36,56	1971	126	0,84	25,0
88156	Vosges	Ormont Robache	OrmontRobache	624	36,56	1985	140	0,80	24,7
88157	Vosges	Saint-Dié	FD OrmontRobache	624	17,46	1971	106	0,95	30,4
88157	Vosges	Saint-Dié	FD OrmontRobache	624	17,46	1985	120	0,77	28,7
88159	Vosges	Moyen moutier	FC Moyenmoutiers	435	16,28	1972	91	0,68	32,2
88160	Vosges	Moyen moutier	FC Moyenmoutiers	435	13,36	1971	81	0,76	30,7
88160	Vosges	Moyen moutier	FC Moyenmoutiers	435	13,36	1984	94	0,61	31,6
88161	Vosges	Moyen moutier	FC Moyenmoutiers	435	31,36	1971	103	0,70	34,5
88162	Vosges	Moyen moutier	FC Moyenmoutiers	435	33,39	1971	105	0,61	29,2
88163	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	20,64	1971	101	0,81	28,7
88164	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	31,27	1971	116	0,79	31,8
88164	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	31,27	1985	130	0,74	31,5
88165	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	13,97	1971	72	0,99	28,2
88166	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	23,59	1971	87	0,82	29,3
88166	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	23,59	1985	101	0,77	29,8
88167	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	16,41	1971	92	0,74	27,4
88167	Vosges	Moyen moutier	FD Moyenmoutiers	435	16,41	1985	106	0,68	28,2
88169	Vosges	Saint-Dié	FD SaintDie	447	47,36	1971	115	0,80	28,2

Placette	Massif	Commune	Forêt	Alt 2km (m)	Surface (ares)	Date	Age	RDI	IF (m)
88170	Vosges	Saint-Dié	FD SaintDie	447	21,86	1971	89	0,81	25,8
88171	Vosges	Saint-Dié	FD SaintDie	447	43,14	1971	103	0,83	32,8
88172	Vosges	Saint-Dié	FD SaintDie	447	31,09	1971	95	0,75	32,6
88173	Vosges	La Bourgonce	FD LaBourgonce	425	24,34	1971	139	0,80	29,9
88174	Vosges	La Salle	FD LaSalle	425	35,05	1971	117	0,85	32,9
88175	Vosges	Rambervillers	FD Rambervillers	457	16,84	1971	71	0,76	25,7
57004	Vosges	Trois fontaines		361	27,33	1960	90	1,08	
57003	Vosges	Trois fontaines		361	31,76	1960	57	0,91	
71029	Jura	St Prix		789	54,06	1963	85	1,15	
71026	Jura	St Prix		789	29,42	1963	70	1,14	
71025	Jura	St Prix		789	41,38	1963	58	2,23	30,5
71016	Jura	La petite verrière		473	21,76	1962	72	0,77	
71016bis	Jura	St Bonnet de joux		374	41,93	1964	44	0,71	
71016bis	Jura	St Bonnet de joux		374	41,93	1969	51		
39005	Jura	Chapois		710	44,42	1963	91	0,89	
390046	Jura	Fresse		748	50,97	1963	74	0,98	
390045	Jura	Fresse		748	41,27	1963	68	0,89	
390044	Jura	Fresse		748	14,12	1963	62	0,96	
390043	Jura	Fresse		748	189,58	1963	101	1,21	
390042	Jura	Fresse		748	102,48	1963	95	0,82	
390041	Jura	Fresse		748	109,52	1963	86	0,79	
68110	Vosges	Riquewihhr	FCRiquewihhrP7	540	31,31	1985	182	0,63	17,1
68111	Vosges	Riquewihhr	FCBetenheimP6	540	28,51	1985	233	0,88	11,8
68112	Vosges	Kaysersberg	FCSigolsheimP22	657	30,45	1985	97	0,78	29,9
68113	Vosges	Rimbach	FCRimbachP3	759	23,73	1985	122	0,90	26,1
68114	Vosges	Soultz	FCSoultzP19	707	21,83	1985	93	0,69	26,2
68115	Vosges	Saint-Amarin	FCSaintAmarinP17	917	41,23	1985	146	0,65	28,0
68116	Vosges	Saint-Amarin	FCSaintAmarinP3	917	23,90	1985	120	0,65	21,2
67100	Vosges	Le Hohwald	LeHowald	834	38,65	1985	124	0,84	34,4
67101	Vosges	Oberhaslach			50,00	1985	147	0,91	28,8
67102	Vosges	Oberhaslach			50,00	1985	147	0,81	29,1
67103	Vosges	Grandfontaine	FDLeDonon	702	38,75	1985	96	0,67	33,9

<b>Placette</b>	<b>Massif</b>	<b>Commune</b>	<b>Forêt</b>	<b>Alt 2km (m)</b>	<b>Surface (ares)</b>	<b>Date</b>	<b>Age</b>	<b>RDI</b>	<b>IF (m)</b>
67104	Vosges	Grandfontaine	FDLeDonon	702	40,12	1985	123	0,86	29,9
67105	Vosges	Stambach	FDSaverneP190	338	48,92	1985	82	0,55	31,9
67106	Vosges	Rheinhardmunster	FDSaverneP88	402	32,88	1985	122	0,45	28,4
67107	Vosges	Stambach	FDSaverneP155	338	28,53	1985	103	0,70	35,2
57108	Vosges	Saint-Quirin		415	32,34	1985	103	0,70	30,6
57109	Vosges	Abreschwiller	PrisFCAbreschwiller	451	15,43	1985	90	0,85	27,5
			<b>Moyenne</b>	583,611	31,95		102	0,83	28,6
			<b>Ecart-type</b>	162,516	22,19		29,9	0,20	3,9

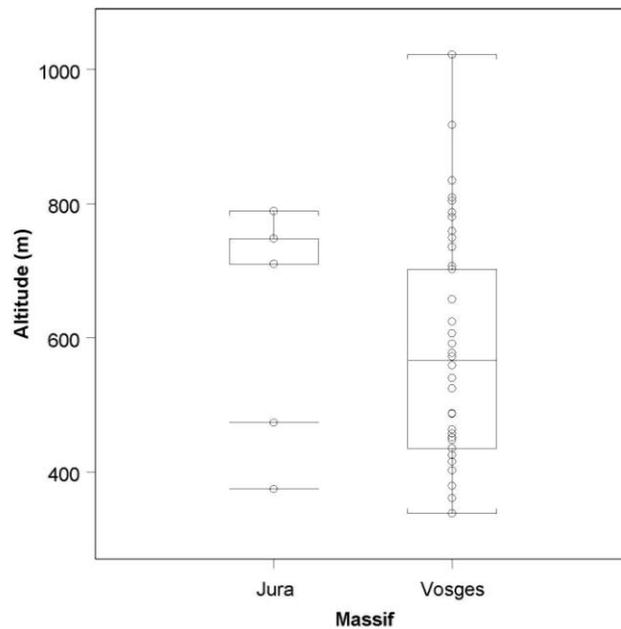


Figure 10. Gradient d'altitude couvert par les placettes temporaires.

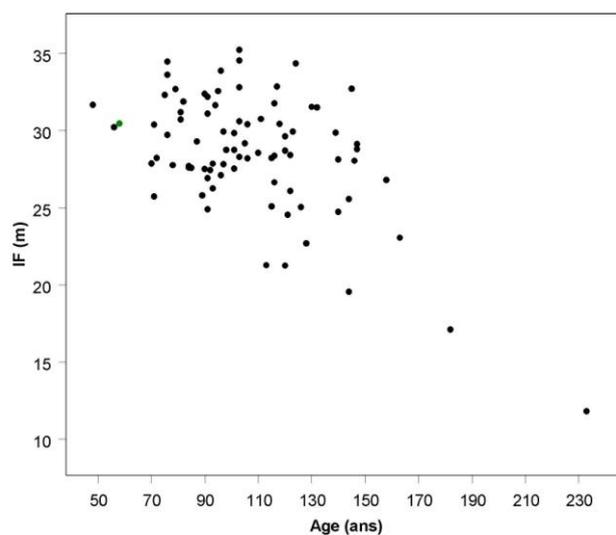


Figure 11. Représentation du réseau de placettes temporaires dans un plan âge – fertilité.

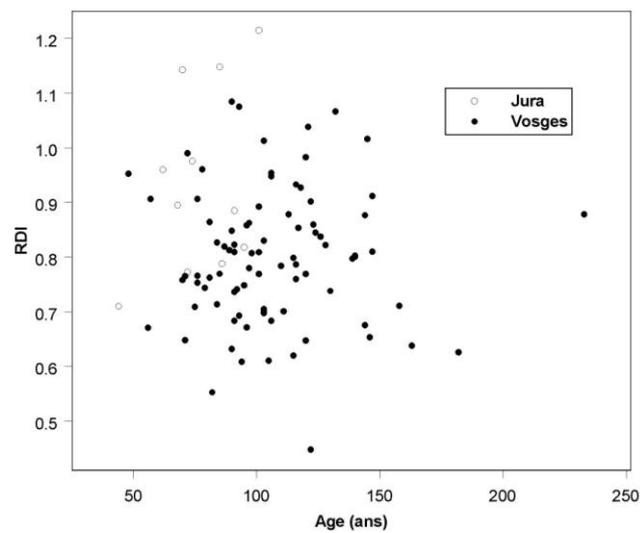


Figure 12. Représentation du réseau de placettes temporaires dans un plan âge – densité.

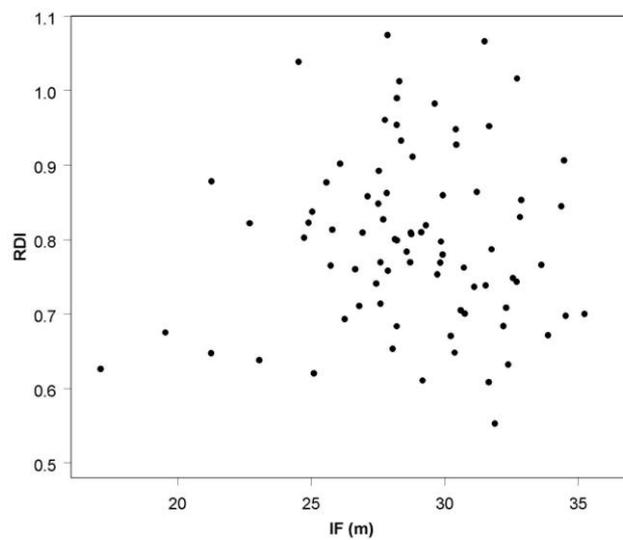


Figure 13. Représentation du réseau de placettes temporaires dans un plan fertilité – densité.

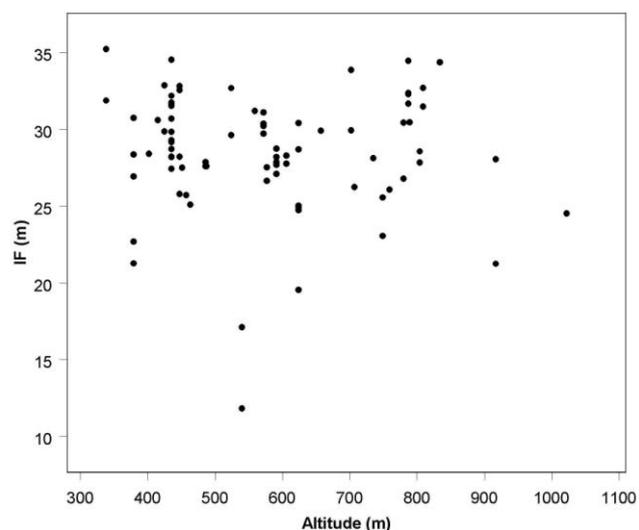


Figure 14. Représentation du réseau de placettes temporaires dans un plan altitude – fertilité.

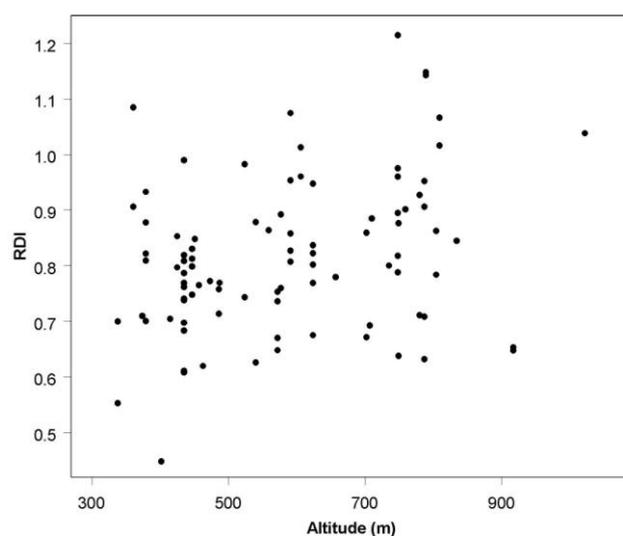


Figure 15. Représentation du réseau de placettes temporaires dans un plan altitude – densité.

### 3. Analyses de tige, données d'accroissements en hauteur pour les Vosges

Pour le massif des Vosges, on disposait de 16 x 2 AT d'arbres dominants dans 16 placettes. Ces analyses de tiges ont été réalisées dans des PT en 1985. Par ailleurs, les remesures réalisées dans 25 PT en 1985 et 1996 fournissent 1 à 2 accroissements de hauteur dominante (14 PT à 1 accroissement, 11 PT à 2 accroissements). La liste et la localisation de ces placettes est fournie dans le **tableau 3**.

Ces placettes couvrent un gradient d'altitude allant de 340 à 1020m, qui permet de rechercher un effet de l'altitude sur la croissance en hauteur dominante. Peu de placettes dépassent 150 ans, ce qui fixe une frontière temporelle de validité des courbes de référence et du simulateur.

**Tableau 3. Placettes temporaires à remesures et placettes d'analyses de tiges pour le massif des Vosges.**

Origine	Nombre mesures	Placette	Commune	Foret	Altitude
AT	N	88109	Remiremont	FDRemiremont	697
AT	N	88117	Plainfaing	FCPlainfaing	591
AT	N	88120	Aumontzey	FCAumontzey	572
AT	N	88124	LeThillot	FCLeThillot	577
AT	N	88157	OrmontRobache	FDOrmontRobache	624
AT	N	88200	FDValdAjol	Placette ChanotDuMoncell	534
AT	N	67100	LeHowald		834
AT	N	67104	LeDonon		702
AT	N	67105	Stambach	FDSaverneP190	338
AT	N	67106	RheinHardmunster	FDSaverneP88	402
AT	N	57108	SaintQuirin		415
AT	N	68112	Kaysenberg	FCSigolsheimP22	657
AT	N	68113	GuebwillerRimbach	FCRimbachP3	759
AT	N	68114	SoultzEnclave	FCSoultzP19	707
AT	N	68115	SaintAmarin	FCSaintAmarinP17	917
AT	N	68116	SaintAmarin	FCSaintAmarinP3	917
PT	2	67103	Grandfontaine	FDLeDonon	702
PT	2	67107	Stambach	FDSaverneP155	338
PT	2	68110	Riquewihr	FCRiquewihrP7	540
PT	2	88116	Plainfaing	FCPlainfaing	591
PT	2	88122	Gerardmer	FDGerardmer	787
PT	2	88125	La Bresse	FCLa Bresse	1022
PT	2	88132	Clefcy	FCClefcy	606
PT	2	88147	Gerardmer	FDGerardmer	787
PT	2	88151	Ban de Sapt	FCBanDeSapt	487
PT	2	88153	OrmontRobache	OrmontRobache	624
PT	2	88165	Moyenmoutiers	FDMoyenmoutiers	435
PT	2	88119	Gerardmer	FDGerardmer	787
PT	2	88148	Gerardmer	FCGerardmer	804
PT	2	88170	SaintDie	FDSaintDie	447
PT	3	88101	LiezeyRagimont	FDGerardmer	830
PT	3	88107	Remiremont	FCRemiremont	550
PT	3	88115	SaintDie	HospicesDeNancy	379
PT	3	88121	Aumontzey	FCAumontzey	572
PT	3	88135	Plainfaing	PlainfaingBarancon	809
PT	3	88136	Plainfaing		591
PT	3	88155	NayemontLesFosses	FD NayemontLesFosses	486
PT	3	88156	OrmontRobache	OrmontRobache	624
PT	3	88160	Moyenmoutiers	FCMoyenmoutiers	435
PT	3	88167	Moyenmoutiers	FDMoyenmoutiers	435
PT	3	88166	Moyenmoutiers	FDMoyenmoutiers	435

#### 4. Préparation des données, calcul des variables peuplement $N$ , $G$ , $H_0$ – I Seynave

Les routines développées pour le GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers ont été utilisées pour préparer les jeux de données PP et PT. Ces routines permettent de vérifier les données et de calculer les variables du peuplement.

##### *Mise en forme des données*

Dans un premier temps, les données ont été mises en forme de façon semi-automatique (Excel et/ou R) pour pouvoir leur appliquer les routines existantes. Pour les PP, le statut des arbres saisis dans les données brutes a été conservé et recodé : tous les arbres notés "chablis", "sec" ou "éclairci" ont été assimilés à des arbres "partant", dans la mesure où ils ne sont plus pris en compte dans les calculs portant sur la période de croissance suivante.

##### *Vérification des données*

Les deux routines utilisées pour la vérification des données ont été développées sous Excel. La première réalise des tests sur les données d'inventaire à chaque date : des tests quantitatifs basés sur la moyenne et l'écart-type permettent d'identifier les valeurs extrêmes (au-delà de la moyenne plus/moins 3 écart-types). Ces tests portent sur la circonférence à 1.30m, la hauteur totale et le rapport  $ht/d$ . En plus de ces tests quantitatifs, des graphiques sont réalisés pour chaque placette et chaque date d'inventaire, en particulier le graphique représentant la hauteur totale en fonction de la circonférence. Ces graphiques combinés aux résultats des tests permettent d'identifier des valeurs aberrantes. Dans l'exemple de la **figure 16** ci-dessous, seule la valeur de la hauteur totale de l'arbre 252 a été supprimée. Les autres valeurs ont été jugées cohérentes.

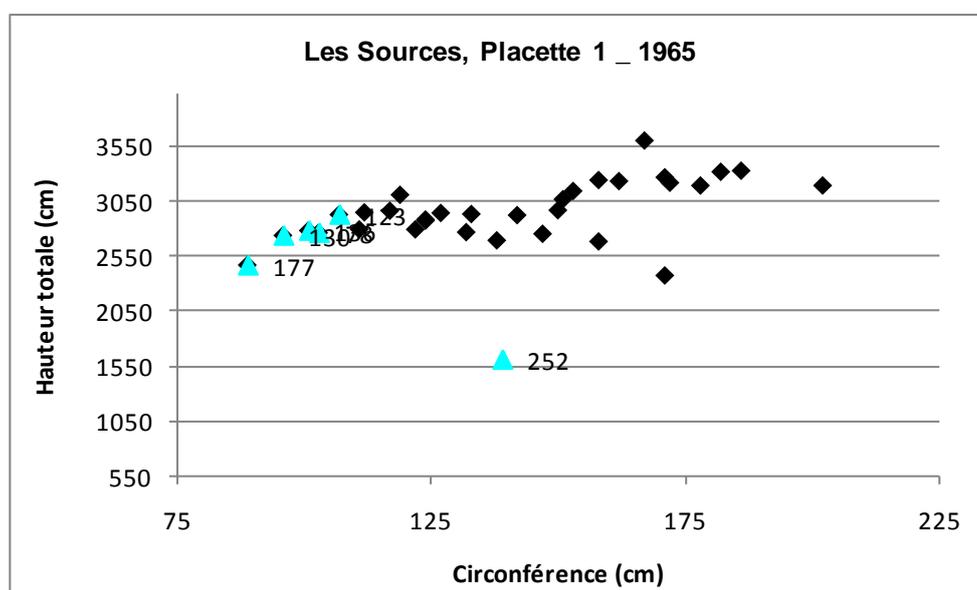
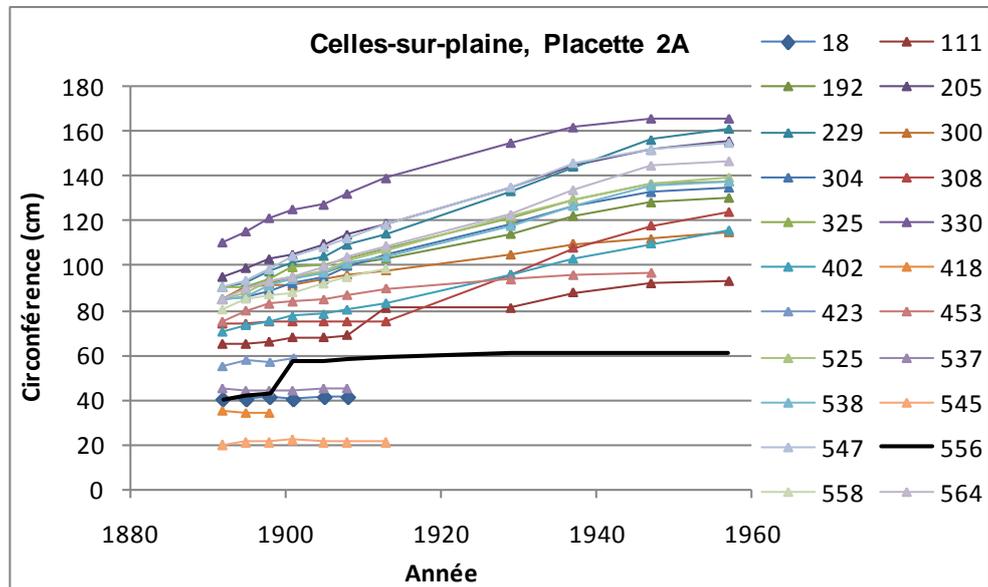


Figure 16. Exemple de résultats obtenus par la première procédure de vérification. Les points noirs correspondent à l'ensemble des arbres de l'échantillon et les points clairs à ceux identifiés comme des valeurs extrêmes.

La seconde routine réalise des tests sur les données d'accroissements en hauteur et en circonférence. De la même manière que la première, elle effectue des tests quantitatifs

(également basés sur la moyenne et l'écart type) et des graphiques. Dans l'exemple de la **figure 17**, les données de circonférence de l'arbre 556 avant 1900 ont été supprimées (on peut soupçonner une erreur dans le suivi de l'arbre).



**Figure 17.** Exemple de résultats obtenus par la seconde procédure de vérification. Les courbes représentent les trajectoires individuelles.

Sur l'ensemble des jeux de données (PP et PT), très peu de données aberrantes ont été détectées et supprimées.

### *Calcul des variables du peuplement*

Pour le calcul des variables peuplement, la procédure utilisée calcule, à chaque date d'inventaire et à partir des données individuelles de hauteur et circonférence, la densité et la surface terrière par hectare, les circonférences moyenne, dominante et quadratique moyenne ainsi que les hauteurs dominante et quadratique moyenne.

Dans la mesure où on ne dispose des hauteurs totales ( $ht$ ) que pour un échantillon d'arbres choisi pour être représentatif de la placette, la hauteur dominante est calculée de la façon suivante :

- l'équation  $ht = 1.30 + m_1 (1 - \exp(-m_2 c))$ , où  $ht$  est la hauteur totale individuelle et  $c$  la circonférence à 1,30m, est ajustée sur le nuage de points hauteur totale en fonction de la circonférence pour estimer les paramètres  $m_1$  et  $m_2$ ,
- les paramètres  $m_1$  et  $m_2$  estimés sont ensuite utilisés pour calculer  $H_0$  en fonction de  $C_0$  en appliquant la même équation (voir **figure 18** ci-dessous).

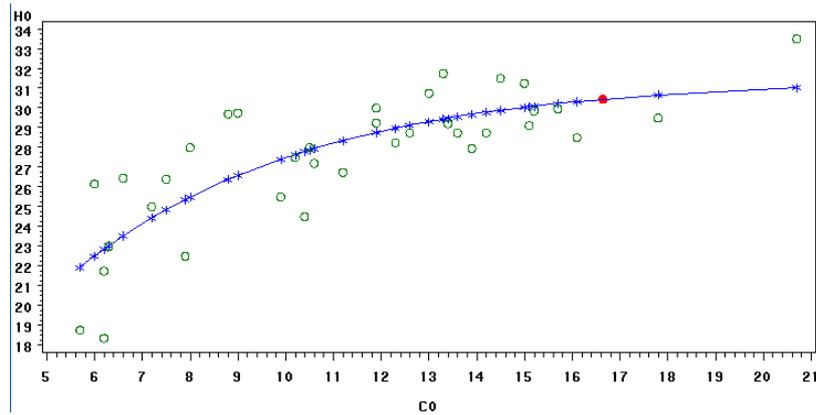


Figure 18. Exemple d'ajustement de la relation  $ht=f(c)$  (courbe, Nideck, placette 1, 1934). Le point rouge correspond à la hauteur dominante calculée par la procédure.

Le programme est exécuté une fois en incluant tous les arbres, puis une seconde fois en excluant les arbres « partant » : on obtient ainsi la densité et la surface terrière avant et juste après l'éclaircie (en faisant l'hypothèse que l'éclaircie a lieu à la date d'inventaire).

## Présentation des composants du simulateur

### 1. Modèle de croissance en hauteur dominante – J-D Bontemps

#### *Vosges*

#### *Analyse exploratoire*

Pour les Vosges, la réunion des données PP, PT et AT permettait de disposer de 137 accroissements. **L'âge est défini à 1,30m.** Les courbes de croissance sont présentées sur les **figures 19 et 20**. Ces figures montrent des trajectoires tendues et qui ne plafonnent pas (mais les âges ne dépassent pas 140 ans). La gamme des fertilités est correcte, malgré un déficit de fertilités faibles. Les accroissements récents des placettes temporaires semblent plus élevés que les accroissements terminaux des courbes issues d'analyses de tige. Il est difficile de préciser s'il s'agit d'un effet de la période ou d'un effet du protocole d'acquisition des données, très différent !

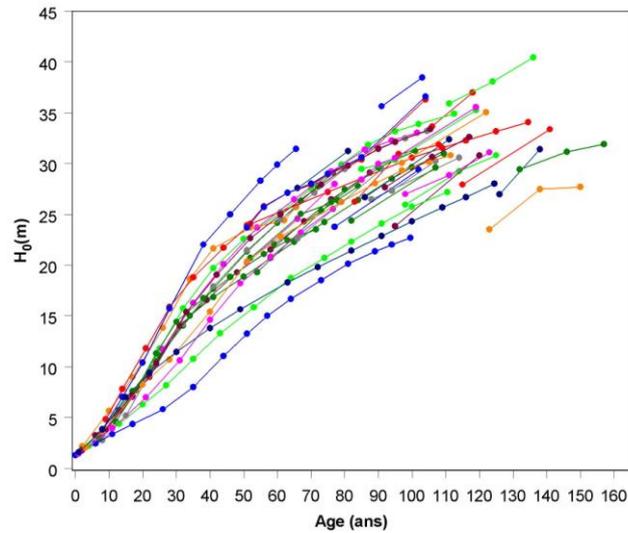


Figure 19, Hauteur dominante en fonction de l'âge à 1.30m, représentée par placette.

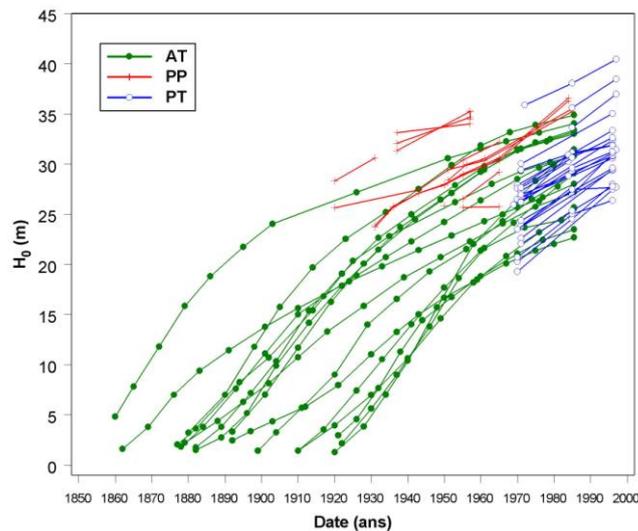


Figure 20, Hauteur dominante en fonction de la date, représentée par type de données.

### Modélisation statistique

Trois équations de croissance ont été testées sous la forme d'équations aux différences ajustées aux accroissements : l'équation de Chapman-Richards, de Hossfeld, et de Lundqvist-Matern (Zeide 1993). C'est ce dernier modèle qui a conduit aux meilleurs ajustements. Il comprend un paramètre de fertilité (la vitesse de croissance maximale en hauteur) qui permet d'étager les trajectoires.

L'analyse des résidus en fonction de l'altitude est présentée sur la **figure 21**. Elle n'a pas permis d'identifier de tendance sur un gradient altitudinal important.

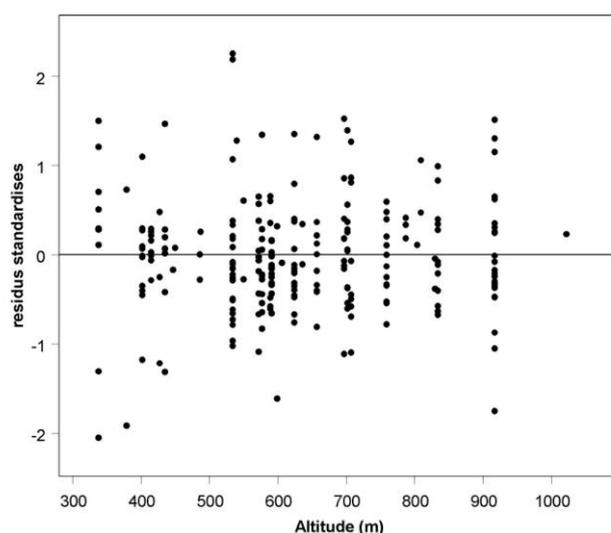


Figure 21. Résidus du modèle d'accroissement en hauteur dominante en fonction de l'altitude.

La comparaison des accroissements prédits et observés est représentée sur la **figure 22**.

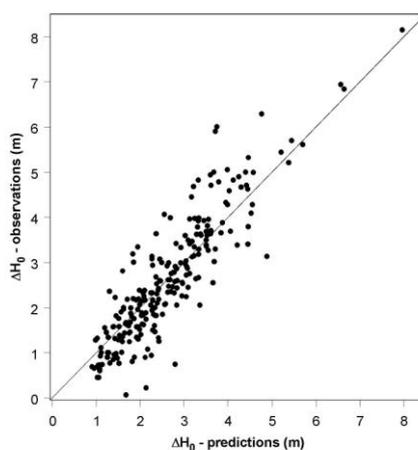


Figure 22. Comparaison entre accroissements en hauteur dominante observés et prédits.

### *Equation retenue*

L'équation retenue est :

$$H_0(t) = K \exp \left[ - \left\{ \left( \frac{R \ m \ C_m}{K} (t - t_0) + (\ln[K / H_0(t_0)])^{-m} \right)^{-1/m} \right\} \right] \quad (1)$$

Avec :

$$C_m = \exp((1 + m) (1 - \ln(1 + m)))$$

Et :

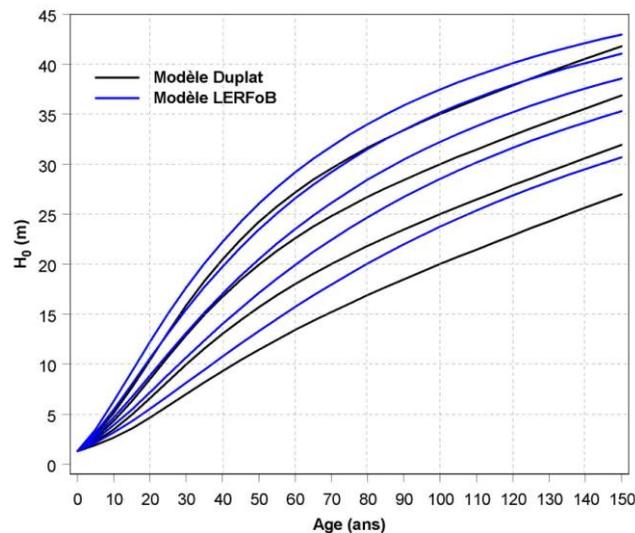
$$t_0 = 0 \text{ an (à } \mathbf{1,30 \text{ m)}, } H_0(t_0) = 1,30 \text{ m, } m = 0,8837, K = 56,49 \text{ m}$$

Pour tout couple  $\{t, H_0(t)\}$  quelconque, une estimation de R est fournie par l'inversion de (1) :

$$\hat{R} = \frac{K}{m C_m (t - t_0)} \left[ \ln(K / H_0(t)) \right]^{-m} - \left[ \ln(K / H_0(t_0)) \right]^{-m} \quad (2)$$

### Comparaison à la référence ONF

Le faisceau de courbes généré à partir de ce modèle est comparé à la référence établie antérieurement par l'ONF (modèle de Duplat) sur un jeu de données quasi-identique (à l'exception de quelques placettes permanentes qui ne représentent que 8 accroissements) sur la **figure 23**. Pour la référence Duplat, on a utilisé les classes de fertilité mentionnée, sans information sur leur choix. Pour la présente référence, on a utilisé les classes de fertilité déduites du paramètre de fertilité (moyenne, moyenne plus/moins un écart-type, plus/moins deux écarts-types).



**Figure 23. Comparaison des faisceaux de courbes de croissance en hauteur dominante des références Duplat et présente.**

Le comportement des références est très semblable aux âges élevés. On y perçoit l'effet du choix de modélisation (asymptote oblique / horizontale et unique). **En revanche, une différence de courbure prononcée apparaît aux premières décennies de croissance**, avec un glissement progressif d'une classe de fertilité en faveur de la présente référence.

Afin d'interpréter cette différence, les deux faisceaux sont superposés aux observations sur les **figures 24 et 25**. **Le syndrome de traversée du faisceau par les courbes observées est**

nettement perceptible avec la référence Duplat. Les courbes s'accordent mieux avec la présente référence.

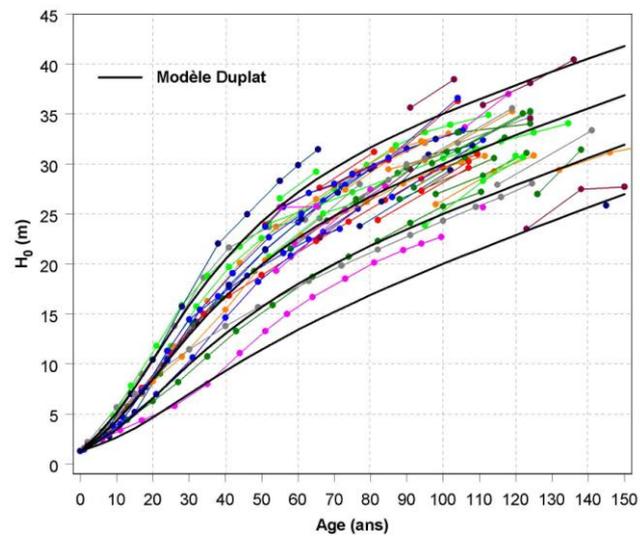


Figure 24. Superposition des courbes de croissance en hauteur dominante à la référence Duplat

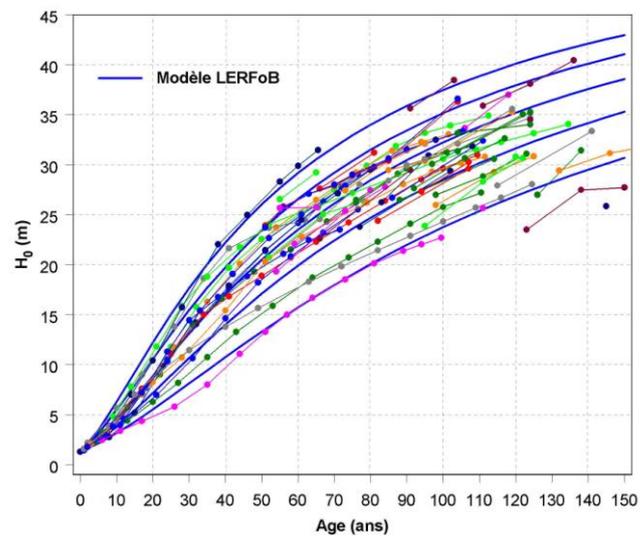


Figure 25. Superposition des courbes de croissance en hauteur dominante à la référence LERFoB.

## **Jura**

L'absence de matériel dendrométrique pour le Jura a conduit à utiliser la référence établie par l'ONF (Duplat 1980, p17).

L'équation est :

$$H_0(t) = [H_0(100) + 0.01 * (H_0(100) - 28)^2 + 0.0133t - 8.75] [1 - 2.15 \exp(-[t/20]^c)]^d + 0.0867t$$

(3)

Avec :

$$c = 1 - 0.00063 * (H_0(100) - 22)^2 \quad \text{et} \quad d = \frac{60}{H_0(100) - 15} - 1$$

La hauteur dominante à 100 ans tient lieu d'indice de fertilité. **L'âge est défini à la souche.**

En outre, les précisions suivantes ont été apportées par l'auteur (Duplat, comm. pers., 13/11/2008) :

*"Pour le SAPIN du Jura, le faisceau de courbes publié (Bartet, 1976) repose sur :*

*- 10 "peuplements avec analyses de tiges", de 100 à 150 ans, selon un protocole peu précisé (3 arbres "dominants" sur surface inconnue), vers 1973 ; je ne sais pas si ces données peuvent être retrouvées ;*

*- 6 "placettes permanentes" INRA observées sur 30 à 50 ans, mais sans mesures de hauteur dominante (reconstitutions discutables à partir des hauteurs des arbres enlevés en éclaircie)*

*- plus de 50 "segments terminaux" (entre la découpe bûcheron et le sommet, avec mesure des deux hauteurs et comptage des cernes "à la base" et à la découpe) observés sur des arbres dominants abattus sur autant de lots de mesures (lors de recueil de données pour tarifs de cubage)*

*- une modélisation basée sur le tracé à la main de 5 courbes étagées rendant compte au mieux des données, puis harmonisation a posteriori de ce faisceau selon un modèle mathématique".*

## **2. Modèle de loi d'auto-éclaircie – F Longuetaud et F Mothe**

### **Principe**

Le principe est fondé sur l'observation de Reineke (1933) concernant l'existence d'une droite limite pour les peuplements hyperdenses dans un plan  $\ln N - \ln D_g$  (**figure 26**).

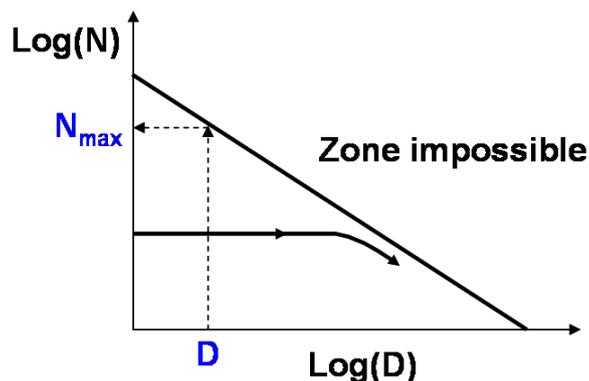


Figure 26. Schéma de principe de la loi d'auto-éclaircie.

Le modèle a été ajusté à partir des **3 premiers cycles de données de la nouvelle méthode d'inventaire de l'IFN pour les Vosges et le Jura, auxquelles les placettes permanentes ont été adjointes**. La **figure 27** permet d'observer qu'une telle droite limite apparaît nettement, et que les données IFN ne montrent pas de désaccord avec les données de placettes permanentes.

Ces données ont donc servi à ajuster la droite d'auto-éclaircie. Pour écarter les peuplements qui sont à coup sûr hors des conditions d'hyperdensité, on a fixé un seuil supérieur de 45cm au  $D_g$  (peuplements en fin de vie, souvent ouverts). De plus, l'existence d'un seuil de recensement à 7,5cm dans les PIFN a conduit à fixer un seuil inférieur pour le  $D_g$  de 15cm.

### Modélisation statistique

D'après la littérature (Zhang et al., 2005 ; Weiskittel et al., 2009), une méthode efficace pour ajuster la droite d'auto-éclaircie est l'analyse de frontières stochastiques (*stochastic frontier analysis* = SFA ou *stochastic frontier function* = SFF). C'est une méthode traditionnellement utilisée en économie pour étudier des fonctions de production ou de coût. Le package R « frontier » permet l'utilisation de cette méthode (Coelli, 1996 ; Coelli et Henningsen, 2009). Le modèle s'écrit :

$$Y_i = \beta X + (V_i - U_i)$$

où  $Y = \ln(N)$  avec  $N$  le nombre de tiges /ha et  $X = \ln(Dg)$  avec  $Dg$  le diamètre quadratique moyen de la placette en cm.  $\beta$  est le vecteur des paramètres.

Le principe de la méthode est d'utiliser un terme d'erreur composé (i) d'un effet aléatoire  $V_i$  suivant une loi  $N(0, \sigma_v^2)$  et (ii) d'un terme appelé « inefficacité technique »  $U_i$  tel que  $V_i$  et  $U_i$  sont indépendants,  $U_i$  est positif et  $U_i$  suit une loi  $|N(0, \sigma_u^2)|$  (*half-normal distribution*).

Les paramètres estimés sont : l'ordonnée à l'origine de la droite d'auto-éclaircie (*intercept*), la pente de la droite d'auto-éclaircie,  $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$  et  $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ .

Pour plus de détails sur l'interprétation des paramètres voir par exemple l'article de Weiskittel et al. (2009).

### Equation retenue

La droite d'auto-éclaircie obtenue est illustrée sur la **figure 27**.

L'équation est :

$$\ln N_{\max} = a - b \ln Dg_{\max} \quad (4)$$

avec :  $a = 12.4748959$ ,  $b = 1.7221446$

Le *RDI* est ensuite calculé comme le rapport de  $N$  à la valeur  $N_{\max}$  :

$$RDI = N / N_{\max} = N Dg^b / \exp(a) \quad (5)$$

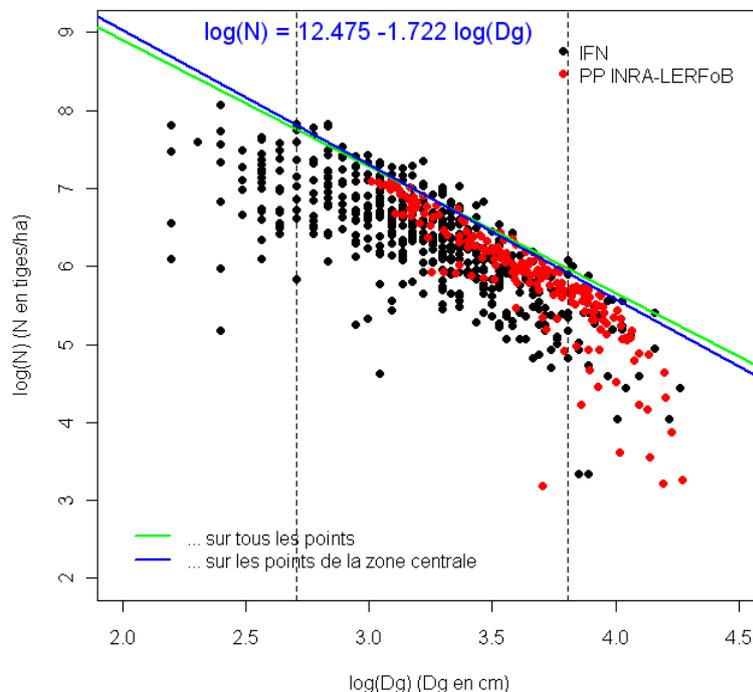


Figure 27. Ajustement de la droite d'auto-éclaircie aux données Sapin IFN et PP du Nord-Est de la France.

### 3. Modèle de productivité du peuplement (loi de Eichhorn) – J-D Bontemps

#### Cadre de formalisation

La loi de Eichhorn précise que dans un domaine climatique donné, la production totale d'un peuplement depuis son origine (ici en surface terrière  $GT$ ) ne dépend que de sa hauteur dominante, indépendamment des conditions de fertilité, selon une relation en principe convexe :

$$GT = F(H_0) \quad (6)$$

Sous forme différentielle, on a donc :

$$\frac{\Delta GT}{\Delta t} = F'(H_0) \frac{\Delta H_0}{\Delta t} \quad (7)$$

avec  $F'(H_0)$  en principe croissante.

Sa formulation généralisée fait intervenir une sensibilité aux conditions de densité (perte de production pour les densités faibles ou relation saturante), représentée par le *RDI*. De même, une sensibilité aux conditions de fertilité est possible (*IF*). S'agissant de la production d'une espèce de montagne, l'altitude (*ALT*) peut en particulier modifier la relation. Une formulation généralisée de type potentiel-réducteur s'écrit donc comme suit :

$$\frac{\Delta GT}{\Delta t} = F_1(RDI) F_2(\text{fertilité}(IF, ALT)) F'(H_0) \frac{\Delta H_0}{\Delta t} \quad (8)$$

Un cadre statistique additif est alors fourni par le passage au logarithme :

$$\ln \frac{\Delta GT}{\Delta t} = \ln F_1(RDI) + \ln F_2(\text{fertilité}(IF, ALT)) + \ln F'(H_0) + \ln \frac{\Delta H_0}{\Delta t} \quad (9)$$

Afin de conserver la compatibilité avec la formulation (7) (puissance unitaire de l'accroissement en hauteur), on a choisi de modéliser la variable  $\ln \Delta GT / \Delta H_0$ , ce qui permettait de plus de garantir les conditions d'homogénéité de la variance résiduelle.

### **Analyse exploratoire**

Les relations entre  $\Delta GT$  et  $H_0$ , *RDI*, et l'altitude obtenues à partir des PIFN sur les Vosges et le Jura sont représentées sur les **figures 28 à 30**. Elles permettent de mettre en évidence une liaison négative avec la hauteur dominante, positive avec le *RDI* (avec une perte de production qui paraît faible dans un large domaine supérieur du *RDI*), et une absence apparente de relation avec l'altitude. En outre, on ne met pas en évidence de disparité entre massifs.

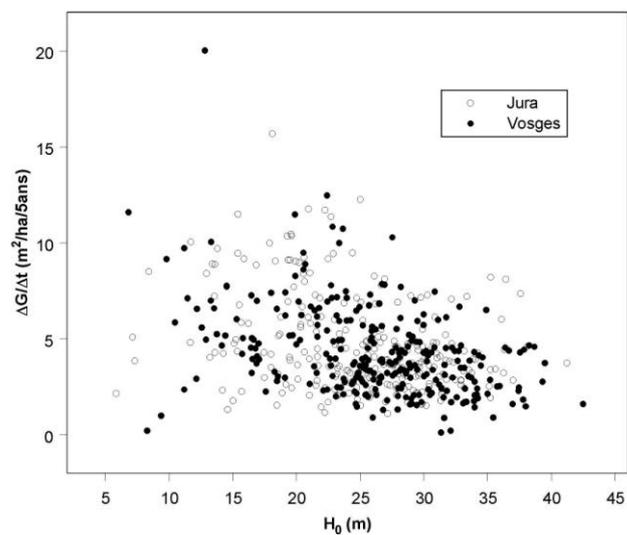


Figure 28. Relation entre  $\Delta GT$  et  $H_0$  observée sur les données IFN.

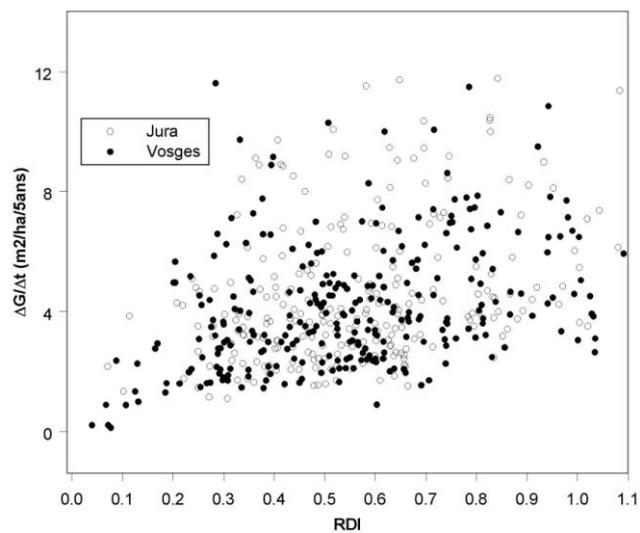


Figure 29. Relation entre  $\Delta GT$  et  $RDI$  observée sur les données IFN.

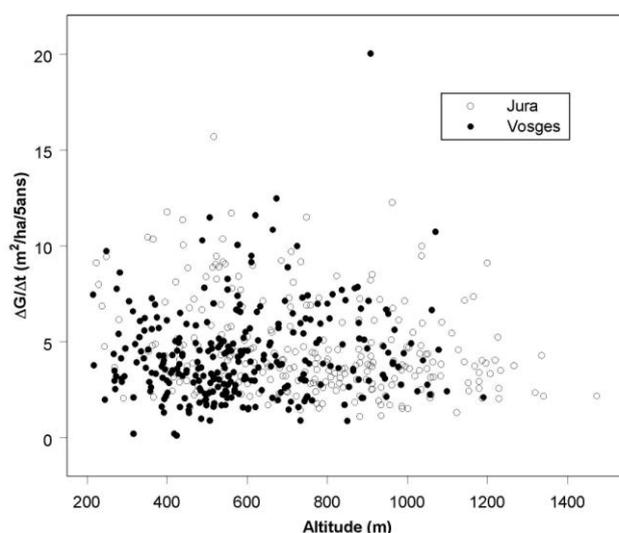


Figure 30. Relation entre  $\Delta GT$  et l'altitude observée sur les données IFN.

Cette analyse est complétée sur les placettes permanentes, en fonction du massif, de  $\Delta H_0$ ,  $H_0$ ,  $RDI$ , et l'altitude sur les **figures 31 à 35**. Elle permet d'identifier des accroissements supérieurs dans le Jura, une relation positive avec l'altitude (mais il existe une confusion entre altitude et massif, au moins dans le Jura), une relation positive avec l'accroissement en hauteur dominante, de confirmer l'effet négatif de  $H_0$ , cependant distinct entre massifs, et de confirmer l'effet positif du  $RDI$  sans distinction de massif (avec une convexité étonnante mais à confirmer par la modélisation). L'accroissement en hauteur dominante étant négativement corrélé à la hauteur dominante, l'effet de la hauteur dominante est de fait intégré dans la variable modélisée. L'effet direct de la hauteur dominante ne s'impose donc pas nécessairement dans l'ajustement.

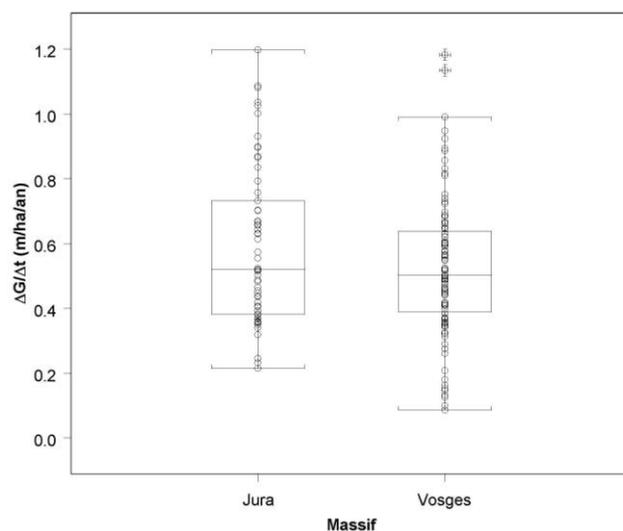
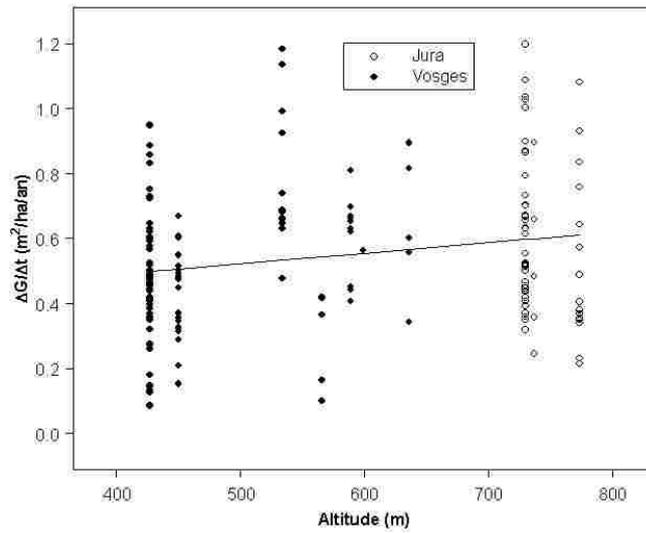
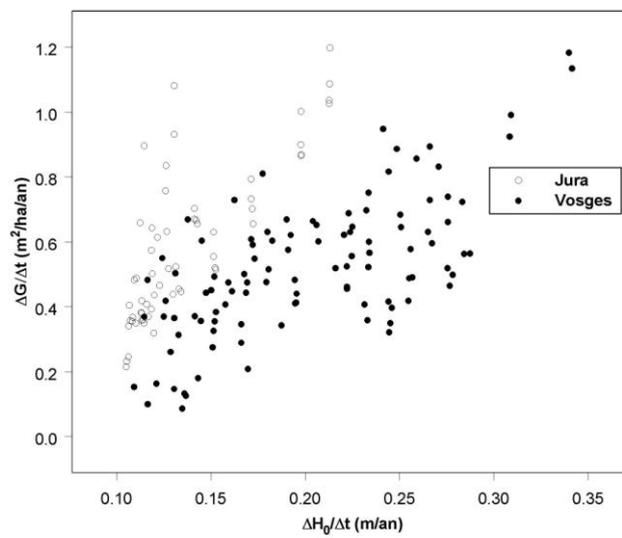


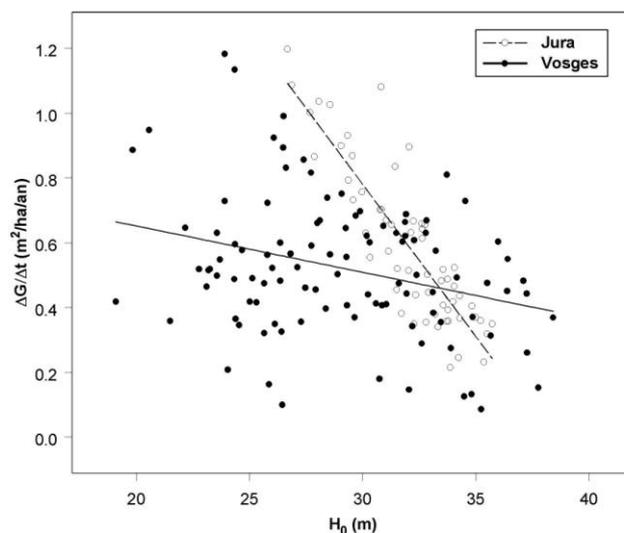
Figure 31. Relation entre  $\Delta GT$  et le massif observée sur les placettes permanentes.



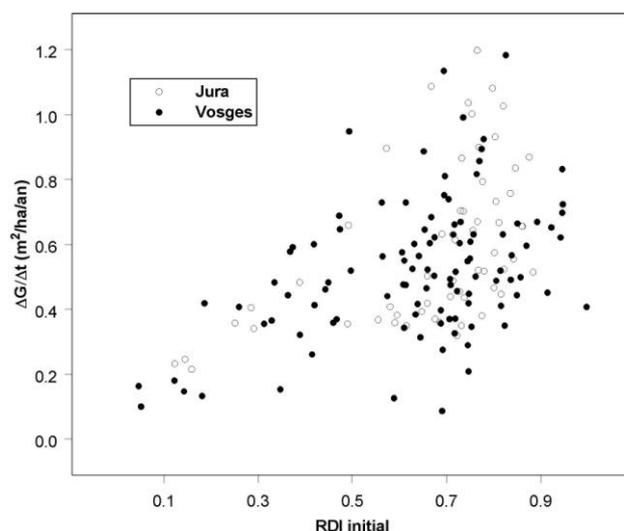
**Figure 32. Relation entre  $\Delta GT$  et l'altitude sur les placettes permanentes.**  
*La relation a été ajustée par une droite de régression*



**Figure 33. Relation entre  $\Delta GT$  et l'accroissement en  $H_0$  sur les placettes permanentes.**



**Figure 34. Relation entre  $\Delta GT$  et  $H_0$  sur les placettes permanentes.**  
*La relation a été ajustée par massif par une droite de régression.*



**Figure 35. Relation entre  $\Delta GT$  et le RDI sur les placettes permanentes.**

### *Modélisation statistique*

On a d'abord introduit l'effet du *RDI*, testé sous forme linéaire ou logarithmique. La seconde forme est apparue plus convenable. L'effet pur du massif a ensuite été testé et est ressorti comme étant très significatif. Pour le massif des Vosges, un effet additionnel de l'altitude (à *RDI* et accroissement en hauteur dominants fixés) a été testé. Une forme linéaire était la plus appropriée. L'effet pur de la hauteur dominante n'est pas ressorti. Aucun effet additionnel de l'indice de fertilité n'a pu être mis en évidence. Le modèle final permet d'expliquer 47,4% de la variabilité des accroissements en surface terrière (dans l'unité d'origine). Les observations sont comparées aux prédictions sur la **figure 36**.

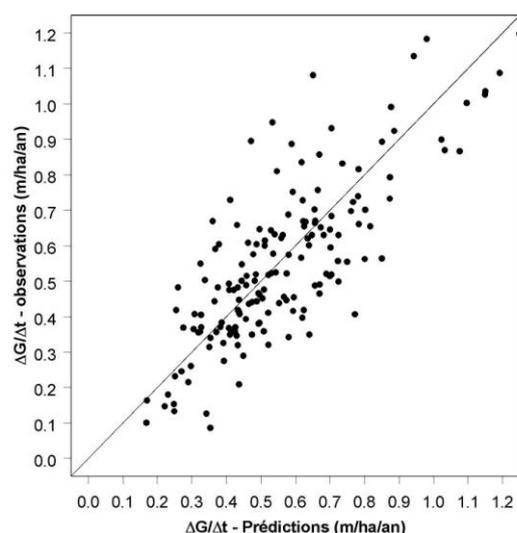


Figure 36. Comparaison entre observations et prédictions du modèle.

### Equation retenue

L'équation retenue est :

$$\frac{\Delta GT}{\Delta t}(t, t_{+1}) = RDI(t)^a \exp[b_{ma} ALT + (c_0 + c_{ma})] \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) \frac{\Delta H_0}{\Delta t}(t, t_{+1}) \quad (10)$$

où  $ma$  est un indice de massif (= Jura ou Vosges), le  $RDI(t)$  correspond à l'état initial de la période d'accroissement, et les accroissements sont moyens sur la période considérée  $[t, t_{+1}]$  ( $m^2/ha/an$ ).

Avec :

$$\begin{aligned} a &= 0,2663 \text{ (ss u)} \\ c_0 &= 1,06225 \text{ (ss u)} \\ \sigma &= 0,3095 \text{ (ln m. ha}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Et des paramètres dépendant du massif :

$$\begin{aligned} b_{Vosges} &= 0.000966 \text{ (m}^{-1}\text{)} && \text{applicable sur [400m, 700m], seuiller aux bornes} \\ b_{Jura} &= 0 \\ c_{Vosges} &= -0,4735 \text{ (ss u)} \\ c_{Jura} &= 0,4735 \text{ (ss u)} \end{aligned}$$

La saturation de la relation avec le  $RDI$  est en particulier confirmée.

#### 4. Modèle de relation taille - croissance individuelle – L Saint-André

##### *Modélisation statistique*

Pour la relation taille – croissance individuelle, on a considéré le modèle de Deleuze et al. (2004) correspondant à une hyperbole croissante convexe (à deux asymptotes obliques), et dont la forme est donnée par:

$$\Delta g_{t, t+1} = \frac{P}{2} \left( c_t - mA + \left( (mA + c_t)^2 - 4Ac_t \right)^{1/2} \right) \quad (11)$$

où  $\Delta g$  est l'accroissement individuel en surface terrière sur la période  $[t, t+1]$ ,  $c_t$  est la circonférence en début de période d'inventaire, P, m et A sont les paramètres de l'hyperbole. P contrôle la pente de l'asymptote pour les valeurs élevées de  $c$ , A contrôle l'ordonnée à l'origine (négative) de cette asymptote donc le seuil de circonférence où la croissance augmente fortement avec la taille, et m est un paramètre de forme.

La relation a été ajustée à partir des inventaires des PP. Elle a d'abord été ajustée individuellement sur chaque inventaire (tous les paramètres étant libres) par régression non linéaire (procédure nlin de SAS). Un modèle d'erreur a été introduit pour tenir compte de l'hétéroscédasticité des résidus.

Les variations des paramètres P, A, m, et k en fonction des variables du peuplement (*age*, *RDI*, *G*, *H<sub>0</sub>*, *G/H<sub>0</sub>*,  $\Delta GT$ , ratio  $\Delta GT/\Delta H_0$ , *IF*,  $\Delta RDI(t)$  à l'éclaircie (initial – final !)) ont été analysées et ont conduit à identifier les relations suivantes:

- des relations de type  $P = f(\Delta GT)$  et  $P = f(\Delta GT/\Delta H_0)$ , relations linéaires mais très structurées en fonction des forêts (pente décroissante avec l'altitude). Ce constat amène à reformuler le paramètre P puis le modèle ainsi :

$$P = p \Delta GT = p \frac{\Delta GT}{\Delta H_0} \Delta H_0 \quad (12)$$

Et:

$$\frac{\Delta g}{\Delta H_0} = p \left( \frac{\Delta GT}{\Delta H_0} \right) f(c) \quad (13)$$

Cette forme est intéressante car d'une part, elle exprime **l'accroissement individuel en grosseur des tiges relativement au potentiel de croissance  $\Delta H_0$  et d'autre part elle introduit la pente de la relation de Eichhorn** (voir 3.) dans le modèle de croissance individuel (articulation arbre/peuplement).

- Les effets *altitude* et *RDI* sont confondus, et l'introduction du *RDI* sur le paramètre p élimine la relation  $p = f(ALT)$ . Le modèle incorporant le *RDI* a été conservé (augmentation du R2 de 0.53 à 0.62). L'altitude intervenant dans le modèle de productivité (voir 3.), son effet se propage au niveau individuel de la croissance via l'équation (13). Le *RDI* intervient soit sous forme exponentielle, soit sous forme puissance.

Les deux formes sont équivalentes en termes de R2 avec un léger avantage pour la fonction puissance (0.62 contre 0.60). Cependant, la forme exponentielle est conservée pour garder de bonnes propriétés d'extrapolation,

- Le paramètre  $m$  ne varie avec **aucune des variables peuplement**,
- Le paramètre  $A$  est relié à la hauteur dominante ou l'âge, et on a conservé la relation avec la hauteur dominante (critère de cohérence du modèle),

Ces différents effets ont été introduits dans un modèle global puis testés à nouveau, en introduisant ceux qui étaient masqués à la première étape (comme l'effet des éclaircies). La moyenne des résidus ne montre pas de déviations majeures par rapport à 0 en fonction de la forêt, des placettes, de l'âge, de la hauteur dominante, de l'indice de fertilité, de l'altitude. Il existe un très léger biais pour les rdi très faibles (0.05 à 0.2) et des écarts à la moyenne nulle qui peuvent être marqués pour certaines années (1946 en positif par exemple, pour les deux placettes d'Haslach).

### **Equation retenue**

L'équation finalement retenue (R2 = 0.63) est:

$$\left( \frac{\Delta g}{\Delta H_0} \right)_{t,t+1} = p \left( \frac{\Delta GT}{\Delta H_0} \right)_{t,t+1} \left( c_t - mA + ((mA + c_t)^2 - 4Ac_t)^{1/2} \right) \quad (14)$$

Avec: 
$$p = p_0 \left[ RDI(t)^{-p_1} + p_2 \ln(0.002 + \Delta RDI(t)) \right] \quad (15)$$

Et:

$$\begin{aligned} m &= 1.0718 \text{ (ss u)} \\ A &= 48.414 \text{ cm} \\ p_0 &= 3.1745 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \\ p_1 &= 1.153 \text{ (ss u)} \\ p_2 &= 0.01584 \text{ (ss u)} \end{aligned}$$

Les valeurs des paramètres conduisent à des interprétations cohérentes:  $p_1 > 1$  indique une décroissance saturante du  $RDI$ ,  $p_2 > 0$  indique une **augmentation de la pente du modèle d'autant plus forte que les éclaircies sont fortes**.

A noter que  $RDI$  et  $\Delta RDI$  interviennent seulement sur le paramètre de pente. A l'inverse, **le seuil ne change pas au cours du temps** ( $A = 48\text{cm}$ ).

Des exemples d'ajustement sur les FD de Lajoux et de Rambervillers illustrent la grande capacité du modèle final à restituer les variations d'accroissement entre forêts (**figures 37 et 38**). L'exemple d'Haslach (**figure 39**) illustre par contre une certaine incapacité du modèle à restituer correctement, pour certaines années, les accroissements mesurés.

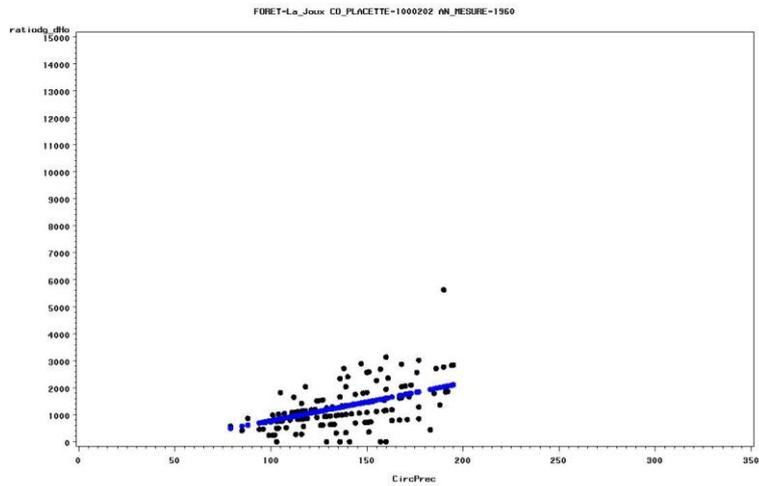


Figure 37. Exemple d'ajustement de relation accroissement – circonférence, FD La Joux.

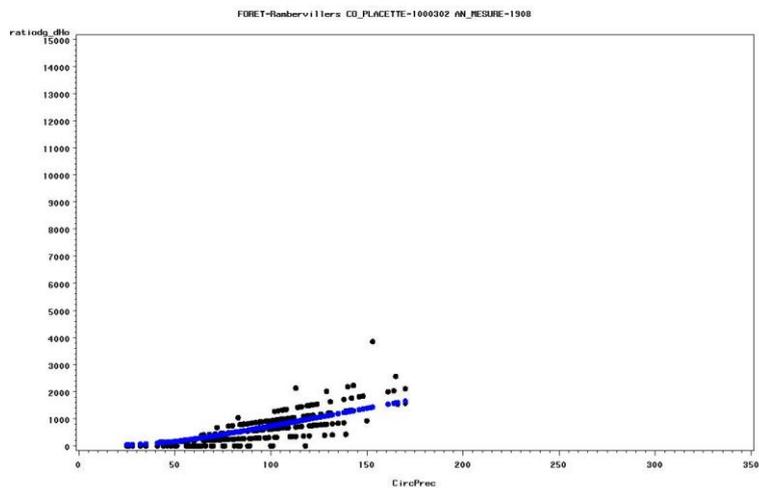


Figure 38. Exemple d'ajustement de relation accroissement – circonférence, FD Rambervillers.

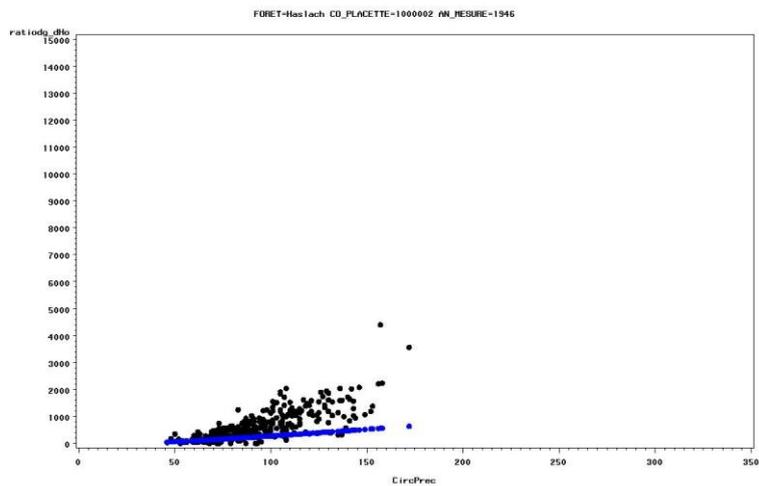
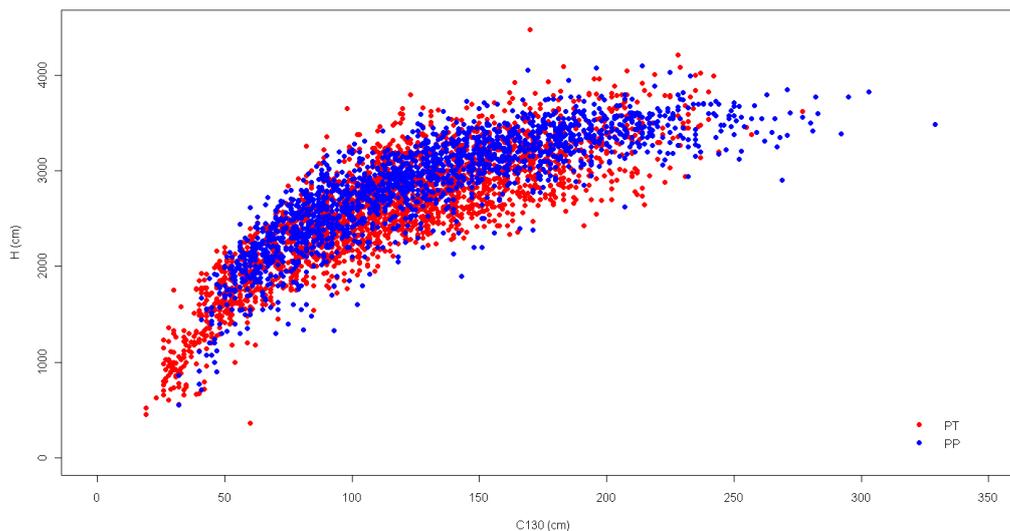


Figure 39. Exemple d'ajustement de relation accroissement – circonférence, FD Haslach.

## 5. Modèle de relation individuelle hauteur - diamètre – F Longuetaud

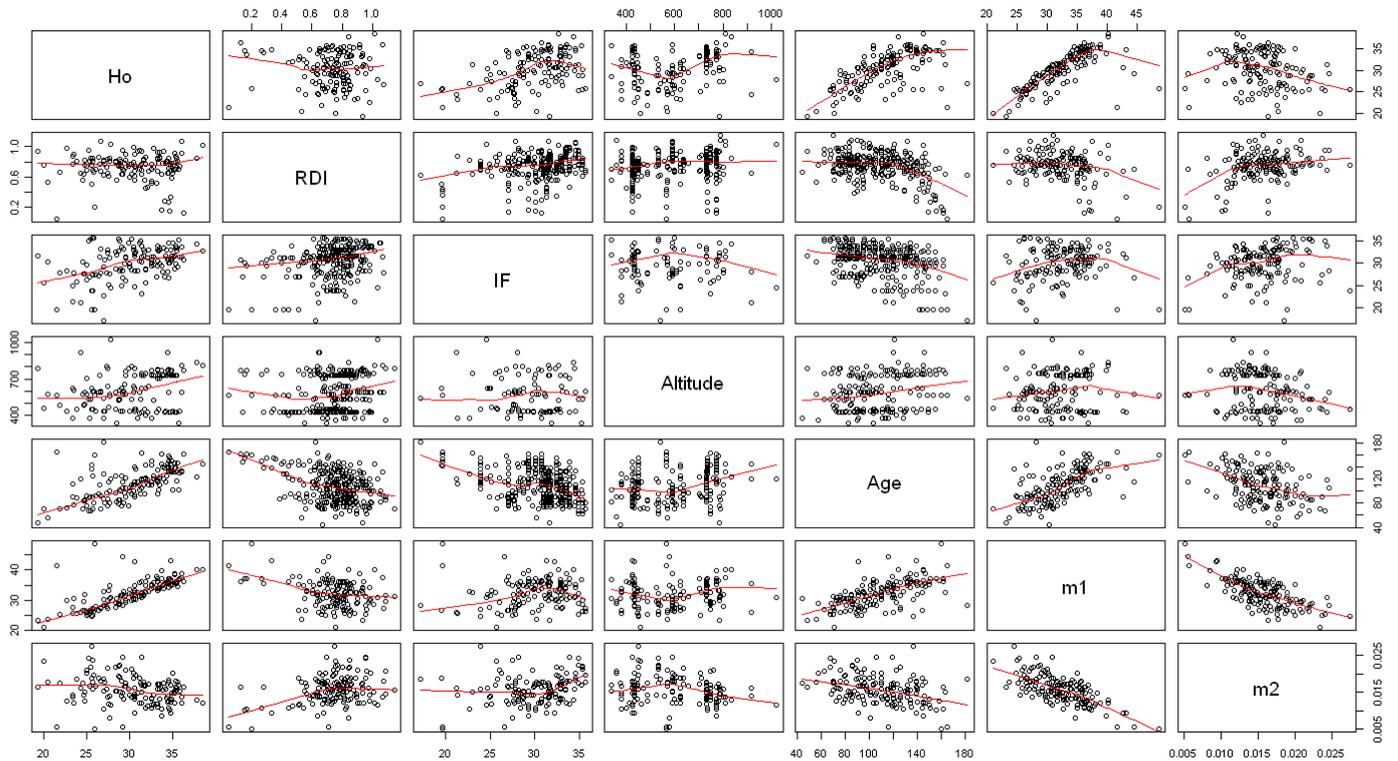
### Analyse exploratoire

Pour l'ajustement du modèle, nous avons utilisé la totalité des données disponibles (PT et PP), sans considérer d'échantillon de validation. Nous disposons d'échantillons individuels en diamètre à 1,30 m ( $d$ ) et hauteur des arbres ( $ht$ ), et des variables peuplement  $H_0$ ,  $RDI$ ,  $IF$ , altitude. **La figure 40** illustre les données disponibles pour l'ajustement de la relation hauteur – circonférence à 1,30m pour le Sapin dans le Nord-Est de la France. Les données des placettes permanentes sont positionnées un peu plus haut dans le nuage que celles des placettes temporaires.



**Figure 40. Relation circonférence - hauteur pour le sapin dans le Nord-Est de la France.**

Les corrélations entre les différentes variables sont illustrées sur la **figure 41** :



**Figure 41. Corrélations entre les différentes variables utilisées pour la construction du modèle de relation diamètre-circonférence.**

### *Modélisation statistique*

Plusieurs équations de la littérature ont été comparées. Une adaptation de l'équation testée par Pretzsch et Schütze (2005) :

$$ht = 1.30 + (a + b/d)^{-1} \quad (16)$$

l'inverse se substituant à une puissance cube inverse. La valeur de l'asymptote pour ce modèle est égale à  $1.30 + 1/a$ .

Le second modèle testé est de la forme :

$$ht = 1.30 + m_1(1 - \exp(-m_2 c)) \quad (17)$$

Cette forme a été utilisée pour le calcul de  $H_0$  à partir de  $C_0$  (voir section Préparation des données). La valeur de l'asymptote pour ce modèle est égale à  $1.30 + m_1$ .

Les deux modèles donnant des résultats sensiblement équivalents, nous avons retenu le second modèle pour deux raisons : (i) par souci d'homogénéité car il s'agit du modèle utilisé pour calculer les valeurs de  $H_0$ , (ii) car il permettait visuellement d'obtenir de meilleurs résultats pour les arbres les plus gros. De façon préliminaire, le modèle a été ajusté placette par placette, et a conduit à autant de jeux de paramètres  $m_1$  et  $m_2$ .

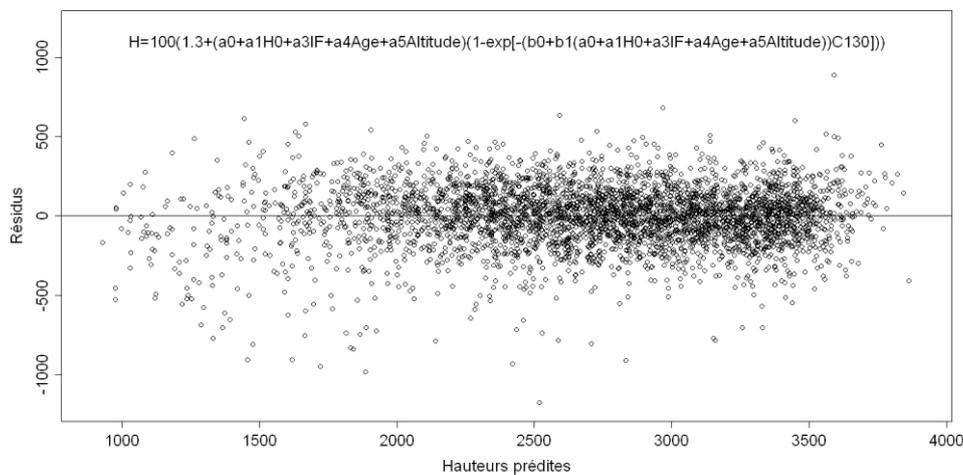
Du fait de la **corrélation forte entre les paramètres  $m_1$  et  $m_2$  (Figure 41)**, nous avons testé un modèle simplifié en posant :

$$m_2 = b_0 + b_1 m_1 \quad (18)$$

On a alors cherché à modéliser le paramètre  $m_1$  en fonction des caractéristiques du peuplement: *IF*, *RDI*,  $H_0$ , age et altitude. Le modèle a été ajusté avec une procédure de régression non-linéaire sur l'ensemble des arbres.

La valeur de l'asymptote (=  $1,3 + m_1$ ) est apparue **corrélée positivement à  $H_0$ , et à l'indice de fertilité *IF*. L'effet de l'âge est peu significatif. Et enfin, plus l'altitude est élevée, moins l'asymptote est haute. Le *RDI* n'apparaissait pas significatif.**

Les résidus du modèle obtenu sont représentés sur la **figure 42**:



**Figure 42. Résidus du modèle global en fonction des hauteurs prédites.**

### *Equation retenue*

L'équation générale du modèle est donc :

$$ht = 1.30 + m_1(1 - \exp(-(b_0 + b_1 m_1) c)) \quad (19)$$

avec  $ht$  en m et  $c$  en cm, et :

$$m_1 = a_0 + a_1 H_0 + a_2 IF + a_3 Age + a_4 Altitude$$

$$RSE \text{ (cm)} = 190.5$$

et:

$$\begin{aligned} a_0 &= 3.818 \\ a_1 &= 0.7822 \\ a_2 &= 0.169 \\ a_3 &= 0.009667 \\ a_4 &= -0.003297 \end{aligned}$$

$$b_0 = 0.02052$$

$$b_1 = -0.000149$$

## 6. Modèles de cubage (littérature)

Des modèles de cubage d'arbre issus de la littérature ont été utilisés pour obtenir des volumes sur pied et éclaircis. Ils comprennent:

- les tarifs de cubage de **volume total aérien de l'arbre** (Vallet et al. 2006) :

$$v = \frac{c^2 ht}{40000\pi} \left[ a + b c + c \frac{\sqrt{c}}{ht} \right] \quad (20)$$

avec  $c$  en cm et  $ht$  en m et  $v$  en  $m^3$ :

$$a = 0.55 \text{ (ss u)}$$

$$b = -0.000749 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

$$c = 0.277 \text{ (m.cm}^{-1/2}\text{)}$$

- des tarifs de cubage volume géométrique **à une découpe fixe (7cm)** : on a considéré le tarif issu de Duplat (1980) :

$$v = 0.0113 + 0.411 d^2 ht + 0.1942 d - 0.00411 ht + 0.0001467 ht^2 - 0.121 d^3 h \quad (21)$$

Avec  $ht$  et  $d$  en m et  $v$  en  $m^3$

Par différence entre ces deux types de tarif, on accède à un volume des branches du houppier.

*Remarque:* Pour les Vosges, le tarif bois fort "établi par la station de sylviculture et de production de l'INRA Champenoux" cité par Lespagnol 1998 a été testé, mais les volumes obtenus semblaient surestimés (souvent supérieurs au volume total Vallet).

## Implémentation du simulateur – adaptations – F Mothe / J-D Bontemps

Le simulateur a été écrit en Java sous la plate-forme Capsis en s'inspirant du module Fagacées écrit par P. Vallet. **Le simulateur AbiAl v1.0 reste par défaut en diffusion contrôlée dans sa phase de développement<sup>1</sup>**. Le fichier de distribution est *abial\_1.0-setup.jar*. Il permet également la diffusion de la famille de simulateurs *Fagacées* (**figure43**).



Figure 43. Lancement de l'application *abial\_1.0-setup.jar*.

### 0. Notations

Dans cette partie, nous nous référons aux modèles présentés précédemment avec les dénominations abrégées suivantes :

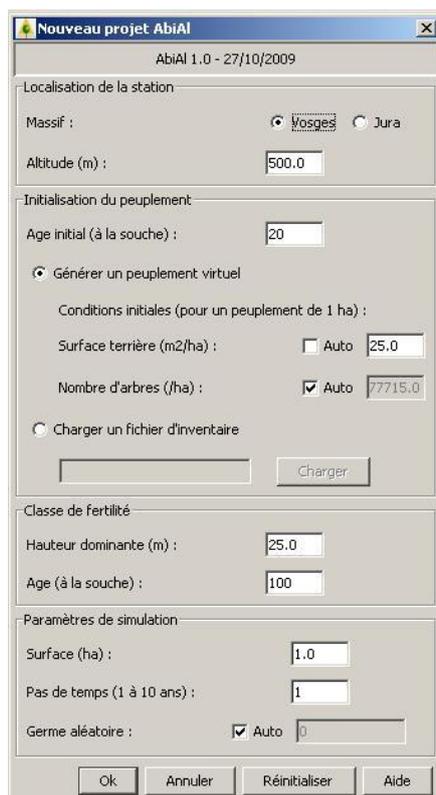
- *modèle Hdom* : modèle de hauteur dominante
- *modèle AutoEclaircie* : modèle de loi d'autoéclaircie
- *modèle dG-Peuplement* : modèle de productivité
- *modèle dG-Arbre* : modèle de relation taille - croissance individuelle
- *modèle H-Arbre* : modèle de relation individuelle hauteur - diamètre
- *modèles V-Arbre* : modèles de cubage (littérature)

### 1. Fonctionnement général du simulateur

#### *Données d'entrée*

La station est décrite par le massif (Vosges ou Jura), l'altitude et la fertilité (hauteur dominante à un âge donné). La surface terrière et/ou la densité initiale (à 20 ans) peuvent être précisées par l'utilisateur. L'utilisateur peut également préciser une surface (1 ha par défaut), et un pas de simulation (1 an par défaut). Le germe d'initialisation du générateur de nombres pseudo-aléatoires, utilisé pour générer le peuplement et sélectionner les arbres à éclaircir, peut être fixé (ce qui permet de répéter plusieurs fois la même simulation) ou modifié à chaque simulation. L'interface est représentée sur la **figure 44** :

<sup>1</sup> Contacter Frédéric Mothe ([mothe@nancy.inra.fr](mailto:mothe@nancy.inra.fr)) / Jean-Daniel Bontemps ([bontemps@engref.agroparistech.fr](mailto:bontemps@engref.agroparistech.fr))



**Figure 44. Interface de saisie du paramétrage d'initialisation du simulateur.**

### *Génération du peuplement*

**Le peuplement est généré par défaut à l'âge de 20 ans**, en supposant que tous les arbres ont alors atteint 1,30m de hauteur (sécurité de 5 ans sur l'estimation de P. Duplat). **L'utilisateur peut cependant initialiser le peuplement à un âge quelconque.** Dans cette situation, il est souhaitable que l'utilisateur vérifie : (i) s'il dispose d'un **fichier d'inventaire pour l'initialisation**, (ii) s'il préfère faire évoluer le peuplement à partir d'un âge de 20 ans **en conditions sylvicoles contrôlées**, ou (iii) s'il **initialise un peuplement par défaut en l'absence d'information** (voir algorithme plus bas).

**La possibilité est laissée à l'utilisateur de définir lui-même les conditions initiales:** (i) soit par **chargement d'un fichier d'inventaire**, (ii) soit en fixant la **densité initiale ( $N$ ) ou la surface terrière ( $G$ ) à 20 ans**, en faisant l'hypothèse que le peuplement est en **conditions d'auto-éclaircie** ( $N$  ou  $Dg$  sont alors calculés à partir du *modèle AutoEclaircie*), (ii) soit en **saisissant un couple  $\{N, G\}$**  qui définit dans ce cas le *RDI* initial.

Lorsque l'utilisateur ne procède pas par chargement d'un fichier d'inventaire, **le calcul des diamètres individuels initiaux est fondé sur des hypothèses de distribution de diamètres, établies d'après les inventaires des PT du massif des Vosges.** On a pu constater : (i) que la distribution de diamètre des peuplements est modale et proche de la symétrie (coefficients d'asymétrie allant de 0.1 à 0.5 pour les stades les plus jeunes), (ii) que l'écart-type de la distribution des diamètres présente une relation concave croissante du diamètre quadratique moyen  $Dg$ , (iii) que le diamètre maximum est une fonction affine de  $Dg$ .

La règle de calcul de Fagacées (Dhôte et Le Moguedec 2005, distribution exponentielle) n'a donc pas été retenue. Les diamètres sont générés comme suit :

L'écart-type ( $ET$ ) de la distribution de diamètre est estimé à partir du diamètre  $Dg$  selon la relation :

$$ET/Dg = 0.506 - 0.00568 Dg \quad (Dg \text{ en cm, } R^2 = 47,66\%)$$

Soit :

$$ET = 0.506 Dg - 0.00568 Dg^2$$

Le diamètre arithmétique moyen est ensuite déduit de la relation :

$$Dm = (Dg^2 - ET^2)^{1/2}$$

Le diamètre maximal de la distribution est estimé à partir de la relation :

$$Dmax = 20.66 + 1.1642 Dg \quad (R^2 = 79\%)$$

Finalement, les diamètres individuels sont échantillonnés dans la distribution normale tronquée suivante :

$$D \sim \max(0, \min(N(Dm, ET), Dmax))$$

*Remarque* : Lorsque l'utilisateur introduit un couple  $\{N, Dg\}$  conduisant à un  $RDI > 1$ , l'effectif des diamètres échantillonnés aléatoirement est réduit par la gauche de l'histogramme des diamètres jusqu'à atteindre un  $RDI$  de 1.

### ***Croissance***

L'évolution du peuplement de l'âge  $t$  à l'âge  $t + p$ ,  $p$  étant le pas de temps choisi, s'effectue de la façon suivante :

1. calcul de la hauteur dominante à l'âge  $t+p$  (*modèle Hdom*) et de son accroissement
2. calcul de l'accroissement en surface terrière (*modèle dG-Peuplement*)
3. calcul des accroissements en diamètre individuels (*modèle dG-Arbre*), puis ajustement pour que la somme des accroissements individuels corresponde à l'accroissement du peuplement
4. calcul des hauteurs individuelles (*modèle H-Arbre*), puis ajustement de façon à ce que la hauteur dominante résultante corresponde à celle du peuplement
5. calcul du nouveau  $RDI$  et de la mortalité naturelle (*modèle AutoEclaircie*)
6. calcul des volumes individuels

### ***Création d'un scénario sylvicole, éclaircies manuelles ou automatiques***

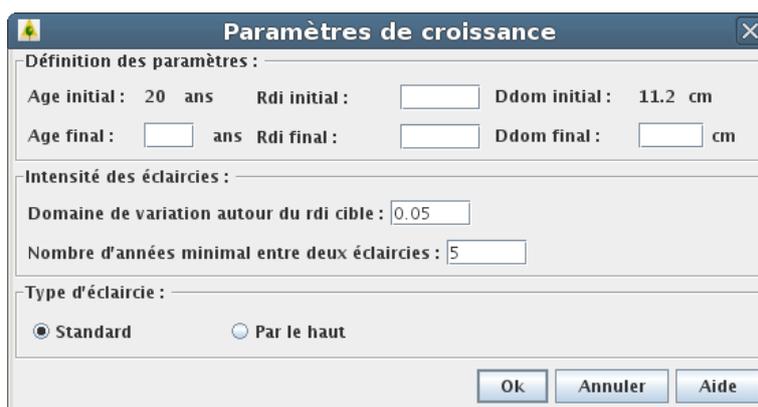
Dans Capsis, chaque pas de simulation est représenté graphiquement par un rectangle. L'utilisateur définit un scénario sylvicole en cliquant avec le bouton de droite de la souris sur une étape et en choisissant les menus "Evolution" ou "Intervention".

**Le menu "intervention" permet de déclencher manuellement une éclaircie**, selon différentes modalités (voir la documentation générale Capsis: [http://www.inra.fr/capsis/doku.php?id=help\\_fr](http://www.inra.fr/capsis/doku.php?id=help_fr)).

**Le menu "évolution" du simulateur (Figure 45) permet soit de faire évoluer le peuplement en croissance libre, soit de définir un scénario sylvicole dans lequel des éclaircies seront déclenchées automatiquement.** Le simulateur reprend pour cela le principe des scénarios basés sur le *RDI* programmés dans Fagacées sous Capsis (Dhôte et Le Moguédec 2005). **Une durée minimum entre deux éclaircies et une variation maximale de *RDI* autour de la valeur cible sont précisées.**

Les scénarios d'AbiAl utilisent les paramètres d'entrée suivants :

- l'âge du peuplement en fin de scénario (AgeFinal)
- le *RDI* ciblé en début de scénario (RdiInitial)
- le *RDI* ciblé en fin de scénario (RdiFinal)
- le domaine de variation autorisé autour du *RDI* ciblé (dRdi)
- le nombre d'années minimal séparant deux éclaircies
- le diamètre dominant ciblé en fin de scénario
- le type d'éclaircie à pratiquer ("standard" ou "par le haut")



**Figure 45. Interface de définition d'un itinéraire sylvicole.**

Si l'utilisateur ne renseigne que l'âge final, aucune éclaircie ne sera pratiquée (peuplement témoin).

S'il précise les *RDI* initial et final, une première éclaircie est effectuée immédiatement pour atteindre le RdiInitial (si nécessaire), puis le peuplement évoluera jusqu'à dépasser de  $dRdi/2$  la valeur RdiObjectif définie par la droite reliant les couples (AgeInitial, RdiInitial) et (AgeFinal, RdiFinal) à l'âge courant. A ce moment (ou après quelques années supplémentaires de croissance si la durée minimale entre deux éclaircies n'est pas respectée), une éclaircie sera pratiquée pour ramener le *RDI* à la valeur RdiObjectif - dRdi.

**Le scénario s'achève lorsque l'âge du peuplement atteint la valeur AgeFinal, ou lorsque le diamètre dominant atteint la valeur cible** (si l'utilisateur l'a précisée).

Le type d'éclaircie définit la façon dont seront sélectionnés les arbres à éclaircir pour atteindre le Rdi cible :

- dans une **éclaircie "par le haut"** tous les arbres auront la même probabilité d'être éclaircis ;
- dans une **éclaircie "standard"**, un diamètre dSup est défini (le diamètre quadratique moyen que l'on obtiendrait en ne coupant que les petits arbres pour obtenir le Rdi cible) au delà duquel aucun arbre ne sera coupé. Les petits arbres auront une probabilité d'autant plus forte d'être éclaircis que leur diamètre est inférieur à dSup.

### *Données de sortie*

Les visualisateurs standard de capsis peuvent être utilisés pour afficher les variables calculées par le simulateur (**Figure 46**).

Un visualisateur a été écrit spécifiquement pour AbiAl : il permet d'afficher la **largeur de cerne**, calculée comme l'accroissement radial annuel sur écorce à 1,30m, des **arbres objectifs** (les arbres vivants à la fin d'un scénario), des **arbres dominants**, de l'**arbre moyen** ou d'une liste d'arbres sélectionnés par l'utilisateur (pour choisir les variables ou les arbres à afficher, cliquer avec le bouton de droite sur le graphique et choisir le menu "configurer").

Pour exporter les données d'un graphique, choisir le menu "table" puis copier/coller les données dans un programme tiers.

**Un fichier synthétique décrivant le peuplement généré peut également être exporté sous forme de fichier texte ou html** (cliquer avec le bouton de droite sur la dernière étape du scénario et choisir le menu "exporter").



Figure 46. Visualisateur de sortie du simulateur

## 2. Utilisation et adaptation des modèles

### *Modèle Hdom*

Deux fonctions sont définies à partir de ce modèle : la première initialise les paramètres de façon à ce que la courbe passe par le couple (Hdom, âge) fourni pour définir la fertilité, la seconde renvoie la hauteur dominante à un âge donné. Dans les deux cas, **l'âge d'entrée est l'âge depuis la souche (0,30m) et l'on admet que le peuplement atteint 1,30m de hauteur dominante à 15 ans** (Duplat, 1998).

La relation utilisée dans le modèle Jura (Duplat 1980) ne se comporte pas correctement pour des fertilités anormalement basses ( $H_{dom} < 15$  m à 100 ans), ce qui pose problème pour estimer la fertilité par dichotomie. On a donc admis que **lorsque la fertilité à 100 ans est inférieure à 15m dans le Jura, la hauteur dominante à un âge donné est simplement proportionnelle à celle obtenue au même âge pour une fertilité de 15m.**

### *Modèle AutoEclaircie*

Le modèle est utilisé dans la phase d'initialisation pour calculer le nombre d'arbres à générer et leur diamètre quadratique moyen  $D_g$  (voir ci-dessus), puis à chaque étape de la simulation pour calculer les *RDI* avant et après éclaircie. **Il permet aussi de calculer la mortalité naturelle de la façon suivante : tant que le *RDI* dépasse la valeur 1, l'arbre de plus petit diamètre est éliminé et le *RDI* est recalculé.**

### ***Modèle dG-Peuplement***

Ce modèle permet de calculer l'accroissement en surface terrière du peuplement à partir de l'accroissement en hauteur, du *RDI* courant et de l'altitude avec des paramètres différents pour les deux massifs.

**Pour les Vosges, le modèle n'est applicable qu'à des altitudes comprises entre 400 et 700m. L'altitude définie par l'utilisateur est donc ramenée à la borne la plus proche de ce domaine de validité pour initialiser le modèle.** Cette correction locale n'affecte pas le *modèle H-arbre* qui utilise également l'altitude comme variable d'entrée.

**Pour le Jura, la relation est valable au voisinage de 750m,** le gradient couvert par les PP étant trop restreint pour évaluer un effet de l'altitude.

### ***Modèle dG-Arbre***

Le modèle fournit une fonction donnant l'accroissement annuel en surface terrière d'un arbre dans une période de croissance libre à partir de sa circonférence, du *RDI* courant et de la variation de *RDI* (*deltaRdi*) provoquée par une éclaircie pratiquée avant la phase de croissance.

Dans le simulateur, la fonction est utilisée à chaque pas de temps et donc parfois bien après une éclaircie. **Pour éviter que l'effet des éclaircies ne persiste trop longtemps, nous avons imposé de ramener *deltaRdi* à 0 lorsque l'éclaircie date de plus de 5 ans.**

Par ailleurs, **les accroissements calculés sont corrigés de façon à ce que la somme des accroissements individuels en surface terrière corresponde à l'accroissement global du peuplement** (fournie par le *modèle dG-Peuplement*). Chaque valeur renvoyée par le modèle est donc multipliée par le rapport entre l'accroissement du peuplement et la somme des accroissements individuels.

### ***Modèle H-Arbre***

Le modèle permet de calculer la hauteur d'un arbre en fonction de son diamètre et de plusieurs variables du peuplement (*H<sub>0</sub>*, *RDI*, *IF*, *altitude*).

Les accroissements individuels obtenus sont ajustés de façon à ce que la hauteur dominante fournie par le *modèle Hdom* corresponde à la valeur *HdomArbres* renvoyée par le *modèle H-Arbre* pour le diamètre dominant. La correction est effectuée de façon à ce que la hauteur renvoyée pour le diamètre à 1,30m reste bien égale à 1,30m. C'est donc le paramètre *m<sub>1</sub>* de l'équation (19) qui est ajusté en le multipliant par le rapport  $(H_0 - 1,30) / (H_{domArbres} - 1,30)$ .

Le modèle est également appliqué pour calculer la hauteur moyenne du peuplement à partir du diamètre quadratique moyen. Lorsqu'une éclaircie est pratiquée, *H<sub>0</sub>* et *RDI* avant éclaircie sont mémorisés de façon à ce que le même *modèle H-Arbre* soit appliqué avant et après l'éclaircie.

### ***Modèles V-Arbre***

Le volume total aérien est calculé à l'aide du tarif de Vallet et al. (2006). Le tarif Duplat (1980) établi pour le Jura est appliqué aux 2 massifs.

## **3. Organisation des fichiers source**

Tous les fichiers sources sont rassemblés dans le répertoire capsis4/bin/abial et ses dérivés.

Le sous répertoire *model* contient les classes principales suivantes :

- AbialModel : classe principale rassemblant les fonctions d'initialisation du peuplement, de croissance, mortalité et gestion des éclaircies ;
- AbialStand : classe Capsis modélisant un peuplement
- AbialTree : classe Capsis modélisant un arbre
- AbialSettings : constantes et variables communes à un scénario
- AbialMethodProvider : classe Capsis d'interface avec les outils de visualisation
- AbialDendro : calcul des variables dendrométriques de base ( $G$ ,  $D_g$ ,  $H_0$ ,...)
- AbialModelHdom : modèle *Hdom* (avec les classes dérivées AbialModelHdomJura et AbialModelHdomVosges)
- AbialModelSelfThinning : modèle *AutoEclaircie*
- AbialModelStandBasalArea : modèle *dG-Peuplement*
- AbialModelTreeBasalArea : modèle *dG-Arbre*
- AbialModelTreeHeight : modèle *H-Arbre*
- AbialModelTreeVolume : modèles *V-Arbre*

## Références

- Becker M., (1989). The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Can. J. For. Res.* 19:1110-1117.
- Coelli T. J., 1996. A guide to FRONTIER Version 4.1: A computer program for stochastic frontier production and cost function estimation. CEPA Working Papers. Department of Econometrics, University of New England, Armidale, NSW 2351, Australia.
- Coelli T., Henningsen A., 2009. Stochastic Frontier Analysis. Package 'frontier'. R project.
- Décourt N. (1973). Protocole d'installation et de mesure des placettes de production semi-permanentes. Champenoux: INRA-CNRF, 25p.
- Deleuze C., Pain O., Dhôte J.-F., Hervé J.-C. (2004). A flexible increment model for individual trees in pure and even-aged stands. *Annals of Forest Science*, 61:327:335.
- Dhôte J.-F., Hercé de E. (1994). Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. *Canadian Journal of Forest Research*, 24:1782-1790.
- Dhôte J.-F. (1995). Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne. *Revue Forestière Française*, XLVII, 106-110.
- Dhôte J.-F., Le Moguedec G. (2005). Présentation du modèle Fagacées. Document interne du laboratoire LERFoB (UMR 1092 INRA-ENGREF). 35p.
- Duplat P. (1980). Tables de production de référence pour le sapin du Jura. 13-25. *Bulletin Technique de l'ONF*, 11:13-26.
- Duplat P. (1998). Note interne sur la sapinière Vosgienne, ONF, Fontainebleau.
- Gallet F. (1998). La production du sapin pectiné dans les Vosges. Etude de l'accroissement à partir de différentes sources en vue de l'adaptation de la table de production aux conditions réelles de la Sapinière. ONF Epinal, Mémoire diplômant, Formation des Ingénieurs Forestiers, ENGREF, Nancy, France. 99p.
- Lespagnol V. (1998). Construction d'une table de production pour le sapin pectiné sur le massif Vosgien. ONF Epinal, Mémoire diplômant, Formation des Ingénieurs Forestiers, ENGREF, Nancy, France. 46p.
- Pretzsch H., Schütze G. (2005). Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands. *Plant Biology* 7:628-639.
- Reineke, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46:627-638.

Vallet P., Dhôte J.-F., Le Moguedec G., Ravart M., Pignard G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*. 229:98-110

Weiskittel A., Gould P., Temesgen H., 2009. Sources of variation in the self-thinning boundary line for three species with varying levels of shade tolerance. *Forest Science* 55:84-93.

Zeide, B., 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39:594-616.

Zhang L., Bi H., Gove J.H., Heath L.S., 2005. A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line. *Canadian Journal of Forest Research* 35:1507-1514.

\*\*\*