

**Stabilité et résistance individuelle et collective
et phénomènes de désintégration collective
face aux sollicitations de neige lourde
au sein de peuplements de pin sylvestre
(*Pinus sylvestris* L.)**

Analyse et gestion du risque de dégâts.
Conséquence pour la pratique d'éclaircies tardives

Dimiter Ivanov

Thèse EPFZ no. 17513

2007

Thèse EPFZ no. 17513

**STABILITE ET RESISTANCE INDIVIDUELLE ET COLLECTIVE
ET PHENOMENES DE DESINTEGRATION COLLECTIVE
FACE AUX SOLLICITATIONS DE NEIGE LOURDE
AU SEIN DE PEUPELEMENTS DE PIN SYLVESTRE (*Pinus sylvestris* L.).**

**Analyse et gestion du risque de dégâts.
Conséquence pour la pratique d'éclaircies tardives**

présentée à

L'ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE ZURICH

pour l'obtention du
titre de Docteur ès sciences

par

DIMITER EMILOV IVANOV
Ingénieur forestier dipl. Université des Sciences Forestières (Sofia)

né le 05.08.1974

originaire de Sofia (Bulgarie)

acceptée sur proposition

du professeur Dr. Hans Rudolf Heinemann, rapporteur
du professeur Dr. Jean-Philippe Schütz (Emeritus), corapporteur
du professeur DI Ernst Gehri (Emeritus), corapporteur
de l'ingénieur forestier dipl. EPF Andreas Zingg, corapporteur

2007

Remerciements

„Ce qui est tordu ne peut être redressé, et ce qui manque ne peut être compté ... et si un arbre tombe, au midi ou au nord, il reste à la place où il est tombé.“

(Ecclésiaste 1 :15 et 11:3)

En premier lieu je voudrais remercier le Prof. Dr. Jean-Philippe Schütz d’avoir proposé un sujet de recherche intéressant, puis d’avoir encadré et guidé le travail. Je lui suis reconnaissant de son soutien sans réserve durant toutes ces années, du climat de confiance et de pleine liberté scientifique, des discussions fructueuses et spécialement de son encouragement pour la recherche d’approches inaccoutumés et de solutions innovatrices au problème étudié. Je le remercie en outre de son engagement personnel et de sa compréhension du défi de conduire un travail scientifique dans deux pays de conditions et de mentalités fort différentes. Mes remerciements sont ensuite destinés au Prof. Dr. Ernst Gehri, pour son soutien très précieux dans les domaines de la mécanique et de la résistance des matériaux, au Prof. Dr. Hans Rudolf Heinemann, pour avoir prêté son assistance et encadré le travail dans sa phase finale ainsi que pour avoir lu et évalué le texte, et à M. Andreas Zingg, ingénieur forestier dipl. EPFZ, pour la lecture du texte et pour ses remarques.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au Dr. Peter Ammann pour les innombrables discussions, ses conseils méthodologiques et son encouragement au cours des années ainsi que pour son aide amicale pendant le séjour de ma famille en Suisse. Je suis reconnaissant au Prof. Dr. Kiyoshi Umeki (Graduate School of Science and Technology Chiba University, Japan) de son aide et de ses conseils. Je remercie M. Martin Sauerbier, ing. dipl., de l’Institut de géodésie et de photogrammétrie de l’EPFZ de sa coopération dans la mise en œuvre des méthodes de mesures stéréo photogrammétriques. Mes remerciements sont également destinés au Dr. Sotir Glushkov de l’Institut des recherches forestières de Sofia et au Dr. Stanimir Stoilov de l’Université des sciences forestières de Sofia pour leur coopération dans la préparation et la conduite des essais de fléchissement d’arbres sur pied. Je remercie très chaleureusement ma mère, Rosa Ivanova, ingénieur en mécanique, de m’avoir aidé dans l’organisation et la conduite des essais de fléchissement de billons, ainsi que ses collègues ingénieurs Atanas Véliov et Nikola Dimitrov.

A mes collègues de l’arrondissement forestier de Godetch et surtout à M. Rumen Iliev, ing. for.dipl., à Mme Antoaneta Pehleva, ing.for. dipl. (dans leur fonction de directeur/directrice de l’arrondissement) et à M. Todor Todorov, garde forestier – j’adresse mes remerciements pour leur assistance dans mes activités en relation avec les placettes d’essai (collecte de données et essais) et surtout d’avoir assuré la sauvegarde des placettes contre les coupes illégales. Sans la contribution essentielle d’un groupe de bûcherons de la ville de Valchedram, ce projet de recherche n’aurait pas été possible. Mes remerciements vont à Vankata Bélia, Vankata Chernia, Plamen, Goshov, Stephan et Baïram pour le bon déroulement des coupes. Mes remerciements vont également aux aides de terrain lors des nombreuses campagnes de collecte des données - Miro, Tédi, Valio, Nasko, Iveto, Venzi, Emo, Moni, Dido, Apostol, Malkia Mitak, Adasha, Mitko na Vili, Juli, M. Vassil Vassilev, Néli, Philippe, à mon frère Ivan et à mon père Emil.

En ce qui concerne l’appui institutionnel, indispensable au moment du démarrage du projet de recherche, je tiens à remercier M. Vassil Stiptzov, alors secrétaire général du Service forestier national de Bulgarie, Mme Margarita Decheva, manager du Programme forestier bulgaro-suisse, ainsi que M. Jean-Pierre Egger de la Direction du développement et de la coopération à Berne.

Un tout grand merci à mes collègues de la Chaire de sylviculture qui m'ont chaleureusement accueilli et pleinement intégré dans leur joyeuse équipe pendant toutes ces années – Hans-Ulrich Bucher, Dr. Jean-Pierre Sorg, Marianne Altendorfer, Dr. Kaspar Schmidt, Dr. Pierre Vanomsen, Andreas Rudow, Peter Schwab, Urs Hunziker, Dr. Peter Rotach, Paul Berliat, Andrea Ledergerber, Ueli Mauderli, Philippe Wohlhauser, Michael Götz et Isabelle Gambetta. Au même groupe appartiennent également le Dr. Christian Rosset, Dr. Urs Kamm et Jean-François Matter, auxquels j'adresse en outre mes remerciements pour les expériences transmises et leur soutien dans l'accomplissement de mes tâches d'assistant à la Chaire de sylviculture.

Je remercie de tout mon cœur mon épouse Julie; je lui suis reconnaissant de m'avoir soutenu durant ces années, d'avoir pris soin de notre famille pendant mes absences et d'avoir sacrifié sa propre carrière pour moi.

Sommaire

Résumé	10
Summary	14
Резюме.....	17
Abréviations fréquentes et définitions.....	21
1 INTRODUCTION.....	22
1.1. Les éclaircies tardives dans le contexte des nouveaux concepts d'éducation	22
1.2. Pertinence du thème pour la foresterie bulgare	22
2 OBJECTIFS.....	23
3 ETAT DES CONNAISSANCES.....	25
3.1 Dégâts de neige lourde	25
3.1.1 Genres de dégâts.....	25
3.1.2 Forme et dimensions spatiales des dégâts	26
3.1.3 Genres et répartition des dégâts à l'échelle d'un peuplement	26
3.1.4 Répartition altitudinale et géographique des dégâts.....	26
3.1.5 Aspects des dégâts à grande échelle.....	28
3.2 Dégâts d'autres formes de précipitations.....	28
3.3 Evaluation critique des interprétations des dégâts de neige lourde	29
3.3.1 Le processus naturel.....	29
3.3.2 Le but de production.....	31
3.3.3 Les catastrophes	32
3.3.4 Les aspects phytosanitaires	34
3.4 Facteurs extérieurs.....	34
3.4.1 La neige lourde comme phénomène météorologique	34
3.4.2 Accumulation de la neige lourde sur le houppier d'un conifère	35
3.4.3 Influence de la station et de la topographie.	38
3.5 Biomécanique de l'arbre individuel.....	38
3.5.1 Système mécanique. Stabilité et résistance à la charge de neige.....	38
3.5.2 Rôle mécanique des parties morphologiques de l'arbre.....	41
3.5.3 Propriétés mécaniques du matériau bois	44
3.5.4 Indices de stabilité	47

3.5.5	Essais statiques avec des arbres sur pied	51
3.6	Facteurs au niveau du peuplement	51
3.6.1	Position sociale.....	52
3.6.2	Densité et effets de groupe.....	52
3.6.3	Effet domino.....	58
3.6.4	Stabilité collective du point de vue mécanique	59
3.7	Incidences des activités humaines.....	60
3.7.1	Conséquences immédiates	60
3.7.2	Conséquences à long terme.....	62
3.8	Risque de dégâts de neige lourde	62
3.8.1	Définitions	62
3.8.2	Analyse du risque de dégâts de neige lourde. Etat des connaissances.....	63
3.8.3	Indices du risque.....	66
3.8.4	Stratégies de gestion du risque de dégâts de neige lourde.....	66
4	PARCELLE D'ETUDE	69
4.1	Emplacement	69
4.2	Facteurs de la station	69
4.3	Description du peuplement.....	70
5	METHODES – APPLICATION ET DEVELOPPEMENT	72
5.1	Dispositif expérimental	72
5.2	Mesure des houppiers	74
5.2.1	Mesures conventionnelles	74
5.2.2	Mesures 3-dimensionnelles	75
5.3	Modélisation du vecteur d'asymétrie du houppier	75
5.4	Essais mécaniques	78
5.4.1	Définition de la stabilité et de la résistance collectives.....	78
5.4.2	Simulation d'une charge excentrée due à l'asymétrie du houppier	79
5.4.3	Simulation de la charge de la neige lourde	80
5.4.4	Simulation des interactions entre les arbres	81
5.4.5	Etude des propriétés de fléchissement de billons	81
5.5	Modélisation de la stabilité et de la résistance individuelles de l'arbre	85

5.5.1	Déformation d'une barre en flexion. Analogie de Mohr	85
5.5.2	Calcul du module E et de la résistance du bois.....	87
5.5.3	Paramètres de la modélisation	89
5.5.4	Calcul de la charge critique de flambage. Stabilité individuelle.....	91
5.5.5	Calcul des états d'équilibre de 2 ^{ème} ordre	94
5.5.6	Calcul de la résistance individuelle. Indice et zone de résistance individuelle.....	95
5.6	Mesures 3-dimensionnelles des tiges.....	96
5.7	Objet de l'analyse du risque.....	101
6	RESULTATS.....	102
6.1	Dispositif expérimental	102
6.1.1	Mise en place et caractéristiques des placettes	102
6.1.2	Réalisation et évaluation de l'éclaircie sélective	103
	• coupe et débardage	105
	• évaluation de l'éclaircie sélective	105
6.1.3	Evaluation des paramètres de stabilité des arbres.....	106
	• coefficient d'élancement	106
	• inclinaison de la tige.....	108
	• asymétrie du houppier	108
	• longueur relative du houppier	109
	• emplacement des concurrents par rapport aux arbres de place	110
	• conclusion.....	111
6.2	Historique des dégâts de neige lourde dans la région d'étude	111
6.3	Mesures 3-dimensionnelles des houppiers	111
6.3.1	Collecte et traitement des données.....	111
6.3.2	Résultats	112
	• surface de la projection orthogonale du houppier (SPOH)	112
	• vecteur d'asymétrie (VA).....	112
	• accroissement de la SPOH	113
6.4	Modélisation du vecteur d'asymétrie du houppier	114
6.4.1	Données d'entrée	114
6.4.2	Résultat de la modélisation, estimation et discussion.....	115
6.4.3	Simulation des VA à l'échelle du peuplement	116

6.4.4	Comparaison des différentes façons d'estimer l'asymétrie.....	117
	• VA simulés et direction d'asymétrie.....	117
	• VA simulés et VA (4 rayons).....	119
6.5	Etude de la stabilité et de la résistance individuelles par simulation de la charge de neige.....	119
6.5.1	Choix et caractéristiques des arbres d'essai	119
6.5.2	Déroulement des essais.....	121
6.5.3	Modèles 3D des tiges et reconstruction de la ligne élastique.....	121
6.5.4	Module E, résistance et limite d'élasticité du bois (essais avec billons) ..	126
6.5.5	Module E des tiges sur pied.....	129
6.5.6	Détermination de la SI et de la RI. Scénarios et analyse de sensibilité ...	131
6.5.7	Déformations simultanées lors d'une accumulation de neige simulée	137
6.6	Stabilité et résistance collectives	140
6.6.1	Simulation d'interactions statiques entre les arbres.....	140
6.6.2	Modèles mécaniques de la SC	144
6.6.3	Résistance collective	149
6.7	Dégâts de neige lourde après l'éclaircie	150
6.7.1	Processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé	150
	• Typologie détaillée des dégâts	150
	• Reconstitution du processus d'apparition des dégâts.....	150
	• Analyse du processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé (Fig. 111).....	151
6.7.2	Interactions entre les arbres. Effets domino. Typologie et reconstitution	153
	• Genres d'interactions et modes d'apparition des dégâts	153
	• Principes et procédés de reconstitution des interactions	155
	• Types d'effets domino.....	157
6.7.3	Evaluation de l'effet de la coupe sur l'apparition des dégâts.....	159
	• Cas de figure des effets de la coupe	159
	• Exemples d'évaluation des effets de la coupe sur l'apparition des dégâts.....	162
6.7.4	Evaluation des dégâts à l'échelle de la parcelle d'étude	165
	• Evaluation des dégâts en fonction de leur genre	165
	• Evaluation de l'effet de la coupe.....	167
	• Evaluation des effets domino	170
6.7.5	Evaluation des dégâts à l'échelle des placettes	173

•	Comparaison du taux des dégâts pendant des périodes hivernales diverses	173
•	Analyse des dégâts de la période 2004/2005	173
7	DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	177
7.1	Calculs du module E et de la résistance du bois	177
7.2	Evaluation de la simulation de la charge de neige lourde	177
7.2.1	Au niveau de l'arbre individuel	177
7.2.2	A l'échelle collective	178
7.3	Stabilité et résistance individuelles	179
7.3.1	Critique du modèle de la SRI	179
•	emplacement du $C_{g_{houpp+neige}}$	179
•	déformations dans la zone du houppier	179
•	rigidité d'encastrement et résistance au déracinement	179
•	influence de la torsion	180
•	validation du modèle de la SRI	180
7.3.2	Effet de quelques facteurs sur la SI et la RI	181
7.4	Stabilité et résistance collectives	182
7.4.1	Critique des modèles de la SRC	182
7.4.2	Rôle des interactions statiques entre les arbres.....	183
7.4.3	Extrapolation des interactions statiques à l'échelle du peuplement.....	183
7.4.4	SRC et développement du peuplement.....	184
7.4.5	Destruction des systèmes collectifs de support	185
7.4.6	Validité pour d'autres essences	185
7.5	Rôle de la coupe pour la SC et la RC.....	185
7.5.1	Distance entre les arbres et efficacité du support souple.....	185
7.5.2	Influence de la coupe sur l'arbre individuel	187
7.6	Effets domino	187
7.6.1	Effet domino statique	187
7.6.2	Effet domino dynamique	188
7.7	Risque de dégâts de neige lourde	188
7.7.1	Vulnérabilité, effet dose-réponse et risque chez l'arbre individuel.....	188
7.7.2	Risque au niveau du collectif. Influence de l'effet domino dynamique... 189	
•	probabilité et efficacité de support	189

•	probabilité et efficacité d'un coup dynamique	190
•	conséquences pour la gestion du risque	192
7.8	Conséquences pour la gestion forestière	193
7.8.1	Le coefficient d'élanement comme indice de stabilité contre la neige ...	193
7.8.2	Conséquences pour la conduite des interventions tardives	193
7.8.3	Conséquences pour les stratégies de gestion forestière à long terme	196
7.9	Conclusion finale	198
	Curriculum vitae	199
	Annexe 1. Terrestrial 3-dimensional measurements of tree crowns	200
	Annexe 2. Désignation de l'éclaircie sélective	215
	Annexe 3. Projection orthogonale de la ligne élastique (arbre K7)	216
	Annexe 4. Calcul des moments en fonction de la position initiale	217
	Annexe 5. Calcul du module E (essai de terrain)	218
	Annexe 6. Dégâts de neige (2005) - genre et répartition spaciales.....	220
	Annexe 7. Dégâts de neige lourde - exemples.....	227
	Bibliographie.....	230

Résumé

L'**objectif principal** du travail de recherche est de trouver une façon adéquate de pratiquer les interventions tardives (c.à.d. la moins traumatique possible immédiatement après l'éclaircie) dans des peuplements de pin sylvestre non-traités jusqu'alors, à un état avancé de leur développement (stade de perchis), en vue d'assurer leur survie physique vis-à-vis de la neige lourde.

La stabilité d'un peuplement contre la neige lourde est estimée les dernières décennies exclusivement sur la base de la stabilité individuelle des arbres qui le constituent. Le coefficient d'élanement h/d sert d'indice de stabilité ensemble avec la répartition des arbres par classes de h/d. Un peuplement (et surtout un haut perchis) de pins sylvestres (ou d'épicéas) dense non-traité est estimé instable en fonction de cet indice, présentant un haut risque de dégâts de neige lourde. Au lieu de considérer les effets de la neige lourde comme dégâts, il convient de les classer dans la plupart des cas comme une **forme de la mortalité naturelle** ou comme une **éclaircie par le bas naturelle**. Le terme de „dégât” doit être réservé seulement pour des arbres choisis qui sont supposés constituer le peuplement au stade de la vieille futaie.

Jusqu'ici dans les modèles mécaniques les capacités porteuses d'un arbre sont exprimées par la stabilité ou la charge critique de flambage d'une barre encastrée (de façon rigide ou élastique) à sa base et soumise à l'autre extrémité à une charge centrée. La charge critique est une fonction de la forme de la barre, des propriétés du matériau (module E) et de l'encastrement. L'hypothèse d'une charge centrée et d'une barre d'aplomb exclue tout fléchissement jusqu'à l'atteinte de la charge critique, le flambage s'effectuant dans une direction arbitraire. Dans des conditions naturelles, il existe toujours une certaine excentricité de la charge de la neige, due soit à l'asymétrie du houppier, soit à l'inclinaison de la tige par rapport à la verticale, soit aux deux à la fois. Par conséquent, le **fléchissement est inévitable** et **il s'agit d'un problème de résistance**. Le genre de la charge (parallèle à l'axe de la tige) et l'ampleur des déformations possibles (jusqu'à quelques mètres) exigent l'application de la théorie de 2^{ème} ordre pour les calculs des déformations, car les dernières ne sont pas proportionnelles à la charge exercée et l'**effet amplificateur** doit être pris en compte. Le bras de levier initial qui provoque l'excentricité de la charge dépend surtout de l'asymétrie du houppier. L'asymétrie du houppier se laisse exprimer par **le vecteur d'asymétrie**. Une diversité notable dans l'intensité et la direction des vecteurs d'asymétrie se constate au sein de perchis denses non-traités, suite à la concurrence intraspécifique durant de longues années, amplifiée par l'effet de la pente et/ou de l'exposition du terrain. Le vecteur d'asymétrie prédétermine en énorme partie **la direction naturelle de fléchissement** et finalement la **direction du dégât** (plastification, bris ou déracinement) d'un arbre sous la charge de la neige accumulée sur son houppier. Le vecteur d'asymétrie prédétermine aussi **l'arbre voisin et la façon dont l'arbre étudié est en mesure d'entrer en interactions mécaniques**.

L'étude se solde par une première esquisse d'une **théorie de la stabilité, de la résistance et de la désintégration collectives** d'un peuplement sous la charge statique de la neige lourde. **Deux genres d'interactions mécaniques** entre les arbres sont identifiés – **interactions statiques (pression)** et **interactions dynamiques (coup)**. Dans un peuplement dense, **deux types d'interactions statiques** sont identifiés entre deux arbres-voisins directs – **1) cas de support bilatéral** et **2) cas de support unilatéral/pression unilatérale**. Etant donné les petites distances entre les pieds des arbres, ces interactions s'effectuent dans **le domaine élastique de déformation** jusqu'à des charges très élevées lors du fléchissement des tiges. Le modèle mécanique établi et proposé du système composé de deux tiges en support bilatéral

suggère que la charge critique de flambage que chacun des deux éléments peut supporter est en mesure d'augmenter de plusieurs fois **par rapport à chacun des éléments** considéré individuellement (sa stabilité collective par rapport à sa stabilité individuelle). **La borne supérieure théorique est une augmentation d'env. 8 fois.** En réalité, les arbres dans les systèmes de support fléchissent aussi et il convient de considérer le problème mécanique de nouveau comme un problème de résistance. On suppose que l'augmentation de la résistance est du même ordre de grandeur (rapport de la résistance collective et individuelle semblable au rapport des stabilités collective et individuelle). Des augmentations du même ordre de grandeur peuvent être attendues aussi dans le modèle unilatéral, par rapport à l'arbre supporté par son voisin. **Dans les conditions naturelles** d'un peuplement dense **plus que deux arbres sont en mesures d'interagir statiquement.** Des **systèmes complexes** variés **de type mixte (bilatéral et unilatéral)** en résultent, dont la modélisation et le calcul de la stabilité et de la résistance de chaque constituant s'avèrent des problèmes très difficiles.

Vers la limite des capacités porteuses des éléments ou des sous-systèmes les plus stables (les plus résistants) dans un système complexe de plusieurs arbres en interactions statiques (surtout du type unilatéral), il se produit **une désintégration collective des parties entières d'un peuplement dense (dégâts par surfaces).** Ce phénomène est appelé **effet domino statique.** Selon la littérature, il ne concerne que des peuplements jeunes (fourrés et éventuellement bas perchis).

Des distances suffisamment grandes entre les arbres (dans le cas étudié **à partir de 4 à 6 m**) rendent possibles la déformation plastique et le bris ou le déracinement consécutifs des arbres individuels. Au cas où s'effectue un contact mécanique avec un arbre voisin, **l'interaction est déjà de nature dynamique.** L'augmentation des distances entre les arbres est une conséquence inévitable des activités humaines en forêts (des éclaircies).

Le rôle des éclaircies à l'égard de la stabilité des arbres et des peuplements est estimé jusqu'ici comme stabilisateur à moyen terme. Néanmoins, toute éclaircie se caractérise par un effet post-déstabilisateur à court terme (le plus prononcé après des éclaircies tardives), même au cas où seulement des individus individuellement très instables sont enlevés. **La présente étude identifie deux aspects négatifs de la coupe :**

1. **Désactivation des interactions naturelles de support.** Ceci peut conduire à la **déstabilisation locale** sous la charge de la neige lourde d'arbres, situés à la bordure de l'espace libéré par le houppier de l'arbre enlevé et ayant une direction naturelle de fléchissement vers cet espace. Des interactions statiques dans le domaine de déformations plastiques ainsi que le développement d'effets dominos statiques sont ainsi favorisés.
2. **L'apparition d'interactions dynamiques** entre les arbres. L'éclaircie peut former **une distribution spatiale des arbres restants, favorable à la portée de coups dynamiques initiaux** de la part des arbres endommagés individuellement (**arbres-initiateurs**) sur des arbres voisins se trouvant dans leurs champs de chute, ainsi qu'à **la transmission d'à-coups sur d'autres arbres.** Les coups dynamiques, combinés avec la charge statique de la neige sont dotés d'une force destructrice énorme. La transmission d'à-coups dans une chaîne d'interactions dynamiques conduit à la formation d'**une chaîne d'effet domino** d'arbres endommagés. Le phénomène est appelé **effet domino dynamique.**

L'effet domino dynamique (respectivement les interactions dynamiques) est identifié comme le facteur principal, déterminant le taux des dégâts. **L'ampleur des dégâts se laisserait alors contrôler en limitant l'initiation et/ou le développement des chaînes de l'effet domino dynamique.**

Deux approches sont proposées pour **minimiser les risques** de déstabilisation après des éclaircies tardives :

1. **Interventions ponctuelles autour des arbres de place choisis.** Elles consistent dans l'élimination seulement de leurs concurrents, tandis que les parties entre les cellules de martelage restent intactes (les interactions de support y restent activées). Les principes de l'éclaircie sélective excluent par définition la déstabilisation de l'arbre de place choisi par l'enlèvement des plus grands concurrents, situés du côté le moins développé de son houppier, vers lequel l'arbre en question n'est pas disposé à fléchir naturellement sous la charge de la neige. L'analyse lors du martelage doit inclure tous les arbres, situés à la bordure de l'espace libéré par chaque arbre enlevé, afin d'identifier et d'éviter des déstabilisations dans cette zone.
2. **Eclaircie (très) forte.** Il s'agit d'une part de favoriser les individus les plus stables et les plus résistants individuellement en éliminant si possible tous les arbres potentiellement en danger de déstabilisation **et de l'autre – de diminuer la probabilité de transmission d'à-coups dynamiques, grâce des grandes surfaces libérés qui arrêtent le développement des chaînes d'effet domino dynamique.**

La deuxième approche paraît dangereuses en ce qui concerne le risqué de dégât du vent et on recommande la première. Il faut en tout cas **éviter les états intermédiaires de distribution spatiale des arbres restants**, résultant d'éclaircies en plein d'intensités modérée, qui s'avèrent les plus vulnérables à la neige lourde, respectivement les plus propices au développement de l'effet domino dynamique.

Méthodes et objet d'étude

- Les projections orthogonales des houppiers sont mesurées sur des modèles 3 dimensionnels avec des photos terrestres
- La stabilité et la résistance individuelles sont étudiées par simulation de la charge de la neige lourde par une charge verticale excentrée, appliquée aux arbres sur pied. La ligne élastique dans chaque état d'équilibre statique, est reconstruite de façon photogrammétrique, avec une exactitude des points-cibles de l'ordre de 0.5-2.0 cm dans le plan horizontal. Les valeurs obtenues pour le module E sont vérifiées par des essais de fléchissement de billons des mêmes arbres sous une presse hydraulique.
- La stabilité et la résistance collectives sont étudiées par simulation des interactions statiques (bilatérales et unilatérales) entre deux arbres voisins sur pied.
- Les effets dominos statique et dynamique sont décrits et étudiés par des observations et procédés de reconstitution "post-factum" des dégâts de neige lourde.
- L'effet de la coupe est évalué par les dégâts qui ont eu lieu après une éclaircie tardive dans un haut perchis de pin sylvestre, dense et récemment traité. La parcelle d'étude représente un essai avec des variantes de l'éclaircie situative (chacune sur une surface de 0.5 ha) en fonction de deux paramètres – nombre d'arbres de place et degré de leur libération (nombre de concurrents enlevés par arbre de place). L'analyse des relevées montre que dans 77% des cas la coupe a directement ou indirectement provoqué le dégât.

Du point de vue des stratégies de gestion forestière à long terme, les nouvelles connaissances sur la stabilité et la résistance collectives montrent que **le retard des interventions culturelles (pas de soins aux fourrés, éclaircie tardive) ne représente un handicap pour les buts de production.** Les résultats de l'étude suggèrent que la stabilité et la résistance collectives représentent le **mécanisme naturel de protection commune contre la neige lourde** qui fonctionne de façon efficace jusqu'à âge avancé du peuplement. Par conséquent, le problème principal dans les stratégies de gestion devrait être „**comment** intervenir“ au lieu de „**quand** intervenir“. **L'aspect de la stabilité ne**

représente plus un obstacle insurmontable pour la réalisation des concepts d'éducation tardive des forêts.

Le coefficient d'élanement ne tient compte ni des effets des interactions statiques, ni des effets des interactions dynamiques. Pour ces raisons (en complément d'autres raisons déjà connues) il s'avère **inapproprié comme indice d'estimation de la stabilité ou de la résistance des arbres individuels ou de peuplements entiers et aussi comme indice d'estimation du risque de dégâts de neige lourde.**

Summary

INDIVIDUAL AND COLLECTIVE STABILITY AND RESISTANCE AND PHENOMENA OF COLLECTIVE DISINTEGRATION IN SCOTS PINE (PINUS SYLVESTRIS L.) STANDS UNDER WET SNOW LOAD. Risk assessment and risk management. Consequences on the practice of delayed thinning

The aim of this thesis is to find a suitable way for the practice of delayed thinning (i.e. the less traumatic immediately after the intervention) in unmanaged before high pole Scots pine stands in order to guarantee their physical survival against wet snow.

Stand stability against wet snow load has been estimated in the last decades exclusively on the base of the individual tree stability. The h/d ratio is used as stability index together with stem distribution in classes of h/d. On this basis a dense unmanaged Scots pine (or Norway spruce) stand (especially in high pole stage) is usually considered as unstable according to this index and exposed to high risk of wet snow damages. Instead of interpreting the wet snow effects as damage, it is reasonable to classify most of them as being the **result of natural mortality** or of **natural thinning from below**. The term “damage” should be reserved only for a limited number of crop trees which are supposed to constitute the mature stand.

Until now in mechanical models the bearing capacity of a tree is expressed by the stability or the buckling load of a clamped bar (rigidly or elastically) under compressive stress. The buckling load is a function of the bar form, material properties (E modulus) and the clamping. The hypothesis of perfect compressive stress without any eccentricity and a perfect vertical bar doesn't allow any kind of bending till the buckling load is reached. The buckling deformation occurs in an arbitrary direction. Under natural conditions there is always a certain load eccentricity of the snow mass, due to crown asymmetry, leaning stem or both of them. Therefore **bending is inevitable** and **the mechanical problem is related to the resistance**. The type of load (parallel to the stem axis) and the large deformations (up to several meters) require the use of the theory of 2nd order deformations, as **deformations are not proportional to the load**. The initial lever arm which leads to load eccentricity depends mostly on the crown asymmetry. Crown asymmetry can be expressed by the **crown-vector**. Within a dense high pole never thinned stand a considerable diversity with regard to magnitude and direction of crown vectors can be observed. This is the result of the intra-specific competition during many years, amplified by the slope and/or the aspect. The crown-vector predetermines mostly the **natural bending direction** and finally the **damage direction** (plastification, breakage or uprooting) of a tree under the snow load, accumulated on its crown. The crown-vector predetermines also **with which neighbor tree and in what way the studied tree could enter in mechanical interactions**.

The present study offers an outline of a **theory of collective stability and resistance and collective disintegration** in stands under static wet snow load. **Two types of mechanical interactions** between trees have been identified – **static interactions (pressure)** and **dynamic interactions (shocks)**. In a dense stand, **two types of static interactions** have been identified between two direct neighboring trees – **1) mutual bilateral support** and **2) unilateral support/ unilateral pressure**. Given the small distances between the stem bases these interactions happen in the **elastic range** of deformation up to high loads during the stem bending. A mechanical model has been created, describing the mechanical system of two stems in mutual support. The model suggests that the buckling load **for each element in the system** increases several times in comparison to the buckling load of the same element considered individually (ratio between its collective stability and its individual stability). **The**

theoretical maximum increase is estimated to be about 8 times. In reality, both trees in the system bend, thus leading again to a resistance problem. It is supposed that the increase of the resistance in the support system should be in the same range as with regards to the stability (ratio of collective resistance to individual resistance similar to ratio of collective stability to individual stability). Increases in the same range could be expected also in an unilateral support model, with regard to the supported tree. **Under natural conditions, more than two trees in a dense stand are able to interact statically. Complex mechanical systems of mixed type (bilateral and unilateral) should be built in result.** The modeling, stability and resistance computation of each structural element are very difficult problems.

By approaching the limits of the bearing capacity of the most stable (the most resistant) elements or subsystems of a complex system with many trees in static interactions (mostly of the unilateral type) a **collective disintegration of the entire stand parts can be observed (surface damages)**. This phenomenon is called **static domino effect**. According to the reference in the literature, the static domino effect concerns young stands (mostly thickets).

If the distances between neighboring trees are big enough (in the study case **up to 4 to 6m**) individual plastic deformation, followed by breakage or uprooting is possible. In case where falling trees come into mechanical contact with a neighbor tree, **the observed interaction already has a dynamic nature**. Larger distances between trees are inevitable consequences of human activities in forests (thinning).

The role of thinning with regard to the tree and stand stability has been assessed till now as positive in mid term period. Nevertheless, each thinning leads to a short term destabilization (especially after late thinning), even when only individually unstable trees had been removed. The present study identifies **two negative aspects of the thinning**:

1. **Deactivation of the natural support interactions.** This could lead to **local destabilization** of trees under wet snow load. The endangered trees are located at the border of the space liberated by the crown of the removed tree and have the natural tendency to bend in this direction. Additionally, static interactions within the plastic range of deformation and development of static domino effects are possible.
2. **Outbreak of dynamic interactions** between trees. Thinning could lead to **spatial distribution of the remaining trees which is favorable** on the one hand **for arising of initial shocks** from individually damaged trees (**initiator trees**) over neighbor trees located in the field and their falling and on the other hand, for the **transmissions of shocks over other trees**. These dynamic shocks combined with the static snow load are characterized by enormous destructive force. The transmission of shocks in a chain of dynamic interactions often leads to formation of a **domino effect chain** of damaged trees. The phenomenon is called **dynamic domino effect**.

The dynamic domino effect (or dynamic interactions) has been identified as the **main factor which determines the percentage of damage**. Logically, **damage could be controlled by restraining the beginning of the development of dynamic domino effect chains and/or by restraining their further development**.

Two main approaches have been proposed in order to **minimize risks** of destabilization after late thinning:

1. **Concentration of the interventions only around the selected crop trees.** They should focus only on the removal of their biggest competitors. Stand parties between crop trees should remain unmanaged (keeping this way the support interactions active). The principles of selective thinning per definition don't allow the destabilization of the crop tree by removing its biggest competitors, because the latter are always located on its less developed crown side and in this direction the crop tree

is not liable to bend under the wet snow load. In order to identify and avoid destabilizations, at the moment of marking the forester should include in his analysis all the trees located on the border of the liberated space from each removed tree.

2. **Thinning with very high intensity.** The concept is to favor on the one hand the most stable and resistant individuals by removing all potentially endangered by individual destabilization trees and on the other hand **decrease the probability of shocks transmission due to the big free areas and thus stopping the development of the dynamic domino effect chains.**

However, the second approach may increase the risk of windthrow. For that reason the first approach is recommended. **Intermediate spatial distribution stages of the remaining trees should be avoided in any case.** Such stages result from thinning with moderate intensity and appear to be very liable to the development of dynamic domino effects.

Methods and study object

- Crown orthogonal projections are measured on 3D stereo models from terrestrial images
- Individual resistance and individual stability are studied by simulation of wet snow load with vertical eccentric load applied to standing trees. The elastic line in each state of static equilibrium is modeled photogrammetrically. The targets points accuracy is in the range of 0.5-2.0 cm in the horizontal plane. The obtained values about the Young modulus are verified by bending tests under hydraulic press with logs taken from the same standing trees.
- Collective stability and resistance are studied by simulation of the static interactions (bilateral and unilateral) between two standing neighbor trees
- Static and the dynamic domino effects are described and studied by surveys and reconstruction procedures after wet snow damage.
- Thinning effect is assessed with damages which took place after late thinning in a dense recently thinned high pole Scots pine stand. The study object represents 6 variants of selective thinning (each plot 0.5 ha) according to two parameters– number of crop trees and degree of their liberation (ratio of number of removed competitors to crop trees). The results show that 77% of the damaged trees thinning was directly or indirectly responsible for the damage.

The h/d ratio doesn't take into account neither the effects of static interactions, nor the effects of dynamic interactions. For these reasons (and some others which are already known) this ratio **can be assessed as unsuitable as individual trees or whole stands stability and resistance estimation index and also as risk estimation index against wet snow damages.**

From the point of view of the long term forest management strategies the acquired knowledge about collective stability and resistance shows that no tending measures and considerable **thinning delay should not anymore be considered as a hindrance to achieve production goals.** The results of the present study suggest that **collective stability and collective resistance represent the natural mechanism of mutual protection against wet snow.** Evidence shows that mechanism functions efficiently till the mature age of a stand. Therefore the main problem related to the management strategies should be reformulated from “**when to start the interventions**“ to “**how to practice the interventions**“. **Stability concerns should not anymore be considered as an absolute hindrance for the implementation of concept for minimum cultural measures or delayed thinning.**

Резюме

ИНДИВИДУАЛНА И КОЛЕКТИВНА УСТОЙЧИВОСТ И ЯКОСТ И ЯВЛЕНИЯ НА КОЛЕКТИВЕН РАЗПАД В БЯЛБОРОВИ (PINUS SYLVESTRIS L.) НАСАЖДЕНИЯ ПОД ТОВАР ОТ МОКЪР СНЯГ. Оценка и управление на риска. Последствия при провеждането на закъснели прореждания

Целта на настоящото изследване е да се намери подходящ начин за провеждане на късните отгледни мероприятия (т.е. възможно най-малко травматични непосредствено след прореждането) в досега нестопанисвани бялборови насаждения, в напреднал етап от тяхното развитие (върлиняк), с оглед осигуряване на физическото им оцеляване срещу мокър сняг.

Устойчивостта на мокър сняг на едно насаждение се оценява през последните десетилетия изключително въз основа на индивидуалната устойчивост на дърветата. Като индекс се използва коефициентът h/d , в съчетание с разпределението на дърветата по класове на h/d . Съгласно този индекс, едно неотглеждано средновъзрастно насаждение (бб, см) винаги се определя като неустойчиво и изложено на риск от повреди от мокър сняг. Вместо обаче последиците от мокрия сняг в такива насаждения да се разглеждат като повреди, те би трябвало да бъдат класифицирани като **форма на естествения отпад** или като **естествено низово прореждане**. Терминът „повреда“ трябва да бъде използван само по отношение на избрани дървета, които се предполага че ще съставят насаждението в зряла възраст.

Обикновено индивидуалните носителни способности на едно дърво се изразяват в механичните модели чрез устойчивостта на изкълчване на едностранно (кораво или еластично) запънат прът, подложен на центричен натиск. Критичната сила е функция на формата и материалните характеристики (модул E) на този прът и на запъването му. Приемането на центричността на натиска и абсолютната вертикалност на стъблото предопределя произволна посока на изкълчване при достигане на критичната сила. На практика обаче натискът от теглото на снега е в една или друга степен ексцентричен, поради асиметрия на короната и/или наклонено стъбло. Следователно се наблюдава **винаги огъване, т.е. става въпрос за якостен проблем**. Поради вида на товара (успореден на оста) и размера на деформациите (от порядъка на няколко m) изискват прилагането на Теорията за деформациите от втори порядък, защото деформациите не са правопрпорционални на натоварването и има влияние на **ускорителния ефект**. Първоначалното рамо, водещо до ексцентрицитет на натиска, зависи преди всичко от асиметрията на короната, която от своя страна може да бъде изразена с **вектора на асиметрията**. В средновъзрастни гъсти неотглеждани насаждения, в резултат на дългогодишната вътревидова конкуренция и влиянието на наклон и/или изложение на склона, се констатира голямо разнообразие в големината и посоката на вектора на асиметрията. Векторът на асиметрията предопределя в огромна степен **естествената посока на огъване** на едно дърво под натоварването от натрупания в короната сняг и в крайна сметка **посоката на повредата**, която може да възникне (пластифициране, счупване или изкореняване). Векторът на асиметрията предопределя и **с кой съсед и по какъв начин дадено дърво ще взаимодейства механически**.

Изследването доведе до съставянето на **първоначален вариант на теория за колективната устойчивост и резистентност и колективното разпадане на едно насаждение** под статичното тегло на мокрия сняг. Обособени са **два вида механични**

взаимодействия между дърветата – **статични (натиск)** и **динамични (удар)**. В гъстото неотглеждано насаждение между две дървета, непосредствени съседи, се идентифицират **два основни типа на статични взаимодействия** **1) взаимно подпирание** и **2) едностранен натиск/едностранно подпирание**. Поради малките разстояния между дърветата, тези взаимодействия до големи натоварвания се осъществяват при деформации само **в еластичната област на огъване** на стъблата. Изработеният и представен механичен модел на системата от две взаимно подпирани се стъбла показва, че критичната сила на изкълчване, която може да понесе всеки един елемент от системата може да се увеличи няколкократно **спрямо всеки един елемент** (неговата SC отнесена към неговата SI). **Теоретичната горна граница е около 8-кратно увеличение**. В действителност дърветата се огъват и в изградените системи, поради което отново трябва да се разглежда и тяхната резистентност. Предполага се, че нарастването на резистентността е в същия порядък (RC спрямо RI, както SC спрямо SI). Увеличения от същия порядък при устойчивостта и резистентността се очаква да има и при едностранния модел, по отношение на подпряното дърво. В едно гъсто насаждение **реално повече от две дървета са в състояние да взаимодействат статично**. В съответните комплексни механични системи от смесен тип (двустранни и едностранни) моделирането и изчислението на устойчивостта и резистентността на всеки един съставен елемент са твърде сложни задачи.

Когато се достигне горната граница на носимост на най-устойчивите дървета или подсистеми в една комплексна система от няколко статично взаимодействащи си дървета (предимно от едностранния тип), настъпва **колективно разрушаване на цели части от гъстото насаждение (площни повреди)**. Явлението е наречено **статичен домино ефект**. По литературни данни то засяга предимно млади насаждения (младиняци и ниски върлиняци).

Достатъчно големи разстояния (в изследвания случай **над 4-6m**) между съседни дървета позволяват тяхното индивидуално деформиране в пластичната област, завършващо с пречупване или изкореняване. В случай на механичен контакт със съседно дърво, упражненото натоварване има вече динамичен характер. Увеличаването на разстоянията между дърветата е пряко последствие от човешката дейност (прорежданията).

По отношение на устойчивостта и резистентността, **ролята на прорежданията** се разглежда досега като стабилизационна в средносрочен период. При всяко прореждане обаче се наблюдава пост-дестабилизационен ефект в краткосрочен период (особено силен при късните прореждания), дори когато се изваждат само индивидуално нестабилни дървета. В настоящото изследване се идентифицират **два негативни аспекта на сечта:**

1. **Деактивиране на естествените опорни връзки**. Това може да доведе до **локално дестабилизиране** под теглото на мокрия сняг на дървета, разположени по крайнината на пространството, освободено от короната на отсеченото дърво, и имащи естествена посока на огъване към него. Създава се възможност за взаимодействия между дърветата в пластичната област на деформация, както и за развитие на статични домино ефекти.
2. **Възникване на динамични взаимодействия** между дърветата. Прореждането може да създаде **определено пространствено разпределение на оставащите дървета**, което да благоприятства както нанасянето на първоначални динамични удари от индивидуално повредени дървета (дървета-инициатори) върху техните съседи, разположени в обхвата им на падане, така и тяхното предаване на

следващи дървета. Динамичните удари, комбинирани със статично натоварване от снега, се характеризират с голяма разрушителна сила. Предаването на динамичните удари на други дървета в една поредица от динамични взаимоотношения водят до образуване на **домино-верига** от повредени дървета. Явлението е наречено **динамичен домино ефект**.

Динамичният домино ефект (респективно динамичните взаимодействия) е идентифициран като основния фактор, от който зависи % на повредите. **Размерът на повредите може да бъде контролиран чрез ограничаване иницирането и/или развитието на домино-веригите (ако вече са възникнали).**

Предлагат се два подхода за минимизиране на рисковете от последваща **дестабилизация** при осъществяване на първите късни прореждания:

1. **Точковата намеса около избраните дървета на бъдещето.** При нея се отстраняват само директните им конкуренти, а пространствата между дърветата на бъдещето се оставят непрореждани, т.е. с активирани опорни взаимодействия. Принципите на **селективното прореждане** по дефиниция изключват дестабилизацията на избраното дърво на бъдещето при отсичането на най-големите му конкуренти, които се намират откъм най-слабо развитата част на короната, към която дървото няма афинитет да се накланя под товара на мокрия сняг. В анализа по време на маркирането трябва да се включват обаче и всички останали дървета около освободеното от всяко отсечено дърво пространство, с цел идентифициране и избягване на дестабилизации в тази зона.
2. **Прореждане с (много) висока интензивност.** От една страна се оставят основно индивидуално устойчивите и резистентни дървета от насаждението и се отстраняват по възможност всички потенциално застрашени от индивидуално дестабилизирани дървета, а от друга страна се намалява вероятността от предаване на динамични удари, поради оставените големи свободни пространства в насаждението, които спират развитието на динамични домино-вериги.

Предполага се, че вторият начин би създавал опасност от повреди от вятър и затова се препоръчва първият. При всички случаи трябва да се **избягват междинните състояния на пространствено разпределение на оставашите дървета**, плод на повсеместни прореждания с умерена интензивност, които се оказват най-уязвими на мокрия сняг, респективно благоприятстващи в най-голяма степен развитието на динамичен домино ефект.

Методи и обект на изследване

- Ортогоналните проекции на короните са измервани по 3Д стереомодели от наземни снимки
- Индивидуалната устойчивост и резистентност са изследвани чрез симулиране на натоварване от мокър сняг с прилагане на вертикален асиметричен товар на стоящи дървета. Еластичната линия във всяко статично равновесно положение е възстановена по фотограметричен път, с точност на обектните точки от порядъка на 0.5-2 cm в хоризонтална равнина. Резултатите за модула E са верифицирани чрез огъване под хидравлична преса на стъблени секции от същите дървета.
- Колективната устойчивост и резистентност са изследвани чрез симулиране на статични взаимодействия от двата типа (едностранни и двустранни) между две съседни стоящи дървета.
- Статичен и динамичен домино ефект са описани и изследвани по възстановки след повреди от мокър сняг.
- Ефектът на сечта е оценен по настъпили повреди след първо прореждане в бялборова средновъзрастна неотглеждана култура. Заложеният опит представлява варианти (всеки с площ от 0.5 ha) на селективно прореждане в зависимост от два параметъра – брой дървета на бъдещето и степен на освобождаване (отношение на броя отсечени конкуренти към броя на дърветата на бъдещето). Анализът на резултатите показва, че в 77% от случаите сечта е била пряка или косвена причина за наблюдаваната повреда.

Коефициентът h/d не отчита нито влиянието на статичните, нито влиянието на динамичните взаимодействия. Поради тези причини (в допълнение към вече известни причини), той не е подходящ нито като индекс за оценка на устойчивостта на насаждения и на отделни дървета, нито като индекс за оценка на риска от повреди от мокър сняг.

От гледна точка на дългосрочните стратегии за стопанисване на насажденията, новите познания за колективната устойчивост и резистентност показват, че **отлагането на отгледните мероприятия (отказ от прочистки, дълго отлагане на прорежданията) не ограничава постигането на целите на производство.** Резултатите сочат, че **SRC може да се възприема като естествен механизъм за противопоставяне на насаждението на мокрия сняг**, който може да работи ефективно през целия му живот. Следователно въпросът, който се поставя в стратегиите на стопанисване, не трябва да бъде „кога” да се проведе първото мероприятие, а „как” да се проведе. **Аспектът на устойчивостта повече не представлява непреодолима преграда за реализирането на концепциите за късно отглеждане на горите.**

Abréviations fréquentes et définitions

Signe	Dimensions	Description
$d_{1,3}$ (dhp)	[cm]	Diamètre à hauteur de poitrine
h	[m]	Hauteur totale de l'arbre
hbh	[m]	Hauteur à la base du houppier
hlh	[m]	Hauteur à la plus grande largeur du houppier
POH	-	Projection orthogonale du houppier
SPOH	[m ²]	Surface de la projection orthogonale du houppier
PE	[m]	Profondeur d'encastrement, à partir du niveau du terrain
DNF	[°]	Direction naturelle de fléchissement (d'un arbre sous la charge de neige)
DAH	[°]	Direction de l'asymétrie du houppier (estimation visuelle)
DFS	[°]	Direction du fléchissement simulé : lors des essais de simulations de la charge de neige lourde chez des tiges sur pied
-	[°]	Direction du dégât : exprime la direction, dans laquelle l'arbre a subi un dégât par rapport à la base de sa tige. Syn. direction de chute (falling direction , en anglais)
VA	[°] et [m]	Vecteur d'asymétrie du houppier (cf. p.43)
position	-	Chaque état d'équilibre statique correspondant à une combinaison unique de charge appliquée, direction de fléchissement simulé et conditions d'interactions avec un voisin (cf. p.88)
position initiale	-	La position naturelle d'un arbre dans l'état naturel non-chargé (cf. p.88)
position zéro	-	Position virtuelle dans l'espace 3-dimensionnel d'une tige qu'elle aurait si son houppier était enlevé et si elle n'avait pas de poids propre (cf. p. 94)
$C_{g_{houpp+neige}}$	coordonnées 3D	Centre de gravité de l'ensemble du houppier et de la neige accumulée
$C_{g_{houpp}}$	coordonnées 3D	Centre de gravité du houppier (sans neige)
SRI (SI, RI)		Stabilité et résistance individuelles (stabilité individuelle, résistance individuelle) (cf. p. 78)
SRC (SC, RC)		Stabilité et résistance collectives (stabilité collective, résistance collective) (cf. p. 78)
EDD		Effet domino dynamique (cf. p.157)
EDS		Effet domino statique (cf. p.157)

genres de dégâts : 1) plastification ; 2) bris ; 3) déracinement

modes d'apparition des dégâts : 1) neige ; 2) neige + pression statique; 3) neige + coup dynamique

genres d'interactions mécaniques entre les arbres : 1) statiques ; 2) dynamiques

types d'interactions statiques : 1) bilatérales 2) unilatérales : 2a - cas support bilatéral ; 2b - cas support unilatéral/pression unilatérale

types d'effet domino : 1) statique ; 2) dynamique

1 Introduction

„...das Thema Schneebruch und Schneebruchschaden ist kein Thema mehr für die Forschung, sondern eine Herausforderung für den Praktiker, Waldbaurichtlinien konsequenter zu beachten.“

Peter Abetz (1989)

1.1. Les éclaircies tardives dans le contexte des nouveaux concepts d'éducation

Lors des dernières deux décennies les conditions cadres déterminant le développement du secteur forestier dans les pays de l'Europe occidentale et centrale sont devenues de plus en plus défavorables à cause du rapport toujours croissant entre les coûts de la main d'œuvre et le prix du bois. Du point de vue sylvicole, dans les forêts à alternance de générations, la règle d'or culturelle dicte de „commencer les interventions tôt, les pratiquer fréquemment et avec modération“, mais de point de vue économique, elles représentent des investissements considérables à très long terme, avec un résultat financier faible, voire négatif (Beck, 2000). Dans le désir de trouver une solution de compromis, une partie des recherches scientifiques se concentrent de nos jours sur l'élaboration de nouveaux concepts d'éducation des forêts (Ammann, 1997, 1999, 2004). Le leitmotiv devient les rationalisations de nature biologique (Schütz, 1999), qui cherchent à modifier les approches sylvicoles et méthodes de traitement classiques. L'idée repose sur les principes de concentration et d'utilisation des automatismes naturels et consiste dans la minimisation des efforts pour atteindre les buts posés en comptant largement sur ce que la nature fait gratuitement elle-même et en appliquant à la rigueur des mesures de correction.

Selon Ammann (1999) les nouveaux concepts, pour des peuplements d'épicéas, auront comme effets négatifs:

- une stabilité inférieure, exprimée par un degré d'élancement des tiges, respectivement un danger de dégâts de neige lourde élevé ;
- une densité élevée posant des problèmes à l'abattage des arbres lors de la première intervention ;
- une augmentation de la durée de production pour atteindre le but de production (un diamètre donné)

et comme effets positifs :

- peu de coûts pour l'éducation (pour des soins aux stades de fourrés et perchis) jusqu'à la première intervention ;
- pas de dégâts d'exploitation dus aux interventions en jeunesse (p.ex. pourritures)
- une qualité meilleure du bois produit (cernes annuels étroits, tiges à fût soutenu)

Ces conclusions valent également dans le cas des perchis non-traités de pin sylvestre. Les peuplements de cette essence sont réputés pour leur vulnérabilité aux neiges lourdes. Les risques de déstabilisation après la première intervention (éclaircie tardive ou éclaircie de rattrapage) nécessitent une étude approfondie.

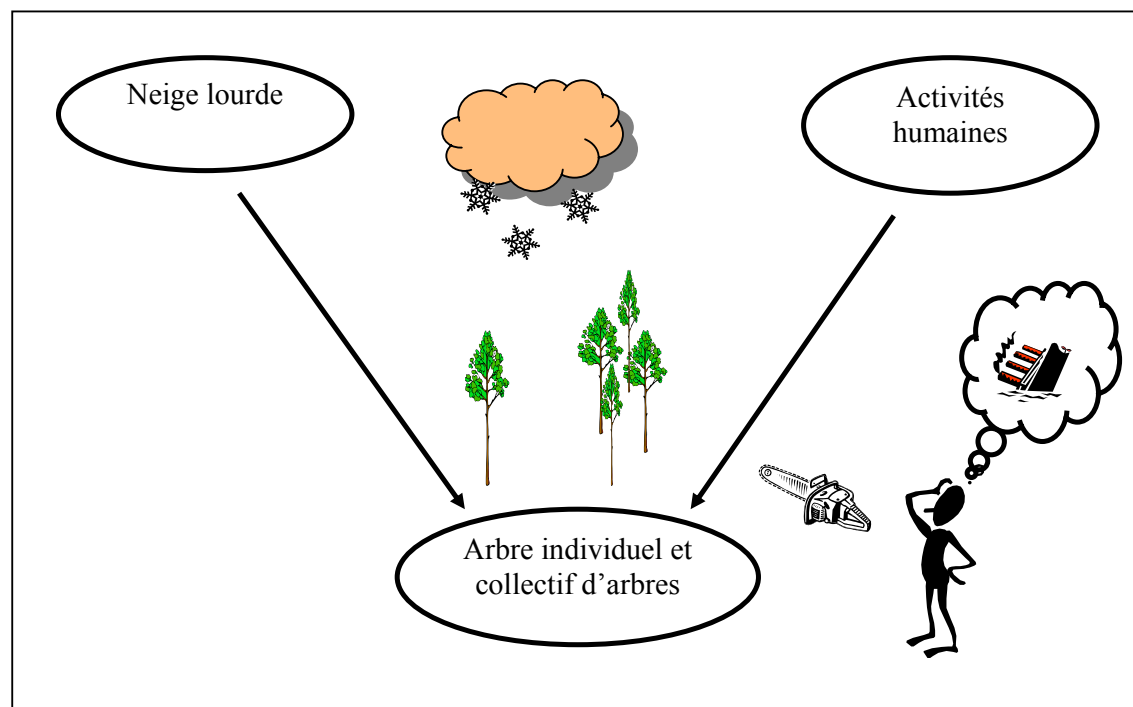
1.2. Pertinence du thème pour la foresterie bulgare

Le pin sylvestre occupe en Bulgarie une part importante - il représente 27% de la surface boisée (Kostov&Nédelin, 1996). Près d'un tiers des 3.6 millions d'ha de forêts du pays sont

des plantations de conifères, surtout de pin sylvestre et de pin noir, créées dans les années 1950-1980, en quelque sorte „la période d’or des afforestation” de la foresterie bulgare, dans le but d’augmenter la productivité des forêts (Mihov, 1983). Ces plantations sont créées le plus souvent avec des plants d’origine inconnue et à des espacements très serrés. Ce sont aujourd’hui des perchis d’âge entre 30 et 50 ans, restés en grande partie non-traités pour différentes raisons - manque de rentabilité des interventions jusqu’ici, faible accessibilité des peuplements, mauvaise organisation du travail et manque de techniques d’exploitation appropriées. L’existence de telles plantations dans un tel état cultural diverge grandement des normes de gestion du Service Forestier National (SNF) de Bulgarie. Le SNF se voit confronté à une réalité qui en effet ne devrait pas exister selon ses propres concepts (en vigueur depuis plus d’un demi-siècle) d’éducation classique par des interventions régulières dès la création du peuplement. Dans le document normatif du SNF (Soubev et al., 1997), résumant tous les concepts de gestion des forêts, on ne trouve aucune mention sur la gestion des plantations non-traitées.

2 Objectifs

L’**objectif principal** du travail de recherche est de trouver une façon adéquate de pratiquer les interventions tardives (c.à.d. la moins traumatique possible immédiatement après l’éclaircie) dans des peuplements de pin sylvestre non-traités jusqu’alors, à un état avancé de leur développement (stade de perchis), en vue d’assurer leur survie physique vis-à-vis de la neige lourde.



Conformément à cet objectif, se posent les **questions** suivantes:

- Comment expliquer la vulnérabilité des peuplements après une intervention et surtout après une éclaircie tardive? Qu’est-ce qui provoque la déstabilisation d’arbres individuels et/ou la désintégration de parties entières d’un peuplement lors du passage de l’état dense à l’état libéré? Est-ce qu’il convient de parler de stabilité ou de résistance?
 - La stabilité individuelle (la résistance individuelle) est-elle une fonction linéaire des paramètres dendrométriques des arbres (hauteur, $d_{1.3}$) ?

- Comment définir la stabilité collective (la résistance collective), décrire son mécanisme et estimer son importance?
- Est-ce que l'éclaircie sélective est un outil adéquat et conforme au but de garantir la stabilité (la résistance) mécanique ?
- Comment définir les limites à l'intervention – en termes de force de l'éclaircie, nombre d'arbres d'élite et degré de leur libération ou autrement ?
- Quelles sont les conséquences des interventions tardives adaptées du point de vue de la stabilité (de la résistance) mécanique sur les stratégies de gestion du risque de dégâts de neige lourde et sur les stratégies de gestion forestière?

3 Etat des connaissances

3.1 Dégâts de neige lourde

3.1.1 Genres de dégâts

Dans les jeunes peuplements au stade du recrû et du fourré, les plantes peuvent être entièrement couvertes ou en partie enveloppées par une couche de neige. Sous certaines conditions (peuplements sis en forte pente) la couche de neige peut commencer à glisser sur le terrain, à ramper et à entraîner avec elles les arbres enveloppés en les pliant, cassant ou déracinant. Ce genre de dégâts est connu sous le nom de „dégât de répartition des neiges ou de pression de la neige“¹(Magahan&Steel, 1987; Kato, 1988; Nakatani, 1991). Il s’agit d’une pression parallèle à la pente due à la masse neigeuse en mouvement. Les arbres ayant survécu à un tel phénomène se reconnaissent plus tard par les courbures caractéristiques à la base de leurs tiges. Ce genre de dégât ne fera pas l’objet de la présente étude.

Après la fermeture du couvert et l’atteinte d’une certaine hauteur par les arbres, la neige peut s’accumuler surtout sur les houppiers et même si elle les enveloppe en une couche uniforme, cette couche n’a plus de contact avec le sol. Les dégâts qui peuvent en résulter sont de trois genres principaux (Tab. 1):

Français	Deutsch	English	Български
fléchissement ² (plastification)	Stammbiegung, Hänger, Schneedruck	bending	огъване
bris de neige	Schneebruch	snow break(age)	снеголом
bris de tige	Stammbruch	stem breakage	пречупване на стъблата
bris de houppier	Kronenbruch	canopy damage	пречупване на короната
déracinement	Entwurzlung	uprooting	изкореняване, снеговал

Tab. 1. Principaux genres de dégâts de neige

Les bris peuvent concerner des branches isolées ou la cime du houppier. Si tout le houppier subit une cassure, l’arbre endommagé n’a aucune chance de rester en vie (Nykänen et al., 1997). Selon Nykänen et al. (1997), le genre de dégâts de neige le plus fréquent est le bris de tige. La cassure se produit très souvent juste en dessous de la base du houppier (Bühler, 1886; Anonymus&Keller, 1887; Cremer et al., 1983; Rottmann, 1985). Avec l’âge, l’emplacement des cassures se déplace vers le haut de l’arbre pour se trouver finalement à l’intérieur du houppier (Haakh, 1940, in Rottmann, 1985; Schütz, 1990). Les mêmes genres de dégâts, à l’exception du fléchissement, sont constatés après un ouragan (Bazzigher et Schmid, 1967, in Schütz, 1990 ; Smith et al, 1987). Les dégâts du vent, à la différence des dégâts de neige, affectent surtout des peuplements adultes (Schütz, 1990).

Dans ce travail de recherche, sous „dégât“ au sens physique du terme on va comprendre **tout changement durable, suite à une accumulation de neige lourde, du statut mécanique d’un arbre par rapport à son état avant la chute de la neige.**

¹ snow pressure (Magahan&Steel, 1987; Kato, 1988) ou snowpack damage (Magahan&Steel, 1987) (angl.)

² il s’agit d’une déformation permanente, due au dépassement de la limite d’élasticité

3.1.2 Forme et dimensions spatiales des dégâts

Les dégâts peuvent affecter des arbres isolés ou plusieurs arbres sur une même surface. Les **dégâts par surfaces**³ semblent être limités à une période de la vie des peuplements seulement, surtout en jeunesse. Avec l'âge surtout des arbres isolés sont touchés (Huss, 1983, Schütz, 1990). Selon Spellmann et al. (1984), dans une grande revue des dégâts de neige lourde dans des peuplements endommagés de pin sylvestre, „Sowohl im Spessart, als auch im Steigerwald traten Flächenschäden nur in Stangenhölzern mit Bestandesmittelhöhen zwischen 8 und 10 m auf“. Les mêmes conclusions sont faites aussi par Petri (1976), pour des hauteurs dominantes entre 6 et 13 mètres, ce qui correspond à hauteurs moyennes entre 9 et 10m (Spellmann et al., 1984). Les informations dans la littérature concernant la répartition par surfaces exacte des dégâts de neige manquent généralement. Selon Petri (1976), les dégâts enregistrés dans les jeunes peuplements de pin sylvestre (jusqu'à 25 ans), issus de plantations de densités extrêmes (20 000 à 30 000 semis/ha) apparaissent dans 27% des cas en touffes (moins de 2 ares), dans 12% en petits groupes (2-6 ares), dans 21% en grands groupes (0.07 ha jusqu'à 0.25 ha) et dans 40% en bouquets (0.25-0.50ha). Il n'y a malheureusement pas d'indications supplémentaires sur l'état cultural de ces peuplements (traités ou non-traités). On peut toutefois retenir cette information de l'indication de Petri que seuls 31% des peuplements endommagés étaient „denses fermés“, le reste étant apparemment traités. Ainsi on peut conclure que dans le pire des cas possibles au moins un tiers des dégâts les plus graves (par bouquets) n'ont pas eu lieu dans les peuplements denses fermés. Ammann (2004) dans son étude de peuplements non-traités (l'objet de sa thèse) indique que parmi les centaines de peuplements visités il n'y en avait qu'un seul qui ait été anéanti (dégât total) par la neige lourde et 3 autres qui témoignaient de dégâts antérieurs par touffes de quelques ares sans conséquences majeures. L'étendue spatiale des dégâts dépend de la densité initiale de plantations de pin sylvestre – avec des espacements étroits les dégâts apparaissent par groupes et par surfaces, alors que avec espacements plus larges ils sont individuels (Burschel&Huss, 1997).

3.1.3 Genres et répartition des dégâts à l'échelle d'un peuplement

A l'échelle d'un peuplement, la neige lourde affecte surtout les arbres de faibles dimensions et de position sociale inférieure (les dominés et les surcimés). De nombreuses répartitions par catégories de diamètres des proportions des arbres endommagés confirment cette tendance (Merkel, 1975; Kramer&Bjerg, 1978, in Marsch, 1989; Kramer, 1980; Johann, 1980&1981; Cremer et al., 1983 ; Río et al., 1997; Huss, 1998 - verglas; Hase, 2001, in Ammann, 2004). Les arbres les plus frêles sont normalement plastifiés, les plus forts sont surtout cassés (Abetz&Prange, 1976; Cremer et al., 1983) ou déracinés.

3.1.4 Répartition altitudinale et géographique des dégâts

Les observations des dégâts de longue durée dans les peuplements à l'échelle européenne montrent une concentration dans certaines zones altitudinales, qui s'explique en grande partie par la latitude ($R^2=0.81$) ou par les différences entre les climats océanique et continental (Tab. 2 et Fig. 1).

³ patch damages (en anglais); Nesterschäden (en allemand)

Pays	Région géographique	N (°)	Zone de chute de neige lourde	Source
Finlande	Golf de Finlande	60	100-300	Suominen (1963)
Belgique	Marche-en-Famenne	50.5	200-400	Duterme (1965)
Allemagne	Mittelgebirge Vorderrhön	47-52 50	300-900 300-550	Spellmann et al. (1984) Brandt (1981)
Pologne	Ostschlesischen Beskiden	51	(300)-500-900-(1200)	Rosenfeld (1944)
France	Haute Ardenne	49.5	500-700	S., C.L. (1951)
Tchéquie, Slovaquie	toute la surface	50	500-800	Pařez (1972), in Slodičák (1995)
Suisse	Plateau	46	500-800	Schütz (1990)
Espagne	Pyrénées Sistema Central	42.5 41	900-1200 1700-1800	Montero (2003, comm. pers.) Río et al. (1997)
Bulgarie	Mer Noire, littoral Strandja région de Godetch Rhodopes	42.5 41.5	0-200 300-700 (*) <600-1200 1000-1500 1350	Ivan Ianev (comm. pers.) Kostov (1971) Ivanov (observation personnelle) Vlassev&Dobrinov (1956) Milev&Iliev (2003)
Roumanie	Maramureș (Vișeu, Baia Mare)	47.5	800-1100	Haring&Iuga (1970)

Tab. 2 Zones d'apparition de dégâts de neige lourde et de verglas (*) à l'échelle européenne

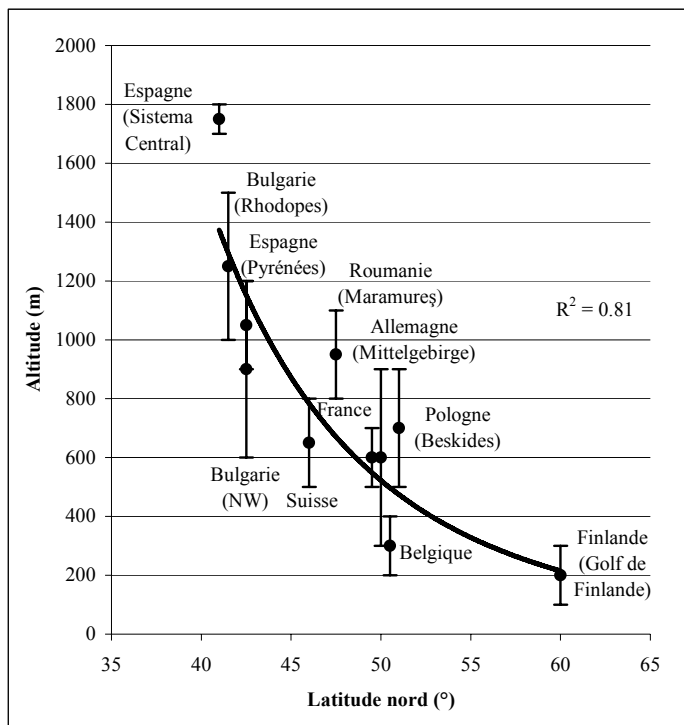


Fig. 1 Zones d'apparition de dégâts de neige lourde à l'échelle européenne

Les courbes de régression sont faites par rapport aux centres des zones. Plus on va au sud, plus la zone de chute de neige lourde s'élève en altitude, allant de 100 mètre près de la côte du Golf de Finlande jusqu'à presque 2000 mètres dans les montagnes en Espagne centrale et en Bulgarie du sud. La proximité de la mer ou de l'océan favorise les accumulations plus

fréquentes de quantités extrêmes de neige lourde à cause de l'humidité élevée de l'air (p.ex. les régions côtières de la Finlande et de la Bulgarie). Le climat continental explique vraisemblablement la plus grande altitude des zones de concentration des dégâts de neige lourde (Roumanie, Pologne) par rapport aux autres pays de même latitude.

La zone de chute de neige lourde en Bulgarie n'est pas la même pour tout le pays. Etant donnée les variations du relief et du climat (entre continental tempéré typique au nord jusqu'à continental-méditerranéen au sud et à l'est (Velev, 2004 ; in Knight et al., 2004)), la zone monte sensiblement dans les montagnes situées au sud. Le littoral de la mer Noire représente un cas à part.

Des dégâts de neige lourde sur la flore ligneuse et surtout chez une grande partie des espèces du genre *Pinus* sont enregistrés partout au monde dans les régions tempérées de l'hémisphère nord (Etats-Unis, Canada, Russie, Japon) et de l'hémisphère sud (Australie⁴, Nouvelle Zélande). Dans son aire de répartition (37°N-70°N/8°W-141°E, Boratynski, 1991, in Mason&Alía, 2000) le pin sylvestre est affecté pratiquement partout.

3.1.5 Aspects des dégâts à grande échelle

La littérature déborde de données sur la quantité des dégâts de neige lourde à l'échelle locale (une entreprise forestière), régionale, nationale ou continentale. On ne va citer que quelques chiffres récents. Montero et al. (1997, in Río et al., 1997) estiment les pertes en janvier 1996 dans **Sistema Central (Espagne)** à 200 000 m³, ce qui représente plus de 400 000 arbres de diamètres supérieurs à 20 cm et plus de 1 million d'arbres de diamètres inférieur à 20 cm. Les dégâts de verglas en décembre 1996 en **Rhénanie-Palatinat** et **Bade-Wurtemberg** sont estimés à plus de 200 000m³ (Huss, 1998). En **Suède**, environs 4 millions de m³ de bois sont estimés avoir été endommagé par année par le vent et la neige (Valinger&Fridman, 1997). A l'échelle de l'**Union européenne**, la totalité des dégâts de neige lourde est estimée à 4 millions de m³ par an (Nykänen et al., 1997).

Il y a dans la littérature très peu de références sur la proportion de la surface forestière endommagée. Selon Petri (1976), pour la région étudiée, 0.77% de la surface totale des jeunes peuplements (<25ans) a été détruite par la neige (dégâts par surfaces). A l'échelle d'une entreprise forestière soviétique (Leshoz), Kovtunov (1963) constate que plus de 50% du volume sur pied a été endommagé dans seulement 3.8% de la surface totale des peuplements, d'autre part 84% de la surface forestière a subi moins de 15% de pertes du volume.

3.2 Dégâts d'autres formes de précipitations

A part la neige, les précipitations peuvent s'accumuler sur les arbres sous d'autres formes telles que verglas, givre, giboulée ou sous différentes combinaisons entre elles. Les dégâts de verglas sont très fréquents aux Etats-Unis (Bragg et al., 2003) et en peu moins en Europe, si on compare le nombre de publications. Le verglas affecte aux Etats-Unis plusieurs essences feuillues et résineuses dont plusieurs espèces du genre *Pinus* (p.ex. *P. ponderosa*, *P. taeda*, *P. elliottii*, *P. palustris*, *P. banksiana*). Le verglas, comme la neige, s'accumule sur la cime et sur les extrémités des branches des conifères (Miller, 1964). Le paquet de glace déposé par la pluie verglaçante crée une charge comparable à la charge de la neige lourde et cause par conséquent les mêmes genres de dégâts (Schmidt-Vogt, 1989, in Huss 1998). Les dégâts de verglas peuvent donc être étudiés ensemble avec les dégâts de neige, dans la mesure où la nature de la charge reste la même (charge verticale centrique ou excentrée, cf. Fig. 5, p.39). Toutefois, il apparaît qu'à la différence de la neige lourde, la pluie verglaçante est assez

⁴ au bord de la région tempérée, SE Australie (Canberra) (Cremer et al., 1983)

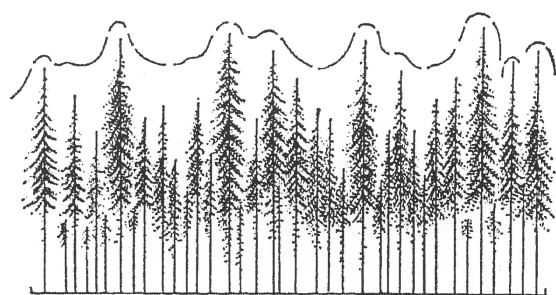
souvent accompagnée de vent (cf. Goebel&Deitschman, 1967 ; Kostov, 1971; Kuhl&Norra, 1992; Bragg et al., 2003) et que la vitesse du vent n'est pas un même facteur pour l'accumulation de verglas que pour l'accumulation de neige (cf. §3.4.1). L'action commune d'une masse accumulée sur le houppier et du vent soumet un arbre à d'autres sollicitations que la masse accumulée toute seule. Les dégâts de verglas doivent donc être interprétés avec précaution. Une comparaison directe avec les dégâts de neige ne paraît possible qu'en absence de vent très fort.

3.3 *Evaluation critique des interprétations des dégâts de neige lourde*

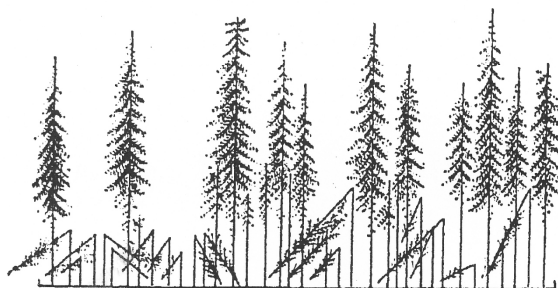
Il paraît important au début du travail de recherche de reconsidérer le terme de „dégâts de neige lourde“ et d'en relativiser l'importance pour la gestion forestière. Dans l'interprétation des dégâts, il convient de prendre en compte la dynamique naturelle d'un peuplement, sa conformité au but de production, l'ampleur des dégâts soi-disant catastrophique et les aspects phytosanitaires.

3.3.1 **Le processus naturel**

Le fait que la neige lourde cause des dommages surtout chez les arbres de faibles dimensions (cf. §3.1.3) permet de qualifier son effet d'une **éclaircie naturelle par le bas** (p.ex. Haufe, 1934; Merkel⁵, 1975; Mangold&Spellmann⁶, 1989) **d'une force le plus souvent faible à moyenne, rarement extrême**. La vue en profil de Haring&Iuga (1970) donne une très bonne impression des conséquences de la neige lourde sur la structure d'un bas-perchis d'épicéa en Roumanie (Fig. 2).



Avant les dégâts



Après les dégâts

Fig. 2 Vue schématique des conséquences de la neige lourde sur la structure d'un bas-perchis dense d'épicéas (Haring&Iuga, 1970)

⁵ „Der Schnee hat [...] als Folge eine unkontrollierte Niederdurchforstung geführt“

⁶ „Der Schnee hat niederdurchforstungsartig eingegriffen“

La conclusion de Johann (1981), spécialement dans des peuplements denses non-traités, va exactement dans ce sens : „Der Schnee schädigt vorwiegend die schwächeren Bäume eines Bestandes. Gibt es in einem undurchforsteten und bisher unbeschädigten Bestand mehr schwache als starke Bäume (linksschiefe Durchmesser-Verteilung), so signalisiert dies hohe Schneebruchgefahr! Trotzdem: **Die Hauptwuchsträger (die stärksten Bäume eines Bestandes) bleiben meist verschont!**“.

La neige lourde est un des principaux facteurs dont dépend la mortalité naturelle, notamment la mortalité naturelle extraordinaire ou non-compétitive⁷ (Lee, 1971, in: González et al., 2004)⁸. D'une part, la mortalité naturelle culmine lors de la culmination de l'accroissement courant en hauteur du peuplement (Slodičák, 1995), où la concurrence interspécifique atteint son paroxysme (Schütz, 1990). D'autre part, justement cette période est marquée par un taux maximal de dégâts de neige dans les peuplements non-traités (cf. Rottmann, 1985, p. 51, Abb. 20). En autres termes „Im Bestandesalter des Stangenholzes ist die Phase mit der höchsten Anfälligkeit gegenüber Schneeschäden, weil sie auch diejenige mit der grössten Zunahme des Wettbewerbes, d.h. die Phase des stärksten Höhenwachstums ist“ (Schütz, 2003). Cette coïncidence n'est pas fortuite, il s'agit évidemment du même phénomène dans la dynamique d'un peuplement régulier.

☞ Pour autant que les effets de la neige lourde soient identiques aux effets de la concurrence (élimination des éléments qui accusent un retard dans le développement par rapport aux autres), il paraît justifié d'apparenter les deux phénomènes résultant en une réduction du nombre de tiges et d'interpréter les arbres éliminés par la neige comme mortalité naturelle et non comme des dégâts (Fig. 3).

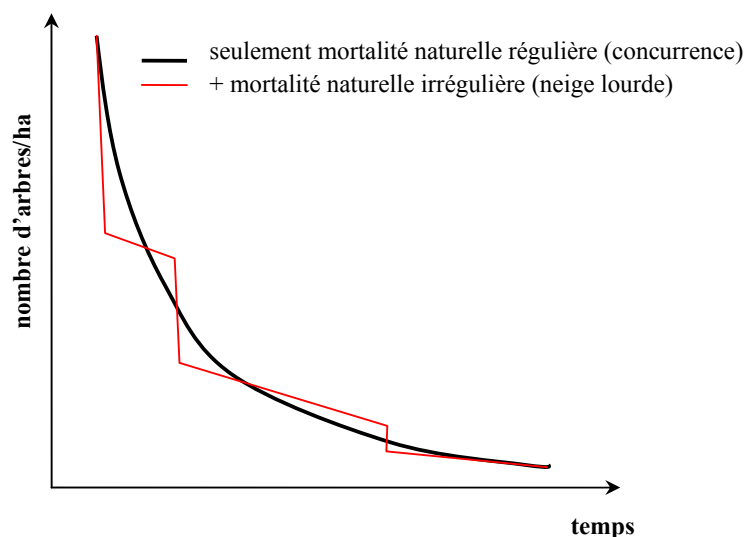


Fig. 3 Evolution d'un peuplement dense non-traité

Du fait que le peuplement est une unité dynamique qui évolue constamment ressort un problème négligé par tous les auteurs qui ont travaillé sur les dégâts de neige lourde – le manque de référence objective pour évaluer les dégâts.

⁷ non competition-induced mortality (en anglais)

⁸ regular mortality, or self-thinning, is due to competition for light, water and soil nutrients within a stand. Irregular mortality results from random disturbances or hazards such as fire, wind, snow or insect outbreaks (González et al., 2004)

Il n'existe pratiquement pas de référence objective pour estimer les conséquences d'arbres endommagés par la neige. Dans plusieurs études, à l'exemple de recherches sur la productivité forestière, la placette non-traitée sert de référence. Mais elle ne l'est pas. Un peuplement dense non-traité perd plus de ses effectifs car il a tout simplement plus à perdre. Aucun peuplement n'est supposé ne rien perdre au cours du temps. Un peuplement non-traité ne peut pas être la référence pour un peuplement traité et vice versa, car chacun des deux suit sa propre évolution, marquée par un taux de mortalité naturelle. Une référence devrait représenter en effet un état „stable“, un état-cible, exprimé p.ex. par des critères objectifs comme un nombre minimal d'arbres non-endommagés, répartis de certaine façon sur la surface. Cet état-référence sera différent en fonction de l'âge, de l'essence, des conditions de station. Les peuplements-modèles des tables de production ne sont pas un tel état de référence, car ils sont liés à un concept d'éducation ou à un but de production. Pour les mêmes raisons, les courbes d'éclaircies ne le sont non plus.

Dans les études sur les dégâts de neige lourde, l'état-cible implicitement visé est un peuplement idéal sans aucun arbre endommagé par la neige ou autrement, un peuplement sans mortalité naturelle. Il faut donc récolter les arbres avant qu'ils ne meurent, parce qu'en tout cas ils sont condamnés, tôt ou tard, à mourir, que ce soit suite à la concurrence ou suite à la neige. Eviter les dégâts dans un tel peuplement idéal dense non-traité veut dire arrêter la mortalité naturelle.

3.3.2 Le but de production

Est-ce que les dégâts de neige lourde mettent en danger la réalisation des buts de production ? En principe, la conservation de chaque arbre au cours de toute la vie du peuplement, depuis la phase d'installation jusqu'à la maturité est naturellement impossible et serait un but absurde. Même dans un concept de sylviculture de masse ceci n'est pas biologiquement réalisable. Dans l'esprit de l'éclaircie sélective, la production est concentrée sur une petite proportion du collectif. Selon Abetz (1989): „Schnee bricht nicht Bestände, sondern Bäume. Werden für das Produktionsziel indifferente Bäume gebrochen, muss dies nicht unbedingt ein Schaden im betriebswirtschaftlichen Sinne sein. Werden keine Z-Bäume, sondern nur Füllbestandsbäume gebrochen, könnte sich die Gesamtwertleistung des Bestandes aufgrund des Schneebruches sogar erhöht haben. [...] Bedenkt man, dass 80 bis 90 % der Gesamtnettowertleistung aus dem künftigen Endbestand resultiert, kann die durch Schneebruch reduzierte laufende Volumenleistung in Jungbeständen kein Kriterium für eine Schadensbeurteilung sein. Entscheidend für die Beurteilung eines Schadens ist allein der Z-Baum-Bestockungsgrad. Mit diesem kommt zum Ausdruck, ob die Fläche mit Z-Bäumen voll bestockt ist oder nicht. Erst wenn durch Schneebruch der Z-Baum-Bestockungsgrad reduziert wurde, kann von einem Schneebruchschaden gesprochen werden.“ L'opinion que les pertes de valeur pour le peuplement se manifestent seulement quand des arbres de place sont endommagés, est partagée aussi par Hase (2001, in Ammann, 2004). Selon Ammann (2004), jusqu'à un certain âge les peuplements non-traités et soumis à l'influence de la neige lourde, présentent un nombre suffisant de candidats (répartis de façon aléatoire avec une tendance de répartition régulière sur la surface) pour faire la sélection des arbres de place.

☞ **Il n'est pas donc logique de considérer la perte physique d'un arbre quelconque comme un „dégât“ qui mérite une préoccupation particulière. Par conséquent, il ne convient pas à considérer comme de véritables dégâts de neige que cette proportion des arbres physiquement endommagés qui ne peut pas être qualifiée de mortalité naturelle, c.à.d qui ne serait pas éliminés par l'effet de la concurrence. On arrive aux mêmes conclusions si on fait une analyse avec les instruments de la théorie du risque (cf. §3.8.2). La délimitation entre mortalité naturelle et dégâts véritables de neige est**

indispensable mais n'est pas évidente. Vraisemblablement c'est une des raisons pour lesquelles elle fait complètement défaut des études sur les dégâts de neige lourde.

3.3.3 Les catastrophes

Plusieurs auteurs désignent souvent les cas de dégâts de neige en général et surtout dans peuplements denses non-traités comme des „catastrophes“. Cette qualification se laisse réfuter pour plusieurs raisons :

- Les exemples dans la littérature de peuplements denses non-traités **gravement atteints ou complètement anéantis** par la neige sont **très rares**. Ils ne concernent que des plantations de densités initiales énormes, de l'ordre de 20 000 à 30 000 plants/ha (cf. Chroust, 1969a; Petri, 1976; Abetz&Prange, 1976; Spellmann et al., 1984). Des densités initiales entre 20 000 et 40 000 plantes/ ha dans les plantations de pins sylvestres étaient pratiquées jusqu'à la fin des années 1970 et leur densité extrême était à l'origine de leur instabilité (Schütt&Stimm, 1994). En Bulgarie, les densités initiales pratiquées au début des reboisements avec le pin sylvestre ont été de 20 000 jusqu'à 100 000 semis/ha (Milev&Iliev, 2003). Les concepts d'éducation des nos jours impliquent une densité initiale de 10 000 plantes/ha au grand maximum (Schütt&Stimm, 1994; Burschel&Huss, 1997), 3 000 à 5 000 plantes/ha étant largement suffisants pour la sélection d'arbres de place.
- Les interprétations momentanées sont influencées par l'aspect à première vue désastreux qu'un peuplement endommagé peut présenter et par l'intérêt à la proportion des arbres endommagés au lieu de la partie restée intacte. Dans un peuplement dense non-traité Huss (1998) estime les dégâts de verglas (44% du nombre total et 32% du volume total) comme „considérables“. Cinq ans plus tard Ammann (2004) fait des relevés dans le même peuplement et constate qu'entretemps une grande partie des arbres désignés comme endommagés (bris partiels des houppiers) ont survécu avec succès et que le volume sur pied a rétabli sa valeur avant les dégâts. Les dégâts n'ont pas eu de conséquences sur la production de valeur du peuplement. Mauritz (1980) indique aussi que des peuplements endommagés par la neige (pin sylvestre et épicéa, jusqu'à 40 ans d'âge) se remettent avec succès, même après avoir subi des dégâts par surfaces (>0.09ha). Dans un exemple de Río et al. (1997), après une accumulation énorme de neige lourde (150kg/m²), les dégâts dans une placette non-traitée de pin sylvestre représentaient 38% du nombre de tiges, 26% de la surface terrière et 25% du volume sur pied avant les dégâts. En dépit de la masse éliminée, la même placette présentait un volume sur pied supérieur aux autres variantes d'éclaircie. Certaines études mettent l'accent seulement sur le nombre d'arbre endommagés sans donner des indications sur la proportion de la surface terrière ou du volume sur pied du peuplement. Ainsi par exemple Valinger et al. (1993) qualifient comme „heavy damaged“ un peuplement de 48 ans où en tout 11% du nombre total des arbres dans les placettes ont été endommagés.
- Ils manquent souvent des indications sur la grandeur et la répartition spatiale des dégâts pas surfaces. Le danger de dégâts par surfaces semble limité à une période de la vie des peuplements (cf. §3.1.2).
- Rottmann (1985) donne une liste exhaustive des dégâts de neige et autres formes de précipitations, parfois combinés avec du vent, qui ont eu lieu en Europe centrale dans les derniers deux siècles. Pour un cas isolé, l'ampleur des dégâts est souvent de l'ordre de quelques millions de m³. Si on regarde ces données de plus près, on remarque que dans la vaste majorité des cas (pour lesquelles il y a aussi des références pour les

surfaces touchées) l'intensité des dégâts est inférieure à 20 m³ha⁻¹. Dans seulement quelques cas la quantité du bois endommagé dépasse 50 m³ha⁻¹. Le maximum absolu est de 84m³/ha⁹ (Mauritz, 1980). Pour une interprétation correcte il faut naturellement se rendre compte qu'il est possible que ces moyennes ne reflètent pas l'état dans des peuplements isolés où le taux de dégâts peut être supérieur. Il n'y a souvent pas de références sur l'état de développement et surtout pas sur l'état cultural des peuplements concernés. Cependant, on constate le même ordre de grandeur du volume du bois endommagé dans des placettes d'essais – de 5 à 45 m³/ha (Wenk et al., 1982, in Marsch, 1989). De telles quantités endommagées ne représentent pas une perte importante par rapport au volume sur pied, même pour des jeunes peuplements (dans le cas de Mauritz il s'agit de peuplements d'âge entre 30 et 70 ans).

- **L'anéantissement total** d'une placette ou d'un peuplement entier est aussi une fonction de leur étendue. Si l'étendue est trop petite (de l'ordre de grandeur des dégâts par surfaces (cf. §3.1.2), comme p.ex. dans l'expérience de Chroust (1969a)), les dégâts par surfaces sont sûrement une catastrophe à l'échelle relative mais vraisemblablement insignifiants à l'échelle absolue.

Tab. 3 ci-dessous donne trois exemples de dégâts extrêmes dont l'interprétation n'est pas pleinement convaincante.

Description de l'essai	Dégâts de neige	Commentaire
Chroust (1969a), Slodičák (1995), Versuch „Adlergebirge”. Placette-témoin dans un dispositif de 3 traitements (~0.04ha par placette). Plantation non-traitée de 26 ans, épicéa. Densité initiale 30 000 plants/ha, ~7000 arbres/ha lors des dégâts	81% de la surface terrière. „Der Kontrolteil wurde total vernichtet“ (Chroust)	Densité initiale énorme. L'étendue de la placette-témoin (19x19m, Slodičák, 2007, comm. pers.) est trop petite pour être représentative pour la destruction totale (cf. §3.1.2).
Cremer et al. (1983). Placette-témoin dans un dispositif de 8 traitements avec 3 répétitions (0.09ha par placette). Plantation non-traitée de 20 ans, <i>Pinus radiata</i> . Densité initiale 2470 plants/ha, 1910 arbres/ha lors des dégâts.	71% du nombre des tiges (plastification ou cassures)	Aucune indication sur la répartition spatiale des dégâts. Le nombre d'arbres qui restent non-endommagés dans la placette-témoin est toujours supérieur aux autres placettes. Attention avec l'interprétation des données pour les conditions européennes: les conditions de croissance représentent dans le peuplement étudié une hauteur dominante de 27m à l'âge de 20 ans !
Abetz&Prange (1976), Versuchsfläche „Kie159”. Placettes-témoins dans un dispositif de 10 placettes (0.20ha par placette). Plantations non-traitées à l'âge de 10ans, pin sylvestre. Densité initiale 30 000 plants/ha, ~3100 arbres/ha lors des dégâts	~2000 arbres. „brachen die nicht durchforsteten Vergleichsfelder unter der Schneelast total zusammen“ (Abetz&Prange)	Aucune indication sur la répartition spatiale des dégâts, sur le volume ou sur la surface terrière des placettes. Les placettes-témoins ont subi le plus de dégâts en nombre de tiges, mais présentent, à l'âge de 22 ans, un nombre suffisant de 1100 arbres/ha.

Tab. 3 Cas extrêmes de dégâts de neige lourde

- en ce qui concerne **le volume total des arbres endommagés**, les chiffres sur l'ampleur des dégâts à grande échelle (cf. §3.1.5) sont à première vue considérables. On ne peut pas toutefois se laisser impressionner, sans en déduire la proportion des

⁹ certains chiffres supérieurs, donnés par Rottmann, se sont avérés erronés, après une comparaison avec les données originales dans les sources citées

arbres voués inévitablement à l'élimination par la mortalité naturelle. Une analyse plus détaillée doit tenir aussi compte de la proportion des peuplements dans un stade de développement où la mortalité naturelle est la plus forte.

3.3.4 Les aspects phytosanitaires

La présence après des dégâts de neige d'une certaine masse d'arbres morts (cassés ou déracinés) ou fortement affaiblis (fléchis) peut éventuellement provoquer une calamité d'insectes ravageurs ou de champignons (Río et al., 1997; Nykänen et al., 1997). Schröder&Eidmann (1993) estiment toutefois, dans une étude ciblée sur les conséquences des dégâts dans des peuplements de pins sylvestres et d'épicéas, le danger de calamité comme relativement petit : „Snow-breakage contributes to maintain resources for a multitude of insect species. The majority of parasitoids and predators of bark- and wood-boring Coleoptera is not dependent on particular host insects, but on specific ecological conditions (e.g. Nuorteva, 1956). The multitude of insect habitats created by snow-breakage is widely utilized by bark- and wood-boring species which do not damage living trees or timber. This favours also the parasitoids and predators. To summarize, the negative effects of snow-breakage such as volume losses, reduction of wood quality and increased risk of insect outbreaks are to some degree counterbalanced by the positive effects of its contributions to arthropod species diversity”. La densité plus élevée de certains insectes est en mesure, à la rigueur, de réduire temporairement l'accroissement en volume. Pour n'évoquer qu'une espèce nuisible au pin sylvestre très répandue, l'hylésine du pin: „*T. piniperda* does not kill healthy pine trees, but the feeding of the adults in the pine shoots can lead to a decrease of increment. To effect a significant decrease of increment in mature trees, shoot losses must be high, which requires high beetle numbers.” (Långström&Hellqvist 1991, in Schröder&Eidmann, 1993).

3.4 Facteurs extérieurs

3.4.1 La neige lourde comme phénomène météorologique

La neige lourde a un poids spécifique (0.10-0.30 g/cm³) deux à trois fois plus grand que la neige légère (<0.10g/cm³) (Seligman, 1936, in : Rachner, 1969 ; Gärtner, 1987, in : Marsch, 1989), même plus (0.40 à 0.66g/cm³) (Busse, 1930, in : Rottmann, 1985). Elle se forme lors des précipitations autour de 0°C.

Solantie (1994) a constaté des dégâts faibles à modérés chez l'épicéa, le pin sylvestre et le bouleau à partir de précipitations neigeuses de 40 mm et très sévères à partir de 60mm. Les extrêmes quantités enregistrées de neige lourde, mentionnées dans la littérature, vont parfois jusqu'à 160 mm (Spellmann et al., 1984 ; Río et al., 1997) et même jusqu'au 298 mm (en une nuit !) (Spellmann et al., 1984).

La constellation de facteurs météorologiques qui favorisent la formation et surtout l'accumulation de la neige lourde est très spéciale. En général, l'accumulation s'effectue à des **températures** comprises entre +0.6° et -3°C. Si la température est supérieure à 0.6°C, la neige déjà accumulée est disposée à glisser et tomber des branches (Solantie, 1994). Avec des températures en dessous de -5°C la neige est trop sèche et n'adhère pas aux branches, mais la neige déjà accumulée gèle et s'y attache fermement (Nykänen et al., 1997). Un peu au-dessus de 0°C les précipitations tombent en forme de pluie qui est en mesure de geler sur de la neige déjà accumulée (Güller, 1962, in Grünig, 1963).

Ensemble avec la température et la quantité des précipitations, le **vent** est le troisième facteur qui entre en ligne de compte. Son rôle est équivoque. D'une part, si **lors** des précipitations de neige sa vitesse dépasse 9m/s, la neige est balayée des houppiers (Solantie, 1994). Si d'autre part, **après** l'accumulation de la neige, la température de l'air baisse, les houppiers ne se

déchargent plus si facilement par le vent et des rafales éventuelles peuvent provoquer de grands dégâts (Anonymus&Keller, 1887; Abetz&Prange, 1976; Valinger&Lundqvist, 1992, in Nykänen et al., 1997). Le rôle du vent est bien exprimé encore par von Berg (1847) „So nachteilig der Wind wirkt, wenn der Anhang fest auf den Bäumen ist, so günstig ist er während oder gleich nach dem Schneefalle, weil er den Schnee von den Bäumen abschüttelt.“ En général, pour les conditions de la partie continentale de l'Europe et des pays nordiques, les grandes accumulations de neige lourde sont associées à un temps calme ou avec des petites vitesses du vent (Güller, 1962, in Grünig, 1963; Schöpfer, 1964; plusieurs auteurs cités dans Nykänen et al., 1997). L'influence commune de la neige et du vent sur la stabilité, lors des tempêtes de neige¹⁰ (p.ex. Pellikka&Järvenpää, 2003), ne fera pas objet du présent travail de recherche, si le facteur principal est essentiellement la vitesse du vent. De tels événements météorologiques sont d'ailleurs assez rares et leurs conséquences peu étudiées (Nykänen et al., 1997). Selon Peltola et al. (1997), l'effet du vent sur le moment fléchissant est relativement petit. Il est de l'ordre de 20% en comparaison avec l'effet de la neige jusqu'à des vitesses de 8m/s. De même, Gaffrey&Kniemeyer (2002) arrivent au résultat similaire (calculs avec un arbre-modèle) que jusqu'à 9m/s de vitesse du vent, les contraintes dues à la charge de neige représentent entre 70 et 80% du total. Quoique ces conclusions dépendent de la qualité des modèles mécaniques employés pour faire la comparaison, on peut affirmer qu'au moins en ce qui concerne le moment de la chute et de l'accumulation de la neige lourde, le vent peut être partiellement négligé dans les études de la stabilité.

Les conditions météorologiques **précédant** ou **suivant** l'accumulation de neige lourde peuvent varier beaucoup et influencer sensiblement les dégâts. De longues périodes très froides avant la chute de neige lourde font geler le bois des tiges et des branches des arbres (Haufe, 1934) ce qui modifie considérablement les propriétés mécaniques du bois (cf. §3.5.3) et les propriétés mécaniques de l'ancrage racinaire (cf. §3.5.2). Des pluies abondantes avant la neige lourde peuvent aussi avoir des conséquences sur l'ancrage racinaire. D'autre part, de longues périodes froides après l'accumulation favorisent le maintien continu de la masse de neige (Güller, 1962, in Grünig, 1963) ou de la masse de glace (von Berg, 1847) et conduisent à une diminution des propriétés mécaniques à cause du fluage (cf. §3.5.3). Une hausse de la température accompagnée d'un vent chaud et d'un ensoleillement direct provoque la fonte et la décharge rapide des houppiers (Solantie, 1994).

3.4.2 Accumulation de la neige lourde sur le houppier d'un conifère

- **Interception**

Il faut faire la différence entre la quantité des précipitations de neige lourde (équivalent en eau en mm ou kg/m²) et la quantité interceptée sur le houppier d'un arbre résineux. Ce n'est que la partie interceptée qui reste comme charge sur le houppier. Le processus d'interception de la neige est très complexe et implique différentes composantes comme „throughfall, adhesion, cohesion, wind removal, sliding, melting and vapour transport“ (Keller, 1979, in Nykänen et al., 1997). Selon Kobayashi (1987, in Schmidt&Gluns, 1991) les forces de cohésion et d'adhésion entre les cristaux de neige augmentent sensiblement lors de températures entre -3° et 0°C. Elles sont maximales juste en dessous de 0°C (Miller, 1964). La neige lourde possède donc une grande adhésivité (Bühler, 1889, in Marsch, 1989). Selon (Solantie, 1994), si les branches sont déjà mouillées, l'attachement de la neige sur les branches est facilité. L'interception est faible à des températures négatives, elle est moyenne à grande à des températures en peu en dessous de 0°C (étude japonaise de 1952, citée dans Miller, 1964).

¹⁰ snow storm (angl.)

L'estimation de l'interception peut se faire indirectement (Bühler, 1886; Leibundgut, 1943; Rosenfeld, 1944) ou directement - sur des arbres dans des conditions naturelles (Satterlund&Haupt, 1967; Schmidt&Gluns, 1991) ou dans des conditions de neige artificielle (Nakashima et al., 1989).

Schmidt&Gluns (1991) étudient l'interception lors des précipitations naturelles sur des bouts de branches de trois conifères du Canada (épinette d'Engelmann, sapin subalpin et pin de Murray) et arrivent au résultat que pour la neige très légère (poids spécifique entre 0.04 et 0.13) l'interception diminue (de 50% à 30%) avec l'augmentation des précipitations (entre 10 et 20mm) et avec l'augmentation du poids de la neige (atteignant seulement 10%). Schmidt&Gluns n'ont toutefois que deux mesures de l'interception à un poids spécifique supérieur à 0.10 g/cm³ et à température supérieure à -3°C, ce qui les fait douter eux-mêmes de la représentativité des relations constatées pour des poids spécifiques supérieurs.

Satterlund&Haupt (1967) étudient l'interception sur des plants entiers de Douglas et de pin argenté, à des températures comprises entre +0.6 et -0.6°C. Pour des quantités de deux précipitations naturelles de 9 et 15 mm, ils obtiennent des résultats d'interception de 24% et 47% respectivement.

Nakashima et al. (1989) font des études sur l'interception avec de la neige artificielle dans des conditions contrôlées (integrated snowfall). Ils ne mentionnent malheureusement ni les températures ni le poids spécifique de la neige et dans ce cas leurs résultats sont peu utiles.

Leibundgut (1943) compare après des précipitations de neige de poids spécifique entre 0.15-0.18g/cm³ (donc lourde) la quantité accumulée au découvert avec celle sous le couvert d'un peuplement. La différence représente la neige accumulée sur les houppiers des arbres. Il arrive ainsi à des valeurs d'interception entre 47 et 63%, pour des peuplements d'épicéa âgés respectivement entre 70 à 90 ans et 15 à 20 ans. Presque les mêmes valeurs d'interception en fonction de l'âge (entre 45 et 75%) sont constatées par Bühler (1886), pour l'épicéa et le sapin blanc, et par Rosenfeld (1944) pour l'épicéa. Plus les peuplements sont jeunes (et denses !), plus la proportion de la neige interceptée est grande. Bühler (1886) obtient pour le pin sylvestre des valeurs moindres de l'ordre de 45% au maximum.

La fiabilité de la méthode indirecte est critiquée „because all inaccuracies and errors of measurements are included in the residual term and because of the questionable assumption that snowfall in a forest opening is an accurate measure of snowfall above forest canopy” (Satterlund&Haupt, 1967). Le dernier argument semble toutefois peu valable dans le cas des mesures de Leibundgut (1943), qui prend comme référence la neige en plein découvert et pas dans une trouée.

Pour les peuplements denses on peut donc admettre un taux d'interception de la neige lourde entre 60 et 80% (cf. aussi Marsch, 1989). Selon Takahashi (1952, in Nakatani, 1991) qui fait des mesures directes de la quantité de la neige accumulée sur les houppiers de cryptoméris du Japon (*Cryptomeria japonica* D. Don), l'interception maximale est de 80%.

Il est donc évident que la combinaison la plus défavorable des facteurs est la chute par un temps calme de neige lourde collante qui est interceptée au plus haut degré par des peuplements denses (non-éclaircis). Ce sera la référence pour l'objet du présent travail de recherche.

- **Déformation du houppier sous le poids de la neige**

Sous le poids de la neige, les branches fléchissent vers le bas, ce qui provoque une diminution, dans une certaine mesure, de la surface de la projection orthogonale. Ce phénomène est très marqué p.ex. chez la cryptoméris du Japon. Pour des jeunes arbres ($d_{1.3}$

15-18cm, h 10-15m), Nakashima et al. (1989) ont très bien illustré la diminution sensible de la surface avec l'augmentation de la quantité de la neige accumulée. Dans l'état final (charge maximale), elle ne représente que 30 à 70% de la surface initiale (Fig. 4). Il faut noter que ce n'est que le houppier coupé (d'une longueur d'env. 4m) et encastré sur un support artificiel qui a été chargé de neige. Ainsi à la fin de la charge, l'axe de la tige du houppier fléchit jusqu'à la base, parfois même sans se casser. Les houppiers de pins sylvestres entiers d'une hauteur d'env. 20m soumis au fléchissement sous la charge de la neige lourde ne fléchissent pas de la même façon, probablement à cause d'une plus grande rigidité des branches et sûrement parce que l'arbre fléchit sur toute sa hauteur. L'effet de diminution de la surface de la projection orthogonale du houppier dépend vraisemblablement de l'élasticité des branches, de l'angle de leur insertion par rapport à la tige et de la quantité de la neige. Cela peut être interprété comme un mécanisme naturel de protection contre la neige (Rubner, 1934). D'autres phénomènes sont en mesure de contrecarrer cet effet. Ainsi selon Schmidt&Pomeroy (1990, in Schmidt&Gluns, 1991), à des températures négatives entre -12° et 0°C, la résistance augmente de façon linéaire avec la diminution de la température. La glace se formant dans les cellules des branches conduit à une augmentation du module d'E et à une réduction du fléchissement, ce qui permet aux branches de supporter plus de neige.

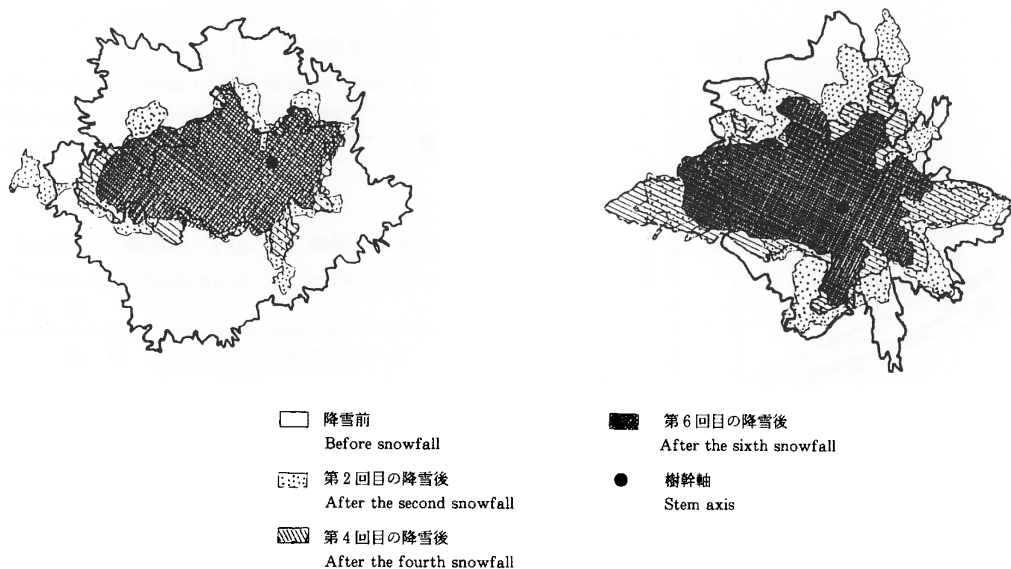


Fig. 4 Rétrécissement du houppier et diminution de sa projection orthogonale lors de charge de neige progressive (selon Nakashima et al., 1989)

Avec l'accumulation continue de neige lourde, l'effet de diminution de la surface de la projection orthogonale (POH) est progressivement atténué et contrebalancé par un effet d'augmentation consécutif à l'inclinaison de la tige et du houppier. A partir d'un certain moment la POH commence de nouveau à augmenter (Rosenfeld, 1944, in Miller, 1964), atteignant et vraisemblablement dépassant sa valeur initiale.

- **Estimation de la quantité de neige accumulée sur le houppier d'un arbre**

Faute de mesures directes de la quantité de neige accumulée, comme c'est souvent le cas, il est possible de l'estimer indirectement. L'approche la plus simple est d'admettre que le poids de la neige accumulée (P_{neige}) est égal à la valeur des précipitations de neige, multipliée par la surface de la projection orthogonale du houppier (Petty&Worrel, 1981; Kufner, 1983; Peltola et al., 1999, in: Päätaalo, 2000; Gaffrey&Kniemeyer, 2002). Il serait plus correct de prendre en compte comme facteur de réduction le pourcentage de l'interception, si on le connaît. Ainsi, à

la base des données de Leibundgut (1943) sur la quantité par ha estimée de la neige interceptée sur les houppiers des épicéas dans des peuplements âgés respectivement entre 70 et 90 ans et 15 et 20 ans, en les divisant par 10 000, on obtient des valeurs de neige interceptée entre 63 à 85.5 kg/m² de la surface de la POH. Rosenfeld (1944) divise la quantité/ha estimée de neige interceptée directement par le nombre d'arbres/ha. Les valeurs ainsi obtenues ne donnent toutefois qu'une idée de l'ordre de grandeur de la quantité moyenne accumulée, car elles ne tiennent pas compte des différentes capacités d'accumulation des arbres en fonction de leurs dimensions. Les mêmes calculs avec les données de base de Rosenfeld qu'avec celles de Leibundgut donnent des valeurs semblables entre 53 et 87 kg/m² de la surface de la POH. Inclure dans les calculs l'allure de l'évolution de la POH suite à la déformation du houppier semble plus difficile à cause de la complexité du processus.

Les chercheurs japonais (Matsuda, 1981, in Nakatani 1991; Nakashima et al., 1989; Kato et al., 1993, in Kato&Nakatani, 2000) déduisent la charge de la neige accumulée à la base des relations empiriques corrélatives avec la quantité des précipitations et le poids de la masse foliaire (à l'état sec) du houppier de l'autre. Etant données les relations empiriques également très étroites entre le poids du feuillage d'une part et le $d_{1,3}$ et la hauteur de l'arbre de l'autre, il est finalement possible de déduire la charge de la neige lourde accumulée à partir de simples paramètres dendrométriques ($d_{1,3}$, h) et de la quantité des précipitations.

3.4.3 Influence de la station et de la topographie.

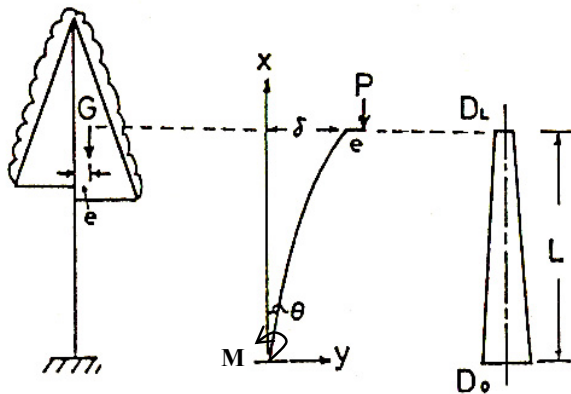
Selon l'assertion de Rottmann (1985) dans son œuvre capitale: „Schneebruchschäden können auf allen Standorten, Expositionen, Hangneigungen, Hanglagen und in allen Höhenlagen vorkommen”. La variance des expositions est grande, avec une préférence pour l'Europe centrale pour les expositions N et E (Rottmann, 1985). L'affirmation que les accumulations de neige, respectivement les dégâts de neige sont plus grands au pied des versants sis à l'abri du vent est contestable (Nykänen et al., 1997). Les peuplements sur des versants raides sont plus disposés aux dégâts (Cremer et al., 1983; Rottmann, 1985; Río et al., 1997; Zhu et al., 2006). Cela s'explique éventuellement par la plus grande asymétrie des houppiers des arbres sur tels versants (Anonymus&Keller, 1887; Nykänen, 1997).

3.5 Biomécanique de l'arbre individuel

La biomécanique est définie comme „discipline that operates at the interface between engineering and biology” (Niklas, 1992). Du point de vue morphologique, l'arbre est constitué de trois parties principales - racines, tige et houppier. Du point de vue mécanique, l'arbre représente un système où chacun de ses composants morphologiques joue un rôle spécial. Pour comprendre l'apparition de dégât de neige, il faut connaître d'une part les propriétés mécaniques du matériau dont ce système est composé, et d'autre part le comportement du système sous la charge de la neige.

3.5.1 Système mécanique. Stabilité et résistance à la charge de neige

L'arbre comme système mécanique soumis à la charge de neige lourde peut être illustré à la Fig. 5 à l'aide du modèle de Nakatani et al. (1984).



$G - C_{g\text{houpp+neige}}$

e – excentricité de la charge

P – charge concentrée (houppier + neige)

L – hauteur de la base de la tige jusqu’au $C_{g\text{houpp+neige}}$

θ - angle de rotation à la base

M – moment d’encastrement

Fig. 5 Modèle structurel mécanique (Nakatani et al., 1984)

Du point de vue mécanique, la tige peut être considérée comme une barre encastree à l’extrémité inférieure et libre à l’extrémité supérieure (Windirsch, 1936; Pfeffer, 1955; Möhring, 1981; Kufner, 1983; Petty&Worrel, 1981, Nakatani et al., 1984; Nakatani, 1991; Kato&Nakatani, 2000). Pour simplifier l’analyse, l’ensemble du houppier et de la neige accumulée peut être considéré comme une charge verticale ponctuelle (P) avec point d’application au centre de gravité de l’ensemble (G), situé à une hauteur (L) de la base de l’arbre. Si cette charge travaille seulement sur l’axe de la tige, elle ne crée que des contraintes de compression le long des fibres. Si par contre la charge est excentrée, elle fait fléchir la tige en fonction de la grandeur et de la direction de l’excentricité (e). La déformation devient alors visible - la tige prend la forme d’une courbure. Le plus grand écart (la flèche δ) par rapport à la position initiale se trouve à l’extrémité supérieure de la hauteur L considérée. Du point de vue de la mécanique et de la résistance des matériaux, il y a trois phénomènes destructifs pour le système mécanique de l’arbre chargé de neige (Tab. 4).

Phénomène	Charge indicatrice	Genre de problème mécanique	Conditions
Flambage	P_{cr}	Problème de stabilité	$e=0$; P_{cr}
Plastification et bris	P_b	Problème de résistance (à la flexion)	$e>0$; $P_b < P_d$
Déracinement	P_d	Problème d’ancrage	$e>0$; $P_d < P_b$

Tab. 4 Phénomènes mécaniques destructifs pour un arbre chargé de neige

Dans le génie civil, le flambage est décrit comme un phénomène de perte de stabilité d’un élément constructif (Kissiov, 1978). La stabilité peut être illustrée par un exemple de la mécanique des corps solides (Timoshenko&Gere, 1961, in Marsch, 1989) en parallèle avec le cas d’une barre encastree rectiligne et parfaitement verticale soumise à une charge axiale P (Fig. 6).

Le flambage se produit au moment où la charge P dépasse une certaine charge critique P_{cr} et se manifeste par un brusque fléchissement et une cassure de la barre. La charge critique représente en effet la charge maximale qu’une barre de forme et de module E donnés peut supporter. La résistance du matériau dans ce cas particulier est sans importance. P_{cr} est donc une valeur qui pourrait être atteinte seulement si les arbres ont des tiges d’axe parfaitement droit et parfaitement vertical et des houppiers parfaitement symétriques, pour assurer que la charge soit centrique.

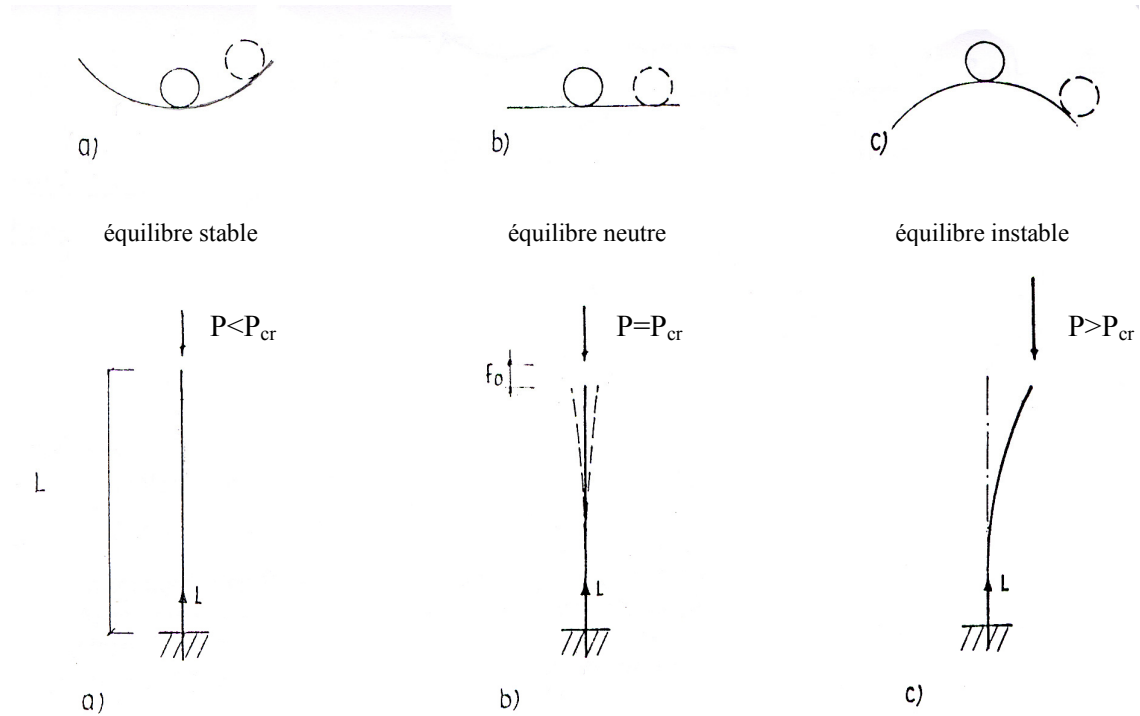


Fig. 6 Comportement d'une barre encastrée à une extrémité et soumise à compression axiale par une charge P à l'autre extrémité, parallèle avec les états d'équilibre d'un corps solide. Genre d'équilibre en fonction de l'intensité de la force appliquée par rapport à la charge critique P_{cr}

La moindre imperfection (due à une inclinaison de la tige et/ou à une asymétrie du houppier) engendrera une certaine excentricité de la charge (Fig. 7 et Fig. 8). Par conséquent, l'arbre fléchira. Avant même d'atteindre P_{cr} , l'arbre fléchissant va subir une plastification (plus tard une cassure) ou sera déraciné. Plus grande est l'excentricité, plus petite sera la charge nécessaire pour provoquer une cassure ou un déracinement (Marsch, 1989; Nakatani, 1991).

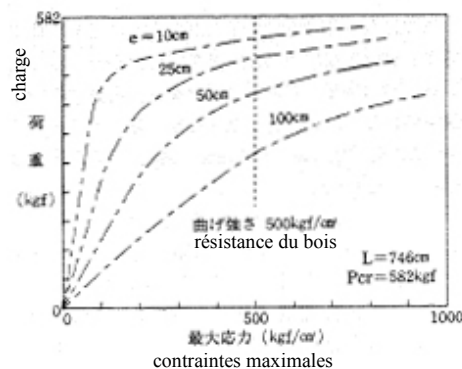


Fig. 7 Contraintes maximales en fonction de l'excentricité de la charge appliquée (Nakatani, 1991)

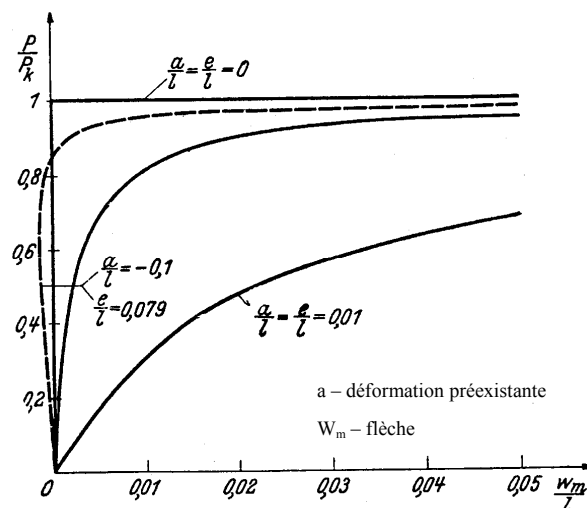


Fig. 8 Influence d'une déformation préexistante (déviation de l'axe vertical) ou d'une excentricité initiale sur les déformations (Pflüger, 1950, repris dans Marsch, 1989)

Déjà Bühler (1886), conseillé par Tetmayer et Ritter, exclue la probabilité de flambage sous une charge centrique car ce cas est considéré comme pratiquement inexistant dans la nature.

La même opinion est partagée par pratiquement tous les autres chercheurs (Rosenfeld, 1944; Chladek, 1965, in Petty&Worrel, 1981; Petty&Worrel, 1981; Nakatani et al., 1984; Marsch, 1989). Marsch (1989) qui travaille avec l'épicéa, Nakatani et al. (1984), Nakatani (1991), Kato&Nakatani (2000) qui travaillent avec la cryptométrie du Japon admettent toutefois que l'excentricité est assez petite et que la charge maximale qu'un arbre peut supporter s'approche de la charge critique. Leurs efforts sont concentrés dans le calcul ou dans l'estimation de la charge critique qui s'avère sous ses conditions un indice de la résistance.

Certains auteurs comme Peltola&Kellomäki (1993), Peltola et al. (1997), Päätaalo et al.(1999) négligent complètement le phénomène de flambage et ne travaillent que sur la résistance à la flexion.

3.5.2 Rôle mécanique des parties morphologiques de l'arbre

- Houppier

Les caractéristiques du houppier déterminent avec la neige l'intensité de la charge et la façon dont cette charge agit sur l'arbre. Ces caractéristiques sont la hauteur du début de la couronne, la POH du houppier et son asymétrie. Leurs rôles seront considérés consécutivement :

- hauteur à la base du houppier (hbh)

Elle est dans une grande partie déterminante pour la hauteur du point d'application de la charge concentrée (L, Fig. 5) de la masse de neige accumulée (Rosenfeld, 1944; Möhring, 1981 ; Nakatani, 1991). Le $C_{g_{houpp+neige}}$ se situe au dessus de la hbh. Selon Spellmann et al. (1984), la hbh joue un certain rôle pour la stabilisation contre la neige lourde, mais selon lui une „valeur de sécurité“ de 50% de la hauteur totale comme chez l'épicéa ne peut pas être donnée. Dans des peuplements denses non-traités, la hbh est relativement grande (Ammann, 2004).

- POH et asymétrie du houppier

Le rôle de la POH pour l'intensité de la charge de neige a été déjà décrit (cf. §3.4.2). En ce qui concerne l'asymétrie du houppier, plusieurs auteurs expriment l'opinion qu'elle joue un rôle essentiel pour la déstabilisation individuelle (Bühler, 1886; Anonymus&Keller, 1887; Stephani, 1933; Haufe, 1934; Curtis, 1936; Sanzen-Baker&Nimmo, 1941; Kangas, 1959 et Perttilä, 1987, in Päätaalo et al, 1999; Grünig, 1963; Duterme, 1965; Matsuda, 1979 et 1988, in Nakatani 1991; Cremer et al., 1983; Polley, 1995; Huss, 1998). Curtis (1936) étudie les dégâts de neige lourde dans des plantations de 10 essences résineuses (dont le pin sylvestre). Chez les arbres endommagés (présentant des tiges fléchies ou gisant par terre) il constate que 82% ont des houppiers unilatéraux (one-sided crowns) et que 80% ont une direction du dégât correspondant à la direction de l'asymétrie du houppier. Il faut noter que trois quarts des arbres relevés étaient des douglas. Curtis suppose que „this had been caused by the trees growing on the margins of stands or openings, or being suppressed from one side in close spacings“. Les peuplements denses non-traités se caractérisent par une haute proportion d'arbres de houppiers asymétriques à la différence de peuplements régulièrement traités (Persson, 1972 et Valinger et al, 1994; in Päätaalo et al, 1999; Rottmann, 1985).

Plusieurs références des recherches sur la dynamique des peuplements et de la structure des forêts tropicales indiquent la prédétermination de la direction de chute par l'asymétrie du houppier des arbres. Young&Hubbel (1991) démontrent que „Trees have a strong and significant tendency to fall on their heavy sides“ (déterminées par l'asymétrie des houppiers) en fonction de leur proximité des ouvertures du couvert. A la base de projections orthogonales et d'une surveillance continue pendant presque 7 ans du statut mécanique des arbres dans une forêt tropicale au Panama, Young&Perkocha (1994) démontrent directement la tendance des

arbres de s'écrouler en direction de l'asymétrie de leurs houppiers et que les arbres plus asymétriques sont plus susceptibles de s'écrouler que les arbres moins asymétriques. Robert (2003) admet dans ses modèles de simulation des chutes d'arbres qu'un arbre „falls in the direction where its crown displays the strongest asymmetry and can create damages in its vicinity". De même, Gaffrey&Kniemeyer (2002) admettent dans leur modèle qu'un arbre chargé de neige lourde va fléchir en absence de vent dans la direction, déterminée par la position du $C_{\text{houpp+neige}}$ par rapport à l'axe de la tige. Dans un scénario „half-sided crown“ calculé avec leur modèle holistique „TreeFlex“, ils obtiennent des augmentations d'env. 25% des contraintes (dans la zone en peu en-dessous du point d'application de la charge de neige simulée) par rapport au scénario de référence

Est-ce que la direction naturelle de fléchissement est toujours prédéterminée par l'asymétrie du houppier? Est-ce que le vent peut apporter des changements et même pencher l'arbre dans la direction opposée de celle de l'asymétrie? Quelques exemples de la littérature donnent certaines indications à ce propos. Selon Bühler (1886): „Tritt starker Schneefall bei bewegter Luft ein, so ist die Belastung nicht mehr gleichmässig verteilt. Sie wird nicht nur eine einseitige auf der dem Winde zugekehrten Seite der Baumkrone, sondern auch eine stärkere. Bei solchen Schneefällen lässt sich oft die Beobachtung machen, dass die hinter dem Baum liegende Fläche fast schneelos bleibt, weil die Krone den Schnee auffängt.“ Il faut relativiser ces observations dans la mesure où il n'est pas mentionné s'il s'agit de peuplements fermés ou des arbres quasi solitaires, la vitesse du vent n'est pas indiquée non plus et de même que le genre de la neige (lourde ou légère). Ainsi par. ex. Cain&Shelton (2002) indiquent que dans un bas perchis non-traité de *Pinus taeda* lors d'une tempête de pluie verglaçante environs 18% des arbres endommagés ont fléchi dans une direction opposée à celle de la direction prédominante du vent. Kuhl&Norra (1992) décrivent un exemple frappant de dégâts de verglas (accumulation d'une couche de 29mm) dans des peuplements de hêtres et d'épicéas lors des rafales de vent d'une vitesse maximale de 65km/heure (!): „So treten flächenhafte Würfe fast ausschliesslich an steilen Hängen auf. **Die Fallrichtung ist jedoch entgegen der seinerzeit vorherrschenden Windrichtung, was als Ursache den klassischen Windwurf ausschliesst und mehr für ein regelrechtes Fallen spricht.** Die natürliche Hangabwärts-Richtung könnte als eine Unbalance herrühren, die mit einer **hangbedingten Kronenasymetrie** und nunmehr verstärktem Eisanhang zu Ungleichgewicht und Fall führen. Es ist aber auch ein Anwehen von in der Krone festfrierendem Eisregen denkbar, da durchaus nicht alle, sondern überwiegend dem Wind zugeneigte Ostexpositionen betroffen wurden. Die Falltheorie würde auch die erstaunliche Stabilität der ungeschädigten Gegenhänge erklären, denn ein direkt von oben wirkende Eisanhang hätte alle Hangexpositionen gleich schwer treffen müssen. Eine endgültige Klärung steht hier noch aus. Sicher ist aber die Schadenshöhe auch durch den im Bild gut sichtbaren Domino-Effekt, dem Mitwerfen des jeweils hangabwärts stehenden Nachbarbaumes, noch vertärkt worden. Eine Annahme, die auch die geringen Schäden im Ober- und Unterhang erklärt“. Cet exemple montre clairement que l'asymétrie des houppiers a été le facteur prédominant pour la direction de chute. Le vent n'a joué qu'un rôle secondaire pour l'accumulation excessive de verglas sur la partie fortement asymétriques du houppier mais pas du tout pour la direction de chute.

L'asymétrie du houppier peut être exprimée de façon très convenable par le vecteur d'asymétrie (VA)¹¹. Selon Takagushi (1983, in Umeki, 1995), le VA du houppier d'un arbre est un vecteur dans le plan horizontal de la surface terrestre, qui relie le centre de la section transversale de la base de la tige avec le centre de gravité de la projection orthogonale du houppier sur le même plan (Fig. 9).

¹¹ crown-vector (angl.)

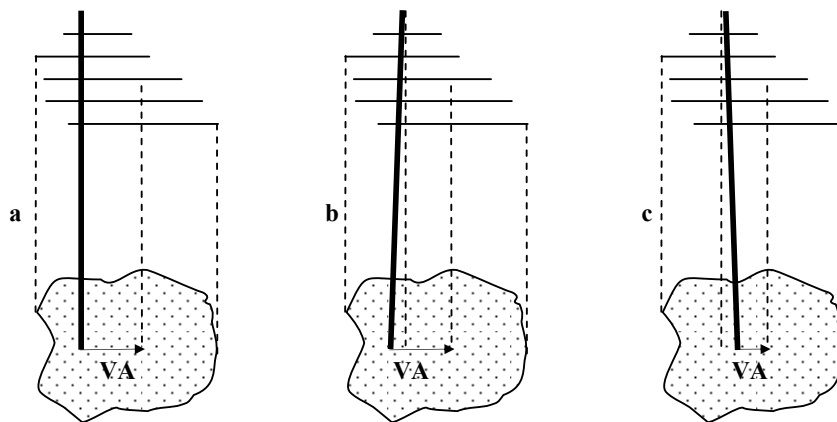


Fig. 9 Vecteur d'asymétrie du houppier, tige sans (a) ou avec (b, c) inclinaison (adapté d'Umeki, 1995).

Ainsi défini, le VA ne tient pas explicitement compte d'une éventuelle inclinaison de la tige (cf. Fig. 9 b&c). Les cas plus compliqués où le VA gît dans un autre plan que celui de l'inclinaison de la tige ne sont pas montrés.

L'expression de l'asymétrie par le VA a l'avantage de fournir en même temps des indications sur la grandeur de l'asymétrie d'une part et de sa direction, de l'autre. Il est clair que l'excentricité (e) de la charge de neige accumulée dépend étroitement de l'intensité du VA (\sim bras de levier initial), sans pour autant pouvoir estimer plus exactement la relation.

- Géométrie de la tige
 - forme de la tige

La forme décroissante de la tige conditionne une **rigidité variable** même si on admet un module E constant pour toute la hauteur de la tige. Ce fait empêche l'utilisation des formules classiques d'Euler pour le calcul de la stabilité, ce qui était la pratique des premiers travaux sur la stabilité des arbres (cf. Windirsch, 1936 ; Pfeffer, 1955). Nakatani (1991) utilise le coefficient de décroissance L/D_0 (cf. Fig. 5, p.39) pour délimiter avec une exactitude de 88% les cas de cassures des cas de déracinement.

- inclinaison de la tige par rapport à la verticale

Déjà Petty&Worrel (1981) notent qu'une inclinaison de la tige dans l'intervalle 1-12° peut créer un moment fléchissant additionnel considérable.

- Ancrage racinaire

Du point de vue mécanique, l'ancrage racinaire est caractérisé par sa résistance au déracinement et par sa rigidité. Les deux sont déterminées par quatre composantes - la masse de l'assiette du système racinaire de l'arbre; l'adhésion entre le sol et l'assiette; la résistance à la traction des racines du côté de la direction du fléchissement de la tige et la résistance à la compression des racines du côté opposé du fléchissement (Coutts, 1986, in Brüchert&Becker, 2000). L'adhésion entre le sol et l'assiette dépend fortement de la teneur en eau dans le sol (Vanomsen, 2006) et de la température.

La résistance au déracinement est représentée le plus souvent par le moment maximal que la base de la tige peut supporter - le **moment de déracinement** M_d [kN.m]. M_d dépend très étroitement des dimensions de la tige - plusieurs auteurs obtiennent une très haute corrélation ($R^2 > 0.9$) entre le M_d et le $d_{1,3}$ (Peltola et al., 2000 ; Blackburn et al., 1988 et Bolkenius (2001), in Vanomsen, 2006 ; Vanomsen, 2006), pour un sol non-gelé ou gelé.

La rigidité de l'ancrage reflète la faculté de la base de la tige de se déformer (Vanomsen, 2006). Nakatani et al. (1984) l'expriment par le coefficient de rotation μ (rad/N.m) qui reflète la proportionnalité entre le moment fléchissant externe et l'angle de rotation (d'inclinaison) à la base de la tige (Eq. 1).

$$\text{Eq. 1 } \theta = \mu.M_{base}^{externe}$$

La rigidité de l'ancrage dépend étroitement du diamètre de la tige à la base (R^2 -0.60÷-0.76, Nakatani, 1991). L'angle de rotation θ (cf. Fig. 5, p.39), mesuré le plus près possible du niveau du sol, afin d'éviter l'effet de déformation de la tige, est très petit - dans l'ordre de 2 à 6° au moment de déracinement M_d (Vanomsen, 2006). De nos jours, la rigidité d'ancrage est exprimée normalement par l'inverse du coefficient (Eq. 2, plusieurs auteurs dans Vanomsen, 2006):

$$\text{Eq. 2 } k_v = \frac{1}{\mu}$$

Jonsson et al. (2006) trouvent aussi une bonne corrélation entre k_v et le $(d_{1.3})^2$ ($R^2=0.64$).

Toutes les études qu'on vient de citer affirment qu'au sein d'un peuplement, les grosses tiges sont plus rigidement encastrées et sont plus résistants au déracinement que les faibles.

L'influence de la **température** sur les propriétés mécaniques de l'ancrage racinaire se fait très fortement sentir au passage entre l'état non-gelé vers l'état gelé du sol. Un sol gelé rend l'encastrement sensiblement plus rigide et l'ancrage plus résistant au déracinement. Lors des essais de terrain de fléchissement de pins sylvestres par tirage latéral de Peltola et al. (2000) tous les arbres ont subi une cassure quand le sol était gelé, autrement, sur un sol non-gelé, dans presque 90% des cas était on observait un déracinement. Selon les résultats de Peltola et al., la résistance au déracinement augmente sur un sol gelé au moins de 1.5 fois pour tous les diamètres. Les tiges se déformaient, au moment maximal, en moyenne deux fois plus chez les arbres cassés sur un sol gelé que chez les arbres déracinés sur un sol non-gelé (angle d'inclinaison du houppier par rapport à la verticale $39.6\pm 8.8^\circ$ contre $18.4\pm 9.7^\circ$), ce qui peut être grossièrement interprété comme un doublement de la rigidité d'encastrement sur un sol gelé.

En plus, **la direction de fléchissement** de la tige par rapport à la direction de la pente semble aussi jouer un rôle. Nicoll et al. (2005) ont constaté que sur une pente raide (30°) des arbres d'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*) étaient significativement plus résistants au déracinement quand ils sont treuillés vers le haut de la pente que quand ils sont treuillés vers le bas de la pente.

3.5.3 Propriétés mécaniques du matériau bois

Le bois est un matériau composé, anisotrope et hétérogène (Spatz&Brüchert, 2000). Sous certaines conditions (manque de nœuds et d'autres défauts) il peut être considéré le long des fibres comme orthotrope (Kissiov, 1978), c.à.d. avec des propriétés mécaniques constantes. Plusieurs facteurs peuvent modifier les propriétés mécaniques du bois d'une même essence, dont par exemple la teneur en eau, la densité, le rapport bois de printemps/bois d'été dans les cernes, le rapport bois juvénile/bois adulte dans une section (Nakatani et al., 1988; Brüchert&Becker, 2000; Bluskova, 2003). Ces facteurs peuvent varier dans la direction radiale d'une section transversale et le long d'une tige.

Dans le présent travail on s'intéresse particulièrement aux propriétés mécaniques du *bois frais*, car l'objet de l'étude sont des arbres vivants. Le bois frais se caractérise par des propriétés mécaniques inférieures à celles du bois séché. Ainsi par exemple le bois séché de

pin sylvestre possède un module d'élasticité en moyenne deux fois supérieur à celui du bois frais (Bluskova, 2003). Le même rapport est valable en ce qui concerne la résistance à la compression (Wessolly, 1991a). La diminution des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en eau se constate jusqu'au seuil de saturation en eau des parois des fibres du bois et à partir d'une humidité supérieure à 30%, ce qui est le cas pour le bois des arbres dans leur état naturel, les propriétés mécaniques et surtout la résistance à la flexion et le module E restent constants (Kollmann, in Kufner, 1983; Bluskova, 2003).

Les propriétés mécaniques chez les conifères peuvent dépendre de la proportion et de l'emplacement dans la tige de *bois de compression*. Le bois de compression est plus résistant à la compression et a un module E plus élevé que le bois normal, mais il est par contre moins résistant à la tension (Bluskova, 2003). Il est normalement développé quand la tige est inclinée par rapport à la verticale, toujours du côté de l'inclinaison (Duncker et al., 2006). Abetz&Künstle (1982) constatent que les arbres d'un peuplement dense non-traité d'épicéa développent moins de bois de compression par rapport aux arbres de peuplements traités et que la production de bois de compression augmente après des interventions de réduction du nombre des tiges.

Un autre facteur qui peut influencer le comportement mécanique du matériau bois est la *température*. En général, pour une diminution de la température d'env. 10°C, il en résulte une augmentation de la résistance (à la flexion?) de 3 à 9% (Hoadley, 1990). Dans la nature, Silins et al. (2000) démontrent que l'allure journalière de la température de l'aubier des arbres sur pied suit exactement l'allure journalière de la température de l'air, avec un retard de quelques heures seulement, si l'amplitude des oscillations est grande. Lors d'une température constante de l'air, l'aubier a la même température que l'air. L'aubier gèle complètement vraisemblablement en dessous de -1.5°C (Silins et al., 2000). Dans l'état gelé, la résistance à la flexion du bois augmente considérablement et à des températures très basses (de l'ordre de -13÷-15°C) peut même doubler par rapport à l'état non-gelé, le module E augmente aussi. (Vorreiter, 1938). **Le bois gelé devient donc sensiblement plus résistant, un peu plus rigide et plus fragile.** En réalité, il a été déjà observé que la neige lourde s'accumule sur des arbres dont le bois est déjà gelé ou qui gèle peu après l'accumulation (von Karlovitz, 1713, in von Berg, 1847; Haufe, 1934; Vorreiter, 1937). En dehors de la période de végétation et même en hivers, la teneur en eau dans le duramen et dans l'aubier reste supérieure au point de saturation des fibres (Ernst Zürcher, comm.pers.)

Les propriétés mécaniques du bois dépendent aussi de la durée d'application de la charge. Si le bois est chargé pendant longtemps (des heures et des jours) et si la charge est assez grande, la résistance du bois, respectivement sa rigidité diminuent. Ceci est lié au phénomène de *fluage*, qui s'exprime par une augmentation des déformations en fonction du temps et en fonction de l'intensité de la charge (charge constante de longue durée). La résistance au fléchissement du bois diminue sensiblement (de l'ordre de 10 à 20%) déjà lors des premières heures du début de la charge (Graf, 1938, in Marsch 1989). Si la charge dure 5 à 10 jours, la résistance à la flexion ne représente qu'env. 60% et même moins de la résistance pour une charge de courte durée. Pour tenir compte du phénomène du fluage, certains auteurs qui ont étudié la stabilité des arbres par rapport à la neige travaillent avec 50% des valeurs de la résistance du bois, issues des essais de charge de courte durée (Petty&Worrel, 1981; Peltola et al., 1997).

Il paraît que dans les conditions naturelles (cf. §3.4.1) une charge de longue durée de neige lourde est vraisemblablement presque toujours liée à un état gelé du bois. Par conséquent il semble que l'effet de la charge de longue durée est en quelque sorte contrecarré par l'effet de la température sur les propriétés mécaniques du bois. Des essais de fléchissement de bois gelé

sous une charge de longue durée seraient nécessaires pour éclaircir ses aspects mais ils font apparemment défaut.

Les propriétés mécaniques du bois sont en général étudiées sur la base d'essais standardisés avec des échantillons de petites dimensions de bois scié sans défauts. Dans le présent travail, les propriétés mécaniques du *bois rond* à état frais (fibres saturés en eau) à des températures autour et en dessous de 0°C sont importantes, pour lesquelles il y a en général moins de références, surtout en ce qui concerne des tiges entières (p.ex. Ylinen, 1952, in Marsch, 1989). Pour les grandes dimensions de bois rond, ils n'existent pratiquement pas de données sur la résistance à la flexion (Brüchert&Becker, 2000). Dans le bois rond (tige en état naturel ou billons) il y a des *contraintes internes préexistantes* le long des fibres (des contraintes de tension dans la partie extérieure et de compression dans la partie intérieure). De cette façon lors d'un fléchissement l'arbre peut compenser la résistance à la compression du bois, nettement inférieure à la résistance de tension, par ces contraintes préexistantes, qui peuvent être de l'ordre de grandeur de la résistance de compression elle-même (Wessolly, 1991a). De part ce fait, des sections de bois rond sous fléchissement montrent une résistance supérieure par rapport aux échantillons prélevés, où les contraintes internes ne sont plus présentes. D'autre part, toujours pour le bois rond, il faut tenir compte de *la présence de nœuds*. La résistance à la flexion peut être réduite en fonction du nombre et des dimensions des nœuds (Götze, 1961), par contre la résistance au flambage (Götze, 1961) ainsi que le module d'élasticité (Brüchert et al., 2000) semblent moins, respectivement pas du tout influencés par ce facteur.

On va prêter plus d'attention sur les propriétés mécaniques importantes pour cette étude, notamment le module d'élasticité, les comportements élastique et plastique et la résistance à la flexion.

- **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité (module d'Young, module E) est une constante qui relie la déformation à la contrainte subite par un corps. Il est mesuré en Pa ou en N/mm². La nature hétérogène du matériau bois (composé d'écorce, aubier, duramen, canaux de résine, etc.) est exprimée par un module E structurel (Brüchert&Becker, 2000; Brüchert et al., 2000).

Certains auteurs admettent dans leurs travaux un **module E constant** pour toute la tige (Petty&Worrel, 1981; Päätaalo et al., 1999, Peltola et al., 2000). Petty&Worrel (1981) travaillent avec un module E entre 3.5 et 7 kN/mm² pour des conifères. Peltola&Kellomäki (1993) admettent une valeur de 7 kN/mm² „which is quite typical for green coniferous wood including Scots pine“. Päätaalo et al. (1999) admettent aussi la valeur de 7 kN/mm². Peltola et al. (2000) obtiennent des essais de terrain avec des pins sylvestres nordiques une valeur moyenne de 11.35±3.5 kN/mm². D'autres auteurs comme Ylinen (1952, in Marsch, 1989), Nakatani et al. (1988), Brüchert&Becker (2000) et Brüchert et al. (2000) étudient l'évolution du module d'élasticité le long de la tige et constatent qu'il diminue sensiblement de la base vers la cime de l'arbre. Les différences peuvent être de l'ordre de 20 à 73% (Brüchert et al., 2000). Nakatani (1991), Kato&Nakatani (2000) et Gaffrey&Kniemeyer (2002) introduisent un **module E variable** dans leurs travaux de modélisation de la stabilité des arbres.

- **Limite d'élasticité σ_E**

Certains matériaux, dits fragiles, se détruisent sous les contraintes occasionnées par les charges extérieures, pratiquement sans se déformer de façon plastique. D'autres, dit plastiques, se détruisent après avoir subis dans une certaine mesure des déformations plastiques (irréversibles). Chez les derniers, on fait la différence entre la limite de proportionnalité σ_p , qui représente la contrainte jusqu'à laquelle il existe une relation linéaire

entre la contrainte et la déformation et la limite d'élasticité σ_E , qui représente la contrainte jusqu'à laquelle les déformations restent élastiques (réversibles). Chez le bois séché soumis à traction il n'y a en principe pas de zone plastique et il se comporte comme un matériau fragile (cf. Kissiov, 1978). Pour le bois frais par contre „... failure is not an all or non process. Samples, branches or even entire stems can be bent far beyond the range of linear elasticity and still be stable“ (Spatz&Brüchert, 2000). Le bois en état frais peut supporter des déformations plastiques dans différente mesure suivant les essences.

Le bois est un matériau élasto-visco-plastique (Marsch, 1989). Pour un matériau élasto-plastique „the degree of elasticity¹² can vary wildly depending on how far loading has induced plastic deformations“ (Niklas, 1992). Dans la présente étude, en raison des essais moins précis et non-standardisés, on admet que les déformations deviennent irréversibles au même moment que la limite de proportionnalité est franchie et on utilisera seulement le terme de limite d'élasticité.

Dans les études précédentes (Petty&Worrel, 1981; Nakatani 1991; Peltola&Kellomäki, 1993; Kato&Nakatani, 2000; Gaffrey&Kniemeyer, 2002) la limite d'élasticité et le comportement plastique du bois n'ont pas été directement considérés. Un comportement élastique du matériau est admis jusqu'à la rupture. Selon Gaffrey&Kniemeyer (2002) „values for strain parallel to grain at the proportional limit for green wood are seldom published“. Niklas (1992) donne pour le pin sylvestre une valeur indicative de la limite d'élasticité de 45N/mm^2 sans pourtant mentionner s'il s'agit de bois séché ou de bois frais.

L'apparition d'une déformation plastique déprécie le bois dans l'endroit correspondant même si l'arbre reste vivant et continue son développement.

- **Résistance à la flexion σ_B**

Peltola et al. (2000) obtiennent pour le pin sylvestre des essais avec des arbres sur pied des valeurs moyennes de résistance à la flexion de $63.3 \pm 9.2 \text{ N/mm}^2$ sur un sol gelé (bois gelé) et de $37.3 \pm 7.7 \text{ N/mm}^2$ sur un sol non-gelé (bois non-gelé).

3.5.4 Indices de stabilité

- **Coefficient d'élancement h/d**

Le coefficient d'élancement s'est incontestablement imposé comme un indice de stabilité mécanique (ou inversement - de vulnérabilité) et d'estimation du risque de dégâts de neige lourde. Pratiquement tous les auteurs qui ont publié au sujet des dégâts de neige lourde pendant les dernières trois décennies l'ont unanimement adopté et utilisé. Ce coefficient est en usage depuis au moins 120 ans (cf. Bühler, 1886). Les valeurs du coefficient d'élancement sont calculées pour l'arbre individuel aussi bien que pour un peuplement entier, sous la forme d'une valeur moyenne pour les plus gros arbres (h_{200}/d_{200} – Cremer et al., 1983; h_{100}/d_{100} - Slodičák, 1995; Kenk&Weise, 1998; Huss, 1998; Slodičák&Novak, 2006) ou pour l'arbre à la surface terrière moyenne (h_g/d_g – Huss, 1998; Kenk&Weise, 1998; Slodičák&Novak, 2006;).

Une multitude d'études ont révélé pratiquement les mêmes valeurs dites „critiques“ du coefficient d'élancement, au-dessus desquelles la proportion des arbres endommagés par la neige augmente considérablement. **Pour le pin sylvestre**, la valeur absolue en dessous de laquelle des dégâts ne sont pratiquement pas observés même après des accumulations extrêmes de neige lourde est env. 70 (Abetz, 1989). Les arbres de $h/d < 80$ sont considérés

¹² The degree of elasticity is defined as the ratio of the elastic (recovered) deformation to the total deformation when the material is loaded to a given stress level and then unloaded to zero stress (Niklas, 1992)

comme stables (Abetz&Prange, 1976 ; Spellmann, 1984 ; Rottmann, 1985), ceux de h/d entre 81 et 90 comme moyennement stables et ceux de h/d>90 comme instables (Rottmann, 1985). Selon Polley (1995) „Etwa bei Schlankheitsgrad 150 ist der (theoretische) Grenzwert erreicht, bei dem die Bäume schon unter der Last ihrer Krone zusammenbrechen“. Cete valeur supérieure absolue du coefficient d'élancement vient en effet des calculs mécaniques de Marsch (1989) pour un arbre-modèle (épicéa, 14m de hauteur). Certaines études montrent qu'elle peut être dépassée (Montero et al, 2001). Pour **l'épicéa**, la classification des valeurs du coefficient d'élancement est à peu près la même, avec 80 comme seuil inférieur (divers auteurs in : Rottmann, 1985). Selon Pollanschütz (1980) „Ein Nadelbaum mit hohem h/d-Wert (z.B. über 100) hat in Schneebruchlagen nahezu keine Chance, in den Endbestand zu kommen“.

Le coefficient d'élancement possède un grand avantage – il est très simple et facile à mesurer et calculer (Kato&Nakatani, 2000), ce qui explique son large usage dans la recherche et dans la pratique. Mais dans quelle mesure explique-t-il la nature complexe de la stabilité mécanique d'un arbre individuel? Marsch (1989) établit des relations entre la charge critique de flambage (P_{cr}) et le h/d à la base d'une seule tige-modèle de 14m de hauteur dont il fait varier le diamètre en fonction de la classe de fertilité. Marsch ne considère pas la relation pour les arbres dans un peuplement réel, de même que Petty&Worrel (1981) et Peltola et al. (1997). Nakatani et al. (1984), à l'échelle de peuplements obtiennent un R^2 de -0.53 pour la corrélation entre P_{cr} et le coefficient d'élancement, en notant une grande variance dans les résultats et en faisant la conclusion que „the h/d coefficient as an index value for the resistance of the tree against snow load could be considered as insufficient“. Dans une étude plus récente, Nakatani (1991) trouve une grande corrélation entre P_{cr} et le coefficient d'élancement ($R^2=-0.75$). La corrélation entre l'indice de stabilité P_{neige}/P_{cr} et le coefficient d'élancement est encore plus grande ($R^2=-0.79$). Nakatani conclue que „the correlation between the h/d ratio and the buckling load from snow load is at high level and it proves efficiency as index for the resistance performance of the standing trees against snowfall“. Cette fois-ci les calculs de la charge critique sont faits en uniformisant certains facteurs (module E) pour les arbres étudiés. Nakatani fait la conclusion finale que le h/d reflète surtout les différences dans la forme des tiges et dans la mesure où le module E ne varie pas au sein d'un peuplement, il peut exprimer aussi la résistance des arbres (estimée par la P_{cr}). Néanmoins, si le module E varie, il est possible d'avoir deux arbres du même h/d et de résistances complètement différentes.

L'adéquation du h/d comme indice de stabilité **au niveau de l'arbre individuel** est limitée par d'autres facteurs:

- selon Kato&Nakatani (2000) „Yamaguchi et al. (1982) have reported that the critical H/D value causing the snow damage of trees, changed with an average height at Japanese cedar stands. Differences in parentage of damaged tree among three Japanese cedar clones could not be evaluated by the H/D ratio (Nakatani et al., 1984)“. Selon Thomasius (1988) „die Belastbarkeit der Bäume bei gleichem Schlankheitsgrad mit der Dimension zunimmt, weil in die entsprechenden statischen Gleichungen [pour le calcul de la charge critique de flambage] der Durchmesser mit einer grosseren Potenz als die Höhe eingeht“.
- avec **l'âge**, la résistance d'un arbre à la neige augmente dû à l'augmentation du module d'élasticité du bois, même si le rapport h/d reste constant. Un arbre plus âgé peut supporter plus de deux fois plus de neige qu'un arbre plus jeune, les deux ayant le même coefficient d'élancement, selon les calculs avec des arbres-modèles de Kato&Nakatani (2000).

A l'échelle d'un peuplement, le coefficient d'élancement est largement utilisé de nos jours comme indice de stabilité d'un peuplement entier, ensemble avec la répartition des arbres par catégories de diamètres (Slodičák&Novak, 2006). Rottmann (1985) démontre avec des analyses statistiques que des trois catégories d'épicéas (sans dégât, avec bris de houppier et avec bris de tige), respectivement de h/d moyen 107, 110 et 130, le h/d moyen de la catégorie sans dégâts présente une différence hautement significative par rapport aux deux autres. A propos de ces résultats Ammann (2004) note que „Der Unterschied zwischen unbeschädigten Fichten und solchen mit Gipfelbruch war zwar – dank der großen Anzahl von 4962 untersuchten Bäumen – signifikant, aber fast verschwindend gering (107 zu 110!). Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass der Grad der Schlankheit von Einzelbäumen zwar Trends widerspiegelt, pauschale Folgerungen – z.B. bezüglich kritischem h/d-Wert aber mit Vorsicht aufgefasst werden müssen“. Le coefficient d'élancement présente en effet une singularité étrange, très évidente si le peuplement est dense et non-traité - dans plusieurs répartitions d'arbres par catégories de h/d (cf. Johann, 1980&1981; Rottmann, 1985; Río et al., 1997; Montero et al., 2001), une grande partie et parfois même la majorité des arbres de valeurs de h/d dépassant largement la valeur critique restent intactes après une neige lourde (Fig. 10, à gauche et à droite, où „Parzelle 1“ est un peuplement non-traité).

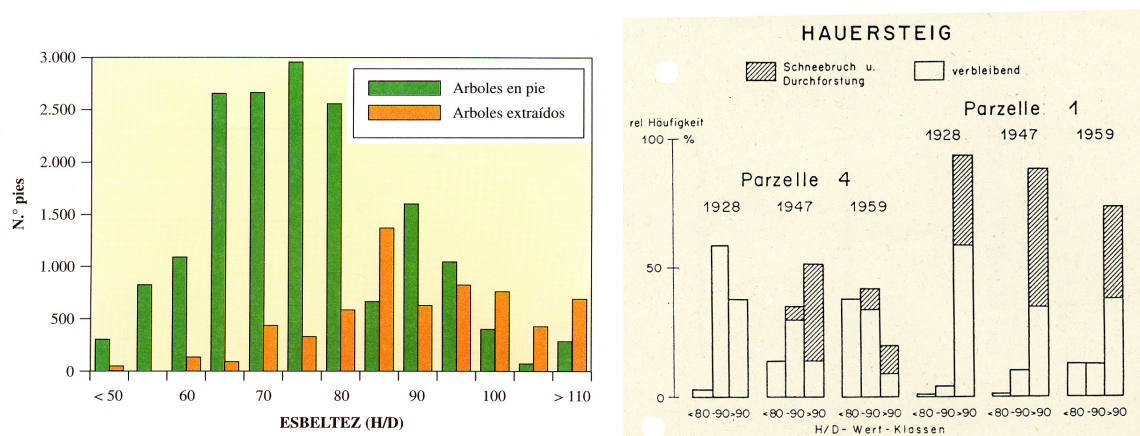


Fig. 10 Répartitions des arbres par catégories de h/d (à gauche Río et al., 1997, à droite Johann, 1980)

Il convient de poser ici la question sur le sens du coefficient d'élancement et sur ce que sa „valeur critique“ indique exactement. Selon les données de l'inventaire forestier fédéral d'Allemagne, „... 30% der Kiefern und 40% der Fichten Schlankheitsgrade aufweisen, die keine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen gelegentlich auftretende mechanische Belastungen durch Sturm oder Nassschnee erwarten lassen. [...] Die Auswertung hat auch gezeigt, dass kritische Schlankheitsgrade in Beständen mit Pflegerückständen um fast 1/3 häufiger sind als in gepflegten Beständen“ (Polley, 1995). Les peuplements non-traités sont pratiquement exclusivement composés d'arbres instables, jugé suivant le coefficient d'élancement. Selon Ammann (2004), qui étudie une série de peuplements d'épicéas denses non-traités, âgés entre 13 et 62 ans, constate que seulement 0.7% des effectifs ont un h/d ≤ 80 et parfois font même complètement défaut, par contre ceux de h/d > 100 représentent 95.8% du total. Pratiquement la même situation se présente à la Fig. 10, „Parzelle 1“, qui au cours de 30 ans subit des dégâts de neige lourde, se présente comme très instable en fonction des h/d de ses arbres et pourtant subsiste toujours en dépit de toute qualification pour servir de placette-témoin. Les valeurs maximales du h/d dans les peuplements étudiés par Ammann (2004) sont entre 170 et 180. Le commentaire d'Ammann: „Die Beurteilung der durchschnittlichen individuellen Stabilität ergibt somit ein geradezu katastrophales Bild. Wie kommt es aber, dass die untersuchten Bestände -welche meist an Nassschneelagen stocken- zum grössten Teil keine, oder dann nur geringfügige Schneebrüche aufweisen, so dass nur in einzelnen

Ausnahmefällen überhaupt von Schäden gesprochen werden kann? Eine Antwort auf diese Frage kann in der guten kollektiven Stabilität gefunden werden: Diese ist umso besser, je dichter die Bestände sind". Comme plusieurs autres exemples dans la littérature montrent, la présence dans un peuplement dense non-traité d'une énorme proportion d'arbres de valeurs du coefficient d'élanement extrêmes n'est pas en soi un indice d'instabilité du peuplement (Ammann, 2004). **En effet, avec le temps, les arbres les plus élancés sont éliminés naturellement du collectif** (Fig. 11, plantations de pin sylvestre, placette-témoin à gauche), **mais le peuplement entier reste intact sur pied. Le coefficient d'élanement ne reflète apparemment pas du tout sa stabilité.**

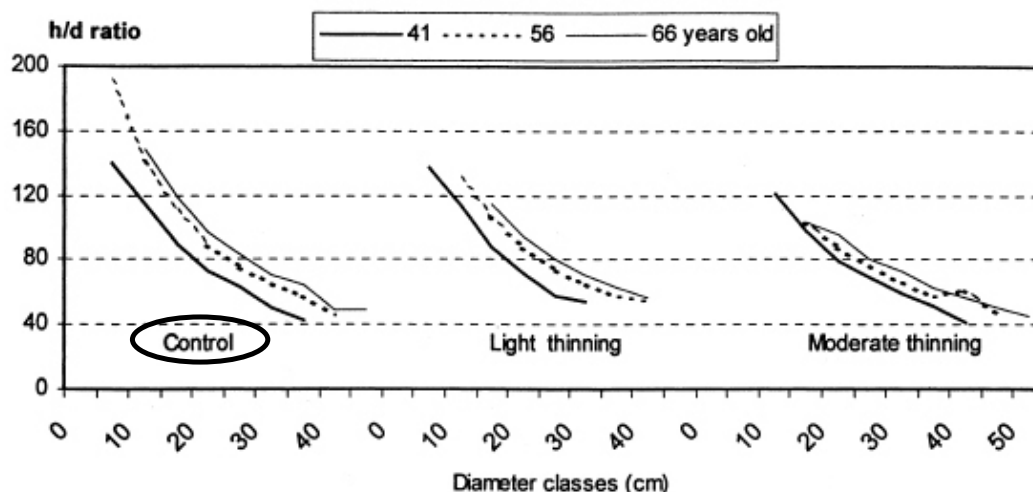


Fig. 11 Evolution du coefficient d'élanement par catégories de diamètres (Montero et al., 2001)

- **l'équilibre instable et la charge critique de flambage**

Du point de vue mécanique, le problème de stabilité pour l'arbre individuel est exprimé par le rapport P_{neige}/P_{cr} , lié avec l'équilibre instable (cf. Fig. 6, p.40). Le dégât est attendu si

Eq. 3 $\frac{P_{neige}}{P_{cr}} > 1$

Cet indice est utilisé par Kufner (1983), Nakatani (1984) et Marsch (1989). Nakatani (1991) démontre que dans un peuplement de cryptoméries du Japon, la P_{cr} moyenne des arbres endommagés est inférieure à celle des arbres intacts (différence statistiquement significative au seuil de confiance de 1%). L'indice de stabilité est aussi un indice de résistance, pour autant que l'arbre soit vertical et le houppier assez symétrique (Nakatani, 1991).

- **Précipitations critiques de neige pour l'arbre individuel (S_{cr})**

Kato&Nakatani (2000) proposent un indice de résistance à la neige lourde, appelé „critical snowfall of single tree” (S_{cr} , kg/m²). Il est calculé séparément pour chaque arbre et représente les précipitations nécessaires pour qu'il subisse un dégât (déracinement ou flambage). Cet indice se base en même temps sur l'indice de stabilité sous Eq. 3 (P_{cr} calculée suivant la méthode développée par Nakatani, 1991) et sur le poids de la neige interceptée par le houppier, estimé sur la base de formules empiriques (cf. §3.4.2). L'indice présente le seuil maximal des précipitations que l'arbre en question peut supporter.

3.5.5 Essais statiques avec des arbres sur pied

Les essais statiques avec des arbres sur pied visent normalement l'étude du comportement mécanique de la tige (résistance à la flexion et module d'élasticité) et de l'ancrage racinaire (rigidité de l'encastrement). Deux genres d'essais statiques avec des arbres sur pied sont généralement pratiqués :

1. Essais de fléchissement **par tirage latéral**¹³ (Fons&Pong, 1957; Wessolly, 1991b; Papesch et al, 1997; Brüchert&Becker, 2000; Brüchert et al., 2000; Peltola et al., 2000; Silins et al., 2000) (Fig. 12).

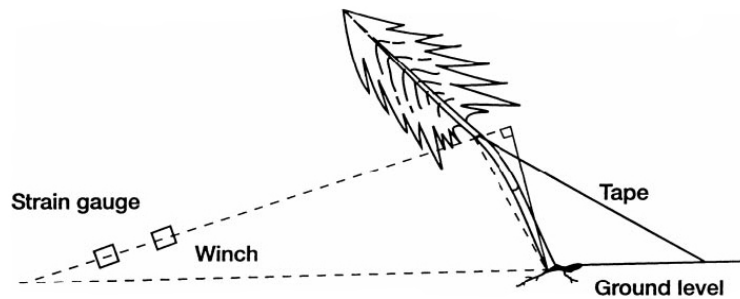


Fig. 12 Installation de l'essai statique par tirage latéral (Peltola et al., 2000)

2. Essais de fléchissement par **charge verticale**¹⁴ (Nakatani et al., 1984; Nakatani, 1991) (Fig. 13). Ce genre d'essai est spécialement conçu pour simuler la charge verticale de la neige lourde. La verticalité est assurée par un réglage permanent à l'aide des deux tireforts.

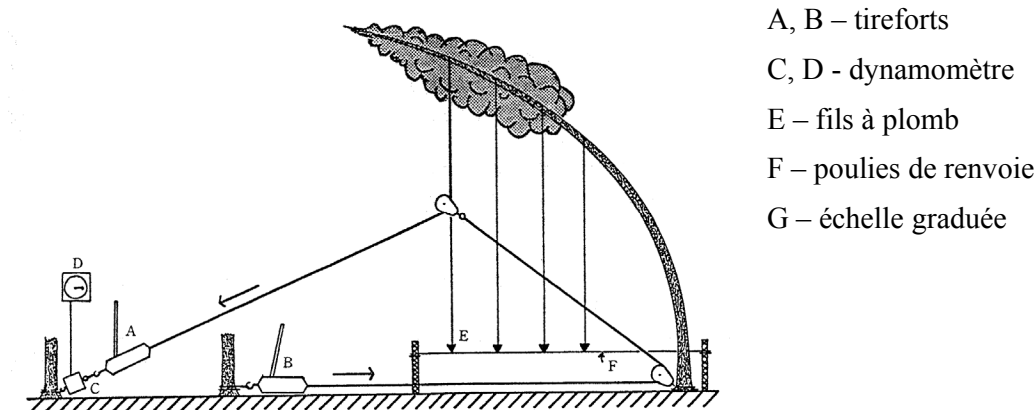


Fig. 13 Installation de l'essai statique par charge verticale (Nakatani et al., 1984)

3.6 Facteurs au niveau du peuplement

Etant donné le thème très focalisé du présent travail de recherche, parmi tous les critères typologiques classiques qui permettent de caractériser et distinguer les peuplements (mode de reproduction, état de développement, structure et texture, cf. Schütz, 1990) on ne va prêter une attention spéciale que sur deux - la position sociale des arbres dans un peuplement de fermeture horizontale comme celui qui fait objet de l'étude et la densité, exprimés par le degré de fermeture. Dans le cas étudié ce sont finalement les seules qui subissent des changements ou semblent jouer un rôle pour la stabilité à l'échelle collective - le peuplement.

¹³ static pulling test , static bending test (angl.)

¹⁴ vertical loading test

3.6.1 Position sociale

Suite à la différenciation naturelle lors du développement d'un peuplement, la variation parmi les individus des caractéristiques morphologiques qui jouent un rôle pour la stabilité et la résistance individuelles ($d_{1.3}$, hauteur, longueur du houppier, etc.) devient plus grande, surtout s'il s'agit de peuplements denses dans un stade de développement avancé, à cause du manque d'interventions conduisant à l'homogénéisation (Ammann, 2004). Les conséquences de la concurrence sur la stabilité individuelle ne se font pas toujours au détriment des classes sociales inférieures. Ainsi, en ce qui concerne les propriétés mécaniques du bois, Brüchert et al. (2000) constatent qu'au sein d'un peuplement les arbres dominés et surcimés montrent la tendance d'avoir un module E structurel supérieur à celui des arbres dominants. Ces arbres montrent également la tendance d'avoir une résistance à la flexion supérieure à celle des dominants (Wütherich, 1988, in Ammann, 2004).

3.6.2 Densité et effets de groupe

En ce qui concerne la stabilité, l'importance de la notion de densité ou fermeture de couvert se traduit par le fait que les arbres dans un peuplement dense sont en mesure d'être en contact physique direct au niveau de leurs houppiers surtout.

Dans le cas du vent, l'état dense favorise la stabilité collective d'un peuplement par l'effet d'amortissement des oscillations (White et al., 1976 ; Rudnicki et al., 2001), la diminution de la rugosité du couvert (moins de rafales en conséquence) et l'effet d'abri du vent que les arbres s'offrent mutuellement (Vanomsen, 2006). La stabilité collective a naturellement ses limites. Les ouragans peuvent provoquer la destruction totale des peuplements entiers. La désintégration d'un peuplement commence alors avec un dégât initial, subit par un arbre élancé de faibles dimensions. La trouée qui en résulte augmente et si les éléments les plus stables cèdent aux sollicitations du vent, un effondrement sur une grande surface est provoqué (Schütz, 2006, in Vanomsen, 2006). Le déroulement de la désintégration d'un peuplement est un processus extrêmement complexe qui n'a que peu été étudié jusqu'ici (Vanomsen, 2006).

Les interactions dynamiques entre les houppiers des arbres oscillant sous l'effet du vent ont été déjà directement étudiées. Pour la première fois Rudnicki et al. (2001) ont mesuré le comportement de fléchissement des arbres à l'échelle d'un peuplement ainsi que la fréquence et les collisions entre les houppiers. Ainsi ils ont constaté en moyenne 65 collisions/minute entre les houppiers des arbres voisins lors des vitesses de vent entre 4.5 et 10 m/s.

Dans le cas de la neige lourde, il semble encore plus difficile d'étudier les interactions statiques possibles entre les arbres dans un peuplement dense, car elles sont apparemment moins bien exprimées. L'état très dense (peuplements non-éclaircis), exprimé par le degré de plénitude, est en général selon Rottmann (1985) associé avec moins de dégâts de neige lourde (Fig. 14). Rottmann interprète cela ainsi „In noch dichteren Beständen nahmen die Bruchprozente wieder ab, weil **sich dort die Bäume gegenseitig so sehr stützen**, dass Einzelbrüche nur in geringem Umfang vorkommen“.

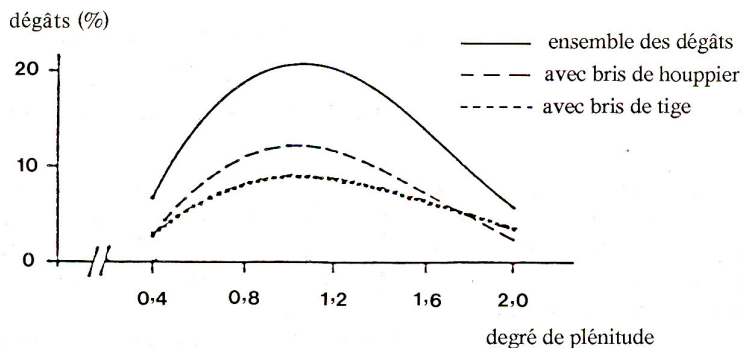


Fig. 14 Dégâts de neige lourde (% du volume sur pied) et densité des peuplements (Rottmann, 1985)

L'observation mais aussi l'explication de ce phénomène sont probablement presque aussi vieilles que la sylviculture elle-même. Dans une revue forestière de 1764 on peut lire que „Eine andere Verwüstung des besten Holzes macht Glatteis und Schneebruch. Obwohl dieselbe nicht gänzlich zu verhindern, so sind doch **voll gewachsene** Orte darwieder einigermaßen (ich würde sagen: größtenteils) zu verwahren, wenn nämlich durch Aushauungen oder Ausplänterungen **keine Lücken** darin gemacht werden, damit ein Stamm an den anderen **sich halten** und keine Gelegenheit finden **möge**, sich auf eine oder die andere **Seite zu beugen**“ (Stahl's Forstmagazin, in von Berg, 1847).

La densité peut être exprimée par le nombre d'arbre/ha, par un coefficient, par le degré de couverture ou par le degré de plénitude (Schütz, 1990). Il semble pourtant que toutes ces expressions au niveau du peuplement sont assez grossières et ne reflètent pas les processus au niveau de l'arbre individuel. Il semble plus pertinent, comme dans le cas du vent, de se concentrer sur les interactions entre des arbres voisins.

Dans la littérature peuvent être trouvées plusieurs remarques sur les interactions possibles (observées directement ou pas) sous la charge de la neige ou du verglas. L'estimation des auteurs du rôle de ces interactions divergent considérablement. Les interprétations vont dans les deux extrêmes (amélioration vs. réduction de la stabilité). Ci-dessous l'ensemble des citations trouvées dans la littérature :

Selon Ammann (2004): „Die kollektive Stabilität findet in der Literatur kaum Beachtung: Eigentliche Untersuchungen existieren bisher nicht. Während viele Autoren die kollektive Stabilität nicht erwähnen, machen andere zwar interessante und teilweise überraschende Feststellungen, ohne aber daraus konkrete Folgerungen für Konzepte abzuleiten. Die Doktrin der flächigen, individuellen Stabilisierung ist seit den Untersuchungen der 1970er und 80er Jahre fest zementiert“. En réalité, la dernière étude qui essaye d'estimer directement l'effet de support entre arbres voisins est celle de Schöpfer (1964). Dans un cas de dégâts il explique la majorité des bris de houppier chez les arbres dominants par rapport aux codominants et aux dominés ainsi: „... die geringere Bruchquote bei den Zwischenständern dürfte dagegen auf die **relativ sichere Stellung dieser Bäume im Schutze des Kronenmantels der dominierenden Nachbarn zurückzuführen** sein. Diese Schutzwirkung der herrschenden Schicht auf die **eingeklemmten** zwischenständigen Fichten...“. Avec cette interprétation, Schöpfer s'est exposé à une critique acharnée de la part de ses contemporains (Schöpfer, 1964).

Selon Schütz (1990) „Alors que la stabilité individuelle représente le risque de cassure pour un arbre pris intrinsèquement, c'est-à-dire hors du contexte du collectif qu'il compose, la composante collective de la stabilité repose sur **l'effet de massif** du collectif d'arbres. Lorsqu'un peuplement, même constitué d'éléments frêles et élancés, individuellement

sensibles aux bris, est encore compact et dense, il peut bien résister aux effets du vent et de la neige, parce que sa stabilité repose sur un **effet de bloc**. Les arbres, en s'étayant mutuellement, **se soutiennent** et s'empêchent notamment de trop se balancer. Le problème commence lorsque l'on s'avise d'ouvrir le peuplement, par des éclaircies, qui en fait seraient nécessaires à améliorer, à moyen terme, la stabilité individuelle. Lorsque les individus intrinsèquement instables, du moins ceux formant l'ossature du peuplement, ne sont plus étayés, et que l'amplitude de leur balancement augmente, même légèrement, il peut y avoir d'un seul coup une perte pratiquement totale de la stabilité en forêt“.

Selon Marsch (1989) „Die kollektive Tragfähigkeit ist nicht einfach die Summe der individuellen Tragfähigkeit, sondern ergibt sich aus der individuellen Tragfähigkeit und aus den Rückwirkungen der Bäume auf die Umwelt und den **Wechselwirkungen zwischen ihnen**“. Marsch nomme ses interactions entre les arbres „innere Stützgefüge“ sans pour autant les identifier et explorer comment ils fonctionnent. „Mit zunehmendem Dichtschluss kommt es zu einer **gegenseitigen Kronenüberschirmung der einzelnen Bestandesglieder**, wovon im Hinblick auf eine Schneelastverringerung die zwischen- und unterständigen Bäume am stärksten partizipieren. Après avoir exprimé la stabilité collective par une formule qui se base sur les coefficients d'élancement (cf. §3.6.4, p. 59), Marsch arrive à la conclusion que „Die Verringerung der Belastung (Schneelast) durch kollektive Rück- und Wechselwirkungen ist aber nicht entscheidend, da auch die Tragfähigkeit der Bestandesbäume mit abnehmendem Schlankheitsgrad zunimmt.“ D'autres auteurs voient aussi l'expression de la stabilité collective uniquement dans une réduction possible de la charge de la neige pour certains arbres sous le couvert d'autres. „However, slender trees can be quite stable, because these trees **may be sheltered** from snow and wind **by other trees**“ (Persson, 1972, in Peltola et al., 1997).

Selon Giesch (1863) „Bei vollkommen dichtgeschlossenen Beständen bleibt der Schnee gänzlich auf den Ästen liegen, so dass der Wald **steckenweise förmliche Gewölbe** bildet und dann **auf einmal unter der schweren Schneelast zusammenbricht**“.

Selon Möhring (1981) „Nur zu oft hat sich in der Vergangenheit bei in dichtem Schluss stehenden Beständen das vermeintliche „**Stützgefüge**“ – bestehend aus vielen schwachen Individuen – bei starker Schnee- oder Eisbelastung als – wortspielerisch bezeichnet – **Sturzgefüge** herausgestellt; die Folge waren Nester- oder gar ganze Flächenbrüche (Anonymus&Keller, 1887; Chroust, 1968)“.

Selon Cremer et al. (1983) „Contrary to popular belief, the evidence presented in this paper [...] and elsewhere [e.g. Kramer 1979; Johann, 1981] shows clearly that **resistance to snow damage increases with decreasing stand density and decreasing height/spacing ratios**. It is often claimed (Möhring, 1981)¹⁵ that dense stands are more resistant to snow because their crowns interlace and provide mutual support. This may be true for shrubberies or thickets, but is rarely or never true for tall trees, because significant interlacing is usually prevented by abrasion when the tree sways”.

Selon Huss (1998) „Bei fehlender oder nur geringer Pflege kommt es oft zu **gruppenweisen Schädigungen**, da die „anlehnsbedürftigen“ Bäume ihre meist auch nicht sehr viel stabileren **Nachbarn mit „ins Unglück reißen**“. Die Schäden sind umso stärker, je weniger zwischen- und unterständige und damit instabile Bestandesglieder früher entnommen wurden.“ [...] Lediglich in den undurchdorsteten Parzellen waren auch stärkere Bäume [...] betroffen. (Hier kam es teilweise **durch gegenseitiges Anlehnen von Nachbarbäumen zu gruppenweisen Schädigungen**)“.

¹⁵ une assertion de Möhring (1981) dans ce sens n'a pas pu être trouvée

En ce qui concerne les observations des interactions entre les arbres en fonction de la densité et leurs conséquences sur la stabilité sous le poids du verglas, Bragg (2003) donne un résumé intéressant : „Density may also influence ice damage in unexpected ways. Cain and Shelton (2002) reported that **collisions from falling neighbors** was the most obvious risk factor in a natural, unthinned 18-year-old stand of loblolly and shortleaf (*Pinus echinata* Mill.) pine. Thinning reduces collision effects by placing greater spacing between trees. Sometimes the glazed crowns of **closely packed neighbors form a large, solid mass** (e.g., von Schrenk, 1900; Kienholz, 1941), **which may contribute to mutual support or group failure**. If the trees gain support from neighbors or their own branches reaching the ground, then the ice load is better distributed and the damage may be lessened (Rogers, 1924; Metcalfe, 1949). However, if structural failure affects even a single tree in this aggregate, its inertia can cause the whole mass to fail (Kienholz, 1941; Fenton, 1959). Cain&Shelton (2002) affirment que „High pine density plus ice in these [unthinned] stands resulted in a **domino effect** – as these unthinned pines began to bend from the ice, their neighbours were forced to bend in the same direction because of intertwined crowns”. Toujours à propos des dégâts de verglas, Sanzen-Baker&Nimmo (1941) écrivent „It is evident that **adjoining crowns of equal height** gave each other **mutual support**.” [...]. When the thaw started and released the individual crowns of the trees which had been **welded together** by the ice coating ...”

Selon Anonymus&Keller (1887), „Je kleineren Abstand der einzelne Baum von seinen Nachbarn hat, desto mehr ist er von den letzteren abhängig, und wenn auch diese Nachbarschaft einerseits bei unbedeutenden und zu Anfang von bedeutenden Schneefällen **durch die Möglichkeit der Anlehnung einen nicht zu unterschätzenden Schutz gewährt**, so wird andererseits die Gefahr für den Einzelbaum erhöht, sobald die Last eine sehr grosse ist. Bei gedrängtem Stande, namentlich im jüngeren Stangenholzalder bilden sich häufig in den Kronen mehr oder weniger umfangreiche geschlossene Schneedächer, deren Gewicht zunächst gemeinsam getragen wird; giebt nun eines der schwächeren oder der Randstämmchen nach, so verschiebt sich die Last des Schneedachs und **wird in den Sturz eines einzelnen Bäumchens die ganze Gesellschaft vernichtet**, und es entstehen Lücken, deren Ränder sodann auf dieselbe Weise sich allmählich zu umfangreichen Druck- und Bruchlöchern erweitern. Auch bei grösserem Abstand der Bäume von einander, wie er sich mit zunehmendem Alter ergibt, können **einzelne fallende Bäume** vermöge ihrer erheblichen Länge und ihres bedeutenden Gewichts **die benachbarten durch Umbrüchen oder Zusammenschlagen gefährden, diese wieder andere u.s.f., und auf diese Weise auch in älteren Beständen erhebliche Lücke entstehen**.“ Dans d'autres descriptions de peuplements endommagés on peut lire que „Besonders ungünstig hat sich bei dichtem Stand der Druck gezeigt, bei welchem **im Fallen andere Bäume mitgerissen wurden** ...“.

„... once a small patch of snowbreak starts, it grows larger every year. Trees along the edge of the patch, **having lost support**, bend into the opening under snow weight.“ (Trappe&Harris, 1958, in Miller, 1964).

Duterme (1965): „C'est ainsi qu'on y observe des îlots ayant résisté, grâce à la présence de **quelques bons piliers** qui ont soutenu les plus faibles [arbres] entre eux“.

„23% aller geschädigten Bäume [...] waren mehr oder minder stark gebogen, aber nicht abgebrochen. Diesem Schicksal waren sie entgangen, weil sie sich **an Nachbarn hatten anlehnen können**“ (Huss, 1998).

Selon Spellmann et al. (1984): „In den gleichaltrigen Pflanzbeständen waren die Schneeschäden an den Bestandaussen- oder Bestandesinnenrändern trotz besserer h/d-Werte und Kronenprozente der Kiefern stets grösser als in den Innenbeständen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass **den Randkiefern einseitig die Anlehnungsmöglichkeiten an**

Nachbarbäume fehlen und dass sie zum Rand hin länger bekront sind, was statische Nachteile mit sich bringt“.

La meilleure description du point de vue mécanique de l'effet de la densité et des interactions de support mutuel des arbres (dans des peuplements d'épicéas) qu'on a pu trouver est donnée par Vorreiter (1937): „Das Zustandekommen einer Biegebeanspruchung des Baumschaftes hängt somit bei senkrecht gerichteter Auflast von gewissen Voraussetzungen für die Vergrößerung bezw. für das Überwiegen der biegenden Teilkraft ab. Diese Voraussetzungen bestehen einerseits im Verhältnis der Knicklänge des Schaftes (d.i. vom Schwerpunkt der Lastresultierenden bis zum Baumfuß) zur Schaftstärke, ferner in der Größe der Biegekraft und **schließlich, was hier sehr wesentlich ist, im Vorhandensein des für die Ausbiegung erforderlichen Bewegungsraumes. Ist letzterer, wie z.B. bei dichtem Bestandesschluss, so klein, das die Biegung durch eine Auflast nur solange möglich ist, bis die Baumkrone eine Stütze an der eines stärkeren Nachbarstammes findet**, bevor der Schaft die äußerst zulässige Biegebeanspruchung erlitten hat, so kann die Bruchgefahr behoben sein. Vorausgesetzt ist natürlich, dass **die Stütze steif genug ist**. Es ist aber auch vielfach beobachtet worden, dass die Kronen einer Baumgruppe sich bei starker Belastung **gegeneinander neigen und gegenseitig abstützen**, sie bleiben dadurch meist vom Bruch verschont, **selbst dann, wenn die Auflast so groß ist, dass sie den Einzellstamm längst geknickt hätte. Geht aber eine Stütze im Tragsystem einer solchen Baumgruppe verloren und kommen die in Bewegung geratenen übrigen Stützen nicht wieder ins Gleichgewicht, so muss unter Umständen mit dem Zusammenbruch der ganzen Baumgruppe gerechnet werden. Er erfolgt**, da hier der Sachlage entsprechend eine größere Biegung nicht möglich ist, **meist durch Knickung**. Manchmal werden die Baumkronen durch sogenannte „Eispanzer“ (nach Rubner¹⁶) umhüllt, die durch aufgetauten und wiedergefrorenen Schnee und Rauhreif entstehen, sich zu einem **festgefügtem Ganzen verbinden und die darin befindlichen Bäume vor dem Bruch bewahren**. Wegen der größeren Bewegungsraumes zwischen den einzelnen Baumwipfeln ist stets die Möglichkeit einer unbehinderten Biegung der Wipfel unter der Last bis über die zulässige Biegebeanspruchung hinaus gegeben. Aus diesem Grunde müssen Wipfel- und Kronenbrüche in geschlossenen Beständen vorherrschen, was auch tatsächlich der Fall ist¹⁷. **Schaftbrüche sind**, diesen Überlegungen entsprechend, **vorwiegend an Bestandesrändern, in Löcherhieben, in Vorverjüngungsschlägen und bei plötzlichen Freistellungen anzutreffen, weil dort wohl die Voraussetzungen für eine starke Durchbiegung, aber nicht für die Bildung eines Stützsystems bestehen, das sich aus nur wenig gebogenen Einzelstützen zusammensetzt**“.

Vorreiter (1937) est un des rares, sinon le seul à interpréter l'asymétrie du houppier de façon positive : „Eine ausschlaggebende Bedeutung für die Widerstandsfähigkeit eines Baumes gegen Bruchlasten hat anerkanntermaßen die Kronenform. Am ungünstigsten ist eine einseitige Krone, durch die das Zustandekommen eines Biegemoments ungemein gefördert wird. Schließlich sich, wie **bei Dichtzustand, mehrere einseitig bekronte Stämme so zusammen, dass sie gegenseitig eine Stütze bilden, dann verlieren einseitig ausgebildete Kronen teilweise ihren Nachteil.**“

Stephani (1933), pour les peuplements d'épicéas: „Ich bin der Ansicht, dass **die gegenseitige Stützung der Stämme im Kronendach ein recht wichtiges Mittel zur Verminderung von Schneebruchschäden ist**, welches nicht genügend beachtet, dessen Wirksamkeit vielleicht sogar angezweifelt ist.

¹⁶ il s'agit de Rubner, K., 1934. Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaues. Neudamm

¹⁷ cf. aussi Schöpfer (1964)

Sehr häufig ist die für den Eintritt der Schneebruchschäden **kritische Zeitspanne** [dans la vie du peuplement?] **nur von kurzer Dauer**. Dabei darf man wohl annehmen, dass sie am leichtesten überwunden wird, wenn **die einzelnen Bäume, von denen der eine stärker oder einseitig vom Schnee belastet ist als der andere, sich gegenseitig wirksame Hilfstellung geben können**. Dieser günstige Umstand dürfte auch besonders bei Schneebruchschäden geringeren Ausmaßes eine wichtige Rolle spielen.“

Haufe (1934), qui résume les témoignages de plusieurs forestiers de terrain: „Andererseits sind **schlechtgepflegte Bestände mit einseitiger schlechter Bekronnung natürlich umso weniger gefährdet, je dichter sie stehen. In solchen Beständen ist es wesentlich, dass die Fichten sich aneinander anlehnen können. Sind etwa durch eine starke plötzliche Hochdurchforstung die Fichten der Möglichkeit des gegenseitigen Anlehns beraubt**, dann wird der Schaden in exponierter Lage besonders gross sein.

Das Forstamt Grottendorf berichtet hierzu: „**Durch die Last des Eisanhanges bogen sich die Fichten gegeneinander, bildeten zu 6 oder 8 Stück eine einzige Krone, stützten sich gegenseitig und blieben hierdurch vor Bruch bewahrt**. Nur einzelne Bäume im Bestandsinneren, die nicht einen durch Zufall erreichten Stützpunkt gefunden hatten, wurden gebrochen. Lockere Bestände, die aus irgendwelchen Ursachen keine regelmässige Stammverteilung zeigen, sind besonders aus dem Grunde, dass die einzelnen Stämme oft gegenseitig keinen Halt fanden, in stärkerem Masse gebrochen worden als die Bestände mit regelmässiger Stammverteilung oder dicht geschlossene Bestände.“

En résumé :

- La totalité des opinions des dernières décennies à l'égard de la stabilité collective sont négatives, à l'exception de Schütz (1990) et d'Ammann (2004). Par contre, jusqu'aux années 50 du XXème siècle, les forestiers considéraient unanimement les interactions de support comme une garantie pour la survie mécanique du peuplement, soutenant leurs positions par de précieuses observations. De nos jours, ces observations ne seraient pas acceptées comme des arguments scientifiques suffisants au profit de la stabilité collective. Il est cependant évident que les interactions de support mutuel existent, que les arbres en état dense réagissent ensemble en résistant sous le poids de la neige, en formant des systèmes de support qui d'une part assurent la survie collective mais dont la désintégration d'autre part conduit à des dégâts par surfaces (en groupes). La nature ambiguë des interactions (Tab. 5) qui mènent à des conséquences aussi bien positives que négatives est apparemment à l'origine de la divergence des opinions sur cette forme de stabilité.
- Il n'y a aucune définition de la stabilité collective. Par conséquent, il n'y a pas d'expression quantitative qui peut servir de comparaison objective entre les peuplements ou les situations différentes.
- Il paraît que la façon dont la stabilité collective fonctionne est étroitement liée à l'asymétrie des houppiers.

Conséquences positives	Conséquences négatives
mutual support, Stützsystem, gegenseitige wirksame Hilfstellung, effet de block, effet de massif, Stützgefüge, bons piliers qui soutiennent les plus faibles	collisions/Sturz, groupe failure/Flächenbrüche/gruppenweisen Schädigungen, Zusammenbruch, Zusammenschlagen, Stützgefüge, die Nachbarn ins Unglück mitreißen, domino effect

Tab. 5 Conséquences (tirées de la littérature) des interactions entre les arbres

3.6.3 Effet domino

Sous „effet domino” on entend en général „a small change which will cause a similar change nearby, which then will cause another similar change, and so on in linear sequence, by analogy to a falling row of dominoes standing on end. The domino effect also relates to a chain of events”¹⁸ Dans le cas des dégâts de neige lourde, il s’agit de la situation où un arbre endommagé occasionne un dégât chez un deuxième arbre, le deuxième chez un troisième et ainsi de suite. Etant donné que les interactions entre les arbres sont peu étudiées jusqu’ici, le mécanisme de transmission des dégâts l’est encore moins. L’effet domino est rarement identifié et explicitement mentionné dans les travaux de recherche sur les dégâts de neige lourde. Il s’agit surtout de réflexions embrouillées ou de remarques fragmentaires. Ainsi selon Cremer et al. (1983) „Snow damage in dense stands tends to occur in patches, while damage in sparse stands affects trees individually (e.g. Kangur, 1973). Trees which have collapsed in patches are often very tangled. There is no doubt that when one tree collapses onto another loaded tree it may cause the latter to collapse also. This is the chain reaction or „domino effect”. It occurs when trees are only marginally stable and the ratio of the tree height to the distance between trees is high (>3)”. Dans ses observations de dégâts de neige chez la cryptoméridie du Japon, Nakatani (1991) mentionne que „... among the broken trees could be found a case of **joint falling due to damaged neighboring trees**. [...] because the process of occurrence of such damages can not be conceived in its essence, more specific attention on these issues has not been paid”. Curtis (1936) décrit une situation semblable „In one instance, 11 Douglas fir were found grounded in one group, creating a large opening in the stand. [...] It was found upon examination that this **mass fall** had been **induced by two one-sided key trees**. These two has taken three others with them in their fall, and it was concluded by cross sectioning and ring count that the remaining ones had followed their neighbors into the recently created opening in subsequent years. It is not impossible that many cases of so called **mass breakage** could be traced to a similar initial case”. Une partie des exemples d’effets domino a été déjà donnée au chapitre précédent (cf. §3.6.2, Anonymus&Keller (1887)).

Faute d’indications dans la littérature revue, on se permet de conclure que l’apparition et le développement de l’effet domino sous la charge de la neige n’ont jamais été étudiés concrètement. Dans le cas du verglas, Kuhl&Norra (1992) semblent être les seuls à avoir directement abordé le phénomène, sans pour autant aller trop dans les détails. Des indices évidents de l’effet domino ont été cependant constatés dans la parcelle d’étude du présent travail de recherche après une neige lourde (cf. §6.7), ce qui a forcé la recherche d’outils appropriés de description et d’analyse du phénomène.

L’étude ciblée de l’effet domino fait partie des recherches sur la formation d’ouvertures du couvert¹⁹ dans les forêts tropicales. Dans une forêt de la Guyane française van der Meer&Bongers (1996) constatent que chez 75% des arbres renversés et 83% des arbres endommagés la cause a été l’effet domino. Selon eux „Some gap studies differentiate between the initiator of a gap („gap-maker”) and the remaining felled trees (e.g. Runkle, 1982; Veblen, 1985; Durrieu de Madron, 1994, in van der Meer&Bongers, 1996), and in an analogical way, we can distinguish between *initiating* tree- and branch-falls the subsequent *domino events*. An important distinction is that the causes of domino tree-falls are initiating tree-falls, whereas the causes of initiating tree-falls are not so easily explained”. Parmi les causes qui expliquent la chute d’un arbre-initiateur d’un effet domino, van der Meer&Bongers mentionnent sa proximité d’une ouverture du couvert. Cette proximité est tenue responsable pour la formation

¹⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Domino_effect

¹⁹ canopy gaps formation (angl.)

de houppiers asymétriques par les arbres situés à la bordure des ouvertures, ce qui les rend significativement plus prédisposés à tomber en direction de l'ouverture (Young&Hubbell, 1991). Cremer et al. (1983), pour des arbres endommagés par la neige lourde, fait une remarque dans le même sens: „... trees thus tend to fall towards the open, i.e. away from their closest neighbour”.

Dans la présente étude, l'ensemble d'arbres endommagés en série sera appelé **chaîne d'effet domino**. On admet qu'une chaîne est composée d'au moins deux arbres – un arbre-initiateur et un arbre touché par lui. La chaîne d'effet domino sera caractérisée par le nombre d'arbres impliqués, par sa longueur (distance horizontale entre le pied de l'arbre-initiateur et celui du dernier arbre touché), par la présence de bifurcations (un arbre touche deux ou plusieurs autres arbres qui à leur tour créent des ramifications séparées de la chaîne initiale, à l'instar des réactions nucléaires). Lors de l'analyse des dégâts dans la parcelle d'étude, certains outils d'analyse additionnels ont dû être développés à cause de la révélation de certains aspects inconnus des effets domino. Ils seront présentés ensemble avec les résultats de l'analyse (cf. §6.7.2).

Les caractéristiques de l'éclaircie sélective (enlèvement d'arbres isolés résultant dans des multiples espaces libres) présentent beaucoup des similitudes avec la formation naturelle d'ouvertures du couvert dans les forêts tropicales. La perte de stabilité de certains éléments du collectif, les interactions avec les voisins, les facteurs au niveau de l'arbre individuel qui favorisent le processus (grandeur et direction de l'asymétrie du houppier) sont des aspects communs entre le thème de la stabilité par rapport à la neige lourde et la dynamique de la structure des forêts tropicales. A la place de la neige lourde, la charge extérieure verticale qui peut provoquer la déstabilisation dans les forêts tropicales est la charge de la pluie²⁰, non négligeable dans ces latitudes. Encore un point commun intéressant à l'égard de la stabilité est exprimé dans une remarque de van der Meer&Bongers (1996) „The creation of a canopy gap may have destabilized or damaged surrounding trees, enhancing the chance that these trees fall in the near future”. Il s'agit notamment dans le présent travail d'étudier l'effet de la coupe, créant des espaces libres, sur le statut mécanique des arbres restant sur pied en bordure de ces espaces.

3.6.4 Stabilité collective du point de vue mécanique

Pour certains auteurs, la stabilité (collective) d'un peuplement ou d'une placette se laisse estimer simplement en fonction du nombre (Abetz&Prange, 1976; Río et al., 1997;) ou du volume (Wenk et al., 1982, in Marsch, 1989) des arbres endommagés après une neige lourde. Plus ils augmentent, moins bonne est la stabilité collective. Par conséquent, les peuplements denses non-traités sont considérés par ces auteurs comme collectivement moins stables. Comme déjà énoncé, il s'agit d'une fausse interprétation de la mortalité naturelle comme un signe d'instabilité (cf. §3.3).

Selon Schütz (1999, in Ammann, 2004) „Für die Stabilität entscheidend sind – nebst der kollektiven Stabilität – die stärksten Bäume, welche auch den tiefsten h/d-Wert aufweisen. Sie werden als Gerüstbäume²¹ bezeichnet“. Ammann (2004) avance l'hypothèse que „Die Gerüstbäume bewirken eine Vernetzung der Stabilitätsfunktion; je weniger Lücken dieses Netz aufweist (d.h. je regelmässiger die Verteilung der Gerüstbäume), desto höher die Stabilität“. Ammann définit le nombre minimal d'arbres d'ossature dans un peuplement dense non-traité d'épicéa à 200/ha, afin que la stabilité collective soit garantie et démontre qu'ils

²⁰ rain load (angl.) (Strong 1977, Brokaw 1985, in van der Meer&Bongers 1996)

²¹ arbre d'ossature (en français)

sont répartis de façon aléatoire sur la surface (c.à.d. pas strictement régulière mais non plus en agrégats).

Les aspects mécaniques de la stabilité collective n'ont pas été directement étudiés jusqu'ici. Marsch (1989) essaye de représenter la stabilité collective par une formule (Eq. 4). Les interactions à l'échelle du peuplement sont exprimées par un produit des rapports „charge critique/charge potentielle maximale“ (niveau arbre individuel) pour chaque classe de coefficient d'élancement, pondérés par des exposants en fonction de la proportion des arbres des différentes classes dans le collectif. Malgré le fait que la formule proposée garde les éléments mécaniques importants au niveau de l'arbre individuel, l'extension de sa validité à tout un collectif ne se fait plus sur la base de vraies interactions mécaniques entre les arbres mais reflète uniquement un effet de masse en fonction du nombre. La formule n'est ni issue de l'expérience ni liée à un modèle mécanique. Son application dans le travail de Marsch se réduit à des calculs théoriques avec des peuplements-modèles.

$$\text{Eq. 4 } T_B = \prod_{i=1}^k \left(\frac{P_{K;B,i}}{P_{0,D;B,i}} \right)^{\frac{n_i}{N_B}} \quad T_B - \text{Tragfähigkeit des Bestandes (kollektive Tragfähigkeit)}$$

$P_{K;B,i}$ – Beanspruchbarkeit der Bäume eines Bestandes (kritische Last P_K an der „Einspannstelle“

$$\text{Eq. 5 } T_B = \prod_{i=1}^k \left(\frac{P_{K;B,i}}{P_{0,D;B,i}} \right)^{\frac{n_i}{N_B}} \geq 1 \quad P_{0,D} - \text{Beanspruchung der Bäume eines Bestandes (gemessen an Längsdruckkraft infolge Kronen-, Schaft- und Schneegewicht)}$$

k - Anzahl der h/d-Wert-Klassen

n_i – Anzahl der Bäume einer h/d-Wert-Klasse

N_B – Anzahl der Bäume des Bestandes

S'appuyant sur le travail de Marsch, Thomasius (1988) fait l'assertion que dans le cas de la neige lourde (à la différence du cas du vent), la stabilité au niveau du peuplement s'explique principalement par la stabilité individuelle des arbres: „Außerdem wurde festgestellt, dass die Belastung einzelner Bäume durch Schnee primär nur von ihrer eigenen Morphologie (Auflagefläche der Krone) und von der Schneemenge abhängig ist, die nicht signifikant vom Baumkollektiv beeinflusst wird. **Im Falle Schnee ist darum die Stabilität eines Bestandes im wesentlichen ein Problem der individuellen Stabilität**, über die das Model von Marsch [1986] Auskunft gibt“.

3.7 Incidences des activités humaines

3.7.1 Conséquences immédiates

La vulnérabilité des peuplements (surtout de conifères) à l'égard de la neige lourde dans la période **immédiatement après des interventions** (nettoyements, éclaircies) est un problème bien connu et maintes fois constaté depuis au moins 150 ans (Bühler, 1886; Anonymus, 1887; Haufe, 1934; Grünig, 1963; Chroust, 1969b; Kostov, 1971; Merkel, 1975; Abetz&Prange, 1976; Pollanschütz, 1980; divers auteurs cités dans Rottmann (1985) /Giesch (1863), Schwappach (1924), Haakh (1940), Huss (1979), Kohl (1981)/ ; Río et al. (1997), Cameron (2002), Ammann (2004). **La période de déstabilisation** après une éclaircie dure selon les différents auteurs entre 2-5 jusqu'à même 5-10 ans (Rottmann, 1985). Ceci est valable surtout pour des peuplements régulièrement traités.

Pour les peuplements non-traités le danger de déstabilisation est encore plus prononcé. Selon Jehle (1995), „Jede Durchforstung führt zu einer vorübergehenden Labilisierung des Bestandes. Diese ist um so grösser, je später der Eingriff erfolgt. Je früher und je geringer die

Zahl der Eingriffe, desto geringer ist das Risiko in seiner Summe des Bestandeslebens“. Selon Rottmann (1985) „Der Durchforstungszeitpunkt ist auch deswegen von besonderer Bedeutung für die Stabilität von Beständen, weil auf jeden Durchforstungseingriff zunächst eine Phase der Instabilität folgt. Diese dauert umso länger, je stärker das Stützgefüge innerhalb des Bestandes unterbrochen wird und je ungünstiger Schlankheitsgrad und Kronenlänge sind. Je länger Bäume in ungepflegten Beständen Dichtstand etragen müssen, desto labiler sind sie aufgrund hoher Schlankheitsgrade und unzureichender Kronenentwicklung. Die individuelle Stabilität erhöht sich nach der mit der Durchforstung verbundenen Wuchsraumerweiterung nur sehr langsam. Dies dauert umso länger, je älter die Bäume sind“. Selon Huss (1983) „Unmittelbar nach starken und besonders nach zu späten und dann zu starken Eingriffen muss mit einer erhöhten Instabilität gerechnet werden (Huss, 1974). Haben Bestände diese allerdings unbeschadet überstanden, so sind sie generell deutlich weniger gefährdet“. Les peuplements d'épicéas (H_{dom} 15-25m) non-traités et récemment éclaircis sont estimés plus vulnérables à la neige que les peuplements denses non-traités, surtout si les derniers montrent une bonne différenciation (Pollanschütz, 1980). Le même résultat se constate dans le dispositif avec différents types d'éclaircie tardive dans un haut perchis de pin sylvestre (Río et al., 1997). La neige lourde cinq ans après la première intervention provoque moins de dégâts (en valeurs absolues et en % du volume avant la neige) dans la placette-témoin que dans les placettes éclaircies par le bas ou par le haut. En résumé, la vulnérabilité relative peut être présentée sous la forme de Fig. 15.

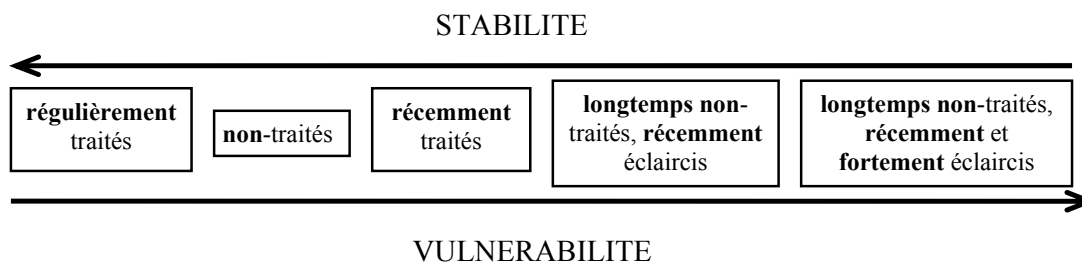


Fig. 15 Stabilité vs. vulnérabilité relative des peuplements en fonction de l'état culturel et du moment par rapport à la dernière intervention

Les conséquences d'une intervention tardive sont particulièrement néfastes si elle est une **éclaircie par le haut**, étant en même temps aussi celles qui sont les plus efficaces en termes de conformation des houppiers (Schütz, 1990). Dans le dispositif d'éclaircies tardives de Río et al. (1997) qu'on vient de citer, le plus haut taux des dégâts (31%) se constate dans la placette éclaircie par le haut. Etant donné que la première éclaircie sélective est une éclaircie par le haut caractérisée (Schütz, 1990), l'objectif du présent travail de recherche s'avère un vrai défi sylvicole. Dans l'essai d'éclaircie sélective tardive modérée (peuplement d'épicéas traité pour la première fois à l'âge de 50 ans) de Merkel (1975), pendant l'année suivant l'intervention la neige lourde a détruit 20% des 330 arbres de place/ha. Selon Merkel „Dieser Bestand hat auch in den folgenden Jahren durch laufende Bruchschäden im Zwischen- und Unterstand nie mehr dichten Kronenschluss erreicht“.

Les peuplements récemment éclaircis sont entre autres vulnérables à **l'effet du vent**. (Cremer&Borough, 1982, Slodičák, 1995, Gardiner et al., 1997, in Päätaalo et al., 1999). De même que chez la neige, la vulnérabilité au vent est la plus grande après de fortes éclaircies tardives par le haut, lors desquelles des arbres dominants sont enlevés.

Tout ce qui était dit est aussi valable dans les cas d'accumulation de verglas (Bragg, 2003).

Etant donné qu'en effet un des buts principaux des interventions est notamment la stabilisation mécanique à long terme, l'effet déstabilisateur immédiat a intrigué plusieurs chercheurs tout en restant une quasi-énigme. Ainsi Ammann (2004), pour les peuplements denses, parle d'un „Paradoxon der Stabilisierung: Gerade Durchforstungen, welche das wichtigste Mittel zur Stabilisierung darstellen – zu einer Destabilisierung führen.“

3.7.2 Conséquences à long terme

Les conséquences à long terme des interventions sont bien connues (cf. Schütz, 1989). Grâce à l'espace libérée, l'arbre favorisé augmente sa stabilité mécanique individuelle suite à l'accroissement accéléré en diamètre (tige plus rigide), à l'arrêt de l'élagage naturel et par conséquent du raccourcissement du houppier (hauteur de flambage plus courte), au développement du système racinaire (meilleur encastrement) (Vanomsen, 2006), à la formation de houppiers plus symétriques (mieux équilibrées). Cependant, la réalisation de ces effets nécessite une certaine période de temps après l'intervention. D'une part, avec l'âge, cette période augmente et d'autre part, les effets deviennent moins prononcés, pour des raisons biologiques.

3.8 Risque de dégâts de neige lourde

3.8.1 Définitions²²

Sous „**risque**” on comprend en général „la possibilité qu'un but ne puisse pas être atteint”, dans le sens d'un risque qui peut être estimé et calculé à la base de la théorie des probabilités (Bachmann, 1999b). Dans le domaine de la foresterie, il s'agit de „expected loss by a physical or biological entity (e.g., a forest stand or larger forest areas), due to a particular hazard, for a given reference period and area“.

Hoffmann (1994) présente la définition du risque sous la forme d'une formule (Eq. 6)

$$\text{Eq. 6} \quad \text{Risque} = P_A \cdot P_B \cdot C$$

P_A - probabilité de présence de l'objet vulnérable dans la zone dangereuse
 P_B - probabilité d'apparition de l'événement dangereux²³
 C - dimension/valeur des dégâts

Les dimensions (ou l'équivalent monétaire) des dégâts dépendent en même temps de la grandeur de l'événement dangereux et de la vulnérabilité de l'objet en danger, qui se traduit par l'effet „**dose-réponse**”. La **vulnérabilité**²⁴ est exprimée par les caractéristiques de l'objet en danger qui sont en mesure d'influencer la relation dose-réponse.

Sous „**analyse du risque**”²⁵ on comprend „an objective quantification of risk components such as hazard, exposure, dose-response, susceptibility, and valuation of associated damage“. Fig. 16 illustre sous forme schématique les différentes composantes du risque et les processus d'analyse, gestion et répartition du risque.

Sous „**gestion du risque**” on comprend „the strategies used to accept and/or to reduce the risk including integration, anticipation and prevention”.

²² sauf indication contraire, toutes les définitions sont reprises de Birot&Gollier (2001)

²³ hazard (en anglais)

²⁴ susceptibility (en anglais)

²⁵ risk assessment (en anglais)

Intégrer le risque veut dire l'accepter dans la gestion forestière „as a cost doing business”. „Risk can be accepted if the expected loss is low in the context of objectives assigned to a given forest or stand“.

L'objectif de la **prévention** est „to reduce damage and losses by acting on factors in particular those related to exposure and susceptibility, as it is not possible to control natural events such as winds and storms. Such actions imply that sufficient knowledge on the mechanistic aspects of damage is available”.

Sous „**anticipation**“ on entend „to be prepared for the risk when there is a reasonable probability of its occurrence by acquiring methods and tools to take quick actions in case of damage”. Les mesures anticipatives sortent donc du cadre de la présente étude et ne seront pas considérées.

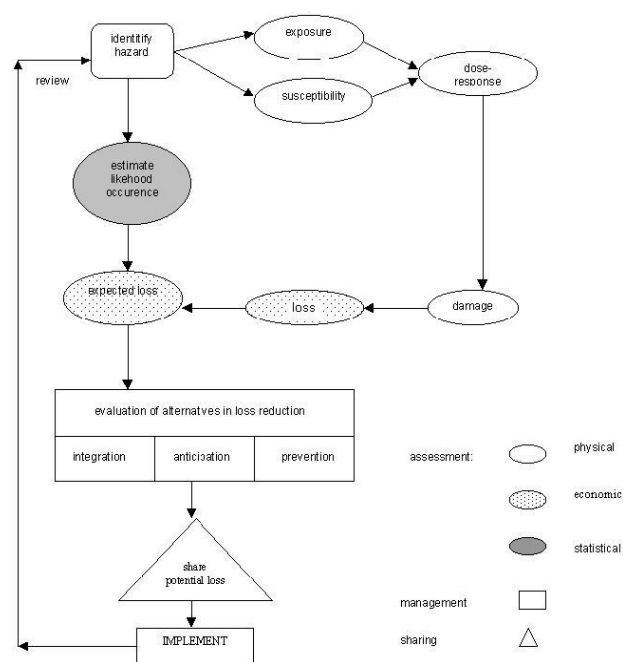


Fig. 16 Composantes, estimation, gestion et répartition du risque (Biroet&Gollier, 2001, adapté de Gardiner&Quine, 2000)

3.8.2 Analyse du risque de dégâts de neige lourde. Etat des connaissances

Dans la définition de Hoffmann (1994), Eq. 6, P_A (probabilité de présence dans la zone dangereuse de l'objet en danger) pour un objet d'étude localisé de façon permanente tel un peuplement, est une constante égale à 1 (pour un peuplement, situé en dehors des zones dangereuses, cf. Fig. 1, P_A est égale à 0).

P_B (probabilité d'apparition de l'événement dangereux) se traduit par la possibilité d'accumulation de neige lourde de quantité donnée à un moment précis dans la vie d'un peuplement. Dans le cas encore plus concret d'estimation de l'effet d'une éclaircie sélective tardive sur le risque de dégâts il s'agit d'estimer la probabilité d'accumulation de neige lourde dans une année précise après l'intervention.

C (dimensions/valeur des dégâts) dépend de la relation entre la masse de la neige accumulée et de la vulnérabilité au niveau de l'arbre individuel et à l'échelle du peuplement, une relation traduite par l'effet „dose-réponse“. Selon Biroet&Gollier (2001), pour la stabilité par rapport au vent „building dose-response models is a very difficult task and requires basic understanding of mechanisms involved as well as empirical knowledge. [...] ... the dose-

response assessment has received little attention because of the complexity of mechanisms involved“. La détermination de l'effet dose-réponse est rendue plus difficile par le fait que la vulnérabilité n'est pas une grandeur statique et constante (p.ex. comme dans le cas d'une maison dont le toit peut s'écrouler sous la masse accumulée de la neige) mais dynamique, car il s'agit d'un objet biologique en croissance et en évolution suivant un rythme annuel.

On peut dresser un petit bilan non-exhaustif des progrès de la recherche dans le domaine de l'analyse du risque des dégâts de neige lourde sur la base de la littérature révisée:

En ce qui concerne P_B : son estimation demeure un problème non-résolu (Jalkanen&Mattila, 2000). Kuboyama&Oka (2000) ont publié une carte des probabilités de dégâts de neige, sur la base de données statistiques, pour toute une préfecture au Japon. Mais il s'agit de probabilités liées à l'âge des peuplements. Elles reflètent de façon inséparable en même temps la probabilité d'accumulation de la neige et la vulnérabilité des peuplements, ce qui les rend donc peu utiles.

En ce qui concerne la vulnérabilité : plusieurs approches ont été suivies, qui s'expriment dans l'élaboration de quelques types principaux de modèles, selon Miller et al. (2000), à savoir :

- **modèles mécaniques**: ce sont des modèles déterministes. Ils étudient l'influence des différents facteurs de nature mécanique qui déterminent la stabilité (cf. §3.5.1).
- **modèles logistiques** : ce sont des modèles probabilistes du **risque relatif**²⁶, en fonction des „odds ratios“ pour des variables explicatives choisies. De tels modèles ont été élaborés par Valinger et al. (1993), Valinger&Fridman (1997), Jalkanen&Mattila (2000), Müller (2002). Ils sont en général relativement peu convaincants. Ainsi par exemple Müller (2002) n'a pas pu développer un modèle du risque, applicable au niveau de l'arbre individuel par les techniques de la régression logistique. Selon lui, la non-réussite était due au fait que la base de données pour la mise en œuvre du modèle provenait essentiellement de peuplement éclaircis régulièrement par le bas et étant très uniformes dans leur structure, avec des valeurs peu variables du coefficient d'élancement. Le modèle de Valinger et al. (1993) n'arrive non-plus à prédire de manière précise quels individus seront endommagés – un tiers des arbres du test ont été mal classifiés. Jalkanen&Mattila (2000) indiquent que „The distribution of damaged stands at the landscape level could not be predicted well with the basic logistic regression model, since it is only concerned with the susceptibility component of probability, and not the occurrence of damaging agents“. Apparemment les modèles logistiques ont aussi certaines limites liées à leur propre nature. Parfois les résultats qu'ils fournissent sont peu logiques et difficiles à interpréter. Ainsi par exemple le modèle de Valinger&Fridman (1997) montre qu'au niveau du peuplement la probabilité de dégâts diminue avec l'augmentation du coefficient d'élancement, ce qui contredit de nombreuses observations pratiques. Néanmoins, Valinger&Fridman prétendent que „it is possible to predict damage from snow and wind at a site by using only single tree characteristics“. Il semble difficile d'interpréter les résultats des modèles logistiques si la nature des processus qui provoquent les dégâts n'est pas prise en compte et impliquée dans l'analyse.
- **modèles empiriques-mécaniques**: ici on peut classifier plusieurs études basés sur le coefficient d'élancement comme indice de stabilité (cf. §3.5.4). L'indice h/d n'est dans ce contexte qu'un indice empirique de la vulnérabilité, qui ne permet non plus une analyse complète du risque de dégâts de neige. Selon Polley (1995) „Neben dem Schlankheitsgrad haben noch viele andere Merkmale einen Einfluss auf das

²⁶ „increase in the damage risk by a particular factor“ (Jalkanen&Mattila, 2000)

baumindividuelle Risiko: baumartenspezifische Festigkeitseigenschaften, Festigkeitsdefekte (Fäule), einseitige Belastungen (Schrägstand, einseitige Krone), Verankerung im Boden (Wurzelsystem), Bestandesverhältnisse, Exposition, Häufigkeit gefährlicher Ereignisse. **Eine umfassende Risikoanalyse erfordert also weit mehr, als eine Darstellung der Schlankheitsgrade**". „The complexity of phenomena and factors involved in the occurrence of damage such as those resulting from wind storms, explains the variety of preventive methods used but also the discrepancies observed. This complexity also prevents the use of a single factor or index (e.g., height/diameter ratio, H/D) as a basis for a strategy aimed at reducing risk." (Biroto&Gollier, 2001). On se permet d'élargir cette constatation aussi pour la neige lourde. La critique du coefficient d'élancement comme indice du risque sera exposée dans §3.8.3.

A part le problème de trouver les variables explicatives les plus appropriées, tous les modèles élaborés jusqu'ici (n'importe quel soit leur type), présentent les inconvénients suivants:

1. Ils concernent presque exclusivement l'arbre individuel, avec quelques exceptions. Valinger et al. (1993) incluent comme variable explicative une expression de la densité (nombre d'arbres dans un rayon de 3 mètres autour des arbres de test).
2. Une complète analyse du risque (impliquant la probabilité d'apparition de l'événement dangereux) fait défaut
3. Un problème majeur s'avère la définition correcte du terme „dégât" du point de vue de la théorie du risque. On revient à la question si chaque arbre endommagé par la neige lourde peut être considéré et compté comme „dégât" (cf. §3.3). Etant donné que le risque est la probabilité de non-accomplissement d'un but et que du point de vue biologique il est impossible de fixer comme but la sauvegarde de chaque arbre dans un peuplement (du moment de sa création jusqu'au terme de la production), un tel objectif est donc irréaliste. Il convient impérativement de reformuler le but et de préciser exactement quels arbres l'on vise à préserver **pour qu'ils soient l'objet exclusif de l'analyse du risque**. Cette compréhension fondamentale fait défaut dans pratiquement toutes les études, une partie desquelles utilisent largement le terme de „high-risk trees" (Persson, 1972, Bryndum, 1986, in Valinger et al., 1993; Río et al., 1997; Päätaalo et al., 1999), sans faire aucune distinction entre mortalité naturelle et dégâts. Ceci n'est pas licite dans la mesure où **la mortalité naturelle n'est pas un risque, mais un fait!** (probabilité de réalisation égale à 1), que ce soit dû à la concurrence ou à la neige lourde. En plus, pour parler de risque, il faut subir une perte économique (Biroto&Gollier, 2001), c.à.d., du point de vue de la théorie du risque il ne convient pas de considérer comme „dégâts" des arbres physiquement endommagés dont la perte n'engendre pas de conséquences économiques, encore moins si la coupe préventive de tels arbres, dits „susceptibles" aggrave la situation et la rend encore moins rentable. Dans ces réflexions sont prises en compte aussi les dégâts potentiels indirects comme les calamités d'insectes. Considérer tout arbre physiquement endommagé comme „dégât" serait justifié si le but fixé était d'exploiter chaque arbre et dans un état non-endommagé. Un tel but fait partie des concepts d'exploitation totale des produits forestiers, à l'exemple des concepts de sylviculture et de planification forestière en Russie, qui visent par exemple l'exploitation de „over 100 million cubic meters of natural mortality there are in European-Ural zone of Russia" (Vagin, 1995). Dans les conditions économiques dans lesquelles s'effectue l'exploitation forestière en Europe de l'ouest, par contre, la perte de cette partie des ressources peut être considérée comme „dégâts virtuels", car la valorisation des

dégâts de neige lourde dépend naturellement du contexte économique. Les chiffres impressionnants cités dans 3.1.5 ne représentent vraisemblablement qu'une partie infime de la mortalité naturelle à l'échelle correspondante.

Le problème très spécifique du présent travail de recherche en ce qui concerne l'analyse du risque est d'évaluer la vulnérabilité (au niveau de l'arbre individuel et du peuplement) avant et après la coupe, afin d'estimer l'effet propre de l'intervention (cf. §6.7.3, p. 159).

3.8.3 Indices du risque

L'indice de stabilité S_{cr} , proposé par Kato&Nakatani (2000, cf. §3.5.4, p. 47), est approprié pour être utilisé comme un **indice du risque** (Kato, 2005), car il établit le lien entre les dimensions du processus destructif et la vulnérabilité de l'objet, ce qui permet l'estimation de l'effet dose-réponse. A l'opposé, le coefficient h/d ne donne qu'une idée de la **vulnérabilité relative** des arbres individuels. Cela veut dire qu'à l'aide du h/d on peut tout au plus estimer grossièrement, sous certaines conditions (cf. §3.5.4, p. 47), si un arbre est relativement plus stable qu'un autre, sans pour autant pouvoir prédire si l'un ou l'autre sera endommagé lors de précipitations de neige lourde de quantité donnée.

L'emploi du coefficient d'élancement comme indice du risque de dégâts de neige lourde conduit inévitablement à qualifier un peuplement dense non-traité comme vulnérable (cf. Fig. 10, p.49). Le h/d est pratiquement l'incarnation ultime de la confusion qui provient du manque de distinction entre „dégâts“ et „mortalité naturelle“. Fig. 17 illustre la source de cette confusion. D'une part, le h/d est directement proportionnel à la densité d'un peuplement. Selon Abetz&Prange (1976) „Je mehr Bäume auf einem ha stehen, desto höher ist der Anteil jener Bäume mit geringem Durchmesser und damit höherem h/d Wert“. D'autre part, les „dégâts“ (nombre d'arbres) sont directement proportionnels au h/d, selon plusieurs études déjà citées. Mais la mortalité (nombre d'arbres) est aussi directement proportionnelle à la densité (Schmidt-Vogt, 1991, in Ammann, 2004)! Il suffit finalement d'ajouter le signe d'équivalence entre les dégâts et la mortalité (déjà justifié dans §3.3 et §3.8.2) pour boucler le cercle des relations.

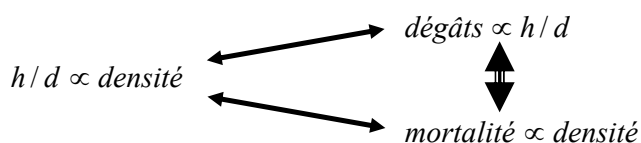


Fig. 17 Densité, mortalité et dégâts de neige lourde

En conclusion : l'emploi du h/d comme indice du risque est fallacieux, dans la mesure où il implique l'interprétation de la mortalité naturelle comme dégâts. De plus, le h/d, à l'exemple du paradoxe de l'éclaircie, énoncé par Ammann (2004), est confronté à une situation paradoxale – l'éclaircie par le bas dans un peuplement dense non-traité qui n'élimine rien d'autre que les arbres de h/d élevés („high-risk trees“) **augmente** temporairement la vulnérabilité du peuplement (divers auteurs cités dans Nykänen et al., 1997 et Päätaalo, 2000).

3.8.4 Stratégies de gestion du risque de dégâts de neige lourde

En général, une grande partie des analyses du risque se basent sur le coefficient d'élancement comme seul critère. Logiquement les stratégies de gestion sont elles aussi largement influencées par la théorie h/d. Les interventions proposées pour contrecarrer les effets néfastes de la neige lourde peuvent être divisées en deux groupes:

- **Stratégies à long terme**

Les stratégies à long terme concernent toute la vie du peuplement, depuis sa création. Elles visent à travers des interventions régulières à régler constamment les conditions de croissance (par la réduction de la densité) d'une telle manière de ne pas permettre, dans la mesure du possible, aux arbres restant d'atteindre les valeurs critiques admises du coefficient d'élancement. La garantie de succès repose sur la stabilité individuelle (Ammann, 2004). La stratégie à long terme est basée sur trois piliers: 1) Créer des plantations à large espacement, 2) réduire régulièrement le nombre des tiges et/ou 3) commencer les éclaircies tôt et en général modérément. Les éclaircies recommandées sont par le bas (Johann, 1981; Cremer et al., 1983; Marsch, 1989; Wonn&O'Hara, 2001; Montero et al., 2001; Cameron, 2002; Slodičák&Novak, 2006) ou bien l'éclaircie sélective (Abetz, 1976; Schütz, 1990). La stratégie à long terme est en vigueur au moins depuis un siècle (Stephani, 1933; Haufe, 1934). En complément, Nakatani (1991) propose récemment la sélection des provenances plus résistantes (d'un module E plus élevé) pour la création de plantation de cryptoméridés du Japon et Kato&Nakatani (2000) l'élagage afin de diminuer la POH et de cette façon augmenter S_{cr} de l'arbre individuel.

- **Stratégies à court terme**

Une multitude de références littéraires font preuve que dans les dernières décennies et à l'échelle européenne pratiquement tous les efforts des chercheurs et des gestionnaires, de nature organisationnelle, technique ou purement scientifique, ont été concentrés dans la justification, la vulgarisation et la mise en pratique de la stratégie à long terme de gestion du risque de dégâts de neige. L'opinion qui prédomine est que le danger de déstabilisation est si grand qu'il ne laisse pratiquement aucune marge de manœuvre pour une gestion réussie des peuplements non-traités.

Selon Marsch (1989) „Die Jungwucherziehung neben einer weitständigen Kulturbegründung die einzige Möglichkeit darstellt, die Trägfähigkeit der Bestände ohne Risiko grundsätzlich zu erhöhen [...]. Kein Eingriff im gesamten Bestandesleben eine verpasste Jungwucherziehung ersetzen kann“. „La conduite des interventions culturales au bon moment n'a pas d'alternatives“ (Stiptzov et al., 1995). Malgré toute l'énergie dépensée pour éviter l'existence de peuplements non-soignés, il semble que les forestiers en ont et en auront plus qu'assez. Le manque de savoir-faire de comment aborder en première intervention un peuplement longtemps laissé à lui-même, ce qui a d'ailleurs justifié le présent travail, peut être expliqué par la volonté désespérée d'appliquer les mêmes principes qui garantissent le succès à long terme (cf. le point précédent). Les efforts de rattrapage se soldent souvent par des échecs. Les essais d'interventions tardives ont à plusieurs reprises clairement démontré que ces principes ne fonctionnent pas à une étape plus avancée de la vie d'un peuplement (p.ex. Chroust, 1969b; Río et al., 1997). Selon Johann (1981) „Die Hoffnung, auch durch verspätete Durchforstung in überdichten Beständen noch Entscheidendes für die Bestandessicherheit tun zu können, ist trügerisch, für die betroffenen Beständen sogar außerordentlich gefährlich“. Le temps restreint progressivement d'une part les possibilités d'agir et d'autre part intensifie l'urgence d'actions. **La situation devient à la fois une impasse et un „Zugzwang“**. Ceci est une des raisons principales pour que les concepts d'éducatives tardives soient exposés à une critique acharnée (par. ex. par Kenk&Weise, 1998). Selon Cameron (2002) „Perhaps the worst feature of no-thinning is that it leaves no options. [...] Once the decision has been taken not to thin, a course is set that cannot be altered; **clearfelling is the only option left open**“. A part la possibilité de **laisser un peuplement non-traité ... non-traité** jusqu'au terme de la période de production et renoncer ainsi à toute mesure éducative, certains auteurs proposent comme une alternative unique lors des éclaircies tardives de pratiquer **des éclaircies par le**

bas en éliminant tout d'abord les soi-disant „arbres à risque“²⁷ (Persson, 1972, in Peltola et al., 1997; Valinger et al., 1993; Río et al., 1997; Päätaalo et al., 1999), une mesure également risquée (cf. 3.8.3). Selon Johann (1981) „Ein Bestand wird nicht dadurch allein schneebruchsicherer, dass man die am stärksten gefährdeten Bäume entnimmt“.

A cause de son potentiel déstabilisateur, **l'éclaircie par le haut** tardive est fortement déconseillée (Haufe, 1934; Valinger et al., 1994; Río et al., 1997). Les interventions **fortes** sont aussi fortement déconseillées (Rottmann, 1985; Kenk&Weise, 1998). Selon Rottmann (1985) „... in vernachlässigten Bestände keinesfalls versucht werden sollte, Pflegerückstände durch starke Durchforstungen aufzuholen. Diese haben dort ausnahmslos eine höhere Bruchgefährdung zur Folge. Derartige Pflegerückstände können nur durch vorsichtige Eingriffe, die möglichst auf mehrere Pflegedurchgänge verteilt werden sollen, beseitigt werden“.

Selon Peltola et al. (1997) „On the whole, the risk of snow damage can best be minimized by identifying and avoiding the high-risk management of stands making trees liable to snow damage“. L'idée d'éviter les opérations sylvicoles à haut risque appartient à Valinger et al. (1994). Comme on vient de constater, il n'existe pratiquement aucune mesure sans risque.

De longues recherches littéraires ont révélés contre toute attente des témoignages historiques d'une gestion réussie de peuplements âgés et jamais traités. Elles ont fourni en outre une image diamétralement opposée à la conception contemporaine sur la stabilité: „Im Hochgebirge trifft man auch heute noch **haubare und überhaubare Bestände** an, welche **noch nie durchforstet worden sind**, und die sich durch sehr hohe Stammzahlen auszeichnen. All diese Bestände haben durch Schnee meist erheblich weniger gelitten, als unsere frühzeitig durchforsteten Jungbestände. [...] In meinem früheren Bezirk hatte ich solche [Bestände], [...] bei denen man **erst im Alter von etwa 60 bis 80 Jahren mit der Durchforstung begonnen hatte**. [...] Diese Bestände [...] waren ebenfalls **sehr stammreich, sie waren dicht geschlossen und hatten hochangesetzte schmale Kronen. Wir brachten sie – sowohl die weiter als auch die enger begründeten Bestände – in recht gutem Schluss ins Haubarkeitsalter**. Unsere jungen Pflanzbestände dagegen, die schon vom Dickungsalter an gut durchgeforstet sind, haben vielfach bereits derartig durch Schneebruch gelitten, dass gar nicht daran zu denken ist, dass wir sie in leidlichem Schluss bis zur Haubarkeit durchbringen können“ (Stephani, 1933). L'expérience vécue et la conviction du praticien Stephani sont carrément stupéfiantes. Stephani n'a malheureusement pas laissé d'indications précises sur la façon exacte dont il a effectué le passage sans déstabilisation de l'état fermé à l'état ouvert d'un peuplement. Il ne mentionne que le succès de la technique de „mehrere, durchschnittlich 8-10 Jahre auseinanderliegende Durchhiebe, ohne starke Lockerung des Kronendaches“. Son témoignage incontestable prouve du moins la faisabilité de cette opération.

- **Stratégies de dernière minute**

Il s'agit de quelques mesures préventives d'urgence. Une d'elles consiste à secouer manuellement les arbres chargés dans le but de faire tomber la neige du houppier, à l'exemple des techniques appliquées en arboriculture (Anonymus&Keller, 1887). Elle a été pratiquée encore au milieu du dernier siècle dans la forêt d'enseignement de l'EPF de Zurich (H.-U. Bucher, 2007, comm. pers.), exceptionnellement et dans le cas de jeunes perchis de chêne uniquement (J.-Ph. Schütz, 2007, comm. pers.). Une autre mesure un peu exotique consiste à faire balayer la neige accumulée à l'aide d'un hélicoptère (Konig, 1964). Elle s'est avérée très onéreuse et également peu efficace.

²⁷ high-risk trees (angl.)

4 Parcelle d'étude

4.1 Emplacement

La parcelle d'étude est située dans la partie ouest de la Bulgarie (43°01'22.00" N, 23°04'40.00" E, <http://earth.google.com>), à env. 50 kilomètres de Sofia et à env. 2 km au nord-est de la ville de Godetch (Fig. 18). L'endroit est nommé „Stoudenetz“ par la population locale. C'est une région de moyenne montagne, appartenant aux versants sud de la chaîne principale des Balkans (Fig. 18 ci-dessous, à droite).



Fig. 18 Emplacement de la parcelle d'étude (cercle blanc, à droite). Source de l'image : Wikipedia

4.2 Facteurs de la station

- **Exposition**

La parcelle d'étude est sise sur un versant, exposé vers le sud-ouest (209-243°), incliné de 36% (20°), à une altitude comprise entre 890 et 920 m.

- **Géologie et sol**

La roche-mère est de la molasse calcaire (Proles Engineering, 1999). Le sol est brun lessivé (Proles Engineering, 1999), frais, moyennement profond, moyennement rocheux, du type Distric-Eutric Cambisols, selon la classification de la FAO (Donov, 1993).

- **Climat**

Le climat est continental tempéré, avec une température moyenne de 9.6° Celsius (janvier -2.3°, juillet +19.2°) et des extrêmes de -32.0° (janvier) et +39.0 (juillet). Les précipitations annuelles varient entre 650 et 800 mm/an, avec un maximum au printemps. Faute de diagramme climatique pour la ville de Godetch, le climat est illustré par le diagramme pour la ville de Sofia (Fig. 19 ci-dessous).

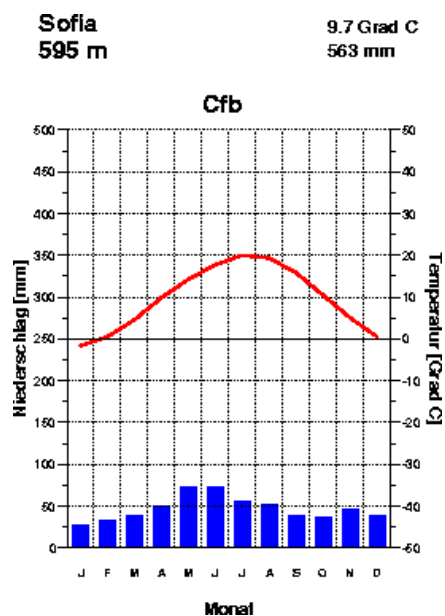


Fig. 19 Cours annuel de la température moyenne (ligne) et des précipitations (barres), station météo de Sofia. Source : www.klimadiagramme.de

- Association forestière

En Bulgarie, un premier essai de développement de la typologie forestière, basée sur les associations forestières, a été fait en 1969 par Pénev et al., mais à partir des années 80 cette typologie n'a plus été utilisée dans la pratique forestière (Kostov&Nédelin, 1996). Ces types de forêts n'ont pas été cartographiés. La station est décrite seulement par les caractéristiques du sol (profondeur et humidité). Dans cette région et à cette altitude, les forêts appartiennent, selon la classification de Pénev, à l'étage montagnard moyen (entre 600 et 1000 m d'altitude), au sous-étage des forêts naturelles de chênes rouvres (*Quercus petraea* Liebl.), de hêtres (*Fagus sylvatica* L.) et de sapins blancs (*Abies alba* Mill.), avec participation d'essences comme le charme commun (*Carpinus betulus* L.), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.), le merisier (*Prunus avium* L.), le frêne commun (*Fraxinus excelsior* L.) et le sorbier torminal (*Sorbus torminalis* Crantz.). Du point de vue phytosociologique, ces forêts appartiennent à l'alliance *Querco-Fagetea* (comm. pers. M. Dimitrov).

4.3 Description du peuplement

L'objet d'étude est un peuplement mélangé de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.) et de pins noirs (*Pinus nigra* Arn.), d'une étendu de 6.1ha (Fig. 20 et Fig. 21). En 2001, au moment de l'installation de l'essai, le peuplement représentait un haut-perchis dense et fermé, âgé de 51 ans.

En ce qui concerne l'origine et le passé sylvicole, le peuplement choisi (division 128, „ж“) est issu de plantation, d'un espacement initial de 1.5m x 1.0 m, soit une densité initiale de 6666 plants/ha. Le but sylvicole des plantations dans la région de Godetch est en premier lieu de stabiliser le terrain contre les processus d'érosion et en même temps d'augmenter la productivité par rapport aux taillis de feuillus en très mauvais état. Le but de production est un diamètre de 50 à 60 cm en 100 ans (comm. pers. R. Iliev, directeur de l'arrondissement forestier de Godetch). Depuis sa création jusqu'à l'installation de l'essai, le peuplement s'est développé sans aucune intervention, pour des raisons liées surtout aux difficultés d'accessibilité.

5 Méthodes – application et développement

5.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en quelques variantes de l'éclaircie sélective (Tab. 6), chacune sur une surface de 0.25ha, en fonction du nombre d'arbres de place par ha (100, 200 ou 300) et du degré de leur libération des concurrents (faible, moyen ou fort). L'idée initiale était d'installer aussi quelques répétitions en vue d'obtenir une représentativité statistique des résultats.

Nz/ha	Degré de libération des houppiers		
	1. Faible	2. Moyen	3. Fort
100	100/1	100/2	100/3
200	200/1	200/2	200/3
300	300/1	300/2	300/3

Tab. 6 Dispositif expérimental (variantes de l'éclaircie sélective)

Les arbres ont été classifiés en trois sous-collectifs – arbres de place, concurrents (enlevés et réservés) et arbres de bourrage. Les arbres de place et les concurrents ont été désignés selon les critères habituels de l'éclaircie sélective (cf. Annexe 2, p.215). Comme arbres de bourrages sont considérés les arbres situés dans les parties entre les cellules d'intervention (arbre de place + ses concurrents). Ces parties n'ont subi aucun traitement en vue de garder leur stabilité collective et pour servir de témoins.

Le degré d'intervention au sein de chaque placette sera estimé en fonction du rapport du nombre, respectivement de la surface terrière des concurrents et des arbres de place (N_k/N_z ; G_k/G_z). Si le rapport N_k/N_z est égal à 1, cela veut dire qu'en moyenne un concurrent par arbre de place a été éliminé. Si en même temps le rapport G_k/G_z est aussi de 1, cela veut dire qu'un arbre du même $d_{1,3}$ que l'arbre d'élite a été enlevé. Un degré faible de libération des houppiers consiste à enlever un, maximum deux concurrents par arbre de place ou aucun du tout, s'il s'agit d'arbres qui n'ont pratiquement pas de concurrents (entièrement dominants). Le degré fort de libération des houppiers consiste à enlever si possible tous les concurrents de tous les arbres de place. La variante de libération moyenne devrait se situer quelque part au milieu entre les deux extrêmes.

L'idée générale du dispositif expérimental est d'obtenir une série de situations de passage entre l'état dense et l'état complètement libéré des arbres de place afin d'observer l'effet conjoint du nombre d'arbres de place et du degré de leur libération sur les phénomènes de déstabilisation.

Selon Rottmann (1985), les dégâts de neige lourde après des éclaircies tardives augmentent considérablement si la force de l'intervention dépasse 50%. Pour cette raison, la valeur de 50% a été admise comme seuil maximal à ne pas dépasser.

• délimitation des placettes et positionnement des arbres

Les placettes ont été délimitées d'abord à l'aide d'une boussole et d'un hypsomètre (Vertex III, Haglöf Sweden AB) qui peut mesurer aussi des distances horizontales, en prenant en compte la pente du terrain. Une délimitation plus précise a été faite plus tard avec une station totale (tachéomètre) Sokkia SET4C à partir des points centraux.

Les coordonnées des arbres (x;y;z) font partie d'un système local, l'axe Y étant orienté vers le nord (Fig. 22).

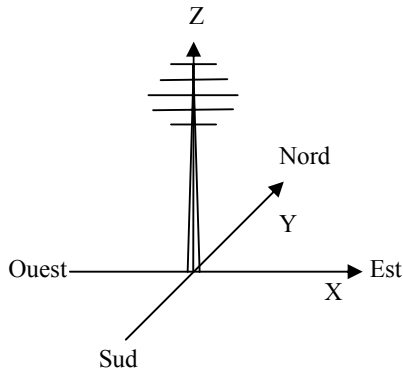


Fig. 22 Système de coordonnées utilisé

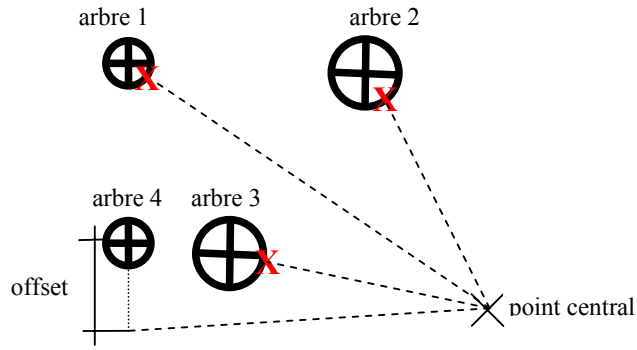


Fig. 23 Mesure des coordonnées (x;y;z) des arbres avec une station totale, plan horizontal (positions marquées avec „x“).

Elles ont été mesurées à partir des points centraux. La précision des mesures est estimée à $\pm 10\text{cm}$. La précision peut être de l'ordre de $\pm 0.5\text{cm}$. La précision dépend du fait que le centre de la section transversale de la base de la tige ne peut pas être visé, le jalon avec le prisme réflecteur étant placé près de l'arbre mesuré, entre sa tige et le point central correspondant. Ainsi, les positions mesurées des arbres sont légèrement déplacées par rapport à leurs vrais emplacements, à une distance d'un demi-diamètre à hauteur de poitrine dans la direction de l'emplacement du point central correspondant, d'où les mesures ont été faites (Fig. 23, arbres 1, 2 et 3). En cas de mauvaise visibilité, la technique de l'offset a dû être appliquée, et alors la distance horizontale entre le prisme réflecteur et l'axe vertical de la tige était prise en compte. Dans ces cas, la précision était dans l'ordre de $\pm 5\text{cm}$ ²⁸ (Fig. 23, arbre 4).

- **mesure des arbres**

Les grandeurs mesurées pour chaque placette sont décrites au Tab. 7:

Paramètre	Instrument	Précision	Classe d'arbres mesurés
$d_{1,3}$	compas forestier	$\pm 1\text{mm}$ $\pm 0.5\text{cm}$	arbres de place arbres de bourrage et concurrents
hauteur totale	hypsomètre Vertex III	$\pm 30\text{cm}$ ²⁹	arbres de place et concurrents
hbh (en haut et en bas de la pente)	hypsomètre Vertex III	$\pm 30\text{cm}$	arbres de place et concurrents
4 largeurs du houppier (N, E, S, W)	Lasermeter Leica	-	arbres de place et concurrents
coordonnées X, Y, Z	station totale (tachéomètre)	$\pm 10\text{cm}$	arbres de place et arbres de bourrage
distance/azimut par rapport à l'arbre de place	Lasermeter Leica / Boussole	$\pm 5\text{cm}/ \pm 1^\circ$	concurrents enlevés
direction d'inclinaison de la tige	boussole	-	arbres de place
direction d'asymétrie du houppier (DAH)	boussole	-	arbres de place, concurrents

Tab. 7 Mesures des arbres

Dans le cas de la direction de l'inclinaison de la tige et de la DAH, il s'agit d'estimations visuelles et ensuite de mesures en fonction de ces estimations.

²⁸ commentaire personnel de Valentin Stefanoff, le géodésiste qui a effectué les mesures

²⁹ Pawels (2001)

De plus, les défauts (courbures locales ou fourchaisons de la tige dues à *Rhyacionia buoleana*, plaies apparentes sur la tige dues surtout aux fouettards) pour les arbres de place et tous les concurrents, ont été relevés.

Pour les arbres de bourrages, seulement la présence d'inclinaison de la tige a été notée, sans autres mesures.

- **calculs des données dendrométriques**

En production forestière en Bulgarie, le calcul du volume sur pied d'un peuplement régulier se base sur le diamètre moyen (d_g) et la hauteur moyenne d'après Lorey (h_l) de la tige de surface terrière moyenne. Ils sont obtenus selon les formules suivantes (Bachmann, 1999a):

$$\text{Eq. 7} \quad d_g = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N d_i^2\right) / N}$$

$$\text{Eq. 8} \quad h_l = \left(\sum_{i=1}^N g_i \cdot h_i\right) / G$$

Le volume sur pied a été calculé comme somme des volumes des tiges individuelles. Le volume des tiges a été calculé à l'aide des tarifs de cubages à deux entrées, choisies en fonction de la classe de hauteur, pour le pin sylvestre et pour le pin noir séparément (Krastanov et al., 1983). La classe de hauteur est déterminée en fonction du diamètre moyen et de la hauteur moyenne.

La hauteur dominante a été calculée comme la moyenne arithmétique des cent plus grosses tiges par ha dont les hauteurs ont été mesurées, vu qu'on n'a pas mesuré les hauteurs de toutes les tiges dans la placette.

La longueur (relative) du houppier d'un arbre est calculée suivant Eq. 9 :

$$\text{Eq. 9} \quad l_{\text{houpp}} [\%] = \frac{h - h_{dc}}{h} \cdot 100$$

L'âge du peuplement a été déterminé par comptage de cernes annuels sur les souches d'arbres abattus.

5.2 Mesure des houppiers

5.2.1 Mesures conventionnelles

Pour mesurer les largeurs des houppiers la „Hochblickmethode“ (Mayer, 1958 et al., in Röhle et al., 1985) a été d'abord appliquée. Les largeurs des houppiers étaient mesurées dans les directions des principaux points cardinaux (N, E, S, W). La distance entre la tige à env. 1.30 m et le point d'intersection entre la ligne de la direction et la tangente du contour du houppier à son extrémité la plus développée dans cette direction a été mesurée (Fig. 24). Lors des calculs, les contours entre les quatre points mesurés ont été arrondis en quarts d'ellipse.

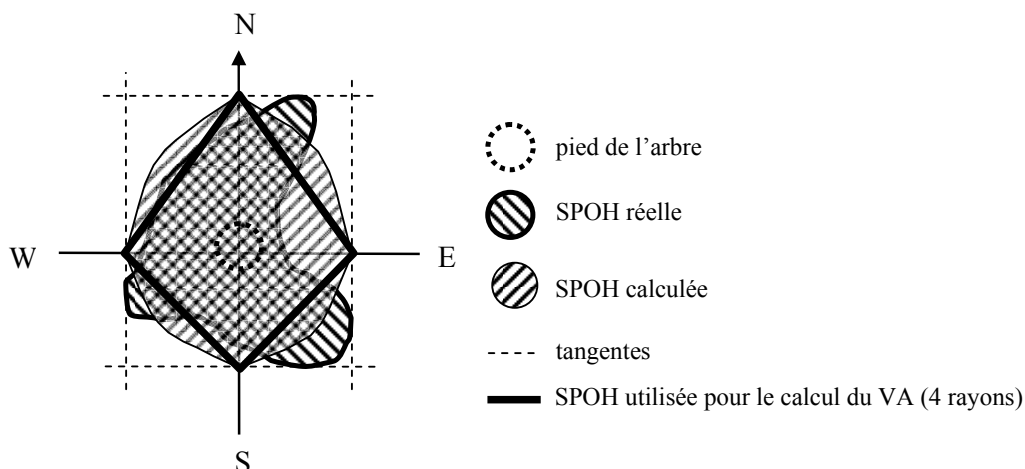


Fig. 24 Mesure de la projection orthogonale des houppiers par 4 rayons

Il s'est ensuite avéré d'une part que la précision des mesures n'était pas suffisante pour la mesure de l'accroissement en rayon du houppier, et de l'autre, qu'il faut mesurer au moins 16 rayons pour bien décrire et mesurer précisément la projection orthogonale d'un houppier irrégulier chez un arbre individuel (Röhle et al., 1985). Pour cette raison l'application d'un procédé stéréo photogrammétrique a été jugé plus appropriée. Cette démarche a conduit au développement d'une nouvelle méthode de mesure des houppiers d'arbres sur pied (§5.2.2).

5.2.2 Mesures 3-dimensionnelles

L'application des procédés stéréophotogrammétriques a donné naissance à une toute nouvelle méthode de mesures sans contacts depuis le sol, des houppiers des arbres sur pied (Ivanon&Sauerbier, 2006). La description des deux versions de la méthode est donnée en annexe (cf. Annexe 1, p.200). La méthode permet la détermination très exacte (précision de moins de $\pm 1\text{cm}$ dans le plan horizontal et de l'ordre de 1-4 cm en direction verticale) des coordonnées 3-dimensionnelles d'un point (trait caractéristique) de l'arbre sur pied, tel un bourgeon, un entrenœud sur une branche, le bout d'un chicot ou un point quelconque bien identifiable visuellement sur l'écorce de la tige. Les données ainsi obtenues ont servi pour:

- mesurer la surface de la projection orthogonale du houppier (SPOH)
- mesurer pour une période antérieure l'accroissement des pousses latérales et de la SPOH
- détecter de très faibles dégâts de neige lourde (plastifications au niveau des houppiers)

5.3 Modélisation du vecteur d'asymétrie du houppier

- variables explicatives

Pour modéliser le vecteur d'asymétrie, le modèle d'Umeki (1995) a été utilisé. Dans le cas de deux peuplements d'étude de *Betula maximowicziana* et de *Castanopsis cuspidata*, son modèle, ajusté à la base de données de 31, respectivement 39 arbres, explique 56%, respectivement 73% de la variance de leurs VA.

Le modèle possède deux composants (Eq. 10) – la première (G) reflète l'influence de la situation (local environment, en anglais) et la deuxième (F) reflète la réaction de l'arbre central aux effets de la situation.

Eq. 10 $VA = F(\text{arbre central}).G(\text{situation}) + e$, e – vecteur-erreur

La fonction F dépend des dimensions de l’arbre (Eq. 11). Umeki a utilisé la hauteur, tandis que dans notre cas on utilisera le $d_{1,3}$. La raison en est que dans la parcelle d’étude seules les hauteurs d’un nombre restreint d’arbres (arbres de place et concurrents) ont été mesurées.

Eq. 11 $F(\text{arbre central}) = c_0 . DHP^l$, où

DHP est le diamètre ($d_{1,3}$) de l’arbre central ; l est un paramètre déterminé lors de la modélisation qui indique la façon dont la réponse plastique de l’arbre dépend de son diamètre ; c_0 est une constante qui détermine la grandeur de cette réponse.

La situation (G) est exprimée par le voisinage (E_1) et par la microtopographie (E_2) (Eq. 12).

Eq. 12 $G(\text{situation}) = c_1 . E_1 + c_2 . E_2$, où c_1 et c_2 sont des constantes.

L’influence du voisinage E_1 est représentée par un vecteur dans le plan horizontal, obtenu par la formule sous Eq. 13.

Eq. 13 $\vec{E}_1 = \sum_i \frac{(dhp_i)^m}{d_i^n} \vec{u}_i$, où

dhp_i [cm] est le diamètre ($d_{1,3}$) du voisin i ; d_i [m] est la distance entre les pieds de l’arbre central et celui du voisin i ; \vec{u}_i est un vecteur unitaire dans le plan horizontal, qui indique la direction de la base de la tige de l’arbre central vers la base de la tige du voisin i ; m et n sont des paramètres déterminés lors de la modélisation.

L’influence de tous les voisins est représentée par la somme des vecteurs (Fig. 25).

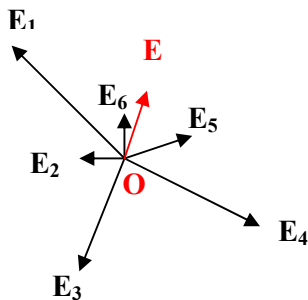


Fig. 25 Somme des vecteurs (influence commune des voisins)

L’influence de la microtopographie (exposition et pente du terrain) est exprimée par la formule sous Eq. 14.

Eq. 14 $\vec{E}_2 = \alpha . \vec{v}_i$

où α est la pente du terrain à l’emplacement de l’arbre central, \vec{v}_i est un vecteur unitaire dans le plan horizontal dont la direction indique l’exposition du terrain

Après des substitutions des équations (Eq. 11 - Eq. 14) dans Eq. 10, la formule de calcul du VA devient :

$$\text{Eq. 15 } VA = a \cdot \underbrace{(DHP)^l \sum_i \frac{(dhp_i)^m}{d_i^n} \cdot \bar{u}_i}_{T_1} + b \cdot \underbrace{(DHP)^l \cdot \alpha \cdot \bar{v}}_{T_2} + e, \mathbf{a} = \mathbf{c}_0 \cdot \mathbf{c}_1; \mathbf{b} = \mathbf{c}_0 \cdot \mathbf{c}_2$$

La première partie de la formule (T_1) représente le facteur prédictif du **voisinage** („neighbour predictor”), la deuxième (T_2) le facteur prédictif de la **microtopographie** („microtopography predictor”), deux facteurs sous forme de vecteurs qui servent de variables explicatives. Il faut noter que les valeurs de la pente du terrain sont utilisées comme nombres sans dimension (scalaire).

- **calibration du modèle**

Pour la calibration du modèle, Eq. 15 est divisée en deux éléments (décomposition des vecteurs sur les axes X et Y).

$$\text{Eq. 16 } VA_x = a \cdot T_{1x} + b \cdot T_{2x} + e_x$$

$$\text{Eq. 17 } VA_y = a \cdot T_{1y} + b \cdot T_{2y} + e_y$$

où $VA = (VA_x, VA_y)$, $T_1 = (T_{1x}, T_{1y})$, $T_2 = (T_{2x}, T_{2y})$, $e = (e_x, e_y)$.

En décomposant ainsi par exemple les vecteurs T_2 en éléments sur les axes x et y les formules sous Eq. 18 ont été utilisées:

Eq. 18

$$T_{2x} = DHP^l \cdot \sin \alpha \cdot v$$

$$T_{2y} = DHP^l \cdot \cos \alpha \cdot v$$

De cette façon le modèle est transformé en un modèle scalaire, où les composants x et y sont traités ensemble, étant indépendants les uns des autres (Eq. 19).

$$\text{Eq. 19 } VA = a \cdot T_1 + b \cdot T_2 + e$$

La calibration du modèle s’effectue de façon itérative, en attribuant des valeurs des paramètres l, m et n (nombres entiers) et en calculant les valeurs correspondantes des coefficients a et b par la méthode de la régression multiple. L’ajustement du modèle est estimé en fonction du coefficient de détermination, calculé par la formule sous Eq. 20.

$$\text{Eq. 20 } r^2 = 1 - \frac{\sum (V_A - \hat{V}_A)}{\sum (V_A - \bar{V}_A)^2}$$

Le résultat de la modélisation représente la meilleure combinaison des 5 paramètres (a, b, l, m et n) qui donne un coefficient de détermination maximal et en même temps statistiquement significatif.

- **estimation de la signifiante du modèle**

Pour estimer l’ajustement du modèle et les effets des variables explicatives on utilise le test de permutation de Fisher, en travaillant avec les coefficients de régression non-standardisés a et b. La permutation s’effectue en deux étapes – d’abord une régression ordinaire est effectuée et les résidus sont calculés. Ensuite les résidus sont attribués de façon aléatoire aux variables explicatives et ajustés à elles afin de calculer les distributions zéro pour le coefficient de détermination et les valeurs de t pour les variables explicatives. Les valeurs de p de l’ajustement général du modèle et des valeurs explicatives sont déterminées en comparant le coefficient de détermination observé et les valeurs de t des variables explicatives pour leurs distributions zéro.

- **logiciel utilisé**

Le modèle a été ajusté aux données à l'aide d'un logiciel spécial (programmé avec VBA et fonctionnant sous MS Excel), élaboré par le prof. Kiyoshi Umeki (Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Japon), aimablement mis à disposition pour les calculs et adapté aux besoins de cette étude par lui-même.

Le logiciel effectue l'ajustement du modèle et conduit le test statistique d'estimation de la signifiante du modèle. Comme données d'entrée il exige :

- les valeurs de r (rayon du cercle autour l'arbre central, à l'intérieur duquel les effets de tous les voisins sont pris en compte lors des calculs)
- les valeurs des paramètres l, m et n
- les valeurs du paramètre A, qui peut varier de 0 à 1 et qui sert pour diminuer l'effet des voisins de dhp inférieur à celui de l'arbre central, de la façon exprimée par Eq. 21 ci-dessous.

$$\text{Eq. 21 } T_1 = (DHP)^l \sum_i \left\{ \begin{array}{l} \frac{(dhp_i)^m}{d_i^n} \bar{u}_i, \text{ si } dhp_i > DHP \\ (1-A) \frac{(dhp_i)^m}{d_i^n} \bar{u}_i, \text{ si } dhp_i < DHP \end{array} \right.$$

Ce paramètre permet de déterminer si l'asymétrie est due à une compétition unilatérale relative (one-sided relative competition, en anglais) ou à une compétition bilatérale complète (completely two-sided competition), selon Thomas&Weiner (1989).

5.4 Essais mécaniques

Des essais mécaniques seront effectués dans le but d'étudier et (si possible) évaluer la stabilité et la résistance individuelles et collectives des arbres sur pied dans des conditions naturelles. Pour y arriver, il faut simuler la charge verticale excentrée de la neige accumulée sur un houppier asymétrique et simuler des interactions entre (au moins) deux arbres voisins. Avant de décrire les techniques de simulation développées, il faut tout d'abord donner une définition de la stabilité et de la résistance collectives.

5.4.1 Définition de la stabilité et de la résistance collectives

Dans la présente étude, on va formuler et travailler avec les définitions suivantes:

Stabilité et résistance individuelles (SRI) : expriment les capacités propres d'un arbre individuel de résister à la charge de la neige lourde (pas de plastification ou de cassure), de se maintenir dans un état stable (pas de flambage) et de ne pas céder à sa base (pas de déracinement), **sans interagir avec d'autres arbres voisins.**

Stabilité et résistance collectives (SRC): expriment les capacités d'un arbre individuel **dans un système composé de deux ou plusieurs arbres voisins en interactions (support mutuel ou unilatéral)** de résister à la charge de la neige lourde (pas de plastification ou de cassure), de se maintenir dans un état stable (pas de flambage) et de ne pas céder à la base (pas de déracinement).

La SI et la SC sont liées à la charge critique de flambage, la RI et la RC à la charge sous laquelle la tige de l'arbre subit une déformation plastique, mais représentent seulement le poids (ou la charge admissible) de la neige accumulée sur le houppier.

☞ Pour éviter la confusion, il faut souligner que **SRC caractérise chaque arbre séparément**. Il s'agit de la stabilité et de la résistance de **l'arbre individuel dans ou au sein d'un collectif (stabilité collective \neq stabilité du collectif !)**. Le peuplement en tant qu'entité sylvicole (unité de discrimination pour l'analyse sylvicole et unité d'intervention, selon Schütz, 1989) n'est pas un système mécanique unique³⁰, soumis à des sollicitations de charges statiques (en tout cas il n'a jamais été décrit comme tel) et par conséquent ne possède pas de caractéristiques communes de stabilité ou de résistance au sens mécanique des termes. Les expressions „stabilité du peuplement“, „stabilité du collectif“, etc., sont courantes dans la pratique et dans la recherche forestières et sont gardées telles quelles dans les citations données, sans qu'on s'associe pour autant à la signification que les auteurs leurs donnent.

5.4.2 Simulation d'une charge excentrée due à l'asymétrie du houppier

La simulation de l'effet de l'asymétrie du houppier par une charge excentrée n'a jamais été effectuée lors des essais de terrain. La difficulté pratique réside dans le fait que $C_{G_{\text{houpp+neige}}}$ n'est pas un point physique sur lequel un effort peut être directement appliqué.

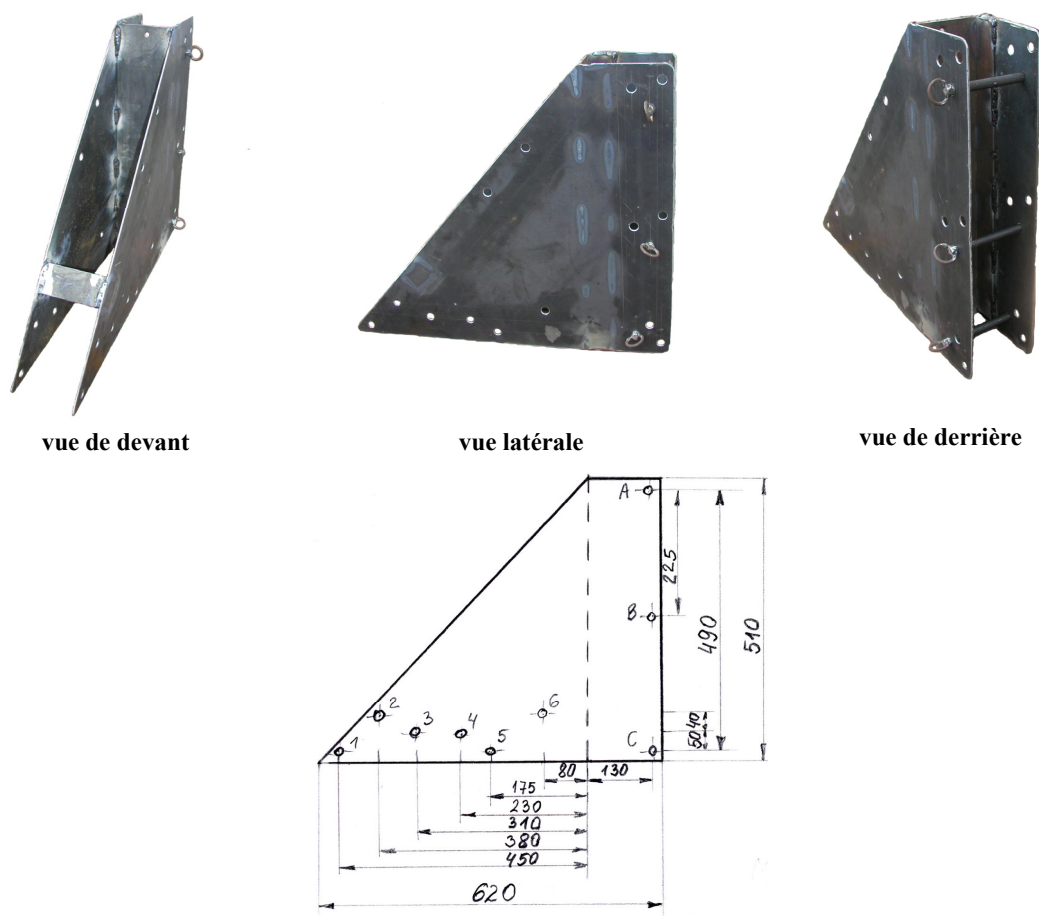


Fig. 26 Engin simulant asymétrie (conçue par Ivanov en 2004)

La solution technique trouvée représente une sorte de console métallique, appelée ESA - Engin Simulant Asymétrie (Fig. 26). Posé sur un verticille, l'ESA ne glisse pas et ne blesse pas l'écorce de la tige. Il est fixé à la tige à l'aide de courtes barres (vue de derrière), avec

³⁰ comme p.ex. un bâtiment

trois largeurs de fixation en fonction du diamètre de l'arbre à cette hauteur. L'ESA donne la possibilité de simuler 6 variantes d'excentricité entre 15 et 52cm par rapport à l'axe de la tige à la hauteur à laquelle il est fixé. La charge concentrée sera appliquée à l'aide de l'ESA à la hlh, à une distance de la tige à cette hauteur qui correspond à l'intensité du VA.

L'ESA est relativement facile à monter sur l'arbre (poids propre ~12kg). Il a aussi le grand avantage de pouvoir tourner autour de l'axe de la tige, ce qui rend possible le fléchissement de la tige dans plusieurs directions. Pour charger simultanément deux arbres et simuler des interactions entre eux, deux exemplaires de l'ESA ont été produits et utilisés.

5.4.3 Simulation de la charge de la neige lourde

L'installation originale de Nakatani et al. (1984, Fig. 13, p.51), complétée par l'ESA, a été d'abord testée sur le terrain. Elle s'est avérée inappropriée pour les buts de la recherche pour trois raisons :

- les arbres chargés individuellement montraient une tendance à se tordre au lieu de fléchir seulement dans le plan déterminé par la corde
- il était pratiquement impossible d'assurer la verticalité de la charge
- après l'entrée en contact des houppiers des arbres, les dynamomètres commençaient à travailler ensemble et par conséquent les charges appliquées n'étaient plus correctement enregistrées.

Il a fallu donc absolument éliminer ces inconvénients. Les efforts de modification ont abouti à l'élaboration d'une nouvelle installation où la méthode de simuler la charge de neige lourde a été changée fondamentalement (Fig. 27).

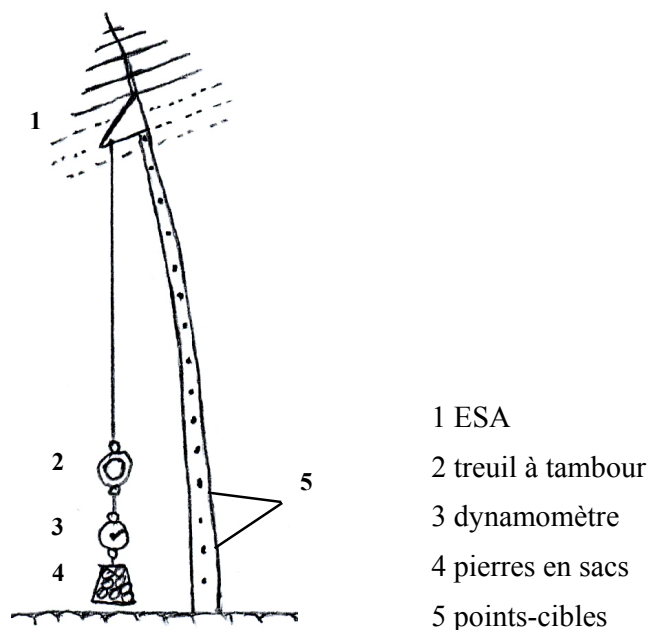


Fig. 27 Installation d'essai statique de charge verticale (conçue par Ivanov&Glushkov en 2004)

Au lieu d'utiliser des tireforts, la charge était appliquée directement par des sacs remplis de pierres et accrochés par une corde métallique directement à l'ESA. Ce procédé a rendu la charge parfaitement verticale, les deux arbres étaient déjà indépendamment chargés l'un de l'autre lors des interactions et étaient en mesure de se déformer librement dans l'espace. L'opérateur qui élève la charge à l'aide du treuil doit se tenir sous l'arbre lors du chargement. De ce fait l'installation présente un inconvénient - elle permet d'effectuer des charges

seulement dans le domaine élastique de déformation de la tige, à cause de la sécurité du travail.

La charge appliquée P est égale à (Eq. 22):

$$\text{Eq. 22} \quad P[kN] = (G_{\text{pierres}} + G_{\text{dynamomètre}} + G_{\text{treuil}} + G_{\text{corde}} + G_{\text{ESA}}) * 9.81$$

Le poids des pierres était enregistré par le dynamomètre, le poids des autres composants était mesuré une seule fois et ensuite additionné à chaque essai au poids des pierres.

5.4.4 Simulation des interactions entre les arbres

Deux **types principaux d'interactions statiques** entre deux arbres chargés et fléchis peuvent être formulés et étudiés par simulations (Fig. 28):

1. type bilatéral (cas de support bilatéral)
2. type unilatéral (cas de pression unilatérale/support unilatéral).



Fig. 28 Simulation des interactions statiques – type bilatéral (à gauche) et type unilatéral (à droite)

5.4.5 Etude des propriétés de fléchissement de billons

- **Description de l'installation et du déroulement des essais**

Afin de contrôler les résultats sur les propriétés mécaniques au fléchissement des tiges, obtenus par les essais d'arbres sur pied (le module E), il est nécessaire de soumettre des billons prélevés des mêmes tiges à la flexion à l'aide d'une presse et dans des conditions de laboratoire. Ces essais fourniront en outre des informations sur la limite d'élasticité σ_E et la résistance à la flexion σ_B , des propriétés qui ne peuvent pas être étudiées sur le terrain pour des raisons de sécurité du travail. Plusieurs chercheurs étudient les propriétés mécaniques du bois sur la base d'essais en échantillons (Kufner, 1983; Nakatani et al., 1988, Brüchert&Becker, 2000; Brüchert et al., 2000). Ce procédé présente les désavantages de fournir des résultats variés du module E et de la résistance à la flexion en fonction de la position de l'échantillon sur la tige. Bien qu'il soit possible par intégration d'obtenir des valeurs plausibles du module E pour la tige entière (Nakatani et al., 1988; Niklas, 1992; Brüchert et al., 2000; Gaffrey&Kniemeyer, 2002), il n'est pas possible par la même voie d'estimer la résistance à la flexion d'un segment de la tige, car les contraintes internes préexistantes dans la tige entière restent complètement négligées. D'autres chercheurs ont effectué des essais avec des billons sous différentes conditions – p.ex. 2 mètres de longueur d'étude, charge centrée (Nakatani et al., 1984). Afin de minimiser l'effet de l'effort tranchant sur la déformation lors du fléchissement, il faut que la longueur étudiée du billon soit supérieure à 20 fois son épaisseur (son diamètre) (Baumann, 1922, in Gaffrey&Kniemeyer,

2002). A partir d'un rapport de 30, l'effet de l'effort tranchant peut être négligé (Brüchert et al., 2000).

Les essais de fléchissement des billons ont été conduits dans une usine de production de chariots élévateurs à Sofia. Une presse hydraulique allemande Erfurt 250/2500 à commande manuelle (Fig. 29), capable d'exercer une pression de 250 tonnes (2 500kN) au maximum, a été utilisée. Le plongeur de la presse (\varnothing 200 mm) se termine par une plaque en métal soudée à celui-ci, qui entre en contact avec le billon.



Fig. 29 Presse hydraulique Erfurt 250



Fig. 30 Manomètre

La pression hydraulique interne de la presse est mesurée à l'aide d'un manomètre (Fig. 30). La surface transversale du plongeur S_{plongeur} est égale à (Eq. 23) :

$$\text{Eq. 23 } S_{\text{plongeur}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.2)^2}{4} = 0.0314 \text{ m}^2$$

A une pression enregistrée de 1MPa correspond donc à une charge de 31.4kN exercée sur et par le plongeur. Respectivement la plus petite division de la graduation du manomètre (0.02MPa) correspond à 0.628kN et la plus petite charge qui peut être estimée correspond à $\frac{1}{4}$ de la plus petite division (0.005MPa), soit 0.157kN. Le dernier chiffre indique en effet l'ordre de grandeur de la précision de lecture des charges exercées par le plongeur.



Fig. 31 Installation des essais de fléchissement des billons

Les billons ont été positionnés sous le plongeur de la presse de telle façon à ce que le centre du billon soit sous le centre de la plaque du plongeur. Des palettes en métal ont servi comme assises. Afin d'empêcher le billon de bouger dans le support lors du fléchissement, les niches ont été remplies de plaques en métal (Fig. 32). Le gros bout du billon a toujours été posé sur l'assise gauche.

Diamètre du plongeur de la presse, mm	200
Dimensions de la plaque sous le plongeur (longueur/largeur), mm	530/400
Distance entre les assises, mm	3110
Distance entre l'assise gauche et le centre de la plaque, mm	1560
Distance entre l'assise droite et le centre de la plaque, mm	1550

Tab. 8 Caractéristiques de l'installation des essais de fléchissement des billons



Fig. 32 Assise droite du billon, vue latérale de la presse hydraulique

La flèche résultant du fléchissement n'a pas pu être directement enregistrée ou mesurée, elle a été admise égale à la course du plongeur. La course du plongeur était suivie par une baguette fixée à la plaque sous le plongeur et les déplacements ont été lus sur un ruban métrique suspendu de côté (Fig. 33).

L'utilisation d'une presse hydraulique pour des essais de fléchissement présente un inconvénient, notamment le fait que le fléchissement s'effectue constamment comme un processus dynamique jusqu'à la rupture du billon ou jusqu'à la relâche de la compression de la presse par l'opérateur. La lecture d'une paire de valeurs déplacement/charge dans une position d'équilibre statique du système n'est donc pas possible. Afin de surmonter cette difficulté, la charge et la course du plongeur (le déplacement) correspondant ont été enregistrées simultanément de deux façons :

- Par prise de photos du manomètre indiquant la pression hydraulique et de la baguette indiquant le déplacement du plongeur à un moment donné du processus (Fig. 33).

- Par enregistrement vidéo du manomètre et de la baguette indicatrice pendant tout le processus de fléchissement jusqu'à la cassure du billon. La lisibilité sur les enregistrements vidéo est moins bonne que celle des photos. Ces enregistrements permettent de déterminer le moment d'entrée en contact de la plaque du plongeur avec le billon, c'est-à-dire le point de référence pour transformer ensuite tous les déplacements relatifs en déplacements absolus.

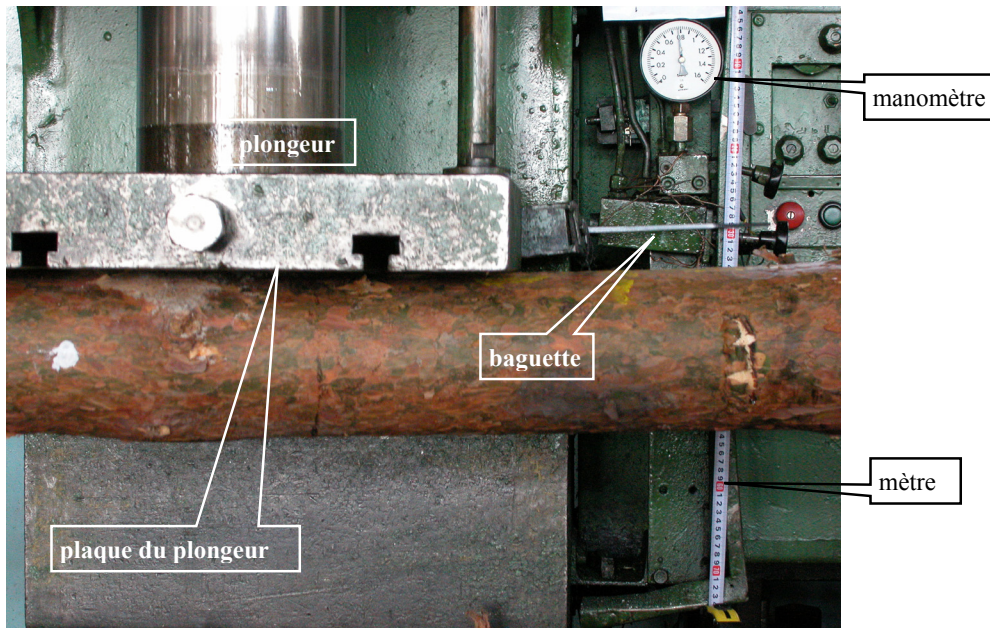


Fig. 33 Fléchissement d'un billon et enregistrement des indications du manomètre et de la baguette sur le ruban métrique

Chaque billon a été soumis au fléchissement dans deux plans et trois sens. D'abord dans le même plan que la direction naturelle de fléchissement (DNF) mais dans le sens opposé (position 1), ensuite dans un plan perpendiculaire à celui de la DNF (position 2) et finalement dans le même plan que la DNF et dans le même sens jusqu'à la rupture (position 3). Dans une position, le billon a été fléchi à quelques reprises. On a veillé à ne franchir la limite d'élasticité du matériau que lors du dernier fléchissement dans position 3, ce qui n'a pas été toujours possible.

- **Evaluation de l'installation et paramètres des essais**

L'installation et la façon de conduire les essais présentent quelques inconvénients dont il faut tenir compte. Le contact initial entre le plongeur et le billon se passe en un seul point (du côté du gros bout), à cause de la forme légèrement conique de ce dernier. Cela pourrait conduire, chez des billons les plus coniques, à une charge asymétrique. Puisque l'appui fourni par les assises a une petite surface, on admet que le point d'application des réactions de soutien se situe à une petite distance du bord des assises (0.055m), ce qui donne une envergure de fléchissement pour tous les billons de 3.22m (Fig. 34).

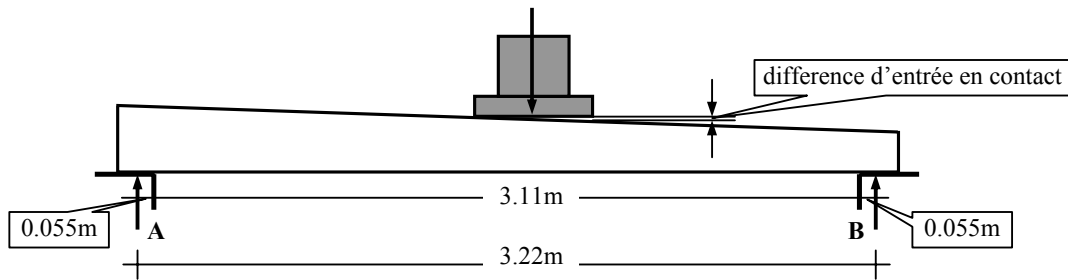


Fig. 34 Envergure de fléchissement

Lors du fléchissement, aux endroits de contact, les compressions exercées sur des surfaces relativement petites provoquent des déformations locales qui ont une influence sur la flèche. La charge exercée par le plongeur sera représentée par deux forces (F_1 et F_2) d'intensité égale dont les points d'application sont admis à une petite distance (0.035m) des bords de la plaque du plongeur (Fig. 35).

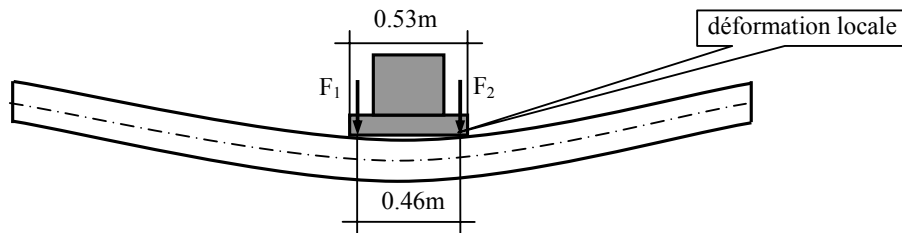


Fig. 35 Charge du plongeur et déformations locales

On admet encore que la forme du billon est parfaitement conique. Le diamètre (sans écorce), respectivement le moment d'inertie J à un endroit donné se calcule en fonction de la distance de l'endroit du petit ou du grand bout et des diamètres des deux bouts. On admet aussi que le module E est constant le long du billon.

5.5 Modélisation de la stabilité et de la résistance individuelles de l'arbre

5.5.1 Déformation d'une barre en flexion. Analogie de Mohr

Suivant le modèle adoptée pour le système mécanique de l'arbre (Fig. 37, p. 88, à gauche), la déformée d'une barre fléchie (dans une seul plan) dans le domaine élastique reflète l'état d'équilibre entre les moments engendrés par les charges extérieures (du poids de la neige, du poids du houppier et du poids propre de la tige) et les efforts intérieurs. Cet équilibre est exprimé par Eq. 24:

$$\text{Eq. 24} \quad \frac{1}{\rho} = \frac{w''}{(1 + w'^2)^{3/2}} = -\frac{M(z)}{EJ(z)}$$

ρ – rayon de courbure

$w(z)$ – déformation

$M(z)$ – moment fléchissant extérieur

E – module d'élasticité

$J(z)$ – moment d'inertie des sections par rapport à l'axe de la tige

Normalement, quand il s'agit de dimensionner un élément constructif, la rigidité EJ est connue et il faut calculer les déformations $w(z)$. La déformation $w(z)$ dans une section de la barre dépend du moment fléchissant M et de l'effort tranchant V qui doit être pris en compte pour des barres élancées (Eq. 25).

$$\text{Eq. 25 } w(z) = w_M(z) + w_V(z)$$

La pratique dans les constructions du génie civil est de travailler normalement avec de très petites déformations, en admettant que la première dérivée de la déformée (w') est égale à 0 (Kissiov, 1978; Dubas, 1983). On travaille ainsi dans le domaine de la théorie de 1^{er} ordre, qui présume la proportionnalité entre les forces extérieures appliquées et les déformations. Ceci n'est pas admissible dans le cas des arbres qui subissent des déformations relativement grandes (Petty&Worrel, 1981), valable aussi dans le cas étudié. Il est possible de prendre en compte l'influence de la déformation sur les conditions d'équilibre statique en admettant une relation linéaire entre la courbure et les dérivés des déformations et travailler ainsi dans le domaine de la théorie de 2^{ème} ordre (Bürgermeister&Steup, 1959). C'est dans ce domaine que les calculs mécaniques du présent travail vont s'effectuer.

Au lieu de travailler avec l'équation différentielle de la déformée, qui déjà dans sa forme simplifiée ($w' \sim 0$, effort tranchant négligé) ne permet qu'une simple solution analytique que si la rigidité à la flexion EJ est constante (Dubas, 1983), il est possible d'appliquer d'autres méthodes. Le calcul des déformations peut être fait par la méthode de Mohr (cf. Fig. 36 et Fig. 37). Selon les théorèmes de Mohr (Stauffer, 1990):

- la déformée $w(z)$ d'une barre en flexion est la ligne représentative du diagramme des moments M^* d'une barre fictive (conjuguée), chargée de façon fictive par une charge répartie q^* égale à la courbe réelle des moments engendrés $M(z)$ par les charges réelles et ceci au coefficient $1/EJ$ près.
- la flèche f dans une section quelconque z de la barre est la valeur du moment fléchissant dans la section z considérée d'une barre fictive chargée en tout point d'une charge fictive égale à M/EJ .

Dans l'application pratique de la méthode de Mohr par voie numérique, la barre conjugquée est „chargée“ par la charge répartie q^* (Eq. 26)

$$\text{Eq. 26 } q^* = \frac{M}{EJ} - \frac{d}{dz} \left(\frac{V}{GA^*} \right)$$

Pour des $M(z)$ et de $EJ(z)$ variables, la charge fictive q^* est calculée comme des charges nodales (formules paraboliques), respectivement pour la première partie d'équation Eq. 26 - suivant Eq. 27, Eq. 28 et Eq. 29 et pour la deuxième partie – suivant Eq. 30 (Dubas, 1983).

$$\text{Eq. 27 } K_0 \left(\frac{M}{EJ} \right) = \frac{\Delta x}{12} \left(3.5 \frac{M_0}{EJ_0} + 3 \frac{M_1}{EJ_1} - 0.5 \frac{M_2}{EJ_2} \right) - \text{pour l'extrémité initiale de la barre}$$

$$\text{Eq. 28 } K_m \left(\frac{M}{EJ} \right) = \frac{\Delta x}{12} \left(\frac{M_{m-1}}{EJ_{m-1}} + 10 \frac{M_m}{EJ_m} + \frac{M_{m+1}}{EJ_{m+1}} \right) - \text{pour la partie moyenne de la barre}$$

$$\text{Eq. 29 } K_n \left(\frac{M}{EJ} \right) = \frac{\Delta x}{12} \left(-0.5 \frac{M_{n-2}}{EJ_{n-2}} + 3 \frac{M_{n-1}}{EJ_{n-1}} + 3.5 \frac{M_n}{EJ_n} \right) - \text{pour l'extrémité finale de la barre}$$

$$\text{Eq. 30 } \frac{d}{dx} \left(\frac{V}{GA^*} \right) = \frac{V_m}{GA_m^*} - \frac{V_{m+1}}{GA_{m+1}^*} \text{ (seulement la partie négative ou positive pour les extrémités)}$$

Ainsi la charge fictive totale K_{tot} est égale à :

$$\text{Eq. 31 } (K_m)_{tot} = K_{m(0,n)} \left(\frac{M}{EJ} \right) + \frac{V_m}{GA_m^*} - \frac{V_{m+1}}{GA_{m+1}^*}$$

5.5.2 Calcul du module E et de la résistance du bois

- **Calcul du module E, de la limite d'élasticité et de la résistance du bois (fléchissement de billons)**

L'envergure du fléchissement du billon sera divisée en 7 segments, chacun d'une longueur de 0.46m. On travaille avec des charges unitaires de 1kN ($F_1+F_2=A+B=2\text{kN}$). A partir du diagramme des moments réduit (M/J) sont calculées les huit charges nodales, avec lesquelles est chargée la barre conjuguée (Fig. 36).

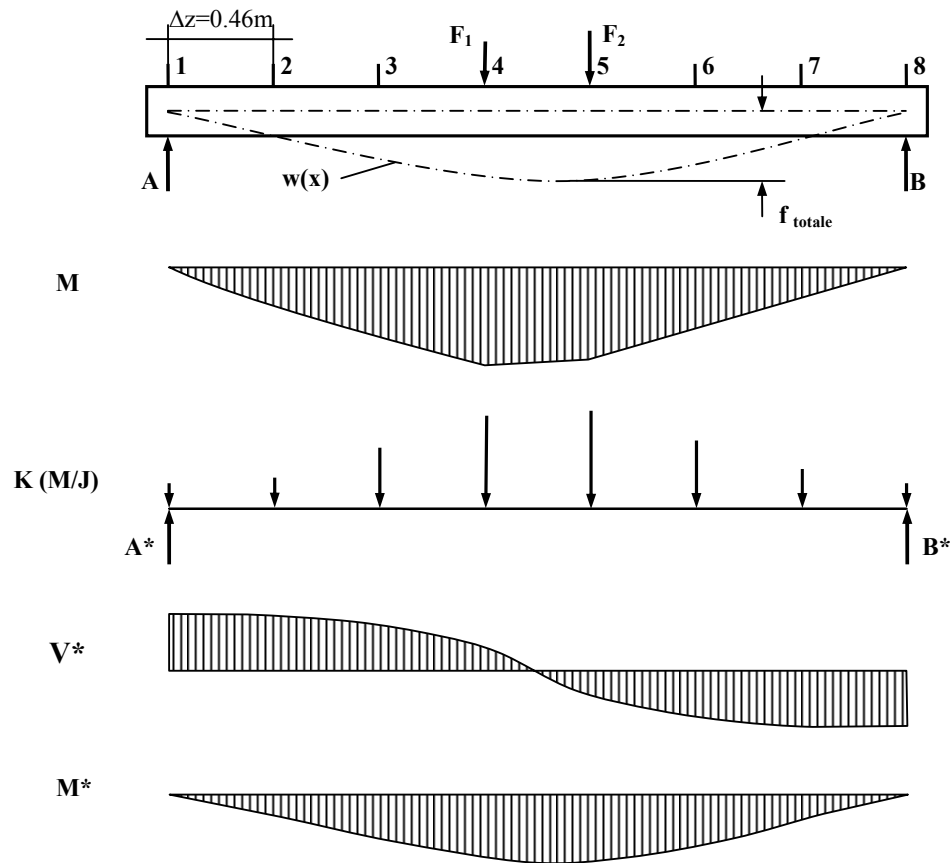


Fig. 36 Analogie de Mohr et calculs des déformations pour un billon

La valeur maximale des M^* correspond à la flèche réelle des déformations. La déformation totale dépend des moments et de l'effort tranchant (Eq. 32) :

$$\text{Eq. 32 } f_{totale} = f_M + f_V$$

On admet que l'apport de l'effort tranchant dans la déformation totale est de l'ordre de 5%, c.à.d. que $f_M / f_{totale} \cong 0.95$. La valeur de f_{totale} pour une charge de 2kN est calculée avec la fonction sous Eq. 33, établie pour le billon des essais de fléchissement (cf. Fig. 75, p.127):

$$\text{Eq. 33 } f_{totale} = a.F$$

Le module E est calculé finalement par la fonction sous Eq. 34 :

$$\text{Eq. 34 } E = \frac{\max M^*}{f_M}$$

La valeur obtenue du module E doit être considérée comme une borne inférieure, car on ne tient pas compte des déformations locales (cf. Fig. 35, p.85).

La limite d'élasticité, respectivement la résistance du bois, sont calculées avec les formules sous Eq. 35, où d est le diamètre de la section dans laquelle est engendré le moment maximal. Le moment maximal maxM d'entrée dans la zone plastique, respectivement de rupture, est calculé avec la charge correspondante enregistrée lors des essais de fléchissement (cf. Fig. 35, p.85)

$$\text{Eq. 35 } \sigma_E = \frac{32 \cdot \max M_{\sigma_E}}{\pi \cdot d^3} ; \sigma_B = \frac{32 \cdot \max M_{\sigma_B}}{\pi \cdot d^3}$$

• **Calcul d'un module E constant (fléchissement d'arbres sur pied)**

Lors des essais de simulations, l'arbre chargé individuellement ou en interactions avec un voisin se déformera sous la charge appliquée jusqu'à la prise d'un nouvel état d'équilibre.

Sous „position“ de la tige on va comprendre chaque état d'équilibre statique correspondant à une combinaison unique de charge appliquée, direction de fléchissement simulé et conditions d'interactions avec un voisin.

Sous „position initiale“ on va comprendre la position dans l'état naturel non-chargé

Dans chaque position de l'arbre, la déformée $w(z)$ (grâce à la reconstitution photogrammétrique) et les moments fléchissants engendrés par la charge appliquée sont connus. Le module d'élasticité (le paramètre inconnu) se laisse déduire par la méthode de Mohr (Fig. 37), seulement pour les positions sans interactions. La tige sera divisée en 24 segments. Pour les conditions aux limites (A), l'encastrement rigide ($w=0; w'=0$) est remplacé par une extrémité libre ($M^*=0; V^*=0$) et vice versa.

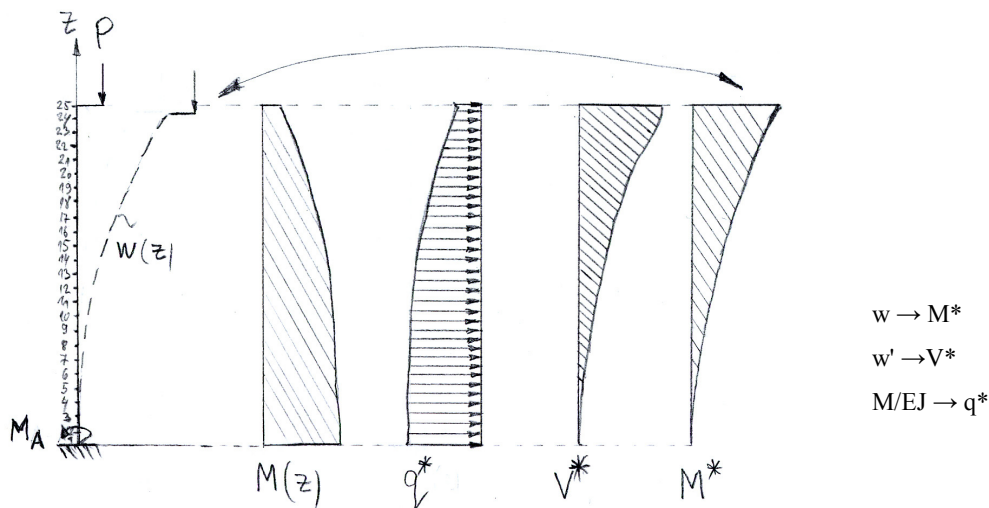


Fig. 37 Barre réelle et barre fictive (conjuguée). Analogie de Mohr pour le modèle de l'arbre sur pied

Le problème consiste à trouver la valeur du module E pour laquelle la déformée théoriquement calculée va coïncider avec la déformée réellement mesurée.

Pour le calcul des moments fléchissants pour chaque portion de la tige, il sera tenu compte de l'inclinaison de la tige et du sens de fléchissement. Trois cas principaux simplifiés seront

considérés (cf. Annexe 4, p.217) : tige verticale (pas d'inclinaison); tige inclinée qui fléchit dans le même plan et dans le même sens que l'inclinaison; tige inclinée qui fléchit dans le même plan mais dans le sens opposé de l'inclinaison. Pour une section n quelconque de la tige, le moment fléchissant externe est égal à la somme des moments, engendrés par la charge du houppier, de la neige (réelle ou simulée) et du poids propre de la tige (Eq. 36) :

$$\text{Eq. 36 } M_n^{\text{externe}} = M_n^{\text{tige}} + M_n^{\text{houppier}} + M_n^{\text{charge}}$$

- **Calcul d'un module E variable (fléchissement d'arbres sur pied)**

Pour introduire correctement un module E variable dans les calculs, il faut connaître la façon dont il évolue le long de la tige. Les allures moyennes par classes sociales (chez des épicéas), présentées par Brüchert et al. (2000), suggèrent que le module E reste relativement constant entre 20 et 50-60% de la hauteur des tiges, ensuite il peut diminuer, parfois considérablement. Vers la base de la tige, le module E montre aussi des valeurs sensiblement inférieures par rapport à la partie centrale. Pratiquement les mêmes constatations sont faites par Nakatani et al. (1988) pour la cryptométrie du Japon – la zone de module E constant est située entre 30 et 80% de la hauteur totale de la tige, en dessous et au-dessus de cette zone le module diminue. Si on regarde de plus près les données de Brüchert et al. (2000) on constate que la diminution du module E apparaît (souvent de façon abrupte) juste ou peu après la base du houppier (hbh). Cette relation ne peut pas être observée chez Nakatani et al. (1988), fautes d'indications sur la hbh.

Lors des calculs un module E constant sera admis dans la partie centrale de la tige (entre 0.2H et la hbh) et sera désigné comme E_{tige} . L'effet d'un module E variable à la base de la tige (<0.2H) et au-dessus de la hbh sera étudié en introduisant dans ces zones une allure linéaire de diminution dans l'ordre de 30% (Fig. 38).

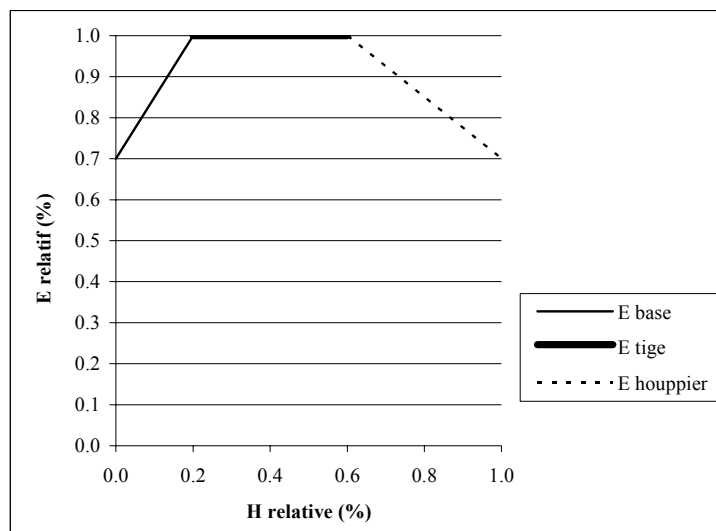


Fig. 38 Allure admise de l'évolution du module E le long de la tige

5.5.3 Paramètres de la modélisation

- **Comportement du matériau**

On admet jusqu'à la limite d'élasticité un comportement élastique linéaire idéal du matériau bois, conforme à la loi de Hook, comme dans beaucoup d'autres études (Petty&Worrel, 1981; Nakatani 1991; Peltola&Kellomäki, 1993 ; Kato&Nakatani, 2000; Gaffrey&Kniemeyer, 2002).

- **Poids propre de la tige et du houppier**

Le poids propre de la tige dépend de la densité du bois frais. Pour toutes les tiges la densité en état frais sera admise pour 900kg/m^3 (Bluskova, 2003). Le poids du houppier à l'état frais ne sera pas directement mesuré. Il sera estimé en fonction de la classe de fertilité du peuplement et du $d_{1,3}$ de l'arbre (tarif de Dimitrov et al., 2003). La valeur tarifaire sera réduite d'un tiers à cause de l'élagage des branches des verticilles situées en dessous de l'ESA.

- **Genre de charges**

La charge créée par le houppier (sans ou avec neige accumulée) peut être exprimée comme une charge répartie à un intervalle donné de la hauteur de la tige (Marsch, 1989 ; Nakatani, 1991) ou comme une charge concentrée (Peltola&Kellomäki, 1993). Dans le présent travail, une charge concentrée sera utilisée. Cela veut dire que seulement la partie de la tige, située en dessous du point d'application de la charge sera étudiée. Le problème pratique dans ce cas est de déterminer le point d'application de la charge concentrée ou en autres termes, de déterminer l'emplacement dans l'espace 3-dimensionnelle de $C_{g_{houpp}}$ et de $C_{g_{houpp+neige}}$. Des recherches ciblées à ce sujet font défaut (Nakatani, 1991). On admet que :

- la distance entre le $C_{g_{houpp+neige}}$ et l'axe de la tige est égale à l'intensité du VA
- $C_{g_{houpp+neige}}$ est situé à une hauteur qui correspond à la hlh .
- la direction du VA correspond avec la direction naturelle de fléchissement (DNF)
- l'excentricité de la charge reste constante lors de l'accumulation de la neige, respectivement lors de l'augmentation de la charge appliquée

- **Forme de la tige**

L'écorce de la tige ne sera pas prise en compte, car elle contribue relativement peu à la résistance et la rigidité de la tige (Speck et al., 1996, in Brüchert et al., 2000). L'épaisseur de l'écorce à déduire des diamètres sur écorce mesurés sera estimée sur la base d'une fonction de régression établie avec des données provenant des analyses de tiges du même peuplement. On admet comme la plupart d'autres auteurs que la section transversale de la tige représente un cercle idéal. A noter que Gaffrey&Kniemeyer (2002) sont parmi les rares à travailler avec une forme ovale). Le moment d'inertie J_n de la section est calculé en fonction de son diamètre sous écorce (Eq. 37) :

$$\text{Eq. 37 } J_n = \frac{\pi \cdot d_n^4}{64} [m^4]$$

- **Genre d'encastrement**

L'encastrement peut être considéré comme rigide (Pfeffer, 1955; Petty&Worrel, 1981; Marsch, 1989). En réalité, il est doté d'une certaine élasticité (Vanomsen, 2006) et devrait être considéré plutôt comme un ressort (Nakatani et al., 1984; Nakatani, 1991; Kato&Nakatani, 2000). L'influence de l'encastrement sur la charge critique de flambage et sur la RI sera présentée et discutée respectivement sous §5.5.4 et §5.5.6.

- **Moment de résistance à la flexion et au déracinement**

Certains auteurs (Petty&Worrel, 1981; Peltola&Kellomäki, 1993) ne prennent en compte que le moment engendré à la base de la tige, car à cet endroit il a la valeur absolue maximale. Toutefois, ce n'est pas à cet endroit que les contraintes sont les plus grandes et une cassure n'y est pas attendue de se produire (Nakatani, 1991). Pour une section n quelconque de la tige, le moment fléchissant admissible est calculé selon la formule sous Eq. 38 :

$$\text{Eq. 38 } \max M_n = \frac{\pi \cdot d_n^3 \cdot \sigma_E}{32}$$

La tige subit donc un dégât de plastification selon la condition sous Eq. 39:

$$\text{Eq. 39 } M_n^{\text{externe}} > \max M_n$$

Au cas où $M_d < \max M_n$, la tige subit un déracinement au lieu d'une plastification ou cassure (Nakatani, 1991).

5.5.4 Calcul de la charge critique de flambage. Stabilité individuelle

La charge critique de flambage (P_{cr}) a été calculée d'abord de façon analytique (Kufner, 1983; Nakatani et al., 1984; Nakatani, 1991). Les formules analytiques ne se laissent déduire que pour des barres de formes géométriques régulières (p.ex. cylindre de révolution). La tige de l'arbre est souvent considérée comme un cône tronqué (Kufner, 1983; Nakatani et al., 1984; Nakatani, 1991). L'emploi de formules analytiques est restreint ou même impossible si la forme réelle de la tige diffère beaucoup de la forme idéalisée et si on veut travailler avec un module E variable le long de la tige.

Marsch (1989) utilise la méthode d'énergie (Pflüger, 1964 ; in Marsch 1989) et la méthode de Ritz pour le calcul par approximations de la charge critique par une intégration numérique. Nakatani (1991) calcule la charge critique en exprimant les équations différentielles de la déformée dans chaque portion de la tige (en prenant ainsi compte de sa forme réelle et en introduisant un module E variable). De nos jours, le progrès de l'informatique rend beaucoup plus facile l'application de méthodes numériques (p.ex. avec Excel), jadis évitées à cause du besoin de calculs manuels énormes ou de programmation de logiciels spéciaux. Selon Stüssi&Dubas (1971) „besteht bei der Lösung der Differentialgleichung des Knickproblems die Schwierigkeit, dass für die Knickkurve η^{31} kein einfacher Lösungsansatz in geschlossener Form angegeben werden kann. Man ist deshalb [...] auf numerische Verfahren angewiesen. Ein [...] Weg besteht darin, dass wir entsprechend der Gleichgewichtsbedingung

$$\eta_1'' = -\frac{P}{EJ} \cdot \eta_0$$

die Form η_0 der Knickbiegungslinie schätzen und zur reduzierten Momentfläche $\frac{P}{EJ} \cdot \eta_0$ die

Biegungslinie $\eta_1 = \alpha_1 \cdot \eta_0$ als Seilpolygon berechnen; die Knickbedingung $\alpha=1$ für irgendeine Stelle x [...] liefert uns einen ersten Näherungswert P_{1kr} , wenn die beiden Kurven η_0 und η_1 einander nicht ähnlich sind. Wiederholen wir die Rechnung, ausgehend von der Form der Kurve η_1 , so finden wir einen zweiten Näherungswert P_{2kr} , der schon wesentlich näher beim gesuchten genauen Wert der Knicklast liegt.

Seine Leistungsfähigkeit beruht auf der sehr guten Konvergenz; sowohl der Wert von P_{kr} als auch die Ausbiegungskurve η nähern sich normalerweise rasch den genauen Werten, d.h. den gesuchten Lösungen der Differentialgleichung“. L'approche numérique rend donc possible le calcul de la charge critique pour une barre de forme et de rigidité (EJ) variables, tout en tenant aussi compte de son poids propre.

Pour le cas d'une barre de rigidité EJ constante, encastrée et chargée de façon centrée à l'autre extrémité (le cas I d'Euler), la charge critique est égale à (Eq. 40):

³¹ ligne élastique de flambage, $\eta(z) = 1 - w(z)$

$$\text{Eq. 40 } P_{cr} = \pi^2 \frac{EJ}{4l^2}$$

La charge critique par la méthode numérique est donnée par Eq. 45:

$$\text{Eq. 41 } P_{cr} = f_{cr} \cdot \frac{EJ_B}{l^2}$$

où f_{cr} est le facteur de la charge critique effective

J_B est le moment d'inertie de la base de la barre

l est la hauteur de la barre de sa base jusqu'au point de charge

Lors du calcul de la charge critique de flambage pour une tige réelle, trois aspects doivent être considérés :

- sa forme réelle et l'évolution du module E le long de la tige (rigidité EJ variable).

Elles sont déjà considérées par le biais du diagramme des moments réduits.

- le poids propre de la tige

Les formules présentées jusqu'ici se rapportent pour une barre sans poids propre. En effet, le poids propre de la tige agit en plus le long de l'axe de la tige comme une charge répartie. Pour une barre en forme de cône tronqué, Likar (1968) publie des formules analytiques pour le calcul de l'influence du poids propre, utilisées par Kufner (1983) pour des tiges de formes idéalisées. Elles peuvent être utilisées en combinaison avec la méthode numérique pour des tiges de formes réelles (Eq. 42-Eq. 44).

$$\text{Eq. 42 } \bar{P}_{cr} = P_{cr} \left(1 - \frac{p_1}{P_{1cr}}\right)$$

où

\bar{P}_{cr} est la charge critique qui tient compte du poids propre

p_1 représente le poids d'un cylindre de révolution, dont le diamètre correspond au diamètre à la base de la tige (d_B) et dont la hauteur est égale à 1 (Eq. 43)

$p_{1,cr}$ est un facteur qui reflète la forme de la tige (Eq. 44)

ρ_u – densité du bois frais

$$\text{Eq. 43 } p_1 = \rho_u \cdot \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} \text{ [kg/m]}$$

$$\text{Eq. 44 } p_{1k} = \frac{E \cdot d_B^4 \cdot \pi \cdot \kappa_{Bk}}{l^3 \cdot 64 \cdot 9,81} \text{ [kg/m]}$$

l – hauteur de la tige jusqu'au point de charge

κ_{Bk} – coefficient qui reflète la forme de la tige

Le coefficient κ_{Bk} est calculé par la méthode numérique de la même façon que le facteur f_{cr} en chargeant dans chaque nœud en fonction du poids propre de la partie au-dessus du nœud.

- la rigidité d'encastrement de la tige

L'encastrement d'une tige réelle n'est pas parfaitement rigide. La charge critique dépend fortement de la flexibilité de l'appui (Pflüger, 1950). L'influence se traduit par une augmentation de la longueur de flambage l_{cr} (Fig. 39), respectivement par une réduction de la charge critique, car la longueur de flambage entre dans la formule avec la puissance 2 (cf. Eq. 41). Pour quelques tiges-modèles de cryptométrie du Japon, Kato&Nakatani (2000) estiment la réduction dans l'ordre de 11%.

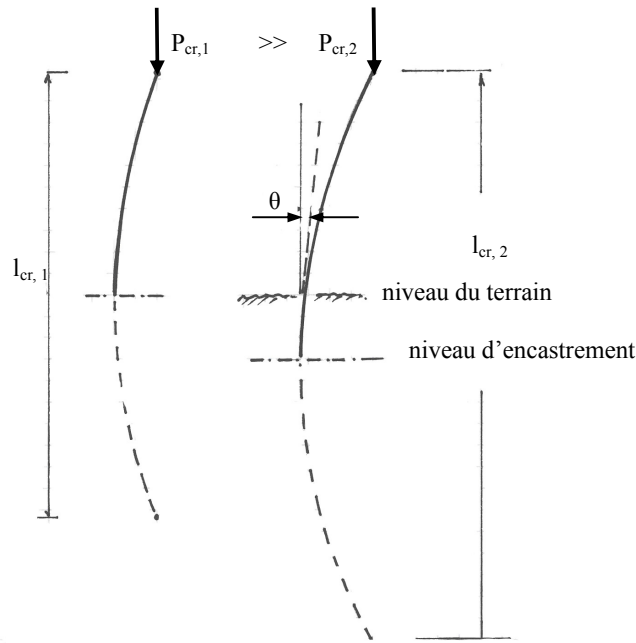


Fig. 39 Influence de la flexibilité de l'encastrement sur la charge critique de flambage

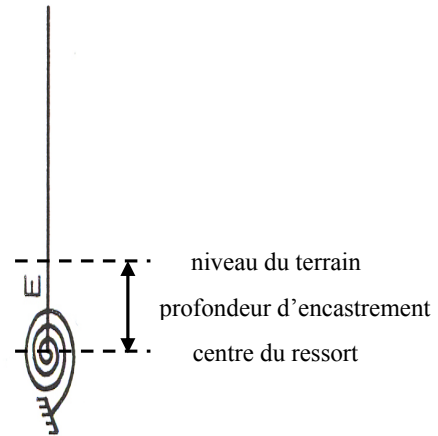


Fig. 40 Encastrement élastique modélisé par un ressort

Il y a en général deux possibilités pour tenir compte de l'élasticité de l'encastrement :

- introduire un ressort (Fig. 40). Pour connaître l'emplacement exact du ressort et sa constante de raideur k (kN.m/radian), il faut faire des essais spéciaux pour évaluer la rigidité d'encastrement. De tels essais ne sont pas prévus dans le cadre du présent travail.
- introduire une profondeur d'encastrement (PE) de la tige plus grande que le niveau du terrain et travailler avec un encastrement rigide. Une PE équivalente 3 à 5 fois le diamètre à la base de la tige sera admise dans ce travail (Fig. 41).

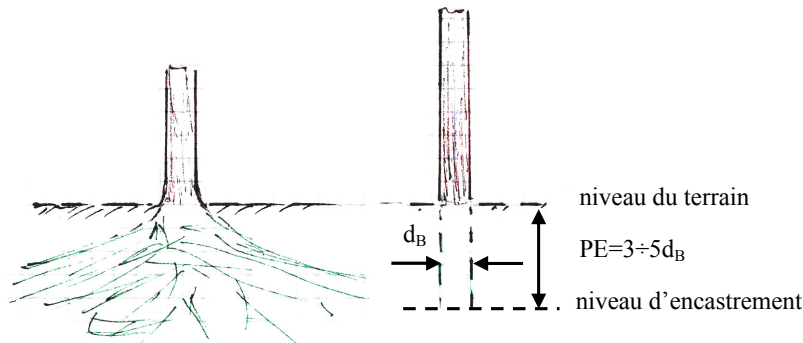


Fig. 41 Profondeur d'encastrement (PE)

Pour chaque arbre, la charge maximale effective de la neige accumulée sur le houppier est obtenue en soustrayant la charge créée par le houppier de la charge critique. C'est l'expression de la stabilité individuelle (SI) de l'arbre (Eq. 45):

Eq. 45 $SI = \bar{P}_{cr} - P_{houpp}$ [kN]

La valeur de la SI n'a qu'une signification théorique, elle représente une borne supérieure de la charge de neige qui sous des conditions réelles ne peut pas être atteinte.

5.5.5 Calcul des états d'équilibre de 2^{ème} ordre

Dans le cas idéal (barre droite, charge centrée) le problème du calcul de la charge critique peut être aussi considéré comme un cas spécial de la théorie des déformations (Bürgermeister&Steup, 1959). Les moindres imperfections dans l'état initial (p.ex. une petite déformation initiale w_0) conduisent à des moments initiaux qui de leur part conduisent à une augmentation de la déformation initiale. Les déformations augmentées conduisent à une augmentation consécutive des moments (moments de 2^{ème} ordre) qui de leurs part conduisent à une augmentation des déformations et ainsi de suite. Dans chaque état d'équilibre, la déformation finale w dans n'importe quelle section de la tige est égale à la somme de toutes les déformations secondaires, c.à.d.:

$$w=w_0+w_1+w_2+ \dots \Leftrightarrow w=w_0+\alpha_1.w_1+\alpha_2.w_2+ \dots \Leftrightarrow w=w_0(1+\alpha_1+\alpha_1.\alpha_2+\alpha_1.\alpha_2.\alpha_3+\dots)$$

Si les déformées intermédiaires sont affines l'une à l'autre (ce qui est le cas), alors $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3\dots=\alpha$. La relation de la déformation finale w avec la déformation initiale w_0 est exprimée par Eq. 46 (Dubas, 1983), où le facteur α est le critère de flambage. Si $\alpha=1$, le flambement se produit.

Eq. 46 $w = w_0 \cdot \frac{1}{1-\alpha}$

Le coefficient $\frac{1}{1-\alpha}$ joue en effet le rôle d'un **facteur amplificateur**. Il exprime la façon non-linéaire d'augmentation des déformations, en fonction seulement de la charge P.

Pour $\frac{P}{P_{cr}} \ll 1$ ($\alpha < 1$), la déformée prend une forme finale (état d'équilibre de 2^{ème} ordre) qui se laisse aussi déterminer de façon itérative³² par la méthode numérique. Les déformations consécutives (w_0, w_1, \dots) peuvent être calculées par la méthode de Mohr. Dans le cas étudié, le moment initial résulte d'une part de l'excentricité de la charge et d'autre part d'une inclinaison de la tige.

La position initiale, mesurée sur le terrain (tige sans charge) représente aussi un état d'équilibre de 2^{ème} ordre que la tige admet sous le poids de son houppier et sous son poids propre. Pour simuler un état d'équilibre quelconque, il faut connaître la position virtuelle (**l'état zéro**) que la tige aurait obtenu si le houppier n'existait pas et si la tige n'avait pas de poids propre. **La position zéro** ne peut naturellement pas être réellement mesurée mais elle se laisse approximer par simulations, la position initiale étant la forme finale cherchée de la déformée. La position initiale ne peut pratiquement correspondre à la position zéro que dans le cas où la tige en position zéro est parfaitement rectiligne, d'aplomb, de section correspondant à un cercle parfait, de matériau parfaitement homogène et si le centre de gravité du houppier ($C_{g_{houpp}}$) est situé sur l'axe de la tige (un houppier idéal parfaitement équilibré).

³² avec MS Excel et à l'aide d'une application sous Visual Basic 6.0, il est possible en très peu de temps de faire un grand nombre d'itérations. Les calculs sont menés jusqu'à ce que la différence $\delta_n - \delta_{n-1}$ devient inférieure à 0.001m (n étant le nombre d'itérations).

5.5.6 Calcul de la résistance individuelle. Indice et zone de résistance individuelle

- **Résistance individuelle**

On admet que la charge de neige accumulée sur le houppier P dépend de façon linéaire de la quantité des précipitations N (kg/m^2), de la surface de la projection orthogonale du houppier de l'arbre (SPOH) (cf. §3.4.2) et du taux d'interception de 80% (Eq. 47):

$$\text{Eq. 47 } P = \frac{N \cdot \text{SPOH} \cdot 0,8}{98,1} \quad [\text{kN}]$$

L'état d'équilibre, dans lequel les moments extérieurs dans une section quelconque égalent les moments de résistance admissibles représente **l'état limite**, à partir duquel un dégât (plastification, suivie plus tard de cassure) peut être attendu. La charge correspondante à l'état limite sera appelée **résistance individuelle (RI)**. RI [kN] représente uniquement la charge de neige maximale P que la tige de l'arbre est en mesure de porter, compte tenu de la charge de son houppier. Pour chaque arbre, la RI elle est obtenue de façon itérative, en modifiant la charge P jusqu'à l'obtention de l'état limite.

Il faut noter que $\text{RI} \leq \text{SI}$, l'égalité ne pouvant jamais exister en réalité, parce qu'il existe toujours une excentricité même minime de la charge. Le rapport RI/SI exprime la diminution de la charge admissible maximale théorique dans des conditions réelles.

- **Indice de résistance individuelle. Zone de résistance**

Les précipitations maximales de neige (N_{max}) correspondantes à la RI seront calculées avec la formule sous Eq. 47 à l'inverse (Eq. 48) :

$$\text{Eq. 48 } N_{\text{max}} = \frac{\text{RI} \cdot 98,1}{\text{SPOH} \cdot 0,8} \quad [\text{kg}/\text{m}^2]$$

N_{max} représente **l'indice de résistance** individuelle qui permet (à la différence de RI) la comparaison directe des capacités de résistance à la neige de deux arbres, indépendamment de toutes leurs caractéristiques (deux arbres de mêmes valeurs de RI mais de SPOH différentes vont accumuler de quantités différentes de neige lors d'une précipitation).

La flèche δ_{max} de la déformée dans l'état limite est d'un intérêt spécial, car elle indique le seuil maximal des déformations élastiques de la tige et donc la zone où des interactions efficaces potentielles de support de la part d'arbres voisins auraient un effet sur sa stabilité ou sa résistance.

5.6 Mesures 3-dimensionnelles des tiges

- **But et expériences existantes**

Pour effectuer les calculs mécaniques, il faut avoir à disposition des données de base sur la forme dans l'espace 3-dimensionnel de l'axe de la tige (la ligne élastique) dans sa position initiale et dans tout état déformé. La forme de l'axe de la tige est représentée indirectement par des points-cibles, marquées sur l'écorce à intervalles réguliers le long de la tige. La déformation est suivie par les déplacements horizontaux et verticaux de ces points-cibles (Fig. 27). Pour le présent travail de recherche le but posé est d'obtenir dans toutes les positions de la tige des coordonnées 3-dimensionnelles des points-cibles d'une haute exactitude (env. 1cm).

Nakatani et al. (1984) lors des essais de simulation de la charge de neige lourde mesurent les déplacements grâce aux fils à plomb suspendus des points-cibles jusqu'au sol (cf. Fig. 13, p. 51). Ils estiment la précision des mesures à 1mm pour des arbres d'une hauteur de 9 à 11m. Ce procédé assez simple et pratique semble poser des problèmes banaux d'abord de fixation de manière appropriée des fils sur la tige, d'éviter qu'ils s'entrelacent, d'attendre après chaque prise de position d'équilibre par la tige chargée que les cordes s'immobilisent pour faire les relevés des déplacements. Travailler avec des arbres de 19 à 21 m de hauteur (deux fois plus grands que ceux des japonais), faire fléchir la tige étudiée dans plusieurs sens (donc besoin de déplacer les fils) et surtout faire interagir deux arbres voisins (donc deux fois plus de cordes) ont été les raisons pour recourir à une méthode photogrammétrique.

L'emploi de techniques optiques de mesures sans contact dans l'étude de la déformation des corps soumis à des contraintes fait partie du domaine de la photomécanique. Les procédés photomécaniques ont déjà été appliqués dans l'étude de la stabilité des arbres sur pied. Robin et al. (2003) ont utilisé des images prises par un appareil d'une seule station en vue de déterminer la ligne élastique lors de flexion dans un seul plan de peupliers tirés latéralement. Leur but était d'évaluer la qualité de l'ancrage racinaire en observant la forme de la ligne élastique, sans estimer la précision des mesures. Les mêmes essais et les mêmes techniques ont été appliquées par l'équipe du SLF (Davos) du projet „Baumstabilität - welche Schutzwirksamkeit bieten Waldbestände gegen Naturgefahren?“ (module „Einzelbaum- und Bestandesmodellierung“)³³. La précision grossièrement estimée des résultats est de 10 cm (Tor Lundström, 2003, comm. pers.). Gaffrey et al. (2001) mesurent sur des images latérales individuelles la hauteur et le renflement des tiges des arbres sur pied. Ils obtiennent des résultats avec une erreur-type entre 0.6cm et 1.0cm pour le diamètre et 0.4m pour une hauteur de 32m.

Des informations sur l'application de techniques stéréophotogrammétriques dans l'étude de la stabilité des arbres sur pied n'ont pas été trouvées.

- **Equipement et logiciel de traitement des données**

Deux façons de travailler ont été appliquées et évaluées:

Variante 1 (appliquée en 2004)

- Deux appareils photographiques digitaux Nikon Coolpix 5000 sont fixés des deux côtés d'une barre métallique (longue d'env. 1m) qui est à son tour montée sur un trépied, le tout formant un engin de prise des photos (à l'exemple de Figure 1, p.202 dans Annexe 1).

³³ <http://www.slf.ch/lebensraum-alpen/treestability/welcome-de.html>

Variante 2 (appliquée en 2005)

- Un seul appareil photographique digital Nikon Coolpix 5000 est utilisé.

- **Procédés de prise des photos dans chaque position de l'arbre**

- Préparatifs

Des taches faites avec un spray servent de points-cibles (marqueurs) (cf. Robin et al., 2003). Pour une meilleure identification (visibilité, contraste) elles sont de couleur blanche dans la partie inférieure de la tige et de couleur noire sur un fond blanc à partir de 5-7 m de la hauteur de l'arbre (Fig. 44, à droite). Le diamètre du point-cible est d'env. 1.5cm.

- Stations de prise des photos, mesures de terrain et type d'images

Variante 1

Les photos sont faites d'une ou deux stations de l'EPP autour de l'arbre étudié, à une distance de la base de la tige comprise entre 7 et 14m (Fig. 42). De chaque station, deux paires de photos latérales - de la partie inférieure et de la partie supérieure de la tige (Fig. 43) - sont faites. L'orientation des photos est du type „paysage“ (plus grande largeur parallèle au sol), avec un recouvrement longitudinal (surface commune entre les images de la partie inférieure et de la partie supérieure de l'arbre) de 15% et 25%. Aucune mesure de terrain n'est pas effectuée.

Variante 2

Même procédé que pour la version 2 de la méthode pour les houppiers (cf. Figure 4, p. 204 dans Annexe 1), à la différence que des photos des houppiers n'ont pas été faites. L'orientation des photos est du type „portrait“ (plus grande largeur verticale au sol), le recouvrement longitudinal est d'env. 50% (Fig. 44). Aucune mesure de terrain n'est pas effectuée.

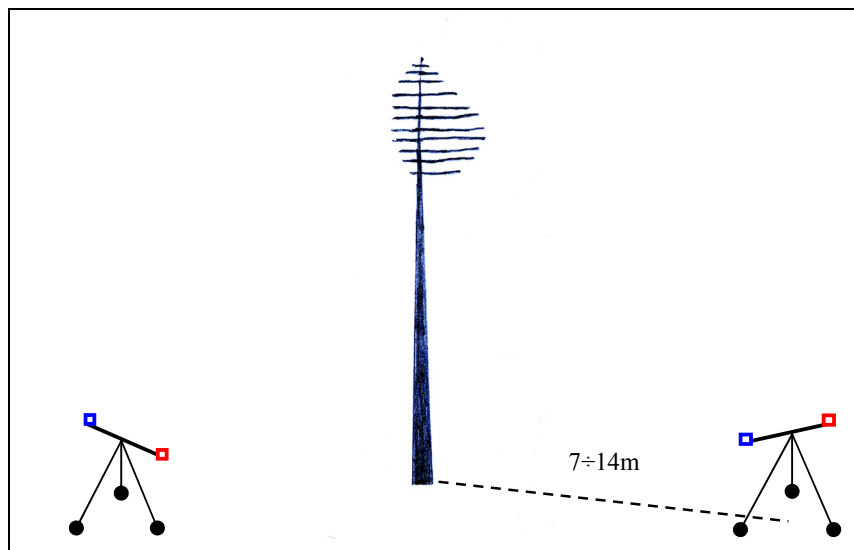


Fig. 42 Engin de prise de photos (EPP) – stations autour de l'arbre étudié

- **Traitement des données**

- Calibration des appareils (cf. aussi Annexe 1, 0, p.204)

La calibration est effectuée à deux reprises - avec le logiciel spécialisé d'Australis³⁴ (Photometrix Pty Ltd) et avec Camera Calibrator 4.0 (partie intégrale de PhotoModeler Pro 4.0, Eos Systems Inc.). Les résultats fournis par Camera Calibrator se sont avérés plus plausibles (après des essais comparatifs en laboratoire avec des points de contrôle) et sont repris dans le travail ultérieur.

- Orientation des images et mise en œuvre du modèle 3D (cf. aussi Annexe 1, §0, p.205)

Le traitement des données s'effectue à l'aide du logiciel PhotoModeler Pro 4.0 (Eos Systems Inc.). Chaque modèle 3D, élaboré sous la forme d'un projet dans PhotoModeler, correspond à une position de l'arbre étudié (cf. §5.5.2, p.87). Un projet comporte 4 ou 8 images (dans variante 1) ou entre 9 et 12 images de l'arbre (dans variante 2), plus 3 à 4 images avec le zoom optique maximal (4x) du fils à plomb avec les points spéciaux (cf. ici-bas).

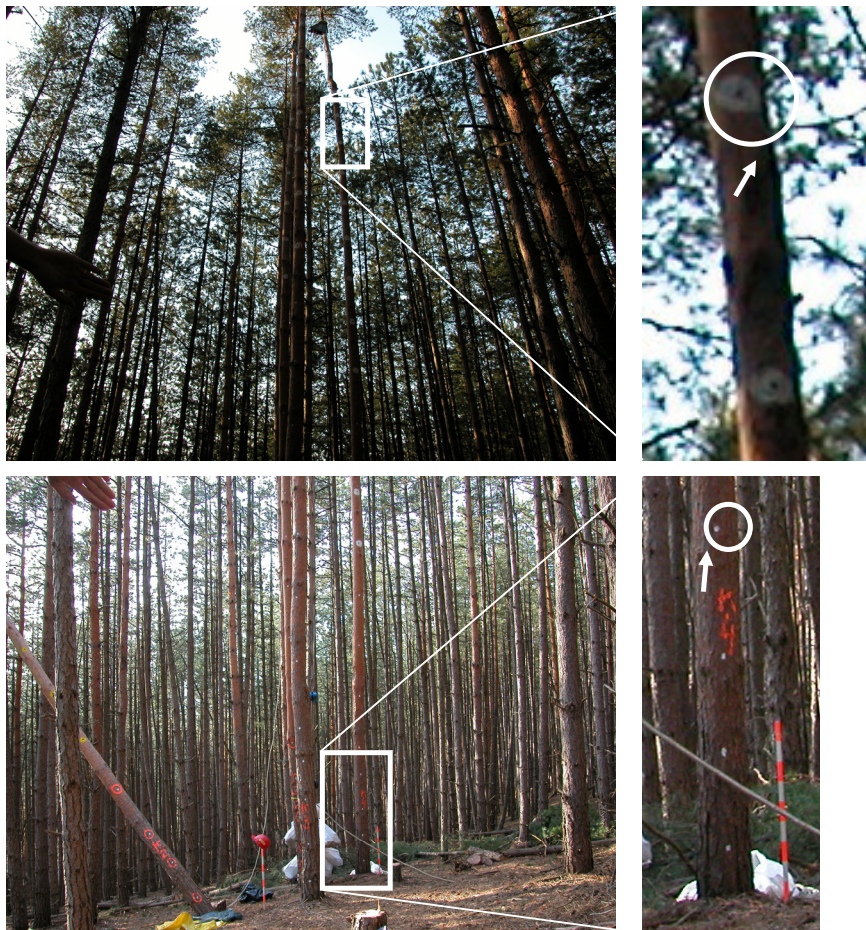


Fig. 43 Variante 1. Photos inférieure et supérieure de l'arbre (à gauche) et points-cibles (à droite)

³⁴ <http://www.photometrix.com.au/>

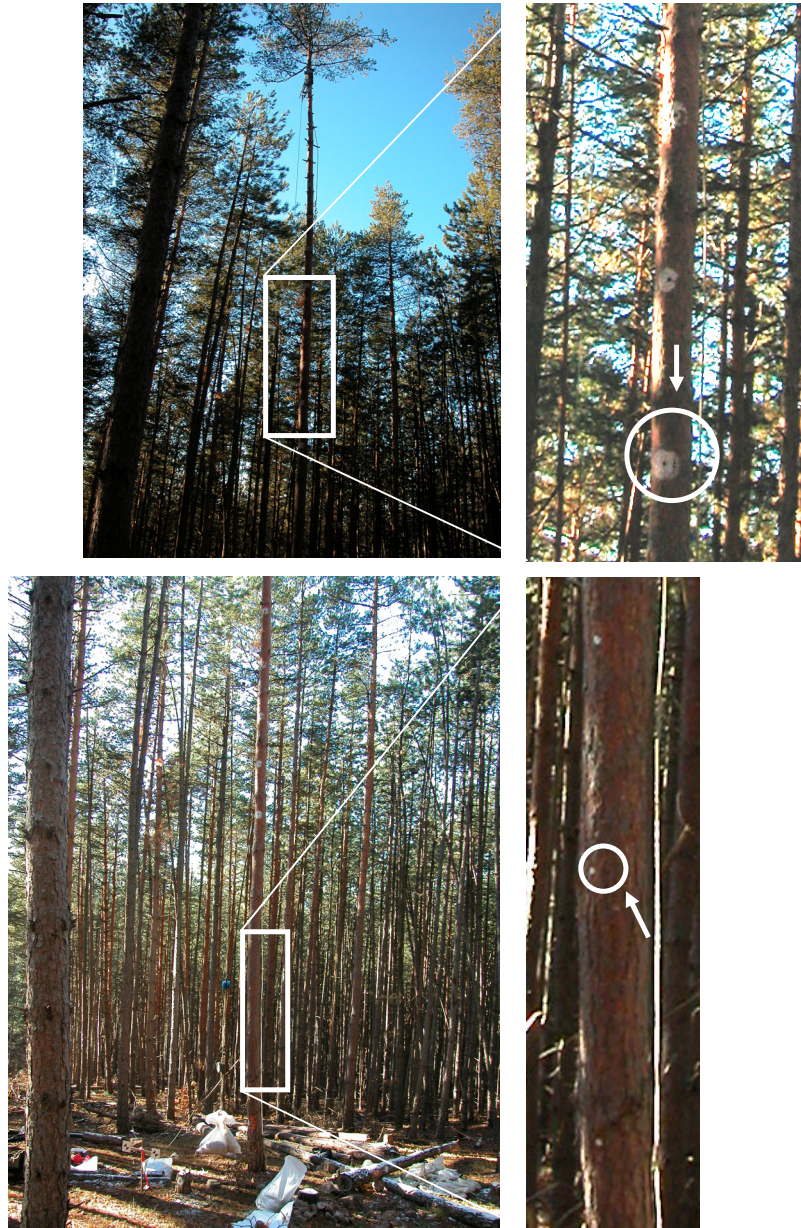


Fig. 44 Variante 2. Photos inférieure et supérieure de l'arbre (à gauche) et points-cibles (à droite)

- Introduction de l'échelle et transformation du modèle 3-dimensionnel (orientation absolue)

Variante 1

L'échelle est introduite directement dans PhotoModeler, à l'aide des points de référence, marqués sur un jalon posé à côté de l'arbre étudié et figurant sur toutes les images de sa partie inférieure. La distance réelle entre ces points est connue (entre 10 et 50 cm, par intervalles de 10 cm). Le redressement du modèle 3D se fait par l'introduction de l'axe vertical à l'aide de la corde portant la charge (cf. Fig. 27, p.80). Des traits à peinture blanche y sont faits pour augmenter le contraste et améliorer l'indentification des points de référence. Malgré ces mesures il s'est avéré que l'identification des points de référence sur la corde dépend beaucoup de l'arrière-fond et dans certains cas elle était très difficile et moins précise.

Variante 2

L'échelle est introduite à l'aide d'un fil à plomb avec des points spéciaux (cf. Figure 10 et §0, p. 208 dans Annexe 1). Ainsi le modèle 3D transformé se trouve dans un système de coordonnées où les dimensions sont réelles et la direction verticale est correcte (le modèle est redressé).

- Transformation des modèles 3D d'un arbre dans un système de coordonnées unique

Il reste à effectuer une rotation appropriée de chaque modèle autour de l'axe vertical Z afin de mettre tous les modèles pour l'arbre étudié ou pour le couple d'arbres en interactions (cf. Fig. 28, p.81) dans un système de coordonnées unique, dans le but d'évaluer les déformations. D'abord le meilleur projet pour un arbre (avec les meilleurs paramètres de qualité) est choisi comme projet de base. Le modèle 3D est transformé par l'introduction de l'échelle et de l'axe vertical. Son système de coordonnées est admis comme système de coordonnées de base. Ensuite trois façons de procéder sont testées:

- a. Trois points homologues (identiques) dans le projet de base qui figurent aussi dans les autres projets sont choisis comme points de référence. Les coordonnées des autres projets sont individuellement transformées dans Excel (MS Office), en utilisant les formules de Gauss pour la solution d'un système de trois équations linéaires (Tchimev, 1990).
- b. Trois points homologues (identiques) dans le projet de base qui figurent aussi dans les autres projets sont choisis comme points de référence. Leurs coordonnées sont utilisées pour la transformation individuelle de chacun des autres projets du groupe directement dans Photo Modeler, par l'option „3 Points Scale”.
- c. Tous les autres projets sont joints au projet de base par la procédure de fusionnement de projets (Merging projects) de PhotoModeler, avec l'option „Named-Point Match“. Cette procédure se solde en effet par la mise en œuvre d'un grand projet où une compensation par faisceaux³⁵ globale s'effectue sur la base des points de référence choisis.

La première (a) et la deuxième façon (b) de procéder ont l'inconvénient de ne pas posséder d'algorithme de répartition des erreurs. Les erreurs minimales inévitables des coordonnées des points de référence sont directement transmises lors de la transformation et superposées aux erreurs de leurs points homologues dans le modèle transformé.

La troisième façon (c) s'avère la plus appropriée car lors de la transformation, l'ensemble des erreurs est minimisé par la méthode des moindres carrés (Eos Systems, 2000) et les coordonnées des points de références sont réajustées, d'un côté grâce à l'emploi d'un nombre supérieur de points de référence (7 en l'occurrence) et de l'autre par la possibilité d'effectuer une compensation par faisceaux globale. Pour garantir une meilleure qualité des résultats, les points de référence homologues doivent répondre aux conditions suivantes:

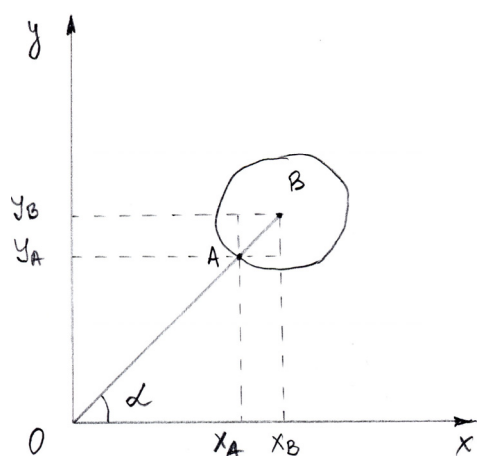
- posséder individuellement les meilleurs paramètres de qualité dans chaque projet avant le fusionnement au projet de base
- être visibles sur la plupart des images d'un projet et dans tous les projets
- être situées entre elles à une distance réelle d'au moins quelques mètres
- ne pas appartenir approximativement à un seul plan mais renfermer un espace de volume maximal (en hauteur, largeur et dans la mesure du possible – en profondeur)

³⁵ bundle adjustment (en anglais)

Afin d'améliorer la qualité des points de référence (augmenter leurs angles stéréo) dans les projets élaborés par la variante 1, des images additionnelles de la scène, prises d'autres stations (des projets de la variante 2) sont jointes et les points de référence y sont marqués. Une possibilité de vérifier et d'améliorer la qualité des résultats finaux de l'orientation absolue est d'utiliser des points d'appui³⁶ lors de la compensation par faisceaux. Ce sont des points dont on connaît les coordonnées réelles dans un système local (mesurées sur le terrain p.ex. avec une station totale) (Eos Systems, 2000). Les bons points d'appui doivent répondre aux mêmes critères qu'on vient d'énumérer pour les points de référence. Dans la mesure où les points de référence sont de bonne qualité, l'application de points d'appui peut être considérée comme superflue.

- **Modèles 3D de la ligne élastique**

Les modèles 3D, élaborés par les procédés stéréophotogrammétriques se basent sur des points-cibles, marqués sur l'écorce des tiges. Vu que ces points ne reflètent pas l'axe de la tige (la ligne élastique) mais une ligne influencée par son renflement, une transformation supplémentaire des coordonnées s'avère indispensable. Il s'agit d'un déplacement des points (translation des coordonnées) dans le plan horizontal à une distance égale à un demi-diamètre de la tige à la hauteur correspondante (Fig. 45). Les coordonnées du centre de projection de l'appareil photographique O dans une station frontale par rapport à la ligne du modèle 3D (les points-cibles apparaissent sur l'image au milieu de la tige, cf. Fig. 43, en bas à droite) sont utilisées pour effectuer les calculs. Ces coordonnées sont données par Photo Modeler (option „Camera Stations“), après la compensation pas faisceaux. La translation est effectuée dans MS Excel, après l'exportation des coordonnées de Photo Modeler.



Cercle – section transversale de la tige à la hauteur correspondante

A (X_A, Y_A) – point-cible du modèle 3D

B (X_B, Y_B) – centre de la section transversale

AB – demi-diamètre sur écorce à la hauteur du point A sur la tige

O (X_O, Y_O) – station de l'appareil photographique

$$X_B = X_A + AB \cdot \cos \alpha$$

$$Y_B = Y_A + AB \cdot \sin \alpha$$

Fig. 45 Translation des coordonnées des points-cibles

5.7 *Objet de l'analyse du risque*

Suivant le principe de concentration sur l'essentiel (Schütz, 1999), dans le cadre des nouveaux concepts d'éducation, dans l'esprit de l'éclaircie sélective et de la production de qualité, il convient d'effectuer une analyse du risque **seulement par rapport aux arbres de place choisis**. Il s'agit non seulement d'évaluer leur vulnérabilité individuelle par rapport à la neige lourde, mais aussi d'identifier et d'étudier les facteurs au niveau du collectif qui sont en mesure d'exercer un effet.

³⁶ control points (en anglais)

6 Résultats

6.1 Dispositif expérimental

6.1.1 Mise en place et caractéristiques des placettes

Le dispositif expérimental a été installé dans la période août –octobre 2001. Les données ont été collectées entre 2001 et 2003. La surface totale du dispositif est de 1.49ha. Il comprend au total 6 placettes d'une surface moyenne de 0.25ha (allant de 0.22 à 0.27ha). L'arrangement des placettes est présenté à la Fig. 46. La forme des placettes résulte de la répartition spatiale des deux essences (pin sylvestre et pin noir) au sein du peuplement. Ainsi p.ex. l'enclave entre placette 3 et placettes 4 et 5 contient une forte proportion de pin noir.

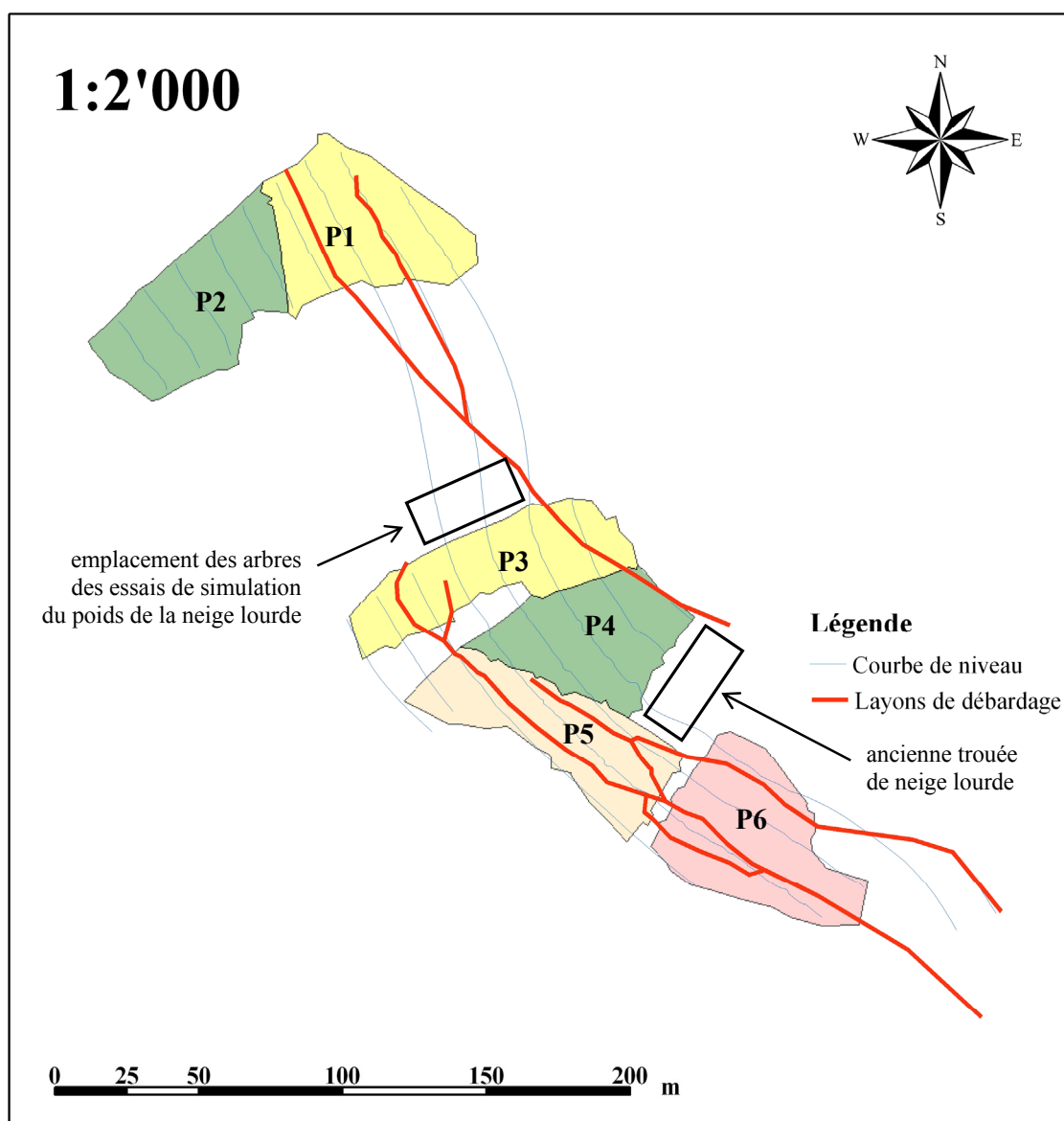


Fig. 46 Arrangement spatial des placettes du dispositif expérimental

Contrairement au plan initial, il n'y a pas eu de répétitions. Le dispositif est aussi incomplet, parce que d'un côté la variante 300/3 s'est avérée irréaliste, car le seuil maximal de la force de l'éclaircie (50%) aurait été dépassé, et de l'autre, pour des raisons organisationnelles, la coupe

n'a pas eu lieu dans deux variantes (100/3 et 200/2), installées dans un autre peuplement. Toutefois, le dispositif peut être considéré comme représentatif au niveau de la cellule d'intervention. Les données qui caractérisent l'état de chaque placette avant la coupe sont représentées au Tab. 9 :

Placette	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Caractéristique						
Variante (Nz/ha / degré de libération)	300/2	100/1	200/3	200/1	100/2	300/1
Surface (ha)	0.26	0.27	0.23	0.22	0.24	0.27
N/ha	2292	2015	1837	2176	2206	1921
D _g (cm)	18.2	18.4	18.7	18.4	18.5	19.4
H _g (m)	19.9	20.9	20.0	20.5	21.1	21.6
D _{dom} (cm)	26.4	26.9	26.7	26.9	26.8	27.4
H _{dom} (m)	21.1	21.4	21.0	21.7	21.5	22.6
G (m ² ha ⁻¹)	55.3	53.2	53.9	55.4	55.5	54.9
dont pin's	50.0	45.2	43.6	53.3	50.3	54.1
Degré de mélange (% de G)						
pin sylvestre	90.3	84.7	80.8	96.1	90.4	98.4
pin noir	9.6	15.1	19.1	3.7	9.3	1.4
chêne rouvre	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2
V (m ³ /ha)	573	559	572	579	583	585
dont pin's	519	476	465	559	530	577
Degré de plénitude ³⁷	1.17	1.14	1.17	1.18	1.19	1.19

Tab. 9 Caractéristiques des placettes avant la coupe

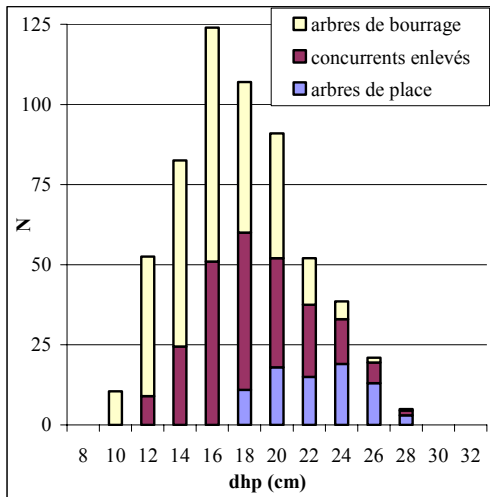
Le diamètre dominant varie entre 28 et 29 cm, la hauteur dominante entre 20.8 et 22.8m, le nombre d'arbres/ha entre 1837 et 2292, la surface terrière entre 53.2 et 55.5 m²ha⁻¹, le volume sur pied entre 559 et 585 m³ha⁻¹, le degré de plénitude entre 1.14 et 1.19 et la proportion du pin noir entre 1.4 et 19.1%. Les différences entre les placettes peuvent être considérées comme très petites, à l'exception du nombre de tiges/ha et de la proportion du pin noir. Le pin noir est une essence qui se rapproche beaucoup du pin sylvestre du point de vue de la forme de son houppier, il est aussi vulnérable aux effets de la neige lourde et pour ces raisons dans ce travail de recherche les deux essences seront traitées ensemble, sans faire de distinction.

La placette P6 accuse toujours les valeurs les plus élevées des diamètres et des hauteurs (moyennes et dominants), bénéficiant apparemment de conditions de station relativement meilleures par rapport aux autres placettes – terrain plus plat, situation en bas de la pente.

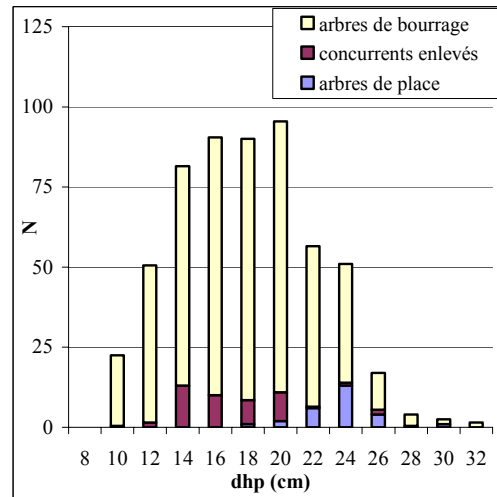
6.1.2 Réalisation et évaluation de l'éclaircie sélective

La désignation des arbres de place et le martelage des concurrents ont eu lieu durant l'été 2001. Les répartitions des tiges par catégories de diamètres dans les placettes sont représentées à la Fig. 47:

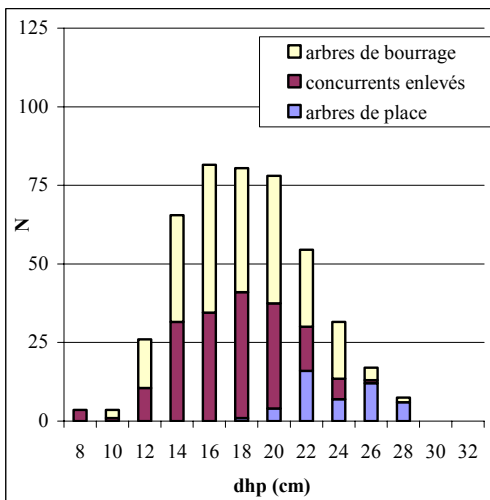
³⁷ selon les tables de production bulgares pour les plantations de pins sylvestres (Kr. Krastanov, P. Béliakov et K. Shikov, 1983)



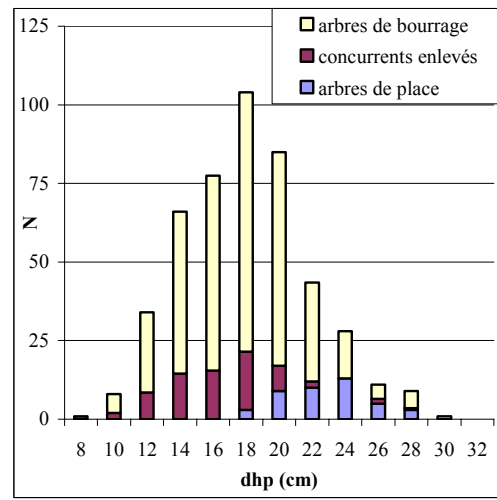
Placette 1



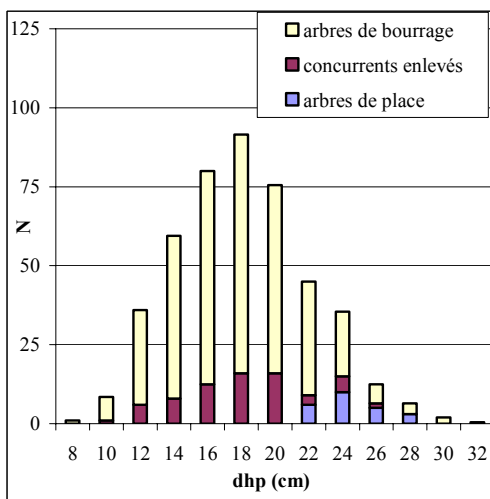
Placette 2



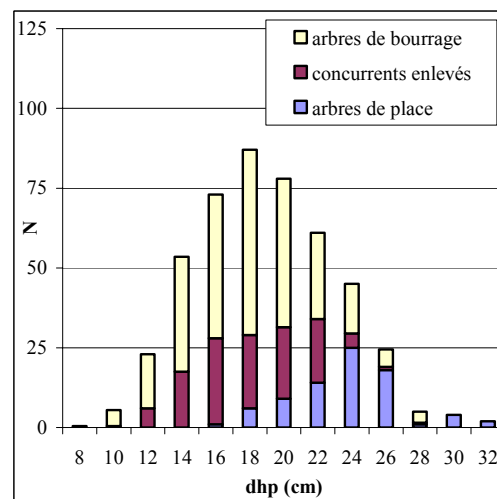
Placette 3



Placette 4



Placette 5



Placette 6

Fig. 47 Répartition des tiges par catégories de diamètres dans les placettes

- **coupe et débardage**

La coupe a eu lieu en avril-mai 2002. Le débardage du bois a été effectué avec des chevaux, par billons de 4m de longueur. Les layons de débardage ont été tracés à travers la parcelle d'étude (cf. Fig. 46) (pour des raisons organisationnelles liées avec le système d'exploitation) de façon à affecter au minimum le dispositif. Quelques arbres de bourrage de faibles dimensions ont dû être abattus en plus pour pouvoir effectuer le débardage.

- **évaluation de l'éclaircie sélective**

Au total 299 arbres de place et 697 concurrents ont été désignés (Tab. 10). Le nombre de candidats, c.à.d. d'individus qui couvrent les critères pour être choisis comme arbres de place (cf. Annexe 2), était en général suffisant pour sélectionner le nombre visé, sauf dans les variantes avec 300 arbres de place/ha (placette 1 et 6), où dans une dizaine de cas quelques compromis ont dû être faits.

Placette	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Caractéristique						
Nz	79	27	46	43	24	80
par ha	290	105	190	193	98	288
Nk enlevés	212	45	176	72	69	123
par ha	803	169	755	324	291	461
Nk réservés	47	37	23	83	25	65
par ha	173	144	95	372	102	234
Arbres de bourrage ³⁸	293	491	227	353	361	259
Force de l'éclaircie	39%	9%	42%	16%	14%	26%
Nk/Nz	2.68	1.59	3.89	1.70	2.28	1.49
G _k /G _z	1.80	1.07	2.56	1.10	1.61	1.08
Nombre de candidats/ha	413	442	399	391	421	480

Tab. 10 Caractéristiques de l'éclaircie sélective

La force de l'éclaircie varie dans les placettes entre 9 et 42% de la surface terrière initiale (Tab. 11). En moyenne 1.5 à 4 concurrents par arbre de place ont été enlevés. Exprimé par la surface terrière, entre 1 et 2.6 arbres par arbre de place de la même surface terrière que celui-ci ont été enlevés (Tab. 12).

Nz/ha	Degré de libération des houppiers		
	1. Faible	2. Moyen	3. Fort
100	9	14	(18)
200	16	(24)	42
300	26	39	X

Tab. 11 Force de l'éclaircie (en % de la G_{initiale}) par variante

	Degré de libération des houppiers		
	1. Faible	2. Moyen	3. Fort
Nk/Nz	1.5 - 1.7	2.6 - 2.7	3.9-4.0
G _k /G _z	1.0-1.1	1.8	2.5-2.6

Tab. 12 Degré de libération des arbres de place

Au Tab. 13 sont représentés les arbres à double fonction, suite au nombre d'arbres de place et au degré de leur libération. Les doubles concurrents sont des arbres qui concurrencent plus

³⁸ y compris les concurrents réservés

d'un arbre de place (surtout placettes 1, 6 et 3) et dans certains cas un arbre de place peut concurrencer un autre (placettes 1 et 6, avec 300 arbres de place). Ce classement montre qu'à cet état de développement du peuplement, à partir de 200 arbres de place/ha, l'enlèvement d'un concurrent peut favoriser plus d'un arbre de place. A noter la différence de l'indice N_k/N_z entre Tab. 10 et Tab. 13.

Catégorie \ Placette	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Doubles concurrents enlevés	96	2	31	12	1	67
Doubles concurrents réservés	3	1	3	1	0	5
Arbres de place - concurrents	6	0	0	0	0	11
N_k/N_z (double concurrents compris)	3.90	1.74	4.50	1.95	2.91	2.38

Tab. 13 Nombre d'arbres à double fonction

Le diamètre moyen des arbres de places varie dans les placettes entre 22 et 24 cm, la différence étant insignifiante (Fig. 48). La majorité des concurrents (enlevés et réservés) désignés (env.92%) sont situés à une distance comprise entre 1 et 4 m de l'arbre central (Fig. 49). Ici les doubles concurrents ont été aussi considérés. La distance de 5m détermine la grandeur de la cellule d'intervention, au sein de laquelle les arbres sont supposés être en contact direct au niveau des houppiers, se concurrençant pour la lumière mais aussi étant en mesure d'interagir de façon mécanique sous le poids de la neige lourde.

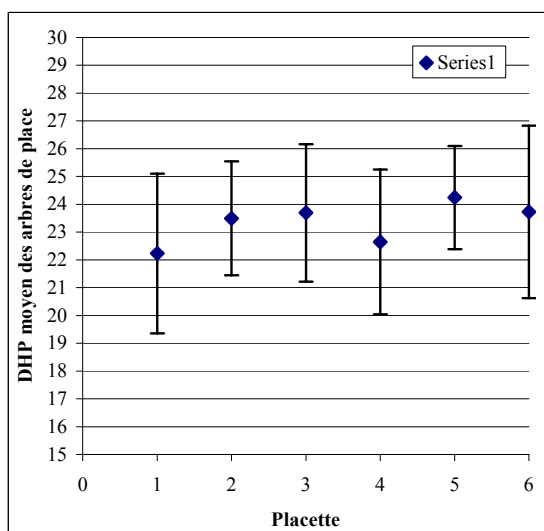


Fig. 48 Diamètre moyen des arbres de place dans les placettes

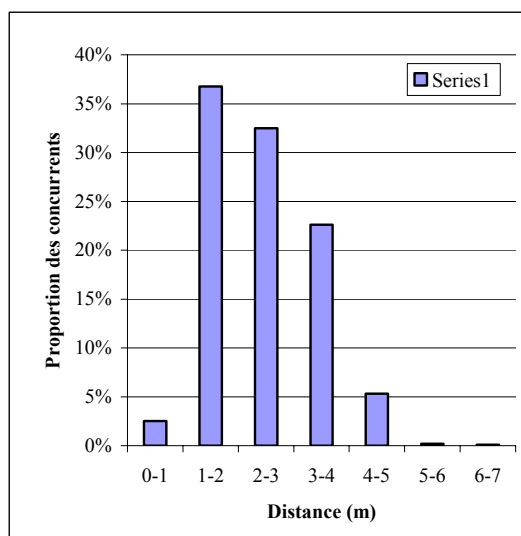


Fig. 49 Proportion des concurrents en fonction de la distance jusqu'à l'arbre central

6.1.3 Evaluation des paramètres de stabilité des arbres

Il s'agit d'analyser les paramètres suivants: coefficient d'élanement, inclinaison de la tige, asymétrie visuellement estimée du houppier (DAH), l et emplacement des concurrents par rapport aux arbres de place

- **coefficient d'élanement**

Sur la base des données de 1237 arbres, dont les $d_{1,3}$ et les hauteurs ont été mesurés (arbres de places et concurrents enlevés et réservés), l'allure du coefficient d'élanement a été égalisée, à l'aide de SPSS, par quatre types de courbes (Fig. 50), dont la courbe exponentielle ajuste le mieux les données, d'un R^2 de 0.85***.

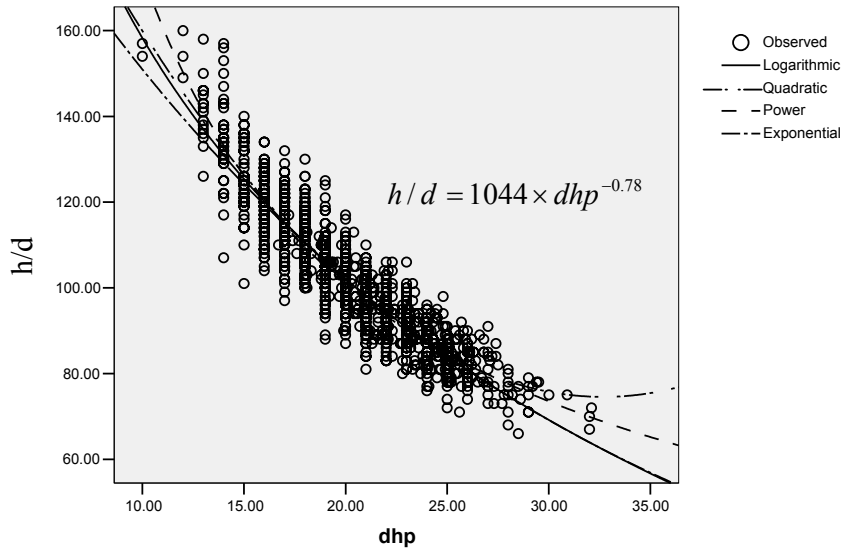


Fig. 50 Allure et ajustement du coefficient d'élanement

En utilisant la formule d'ajustement, les valeurs du coefficient d'élanement pour le reste des arbres du dispositif ont été extrapolées. La répartition en catégories de 10 dénote une image „catastrophique“ de la stabilité (Fig. 51) :

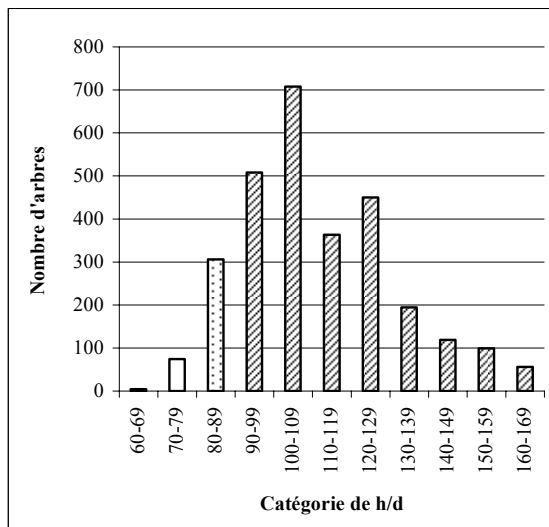


Fig. 51 Répartition par catégories de h/d de tous les arbres du dispositif

Les valeurs extrêmes vont jusqu'à 160. Seulement 2.7% (78) de tous les arbres du dispositif sont individuellement très stables ($h/d < 80$), ce qui fait 52 arbres/ha. Ensemble avec les arbres moyennement stables ($h/d < 90$, selon Rottmann, 1985), ils représentent 13.2% (384 arbres), ce qui fait env. 258 arbres/ha. Un tel nombre d'arbres répond à peine aux besoins de l'éclaircie sélective qui vise la sélection d'env. 150 à 200 arbres de place/ha (cf. Annexe 2, p.215), à la double condition que ces arbres soient d'une part des candidats (qui répondent aux critères de sélection énoncés) et d'autre part soient répartis de façon régulière sur la surface (ne soient pas des concurrents directs les uns aux autres). Une telle coïncidence serait un pur hasard et n'est naturellement pas le cas dans la parcelle d'étude. Parmi les arbres de place choisis, les arbres stables et moyennement stables ($h/d < 90$) ne font même pas la moitié du total dans toutes les placettes, à l'exception de placette 3 (65%) (Fig. 52):

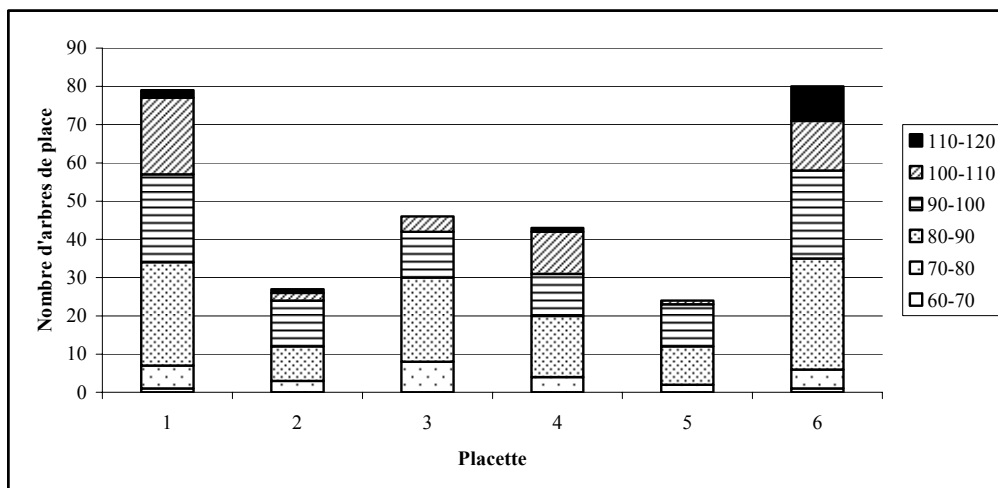


Fig. 52 Répartition des arbres de place choisis par catégories de h/d et par placettes

Le choix d'arbres individuellement très instables ($h/d > 110$) était forcé par les circonstances dans placettes 1 et 6, dans le but d'atteindre le nombre visé de 300 arbres de place/ha. Cependant, des arbres très instables ont été choisis même dans la placette 2 avec 100 arbres de place/ha.

- **inclinaison de la tige**

Des 299 arbres de place, env. trois quarts possèdent des tiges visuellement à plomb. Du reste env. 70% sont inclinés en amont³⁹ de la pente (Tab. 14):

Direction de l'inclinaison (°)	Nombre d'arbres	% du total		% des inclinés	
Nord (315-45°)	11	3.7	en amont 17.7	14.3	en amont 68.8
Est (45-135°)	42	14.0		54.5	
Sud (136-225°)	14	4.7	en aval 10.0	18.2	en aval 31.2
Ouest (226-315°)	10	3.3		13.0	
Tiges verticales	222	74.3	74.3	X	X
Total	299	100.0	100.0	100.0	X

Tab. 14 Répartition des arbres de place en fonction de la direction de l'inclinaison de la tige

Si on considère cet échantillon comme représentatif (l'inclinaison de la tige n'était pas considérée lors du choix des arbres de place), du moins pour la partie du peuplement qui comprend les arbres de $d_{1.3}$ entre 18 et 30 cm, on peut dire en d'autres termes qu'environ 18% de tous les arbres dominants et codominants du dispositif possèdent des tiges inclinées en amont et 10% (deux fois moins) en aval de la pente.

- **asymétrie du houppier**

- chez les arbres de place (DAH)

Parmi les 299 arbres de place, chez en peu moins de la moitié (46.5%) il n'y a pas d'asymétrie marquée. Dans l'autre moitié la majorité écrasante (96.3%) accuse une asymétrie en aval, dans les directions sud et ouest (Tab. 15). La sélection d'arbres dominants comme arbres de place en est vraisemblablement la raison.

³⁹ en admettant une exposition moyenne de 225°(SW), ce sont les directions entre 315-360° et 0-135° (N+E)

DAH (°)	Nombre d'arbres	% du total		% des asymétriques	
Nord (315-45)	5	1.7	en amont 2.0	3.1	en amont 3.7
Est (45-135°)	1	0.3		0.6	
Sud (136-225°)	98	32.8	en aval 51.5	61.3	en aval 96.3
Ouest (226-315°)	56	18.7		35.0	
Pas d'asymétrie marquée	139	46.5	46.5	X	X
Total	299	100.0	100.0	100.0	X

Tab. 15 Répartition des arbres de place en fonction de l'asymétrie de leurs houppiers

- chez tous les arbres dont les projections orthogonales des houppiers ont été mesurées par 4 rayons (1259 au total)

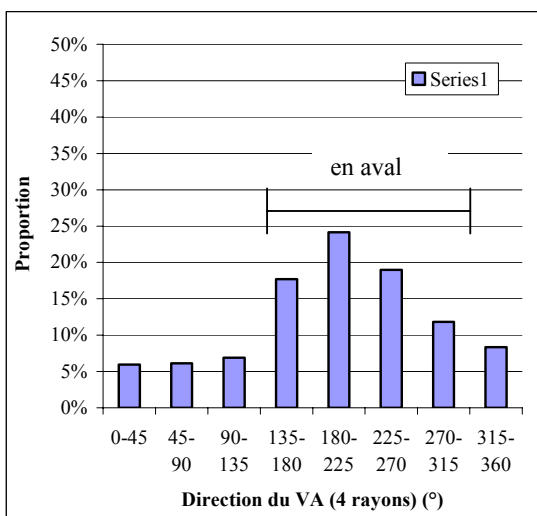


Fig. 53 Répartition des vecteurs d'asymétrie (4 rayons) par catégories de direction

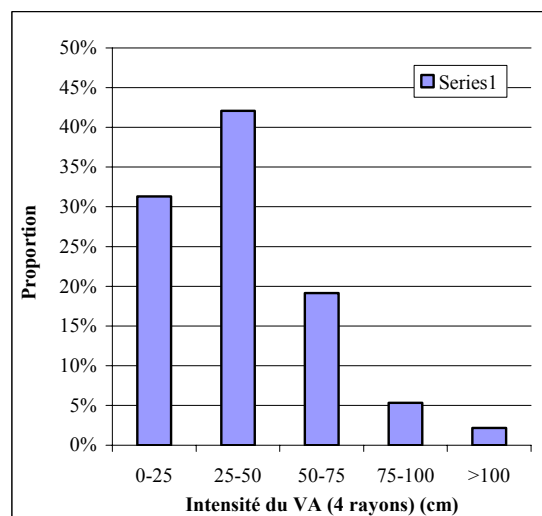


Fig. 54 Répartition des VA (4 rayons) par catégories d'intensité

On constate que dans 27.3% l'asymétrie du houppier est en amont et dans 72.7% en aval de la pente (Fig. 53). L'intensité du VA varie entre 0 et 160cm (Fig. 54).

- **longueur relative du houppier⁴⁰**

Ce critère est évalué sur la base de mesures effectuées sur 1231 arbres. La longueur du houppier varie sensiblement au sein du dispositif pour une même classe de diamètre. Elle augmente d'env. 10% en moyenne pour les plus gros arbres du collectif (Fig. 55).

⁴⁰ sur le terrain incliné, la hhh est naturellement plus grande vers le haut vers le bas de la pente. Ici les valeurs vers le haut de la pente sont utilisées

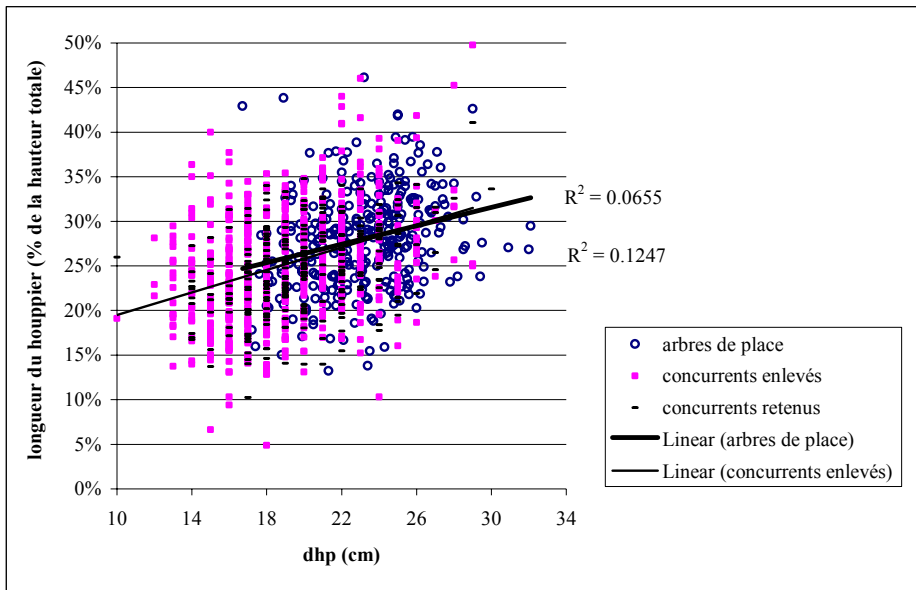


Fig. 55 Répartition de la longueur du houppier par catégories de diamètre

La majorité des arbres (env. 60%) ont un houppier de longueur entre 20 et 30% de leur hauteur. On trouve des arbres de place dans quasi toutes les catégories d'encouronnement, mais logiquement proportionnellement plus que les autres dans les catégories >30% (Fig. 56).

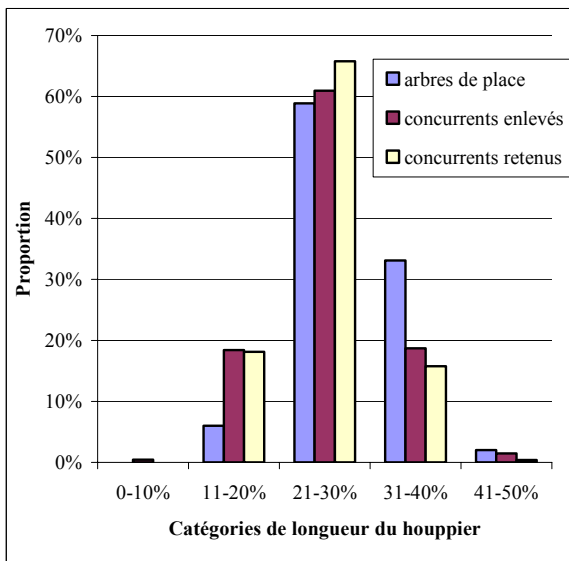


Fig. 56 Répartition des arbres par catégories de longueur du houppier

- **emplacement des concurrents par rapport aux arbres de place**

La nécessité de faire une telle analyse est justifiée par l'intérêt d'analyser si la façon d'intervenir variait en fonction de l'asymétrie et de l'exposition. Il en résulte (Tab. 16) pour tout le dispositif que le nombre d'arbres, enlevés en aval des arbres de place, égale pratiquement celui des arbres, enlevés en amont, et ceci pratiquement dans toute les placettes. Il faut noter qu'ici les doubles concurrents sont aussi pris en compte.

Placette Emplacement	Placette						Total
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
En aval (S+W)	163	24	113	44	32	89	465 (51.3%)
En amont (N+E)	145	23	94	40	38	101	441 (48.7%)

Tab. 16 Emplacement des concurrents par rapport aux arbres de place

• conclusion

De l'analyse des paramètres des arbres en rapport avec leur stabilité mécanique, il en ressort que dans ce cas on trouve presque exclusivement d'arbres apparemment très instables (aussi en ce qui concerne les arbres de place), avec des coefficients d'élanement allant jusqu'au double de la valeur critique et en majorité des houppiers asymétriques et courts (emplacement potentiel du $C_{\text{houpp+neige}}$ situé très haut sur la tige). Cette situation est le reflet de la compétition très acharnée entre les individus. Néanmoins, le peuplement entier est resté fermé et intact après des décennies de non intervention et malgré des neiges lourdes dont témoignent la petite trouée (cf. Fig. 46, p.102) et les traces de dégâts récents dans d'autres peuplements dans la région d'étude (§6.2). Le choix des concurrents éliminés n'a pratiquement pas tenu compte de l'asymétrie du houppier (Tab. 16).

6.2 Historique des dégâts de neige lourde dans la région d'étude

Dans la région dans laquelle se trouve l'objet d'étude on a constaté l'occurrence de dégâts de neige lourde dans d'autres plantations de pins sylvestres non-traitées. Sur la base de rondelles prélevées il a été possible de dater assez précisément l'apparition de tels dégâts. A la Fig. 57 l'allure moyenne de l'accroissement radial de 7 arbres, se trouvant au bord de trouées naturelles ouvertes suite à la neige lourde, est comparée avec celle de 9 autres arbres (dont 4 dominants), croissant dans des parties denses du même peuplement. L'événement a eu lieu au cours de l'hiver 1985/1986, comme témoigne le saut net de l'accroissement des arbres libérés.

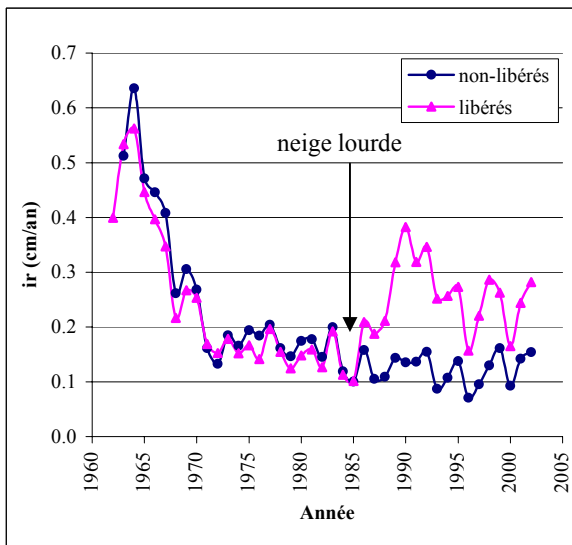


Fig. 57. Evolution de l'accroissement radial d'arbres non-libérés et libérés suite aux neiges lourdes

6.3 Mesures 3-dimensionnelles des houppiers

6.3.1 Collecte et traitement des données

Il faut distinguer deux campagnes de prise de photos stéréoscopiques terrestres. Celle de 2003 porte sur 242 arbres de place. Mais en raison de la trop courte distance (<1m) entre le système

de prise de vue et l'objet (arbre étudié) les angles stéréos trop petits conduisent à une précision médiocre de l'ordre de 8-10cm (cf. Annexe 1, p.209). Pour la campagne 2005 qui comprend 78 arbres on a amélioré notablement la précision. On a néanmoins tenu compte des relevés 2003 car ils reflètent la situation avant les dégâts de neige lourde de janvier-mars 2005 (§6.7).

Au total, des modèles de la projection orthogonale du houppier de 41 arbres de la campagne 2003 et de 26 arbres de la campagne 2005 ont été élaborés. Pour plus de détails sur l'application des deux versions de la méthode photogrammétrique cf. Annexe 1 (p.200).

6.3.2 Résultats

- **surface de la projection orthogonale du houppier (SPOH)**

La Fig. 58 présente la répartition des SPOH par $d_{1,3}$, pour les deux groupes d'arbres mesurés (en 2003 et en 2005). Des arbres avec des houppiers plus grands ont été intentionnellement choisis en 2005 et pour cette raison on ne peut pas faire un calcul d'accroissement de la SPOH en comparant directement les résultats des deux années. Il existe une bonne corrélation entre la SPOH et le $d_{1,3}$ ($R^2=0.64$, résultats 2003). Cependant, la SPOH varie sensiblement pour un même diamètre, souvent jusqu'au double. Cela veut dire qu'avec le même $d_{1,3}$ un arbre est en mesure d'accumuler deux fois plus de neige lourde qu'un autre.

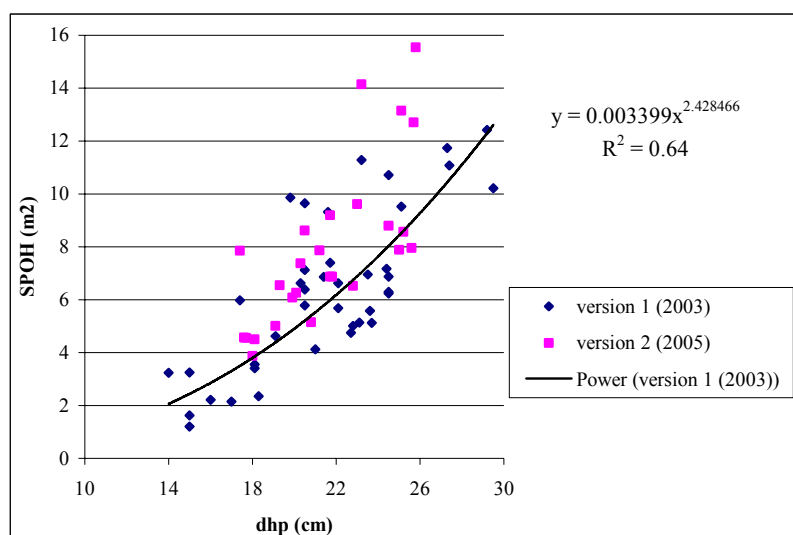


Fig. 58 SPOH en fonction du $d_{1,3}$ (2003 et 2005)

- **vecteur d'asymétrie (VA)**

Le centre de gravité de la SPOH est calculé sous ArcMap™. Fig. 59 présente les résultats pour les deux groupes d'arbres étudiés.

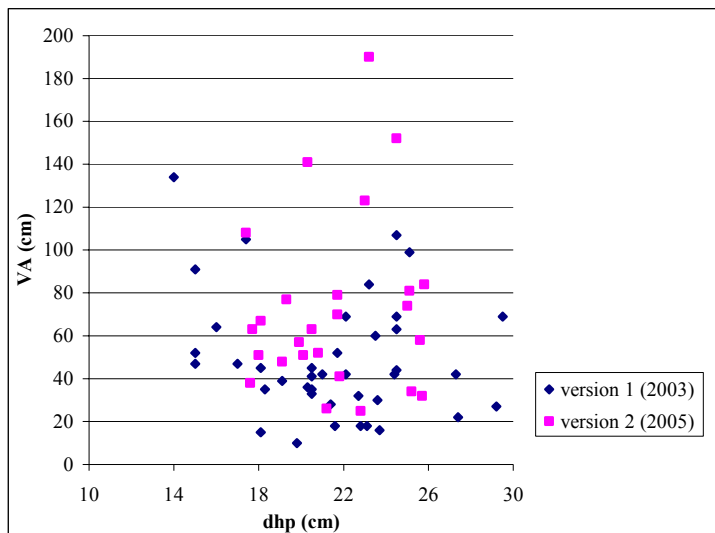


Fig. 59 Intensité du VA mesuré en fonction du $d_{1,3}$

L'intensité du VA mesuré varie entre 10 et 120 cm. Les arbres de VA supérieur à 120 cm ont subi un dégât de neige lourde (cassure chez l'arbre mesuré en 2003 et plastification dans la partie supérieure de la tige chez les arbres mesurés en 2005, ce qui a conduit à une augmentation de leurs VA). Aucune corrélation entre l'intensité du VA et le $d_{1,3}$ n'a pas été trouvée.

- **accroissement de la SPOH**

L'accroissement total de la SPOH au cours de trois périodes de végétation a pu être reconstitué pour 12 arbres⁴¹, dont la SPOH a été modélisée par la version 2 de la méthode photogrammétrique, après restitution et mesures photogrammétriques des points, délimitant les SPOH en 2005 et en 2002. L'accroissement de la SPOH est calculé par la formule sous Eq. 49:

$$\text{Eq. 49 } I_{POH} = SPOH_{2005} - SPOH_{2002}$$

I_{POH} varie entre 0.4 et 1.25m² pour des arbres de $d_{1,3}$ entre 18 et 26cm (Fig. 60). Il faut noter qu'il s'agit surtout d'arbres libérés complètement de leurs concurrents. L'accroissement en longueur des pousses annuelles est en moyenne dans l'ordre de 10cm (allant de 5 à 15cm). La corrélation entre I_{POH} et le $d_{1,3}$ est assez bonne ($R^2=0.65$). L'ordre de grandeur des résultats démontre que la réaction des arbres à la libération de leurs concurrents est relativement faible.

⁴¹ le petit nombre est dû aux problèmes liés avec la qualité des images

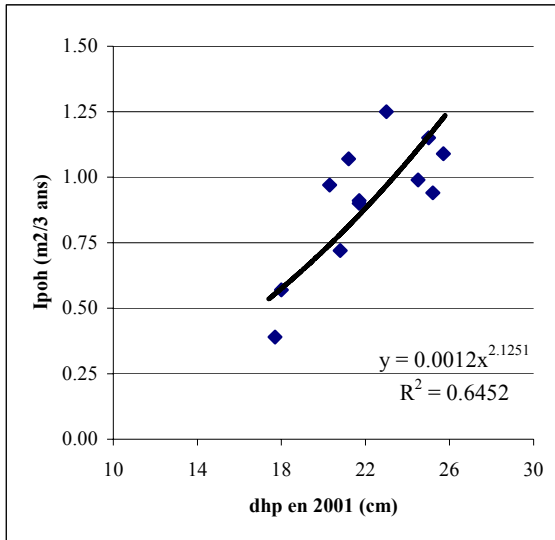


Fig. 60 Accroissement de la SPOH pour 3 périodes de végétation (2002-2004)

6.4 Modélisation du vecteur d'asymétrie du houppier

6.4.1 Données d'entrée

Les données qui ont servi pour la mise en œuvre du modèle de calcul du VA proviennent des projections orthogonales des houppiers de 25 arbres au total, dont 18 étudiés par la version 1 de la méthode photogrammétrique et 7 étudiés par la version 2 (cf. Annexe 1, p.200). Leurs $d_{1,3}$ varient entre 17.6 et 29.5cm. Ils couvrent donc la variation des diamètres au sein du dispositif expérimental, à l'exception de l'intervalle entre 10 et 16 cm qui n'est pas représenté. On a exclu de cette modélisation les arbres inclinés ; les arbres situés à une distance inférieure à 5m de la bordure extérieure du dispositif ; les arbres de grandes erreurs lors de la transformation (cf. version 1 de la méthode, Annexe 1) ainsi que ceux de la version 2 de la méthode qui ont subi des dégâts de plastification sous le poids de la neige lourde en hivers 2005.

Les arbres-voisins de $d_{1,3}$ inférieur à 13cm n'ont pas été inclus dans l'ajustement, car il s'agit en majorité d'éléments dominés ou surcimés selon la classification de Kraft (cf. Schütz, 1989), avec des houppiers très étriqués qui n'exercent pratiquement pas ou plus d'influence sur le développement du houppier de l'arbre central. Les quelques chênes rouvres ont été également exclus, étant généralement de statures inférieures aux pins.

La pente du terrain (α) varie très peu au sein du dispositif – entre 17 et 21°. Il s'agit dans ce cas d'un facteur dont l'effet sur le VA serait très peu prononcé et donc négligeable dans cette modélisation. Vu le fait que les erreurs de mesure de la pente du terrain pour chaque arbre seraient du même ordre de grandeur que la différence entre les arbres, une valeur constante a été attribuée à tous les arbres.

L'exposition du terrain (\vec{v}_i) varie au sein du dispositif entre 209 et 251°. Pour tous les arbres d'une placette une ou deux valeurs de l'exposition ont été admises.

Toutes les combinaisons entre les valeurs des paramètres l, m, n et r, présentées dans Tab. 17 ci-dessous ont été testées :

Paramètre	Valeurs
l	-1; 0; 1; 2; 3
m	-2; -1; 0; 1; 2; 3; 4; 5
n	0; 1; 2; 3; 4
r	1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5; 4.0; 4.5; 5.0
A	0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1;

Tab. 17 Valeurs des paramètres utilisées dans la modélisation du VA

6.4.2 Résultat de la modélisation, estimation et discussion

Les résultats du meilleur ajustement sont présentés au Tab. 18 :

N	a	b	r	l	m	n	A	r ²	p
25	0.001758075	0.013783322	5.0	1	1	2	1.0	0.65	0.0002

Tab. 18 Résultats de l'ajustement du modèle

Le modèle (Eq. 50) a pu expliquer 65% de la variance du VA, en prenant en compte tous les arbres dans un cercle de 5m de rayon autour de l'arbre central. La distance de 5m correspond pratiquement au rayon de la cellule de martelage, au sein de laquelle les concurrents ont été désignés (cf. Fig. 49).

$$\text{Eq. 50 } VA = 1,76 \cdot 10^{-3} \cdot T_1 + 13,78 \cdot 10^{-3} \cdot T_2$$

Le modèle ajuste bien les données d'entrée (Fig. 61), les résidus ne montrent pas de signes de curvilinearité ou hétéroscédasticité (Fig. 62).

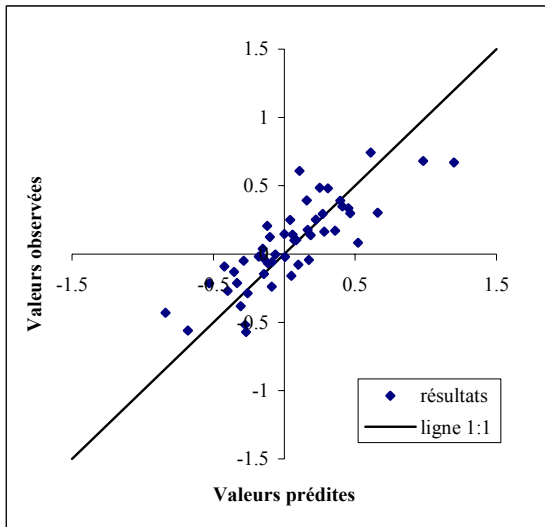


Fig. 61 Diagramme des valeurs prédites et des valeurs observées (éléments du VA)

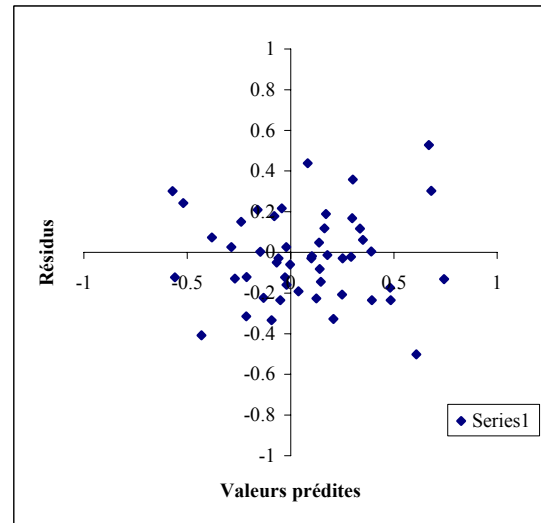


Fig. 62 Répartition des résidus

La valeur obtenue du facteur A, déterminant le genre de compétition, est de 1.0, ce qui veut dire qu'il s'agit d'un cas évident de compétition bilatérale complète.

L'emploi du $d_{1,3}$ au lieu de la hauteur comme variable explicative présente quelques désavantages, liés au fait que le $d_{1,3}$ reflète relativement moins bien l'état de concurrence que la hauteur.

L'emploi de coefficients de régression non-standardisés ne permet pas la comparaison des deux facteurs prédictifs T_1 et T_2 . Chez Umeki l'effet de la microtopographie sur le VA était plus forts que celui du voisinage.

Il est intéressant d'examiner l'influence du rayon r sur le coefficient de détermination, présentée sous Fig. 63. La valeur maximale du R^2 est atteinte avec un r de 5m, mais dans l'intervalle 2.5-5m les différences sont seulement de 0.04, les valeurs des paramètres l , m et n étant les mêmes, ce qui indique que les arbres ayant le plus grand effet concurrentiel sont situés à une distance inférieure ou égale à 2.5m de l'arbre central. Ceci permet, sous certaines réserves, d'utiliser dans les analyses suivantes les valeurs simulées du VA aussi pour les arbres se trouvant entre 2.5 et 5m de la bordure extérieure du dispositif.

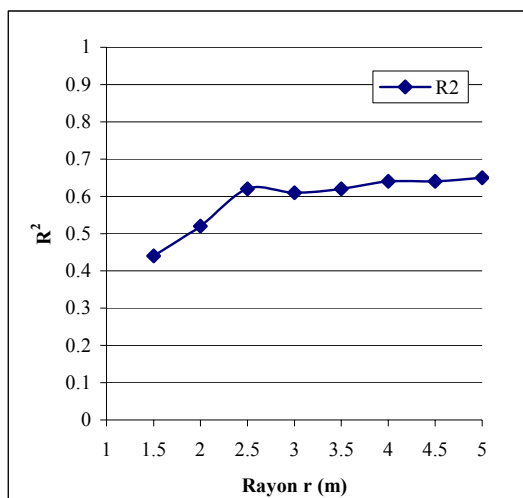


Fig. 63 Effet du rayon r sur le coefficient de détermination du modèle

6.4.3 Simulation des VA à l'échelle du peuplement

Utilisant le modèle élaboré pour le VA (cf. Eq. 50) et les valeurs des facteurs prédictifs T_1 et T_2 , calculées à l'aide d'un logiciel supplémentaire, élaboré sous Java 6.0 (*Sun Microsystems*) avec les paramètres de Tab. 18, les valeurs simulées des VA de tous les arbres du dispositif dans son état initial (avant la coupe) ont été calculées. Après la simulation, les résultats sur les arbres, situés à moins de 2.5m de la bordure extérieure du dispositif ont été éliminés de l'analyse, qui comprend finalement 2166 arbres au total.

Il en résulte que 11.6% des VA simulés sont dirigés en amont de la pente et 88.4% en aval de la pente (Fig. 64). L'intensité des VA simulés varie entre 0 et 125cm. C'est pratiquement le même ordre de grandeur que chez les VA (4 rayons) (cf. Fig. 54).

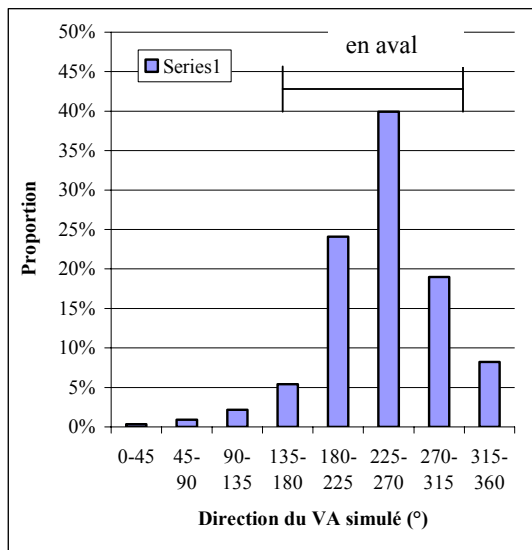


Fig. 64 Répartition des VA simulés par catégories de direction

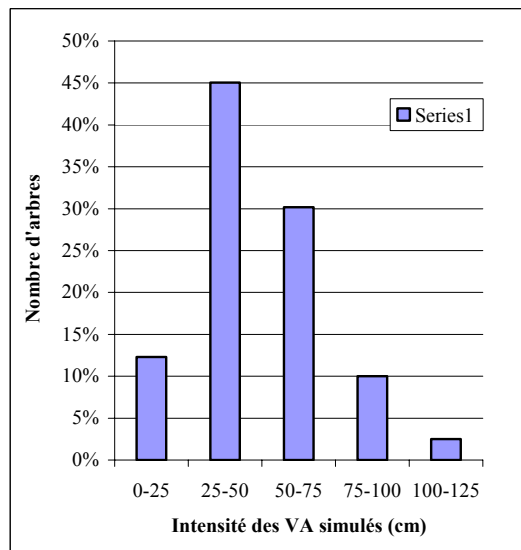


Fig. 65 Répartition des VA simulés par catégories d'intensité

6.4.4 Comparaison des différentes façons d'estimer l'asymétrie

Les VA simulés par le modèle peuvent être comparés avec les estimations visuelles de terrain (DAH chez les arbres de place) et les VA (4 rayons).

- **VA simulés et direction d'asymétrie**

Les directions du VA simulé, prédites par le modèle, correspondent assez bien avec les valeurs de la DAH, y compris chez les tiges inclinées (Fig. 66). Les déviations (VA simulé-DAH) sont dans 57% cas dans l'intervalle $(-30 \div +30^\circ)$ et dans 83% des cas dans l'intervalle $(-60 \div +60^\circ)$ (Fig. 67).

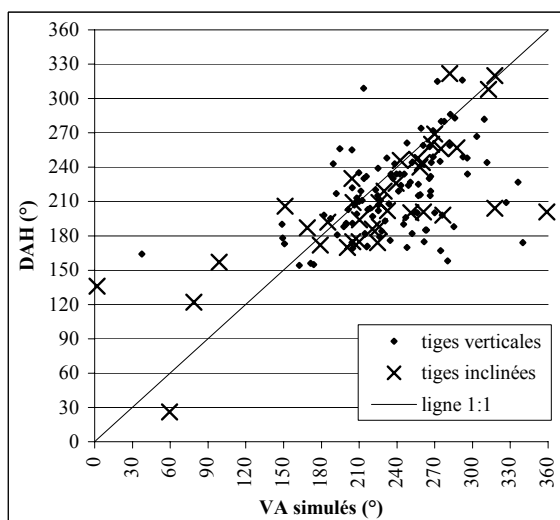


Fig. 66 Comparaison entre les directions (VA simulés et DAH) (arbres de place)

La répartition des déviations par intervalles révèle toutefois un certain biais - les valeurs prédites sont apparemment systématiquement supérieures aux valeurs de la DAH. Il semble difficile d'expliquer l'origine de ce décalage. D'une part, DAH n'est pas une référence absolue, d'autre part il n'y a pas de raisons de justifier la présence d'une erreur systématique

lors des relevés de terrain. Apparemment, si les mesures des DAH sont correctes, le modèle a la tendance à légèrement surestimer la direction des VA, ce qui peut être dû aux arbres choisis pour l'ajustement du modèle d'asymétrie.

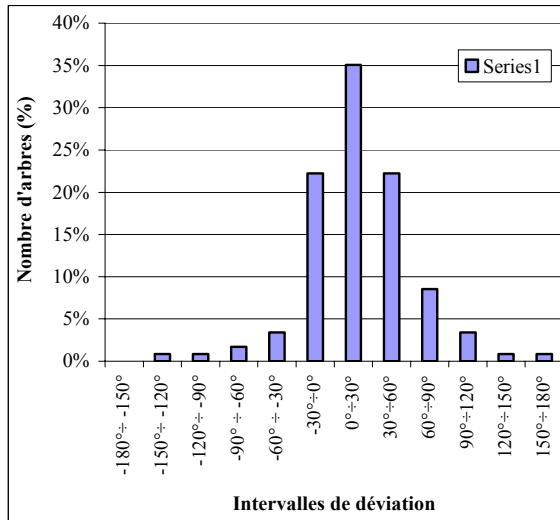


Fig. 67 Répartition des déviations (VA simulé-DAH) par intervalles de 30°

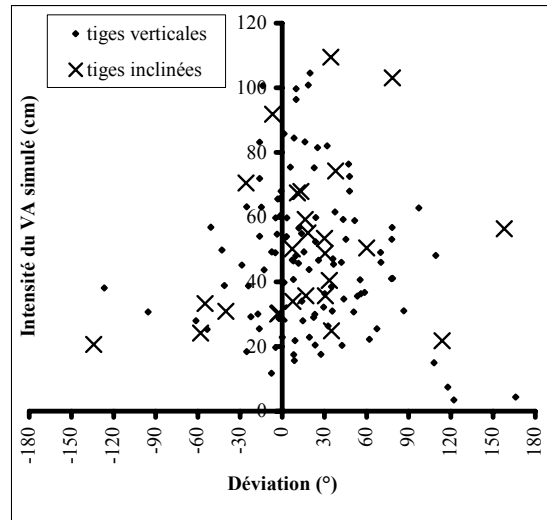


Fig. 68 Intensité du VA en fonction de la déviation entre les directions (VA simulés et DAH)

Fig. 68 présente les déviations en fonction de l'intensité du VA simulé. La tendance de surestimation des directions est une fois de plus bien illustrée. De plus une tendance de diminution des déviations avec l'augmentation de l'intensité du VA simulé s'affiche nettement. Ceci peut être interprété de deux façons :

- si le modèle sert de référence : il est plus facile sur le terrain de détecter et d'estimer plus précisément de manière visuelle des asymétries plus prononcées
- si les estimations de terrain servent de référence : les plus grandes déviations apparaissent chez les houppiers peu asymétriques, c.à.d. avec des VA de petites intensités.

De manière objective, le fait que la déviation diminue en fonction de l'intensité prédite peut être expliqué par les particularités du modèle : puisque la variance des résidus n'est pas corrélée avec l'intensité prédite du VA (cf. Fig. 62, p.115), l'angle potentiel de déviation entre la direction observée et la direction prédite est plus grand chez les VA de petites intensités que chez les VA de grandes intensités (Fig. 69).

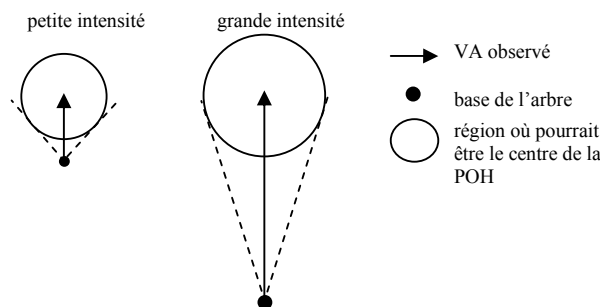


Fig. 69 Angle de déviation en fonction de l'intensité prédite du VA

- VA simulés et VA (4 rayons)

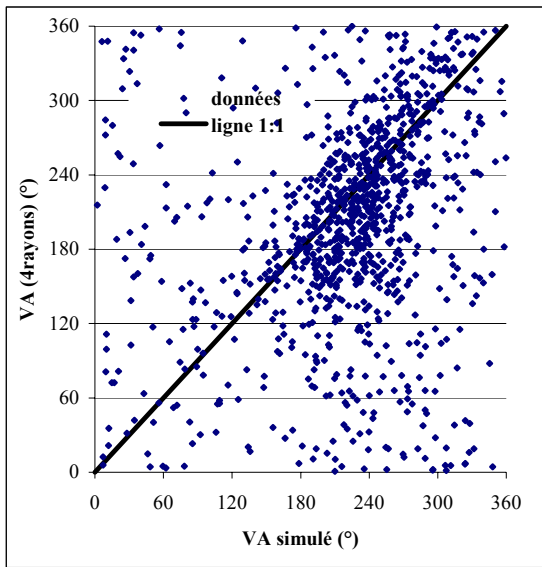


Fig. 70 Comparaison entre les directions (VA simulés et VA (4 rayons))

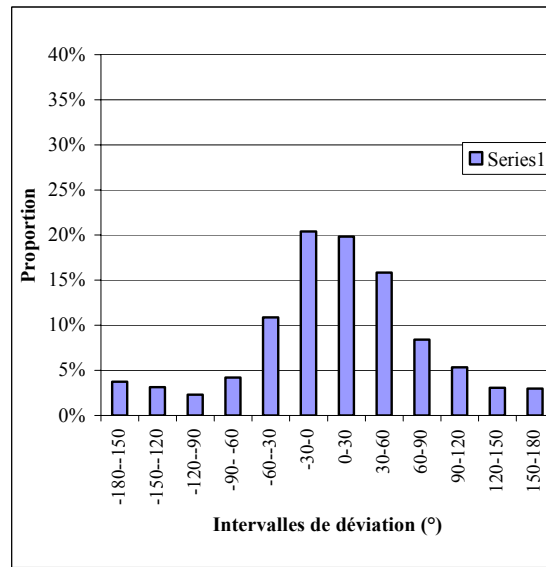


Fig. 71 Répartition des déviations (VA simulés-VA 4 rayons) par intervalles de 30°

Le modèle montre une certaine tendance, apparemment biaisée, à prédire plus les directions entre 180° et 260° (Fig. 70). Les déviations entre les VA simulés et les VA (4 rayons) sont grandes (Fig. 71). Seuls 40% des déviations sont comprises dans l'intervalle (-30;+30°). D'une part, le modèle n'explique qu'une partie de la variance des VA mesurés, d'autre part le VA (4 rayons) est une expression simplifiée du VA réel du houppier et donc entaché d'erreurs. Le modèle du VA ne tient pas compte des tiges inclinées, ce qui pourrait être la raison d'une partie des déviations.

6.5 Etude de la stabilité et de la résistance individuelles par simulation de la charge de neige

6.5.1 Choix et caractéristiques des arbres d'essai

Au total 10 arbres du même peuplement mais en dehors de la parcelle d'essai (cf. Fig. 46, p.102) ont été choisis pour les essais statiques de fléchissement. Les arbres d'essai font partie de 3 cellules. Leur situation spatiale est représentée à la Fig. 72. Les houppiers sont représentés par 4 rayons et par les POH et les VA (à l'exception des arbres K6, K7 et K8), mesurées selon version 1 de la méthode stéréophotogrammétrique (cf. Annexe 1).

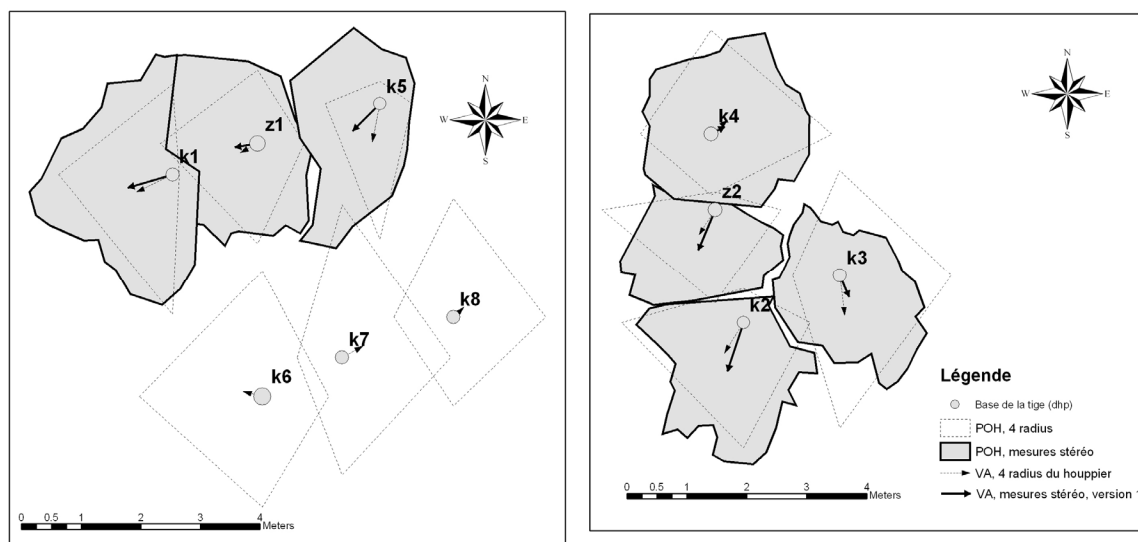


Fig. 72 Situation des arbres d'essai. Cellules I (K1, Z1, K5), III (K6, K7, K8) et II (Z2, K2, K3, K4)

Leurs caractéristiques dendrométriques sont présentées au Tab. 19. Le $d_{1,3}$ des arbres d'essai varie entre 21 et 29 cm, c.à.d. ils représentent les gros arbres du peuplement. Chez trois arbres les houppiers marquent des asymétries en amont de la pente (K4, K7 et K8).

Cellule	I			II				III		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N de terrain	Z1	K1	K5	Z2	K2	K3	K4	K6	K7	K8
$d_{1,3}$ (cm)	26.5	22.5	21.0	24.0	21.0	23.0	24.0	29.0	23.0	22.0
h (m)	19.7	18.7	18.9	19.8	20.5	19.7	21.2	20.9	21.1	20.5
hlh (m)	15.5	14.1	14.7	13.7	13.6	14.2	16.4	14.2	15.8	14.4
Hauteur de l'engin simulant asymétrie	15.4	14.0	15.4	14.3	15.1	15.0	16.3	15.4	15.9	14.4
hlh/h	0.78	0.75	0.81	0.72	0.74	0.76	0.77	0.74	0.75	0.70
Poids houpp. (kg)	60	-	40	50	-	-	50	-	50	-
POH (m ²)	6.16	6.83	5.02	3.78	5.05	4.77	6.08	-	-	-
VA (cm) Photo/4Rad	39/33	79/67	65/65	74/50	86/60	40/45	27/36	-/33	-/40	-/24
VA (°) Photo/4Rad	261/242	254/244	225/191	202/213	198/212	157/126	61/49	-/285	-/61	-/47

Tab. 19 Caractéristiques dendrométriques des arbres d'essai

L'emplacement de la plus grande largeur du houppier a été estimé visuellement comme une moyenne pour chaque arbre (étant donné que l'arbre présente un houppier plus développé du côté de la pente). La hauteur estimée (hlh) a été directement mesurée avec l'hypsomètre. L'ESA a été ensuite monté plus au moins à la hlh, parfois en peu plus haut, à cause de manque de verticille justement à cet endroit, ou bien à cause de l'impossibilité de monter l'ESA (diamètre de la tige à cette hauteur trop grand). L'écart entre la hlh et la hauteur où l'ESA a été monté est en général moins de 1m (sauf chez tiges K2 et K6).

6.5.2 Déroulement des essais

Les essais ont été conduits à deux reprises - dans la période février-avril 2004 et en janvier 2005, quelques semaines avant la chute de neige lourde (§6.7).

- **Préparatifs :**
 - Mesure des 4 rayons du houppier
 - Prise de photos pour reconstitution stéréophotogrammétrique de la POH
 - Elagage des arbres d'essai jusqu'à la hauteur de la plus grande largeur du houppier afin de faciliter l'escalade pour monter et manipuler l'ESA.
 - Marquage des points-cibles le long de la tige
 - Mesure des distances entre les points-cibles et des diamètres à la hauteur des points-cibles (ou après l'abattage de l'arbre)
 - Enregistrement par des photos de la position initiale de chaque tige
 - Montage de l'installation de charge
- **Essais „stabilité et résistance individuelles“**

L'excentricité simulée par l'ESA correspondait à l'intensité du VA (4 rayons) ou du VA, mesuré de façon photogrammétrique (Tab. 19). Dans chaque direction de fléchissement simulé, l'arbre d'essai était tout d'abord chargé et fléchi individuellement, sans interactions avec un voisin. Pour éviter les interactions, les arbres voisins ont été abattus ou bien (s'il s'agissait d'arbres d'essai) fléchis manuellement par tirage latéral pour les écarter temporairement. Au moins deux charges différentes pour une direction de fléchissement simulé ont été appliquées. Chaque position de l'arbre étudié est enregistrée par des photos.

- **Essais „stabilité et résistance collectives“**

L'arbre voisin du côté de la direction de fléchissement simulé a été aussi chargé et les deux types principaux d'interactions statiques ont été simulés. Différentes combinaisons de charges des deux arbres ont été essayées. Chaque position des deux arbres a été enregistrée par des photos.

- **Conditions météorologiques lors des essais**

Les essais ont été conduits en absence de vent. Tab. 20 présente la température de l'air, mesurée lors des essais. On peut en déduire que le bois des arbres n'était pas gelé, à l'exception éventuellement du 07.01.2005.

Année	2004										
Date	14.03	18.03	19.03	20.03	21.03	22.03	28.03	29.03	30.03	31.03	01.04
T°C	4	10-15	17-19	16	17-19	11-16	5-9	2-7	12	14-17	11-14
Année	2005										
Date	05.01	06.01	07.01								
T°C	max.5	max.6	max.2								

Tab. 20 Température de l'air lors des essais de terrain

6.5.3 Modèles 3D des tiges et reconstruction de la ligne élastique

Au total 139 positions des arbres d'essai ont été enregistrées, y compris les positions initiales. Pour chaque position un projet individuel dans Photo Modeler a été élaboré.

- **Mise en œuvre des modèles 3D individuels et exactitude des coordonnées 3D⁴²**

Sous „exactitude“ des coordonnées 3-dimensionnelles d’un point-cible du modèle transformé on comprend un ellipsoïde défini par les dimensions (x; y; z) où les coordonnées réelles du point-cible se trouvent à 95% de probabilité (Eos Systems, 2000). L’exactitude des coordonnées 3D des points-cibles est évaluée par Photo Modeler après la compensation par faisceaux. Les résultats sont représentés dans Tab. 21, séparément pour chaque groupe de projets:

Groupe de projets	Variante de méthode de mesures sans contact	Exactitude des points-cibles (cm)			Angles stéréo (°)	Nombre des positions et proportion du nombre total
		X	Y	Z		
1	Variante 1, une station de l’EPP	1-25			3-9 (13)	61 (44%)
2	Variante 1, deux stations de l’EPP	1.0-3.0	1.0-3.0	1.0-7.0	14-30	64 (46%)
3	Variante 2	0.4-1.5	0.2-1.7	0.6-3.5	40-89	14 (10%)

Tab. 21 Exactitude des points-cibles du modèle 3D de l’axe de la tige

L’exactitude chez les modèles 3D, élaborés selon variante 1 (avec une seule station) dépend entièrement de la base stéréo (la distance entre les centres de projection des deux appareils fixés sur la barre métallique). La base stéréo est très petite (~1m) et les objets photographiés se trouvent à une relativement grande distance (7 à 20m). Cette constellation détermine de très petits angles (angles stéréo) entre les rayons lumineux qui passent à travers les points homologues des deux images. L’exactitude des coordonnées de points homologues avec des petits angles stéréo est médiocre (Eos Systems, 2000). Il en est de même dans le cas en question.

Avec la variante 1 (deux stations) les angles stéréo augmentent sensiblement ainsi que l’exactitude des coordonnées.

Avec variante 2 les angles stéréo atteignent la valeur maximale de presque 90°, ce qui représente en effet le secteur de visibilité des points-cibles autour de l’arbre étudié depuis les stations de prise des photos. Par conséquent, l’exactitude des coordonnées descend en-dessous d’un centimètre et même d’un demi-centimètre. Il faut noter que malgré le fait que le diamètre physique du point-cible est d’env. 1.5cm, les points homologues du modèle 3D peuvent être marqués de sorte à refléter le centre du point-cible. Cette précision de marquage est possible grâce à la haute résolution des images digitales et à une bonne estimation visuelle de la part de l’opérateur.

L’analyse des résultats fait ressortir les constatations suivantes :

1. Plus que la moitié des modèles (44%, tout le groupe 1, Tab. 21) fournissent des coordonnées des points-cibles d’une exactitude insuffisante. Pour cette raison ils doivent être éliminés des traitements ultérieurs.
2. L’exactitude des coordonnées diminue avec la hauteur des points-cibles sur la tige (Fig. 73). Cette tendance est la plus prononcée pour les coordonnées Z. Elle est due au fait que la tige, pour des raisons pratiques, ne peut être photographiée que depuis le terrain et dans ce cas plus la hauteur des points augmente, plus les angles stéréo diminuent. Par conséquent, les coordonnées les moins exactes sont celles du point-cible terminal qui sont d’autre part les plus importantes, car elles sont utilisées dans les calculs de la flèche et de

⁴² système des coordonnées comme à la Fig. 22, p.73

tous les moments fléchissants (cf. Annexe 4). Néanmoins, l'exactitude des points terminaux d'env. $\pm 2.5\text{cm}$ dans le plan horizontal XY peut être considérée comme suffisante pour les fins de la présente étude. Une idée d'améliorer l'exactitude des points terminaux aurait probablement été d'utiliser le zoom de l'appareil digital et choisir des stations de prise des photos de façon à augmenter au maximum les angles stéréo des points. L'inclinaison du terrain a toutefois permis dans quelques cas une plus grande dénivellation entre les stations de prise des photos, ce qui a pallié dans une certaine mesure le problème.

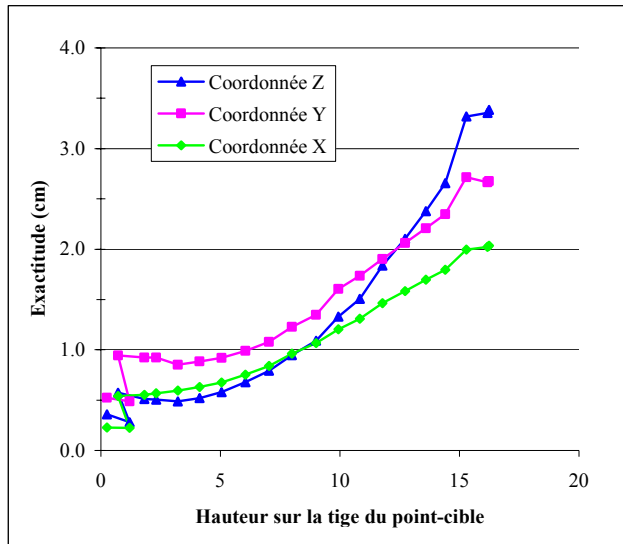


Fig. 73 Exactitude des coordonnées des points-cibles en fonction de leur hauteur sur la tige (tige K4)

Les résultats sur les modèles 3D (dans des projets individuels) sont présentés au Tab. 22. De sorte que l'étude mécanique de la stabilité individuelle d'une tige soit possible, il faut disposer de données au moins pour sa position initiale et pour une position en état chargé sans interaction avec un voisin. Cette condition n'est pas remplie pour la moitié des arbres-test (les 5 arbres K1, K2, K3, K6 et K8). L'exactitude insuffisante des coordonnées 3D des points-cibles rend les modèles 3D élaborés dans ces cas inutilisables. La présence pour certains de ces arbres de quelques modèles de bonne exactitude pour des positions chargées en interaction avec un voisin n'a pas d'importance. Après les essais de terrain de simulation de la charge de la neige en février-avril 2004, ces arbres ont été abattus pour prélever des billons pour les essais de fléchissement sous presse (cf. §6.5.4). Une répétition des essais de terrain était donc malheureusement impossible. La perte de données de base s'est ainsi élevée à env. 61% (85 positions sur 139). Pour les 5 autres arbres, des modèles 3D ont pu être élaborés pour 54 positions.

Cellule de voisins	I			II				III		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arbre de test	Z1	K1	K5	Z2	K2	K3	K4	K6	K7	K8
Pos. initiale, sans charge	1 (0)	-	1 (0)	1 (0)	-	1 (0)	1 (1)	1	1 (1)	1 (0)
Ch. indiv., sans interact.	2 (0)	-	1 (0)	4 (0)	1 (0)	-	7 (6)	-	6 (6)	-
Ch. indiv., avec interact.	7 (0)	-	7 (0)	8 (0)	-	-	7 (0)	-	-	-
Nbre tot. posit. Utilisables	10 (0)	-	9 (0)	13 (0)	-	-	15 (7)	-	7 (7)	-

Tab. 22 Projets réussis de mise en œuvre de modèle 3D de l'axe de la tige

() Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de projets de haute exactitude (version 2 de la méthode stéréophotogrammétrique)

- **Introduction d'un système de coordonnées unique**

Tous les projets individuels réussis (Tab. 22) ont été regroupés dans quatre grands projets (Tab. 23), en introduisant ainsi un système de coordonnées unique. La qualité de cette opération dépend beaucoup de la qualité du projet de base. Dans le cas des grands projets 1 et 2, un projet individuel de haute qualité, élaboré par la variante 2 de la méthode de mesures 3D, sert de projet de base. Il a été possible d'inclure 8 projets individuels de qualité moyenne au grand projet 2. Dans les grands projets 3 et 4, faute de projet de base de haute qualité, l'introduction du système de coordonnées unique est établie selon l'option „3 Points Scale“ (cf. façon (b), §5.4.4, p.81).

Grand projet	Projets individuels inclus	Projet de base de haute qualité	Projets de qualité moyenne	Méthode de transformation	Estimation de la qualité de l'opération
1	Tous les projets pour arbre K7	Oui	Non	comp. par faisceaux globale	Très bonne
2	Tous les projets pour arbre K4 et 8 projets pour arbre Z2	Oui	Oui	comp. par faisceaux globale	Bonne
3	5 projets pour arbre Z2	Non	Oui	3 Point Scale	Incertaine
4	Tous les projets pour les arbres Z1 et K5	Non	Oui	3 Point Scale	Incertaine

Tab. 23 Grands projets d'unification des systèmes de coordonnées

- Influence de l'introduction de l'échelle et d'un système de coordonnées unique
 Chez les grands projets 1 et 2 (Tab. 23) on peut faire les mêmes conclusions que dans le cas de la méthode de mesures 3-dimensionnelles terrestres des houppiers des arbres (Annexe 1, 0, p.211), à savoir – l'erreur due à l'introduction de l'échelle ne dépasse pas 1% des dimensions mesurées et le décalage de la verticale des points-cibles situées le plus haut sur la tige est de 10 cm au maximum⁴³. Chez les grands projets 3 et 4 (Tab. 23) il faut encore tenir compte du fait que les coordonnées des trois points qui servent à introduire l'échelle et à rectifier les modèles proviennent d'un autre projet 3D. Ces coordonnées sont déjà entachées d'erreurs (malgré la bonne qualité du projet-source). Ensuite ces erreurs sont superposées aux erreurs dans le projet en transformation. Une procédure de minimisation des erreurs n'est pas à disposition. Les données sur l'exactitude des coordonnées fournies par Photo Modeler ne reflètent pas la superposition des erreurs et dans le cas des grands projets 3 et 4 l'incertitude dans la qualité de l'opération est relativement grande.

- **Résultats**

A titre d'exemple, on présente à la Fig. 74 les modèles 3D de 5 tiges test dans leurs positions initiales (grand projet 1, Tab. 23). Pour la tige K7 les modèles pour toutes les 6 positions sont visualisées en forme de bouquet (trois directions de fléchissement simulé à raison de deux charges). Les nœuds représentent les points-cibles.

⁴³ cet ordre de grandeur estimé était confirmé dans quelques projets, en introduisant l'axe vertical Z par deux points, situés le long de la corde en état chargé (donc parfaitement verticale), le premier tout en bas et le deuxième tout en haut, au point d'attache de la corde à l'ESA

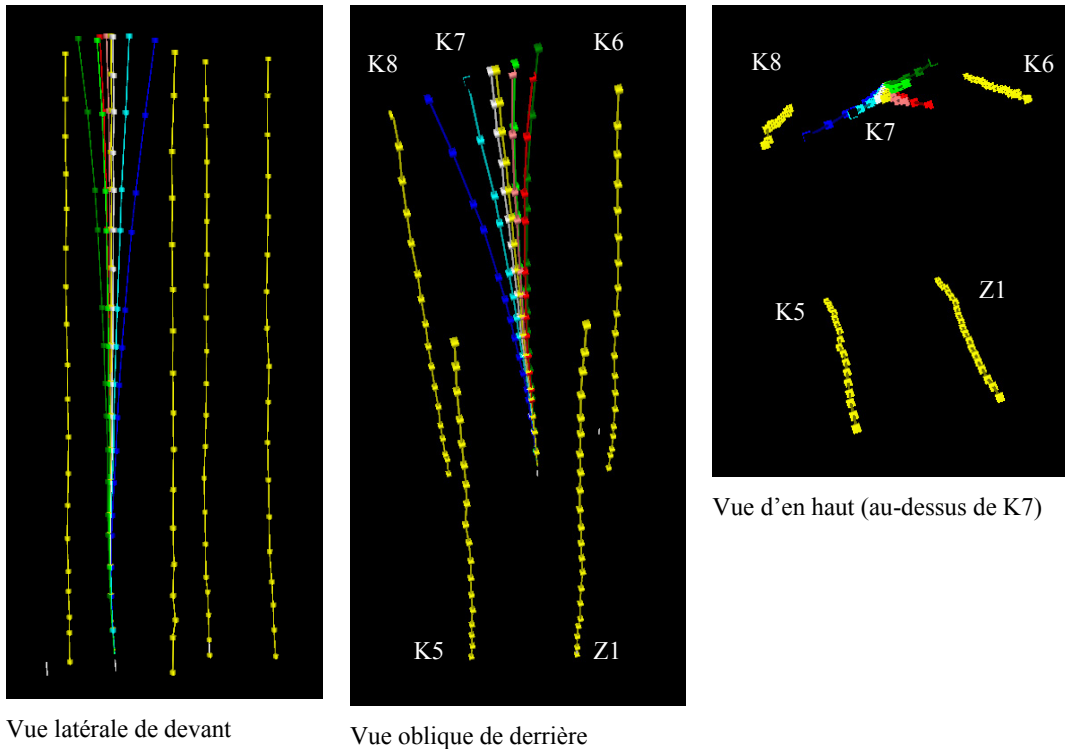


Fig. 74 Modèles 3D (visualisation en perspective) des tiges des arbres de test

Suite à l'élimination considérable de données, le but ultime – d'étudier les interactions entre les arbres lors de simulation de la charge de la neige lourde – n'est atteint que dans relativement peu de cas par rapport à ce qui a été planifié (Tab. 24). Pour seulement deux arbres (K4 et K7) des modèles 3D de bonne qualité ont pu être élaborés. Les relations entre seulement 2 couples d'arbres restent à disposition (Z1&K5 et Z2&K4).

Cellule	I			II				III		
Arbre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N de terrain	Z1	K1	K5	Z2	K2	K3	K4	K6	K7	K8
Résultats *	OK	X	OK	OK	X	X	OK	X	I	X
Qualité **	±	-	±	±	-	-	+	-	+	-

Tab. 24 Résultats de la reconstitution stéréophotogrammétrique de la ligne élastique

* **OK** - reconstitution réussie pour tous les cas (avec et sans interactions avec des voisins)
X - reconstitution non-réussite lors de charges individuelles (sans interactions avec des voisins) (cf. §6.5.3). Pour cette raison, ces arbres doivent être exclus de l'étude.
I - reconstitution réussie seulement dans les cas de charges individuelles (sans interactions avec des voisins)

** (+) bonne qualité; (±) qualité médiocre ; (-) qualité insatisfaisante

L'analyse des projections orthogonales des points représentant l'axe de la tige (à l'exemple de la tige K7, visualisée dans l'Annexe 3) révèle certaines particularités importantes :

- dans la position initiale (sans charge), la forme de la tige est relativement irrégulière, présentant des écarts (dans le plan horizontal XY) par rapport à la verticale qui passe par le centre de la section transversale de la base de la tige.
- les plans verticaux, dans lesquels les fléchissements ont été faits (sans interactions avec des voisins), ne correspondent pas avec le plan principal d'inclinaison initiale de la tige.

- la position estimée du $C_{g_{houpp}}$ se trouve dans un troisième plan vertical qui ne correspond ni au plan principal d'inclinaison initiale, ni au plan de fléchissement
- les particularités décrites jusqu'ici expliquent la façon dont la tige se déforme - elle se tord dans une certaine mesure lors du fléchissement. La torsion semble toutefois relativement faible.

6.5.4 Module E, résistance et limite d'élasticité du bois (essais avec billons)

- déroulement des essais

Le 5 et le 6.04.2004, des 10 arbres, chargés sur le terrain avec une charge verticale simulant la charge de neige 8 ont été abattus. De chaque tige abattue un voire deux billons de longueur d'env. 4 m ont été prélevés, depuis l'emplacement de l'ESA vers la base de la tige. Au total 16 billons ont été prélevés (Tab. 25). Ils furent transportés à l'usine de Sofia le 08.04. Là ils furent soumis à des essais de fléchissement sous la presse hydraulique. Les tests préliminaires pour ajuster la façon de conduire les essais ont eu lieu le 09.04. Le 13.04, 11 billons au total ont pu être examinés correctement. De ces 11 billons, 5 proviennent d'arbres dont on a pu reconstituer avec un certain succès de manière photogrammétrique les lignes élastiques. Le rapport longueur étudiée/épaisseur varie entre 21 et 26, ce qui réduit considérablement l'effet de l'effort tranchant.

Billon	Tige	Diamètres gros bout sur écorce [mm]	Diamètres petit bout sur écorce [mm]	Hauteur sur l'arbre, gros bout – petit bout [m]	Longueur [m]	Essai réussi
1	K1	153/153	112/116	10.4 - 14.4	4.00	-
2	K1	177/180	153/153	6.4 - 10.46	4.06	+
3	K2	166/165	144/135	7.5 - 11.6	4.10	+
4	Z2	150/148	120/111	10.95 - 15	4.05	-
5	Z2	171/168	150/148	6.9 - 10.95	4.05	+
6	K3	169/170	151/151	7.3 - 11.35	4.05	+
7	K3	151/151	110/110	11.4 - 15.45	4.05	+
8	Z1	177/177	150/153	7.55 - 11.6	4.05	+
9	Z1	150/153	115/110	11.6 - 15.65	4.05	+
10	K5	164/155	134/131	7.5 - 11.1	3.60	-
11	K5	134/131	110/110	11.1 - 15.05	3.95	+
12	K6	206/207	185/182	11.7 - 15.75	4.05	-
13	K6	185/182	128/130	7.65 - 11.7	4.05	-
14	K8	172/172	150/145	6.6 - 10.65	4.05	+
15	K8	150/145	125/113	10.65 - 14.7	4.05	+
16	K5	186/177	164/155	3.45 - 7.45	4.00	+

Tab. 25 Caractéristiques des billons

- calculs et résultats

La Fig. 75 illustre bien, à l'exemple-type du billon №5, la relation linéaire qui existe entre la charge et la flèche jusqu'à la limite élastique (σ_E) et finalement la rupture (σ_B) qui suit la déformation plastique. L'entrée dans la zone plastique s'effectue de façon progressive, parce que les limites d'élasticité de compression et de tension diffèrent. La plastification qui commence d'abord dans la zone de compression est retardée par la résistance des fibres dans la zone de tension qui se déforment encore de façon élastique.

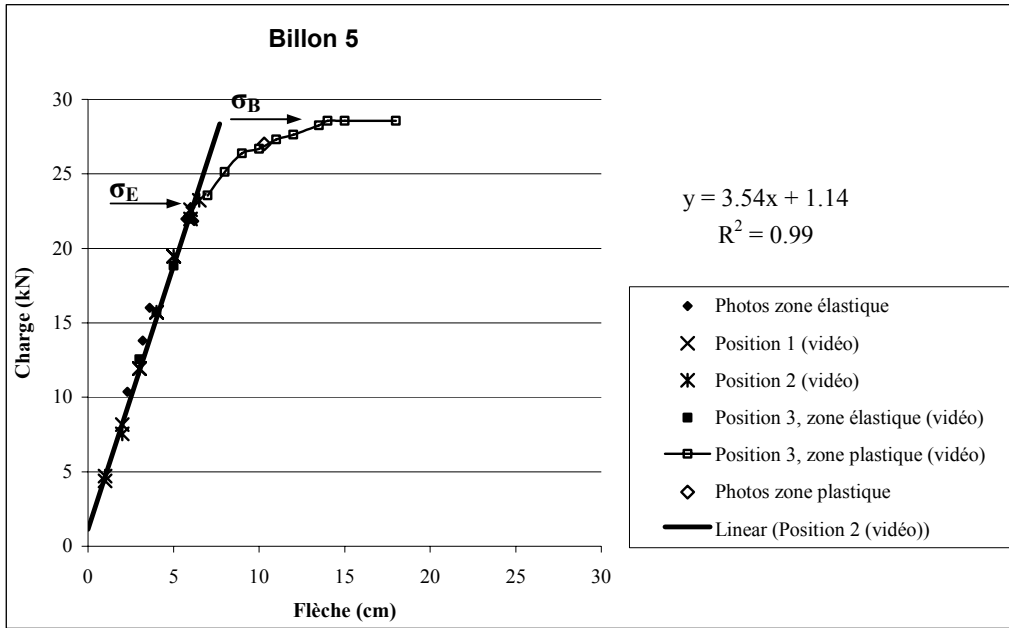


Fig. 75 Relation charge – flèche, limite d'élasticité et résistance à la flexion

Pour cette raison, σ_E ne peut pas être identifiée de façon très nette (Tab. 26). Le comportement du matériau dans la zone élastique s'avère pratiquement linéaire comme attendu. Ceci est valable pour toutes les positions et tous les fléchissements, tant que les contraintes restent toujours inférieures à la σ_E . Dans certains cas le traitement des données a révélé un déroulement plus complexe des essais, quand la limite élastique a été franchie involontairement à maintes reprises, comme par exemple dans le cas du billon N°14 (Fig. 76), où l'entrée dans la zone plastique se passe pour la première fois lors du fléchissement 1 dans la position 3, ensuite le billon a subi une déformation plastique presque jusqu'à la rupture lors du fléchissement 2 dans la même position et finalement l'allure de la relation charge/flèche lors du fléchissement 3 qui a abouti par la rupture ne reflète plus le vrai comportement élastique du matériau.

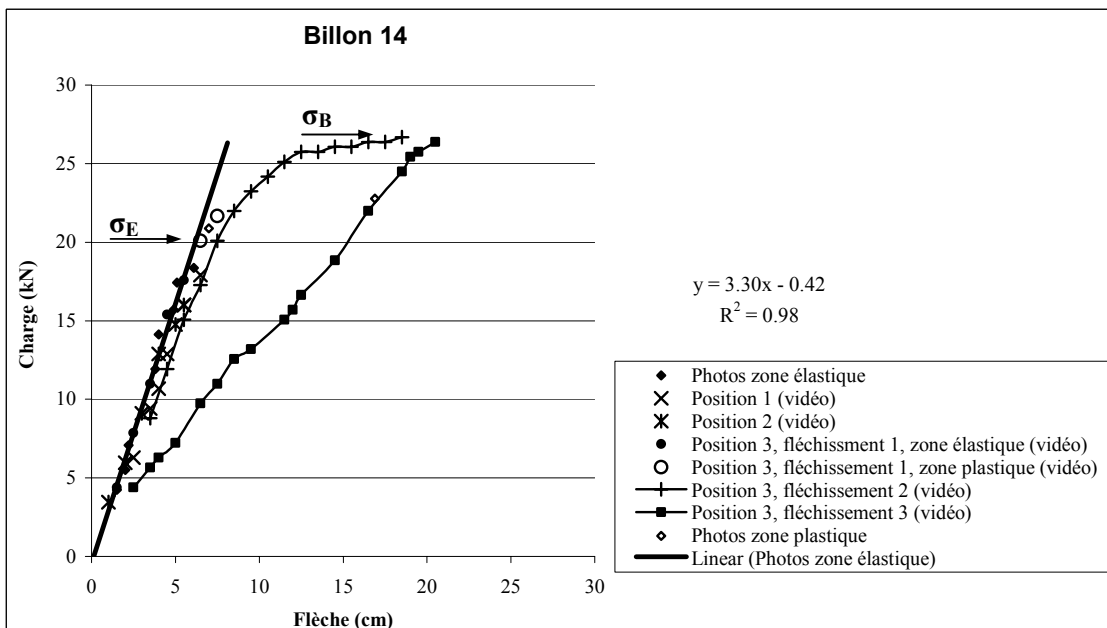


Fig. 76 Relation charge – flèche, limite d'élasticité et résistance à la flexion

L'équation de la droite qui égalise l'allure de la relation charge/flèche dans la zone élastique sert à la détermination ultérieure du module E. Dû aux imperfections déjà mentionnées (§5.4.5, p.81), la droite d'égalisation ne passe pas par le début du système de coordonnées. En effet, on n'utilise pas le coefficient b de l'équation de régression (l'intercept) lors des calculs du module E.

Les résultats des essais de fléchissement des billons sont présentés dans Tab. 26. On obtient un module E moyen de $8.4 \pm 1.2 \text{ kN/mm}^2$, une limite d'élasticité moyenne de $43 \pm 5 \text{ N/mm}^2$ et une résistance à la flexion moyenne de $57 \pm 2 \text{ N/mm}^2$ (sur 7 billons qui ont été fléchis jusqu'à la rupture). Le rapport entre la limite d'élasticité et la résistance à la flexion est de 0.75 ± 0.08 , ce qui est légèrement supérieur au bois sec - $0.6 \div 0.7$ (Bluskova, 2003). Selon ces essais, les déformations plastiques dépassent en grandeur les déformations élastiques dans un rapport entre 2 : 1 et 3 : 1. Le matériau montre donc sous fléchissement des capacités de plastification non-négligeables.

Billon	Tige	H rel (m)	E (kN/mm ²)	σ_E (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
2	K1	8.4	8.8	51	56
3	K2	9.6	10.2	37	-
5	Z2	8.9	9.5	46	59
6	K3	9.3	9.2	45	58
7	K3	13.4	8.3	48	61
8	Z1	9.6	7.9	44	-
9	Z1	13.6	8.4	43	58
11	K5	13.1	5.7	41	54
14	K8	8.6	9.2	36	55
15	K8	12.7	7.1	41	-
16	K5	5.5	8.3	40	-

Tab. 26 Module E, limite d'élasticité σ_E et résistance à la flexion σ_B

Quand on représente les valeurs du module E en fonction de l'emplacement du centre du billon (hauteur relative) sur l'arbre (Fig. 77), il se dessine une tendance de diminution du module E avec la hauteur pour trois des quatre tiges pour lesquelles deux billons ont été prélevés et testés. Cela signifie que le bois devient plus élastique de la base vers la cime. Pour une tige (Z1) on constate une légère tendance dans le sens opposé.

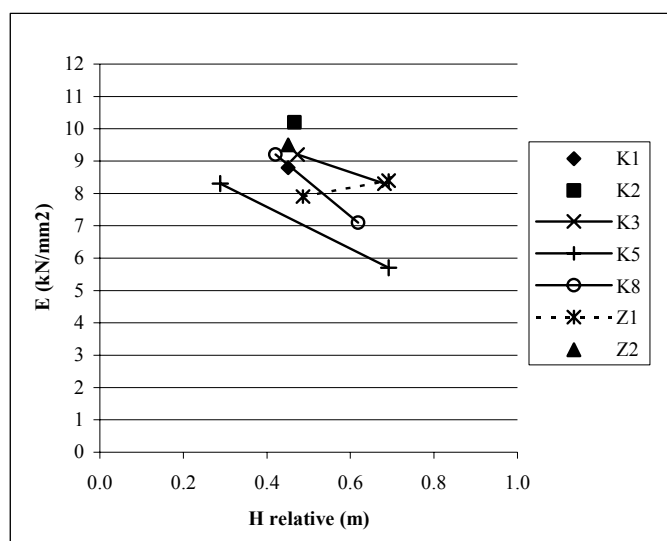


Fig. 77 Module E en fonction de la hauteur relative sur l'arbre

Pour les trois cas cités, les deuxièmes valeurs du module E se rapportent à des endroits de la tige, situés à plus de 60% de sa hauteur totale. La tendance de diminution du module E correspond donc avec les résultats de Brüchert et al. (2000).

6.5.5 Module E des tiges sur pied

- calculs avec un module E constant

Pour chaque tige, l'allure des moments d'inertie J (diamètres sous écorce) en fonction de la hauteur de la section sur l'arbre a été bien égalisée par une exponentielle dans la plupart des cas (Fig. 78), sauf dans la partie vers la base de la tige. Parfois une parabole de 6^{ème} degré a été utilisée. Pour chaque position, l'allure des déplacements w(z) a été parfaitement égalisée par une parabole de 3^{ème} degré qui passe par le début du système de coordonnées (Fig. 79). Le point situé le plus haut sur la tige représente la flèche δ.

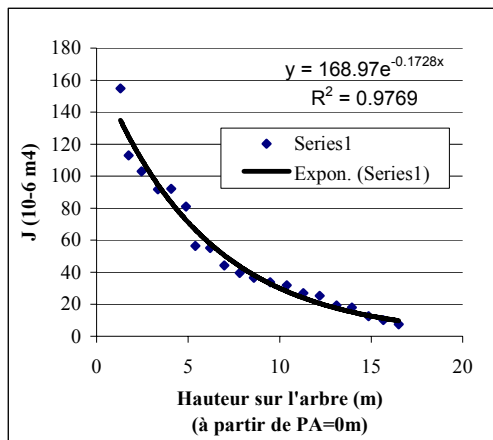


Fig. 78 Egalisation de l'allure des moments d'inertie (tige K7)

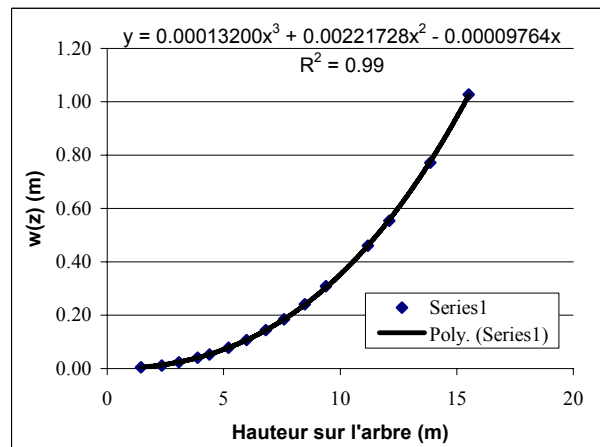


Fig. 79 Egalisation des déplacements w(z) (tige K7, position 114)

Les résultats des calculs pour les tiges des meilleurs modèles 3D (K4 et K7) sont présentés à la Fig. 80 et au Tab. 27 ensemble avec les autres tiges.

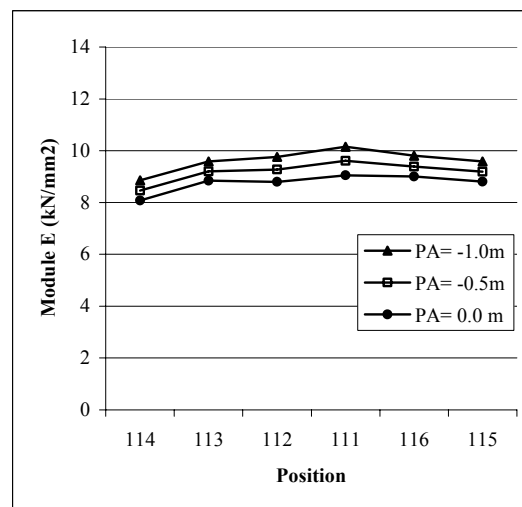
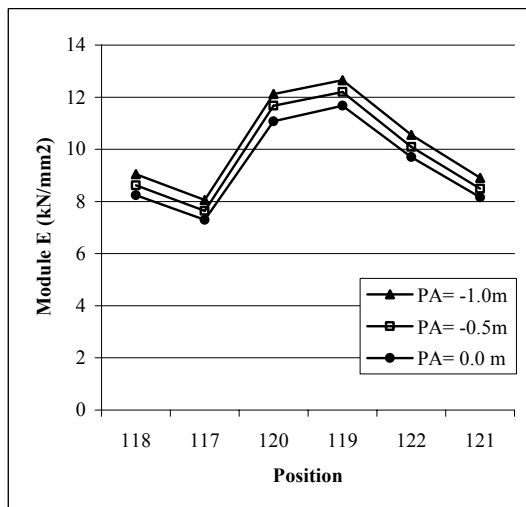


Fig. 80 Module E en fonction de la profondeur d'encastrement. Tige K4 (à gauche) et tige K7 (à droite)

On constate que chez tige K7 les valeurs obtenues sont assez proches pour toutes les positions. Pour tige K4 on peut négliger les valeurs pour les positions 120 et 119 à cause de la mauvaise correspondance de la courbe mesurée avec la courbe calculée (cf. Annexe 5, p.218).

Donc pour les tiges K4 et K7, une augmentation de la profondeur d'encastrement de 0.5 m conduit à une augmentation du module d'élasticité d'env. 0.5 kN/mm^2 .

Pour les tiges Z1, K5 et Z2 les valeurs obtenues sont en peu plus hautes (entre 12.1 et 14.5 kN/mm^2). La qualité des modèles 3D en est probablement la raison. Si l'inclinaison de la tige à l'état initial est négligée (en admettant qu'elle est due à une mauvaise transformation des coordonnées), des valeurs plus basses de l'ordre de 8.8 à 11.4 kN/mm^2 sont obtenues. Augmenter la profondeur d'encastrement augmenterait encore le module E, comme dans le cas des tiges K4 et K7.

Arbre	PE= 0m	PE= -0.5m	PE= -1m
K4	8.3 ± 1.0 (n=4)	8.7 ± 1.0 (n=4)	9.1 ± 1.0 (n=4)
K7	8.8 ± 0.3 (n=6)	9.2 ± 0.4 (n=6)	9.6 ± 0.4 (n=6)
K5	12.9/9.9	non calculé	non calculé
Z1	11.3/9.9	non calculé	non calculé
Z2	10.7/7.7	non calculé	non calculé

Tab. 27 Module E (kN/mm^2) calculé des arbres d'essai de terrain

- **calculs avec un module E variable**

L'essai d'introduire dans les calculs pour les tiges **K4** et **K7** un module E variable n'a pas donné de résultats satisfaisants. La correspondance entre les courbes mesurées et calculées (non représenté) était moins bonne que pour les variantes avec un module E constant (jusqu'à la hauteur de l'ESA). On admet finalement pour ces tiges que jusqu'à la hauteur de l'ESA le module E reste constant.

Pour deux des trois autres tiges (**K5** et **Z1**), on dispose de deux valeurs de référence du module E à différentes hauteurs sur la tige, obtenues par les essais avec les billons (cf. §6.5.4). Elles ne permettent naturellement pas une modélisation correcte de l'allure du module E en fonction de la hauteur sur la tige mais présentent plutôt une valeur indicatrice. Dans le cas de tige Z1 il n'y a apparemment pas de tendance de diminution du module E jusqu'à la hauteur étudiée (cf. Fig. 77, p.128). Pour la tige K5 il y a une diminution d'env. 30% ($E_{0.69H}/E_{0.29H}=0.69$). L'introduction dans les calculs d'un module E variable ($E_{0.60H}/E_{1.0H}=0.70$) conduit à une hausse sensible du module E_{tige} en-dessous de cette hauteur - 10.7 kN/mm^2 (contre 9.9 kN/mm^2), en admettant une tige sans inclinaison. La meilleure correspondance des courbes mesurée et calculée est obtenue toutefois avec un module E constant ou avec un module E légèrement variable ($E_{0.60H}/E_{1.0H}=0.95$). Si on admet une tige inclinée, la meilleure correspondance des courbes est obtenue avec un module variable E ($E_{0.60H}/E_{1.0H}=0.85$), ce qui donne cependant un E_{tige} très élevé de 13.3 kN/mm^2 . La sensibilité des résultats à un module E variable dans la partie supérieure de la partie étudiée de la tige est due au fait que les calculs se basent sur un point – celui au niveau de l'ESA, justement dans la zone où la tige est sujette aux plus grandes déformations. Par contre, les essais de faire varier le module E depuis la base de la tige ($E_{0.0H}/E_{\text{tige}}=0.70$) n'ont conduit qu'à une augmentation insignifiante d' E_{tige} , dans l'ordre de $0.1-0.2 \text{ kN/mm}^2$. Ceci est dû au fait que dans cette zone la tige montre les moindres déformations. Par conséquent, la variation du module E dans cette zone peut être négligée. La variation du module E dans la partie supérieure peut en principe, chez la plupart des tiges étudiées, être également négligée, étant donné que la hauteur de l'ESA est située à la limite de la zone de diminution.

En conclusion : les essais d'introduire un module E variable donnent des résultats insatisfaisants. Les imperfections dans les données de base ou le manque de données de référence ne permettent pas d'étudier plus profondément l'influence d'un module E variable.

On considère que l'emploi d'un E module constant pour la longueur étudiée de la tige est suffisamment justifié.

- **comparaison des modules E des essais avec billons et avec tiges entières**

Les résultats des calculs du module E des essais avec billons et avec arbres sur pied ne sont pas directement comparables, même pour les arbres Z1, Z2 et K5 (insécurité en ce qui concerne l'inclinaison de la tige). Le module E des essais de terrain varie entre 7.7 et 9.9 kN/mm² (tiges sans inclinaison) et des essais avec billons entre 7.9 et 10.2 kN/mm² (pour les billons en dessous de 50% de la hauteur de la tige), ce qui est pratiquement le même ordre de grandeur.

L'évolution du module E en fonction du d_{1,3} de l'arbre montre une assez bonne tendance de diminution du module avec l'augmentation du d_{1,3} (Fig. 81), sur la base des résultats sur toutes les tiges.

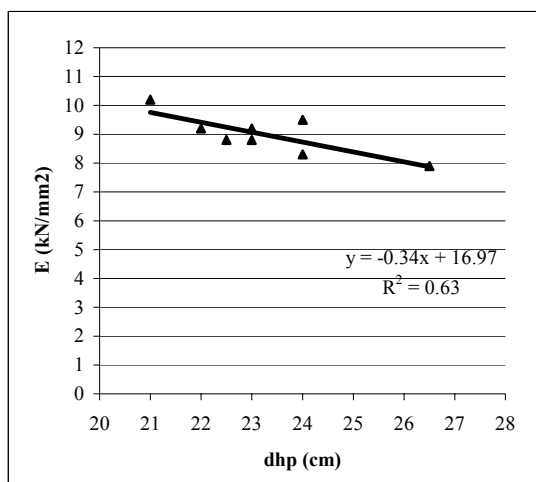


Fig. 81 Module E en fonction du d_{1,3}

6.5.6 Détermination de la SI et de la RI. Scénarios et analyse de sensibilité

- **vérification de la méthode numérique pour le calcul de la SI**

Il convient d'abord de vérifier la pertinence de la méthode numérique utilisée pour le calcul de la charge critique. Il s'agit de comparer les résultats qu'elle donne avec des cas déjà connus, établis par des formules analytiques. Un tel cas, très proche du modèle mécanique de la tige, est celui d'une barre encastree dont la forme est un cône tronqué, donc de rigidité variable. La barre est soumise à une sollicitation excentrée. La forme initiale de la déformée est admise, la flèche δ est unitaire (égale à 1). Ensuite, avec seulement quelques itérations, elle s'approche vite de la déformée de flambage (Fig. 82). Après six itérations, le f_{cr} calculé de façon numérique, est 1.0294. Le f_{cr} , calculé par les formules analytiques publiées par Likar (1968), est 1.0290. Cet exemple et d'autres vérifications de ce type ont confirmé la pertinence de la méthode.

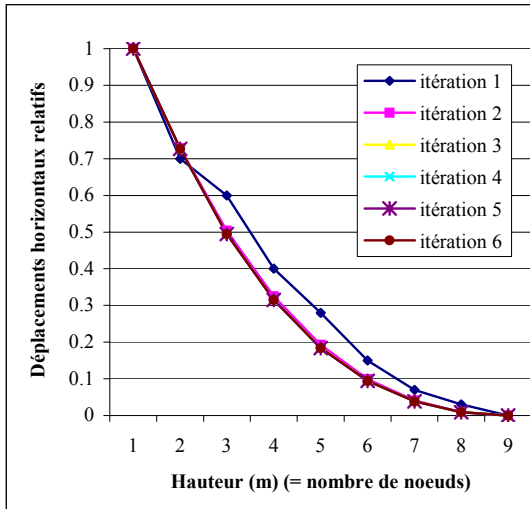


Fig. 82 Approximation de la déformée de flambage par la méthode numérique

- vérification de la méthode numérique (calcul des états d'équilibre de 2^{ème} ordre)

Pour les tiges K4 et K7, les valeurs des flèches mesurées lors des essais de terrain ont été comparées avec celles, calculées par la méthode numérique (Tab. 28). Les tiges sont considérées être non inclinées dans les simulations, à cause de l'impossibilité d'estimer la position zéro (cf. 5.5.5, p.94), avec un $C_{g_{houpp}}$ qui se trouve sur leurs axes (on admet que la position initiale correspond à la position zéro). Les différences entre les valeurs simulées et les valeurs réellement mesurées sont dans un ordre de grandeur acceptable. Pour les simulations qui suivent, les mêmes simplifications seront admises.

Arbre	δ simulé (m)	δ observé (m)	Différence
K4	0.40	0.44	-9%
	0.79	0.71	+11%
K7	0.44	0.42	+5%
	0.97	1.09	-12%

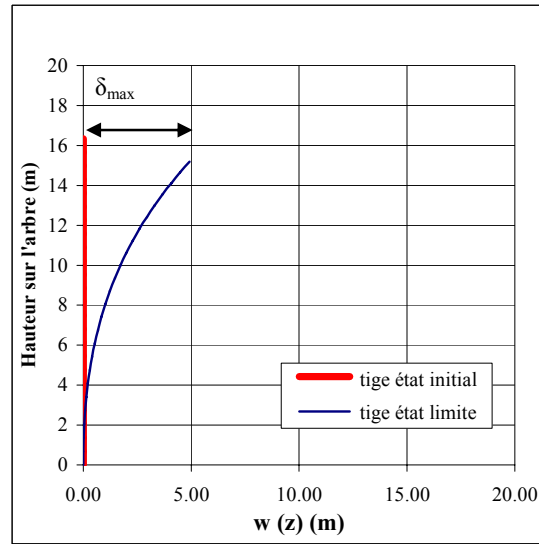
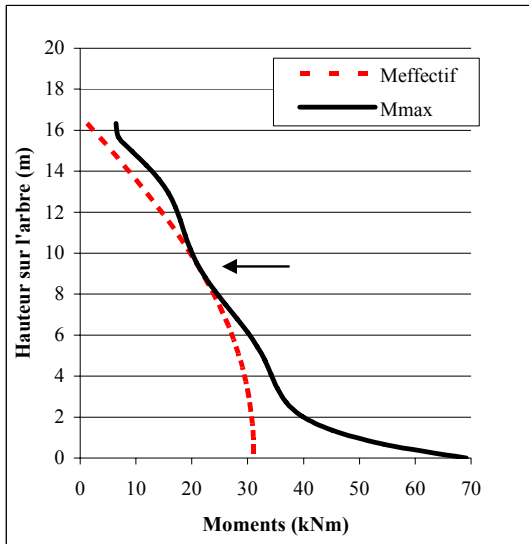
Tab. 28 Comparaison de la flèche simulée avec la flèche observée

- détermination de la RI et de δ_{max}

La Fig. 83 présente l'état limite, dans lequel les moments extérieurs ($M_{effectif}$) égalent les moments de résistance admissibles (M_{max}). Pour l'arbre K4, cela advient à un endroit nettement identifiable, situé à env. 9m de hauteur sur la tige (signalé par une flèche). Pour la tige K5, la partie de la tige soumise à la plastification s'étend sur une longueur d'env. 2m, située entre 10 et 12m de hauteur sur la tige. Le dernier type de déformation est observé toujours chez les tiges de faibles dimensions. Il est conditionné surtout par la forme de leurs tiges et explique pourquoi, comme plusieurs fois mentionné dans la littérature (p.ex. Abetz&Prange, 1976) elles ont la tendance de se plastifier sur une grande partie de leurs hauteurs, parfois même jusqu'à leurs bases, sans se casser, tandis que les plus gros arbres ont la tendance à se casser à l'endroit où la plastification s'est initialement produite.

A l'état limite correspond la flèche maximale δ_{max} (Fig. 84). Il faut noter que le diagramme montre seulement la partie de la tige jusqu'au point de charge (emplacement de l'ESA) et non toute la hauteur de l'arbre.

tige K4, scénario 3



tige K5, scénario 3

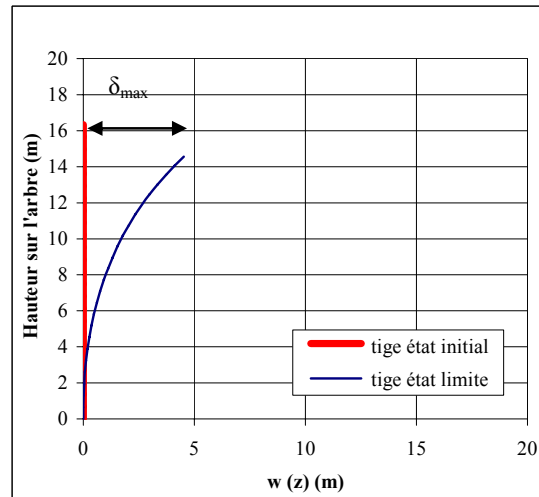
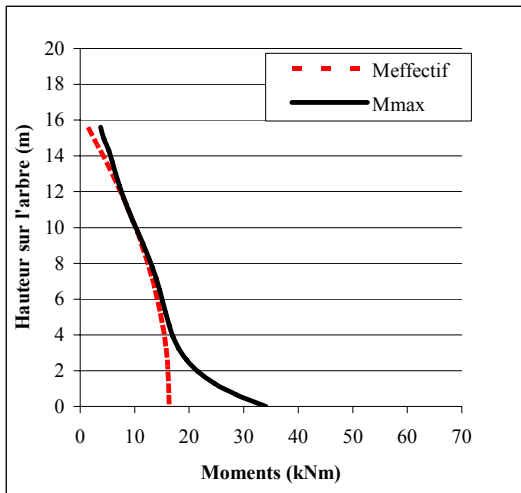


Fig. 83 Etat limite

Fig. 84 Déformée simulée (début de plastification)

• scénarios de simulation

L'effet de certains facteurs sur la SI et la RI sera analysé à l'aide de quelques scénarios de simulation (Tab. 29). Les conditions suivantes sont admises: module E constant le long de la longueur étudiée de la tige, PE égale à 0m, tiges parfaitement droites et sans inclinaison initiale, excentricité de la charge égale à l'intensité du VA.

Scénario	Description	E (kN/mm ²)	σ_E (N/mm ²)	Encastrement
1	tige non-gelée, avec fluage	selon les essais de terrain ou déduit de Fig. 81, p.131	30	parfaitement rigide
2	tige non-gelée, sans fluage	mêmes valeurs que scénario 1	43	parfaitement rigide
3	tige gelée	augmentation de 20% par rapport au scénario 1	43	parfaitement rigide

Tab. 29 Scénarios simulés pour évaluer la SI et la RI

Les simulations ont été effectuées avec les données de 5 tiges des essais de terrain, complétés par les données sur 6 tiges additionnelles du même peuplement (Tab. 30).

N de terrain	P6Z36	P6Z46	P6Z48	P6Z53	P1Z4K12	P1Z6K21
$d_{1,3}$ (cm)	19.8	24.5	22.1	22.1	18	14
h (m)	21.9	23.4	21	20.2	19.5	22
hbh (m)	15.4	17.3	17.5	15.1	15.2	14.3
hlh (m)	16	18	16	16	16	15
hlh/h	0.73	0.77	0.76	0.79	0.82	0.68
Poids houpp. (kg)	50	80	60	60	40	25
POH (m ²)	9.9	6.9	5.7	6.6	4.0	2.7
VA (cm) Photo/4Rad	10/-	65/-	69/-	42/-	-/11	-/1.06
E (kN/mm ²)	10.2	8.6	9.5	9.5	10.9	12.2

Tab. 30 Caractéristiques des arbres additionnels pour les simulations

- résultats des scénarios de simulation

- influence de la résistance et du module E du bois

La Fig. 85 démontre que l'influence de la résistance du bois sur la RI est pratiquement négligeable. Pour une augmentation de 43% de la limite d'élasticité, la RI des tiges-modèles augmente dans l'ordre seulement de 1 à 7% (scénario 2 comparé avec scénario 1). De cette façon, les capacités de déformation plastique du matériau bois semblent peu importantes pour la RI. Le rôle secondaire de la résistance du matériau est dû à l'effet amplificateur.

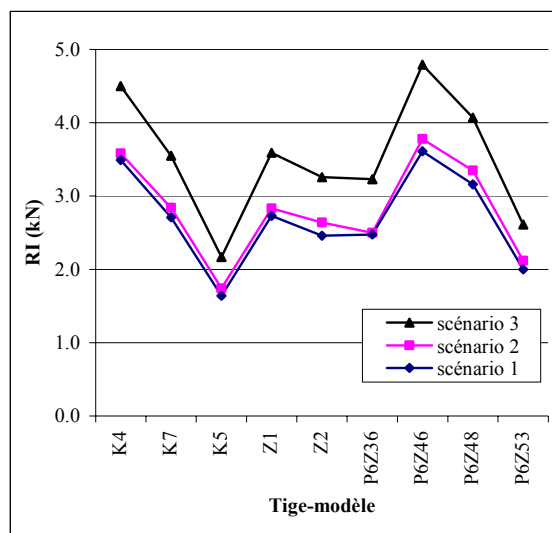


Fig. 85 Influence de la résistance du bois sur la résistance des tiges

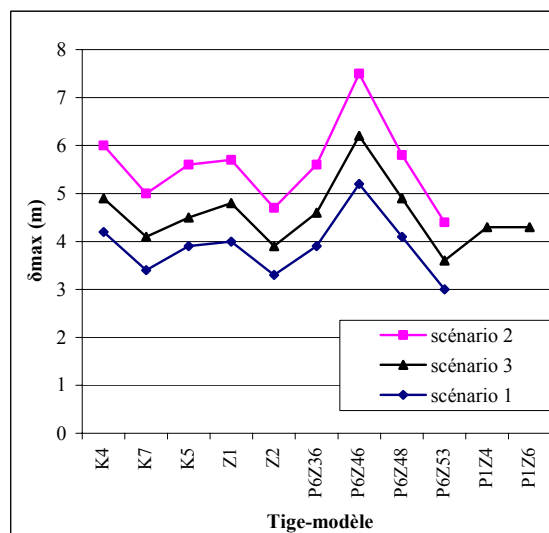


Fig. 86 Influence de la résistance du bois sur la flèche maximale

L'influence de la résistance du bois sur δ_{max} est par contre directement proportionnelle – augmentation de 43% (scénarios 1 comparé avec scénario 3) (Fig. 86). Sur la Fig. 86 on constate que l'ordre de grandeur de δ_{max} est dans la plupart des cas entre 3.5 et 5 mètres (scénarios 1 et 3).

- influence de l'excentricité e sur la RI

Les calculs effectués avec seulement trois tiges sont suffisantes pour illustrer cet effet (Fig. 87). L'augmentation de l'excentricité de la charge conduit naturellement à une diminution linéaire de la RI. Pour des excentricités entre 0.05m et 1m, la diminution de la RI est dans l'ordre de 20 à 25% ($RI_{e=0.05m}/RI_{e=1.0m}$).

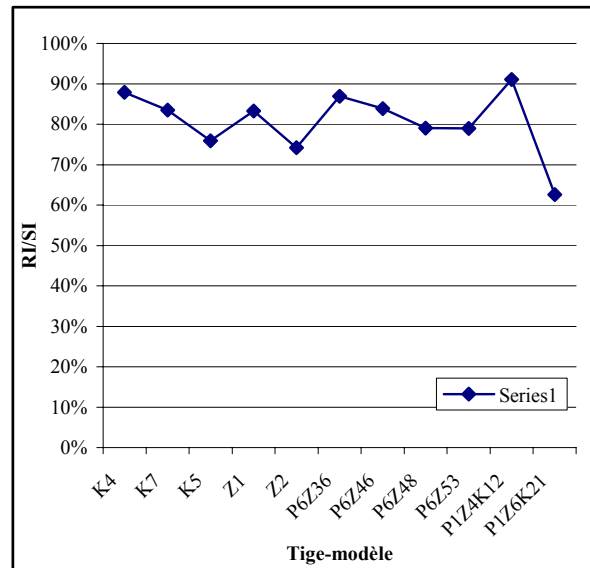
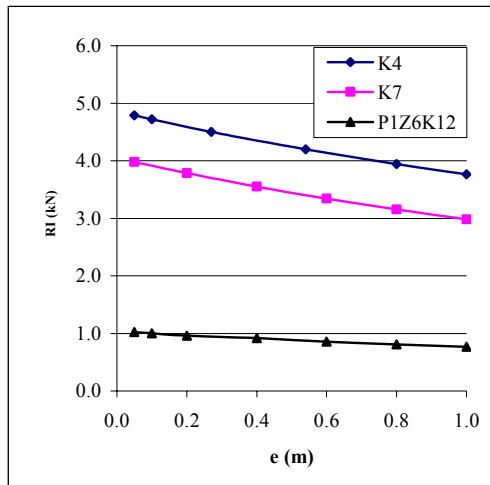


Fig. 87 Influence de l'excentricité de la charge sur la RI (scénario 3) Fig. 88 Rapport RI/SI pour les arbres testés (scénario 3)

Fig. 88 montre la diminution de la charge admissible en fonction de l'excentricité e par le rapport RI/SI. Pour les arbres testés elle est en moyenne de 20% (allant de 9 à 37% au maximum). Ceci représente l'ordre de grandeur de la surestimation des capacités de résistance des arbres en utilisant SI au lieu de RI comme indice de résistance (cf. Nakatani, 1991).

- relations avec le $d_{1,3}$

Fig. 89 et Fig. 90 reflètent la corrélation entre RI, respectivement N_{max} avec le $d_{1,3}$.

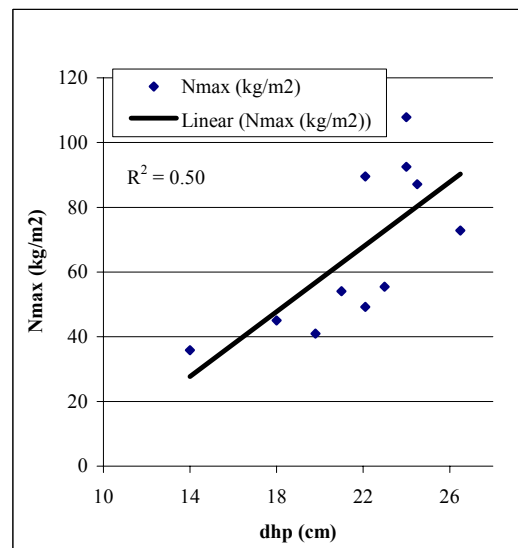
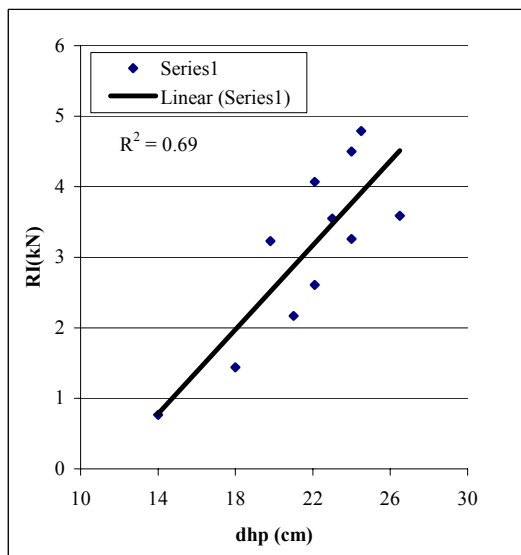


Fig. 89 RI en fonction du $d_{1,3}$ (scénario 3)

Fig. 90 N_{max} en fonction du $d_{1,3}$ (scénario 3)

L'idée ici n'est pas de se concentrer sur la valeur du coefficient de détermination, mais seulement de constater que les arbres plus gros présentent logiquement une plus grande

résistance. La diminution du R^2 chez N_{max} en comparaison de la RI est due certainement au fait que N_{max} reflète la grande variation au sein d'une catégorie de diamètre de la POH (cf. Fig. 58, p.112), dont dépend la charge de la neige accumulée. En général, sans attribuer une valeur spéciale à cette conclusion, N_{max} correspond avec les résultats de Solantie (1994), selon lesquels les dégâts faibles à modérés se constatent à partir de 40mm de précipitations de neige lourde.

- relations avec le coefficient d'élanement

Il est intéressant de voir dans quelle mesure le coefficient d'élanement reflète la stabilité et la résistance individuelles des arbres. Une certaine corrélation peut être notée (Fig. 89 et Fig. 90). Cependant, une grande variation de SI et de RI (respectivement entre 3 et 6 kN et entre 2 et 5 kN) pour des valeurs de h/d entre 80 et 100 peut être constatée. Dans le cadre des résultats de cette simulation, il s'avère que le coefficient d'élanement ne possède pas de valeur pratique et n'est pas approprié ni comme indice de stabilité, ni comme indice de résistance.

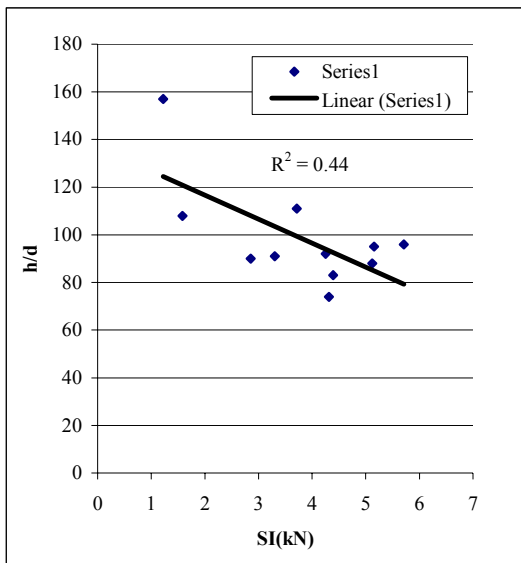


Fig. 91 Coefficient d'élanement en fonction de la SI (scénario 3)

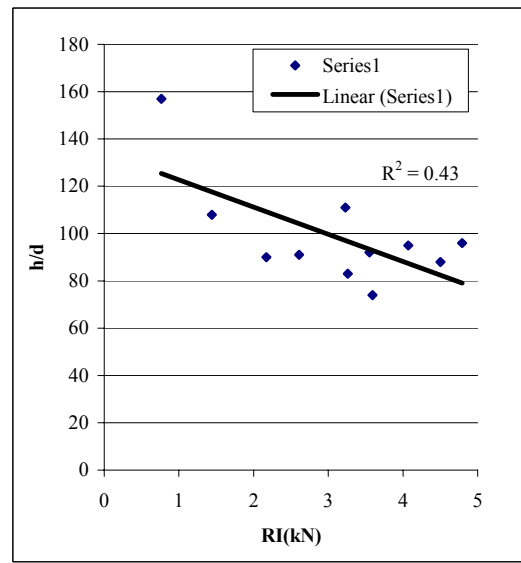


Fig. 92 Coefficient d'élanement en fonction de la RI (scénario 3)

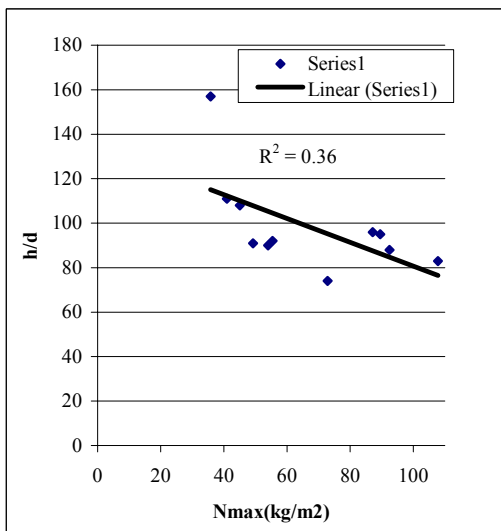


Fig. 93 Coefficient d'élanement en fonction de N_{max} (scénario 3)

La même constatation est valable pour la relation entre le coefficient d'élanement et l'indice N_{max} (Fig. 93). Le coefficient d'élanement ne fait pas de différence entre deux arbres dont le premier sera vraisemblablement endommagé après des précipitations de 40mm et le deuxième – après de précipitations de 100mm.

6.5.7 Déformations simultanées lors d'une accumulation de neige simulée

Fig. 94 illustre les déformations simultanées des tiges-modèles en fonction d'une précipitation de neige lourde simulée entre 10 et 60kg/m² et un taux d'interception par les houppiers de 80%. L'ordonnée représente la flèche au niveau de l'ESA (~hlh). L'abscisse représente la précipitation de neige lourde (kg/m²).

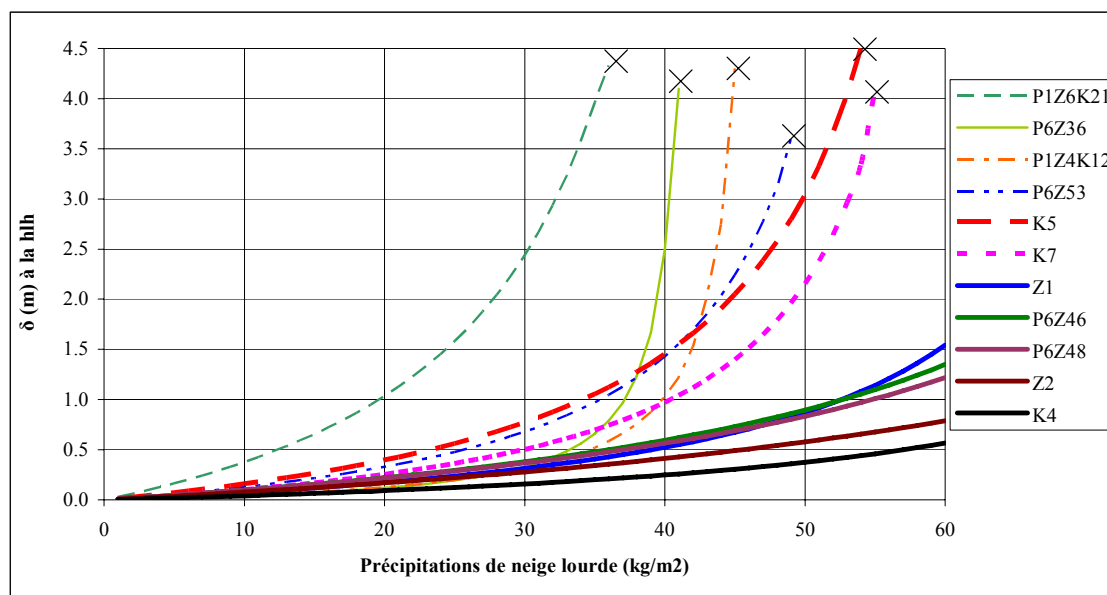


Fig. 94 Déformations lors d'une accumulation simulée de neige lourde (scénario 3)

Au début des précipitations et de l'accumulation de neige, les tiges fléchissent relativement peu. Jusqu'à 10kg/m² de neige leurs flèches sont inférieures à 0.5m, mais le rapport entre les flèches des tiges qui fléchissent le plus et de celles qui fléchissent le moins est en moyenne 4 : 1. Pour des précipitations entre 40 et 60kg/m², ce rapport augmente de 5 : 1 à 10 : 1. Pour 6 tiges, le diagramme montre (avec une croix) la flèche vers le point d'entrée dans la zone plastique de déformation (ce qui correspond sur l'abscisse à N_{max}). A cette étape, les autres tiges se déforment encore dans le domaine élastique. Il faut noter l'inégalité des déformations en fonction de la quantité des précipitations (ou en autres termes – à une étape donnée à partir du début des précipitations) que présentent les 11 tiges-modèles.

On constate que les tiges de faibles RI fléchissent relativement plus que les autres, une tendance assez nette qui s'accroît davantage avec l'augmentation des précipitations (Fig. 95). Il faut bien préciser qu'il s'agit d'une tendance générale, étant donné que RI dépend de la combinaison de plusieurs facteurs. Il peut y avoir en réalité des divergences notables entre des arbres d'une même RI.

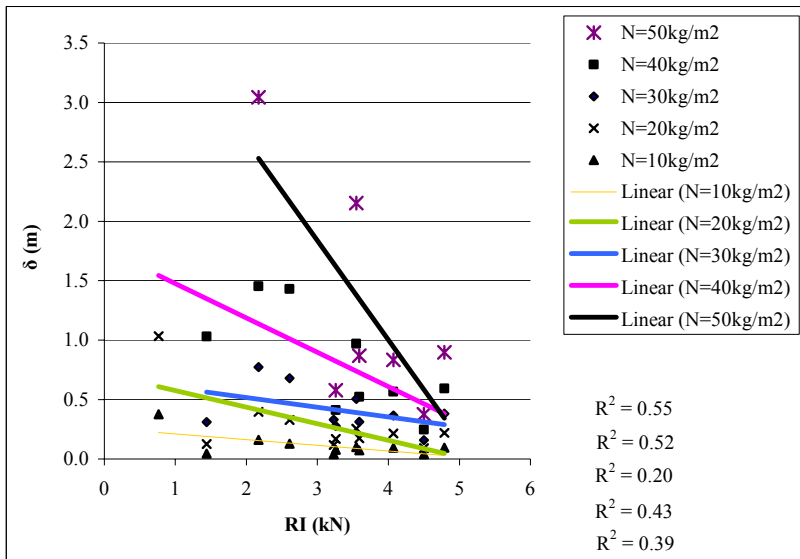


Fig. 95 Flèche en fonction de la RI, accumulations simulées de neige lourde (scénario 3)

Les déformations en fonction des précipitations sont fortement influencées par l'excentricité e de la charge. Fig. 96 illustre l'effet de l'excentricité pour un seul arbre (tige P1Z6K12, scénario 3), pour des valeurs allant entre 0.05m et 1m, ce qui représente leur ordre de grandeur dans le peuplement étudié (cf. Fig. 54, p. 109 et Fig. 65, p.117).

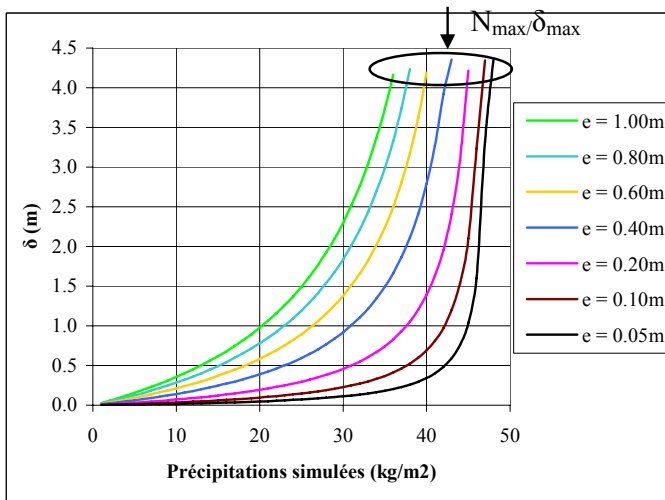


Fig. 96 Evolution de la flèche en fonction des précipitations et de l'excentricité de la charge

Il faut noter cependant que la flèche maximale (δ_{\max}) reste toujours la même quel que soit l'excentricité e . Ceci est dû au fait que toutes les lignes élastiques vers δ_{\max} sont identiques à la ligne élastique de flambage. Par conséquent l'asymétrie du houppier (l'emplacement sur le plan horizontal du $C_{g_{\text{houpp+neige}}}$) n'a aucun effet sur les δ_{\max} calculés selon le modèle. Du point de vue pratique, il suffit que l'asymétrie du houppier confère la moindre excentricité au $C_{g_{\text{houpp+neige}}}$, pour que l'arbre commence de fléchir dès le début des précipitations pour atteindre finalement sa δ_{\max} . L'excentricité détermine la vitesse, à partir du début des précipitations, avec laquelle δ_{\max} est atteint. Le diagramme illustre en outre l'accroissement de la déformation vers N_{\max} (RI) – dans l'intervalle seulement de quelques mm de précipitations (ce qui correspond à une augmentation du poids de la neige accumulée de quelques kg), l'accroissement de la flèche est considérable. Pour un même arbre, à une

excentricité plus grande correspond une RI inférieure, respectivement un N_{\max} inférieur. Le diagramme à la Fig. 96 est en principe identique aux diagrammes des Fig. 7 et Fig. 8, p.40).

6.6 Stabilité et résistance collectives

6.6.1 Simulation d'interactions statiques entre les arbres

Des interactions ont été simulées au sein de 7 couples d'arbres. Des modèles 3D de leurs lignes élastiques ont été élaborés avec succès seulement pour 2 couples (Tab. 24, p.125) – Z1&K5 et Z2&K4. Fig. 97 montre des états d'équilibre statique d'arbres en interactions.



Fig. 97 Simulation des interactions. Arbres K5 et Z1 (à gauche et au milieu) avec des charges verticales, en interactions de support bilatéral. Arbres K7 et K8 en interactions de support unilatéral/pression unilatérale (à droite)

Les résultats des simulations permettent, déjà de façon grossière, de mettre en évidence les effets selon la situation. Les interactions au sein des deux couples seront analysées en observant les déplacements horizontaux des arbres et la distance entre eux à la hauteur des ESA en fonction des charges appliquées et en fonction du type d'interactions statiques (bilatéral ou unilatéral).

- **Interactions entre tiges Z1 et K5**

A la Fig. 98 les deux axes Y représentent les positions initiales des tiges à la hauteur des ESA. La distance horizontale entre les deux tiges à cette hauteur est de 1.85m. Les deux arbres ont fléchis l'un contre l'autre dans trois positions (1, 2 et 3), correspondantes à différentes charges de K5, pour une charge constante de Z1. La Fig. 98 présente les projections (dans le plan horizontal XY) des flèches δ correspondantes sur la droite qui relie les positions initiales des tiges à la hauteur des ESA. A une charge constante de 1.99kN de la tige Z1, la charge de la tige K5 a été progressivement augmentée de 0.31kN, respectivement 1.11kN et 1.31kN. Cela conduit à modifier la position d'équilibre entre les deux tiges. La tige Z1 „recule“ tandis que K5 avance. Ainsi avec l'augmentation de la charge de K5, la distance horizontale entre les deux tiges à la hauteur des ESA diminue (1.44 m, 1.15m et 1.07m respectivement), correspondant à env. 2.8 cm par 0.01kN d'augmentation de la charge de K5. Une liaison (contact) ferme n'est apparemment pas encore réalisée, les deux houppiers continuent de s'entrelacer avec l'augmentation de la charge de K5. Les positions 2 et 4 sont directement comparables. Dans la position 4, la tige K5 fléchit librement sous une charge de 1.11kN, le support prêté par la tige Z1 étant éliminé. L'absence de voisin dans cette position conduit à un plus grand déplacement (augmentation de 0.35m de la flèche par rapport à position 2). C'est là **l'effet de freinage du voisin**. Cela conduit à des différences dans les moments extérieurs, respectivement dans les contraintes intérieures de la tige K5, donc favorables du point de vue de sa résistance dans la position 2 (avec support) que dans la position 4 (sans support). D'éventuelles corrections suite à un redressement plus exact des modèles 3D des tiges ne feraient qu'augmenter⁴⁴ toutes les distances représentées à la Fig. 98. Pour cette raison, les résultats n'ont pas seulement une valeur indicative, mais ils indiquent le seuil inférieur réel de l'effet des interactions.

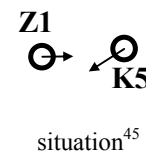
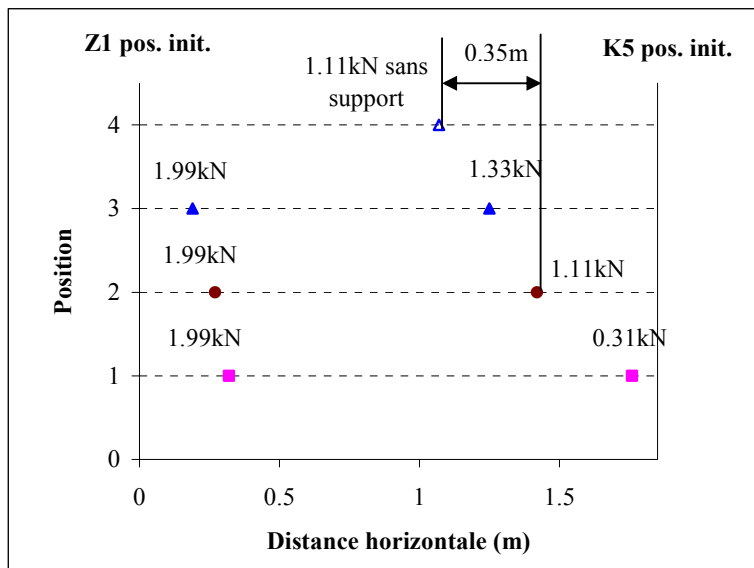


Fig. 98 Déplacements des tiges à la hauteur des ESA

⁴⁴ Du simple fait que la projection sur un plan d'un segment est de longueur maximale dans le cas où le segment est parallèle au plan. Dans tout autre cas (~un redressement imparfait du modèle 3D) la longueur de la projection est inférieure à la longueur du segment.

⁴⁵ les cercles représentent les bases des tiges et les flèches les directions du fléchissement simulé dans le plan horizontal

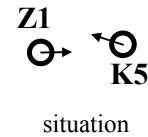
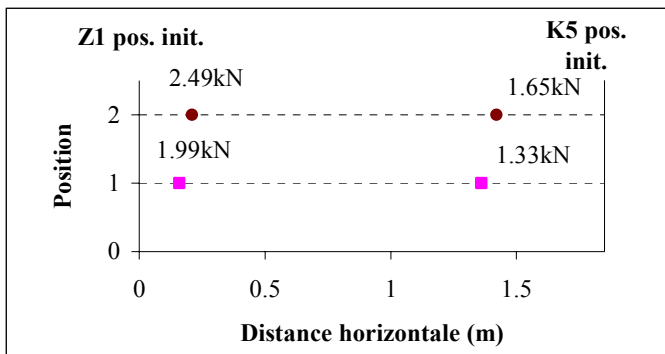


Fig. 99 Déplacements des tiges à la hauteur des ESA

La Fig. 99 montre ce qui se passe quand on augmente de 0.5kN la charge de la tige Z1 et de 0.32kN de la tige K5 (position 2 comparée avec position 1). Cela conduit à un faible déplacement positif de Z1 (car la charge augmente plus que K5) alors que K5 recule légèrement. La distance horizontale entre les tiges à la hauteur des ESA reste pratiquement constante dans les deux positions (~1.20m).

A la Fig. 100 sont présentées deux positions dans lesquelles les arbres fléchissent plus ou moins dans la même direction (l'un sur l'autre). Tandis que la charge de l'arbre K5 reste la même (1.31kN), celle de Z1 est sensiblement réduite dans la deuxième position par rapport à la première. Z1 tend à récupérer sa position initiale et fait reculer K5 par rapport à son état dans position 1. Le recul de K5 est faible – env. 0.10m. Néanmoins, il démontre que ce type principal d'interactions statique entre les arbres peut aussi être favorable à l'amélioration de la résistance de l'arbre K5. La distance horizontale entre les tiges à la hauteur des ESA diminue 0.87m contre 1.04m. Les données ne sont pas suffisantes pour estimer si dans position 2 la liaison au niveau des houppiers est déjà ferme.

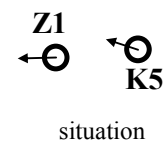
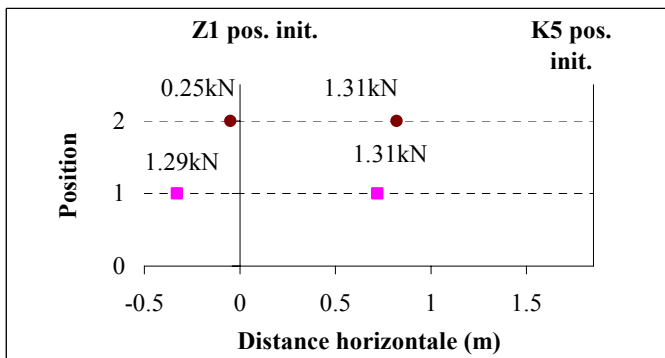


Fig. 100 Déplacements des tiges à la hauteur des ESA

- **Interactions entre tiges K4 et Z2**

La distance horizontale initiale entre les tiges à la hauteur des ESA est de 1.7m (Fig. 101). Les tiges sont fléchies une sur l'autre. Position 1 reflète les projections des flèches en fléchissement libre, sans interactions. En position 2 la tige Z2 est chargée de 1.59kN, alors que K4 est délestée à 1.76kN. Cela la fait reculer et entrer en contact avec Z2, en la faisant aussi reculer. Dans position 3, tige K4 garde sa charge et celle de Z2 est augmentée jusqu'à 2.2kN, Z2 avance, ce qui fait avancer K4 un peu. L'avancement de Z2 se fait pratiquement aux dépens de la distance entre les ESA (1.45m dans position 2 contre 1.27m dans position 3). On ne peut pas estimer si une liaison ferme entre les houppiers a été réalisée.

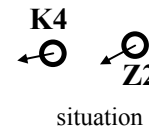
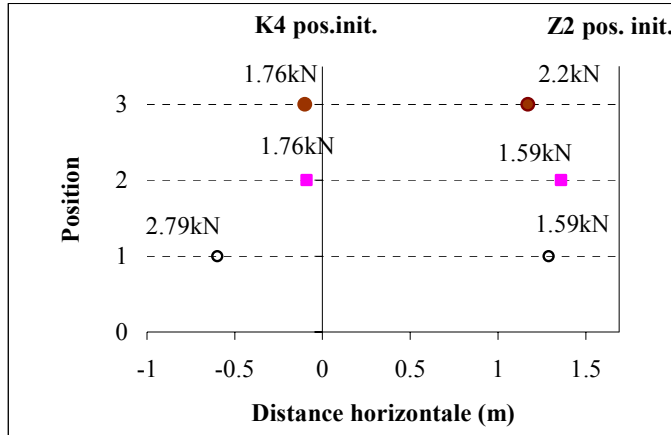


Fig. 101 Déplacements des tiges à la hauteur des ESA

Fig. 102 montre les tiges Z2 et K4 chargées l'une contre l'autre. Dans position 2 la charge de K4 augmente de 0.7kN, celle de Z2 de 0.6kN. De nouveau l'arbre chargé plus avance et celui chargé moins recule. Cette fois-ci la distance entre eux reste pratiquement constante (env. 1.03m).

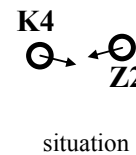
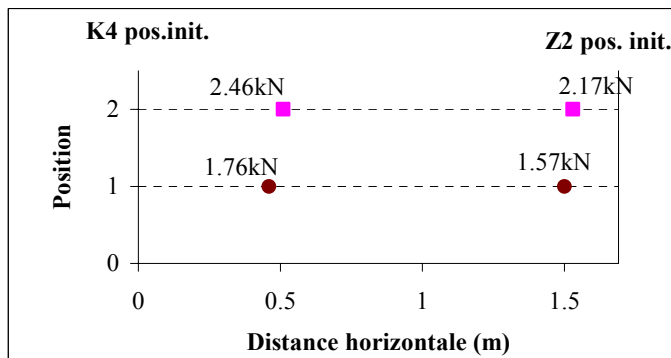


Fig. 102 Déplacements des tiges à la hauteur des ESA

- **conclusion**

Les essais de terrain montrent que :

- des arbres voisins sont en mesure d'interagir au niveau de leurs houppiers, dans le domaine élastique de déformation de leurs tiges.
- dans le cas de support bilatéral, la distance au niveau des ESA diminue avec l'augmentation des deux charges à partir du contact entre les branches et tend vers une

valeur minimale, en dessous de laquelle l'état d'équilibre du système est conditionné en quelque sorte par le rapport des deux charges.

- dans le cas de support unilatéral/pression unilatérale la distance horizontale au niveau des ESA diminue aussi. Il semble qu'elle tend aussi vers une valeur minimale, qui n'a pourtant pas été atteinte lors des essais présentés.

6.6.2 Modèles mécaniques de la SC

Pour les deux types principaux d'interactions statiques, l'effet du support sera étudié séparément par rapport à chacun des deux arbres.

- **modèle 1 - cas de support bilatéral**

Dans ce cas, par rapport à chacun des deux arbres impliqués, l'arbre voisin joue le rôle d'un support. Il suffit donc d'étudier un seul cas de figure.

- influence d'un support rigide sur la charge critique

A la Fig. 103 et à la Fig. 104 sont représentées deux situations extrêmes - sans aucun support (A) et avec un support rigide (liaison de type appui simple) (B) pour une barre encastrée de rigidité constante, respectivement de rigidité variable. Dans chaque cas, A et B sont respectivement le 1^{er} et le 3^{ème} cas connus d'Euler. Le rapport des charges critiques ($\frac{P_{cr}^B}{P_{cr}^A}$)

dans le premier cas (Fig. 103) est égal à ~8.17, c.à.d. l'appui simple conduit à une augmentation de 8 fois de la charge critique.

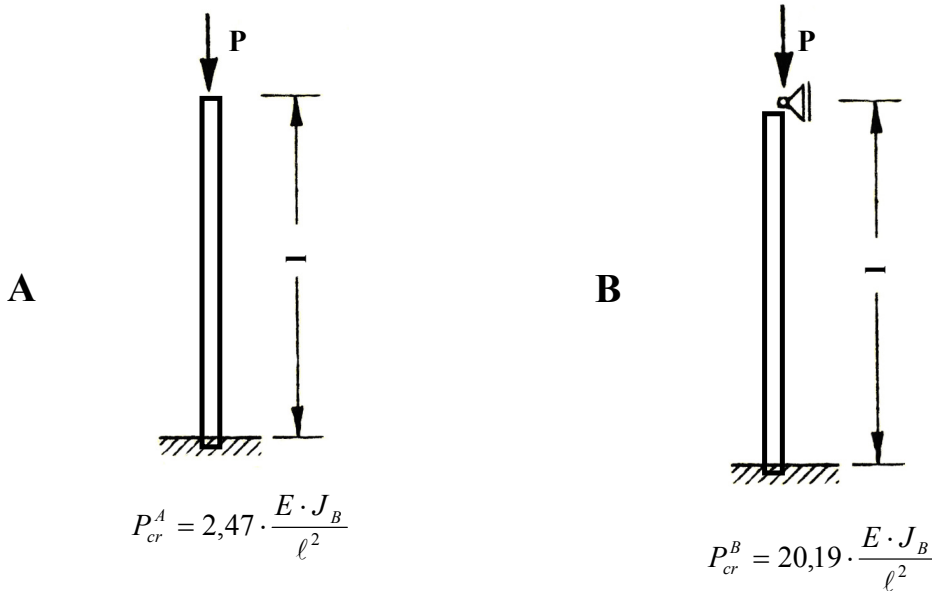


Fig. 103 Influence d'un support rigide pour une barre de rigidité constante (Bürgermeister&Steup, 1959)

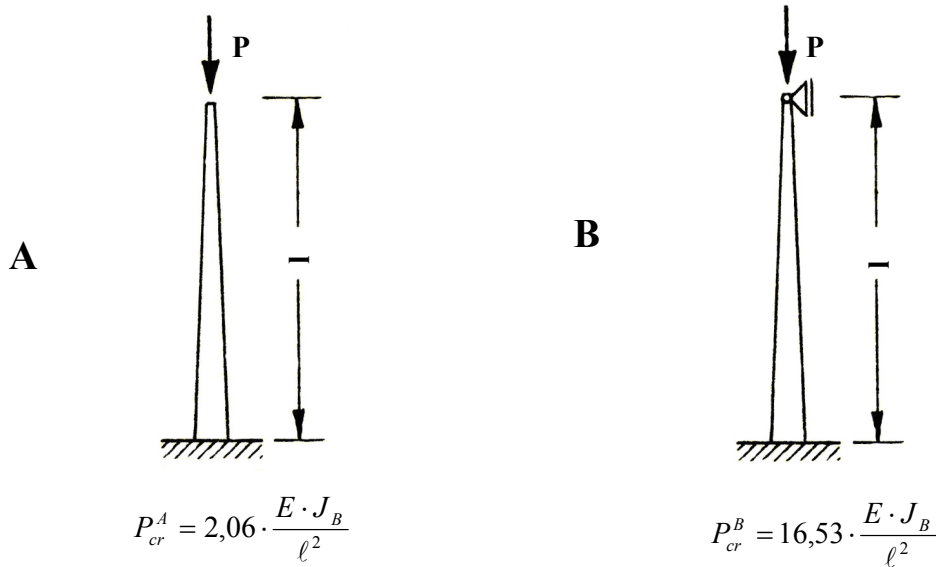


Fig. 104 Influence d'un support rigide pour une barre de rigidité variable

Dans le deuxième cas (Fig. 104) le rapport $\frac{P_{cr}^B}{P_{cr}^A}$ est **~8.02**. En l'occurrence, le moment d'inertie de la section à la base de la barre est deux fois plus grand que le moment d'inertie au bout supérieur ($J_B/J_f = 2$). La situation **B** est reprise de Bürgermeister&Steup (1959), pour la situation **A** la charge critique est calculée par la méthode numérique. Il s'agit d'un système une fois statiquement indéterminé (une fois hyperstatique). Pour pouvoir faire les calculs, il faut d'abord le transformer en un système équivalent statiquement déterminé (système de base). Ceci est possible en supprimant toutes les liaisons surabondantes (qui ne sont pas indispensables pour la stabilité du système). Les liaisons supprimées sont à remplacer par des forces (ou des moments) correspondants, de telle sorte que les efforts intérieurs et les déformations soient identiques dans les deux systèmes (Kissiov, 1978). Dans le cas concret, la liaison supprimée au bout supérieure est remplacée par une force horizontale X (cf. Fig. 106). Comme le système est une fois statiquement indéterminé, il faut résoudre une équation de déformation (Eq. 51) :

Eq. 51 $a_{11} \cdot X + a_{10} = 0$

où a_{11} et a_{10} représentent les déplacements, respectivement suite à la force qui remplace la liaison éliminée et suite aux forces et moments extérieurs. L'effort tranchant est calculé suivant Eq. 52 et la ligne élastique η_1 suivant Eq. 53:

Eq. 52 $Q = Q_0 + X \cdot Q_x$

Eq. 53 $\eta_1 = \sum Q_0 \cdot \Delta x$

La charge critique de flambage peut être déterminée de la relation $\eta_1 = \alpha \cdot \eta_0$, pour $\alpha=1$ (critère de flambage pour une section quelconque de la barre).

La différence dans l'augmentation de la charge critique avec un support rigide diminue très peu si la rigidité est variable. Chez les tiges étudiées, le rapport J_B/J_f varie entre 12 et 43.

- influence d'un support souple

Les essais de simulation d'interactions statiques entre arbres voisins chargés de façon verticale ont démontré la souplesse du support. Le support souple peut être introduit dans le modèle par un ressort positionné au bout supérieur de la barre étudiée. Il rend le système statiquement indéterminé. Dans le système équivalent la liaison simple est remplacée de nouveau par une force horizontale X (Fig. 106). L'équation de déformation qui permet de déterminer la force X doit inclure la constante du ressort c (Eq. 54):

$$\text{Eq. 54 } X = -\frac{a_{10}}{a_{11}} = -\frac{a_{10}}{a_{11}^{\text{barre}} + a_{11}^{\text{ressort}}} = -\frac{a_{10}}{a_{11}^{\text{barre}} + (1/c)}$$

La force X et la charge critique se laissent calculer simultanément par voie itérative, en améliorant par pas successifs la forme de la ligne élastique. L'efficacité des calculs numériques a été testée avec succès pour un cas connu (Fig. 105, barre encastrée de rigidité constante, comprimée et soutenue par un ressort de constante connue, Bürgermeister&Steup, 1959).

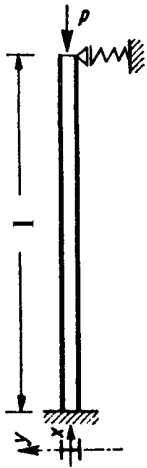
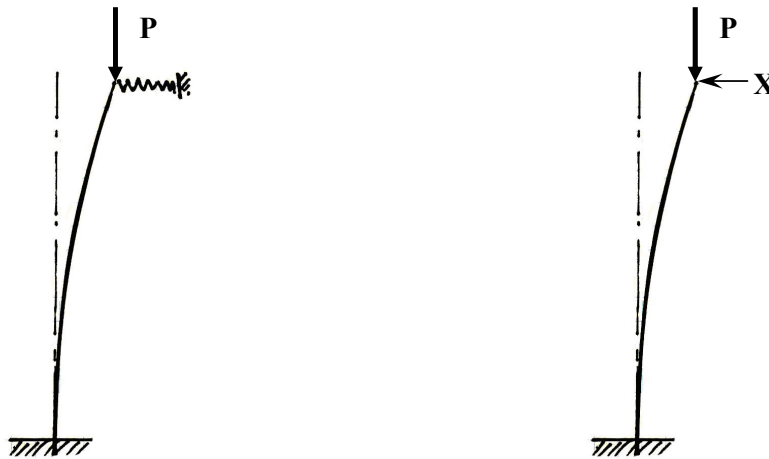


Fig. 105 Barre encastrée avec support souple (Bürgermeister&Steup, 1959)



système 1 fois statiquement indéterminé

système statiquement déterminé

Fig. 106 Système statiquement indéterminé et son système équivalent. Modèle du support bilatéral

La constante du ressort dans le modèle reste inconnue. Des essais visant la détermination de la souplesse du support, prêté par un arbre voisin n'ont pas été conduits. Cette information ne

peut pas être tirée des observations faites. L'augmentation de la charge critique dans un cas concret ne peut donc pas être estimée. Cependant, il est possible d'évaluer de façon générale le rôle d'un support souple, en étudiant l'évolution de la charge critique en fonction de la constante du ressort. Le diagramme à la Fig. 107 se rapporte à une barre de rigidité constante.

L'influence du support est présentée par le rapport $\frac{1/c}{a_{11}^{barre}}$. Pour une constante qui tend vers l'infini, le support devient parfaitement rigide (cf. Fig. 103 et Fig. 104, situation B). A l'opposé, si la constante tend vers 0, l'effet du support souple est négligeable. On peut constater à la Fig. 107 que déjà à partir de la moindre souplesse, en comparaison avec un support parfaitement rigide, la charge critique diminue brusquement et sensiblement. D'autre part, par rapport à l'état non soutenu, l'augmentation de la charge critique se produit de façon asymptotique, très faiblement au début.

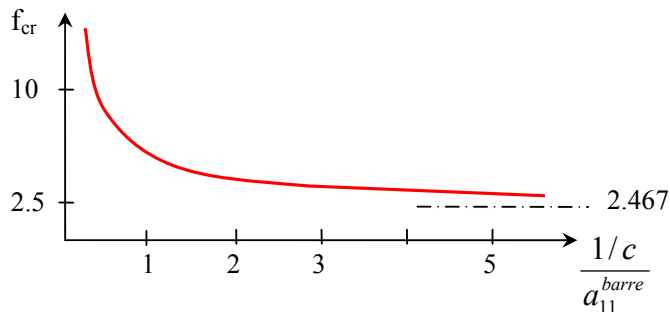


Fig. 107 Influence d'un support souple sur la charge critique de flambage

- **modèle 2 – cas de pression unilatérale/support unilatéral**

Dans le cas d'interactions unilatérales (Fig. 108), la situation pour l'arbre qui s'appuie en fléchissant sur son voisin (arbre 1, à gauche) est en effet similaire à la situation déjà présentée dans le cas d'interactions bilatérales. La stabilité de l'arbre 1 sera augmentée en fonction de la souplesse du support, prêté par arbre 2, suivant la relation montrée à la Fig. 107.

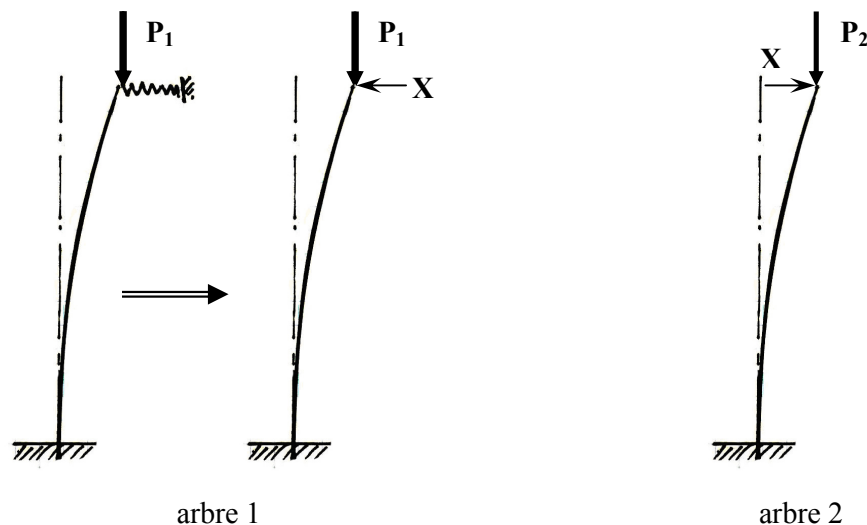
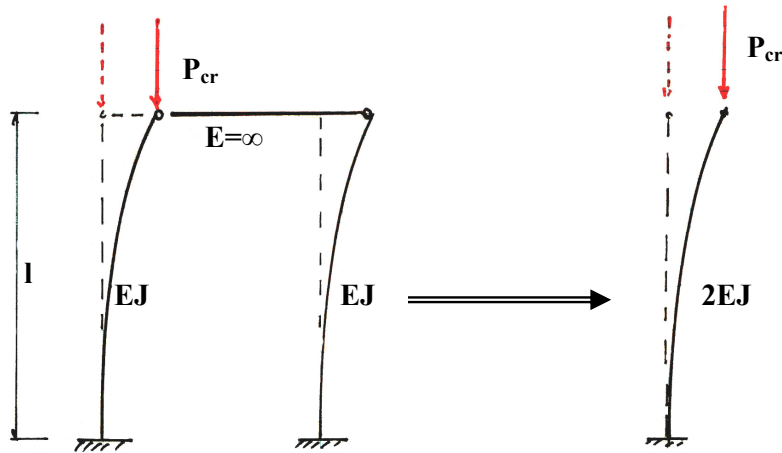


Fig. 108 Modèle du support unilatéral/pression unilatérale

Un cas connu en génie civil est celui de deux barres de rigidités (constantes) et de dimensions égales. Au cas où elles sont liées entre elles de façon rigide, elles forment un système unique

dont la charge critique est égale pratiquement à la somme des charges critiques individuelles des deux barres (Fig. 109) :



$$P_{cr} = 4,856 \cdot \frac{E \cdot J}{\ell^2}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot J}{\ell^2} = 4,935 \cdot \frac{E \cdot J}{\ell^2}$$

Fig. 109 Cas connu du génie civil – deux barres liées de façon rigide

Une telle situation serait possible entre deux arbres au sein d'un peuplement seulement si la neige les lie de façon rigide. Un tel phénomène est parfois observé en réalité quand les houppiers sont soudés l'un à l'autre sous la masse accumulée du verglas (cf. Sanzen-Baker&Nimmo, 1941) ou de la neige en partie fondue et de nouveau gelée (Rubner, 1934, in Vorreiter, 1937).

En réalité, les arbres sont de dimensions différentes et leurs houppiers ne sont probablement pas le plus souvent soudés entre eux.

- **souplesse du support**

Des essais de simulations d'interactions statiques entre deux arbres (cf. §6.6.1, p.140) il devient clair que par rapport à chaque tige, l'état d'équilibre dépend des charges appliquées, de la rigidité des deux tiges et du support que chaque tige reçoit. En effet, le support que chacune des deux tiges reçoit dépend de la rigidité de l'autre tige et de la rigidité du système des deux houppiers. Si on exprime ce support comme un ressort, la raideur de ce ressort dépend de la raideur de la tige (K_{tige}) comme un premier ressort et de la raideur du système des deux houppiers (K_{houpp}) comme un deuxième ressort.

Les observations montrent (interactions de type bilatéral) qu'à partir déjà du premier contact entre les branches, à une distance initiale d_{init} entre les tiges, un faible effet de support apparaît. Avec l'augmentation des charges, les branches s'entrelacent et les deux tiges s'approchent l'une vers l'autre jusqu'à une certaine distance minimale d_{min} . Entre d_{init} et d_{min} il y a un moment où le déplacement horizontal des tiges devient plus grand que la diminution de la distance entre elles, ce qui veut dire que les raideurs des deux tiges deviennent moins grandes que K_{houpp} . En dessous de d_{min} les tiges ne s'approchent pratiquement plus l'une vers l'autre, K_{houpp} étant trop grand et le système des deux tiges trouve un nouvel état d'équilibre en fonction seulement des charges appliquées et de leurs rigidités. K_{houpp} dépend du degré d'entrelacement des branches et évolue apparemment de façon non-linéaire entre d_{init} et d_{min} (Fig. 110) :

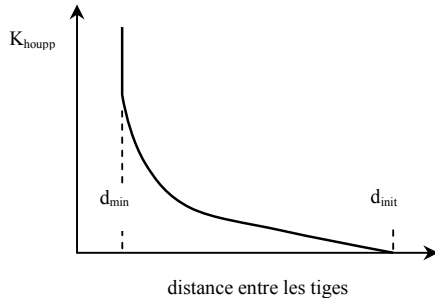


Fig. 110 Raideur du système des houppiers

Si on exprime le déplacement horizontal au niveau de l'ESA d'une des tiges avec f , il sera égal à (Eq. 55) :

$$\text{Eq. 55 } f = X \left(\frac{1}{K_{houpp}} + \frac{1}{K_{tige1}} + \frac{1}{K_{tige2}} \right), \text{ où}$$

X – force horizontale entre les deux tiges à travers les houppiers dans l'état d'équilibre

K_{tige1} – raideur de la première tige

K_{tige2} – raideur de la deuxième tige

Il paraît très difficile d'estimer K_{houpp} , en tout cas ceci est impossible sur la base des essais effectués. Néanmoins, si on admet que vers $d \rightarrow d_{min}$, $K_{houpp} \rightarrow \infty$, alors $1/K_{houpp} \rightarrow 0$ et le déplacement horizontal sera égal seulement à (Eq. 56) :

$$\text{Eq. 56 } f = X \left(\frac{1}{K_{tige1}} + \frac{1}{K_{tige2}} \right)$$

Cette simplification de la réalité rendrait possible la mise en œuvre d'un modèle de la SRC des deux arbres qui tient compte seulement des raideurs des tiges dans leurs fonctions comme ressorts, beaucoup plus faciles à estimer (en fonction de leurs rigidités EJ et des leurs charges verticales P).

Il faut tenir compte du fait que la supposition $1/K_{houpp} \rightarrow 0$ n'est vraie que si la force horizontale X dépasse une certaine valeur minimale X_{min} , à partir de laquelle d_{min} est atteinte. X_{min} peut être trouvée de façon expérimentale. Les observations montrent que lors des interactions de type bilatéral d_{min} est relativement vite atteinte, tandis que lors des interactions du type unilatéral ceci est plus difficile. Néanmoins, si $K_{tige\ devant} > K_{houpp}$, c.à.d. si la tige de devant qui sert de support de la tige de derrière est assez rigide et donc la raideur du ressort qu'elle crée est plus grande que la raideur du système des houppiers, d_{min} sera aussi atteinte. Ceci semble plus facilement réalisable surtout si $EJ_{tige\ devant} \gg EJ_{tige\ derrière}$.

6.6.3 Résistance collective

Du point de vue pratique, dans le cas des systèmes collectifs de support comme dans le cas de la SRI, la destruction se produira avant que la charge critique de flambage soit atteinte, à l'instant où la résistance du bois sera franchie. Le calcul de la RC est à nouveau un problème de second ordre où les déformations sont conditionnées par un effet amplificateur. Le calcul nécessite des données précises sur la raideur du ressort, conditionnée par la liaison entre les deux houppiers et par les rigidités des deux tiges.

6.7 Dégâts de neige lourde après l'éclaircie

Après l'éclaircie du printemps 2002, la parcelle d'étude a été maintes fois parcourue (20.05.2003; 26.12.2003; 14.03.2004; 07.01.2005; 05-11.04.2005 et 18.04.2006) pour faire des relevés des dégâts apparus durant les hivers entre 2002 et 2006. Avant de commencer l'analyse des dégâts constatés, il s'avère nécessaire de compléter la typologie classique des dégâts et d'essayer de reconstruire le processus de leur apparition.

6.7.1 Processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé

- **Typologie détaillée des dégâts**

La typologie classique des dégâts, comme déjà énoncé (3.1.1), fait la différence entre trois genres de dégâts – fléchissements, bris et déracinements. Lors des relevés de terrain cette classification a été adaptée et affinée (Tab. 31 et Fig. 111). Le terme peu convenable de „fléchissement“ qui exprime le processus de déformation⁴⁶ va être remplacé par „plastification“, qui exprime le dégât qui en résulte.

Genre de dégât	Sous-genre	Description
Plastification I	Plastification faible I-1	La courbure résiduelle suite à la déformation plastique ne se remarque que sur le tiers supérieur de la hauteur de la tige
	Plastification moyenne I-2	La courbure concerne les deux tiers de la tige à partir de la cime
	Plastification forte I-3	La tige entière reste courbée sur toute sa hauteur
Bris II	-	Cassure de la tige, dans ou en dessous du houppier
Déracinement III	Déchaussement partiel (III)	Stade initial de déracinement, la base commence à céder mais tient encore dans une certaine mesure
	Déracinement complet III	La base a complètement cédé, la tige n'est plus encastrée

Tab. 31 Typologie détaillée des dégâts de neige lourde observés

Tous les genres et sous-genres de dégâts, à l'exception de la faible plastification, rendent l'arbre concerné inutilisable pour remplir le but de production (production de bois de qualité). La faible plastification rend toutefois l'arbre plus vulnérable aux événements dangereux futurs (neige, vent).

- **Reconstitution du processus d'apparition des dégâts**

La typologie classique considère les dégâts comme des états clairement et facilement discriminables. Cette approche facilite amplement l'analyse des résultats des relevés mais dissimule le caractère réel de ces états qui représentent souvent, du point de vue mécanique, des étapes intermédiaires d'un processus de destruction continu. Quelques raisons supportent cette façon de considérer les dégâts comme un processus:

- théoriquement un même arbre peut subir tous les trois genres principaux de dégâts, avec l'augmentation continue de la quantité de la neige lourde s'accumulant sur son houppier et en fonction de l'état du sol (cf. Peltola et al., 2000).

- un arbre réellement endommagé montre parfois plusieurs genres de dégâts, ce qui indique le passage progressif d'un genre vers l'autre

⁴⁶ Comme déjà démontré (cf. 6.5.3, p. 121), le fléchissement n'est pas le seul processus de déformation de la tige sous le poids de la neige lourde, mais il y a aussi une certaine torsion

- la compréhension du processus favoriserait sa gestion et sa maîtrise

Un processus peut être observé et décrit directement. Le processus de l'apparition des dégâts, de neige lourde chez un arbre isolé a été décrit par plusieurs chercheurs (p.ex. déjà par Bühler, 1886). Dans le cas étudié, faute d'observations directes d'arbres sous charge progressive, le processus d'apparition des dégâts va être reconstitué et illustré par ses différentes étapes suivant le principe des séries diachroniques imparfaites. Il s'agit de ranger logiquement en fonction du statut mécanique plusieurs arbres endommagés de façon différente, chacun avec sa propre limite de passage d'un genre de dégât vers l'autre. Cette approche a pu être complétée et vérifiée par des arbres dont le statut mécanique a subi la même suite de changements au cours des quatre périodes hivernales d'observation. Le processus reconstitué d'apparition des dégâts et de passage d'un genre vers l'autre est représenté à la Fig. 111.

- **Analyse du processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé (Fig. 111)**

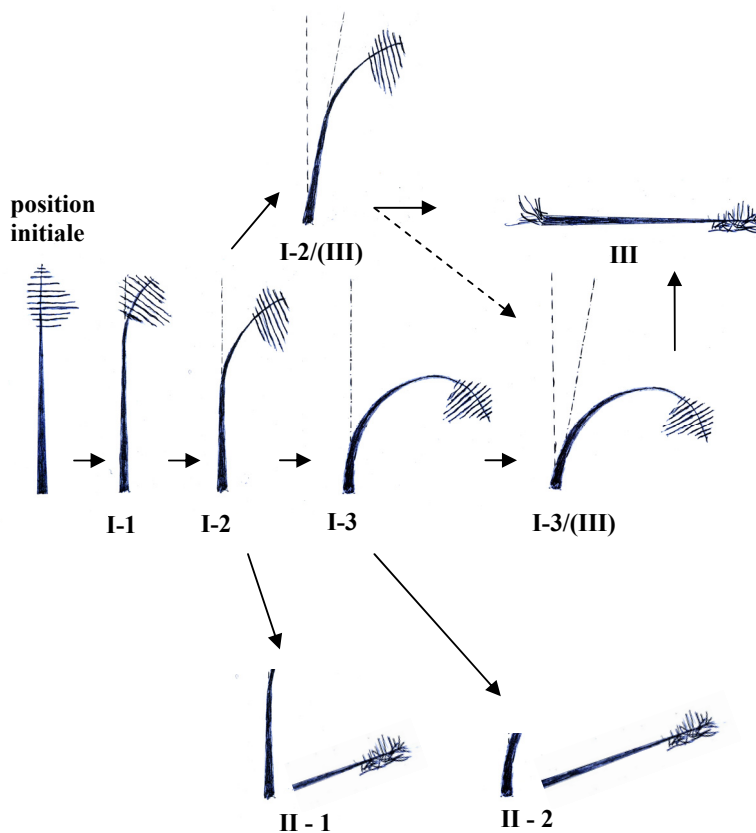


Fig. 111 Genres de dégâts et processus de leur apparition. La ligne traitillée montre la direction verticale, la ligne pointillée-traitillée montre l'axe droit (non-déformé) de la tige. L'angle entre ces deux lignes indique un déchaussement partiel.

Sous le chargement progressif de neige, un arbre isolé (quand il n'y a pas d'interactions avec des congénères) fléchit dans une direction déterminée en grande partie par le $C_{g_{houpp+neige}}$. La flèche augmente jusqu'à dépasser la limite d'élasticité dans la partie inférieure du houppier. Le premier dégât de plastification faible I-1 apparaît alors. Avec l'augmentation de la charge et/ou la diminution de la rigidité, la plastification se propage vers le bas, dans la partie centrale de la tige – plastification moyenne I-2. A partir de ce moment, trois scénarios sont possibles:

1. L'arbre continue à fléchir et la plastification se propage davantage vers le bas, atteignant le pied de l'arbre (I-3). Le fléchissement est accompagné ensuite d'un déchaussement partiel (I-3/(III)) et le processus finit par le déracinement complet (III) et l'effondrement de l'arbre
2. A l'endroit où la plastification est apparue, peu après se produit une cassure (bris de tige II). Ce genre de dégât est le moins fréquent (cf. §6.7.3). Il se place après la plastification moyenne (I-2), dans la suite d'états du processus, car d'après les mesures, l'endroit de la cassure se trouve entre 3 et 12 mètres de hauteur sur la tige, c.à.d. dans le premier ou dans le deuxième tiers à partir de la base.
3. Le déchaussement partiel apparaît simultanément avec la plastification moyenne (I-2/(III)) et le processus finit directement par le déracinement complet III, avec un passage éventuel, mais peu probable, par un état de plastification forte et déchaussement partiel I-3/(III).

Les dégâts combinés „I-2/III“ et „I-3/III“ (plastification faible ou moyenne avec déchaussement partiel) sont relativement rares (constatés seulement chez 3 et 9 arbres respectivement, soit 3.2% du nombre total d'arbres endommagés). Ceci est dû vraisemblablement au fait que ces états sont très instables et avec une faible augmentation de la charge évoluent vite vers un déracinement complet. Pour cette raison ces états intermédiaires sont classés ensuite, dans l'analyse des dégâts, comme déracinements. Ils témoignent que le fléchissement de la tige dans la zone plastique et le déracinement ont lieu simultanément. L'absence de dégâts du genre „I-1/III“ (faible plastification et déchaussement partiel) montre que la plastification est le dégât primaire et que le déracinement éventuel commence ensuite.

Le déchaussement partiel se distingue de l'inclinaison préexistante de la tige dans sa position initiale par une bande claire qui apparaît entre le pied de l'arbre et le niveau du sol. La présence de déchaussement partiel sans plastification (III, Fig. 112) se constate rarement (3 cas au total), exclusivement chez des arbres, ayant subi un coup dynamique ou une pression statique de la part d'un voisin.



Fig. 112 Déchaussement partiel sans plastification

Deux cas combinés de bris de tige et de déracinement (II/III, sans illustration), suite à un coup dynamique, ont été aussi constatés.

6.7.2 Interactions⁴⁷ entre les arbres. Effets domino. Typologie et reconstitution

- **Genres d'interactions et modes d'apparition des dégâts**

Par le terme „direction du dégât” d'un arbre endommagé on va comprendre la direction du fléchissement plastique, de la chute de l'arbre ou de la partie cassée par rapport à sa base. Les relevés des dégâts dans la parcelle d'étude ont révélé des séries d'arbres voisins, endommagés dans la plupart des cas de manière semblable (plastifiés ou déracinés), de telle sorte à ce que la direction du dégât d'un arbre correspondait bien ou déviait peu de la direction entre sa base et celle de l'arbre suivant dans la série. Ils se posent alors chaque fois les questions si le dégât est apparu sous l'action de la charge de la neige seulement ou bien si des interactions entre d'autres arbres et l'arbre endommagé ont contribué au processus. En cas d'interactions il s'agit de savoir de quel genre il s'agissait et quelles en étaient les conséquences. Les essais de simulation d'interactions ont déjà montré que les arbres voisins immédiats dans un collectif non-traité sont en mesure d'entrer en contact au niveau de leurs houppiers lors du fléchissement et d'interagir. Deux types principaux d'interactions statiques ont été identifiées et testées (Fig. 28, p.81). Les interactions simulées n'arrivaient que dans le domaine élastique de déformation des tiges. Une fois le contact établi, les deux arbres forment un système mécanique unique. Lors d'une accumulation réelle de neige, le système modifie constamment son état d'équilibre statique. Les avantages pour la stabilité du système dans le cas de support mutuel bilatéral ont été démontrés (cf. Fig. 104, Fig. 105 et Fig. 107, p. 145-147). Les deux arbres en profitent. Dans le cas de pression unilatérale/support unilatéral par contre il n'y a qu'un seul arbre qui tire profit du système pour sa SRC. Le système mécanique dans ce cas mérite d'être exploré plus à fond car il présente un désavantage pour l'arbre supporteur, en diminuant sa résistance individuelle. Faute d'expérience de terrain, on va effectuer à plusieurs reprises **une expérience de pensée**. On va essayer de s'imaginer comment le système va réagir si les deux arbres sont soumis à une charge de neige qui s'accumule lors de précipitations d'intensité constante le long de tout le processus de chargements, déformations et interactions. On admet le même processus d'apparition des dégâts chez chacun des deux arbres, selon les étapes plastification faible→plastification moyenne→déracinement (I-1→I-2→I-2(III)→III, cf. Fig. 111). On admet que les deux arbres ont les mêmes caractéristiques (forme de la tige, module E, enracinement, etc.) à la différence que l'arbre de derrière possède un houppier plus asymétrique et fléchit plus que celui de devant au fur et à mesure que la neige s'accumule (cf. Fig. 96, p.138, les arbres de $e=0.10\text{m}$ et $e=1.00\text{m}$). On admet encore qu'il n'y a pas de décharges de la neige accumulée. Dans la première expérience les deux arbres sont dans une situation typique d'un peuplement non-traité, situés très proches l'un de l'autre et avec des houppiers qui se touchent ou entre lesquels il y a de très petits interstices. Sous la charge de la neige, l'arbre de derrière va entrer en contact avec celui de devant peu après le début des précipitations. Il s'appuie sur lui et la pression qu'il exerce devrait constamment augmenter. A partir d'un certain moment la limite élastique sera franchie quelque part dans la tige de l'arbre de derrière et en peu plus tard les premiers signes de déracinement vont apparaître. Alors la pression qu'il exerce sur l'arbre de devant augmentera encore plus vite. Le processus d'apparition de dégât chez l'arbre de devant (plastification et déchaussement partiel), qu'on n'est pas en mesure, dans le cadre de cette expérience, de synchroniser avec celui de l'arbre de devant, va accélérer davantage la déstabilisation du système. Si l'arbre de devant se casse ou si sa base ne tient plus du tout, il va s'écrouler

⁴⁷ Ce travail de recherche se focalise exclusivement sur les interactions de contact direct entre les arbres à travers leurs parties aériennes (houppiers et tiges). Des interactions au niveau des systèmes racinaires de deux ou plusieurs voisins immédiats ne sont pas exclues mais n'ont pas été explorées. Elles sont estimées plutôt de moindre influence.

ensemble avec l'arbre de derrière. Le système entier va subitement s'effondrer. Il paraît impossible que l'arbre de derrière puisse rester encore sur pied, sous les conditions de l'expérience. Même si les arbres sont de caractéristiques différentes, il semble suffisant que celui de derrière fléchisse plus que celui de devant pour que les deux subissent à la fin de l'expérience un déracinement simultané.

Si on répète plusieurs fois la même expérience avec les mêmes arbres mais en augmentant chaque fois la distance entre eux, le processus de destruction du système va chaque fois se passer de façon en peu différente. Plus la distance augmente, plus il y aura de l'espace libre pour l'arbre de derrière de fléchir avant d'entrer en contact avec l'arbre de devant. A partir d'une certaine distance, l'arbre de derrière sera déjà plastifié ou plastifié et partiellement déraciné au moment du contact. Normalement, en augmentant la distance entre les arbres, à cause tout d'abord de la différence dans les asymétries et de plus après le commencement de la déformation plastique, l'arbre de derrière va toujours parcourir plus vite la distance, car la déformation (le déplacement du houppier dans le plan horizontal) s'accroît de façon non-linéaire. Pour ces raisons, plus la distance augmente, plus l'augmentation de la pression sur l'arbre de devant par l'arbre de derrière à partir du moment de contact s'accroîtra, car l'arbre de derrière résistera toujours moins. Le collapse du système entier ou la destruction de l'arbre de devant vont donc se produire toujours plus tôt, c.à.d., à un moment qui se rapproche toujours plus du début des précipitations.

A partir d'une certaine distance entre les arbres, la base de l'arbre de derrière va céder complètement juste au moment du contact⁴⁸ entre eux. Alors à ce moment l'arbre de derrière sera couché entièrement sur l'arbre de devant, en exerçant une pression statique par les poids de son houppier, de la neige accumulée et par le poids de sa tige. C'est le cas de la plus grande pression statique qui peut s'exercer dans cette expérience répétée sur l'arbre de devant.

Si on augmente encore la distance entre les arbres, au moment où la base de l'arbre de derrière a complètement cédé, cet arbre ne sera pas encore en contact avec l'arbre de devant. **C'est un moment clé, à partir duquel il ne s'agit plus d'un corps en équilibre statique mais d'un corps qui commence à effectuer un mouvement, en tombant sous l'effet de la force de gravité. Une chute libre, conditionnée par les lois dynamiques, aura lieu dans l'espace libre jusqu'au contact avec l'arbre de devant.** La vitesse de chute sera maximale au moment du contact et dépend de l'espace libre à parcourir depuis le début du mouvement jusqu'au contact. **La charge que l'arbre de derrière va exercer sur l'arbre de devant ne sera plus de nature statique (pression) mais de nature dynamique (coup)**, c.-à-d, elle va augmenter de zéro à sa valeur finale en très peu de temps⁴⁹. L'intensité de cette charge dépend de l'énergie cinétique E_k , c.à.d. de la masse du corps et du carré de sa vitesse au moment du contact ($E_k = \frac{mv^2}{2}$, cf. Kissiov 1978). Plus la distance entre les arbres augmente, plus la charge dynamique augmente. Le problème considéré n'appartient plus seulement aux domaines de la statique et de la résistance des matériaux, mais aussi au domaine de la

⁴⁸ Pour simplifier les réflexions, on admet une liaison de contact rigide. On néglige aussi la question du déplacement de la zone de contact entre les arbres en augmentant la distance entre eux ainsi que les aspects de déformations des houppiers sous la neige. On est conscient du fait que le début de la chute libre n'est pas identifiable à un moment net. Le déracinement est un processus progressif et la base de la tige ne cède pas de façon parfaitement abrupte. Il convient de parler d'un laps de temps depuis le moment où la chute libre devient inévitable mais la base montre encore une certaine résistance jusqu'au déracinement complet

⁴⁹ Il paraît très probable qu'à ce moment, à cause de la secousse et des vibrations provoquées par le coup dynamique, les houppiers des deux arbres se déchargent en grande partie de la neige accumulée, sauf si la dernière n'y est pas gelée.

dynamique, en ce qui concerne la réaction de l'arbre de devant à une charge dynamique. Dans le présent travail de recherche, il ne sera pas exploré dans sa nature.

La série d'expériences de pensée sert à identifier **deux genres possibles d'interactions entre les arbres** – **statiques** jusqu'à une certaine distance et **dynamiques** après cette distance. La même expérience de pensée, en considérant le cas où l'arbre de derrière, au lieu d'être déraciné, subit une cassure et la partie cassée porte un coup sur l'arbre de devant peut conduire aux résultats analogues. La conclusion la plus importante de cette expérience de pensée est donc que **la distance entre les arbres s'avère déterminante pour le genre d'interactions entre eux**.

Il paraît par conséquent très intéressant de savoir, dans des situations réelles, la distance à partir de laquelle s'effectue le passage entre les interactions statiques et les interactions dynamiques et d'autre part de savoir quels genres de dégâts sont favorisés par chacun des deux genres d'interactions. Ces questions seront abordées en peu plus loin (Tab. 32, p.157 et Fig. 113, p.158).

Trois modes d'apparition des dégâts peuvent donc être définis en fonction des forces extérieures qui les ont engendrés:

1. **Pas d'interactions** entre l'arbre endommagé et d'autres arbres. Le dégât est dû seulement à la neige lourde et dépend de la vulnérabilité individuelle de l'arbre en question. A noter que la neige s'accumule progressivement sur le houppier et que chaque arbre possède son propre seuil critique (exprimé par N_{max} , cf. Fig. 94, p.137) de début du processus destructif (apparition d'une faible plastification, I-1), franchi à un moment différent à partir du début des précipitations par rapport aux autres arbres.
2. Le dégât est provoqué par **l'action commune de la charge de la neige et de la pression statique**, exercée par un arbre voisin chargé.
3. Le dégât est provoqué par **l'action commune de la charge de la neige et d'un coup dynamique** de la part d'un autre arbre (par son effondrement ou par la chute libre des parties de sa tige et/ou de son houppier). Il faut donc noter l'effet simultané des deux genres de charges sur l'arbre endommagé – statique par la neige et dynamique par le coup. Les dégâts ne sont conditionnés que quand leur action est simultanée! Sinon, sans charge de neige, les arbres abattus de façon maladroitement tombent, en glissant sur les houppiers et les tiges et en passant entre les cimes des autres arbres qu'ils touchent dans leur chute ou bien restent accrochés sur les derniers, ce qui a été maintes fois observé lors de la coupe en printemps 2002. Les seuls dégâts qui résultent de ces collisions sont des branches cassées et des écorchures sur les tiges. Rarement, chez des arbres frêles touchés, il y en a eu des houppiers entiers cassés ou des tiges brisées. Des déracinements n'ont jamais été observés.

• **Principes et procédés de reconstitution des interactions**

Pour des raisons objectives, les interactions entre les arbres, comme le processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé, n'ont pas été directement observées dans la parcelle d'étude. La présence sur place d'un observateur au moment de l'accumulation de la neige est difficile à organiser et aurait pu même être dangereuse pour celui-ci. La reconstitution des interactions entre les arbres se fait donc „post-factum”, en observant sur le terrain leurs statuts mécaniques (après la chute de neige lourde en 2005, cf. §6.7.4), sans que les arbres soient plus en état

chargé⁵⁰. Les interactions se laissent donc déduire des résultats qu'elles ont en partie provoqués elles-mêmes.

En ce qui concerne les interactions statiques, le fait qu'un arbre plastifié reste appuyé sur son voisin immédiat signifie qu'il a dû incontestablement avoir exercé une pression au moment où les deux étaient chargés de neige. Même s'il n'y a plus de contact entre les arbres, si celui de derrière est moyennement plastifié (genre I-2) et celui de devant faiblement (I-1) (respectivement fortement I-3 et moyennement I-2), on peut conclure que les deux ont été en interactions en état chargé de neige.

En ce qui concerne les interactions dynamiques, selon van der Meer (1996) „It is rare to observe the actual fall of trees and/or branches and this makes it even more complicated to determine their causes. However, the mode of fall (uprooted or snapped-off) may indicate which external factor caused the tree-fall”. Cette façon de procéder comporte, certes, une certaine dose de subjectivité. Toutefois, dans la recherche d'une vraisemblance maximale avec les événements qui ont eu lieu, des indices objectifs ont été utilisés, tels la direction du dégât, des traces sur l'écorce de la tige témoignant d'un contact physique, l'ordre d'empilement des arbres gisant par terre. Il faut noter qu'on ne peut pas s'attendre à trouver des traces d'un coup si la zone de contact s'est toujours située entre les deux houppiers chargés de neige ou entre un houppier et une tige. La présence de branches cassées est un indice équivoque – elle peut être due à un coup entre les arbres mais aussi à l'effondrement par terre. Par contre, des traces évidentes (sous la forme d'une plaie) d'un coup dynamique entre deux tiges à la hauteur correspondante de leurs positions à ce moment ont pu être constatées.

L'analyse de terrain d'une série d'arbres, tous renversés vers le bas de la pente et gisant par terre, chacun en direction vers la base du suivant, est faite en partant de l'arbre, situé le plus haut sur la pente et en allant vers le bas. On admet que l'arbre, situé le plus haut, seul ou ensemble avec un voisin immédiat, a été l'arbre-initiateur d'un effet domino. Si un arbre renversé gît dans la direction vers la base⁵¹ d'un autre arbre endommagé et la hauteur du premier est supérieure à la distance entre les deux, on admet qu'il y a eu un coup dynamique exercé du premier au second, en lui portant préjudice. Il paraît peu probable qu'une chaîne composée d'une dizaine d'arbres endommagés se soit formée sans coups dynamiques dans l'autre sens, c.à.d. que l'arbre se trouvant le plus bas sur la pente soit tombé en premier, que le suivant plus haut soit ensuite tombé dans la direction de la base du premier et ainsi de suite, en montant vers la crête. La présence de quelques arbres (les derniers d'une chaîne domino, tout en bas de la pente), à demi-renversés et couchés sur d'autres arbres non-endommagés confirme en quelque sorte la plausibilité de la première hypothèse.

La reconstitution „post-factum“ ne concerne que les interactions qui ont provoqué ou qui ont coopéré au processus d'apparition de dégâts. Toutes les interactions entre les tiges qui ont eu lieu sous le poids de la neige dans le domaine élastique de leurs déformations ne se laissent

⁵⁰ Les interactions peuvent toutefois continuer après la fonte de la neige dans les cas où un arbre déraciné exerce une pression en gisant partiellement ou entièrement sur le houppier ou la tige d'un ou plusieurs autres arbres.

⁵¹ Une parfaite coïncidence des directions – celle de la chute du premier arbre et celle entre les bases des deux arbres - n'est pas indispensable. D'abord, si les arbres entrent en contact par leurs houppiers, la plus grande surface de contact permet une plus grande déviation entre les deux directions. Ensuite, pour visualiser correctement la situation, il faut se représenter les arbres en état chargé, donc fléchis. Dans l'état chargé, les houppiers sont déplacés à une certaine distance de la base des arbres. Plus les arbres sont proches l'un de l'autre, plus la direction de chute du premier arbre peut dévier de la direction définie par les pieds des deux arbres, sans que la déviation soit un obstacle pour la réussite du coup. Il faut tenir compte en plus du fait que la collision peut modifier la direction initiale d'effondrement des deux arbres en interaction

naturellement pas constater „post-factum”. Il s’agit dans le dernier cas exclusivement d’interactions statiques qui ont joué un rôle positif, exprimé par la SRC.

• **Types d’effets domino**

Dans le processus d’enchaînement et de transmissions des dégâts, deux types d’effet domino se laissent définir en fonction du genre d’interactions mécaniques entre les arbres – **effet domino statique (EDS)** et **effet domino dynamique (EDD)**. Une chaîne d’EDS représente une série d’arbres, endommagés suite au concours d’interactions statiques, l’EDD - une série d’arbres, endommagés suite à des interactions dynamiques. Lors des relevés des dégâts de neige lourde du début de l’année 2005 (§6.7.4, p.165), 40 chaînes d’effet domino et 11 cas additionnels d’interactions où seulement l’arbre de derrière a été endommagé, ont été identifiés. Pour déterminer le type d’effet domino dans chacune des 40 chaînes, il faut savoir, comme formulé tout à l’heure, la limite de passage entre les deux. Puisqu’il s’agit de plusieurs couples d’arbres de caractéristiques mécaniques différentes, il convient de parler d’un intervalle de transition entre les deux genres d’interactions au lieu d’une limite nette. Pour déterminer cet intervalle, 5 groupes de cas ont été formés en fonction de l’environnement des arbres en interactions et du genre du dégât qui apparaît (Tab. 32):

Groupes	Partie du peuplement	Description de la situation	Genre de dégât	Distance (m)
A	Dense non-traitée	Un arbre a été plastifié et s’appuie sur son voisin qui reste intact.	Une plastification	1.3 ÷ 4.2
B	Dense non-traitée	Un arbre a été plastifié et s’appuie sur son voisin aussi plastifié, mais entouré d’autres arbres intacts qui ont pu lui prêter support	Deux plastifications	1.4 ÷ 4
C	Traitée	Deux arbres, entre lesquels il y a eu un arbre enlevé en coupe , ont interagi comme dans le groupe B.	Deux plastifications	2.8 ÷ 6
D	Traitée	La situation est comme dans le groupe C, mais l’arbre de derrière a été déraciné et gît sur l’arbre de devant plastifié qui a pu bénéficier du support de ses voisins .	Déracinement (a. de derrière), plastification (a. de devant)	6 ÷ 7.3
E	Traitée	La situation est comme dans le groupe D, mais l’arbre de devant a été aussi déraciné ou cassé, sans ou avec présence de voisins de support	Déracinement ou cassures partout	3.6 ÷ 12

Tab. 32 Cas d’aide pour déterminer la limite de transition entre les interactions statiques et dynamiques

Fig. 113 présente dans chaque groupe les intervalles (min et max) de la distance entre les deux arbres en interactions ainsi que chaque cas observé. Il en ressort que dans les parties denses non-traitées, jusqu’à une distance d’env. 4m, uniquement des interactions statiques sont observées, qui peuvent provoquer (groupe B) ou ne pas provoquer (groupe A) de dégâts (seulement des plastifications) sur l’arbre de devant. Quand la distance entre les arbres augmente suite à l’enlèvement d’un arbre intermédiaire, des interactions statiques sont observées jusqu’à 6 m de distance, si la déformation de l’arbre de devant est bloquée par un support (groupe C). En augmentant la distance jusqu’à 7.30 m, l’arbre de derrière marque déjà un déracinement, s’écroule et porte un coup dynamique sur l’arbre de devant qui se voit seulement plastifié grâce au support de ses voisins (groupe D). Sans ou avec arbres de support, l’arbre de derrière et l’arbre de devant sont déracinés à partir de 3.6 jusqu’à 12 m de distance (groupe E). Il faut ici mentionner qu’en dehors des cas considérés, des coups dynamiques sont observés le long des chaînes domino jusqu’à concurrence des hauteurs totales des arbres – env. 20m.

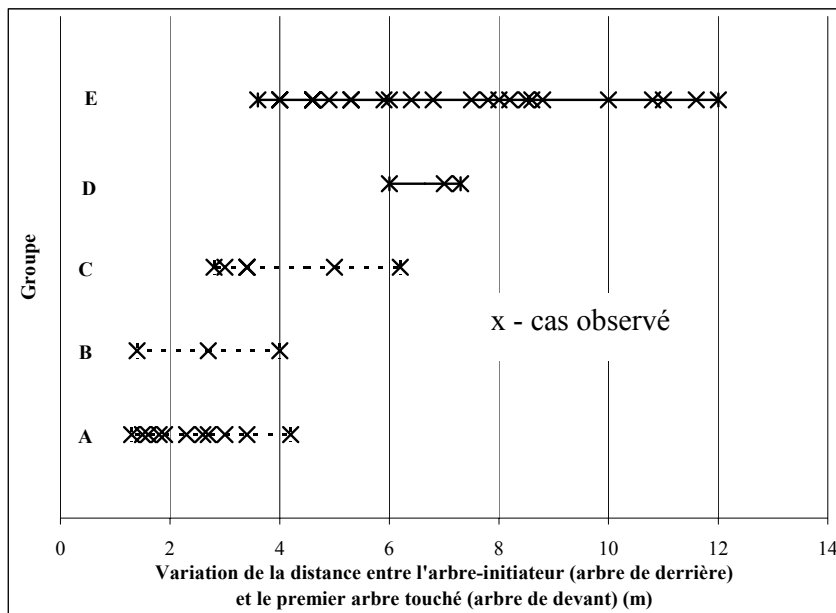


Fig. 113 Définition de la zone de passage entre les interactions statiques et les interactions dynamiques

Conclusions générales:

- Jusqu'à env. 4 m de distance entre les arbres, on n'observe que des interactions statiques entre eux (à une exception près) et à partir de 6 m – que des interactions dynamiques. **L'intervalle entre 4 et 6 m** (la zone commune entre les groupes C et E) **se dessine comme la zone de transition entre les deux genres d'interactions**, où au cas de deux arbres gisant par terre, il n'est pas possible d'affirmer s'il y a eu une pression ou un coup. L'intervalle entre 4 et 6m (différence entre groupes C et D) indique en outre la zone de déformations où se produit le déracinement.
- Par conséquent, **dans un peuplement dense non-traité**, pour autant que le couvert ait gardé son intégralité, **les interactions dynamiques sous le poids statique de la neige lourde entre les arbres s'avèrent impossibles et pratiquement exclues**. L'ouverture d'une trouée par le collapse de plusieurs arbres voisins ne peut se faire que par suite à des interactions statiques. Ce n'est que des années plus tard qu'un arbre de bordure de la trouée, dont le houppier est entretemps devenu asymétrique, peut subir une chute libre qui pourrait finir par un coup dynamique.
- Rarement jusqu'à 7.5m de distance un arbre déraciné en chute libre peut éventuellement être arrêté par un écran d'autres arbres et le coup peut être amorti sans provoquer d'autres déracinements.

Faute de données pour une analyse plus précise, on admet que si l'arbre-initiateur a été déraciné, il s'agit d'un ED dynamique (groupes D et E), sinon – d'un ED statique (groupes B et C). Ainsi est effectuée la détermination du type de l'effet domino. La mise en évidence de l'effet désastreux d'un coup sur un arbre touché justifiera en grande partie cette délimitation (cf. Fig. 127, p.171).

Les EDS et les EDD peuvent être fonctionnellement liés. Une partie des EDD commencent au début comme EDS entre deux arbres et évoluent ensuite en EDD, dans le cas où un arbre, sous la pression statique de son voisin, s'effondre sur un troisième, en lui portant préjudice. D'autre part, un EDD peut se terminer par une interaction statique (au cas où un arbre s'effondre sur un autre sans le renverser et reste couché sur celui-ci, exerçant ensuite une

pression statique) et se transformer à l'occasion d'une autre chute de neige lourde en EDS (pendant une autre période hivernale).

6.7.3 Evaluation de l'effet de la coupe sur l'apparition des dégâts

Après avoir reconstitué le processus d'apparition des dégâts chez l'arbre isolé, défini les genres, le critère de délimitation des interactions entre les arbres et les types d'effet domino en fonction des interactions, il est possible d'aborder le **but principal - évaluer l'effet de la coupe sur la déstabilisation des arbres retenus**. Il s'agit de déterminer le rôle de la coupe, si elle cause les dégâts ou si, tout au contraire, elle est une mesure préventive qui les empêche. C'est un problème très difficile qui n'a jamais été formulé correctement, à cause des aspects douteux du terme „dégât“ (cf. §3.3) en relation avec la stabilité.

• Cas de figure des effets de la coupe

Si l'enlèvement d'un arbre a des conséquences pour le statut mécanique d'un de ses voisins immédiats, on peut parler d'un **effet direct de la coupe**. Il sera étudié au sein d'un couple d'arbres 1 et 2 (cf. Fig. 28, p.81), représentés à la Fig. 114 (deuxième colonne) dans un plan horizontal par les bases de leurs tiges et par leurs directions naturelles de fléchissement.

On va faire la différence entre un état potentiel de support bilatéral, quand les deux arbres ont la tendance naturelle de fléchir l'un contre l'autre sous le poids de la neige, et un état potentiel de pression unilatérale/support unilatéral, au cas où les deux arbres fléchissent dans la même direction et celui de derrière s'appuie sur celui de devant. Il s'agit d'estimer l'effet de l'élimination en coupe d'un arbre par rapport au voisin qui reste sur pied si après l'intervention un dégât de neige lourde est constaté. L'idée est d'essayer de déduire de façon plausible de la situation après la coupe et après la neige lourde ce qui se serait passé, si la coupe n'avait pas eu lieu. On peut définir trois effets possibles de la coupe (Fig. 114) :

- effet déstabilisateur (la coupe provoque ou favorise l'apparition d'un dégât)
- effet stabilisateur (la coupe empêche l'apparition d'un dégât)
- effet neutre (la coupe n'a pas de rapport de causalité avec le dégât).

Dans un état de support mutuel bilatéral (**a1**), l'effet de la coupe peut être nettement estimé comme déstabilisateur. L'effet déstabilisateur peut être attribué aussi dans le cas où les deux arbres ne se rencontrent pas de manière parfaitement frontale, mais de côté (**a2**). Dans un couple où les deux arbres 1 et 2 fléchissent dans la même direction (**b1**, **b2**), il faut savoir si le contact entre leurs houppiers est généralement possible ou non. Au lieu d'essayer de considérer dans toute sa complexité la façon exacte dont ils se déforment (cf.6.5.7, p.137), il convient de simplifier l'analyse en réduisant la réalité en quelques cas hypothétiques. Deux situations hypothétiques paraissent possibles. Hypothèse 1 - avec l'accumulation progressive de la neige, l'arbre de derrière fléchit plus que celui de devant et à un certain moment „l'attrape“ et s'appuie de plus en plus fortement sur lui. Par conséquent, l'enlèvement de l'arbre 2 provoquerait un dégât chez arbre 1. Hypothèse 2 – l'arbre de derrière fléchit moins que celui de devant⁵². Ceci exclut le contact et les interactions statiques entre les arbres et la coupe de l'arbre 2 aurait donc un effet neutre par rapport au dégât chez arbre 1. La neutralité de la coupe peut toutefois être contestée, si le cercle d'arbres observés est élargi. Dans le peuplement dense il y a sûrement dans la direction de fléchissement de l'arbre 2 un autre

⁵² cela signifie en outre que l'arbre 1 est en général relativement individuellement plus résistant (cf.Fig. 95, p.138) qu'arbre 2 et qu'il a relativement moins besoin d'un support. Au contraire – c'est lui qui est plutôt en mesure de prêter support.

arbre voisin 3. Si l'arbre 3 fléchit dans la direction opposée (**b1**), il peut bloquer et immobiliser arbre 2, permettant à l'arbre 1 de l'atteindre et on revient ainsi à hypothèse 1, c.à.d. où de nouveau il y aurait un effet déstabilisateur de la coupe. Si par contre l'arbre 3 fléchit dans la même direction que l'arbre 2 (**b2**), il se pose de nouveau la question duquel des deux fléchit plus, pour déterminer s'il s'agit d'une interaction de support unilatéral (arbre 2 s'appuie sur 3 et se laisse éventuellement atteindre aussi par 1) ou s'il n'y a aucun contact entre eux. Sans exclure ni l'un ni l'autre il faut noter que, pour que l'hypothèse 2 de manque de contact soit toujours vraie, il faut que l'hypothèse 3 soit aussi vraie – que chaque arbre supplémentaire ajouté à la série fléchit dans la même direction et toujours plus que le précédent. L'hypothèse 3 peut sans aucun doute être tout de suite rejetée. Dans les cas de figure **b1** et **b2** on admet finalement que l'enlèvement de l'arbre 2 a favorisé l'apparition du dégât chez l'arbre 1.

Type d'interactions statiques	I.Effet direct		II.Effet indirect		Effet neutre
Support bilatéral	<p>a1</p>	<p>a2</p>	<p>d1</p>	<p>d2</p>	
Pression unilatérale/ support unilatéral	<p>b1</p>	<p>b2</p>	<p>c</p>		<p><u>Légende</u></p> <p>1&2 couple d'arbres en interaction</p> <p>1 – arbre endommagé</p> <p>2 – arbre coupé</p> <p>3 – arbre resté sur pied</p> <p>4 – arbre endommagé</p>

Fig. 114 Evaluation de l'effet de la coupe entre des voisins immédiats

Toujours dans le domaine des interactions statiques entre les arbres, on peut étudier **l'effet indirect de la coupe** (Fig. 114). Sous „effet indirect“ de la coupe on entend les conséquences de l'enlèvement d'un arbre pour d'autres arbres qui ne sont pas ses voisins immédiats. Il se laisse définir dans le cas où la coupe de l'arbre 2 déstabilise directement son voisin immédiat arbre 4 et indirectement l'arbre 1 est aussi déstabilisé. Dans un état de support bilatéral entre arbres 1 et 4, il paraît peu probable d'avoir une déstabilisation suite à la coupe de l'arbre 2 (**d1** et **d2**). Il paraît plus vraisemblable d'avoir une déstabilisation indirecte de l'arbre 1 dans un état de pression unilatérale/support unilatéral avec l'arbre 4 (**c**). Jusqu'ici on admet un effet déstabilisateur dans tous les cas de figure formulés. La coupe peut toutefois avoir un effet stabilisateur, par rapport à l'arbre 4, si l'arbre 1 est aussi enlevé (**c**). Mais ceci implique la coupe de deux arbres autour de l'arbre étudié, ce qui sort du cadre des réflexions.

Toutes ces réflexions ne concernent que des cas de figure idéaux où la majorité des arbres ont des directions naturelles de fléchissement colinéaires (sauf dans les cas a2, b2, d2). La réalité est naturellement beaucoup plus complexe mais se laisse en générale réduire aux cas définis. La prise en compte des interactions entre plusieurs voisins complique davantage l'analyse et la formulation de cas de figure semble très difficile. Il faut analyser chaque cas réel séparément (cf. Fig. 116).

L'enlèvement d'un arbre libère de la place en laissant un espace libre. Pour un arbre situé à sa bordure, l'espace libre rend possible d'une part son fléchissement dans la zone de déformations plastiques et la plus forte pression sur le voisin suivant (EDS) et d'autre part la chute libre et l'écroulement sur un autre arbre, situé plus loin dans son champ de chute (EDD). On va définir dans un tel cas le troisième effet de la coupe – un **effet déstabilisateur indirect suite à des interactions dynamiques (coup) ou statiques (pression)**.

Il y a finalement, dans les parties du peuplement restées non-traitées, des arbres qui subissent aussi des dégâts, donc sans aucune influence de la coupe. Chez une partie infime (cf. groupe B, Tab. 32 et Fig. 113, p.158) les dégâts sont provoqués par la pression statique de leurs voisins. L'enlèvement en coupe de tels arbres aurait donc un effet stabilisateur. A cause de leur nombre insignifiant (seulement 3 pour toute la parcelle d'étude), ils ne seront pas évalués à part.

Les trois effets formulés (direct; indirect avec des interactions statiques ; indirect avec des interactions dynamiques ou statiques) sont présentés dans une vue latérale du profil du peuplement à la Fig. 115. Lors de l'analyse des dégâts qui ont eu lieu dans la parcelle d'étude, chaque arbre sera classé, en fonction de l'effet de la coupe sur son statut mécanique, dans une des quatre catégories définies:

(-) Aucune influence de la coupe. L'arbre endommagé se trouve dans une partie non-traitée du peuplement.

I. Arbre déstabilisé **directement** par la coupe. Le voisin immédiat, situé du côté de la direction naturelle de fléchissement de l'arbre endommagé, a été enlevé.

II. Arbre déstabilisé **indirectement** par la coupe. Son voisin immédiat a été directement déstabilisé

III. Arbre déstabilisé **par un coup dynamique ou une pression statique** d'un arbre des deux groupes précédents ou d'un arbre déstabilisé lui aussi de cette manière (dans une chaîne domino).

Les variantes pour catégorie I (**a1**, **a2**, **b1**, **b2**) et pour catégorie II (**d1**, **d2**, **c**) seront aussi estimées.

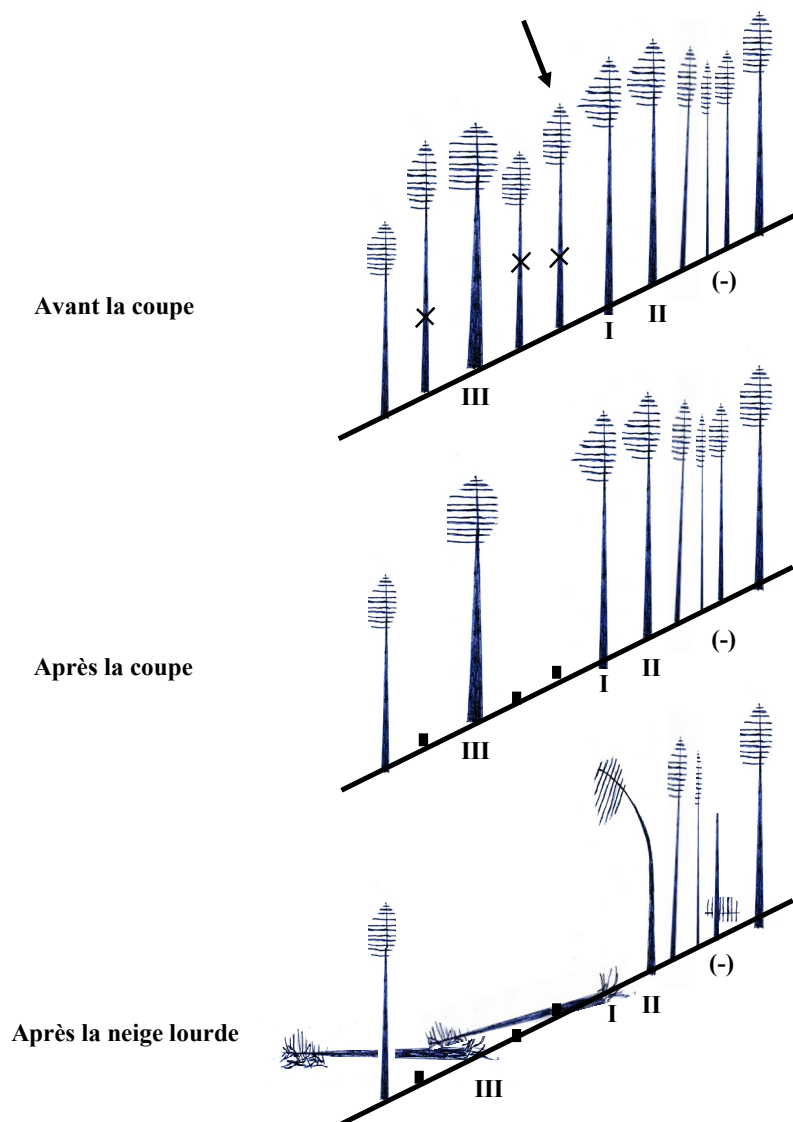
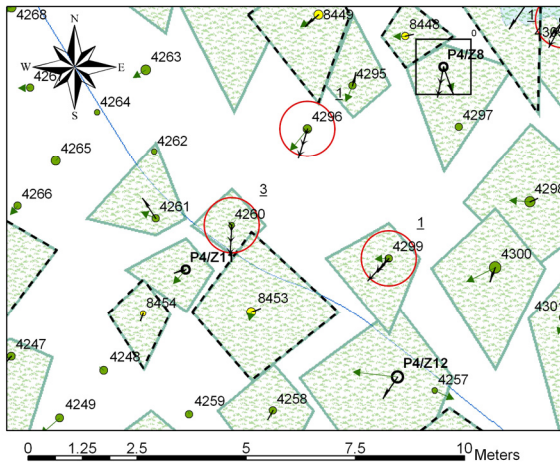


Fig. 115 Effets de la coupe d'un arbre (signalé avec la flèche) sur le statut mécanique des autres arbres

- **Exemples d'évaluation des effets de la coupe sur l'apparition des dégâts**

Chaque arbre endommagé est analysé d'abord sur le terrain. Ensuite l'analyse est complétée par l'étude (sur la carte de la parcelle d'étude) de la situation autour de lui avant la coupe. Les informations sur l'environnement (emplacement des voisins enlevés et retenus), sur les directions des VA (4 rayons, déterminés par la méthode photogrammétrique ou simulés par le modèle du VA) et sur la direction du dégât ont été utilisées pour évaluer l'effet de la coupe. Au cas où il y a une divergence notable entre les directions du VA (4 rayons) et du VA simulé, la direction du VA (4 rayons) sera prise en compte. Le procédé sera illustré par quelques exemples (Fig. 116).

Extrait de la carte du peuplement



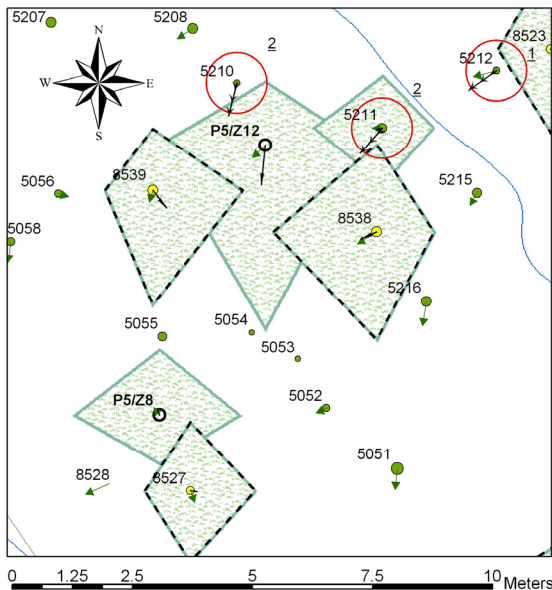
Explications

Déstabilisation locale directe due à la coupe

Arbre 8453 est un concurrent enlevé de l'arbre de place P4/Z21 (placette 4, arbre de place Z21). Son houppier a une asymétrie vers l'est, en amont ! (VA et POH 4 rayons). Les arbres de bourrage 4260, 4296 et 4299 sont directement déstabilisés (plastifications faible ou forte) par l'enlèvement de l'arbre 8453 – donc les trois sont classés dans la catégorie I. Les directions naturelles de fléchissement de 4296 et 4299 sont opposées à celle de 8453. Par conséquent, 8453 était avec 4296 et 4299 en état de support mutuel, donc cas de figure **a1**. Arbre de bourrage 4260 était en mesure de bénéficier d'un support latéral de la part de 8453 – cas de figure **a2**.

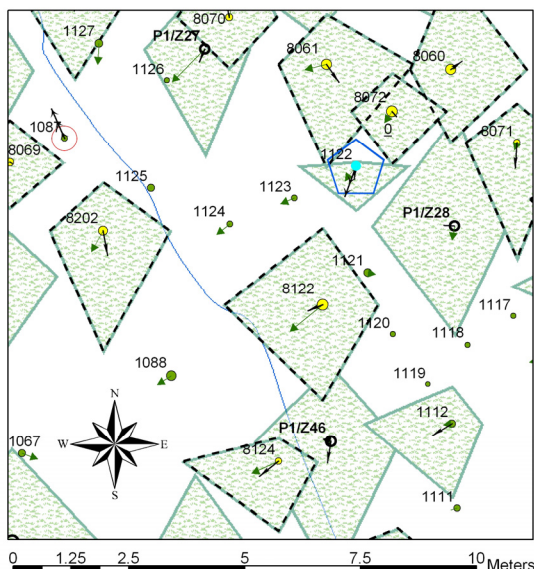
Déstabilisation directe et indirecte

L'arbre de place P5/Z12 a été libéré de ses deux concurrents 8538 et 8539. Tous avaient apparemment la tendance à former un triple groupe de support. Suite à l'enlèvement de 8538, l'arbre de bourrage 5211 (aussi concurrent de P5/Z12) a subi sous la neige une plastification moyenne. La coupe a directement provoqué le dégât – catégorie I, cas de figure **b1**. L'arbre 5212 qui avait la tendance de s'appuyer sur 5211, a subi à son tour une faible plastification, suite à la déstabilisation indirecte par la coupe – catégorie II, cas de figure **c**. L'arbre 5210 a perdu son arbre supporteur 8539 et a été moyennement plastifié, la situation est qualifiée comme déstabilisation directe – catégorie I, cas de figure **b1**.



Déstabilisation directe

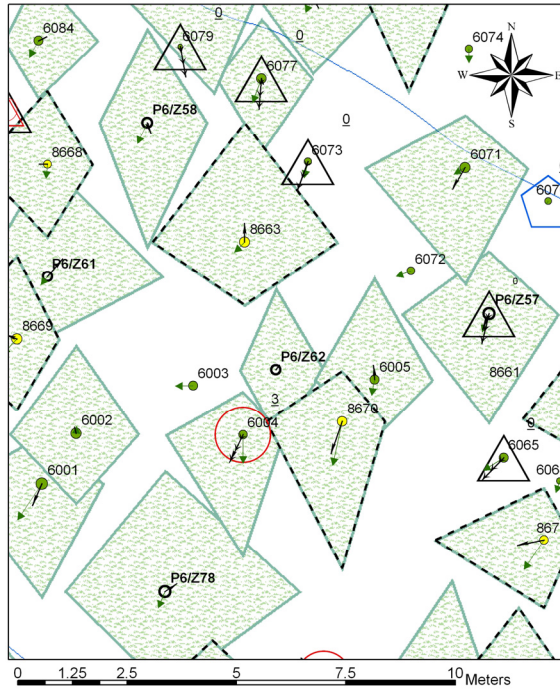
Arbre 8122 est un concurrent enlevé double (des arbres de place P1/Z46 et P1/Z28). Son voisin immédiat 1122, d'un houppier très asymétrique, s'est cassé suite à la déstabilisation directe - catégorie II. 8122 et 1122 se trouvaient en état de pression unilatérale/support unilatéral et 8122 n'était pas en état de support bilatéral avec un autre arbre, donc cas de figure **b2**.



Légende

○ Arbre de place	□ déchaussement partiel
● Arbre de bourrage	○ plastification
● Arbre enlevé	◡ bris
→ VA (4 radius du houppier)	△ déracinement
→ VA simulé	— Courbe de niveau
→ Direction du dégât	
■ Houppier (4 radius)	
■ Houppier (4 radius), arbre enlevé	

Extrait de la carte du peuplement



Explications

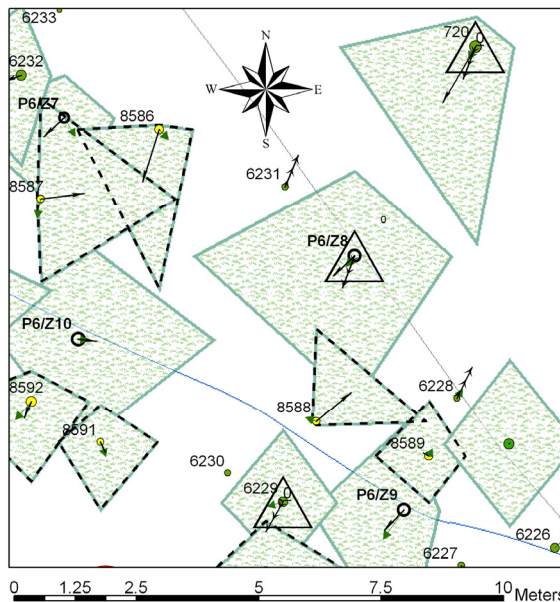
Déstabilisation directe et déclenchement d'un effet domino dynamique (EDD).

Arbre 8663 est un concurrent enlevé de l'arbre de place P6/Z58. Son houppier a une asymétrie vers le nord, en amont ! (VA et houppier 4 rayons). Les arbres 6073 et 6077 sont directement déstabilisés – catégorie I. Ils sont déracinés exactement dans les directions des VA (4 rayons et simulé chez 6077 et simulé chez 6073). Cas de figure **a1**. Dans sa chute, 6077 effectue un coup dynamique sur 6004 (catégorie III), le dernier subit une plastification forte et reste sur pied grâce à l'appui de l'arbre de place voisin P6/Z78.

Légende

○ Arbre de place	□ déchaussement partiel
● Arbre de bourrage	○ plastification
● Arbre enlevé	◡ bris
— VA (4 radius du houppier)	△ déracinement
→ VA simulé	— Courbe de niveau
→ Direction du dégât	
▨ Houppier (4 radius)	
▨ Houppier (4 radius), arbre enlevé	

Dégât de neige en 2005:



Déstabilisation directe et indirecte. Déclenchement d'un effet domino dynamique (EDD)

Arbre 8588 ($d_{1,3}$ 16cm) est un concurrent enlevé de l'arbre de place P6/Z8 ($d_{1,3}$ 24 cm). Son houppier a une asymétrie très prononcée vers nord-est, en amont ! (VA et houppier par 4 rayons) et il a eu la tendance de se supporter mutuellement avec son voisin P6/Z8. L'arbre de place P6/Z8 a été directement déstabilisé (déraciné) par la neige suite à l'enlèvement de l'arbre 8588 et probablement en partie par l'enlèvement de l'arbre 8589, qui a eu la légère tendance d'exercer une pression sur 8588. Le concours de P6/Z10 comme support n'est pas exclu. P6/Z8 est classé dans la catégorie I. La direction naturelle de fléchissement de 8588 est opposée à celle de P6/Z8, donc cas de figure **a1**. L'arbre 720 situé en dehors de la placette et derrière P6/Z8 a été aussi déraciné. Il a été individuellement vulnérable à cause de son houppier très asymétrique vers SW. Le déracinement de son voisin P6/Z8 (sûrement favorisée par sa pression) lui a frayé le passage de fléchir librement et finalement de s'écrouler. Son dégât a été indirectement provoqué par la coupe du 8588 – catégorie II. Ensemble avec P6/Z8, ils étaient en état de pression unilatérale/support unilatéral et 720 était celui de derrière – donc cas de figure **c**. L'enlèvement de 720 aurait probablement eu un effet préventif sur le statut mécanique de P6/Z8. C'est le point de départ d'un effet domino qui sera la cause des dégâts chez plus de 13 autres arbres.

Fig. 116 Analyse de l'effet de la coupe sur l'apparition des dégâts

6.7.4 Evaluation des dégâts à l'échelle de la parcelle d'étude

Les dégâts durant les deux premières périodes hivernales après l'éclaircie (2002/2003 et 2003/2004) ont été plutôt insignifiants. La troisième période 2004/2005 a été marquée par une chute de neige lourde qui a eu lieu entre janvier et mars⁵³ 2005 et a eu des conséquences notables. Les arbres endommagés représentent 10% du volume sur pied avant l'intervention (Tab. 33). Plus d'attention sera prêtée dans l'analyse à la première et surtout à la troisième période.

N	Période hivernale	Nbre d'arbres endommagés	Volume total (m ³)	% du volume avant l'intervention	% du volume après l'intervention
1	2002/2003	95	14.5	1.7	2.2
2	2003/2004	26	3.9	0.4	0.6
3	2004/2005	373	86.7	9.9	13.2
4	2005/2006	0	0	0	0
	Total	494	105.1	12.0	16.0

Tab. 33 Caractéristiques générales des dégâts lors de quatre périodes hivernales d'observation

- **Evaluation des dégâts en fonction de leur genre**

En général, des bris de branches n'ont pas été constatés. Vraisemblablement une grande partie des plastifications très faibles n'ont pas pu être détectées à l'œil nu lors des relevés (cf. Annexe 1, p.209).

La quasi-totalité des dégâts de la première période après la coupe (2002/2003) sont des plastifications de différents degrés (90% du nombre et 88% du volume total) (Fig. 117 et Fig. 118). La situation est identique après la deuxième période (92% de plastifications, pas de figure).

⁵³ Il n'y a pas d'informations précises ni sur la période de chute de neige lourde ni sur la quantité des précipitations. Les collègues de l'arrondissement forestier de Godetch ont témoigné d'une accumulation d'env. 50cm de neige. Selon Panayotov (2006), l'hiver 2004/2005 était marqué par des précipitations exceptionnelles. Au mois de janvier 2005, à la station météorologique de Mussala (2925m), la plus grande quantité de précipitations mensuelles depuis 1966 a été enregistrée. La station météorologique la plus proche de la parcelle d'étude est celle de Dragoman (42°93'N, 22°93'E), située à 16km à SW et à 727m d'altitude (200 m plus bas que la parcelle d'étude). L'analyse des conditions météo (allure de la température et vitesse du vent) à Dragoman à la base des données trouvées sur Internet a fait ressortir la période entre le 24 et le 29 janvier 2005 comme la plus probable. Selon Panayotov (comm. pers.), la source des données météo (www.wunderground.com) est assez fiable en ce qui concerne l'allure de la température mais pas du tout en ce qui concerne la quantité des précipitations.

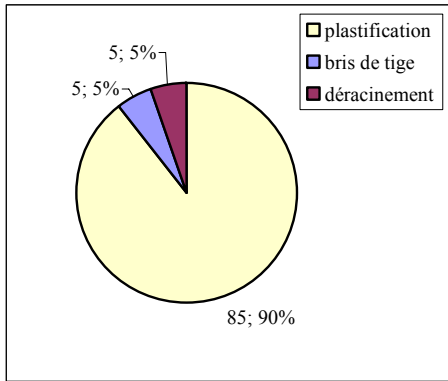


Fig. 117 Proportion des différents genres de dégâts (nombre d'arbres endommagés), hiver 2002/2003

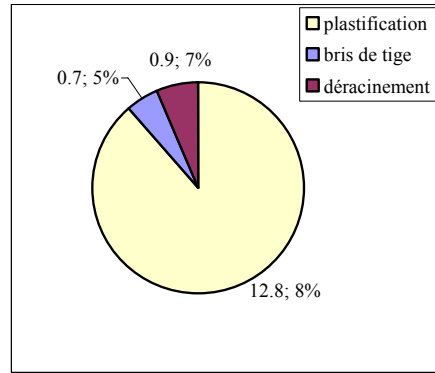


Fig. 118 Proportion des différents genres de dégâts (volume des arbres endommagés en m³), hiver 02/03

Les arbres endommagés sont de très faibles dimensions (en dessous du diamètre moyen). (Fig. 119). La neige a eu un effet de très faible éclaircie naturelle par le bas. Les dégâts de cette période ne seront pas analysés plus en détails, car ils n'ont aucune importance.

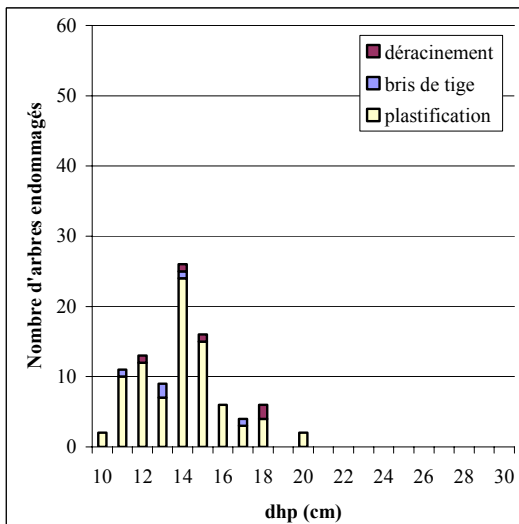


Fig. 119 Répartition par diamètres des différents genres de dégâts (période 1, hiver 2002/2003)

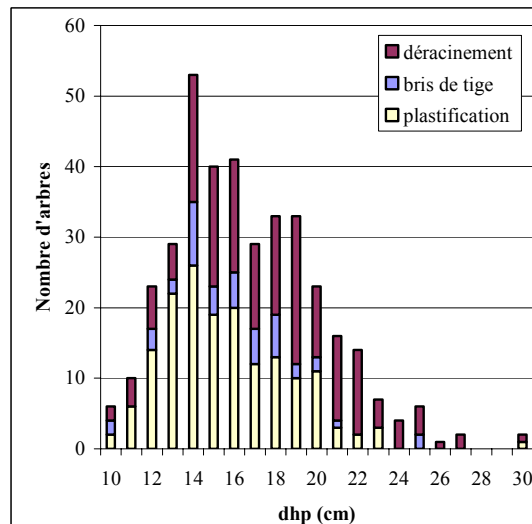


Fig. 120 Répartition par diamètres des différents genres de dégâts (période 3, hiver 2004/2005)

Pendant la troisième période hivernale (2004/2005) au total 373 arbres ont subi des dégâts. Ils sont répartis dans toutes les catégories de diamètre (Fig. 120). Les plastifications (dont un quart de faible degré) et les déracinements prédominent (~85%), il y a très peu de cassures (Fig. 121). Les arbres déracinés égalent en nombre ceux qui ont été plastifiés (44%), mais leur volume fait plus de la moitié des dégâts contre 38% des plastifiés (Fig. 122). La raison en est que la plastification concerne surtout les faibles diamètres et le déracinement – surtout les gros (Fig. 120). Il semble que les gros arbres ont une tendance à être plutôt déracinés que plastifiés. En effet, comme montre Fig. 123, les arbres qui ont subi une plastification sans la pression statique ou le coup dynamique d'un autre arbre sont en majorité d'un diamètre inférieur au diamètre moyen du peuplement. Les gros arbres marquent surtout de faibles plastifications et jamais de plastifications fortes. C'est le coup dynamique subi qui est à l'origine du déracinement de la plupart des gros arbres, ce qui sera mis en évidence en peu plus loin (cf. Fig. 125).

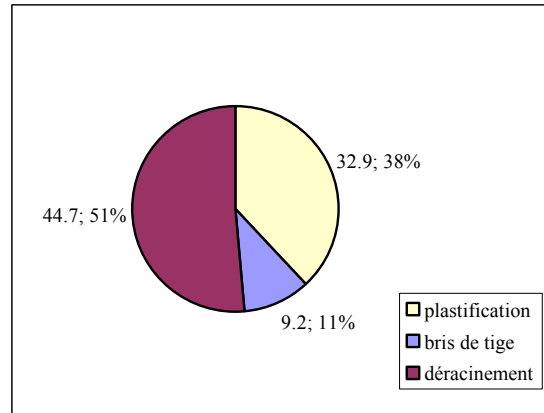
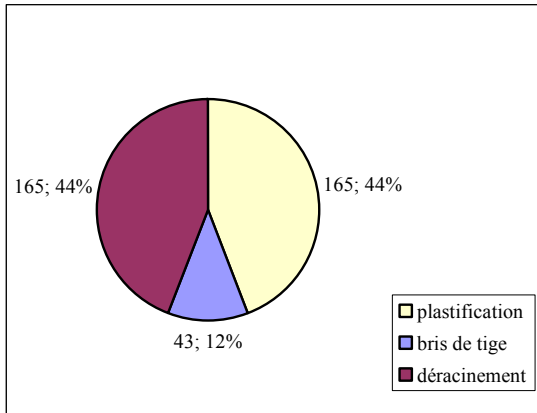


Fig. 121 Proportion des différents genres de dégâts (nombre d'arbres endommagés), hiver 04/05

Fig. 122 Proportion des différents genres de dégâts (volume des arbres endommagés en m³), hiver 04/05

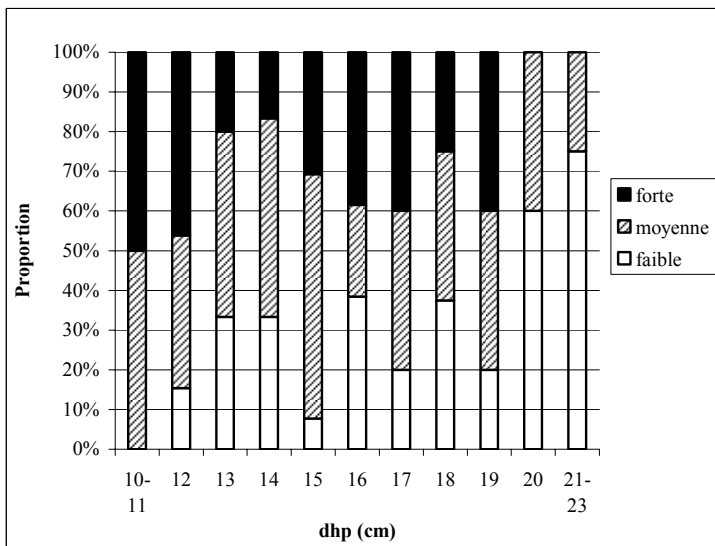


Fig. 123 Répartition par catégories de diamètres des différents degrés de plastification (sans coup dynamique ou pression)

- **Evaluation de l'effet de la coupe**

Une première analyse visuelle du peuplement d'étude (cf. Fig. 21, p.71) montre que les dégâts sont apparus exclusivement dans la parcelle d'étude traitée ou dehors d'elle, dans les parties où une coupe illégale des plus gros arbres a eu lieu⁵⁴. Les arbres endommagés sont situés à l'intérieur ou juste à la bordure extérieure du dispositif expérimental (cf. Annexe 6).

La répartition par catégories de diamètre des catégories d'arbres endommagés en fonction de l'effet de la coupe est représentée à la Fig. 124 et les résultats généralisés sont représentés au Tab. 34.

⁵⁴ cet endroit est indiqué sur l'image satellite (Fig. 21, p.71) avec le chiffre 2

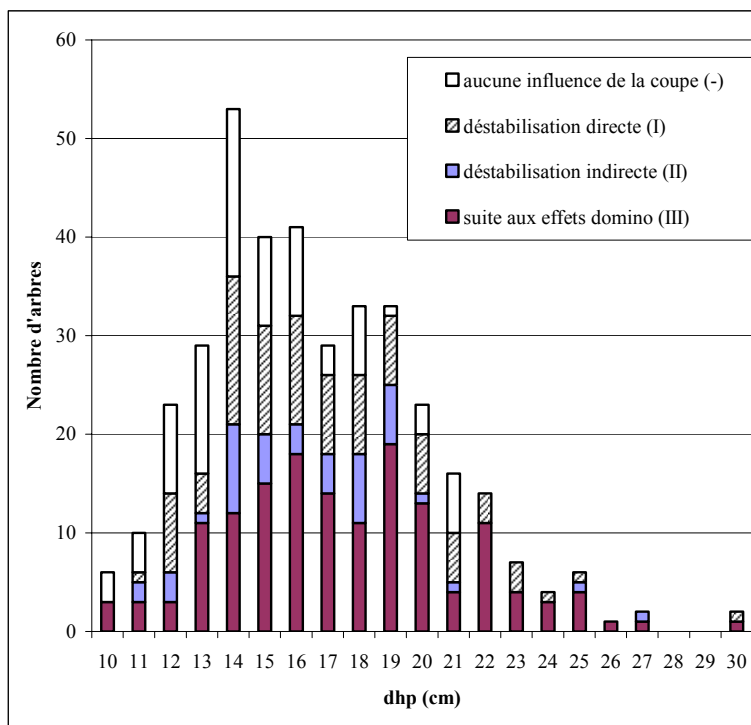


Fig. 124 Répartition des arbres endommagés en fonction de l'effet de la coupe

Catégorie	Nbre d'arbres	%	
(-)	85	23	23
I	93	25	77
II	44	12	
III	151	40	
Total	373	100	100

Tab. 34 Proportions des différentes catégories en fonction de l'effet de la coupe

Il en ressort que **la coupe a provoqué**, directement (catégorie I) ou indirectement (catégories II et III) **le dégât chez 77% des arbres endommagés**, leur volume représentant **83% (72m³) du volume total des dégâts**.

A la Fig. 125 les proportions des catégories d'effet de la coupe sont représentées par catégories de diamètre. Les plus gros arbres ($d_{1,3} \geq 25\text{cm}$) sont mis ensemble à cause de leur petit nombre. Les arbres des parties non-traitées, qui ont subi un dégât sans aucune influence de la coupe, font la majorité des plus petites catégories de diamètre et leur proportion diminue vers les grandes dimensions, où à la fin ils font défaut. Ils ne représentent rien d'autre que la mortalité naturelle. La tendance opposée se dessine pour les arbres, victimes directes ou indirectes d'un effet domino (III). A partir à peu près du diamètre moyen (20cm), leur proportion dans les catégories de diamètres dépasse 50%. C'est la partie importante du peuplement où sont sélectionnés les arbres de place. L'effet domino représente donc le danger principal pour leur statut mécanique. Les plus gros arbres restent pratiquement hors de danger dans les parties denses et non-traitées du peuplement, mais la coupe ou la déstabilisation d'un voisin immédiat situé du côté de l'asymétrie de leur houppier peuvent les rendre eux aussi vulnérables au poids de la neige lourde.

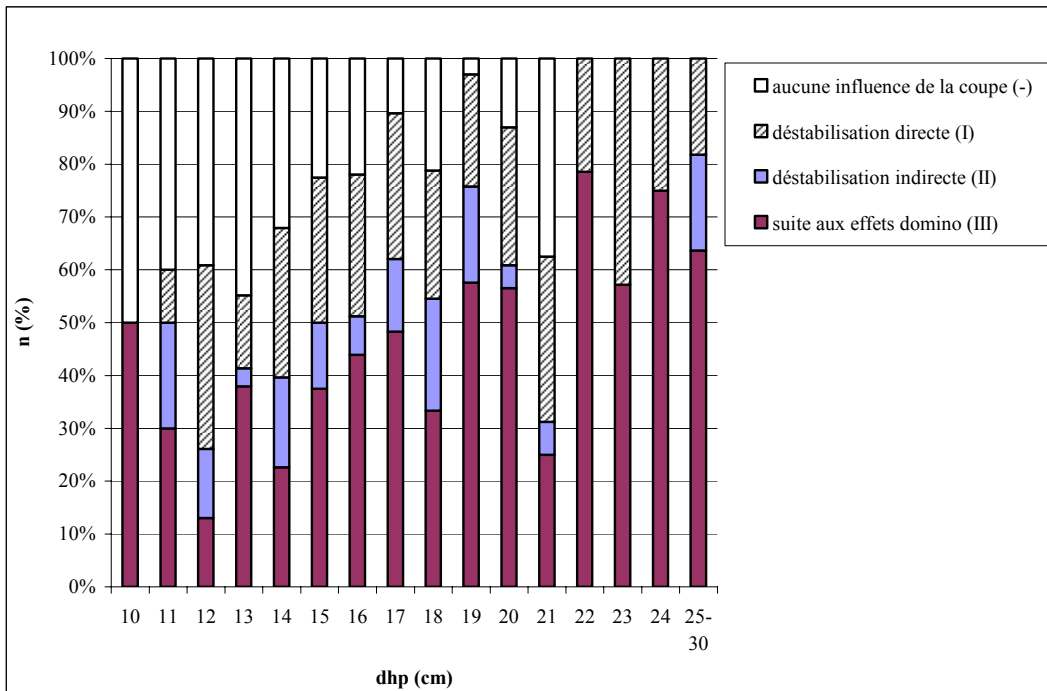


Fig. 125 Répartition par catégories de diamètre des proportions d'arbres endommagés en fonction de l'effet de la coupe

L'évaluation de l'effet de l'enlèvement d'un arbre sur le statut mécanique de son voisin immédiat est présentée à la Fig. 126. Parmi les 93 arbres analysés (toute la catégorie I), le cas de figure **a1** est le moins fréquent, ce qui s'explique par la petite proportion d'arbres avec une asymétrie en haut de la pente (cf. Fig. 53, p.109 et Fig. 64, p.117).

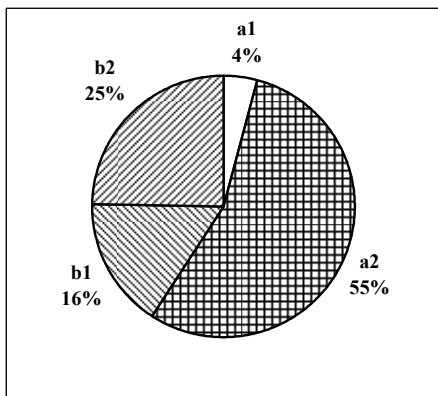


Fig. 126 Evaluation de l'effet direct de la coupe (I)

Le cas de figure **a2** par contre est le plus fréquent. C'est le cas de support mutuel entre deux arbres qui fléchissent de manière latérale l'un contre l'autre. Le fait que plus de la moitié des arbres directement déstabilisés ont été dans un tel état de support avec leurs voisins enlevés montre clairement l'importance de cette variante d'interactions statiques entre les arbres pour leur SRC. Le cas de figure **b2** où le support unilatéral est le plus contestable ne représente qu'un quart de tous les cas évalués.

L'analyse des cas de déstabilisation indirecte par la coupe (les 44 arbres de la catégorie II) fait ressortir un seul cas de figure **d2**, le reste étant des cas de figure **c**. Finalement, les arbres indirectement déstabilisés font pratiquement la moitié des arbres directement déstabilisés. Un

arbre peut donc assez souvent prêter support non seulement à son voisin immédiat, mais aussi indirectement à d'autres arbres qui ont la tendance à pencher dans sa direction. **Ce fait démontre la complexité des interactions statiques qui ont lieu dans un peuplement dense.**

Lors de l'analyse des situations dans seulement 15% des cas la détermination du cas de figure était entaché d'une grande dose d'incertitude, notamment dans les cas où ils manquaient des données sur l'asymétrie des houppiers, estimée sur la base de 4 rayons ; l'asymétrie, exprimée par le VA simulé, déviait beaucoup de la direction du dégât et il y avait plus d'un arbre voisin coupé autour de l'arbre étudié. On estime toutefois que ce petit pourcentage ne met pas en doute la plausibilité des résultats.

• Evaluation des effets domino

Des 373 arbres endommagés, 226 (61%) ont participé dans les chaînes comme arbres-initiateurs, arbres directement ou indirectement endommagés. Les caractéristiques abrégées des 40 chaînes d'effet domino constatées dans la parcelle d'étude sont présentées au Tab. 35. Tous les arbres-initiateurs se trouvent dans les confins des placettes, sauf dans un cas où l'arbre est à la bordure de la parcelle d'étude et a été directement déstabilisé par la coupe. Un seul EDD est partagé entre deux placettes (initié dans P4 et pénétré dans P5). Les chaînes sont en général parallèles à la pente, avec des déviations de l'ordre de $\pm 60^\circ$ (cf. Annexe 6).

Caractéristique	EDS	EDD	Total
Nombre de chaînes (dont initiées par la coupe)	10 (7)	30 (30)	40 (37)
Nombre d'arbres impliqués, y compris les arbres-initiateurs et les arbres indirectement déstabilisés	25	201	226
Longueur totale des chaînes (m)	50	460	510
Nombre d'arbres dans une chaîne	2÷3	2÷25	-
Longueur d'une chaîne (m)	1.5÷7.5	4.6÷31	-

Tab. 35 Caractéristiques des effets domino

Il est intéressant d'analyser la façon dont les chaînes se sont développées (Tab. 36).

Proportion des chaînes qui ...	EDS (%)	EDD (%)
... s'arrêtent au sein de la placette où elles sont initiées	100	53
... quittent les placettes où elles sont initiées ou bien s'arrêtent à la bordure	0	47
... sont arrêtées par un arbre stable ou par un groupe d'arbres voisins	80	23
... s'arrêtent dans un espace libre	20	20
... quittent les placettes et endommagent des arbres extérieurs	0	57
... marquent des bifurcations	0	27

Tab. 36 Développement des chaînes domino

En résumé, les EDS sont trois fois moins nombreux que les EDD, ils concernent moins d'arbres endommagés à un moindre degré, la longueur de leurs chaînes ne dépasse pas 9m en occurrence, elles ne font pas de bifurcations et s'arrêtent toutes aux confins des placettes. Les EDD par contre concernent plusieurs arbres, leurs chaînes atteignent une grande longueur en traversant parfois toute la placette et marquent des bifurcations. Une fois déclenchées, la moitié d'elles ne s'arrêtent pas.

Le coup dynamique provoque dans la majorité des cas un dégât grave comme déracinement (68%) ou cassure (11%). Etant donné que le reste représente presque exclusivement des

plastifications moyennes ou fortes, il en résulte que dans plus de 99% des cas le coup dynamique provoque un dégât total (Fig. 127).

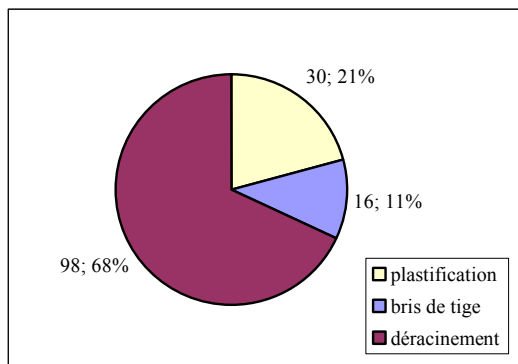


Fig. 127 Dégât provoqué par un coup dynamique sur l'arbre touché

Le rapport „longueur d'une chaîne/nombre d'arbres endommagés qu'elle comprend“ paraît convenable pour évaluer le développement d'une chaîne et pour comparer les chaînes entre elles (Fig. 128). Ce rapport exprime en effet l'intensité destructive d'une chaîne et sera nommé **indice d'intensité de la chaîne d'EDD**. Pour les chaînes qui contiennent au moins 3 arbres, cet indice est de 2.3m en moyenne et varie entre 0.8 et 4 m par arbre endommagé. Comme il vient d'être démontré, jusqu'à 4 m de distance entre des arbres voisins des interactions dynamiques ne peuvent pas s'effectuer et un EDD ne peut donc pas se déclencher. L'indice d'intensité montre cependant qu'une fois déclenchée, **la chaîne d'EDD peut se développer avec des distances entre les arbres, inférieures à 4 m**, ce qui illustre la force destructive des coups dynamiques. A noter que les valeurs calculées de l'indice d'intensité ne se rapportent que pour les chaînes qui ne marquent pas de bifurcations (pour que l'indice soit représentatif pour la conclusion qui vient d'être faite) .

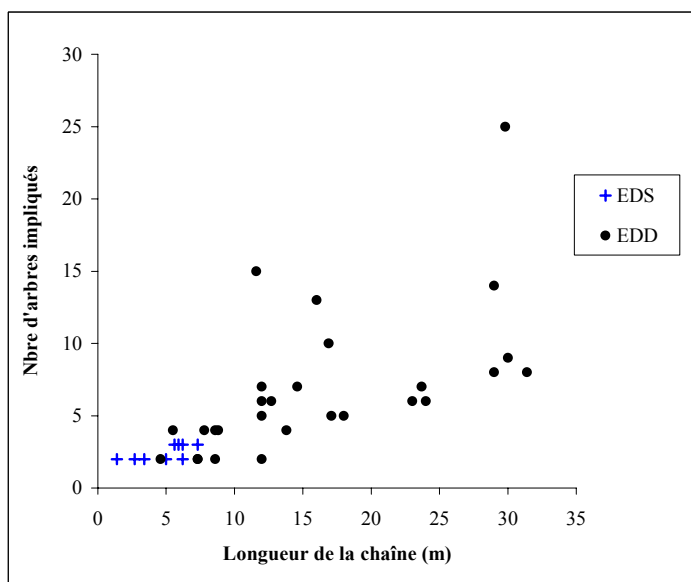


Fig. 128 Nombre d'arbres dans une chaîne domino en fonction de sa longueur

Les EDD semblent avoir encore une caractéristique très importante – l'augmentation exponentielle du nombre d'arbres endommagés. Cette tendance se laisse en partie détecter chez certaines chaînes à la Fig. 128. La transformation des chaînes d'EDD en une avalanche qui balaye, à partir d'une certaine longueur, pratiquement tous les arbres, est

vraisemblablement favorisée par l'apparition le long de la pente de nouveaux arbres-initiateurs qui donnent naissance à des nouvelles chaînes d'EDD. La carte des dégâts de la placette 6 (cf. Annexe 6) illustre en partie cette tendance, où la moitié des arbres-initiateurs sont situés à l'intérieur de la placette. La parcelle d'étude ne donne pas assez d'exemples pour faire une conclusion définitive. Cependant, l'effet d'avalanche a été observé dans d'autres peuplements (d'ailleurs eux aussi récemment éclaircis) de la région de Godetch (43°0'26.00" N, 23°4'44.00" E), qui ont aussi souffert sous la même neige lourde. Le développement des chaînes domino y a réellement conduit, à partir d'une certaine distance des premiers arbres-initiateurs, à la destruction massive et même quasi-totale des parties sous-jacentes des peuplements. La structure de ses peuplements endommagés est tellement caractéristique, qu'ils se laissent facilement détecter sur des photos satellites.

Fig. 129 présente la répartition des arbres-initiateurs par catégories de diamètres. L'EDD semble avoir été initié par des arbres plus gros (d'un diamètre moyen de 18.6 ± 3.4 cm contre 14.9 ± 2.8 cm pour les chaînes de l'EDS), mais il faut aussi noter que les arbres-initiateurs d'EDD sont pratiquement de toutes les catégories de diamètre. L'étude sur les relations entre les dimensions des arbres-initiateurs et l'ampleur des dégâts semble intéressante mais ne fera pas l'objet du présent travail de recherche.

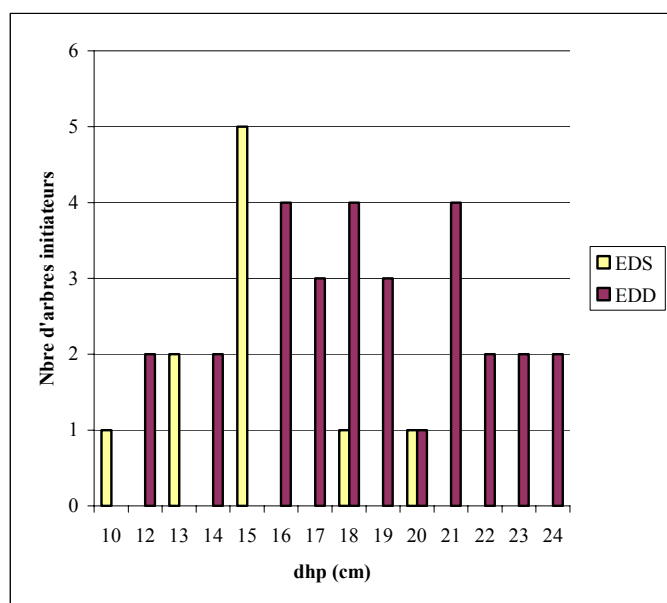


Fig. 129 Répartition par catégories de diamètres des arbres-initiateurs d'effet domino

En conclusion (pour l'effet domino dynamique):

1. L'EDD est un événement très dangereux pour la survie mécanique des arbres. Doté d'une énorme force destructive, il menace l'ensemble d'un peuplement. Une fois déclenché, un EDD s'arrête rarement et a la tendance de se transformer, sous certaines conditions, en une avalanche d'arbres qui tombent et qui renversent tout dans leurs champs de chute. Même les plus gros arbres du peuplement ne sont pas épargnés.
2. Le dégât provoqué par un coup dynamique est un dégât total
3. A l'origine d'un EDD sont exclusivement des arbres-initiateurs, déstabilisés par la coupe.
4. Le coup dynamique est en mesure de renverser les arbres dans des directions très différentes de leurs directions naturelles de fléchissement

6.7.5 Evaluation des dégâts à l'échelle des placettes

• Comparaison du taux des dégâts pendant des périodes hivernales diverses

Le taux des dégâts par placettes pour les deux périodes hivernales où il y a eu le plus de dégâts (2002/2003 et 2004/2005) est présenté à la Fig. 130. L'ordonnée gauche reflète les valeurs pour la première période et l'ordonnée droite celles pour la deuxième période. On constate que les placettes 5 et 6 sont toujours les plus endommagées, en moyenne deux à trois fois plus que les autres. Les rapports pendant les deux périodes montrent que dans placettes NN 3, 4, 5 et 6 les dégâts sont 4.5 à 7 fois plus grands, dans la placette N1 seulement 2 fois. La grande exception est placette N2, où les dégâts ont augmenté de 30 fois, due à deux chaînes d'EDD qui se sont produites dans un coin de la placette (cf. Annexe 6). Si on néglige leur influence sur les résultats, on peut constater que les placettes accusent pratiquement la même vulnérabilité lors des deux cas d'accumulation de neige de quantité différente (Fig. 131).

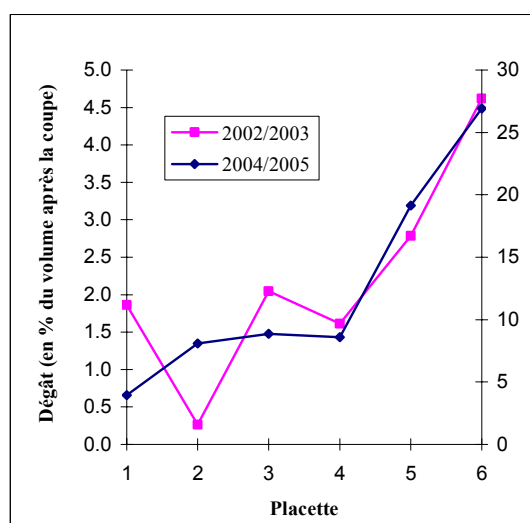


Fig. 130 Taux des dégâts par placettes pour deux périodes hivernales

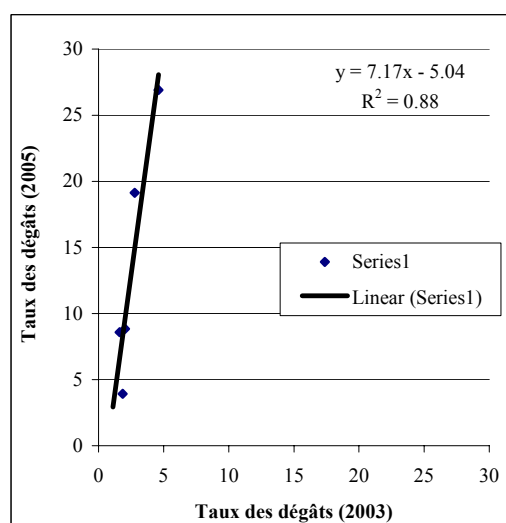


Fig. 131 Relation entre le taux des dégâts pendant les deux périodes hivernales

• Analyse des dégâts de la période 2004/2005

Les dégâts sont inégalement répartis dans les différentes placettes (cf. leur „spatial pattern“ en Annexe 6, p.220). Leur taux (par rapport au volume sur pied après la coupe) varie entre 4.2% et 27.7%. Il est moins de 10% dans les placettes 1, 2, 3 et 4 les plus atteintes sont les placettes 5 et 6 (19.6% et 27.7%). Les Fig. 132 et Fig. 133 présentent la répartition par placettes du nombre d'arbres endommagés. La Fig. 134 indique le volume endommagé en fonction du genre de dégât. Et la Fig. 135 présente le taux des dégâts pour chaque placette.

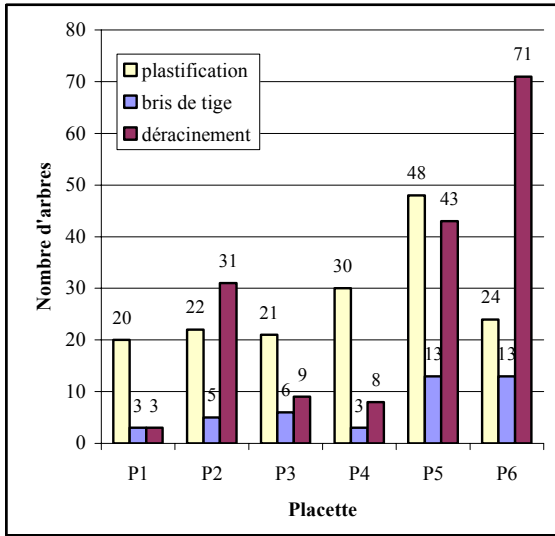


Fig. 132 Répartition des dégâts par placettes et genre

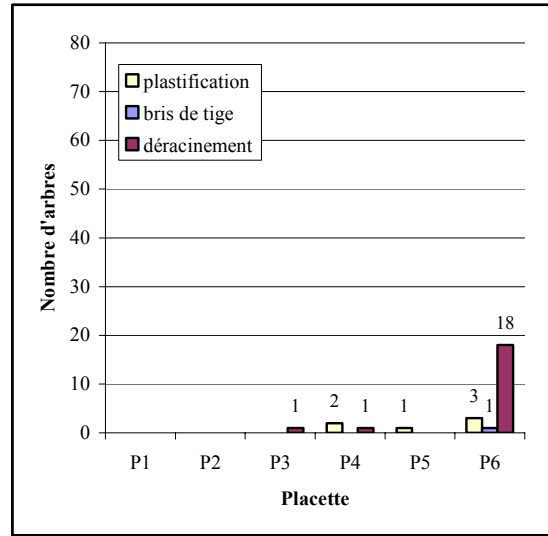


Fig. 133 Répartition des dégâts par placettes et genre (seulement arbres de place)

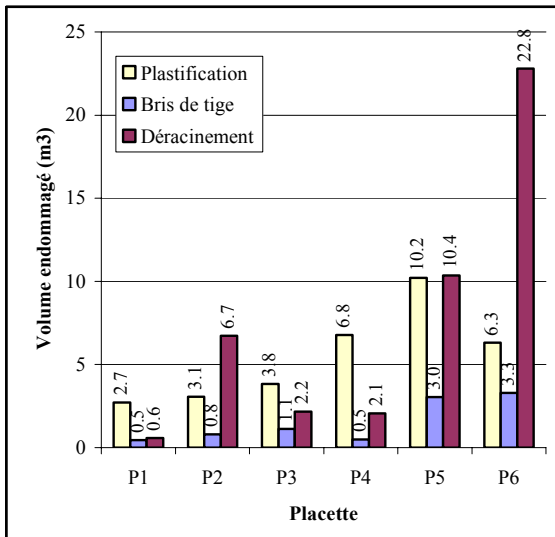


Fig. 134 Répartitions du volume endommagé par placettes et genre de dégât

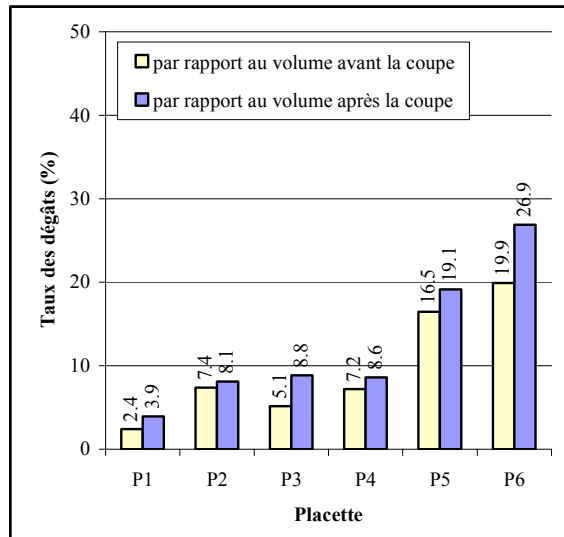


Fig. 135 Taux des dégâts par placettes

La variation entre les placettes du taux des dégâts peut être parfaitement expliquée par le nombre d'arbres endommagés dans des chaînes d'effet domino dynamique (Fig. 136). Leur nombre est légèrement pondéré pour prendre en compte les petites différences entre les surfaces des placettes.

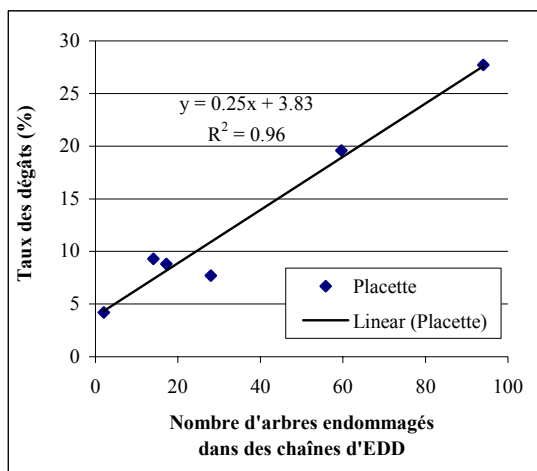


Fig. 136 Taux des dégâts dans les différentes placettes en fonction de l'effet domino dynamique

Il convient donc de concentrer l'analyse sur les caractéristiques des effets domino, présentées par placettes au Tab. 37. L'apparition et le développement d'un EDD dépendent de plusieurs facteurs et seront discutées plus en détails (cf. Fig. 144, §7.7.2, p.189)

Paramètre	Placette	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Nombre de chaînes d'EDS/arrêts de l'effet		1/1	3/3	0	4/4	2/0	0
Nombre de chaînes d'EDD		1	2	4	3	6	14
Cas d'arrêt de l'EDD : arrêté dans un arbre stable ou partie dense/arrêté dans un espace libre/non-arrêté		0/1/0	0/0/2	1/3/0	2/0/1	0/0/6	4/2/8
Arbres impliqués dans un EDS/EDD		2/2	7/28	0/10	10/14	6/53	0/94
Somme des arbres touchés par ED		4	35	12	24	59	94
Longueurs ⁵⁵ min-max des chaînes d'EDD [m]		6	12-16	7-9	6-12	5-30	7-32
Longueur totale des chaînes d'EDS (m)		5	12	0	19	12	0
Longueur totale des chaînes d'EDD (m)		6	28	32	26	96	274
Longueur totale des chaînes d'ED (m) (EDS+EDD)		11	40	32	45	108	274

Tab. 37 Caractéristiques des effets domino par placettes

La relation entre le taux des dégâts (par rapport au volume sur pied après la coupe) et le degré de plénitude après la coupe (Fig. 137), malgré le petit nombre de données, se laisse comparer avec la Fig. 14, p. 53 (Rottmann, 1985). Moins de dégâts se constatent en général dans les parties restées plus denses (à l'exception de placette 5) et dans les parties fortement éclaircies. Les situations intermédiaires démontrent sensiblement plus de dégâts.

⁵⁵ La longueur maximale dépend aussi de la forme de la placette. Dans le cas de placette 5 elle atteint le maximum

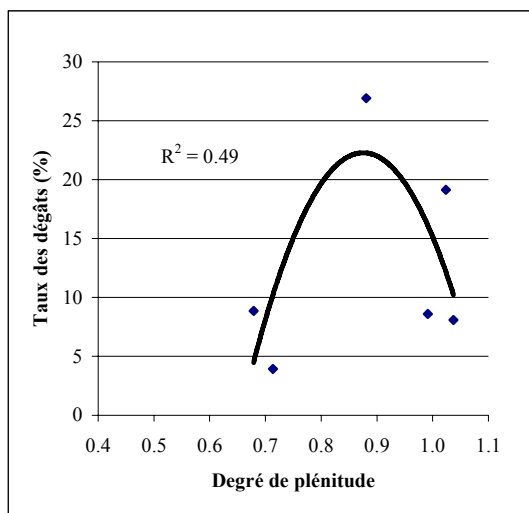


Fig. 137 Dégâts de neige en fonction du degré de plénitude

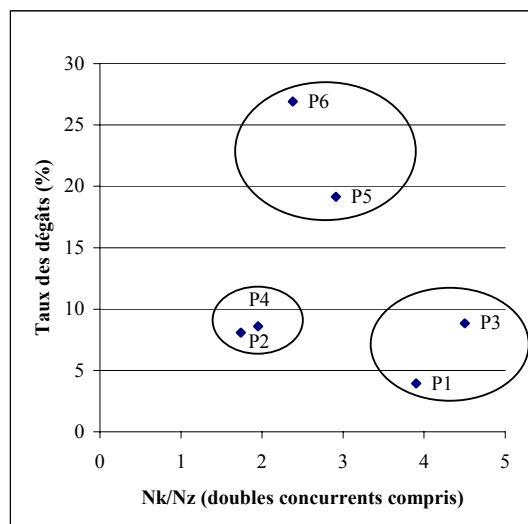


Fig. 138 Dégâts en fonction du degré de libération des arbres de place (Nk/Nz)

Le degré de libération des arbres de place (estimé par le rapport nombre de concurrents enlevés/nombre d'arbres de place à l'échelle de la placette) permet la délimitation de 3 groupes, chacune avec deux variantes de l'éclaircie sélective (Fig. 138 et Tab. 38).

Groupe	Placette	Variantes
1	P2 – P4	100/1 – 200/1
2	P5 – P6	100/2 – 300/1
3	P1 – P3	300/2 – 200/3

Tab. 38 Groupes de placettes de caractéristiques similaires à l'égard de la vulnérabilité à la neige

Groupe 1 comprend les placettes de force de l'éclaircie faible à moyenne (9-16%) et un faible degré de libération par les concurrents - moins de 2 arbres par arbre de place (Nk/Nz 1.74-1.95). Les placettes présentent des parties compactes non-traitées d'arbres de bourrage de SRC conservées. Elles marquent le plus d'ED statiques et moyennement d'ED dynamiques. Aucun arbre de place endommagé dans P2, trois arbres de place légèrement endommagés (faibles plastifications) dans P4. L'état des placettes semble assez bon.

Groupe 2 occupe une situation moyenne par rapport aux deux autres. Entre 2.5 et 3 arbres enlevés par arbre de place (Nk/Nz 2.38/2.91), force de l'éclaircie - moyenne à forte (14-26%). Ce groupe marque le plus haut taux des dégâts, avec les chaînes d'EDD les plus longues et le plus grand nombre d'arbres touchés. Un arbre de place légèrement plastifié dans la placette 5 et 22 arbres de place totalement endommagés dans la placette 6. Les chaînes d'EDD sont régulièrement réparties dans les deux placettes (cf. Annexe 6), la déstabilisation paraît générale, il y a partout d'arbres renversés et couchés sur d'autres, ce qui augmente les risques de dégât futurs. L'état peut être qualifié d'assez mauvais.

Groupe 3 inclut les variantes très fortes de l'éclaircie (39-42%), réciproques en ce qui concerne les deux critères déterminant la variante de l'éclaircie sélective (300/2 et 200/3). La plupart des arbres de place sont presque complètement libérés de leurs concurrents (Nk/Nz 3.90/4.50) et ne résistent que grâce à leurs capacités individuelles. Les interactions favorisant la SRC sont à plusieurs endroits désactivées. Les effets domino statiques sont presque absents, les EDD forment de très courtes chaînes qui s'arrêtent vite dans un espace libre. Malgré un arbre de place déraciné dans P3, l'état des placettes peut être jugé comme très bon.

7 Discussion et conclusions

7.1 Calculs du module E et de la résistance du bois

Malgré toutes les imperfections dans les mesures et l'influence des paramètres admis, les valeurs du module E , obtenues par les deux méthodes (arbres sur pied et billons) sont d'un même ordre de grandeur – entre 8 et 10kN/mm². Elles sont nettement inférieures à celles des essais de terrain de Peltola et al. (2000) - 11.35±3.5 kN/mm². La tendance de diminution du module E en fonction du $d_{1,3}$ concorde avec les résultats de Brüchert et al. (2000).

Des essais de fléchissement de billons on obtient une résistance à la flexion de 57±2 N/mm². Comparée au résultat de Peltola et al. (2000) de 37.3±7.7 N/mm², le bois du pin sylvestre étudié montre une résistance nettement supérieure.

7.2 Evaluation de la simulation de la charge de neige lourde

Le grand avantage de l'installation de simulation de la charge de neige réside dans la possibilité d'appliquer une charge parfaitement verticale et indépendante des interactions, ce qui permet aux arbres de se déformer librement dans l'espace. Les imperfections dans la forme et la position initiale de la tige conduisent à une légère torsion sous la charge appliquée.

L'installation de simulation de la charge de neige et la façon de conduire les essais de terrain présentent aussi quelques inconvénients, notamment:

7.2.1 Au niveau de l'arbre individuel

1. Au début l'excentricité simulée par l'ESA a une valeur initiale e_{init} . Elle ne reste pas constante lors du fléchissement, mais diminue légèrement en fonction de la flèche δ (Fig. 139). La diminution est relativement petite (moins de 1 cm pour les plus grandes flèches obtenues). Elle peut être prise en compte dans les calculs ou bien négligée, car son effet sur les résultats est faible.

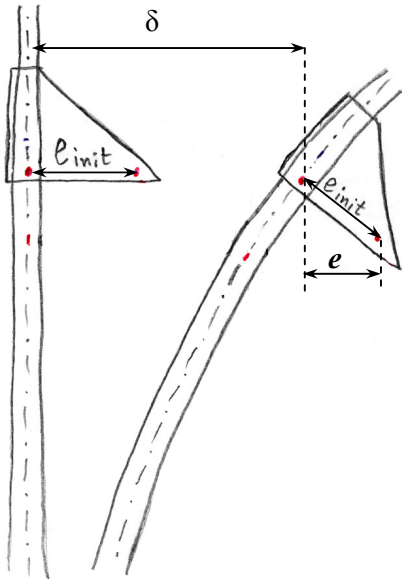


Fig. 139 Evolution de l'excentricité simulée lors du fléchissement

- Seul le segment de la tige en dessous de l'ESA est soumis à flexion. La partie (le houppier) au-dessus de l'ESA s'incline légèrement lors des essais de terrain. L'effet de cette inclinaison sur la déformation du segment en-dessous de l'ESA peut être considéré comme négligeable. Dans des conditions naturelles par contre, lors d'une accumulation réelle de neige, la partie de la tige au-dessus de l'ESA fléchirait aussi (Fig. 140), d'une part sous l'effet de la charge répartie de la neige sur chaque branche dans chaque verticille, d'autre part du fait que le module d'élasticité, les dimensions et finalement la rigidité de la tige diminuent sensiblement dans la zone du houppier, vers la cime. Par conséquent, au lieu de garder son emplacement par rapport à l'axe de la tige, le $C_{g_{houpp+neige}}$ va se déplacer en s'éloignant de celui-ci (Fig. 140), c.à.d. **l'excentricité de la charge va progressivement augmenter en fonction de la charge**. Par conséquent, on aboutit à une augmentation des moments extérieurs pour la même charge. Cela va conduire à une diminution de la RI de l'arbre par rapport aux valeurs calculées avec le modèle. Cela signifie que les valeurs calculées de la RI surestiment la RI réelle de l'arbre.

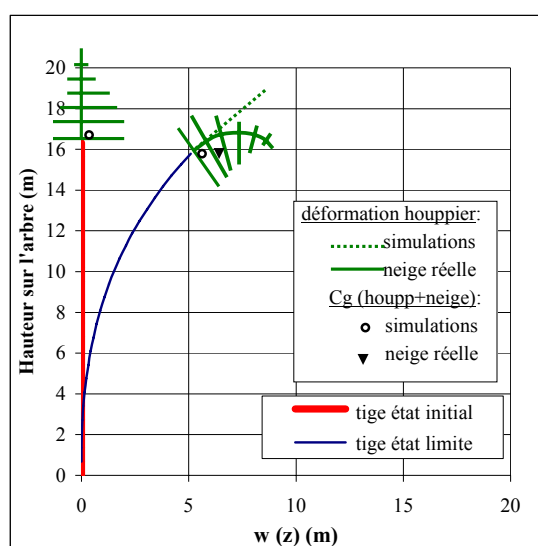


Fig. 140 Déformation du houppier lors des essais de terrain et déformation réelle sous une charge de neige

7.2.2 A l'échelle collective

- Si on tient compte des déformations du houppier, l'arbre étudié entrera en réalité plus tôt en contact avec son voisin par rapport aux simulations.
- L'élagage d'une partie des branches vivantes du houppier a sûrement atténué dans une certaine mesure l'effet des interactions.
- Lors des simulations, les arbres d'essai n'ont pas été fléchis que dans leurs directions naturelles de fléchissement, mais aussi dans plusieurs autres directions. Les simulations n'ont donc pas suivi les prédispositions naturelles des arbres, c.à.d. une grande partie des interactions simulées entre les arbres d'essai n'auraient en réalité jamais eu lieu. On a procédé ainsi pour des raisons pratiques (épargner du temps).
- Il n'est pas possible de faire fléchir les arbres exactement l'un contre l'autre (dans la direction définie par les pieds des deux tiges) car les sacs avec les pierres ou bien butent l'un contre l'autre, ou bien butent dans la tige de l'arbre voisin. Il a donc fallu avoir un petit écart entre la direction du fléchissement simulé et la ligne entre les pieds des deux arbres.

5. Les charges des deux arbres n'étaient pas proportionnelles à leurs SPOH, ce qui serait le cas lors d'une accumulation réelle de neige lourde.

7.3 *Stabilité et résistance individuelles*

7.3.1 Critique du modèle de la SRI

Le modèle de la SRI montre quelques faiblesses qui méritent d'être discutées. Il en va de l'estimation de l'emplacement du $C_{g_{houpp+neige}}$, de la rigidité d'encastrement, de la résistance au déracinement, des déformations dans la zone du houppier et des déformations spatiales.

- **emplacement du $C_{g_{houpp+neige}}$**

Le vrai emplacement du $C_{g_{houpp+neige}}$ est inconnu. Son estimation est relativement grossière. SI et RI sont très sensibles à la hauteur du $C_{g_{houpp+neige}}$ (=longueur de flambage) (Nakatani, 1991), RI est en plus très sensible à l'excentricité du $C_{g_{houpp+neige}}$. (cf. Fig. 87, p.135). Le but n'était toutefois pas de s'approcher le plus possible des valeurs réelles de la SI et de la RI, mais surtout de mettre en évidence l'importance de l'asymétrie, toutes autres conditions égales. En général, l'emplacement du $C_{g_{houpp+neige}}$ a été admis à la hllh, mais en réalité il devrait être même plus haut. De cette façon les valeurs obtenues de la SI et de la RI représentent par conséquent **une borne supérieure** en ce qui concerne l'influence de ce facteur.

- **déformations dans la zone du houppier**

Le modèle de la RI considère la charge du houppier chargé de neige comme charge concentrée. Il ne tient pas compte des déformations au-dessus de l'ESA. Cependant, d'éventuelles plastifications dans cette zone ne sont pas exclues, ce qui conduirait de nouveau à une diminution de la RI par rapport aux valeurs, calculées selon le modèle.

- **rigidité d'encastrement et résistance au déracinement**

Les **scénarios simulés admettent un encastrement parfaitement rigide**, les résultats de la SI, RI et N_{max} sont ainsi surestimés. Cette surestimation est relativement plus grande pour les arbres de plus faibles dimensions, dont l'encastrement réel est plus élastique que celui des arbres plus forts.

Dans des **scénarios avec encastrement élastique**, l'élasticité de l'encastrement aurait pu être prise en compte en augmentant la PE. L'effet de rotation de la base de la tige sur sa ligne élastique, SI, RI et N_{max} aurait pu de cette façon être exprimé. Etant donnée l'évolution inconnue de la rigidité d'encastrement en fonction du $d_{1,3}$, on a renoncé à introduire cela dans les simulations de façon arbitraire. En plus, faute de données sur la résistance au déracinement, le modèle n'aurait pas été en mesure de prédire si un déracinement aurait lieu avant que la limite d'élasticité soit atteinte quelque part le long de la tige. Le modèle aurait admis une déformation élastique de la base de la tige jusqu'au début de la plastification (exprimé par la RI). Les observations de terrain indiquent que le début du déracinement (le déchaussement partiel) commence plutôt peu après l'apparition d'une plastification (cf. Fig. 111, p.151). Même si ce n'est pas toujours le cas chez tous les arbres, la valeur de la RI est suffisamment utile comme référence, car elle représente toujours **la borne supérieure de charge que l'arbre peut supporter sans subir un dégât, sans tenir compte du déracinement**. Cette charge sera en effet ou bien égale à la RI (si la tige se plastifie avant que le déchaussement partielle ne commence pas), ou bien inférieure à elle (dans le cas contraire). Par conséquent, les δ_{max} calculées représentent à leur tour aussi une borne supérieure de

déformation de la tige. En conclusion : les résultats des scénarios testés ne sous-estiment pas la réalité.

A titre d'exemple, les moments maximaux vers δ_{max} , enregistrés à la base des tiges testées, sont comparés avec la résistance au déracinement des pins sylvestres, évaluée par Peltola et al. (2000) (Fig. 141). Il en ressort que les moments obtenus dans notre cas sont inférieurs même à la résistance au déracinement pour un sol non-gelé. En réalité, un des arbres testés lors des simulations a été déraciné par la neige en hivers 2004/2005. La résistance au déracinement des arbres dans la parcelle d'étude s'avère donc sensiblement inférieure à celle des arbres testés par Peltola et al. (2000).

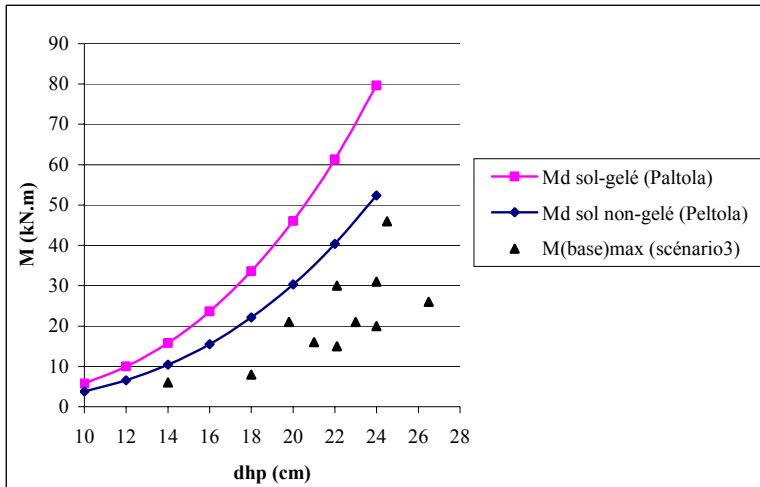


Fig. 141 Comparaison des moments maximaux à la base avec la résistance au déracinement

- **influence de la torsion**

Le modèle de la SRI ne tient pas compte de la torsion. Les déformations spatiales réellement observées sont réduites sur un seul plan, celui de l'axe „idéal“ de la tige dans sa position initiale et la déformation est considérée comme due à un fléchissement simple et à la compression. En réalité, le plan dans lequel se trouvent les charges (de la neige, du houppier, du poids propre de la tige) ne correspond pas avec celui de l'axe de la tige, même l'axe de la tige n'est pas dans un seul plan. Skatter&Kucera (2000) estiment que pour un arbre de houppier asymétrique, soumis aux sollicitations du vent, le risque de cassure suite au fléchissement est égal au risque de cassure consécutif à la torsion. On peut cependant s'attendre à ce que le moment de torsion soit beaucoup plus petit (donc moins important) sous la charge verticale de neige que sous la charge latérale du vent. La torsion a toutefois une conséquence pratique dans le cadre de la présente étude – elle est en mesure de **modifier progressivement la direction de fléchissement de l'arbre avec l'augmentation de la charge**, d'où résulterait une divergence entre la direction naturelle de fléchissement, estimée par exemple à l'aide du vecteur d'asymétrie, et la direction du dégât. L'influence de la torsion n'a pas encore été considérée dans l'étude de la résistance de l'arbre sous le poids de la neige lourde (cf. Marsch, 1989; Gaffrey&Kniemeyer, 2002).

- **validation du modèle de la SRI**

Le fait qu'il y a eu des arbres endommagés après une la neige lourde devrait être une bonne occasion de valider le modèle de la SRI. Plusieurs raisons rendent toutefois la validation du modèle impossible :

- il n'y a pas d'informations sur les quantités exactes de la neige

- faute d'informations sur les conditions météorologiques, l'état du sol (gelé ou non-gelé), l'état (gelé ou non-gelée) du bois et par conséquent ses propriétés mécaniques (résistance, module E) restent inconnus
- le modèle de la SRI ne tient pas compte du danger de déracinement car il n'y a pas de données sur la résistance au déracinement
- le modèle ne tient pas compte de la rigidité d'encastrement (faute de données) et de son effet sur la déformée
- il n'y a pas de données assez exactes sur les POH des arbres endommagés, sur la position initiale de leurs tiges, sur leurs VA ou modules E.
- une grande partie des arbres endommagés ont reçu un coup dynamique d'un autre arbre et ne peuvent pas être utilisés pour la validation du modèle statique
- le modèle ne tient pas compte de l'effet du vent

Néanmoins, on constate en général que :

- la simulation d'apparition d'un dégât correspond aux observations de terrain (cf. Fig. 83 & Fig. 84, p.133 et Fig. 111, p. 151).
- l'ordre de grandeur des déformations élastiques maximales, exprimées par les δ_{\max} simulés (cf. Fig. 86, p.134) correspond à l'ordre de grandeur réellement observé (cf. Fig. 113, p.158) où apparaît le déracinement.

7.3.2 Effet de quelques facteurs sur la SI et la RI

Les facteurs qui exercent un effet sur la charge critique de flambage (sur la SI) ont été minutieusement analysés par Nakatani (1991). Dans la présente étude une attention spéciale sera prêtée à l'effet de la température seulement.

Les simulations avec le modèle de la RI montrent que l'effet d'une plus grande résistance du bois (en état gelé) est négligeable à l'égard de la RI. La RI reste pratiquement la même, seul augmente δ_{\max} (scénario 2 comparé au scénario 1, cf. Fig. 85, p.134). L'effet d'une augmentation du module E s'avère par contre très important. Une augmentation du module E de 20% conduit à une augmentation d'env. 25% de la RI (scénario 3 comparé au scénario 2). Il est intéressant de constater que les arbres gelés sont en mesure de fléchir plus que les arbres non-gelés (scénario 3 comparé au scénario 1, cf. Fig. 86, p.134). Ces résultats doivent naturellement être interprétés avec précaution, car il n'est pas tenu compte de l'effet d'un encastrement élastique sur la déformée, qui sera sûrement plus prononcé sur un sol non-gelé que sur un sol gelé. Néanmoins, l'ordre de grandeur des δ_{\max} avec un encastrement rigide n'est pas du tout négligeable.

Selon les tests de fléchissement de pièces de bois humidifiées de Vorreiter (1938), le bois gelé devient plus fragile et se casse à de plus petites déformations par rapport au bois non-gelé. Vorreiter interprète les conséquences de ses résultats sur la résistance d'arbres sur pied sous le poids de la neige ou sous les sollicitations du vent de la façon suivante: „Bei gleicher Belastung durch Schneelasten oder bei gleicher Stärke des Windangriffes **biegt sich der Baumschaft im ungefrorenen Zustand außerordentlich stark, ehe er bricht**, und kann auf diese Weise den stärksten zerstörenden Kräften ausweichen, bzw. sie mindern. Denn bei Windangriffen wird durch die Biegung eine Stellung des Schaftes und der Krone erreicht, die die geringste Angriffsfläche bietet, bei Schneelast kann durch die infolge der Biegung herbeigeführte Neigung ein Teil dieser Last abgeworfen oder bei Lasten überhaupt eine gegenseitige Stütze an anderen Bäumen gefunden werden. Das trifft bei **gefrorenen Baumschaften** keineswegs zu. Sie **haben ihre Biessamkeit weitestgehend eingebüsst**, wie

die Durchbiegungsergebnisse [...] gelehrt haben. Das hat, zunächst ohne Hinsicht auf die gleichzeitige Zunahme der Biegefestigkeit zur Folge, dass eine nur geringere Biegung, sei es durch einen Windstoss oder durch einseitige Belastung der Krone, genügt, den Bruch des Schaftes herbeizuführen“. Les scénarios de fléchissements simulés de tiges entières montrent la tendance opposée – les arbres en état „gelé“ accusent, toutes autres conditions égales, des flèches maximales supérieures à l'état „non-gelé“ en-delà de la limite d'élasticité. La divergence avec l'estimation de Vorreiter est due au fait qu'il compare les flèches au moment de la rupture de la pièce testée. Pour la présente étude, comme déjà énoncé, l'entrée dans la zone plastique est considérée comme déterminante. Si on revient aux données originales de Vorreiter, on constate que l'entrée dans la zone plastique se fait pour le bois gelé à des contraintes 2.5 à 3.5 fois supérieures et à des flèches env. 2 fois supérieures aux celles du bois non-gelé. L'entrée dans la zone plastique, à part le fait qu'elle est considérée déjà comme un dégât, conduit à une diminution sensible de la rigidité, accélère le fléchissement et finalement réduit la RI de l'arbre.

En conclusion: les arbres à des températures négatives peuvent fléchir autant qu'à des températures supérieures à 0°C, avant de franchir la limite d'élasticité. Ceci leur confère une chance égale d'entrer en contact et d'effectuer des interactions effectives de support avec un voisin (à l'opposé de l'interprétation de Vorreiter !). Le potentiel de la SRC dans un peuplement dense gelé s'avère donc aussi important que dans un peuplement non-gelé.

7.4 Stabilité et résistance collectives

7.4.1 Critique des modèles de la SRC

Les modèles proposés de la SC représentent une simplification de la réalité. Il est admis que les deux tiges fléchissent dans un plan unique et de manière simple, l'une contre l'autre ou l'une sur l'autre, ce qui réellement ne peut jamais être le cas. Des interactions latérales (cf. Fig. 114, p.160, cas de figure **a2**) ont été simulées sur le terrain mais pas modélisées. Dans ce cas, la torsion des tiges après le contact des houppiers est inévitable, même si avant le contact les tiges sont soumises à une flexion simple.

Il ressort des simulations de terrain que les interactions de support se manifestent déjà dans le domaine des déformations élastiques. Pour estimer l'augmentation ou la diminution de la SRC (en fonction du type d'interactions), il faut avoir des données exactes sur la rigidité du support dont chaque arbre bénéficie. De telles données ne peuvent malheureusement pas être tirées des résultats des essais de terrain. Il faut procéder à des études complémentaires plus ciblées.

Il faut noter que dans les conditions réelles, plus que deux arbres sont en mesure d'interagir, selon les témoignages dans la littérature (Haufe, 1934) mais aussi en considérant les situations reconstituées *à posteriori* dans la parcelle d'étude (cf. Fig. 114, p.160). Modéliser l'effet des interactions entre plus de deux arbres formant **un système de support** est un problème très complexe du point de vue de la mécanique et de la résistance des matériaux. Les données nécessaires pour l'aborder font défaut dans le cadre de la présente étude.

Malgré leurs faiblesses, les modèles proposés mettent en évidence un mécanisme d'augmentation potentielle considérable de la stabilité et de la résistance au sein de collectifs d'arbres sous le poids de la neige, jusqu'ici complètement ignoré par la recherche et inexploité (du moins consciemment) par la pratique forestière des dernières décennies.

7.4.2 Rôle des interactions statiques entre les arbres

Les interactions de support entre les arbres sont évidemment la base de la stabilité et de la résistance collectives. Dans les travaux mécaniques précédents, le rôle des interactions n'a pas été étudié. La raison en est que les chercheurs se sont bornés à travailler avec des arbres de tiges parfaitement rectilignes, d'aplomb, avec des houppiers parfaitement symétriques. Dans ces conditions, le fléchissement des tiges est pratiquement exclu. Une déformation est attendue seulement lors de l'atteinte de la charge critique de flambage. Le manque de fléchissement exclut par conséquent le contact entre les houppiers et finalement toute interaction entre les arbres. Le flambage d'un arbre-modèle idéal se produit à l'instant où la charge critique est atteinte dans une direction imprévisible (la probabilité de déformation est égale dans toutes les directions, cf. Fig. 6 (b), p.40). Dans un peuplement régulièrement traité depuis sa jeunesse les arbres possèdent des houppiers assez symétriques pour fléchir très peu sous l'effet de précipitations moyennes de neige lourde (Fig. 96, p.138) et résister individuellement, ce qui justifie l'approche d'étude qu'on vient de décrire. Par contre, dans les conditions réelles d'un peuplement dense jamais traité cette approche n'est pas correcte. Premièrement, les arbres de houppiers asymétriques commencent à fléchir notablement peu après le début des précipitations (Fig. 96, p.138). Deuxièmement, **le contact**, suite aux fléchissements, **entre les arbres chargés est pratiquement inévitable**, comme témoignent aussi Brüchert et al. (2000) pour un tel peuplement d'épicéas (âgé de 45 ans, densité initiale 7000 plants/ha) où ils ont essayé en vain d'éviter le contact des arbres dominés avec leurs voisins lors des essais de fléchissement des arbres sur pied : „In this very dense stand even the smallest displacement of the axis during bending led to contact with the neighbouring trees, which causes irregularities of the force-strain deformation relationships needed to obtain flexural stiffness." Troisièmement, **la direction de la déformation est en grande partie prédéterminée**, et par conséquent, le ou les arbres voisins, avec lesquels l'arbre étudié entrera en interactions.

7.4.3 Extrapolation des interactions statiques à l'échelle du peuplement

A l'échelle d'un peuplement, l'évaluation de la SRC exige des informations sur:

1. la possibilité d'interactions statiques entre les arbres voisins
2. le nombre et la répartition spatiale des systèmes de support et au sein de chaque système – le nombre d'arbres qui y participent et les types d'interactions entre les arbres
3. finalement, la SRC au sein de chaque système de support

La possibilité d'interactions statiques est une fonction de la distance entre les arbres, de la zone de fléchissement élastique et de leurs directions naturelles de fléchissement. Dans un *peuplement dense non-traité*, les interactions statiques entre les arbres voisins sont pratiquement inévitables. Cette assertion peut être prouvée par le rejet de l'hypothèse d'absence totale d'interactions. Pour qu'il n'y ait pas d'interactions statiques entre les arbres au sein d'un tel collectif d'une étendue donnée, il faut que deux conditions soient strictement remplies :

1. tous les arbres fléchissent dans la même direction
2. tous les arbres fléchissent de façon identique (accusent la même flèche) à n'importe quelle étape depuis le début des précipitations (la neige lourde s'accumulant progressivement sur les houppiers)

Il est clair que ces conditions ne sont pas remplies en réalité. Premièrement, les arbres sont naturellement prédisposés à fléchir dans différentes directions, en fonction des asymétries de leurs houppiers (cf. Fig. 53, p.109). Deuxièmement, les arbres accusent des différences

considérables dans leurs flèches à une étape donnée à partir du début des précipitations de neige (cf. Fig. 94, p.137). Ainsi, **l'hypothèse d'absence totale d'interactions statiques peut être rejetée.**

Dans un *peuplement récemment traité (initialement dense non-traité)*, les interactions statiques sont en partie désactivées. Elles restent activées dans les parties entre les cellules d'intervention mais aussi entre certains arbres dans les parties éclaircies.

Les systèmes de support complexes et leurs caractéristiques sont en général identifiables en fonction des possibilités d'interactions (cf. Fig. 116, p. 164, deuxième exemple avec la situation autour de l'arbre P5/Z12).

Evaluer la SRC au sein de chaque système de support complexe s'avère, comme déjà énoncé, la tâche la plus difficile. Elle dépasse la portée du présent travail de recherche et reste l'objet de futures études.

7.4.4 SRC et développement du peuplement

La SRC est très caractéristique pour **les peuplements denses** qui évoluent de façon naturelle. Elle représente **le mécanisme naturel de protection commune contre la neige lourde**. Ce mécanisme est élaboré et perfectionné au cours des années. Il est sollicité et réajusté lors de chaque accumulation de neige. Du collectif sont éliminés presque exclusivement les arbres qui ne participent plus dans les interactions de support - qui ne sont plus en contact latéral effectif par leurs houppiers avec les houppiers des arbres voisins (étant donné la différence des hauteurs), ceux dont les houppiers glissent latéralement sur les houppiers de leurs voisins et en fléchissant passent entre eux ou finalement ceux qui se voient écrasés contre leurs voisins et malgré leur support. Ce sont en général les arbres faibles, de SRI très basse. En même temps le collectif garde ses éléments individuellement les plus stables (souvent même si des dégâts par surfaces ont lieu, cf. Fig. 2, p. 29). Ces éléments sont présents partout dans le peuplement, n'y sont pas concentrés mais sont répartis de façon fortuite (cf. Ammann, 2004). Vraisemblablement le collectif ne sera finalement composé que d'éléments individuellement stables. Faute d'informations, on ignore jusqu'à quand les mécanismes de la SRC sont actifs. Il est en tout cas clair que sans le concours humain le passage d'un état de SRC à un état de SRI s'effectue pendant des décennies.

La SRC dépend vraisemblablement **du degré de différenciation du peuplement**. La **forte concurrence** dans un peuplement dense non-traité conduit à une forte différenciation d'une part en ce qui concerne les diamètres des arbres et d'autre part en ce qui concerne l'asymétrie (grandeur et direction) des houppiers. Le dernier devrait conduire à une augmentation sensible de la SRC, car il favorise les interactions de support effectives entre les arbres sous le poids de la neige dans différentes zones du peuplement et le premier permet une répartition des charges (horizontales!) entre les éléments forts et les éléments faibles du collectif. Cela veut dire que **le peuplement entier ne devient pas moins stable avec le temps, mais vraisemblablement tout au contraire**. Il ne faut pas oublier que la SRC n'est pas une somme des SRI des individus. La stabilité et la résistance sont augmentées surtout par le biais des interactions, non par le biais de l'addition des SRI (au cas de support mutuel). En d'autres termes „Le tout est plus grand que la somme des parties“. Il faut noter aussi que les zones de stabilités au sein du peuplement ne sont pas nécessairement associées aux arbres les plus forts. Il se peut qu'un arbre fort ait en même temps un houppier fortement asymétrique ce qui fait baisser sa RI.

7.4.5 Destruction des systèmes collectifs de support

Dans le modèle pour le système de support du type bilatéral (Fig. 106, p.146), quand la RC pour le moins résistants des deux arbres est atteinte, il va subir une plastification (suivie d'une cassure). L'autre arbre restera intact, si sa propre RI est supérieure à la charge accumulée sur son houppier.

Dans le modèle pour le système de support du type unilatéral, les deux arbres seront simultanément endommagés, à l'instant où la charge appliquée atteint la RC de l'arbre supporteur. Le système entier va se désintégrer. En réalité, dans un peuplement dense, il en résulte des systèmes complexes du type unilatéral (cf. Annexe 7, Fig. 152 et Fig. 153, p.229) mais aussi mixtes, dans lesquels participent plusieurs arbres qui sont en même temps supportés et supporteurs. La désintégration entière de tels systèmes dépend vraisemblablement de la RC d'un ou des quelques arbres supporteurs. Cependant, si la RC des arbres les moins résistants est dépassée avant que la RC des arbres supporteur soit atteinte, ils peuvent être individuellement endommagés, sans que le système complexe se désintègre entièrement. Les dégâts observés dans les parties denses non-traitées de la placette d'étude en sont la preuve (cf. Fig. 113, p. 158, groupe A). Il ne faut pas oublier la possibilité de glissement latéral. Les aspects de désintégration collective sont d'un grand intérêt surtout dans les jeunes peuplements, où ce phénomène se manifeste le plus souvent.

7.4.6 Validité pour d'autres essences

Objet du travail de recherche a été un peuplement de pins sylvestres, avec une faible proportion de pins noirs. Les mécanismes de la SRC au sein d'un peuplement dense non-traité semblent en principe être applicables aussi pour d'autres essences résineuses, tout d'abord pour **les autres représentants du genre *Pinus***, à cause de la forme similaire des houppiers. Il semble convenable d'élargir le champ de validité pour inclure aussi l'**épicéa commun**, sur la base d'observations directes d'interactions de support ainsi que des chaînes d'effet domino dynamique lors des accumulations de neige lourde au mois de mars 2006 dans la région de Winterthur (haut perchis d'épicéa récemment traité) et de Zurich (Fig. 152 et Fig. 153, Annexe 7, p.229). Il faut noter qu'en comparaison avec le pin sylvestre, la forme du houppier de l'épicéa rend souvent plus difficile l'estimation de la direction de son asymétrie dans un peuplement dense.

Estimées à la base d'enregistrements vidéo⁵⁶ d'essais de fléchissement d'arbres sur pied sous une charge verticale dans un peuplement de **cryptomeries du Japon**, les interactions statiques entre des arbres voisins sont aussi possibles et semblent même inévitables dans un peuplement dense. Le **sapin blanc** et le **douglas**, deux autres essences parfois vulnérables à la neige lourde, sont en mesure de rejoindre le groupe des essences précédentes.

7.5 Rôle de la coupe pour la SC et la RC

7.5.1 Distance entre les arbres et efficacité du support souple

Etant donné que la souplesse du support est déterminante pour l'augmentation de la SC (Fig. 107, p.147), il est intéressant de porter un regard sur la façon dont la qualité de la liaison au niveau des houppiers évolue en fonction de la distance entre les arbres. Les essais de terrain ont montré que le ressort du système des houppiers devient assez raide seulement à partir de très petites distances entre les arbres à la hauteur du contact et sous des charges dans l'ordre

⁵⁶ aimablement mis à disposition par prof. Akio Kato (Toyama Forestry and Forest Products Research Center, Forest research division, Japan)

de 1-2 kN (cf. §6.6.1, p.140 et Fig. 110, p.149). Si la distance entre les arbres voisins augmente (p.ex. le voisin immédiat est enlevé en coupe, Fig. 142, à gauche), il paraît que ce n'est pas seulement la distance que l'arbre fléchissant doit „parcourir“ pour atteindre son voisin qui joue un rôle pour que de nouveau les mécanismes de la SRC fonctionnent.

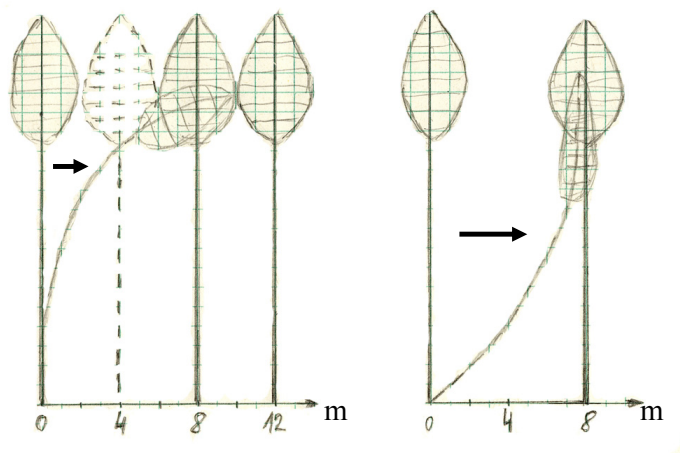


Fig. 142 Contact entre les houppiers d'arbres voisins en fonction de la distance entre eux

Dans la nouvelle situation on peut s'attendre à ce que les deux arbres entrent en contact de façon différente, notamment:

- augmenter la marge de fléchissement libre conduira non seulement aux déplacements latéraux de la tige, mais aussi à une diminution de sa hauteur. À la base de simulations, le raccourcissement s'avère dans l'ordre de 1 à 2 m pour des arbres de 20m de hauteur et pour des flèches de l'ordre de 3-6 m (au niveau de la hlh).
- l'arbre courbé n'entrera plus en contact avec son voisin éloigné avec la partie latérale de son houppier, au niveau de la hlh, mais avec les parties, situées plus haut, vraisemblablement avec sa cime. Un tel contact s'effectuera sur une moindre surface de contact, dans une zone très élastique de la tige qui fléchit. En plus, on peut facilement s'imaginer que la probabilité que le houppier de l'arbre penché de glisser latéralement sur le houppier de l'autre arbre au lieu de s'y accrocher augmente aussi.

Pour ces raisons, la liaison entre les deux arbres, même s'il y a un contact physique entre leurs houppiers, sera vraisemblablement très élastique et donc peu efficace pour une amélioration significative de la SRC de l'arbre en danger. Afin que les interactions statiques entre les arbres jouent leur rôle positif pour la SRC, il faut que la liaison soit assez rigide avant que la limite d'élasticité quelque part le long de la tige ne soit pas atteinte. Ceci semble impossible à partir d'une distance de 4-5 mètres entre les pieds des arbres voisins. L'arbre qui fléchit continuera à se déformer, d'une autre façon, même s'il reste en contact avec son voisin, ce que confirment les observations de terrain (Fig. 142, à droite).

7.5.2 Influence de la coupe sur l'arbre individuel

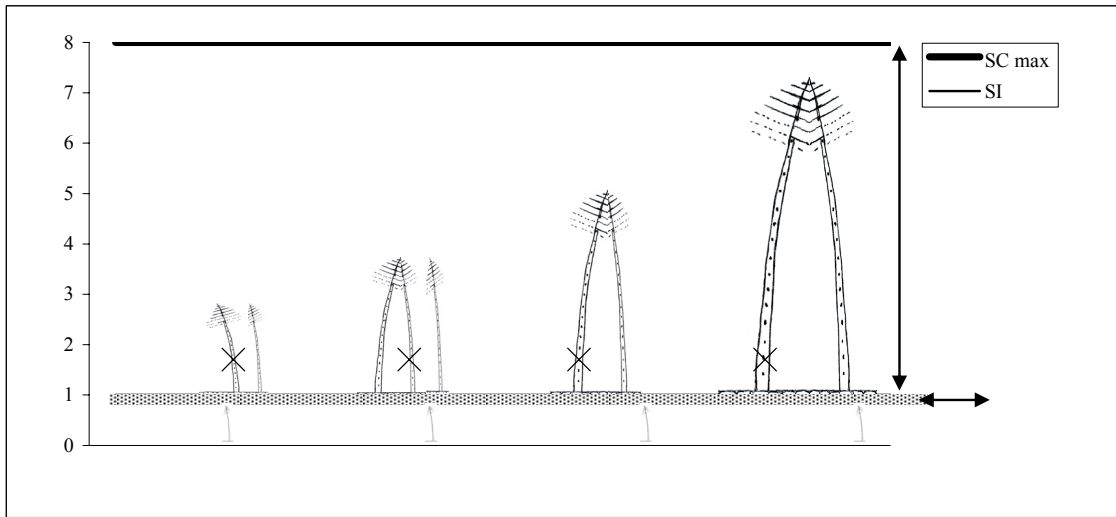


Fig. 143 Influence de la coupe sur la stabilité et la résistance des arbres

L'effet de la coupe peut être directement estimé par le rapport RI/RC , c.à.d. de la résistance d'un arbre après la coupe et de la résistance qu'il a avant la coupe, au sein de son groupe de voisins. Pour les arbres issus de peuplements denses, la résistance après la coupe $RI = (0.7 \div 0.9) \cdot SI$.

L'effet de la coupe peut être aussi estimé par le rapport SI/SC . Dans le cas de support bilatéral, la coupe d'un des arbres en interactions peut conduire à une baisse considérable de la stabilité de l'arbre qui reste sur pied. Théoriquement, la SC maximale d'un arbre peut être dans ce cas env. 8 fois plus haute que sa SI . En réalité, il est possible de s'approcher de ces valeurs si les deux houppiers sont soudés par la neige ou le verglas accumulé, ce qui immobilisera les déplacements horizontaux des deux tiges et la liaison au niveau des houppiers sera très rigide (Fig. 143, situation 4). La hausse de la SC par rapport à la SI sera moindre mais toujours importante si les deux houppiers ne sont pas liés de façon rigide (Fig. 143, situation 3). Même dans le cas d'interactions mixtes (bilatérales et unilatérales), la hausse de la SC serait non-négligeable (Fig. 143, situation 2). Dans le cas d'interactions uniquement unilatérales (Fig. 143, situation 1), la hausse de la SC par rapport à la SI sera notable pour l'arbre qui trouve un support. Dans tous ces cas l'enlèvement en coupe de l'arbre de support provoquerait une baisse considérable de la stabilité de l'arbre qui reste. Il devra résister seul à la charge de la neige.

Pour l'arbre de support (Fig. 143, situation 1) le départ du son voisin n'aurait un effet bénéfique ($RI > RC$) que si seulement ces deux arbres entrent en interactions unilatérales. Dans un peuplement dense ce n'est pratiquement pas le cas (Fig. 152, p.229). La coupe aurait un effet stabilisateur (hausse des RC après la coupe) pour les arbres du groupe en interactions unilatérales, seulement si le dernier arbre de la série (le plus instable et le moins résistant) peut être identifié et enlevé.

7.6 Effets domino

7.6.1 Effet domino statique

Le rôle des interactions statiques entre les arbres peut être équivoque. Il peut être négatif en cas de pression unilatérale/support unilatéral où le système de deux ou plusieurs arbres atteint la limite de la SC et subit un effondrement collectif. Ce phénomène a été appelé effet

domino statique (EDS). Les dégâts par surfaces dans des peuplements denses non-traités relèvent de ce genre d'action. On peut donc proposer, en fonction des connaissances acquises à ce sujet une façon d'identifier dans un peuplement les parties susceptibles de subir des dégâts par surfaces. Ce sont plutôt des groupes d'arbres de dimensions semblables dont la majorité a la tendance de fléchir dans une même direction (surtout sur une pente). Pollanschütz (1980) énonçait déjà cette hypothèse que la faible différenciation serait à l'origine des dégâts par surfaces. On observe parfois au centre de la trouée un arbre, souvent le plus stable, qui reste sur pied, s'il a eu la chance que les houppiers des autres glissent latéralement au lieu de s'encrouer.

7.6.2 Effet domino dynamique

Dans ce travail de recherche il a été constaté pour la première fois que lors de précipitations de neige lourde la charge statique initiale est en mesure d'engendrer des charges dynamiques suite à la transmission d'à-coups par des arbres s'écroulant sur d'autres. L'apparition et le développement de chaînes d'EDD suite aux précipitations de neige lourde ont été aussi pour la première fois étudiés en détails. Dans la seule recherche comparable sur le phénomène, Kuhl&Norra (1992) identifient aussi l'asymétrie des houppiers comme le facteur qui détermine la direction de la chute. Dans la présente recherche le rôle de la coupe pour la déstabilisation des arbres-initiateurs ainsi que pour la création de conditions pour la transmission des a-coups a été mis en évidence.

Il a été possible d'identifier les conditions qui favorisent l'un et l'autre type d'effet domino et de formuler des critères suffisamment nets et pratiques pour leur distinction (§6.7.2). La grande densité, respectivement les petites distances entre les arbres dans un peuplement non-traité excluent l'apparition d'EDD. La distinction entre les deux types d'effet domino – statique et dynamique – s'avère d'une grande importance, étant donné les différences dans leurs forces destructives et la façon dont les arbres endommagés sont répartis sur la surface. L'EDD est nettement plus destructif en comparaison d'EDS, du point de vue de la surface touchée (plus grande) et du point de vue du genre et du degré des dégâts (cassures et déracinements). Ceci est valable du moins dans le cas étudié. Dans des peuplements plus jeunes, l'EDS est en mesure de provoquer de dégâts par surfaces (cf. exemple à la Fig. 149, p. 228). Il semble cependant que ces dégâts restent plus limités que les dégâts d'EDD, très souvent de largeur inférieure à une hauteur d'arbre du peuplement. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour éclaircir cet aspect.

Dans le cadre du présent travail, des chaînes d'EDD ont été observées, aussi bien dans la parcelle d'étude que ailleurs, et ceci aussi bien sur des terrains inclinés que des terrains plats. L'EDD peut être **indirectement** amplifié sur un terrain incliné à cause de l'influence de l'inclinaison du terrain sur le développement de houppiers asymétriques (cf. Robert, 2003) et plus particulièrement dans la direction et dans l'intensité d'asymétrie (Umeki, 1995).

7.7 *Risque de dégâts de neige lourde*

7.7.1 **Vulnérabilité, effet dose-réponse et risque chez l'arbre individuel**

La vulnérabilité, comme déjà énoncé, est l'expression réciproque de la stabilité et de la résistance. Du point de vue mécanique (§6.5.6), un bon nombre de facteurs sont en mesure d'influencer sensiblement la vulnérabilité d'un arbre individuel.

L'indice N_{max} proposé reflète la relation entre les dimensions du processus dangereux (la quantité de précipitations de neige lourde) et les dégâts correspondants (exprimés en nombre d'arbres plastifiés). Par conséquent, le modèle de la SRI, utilisé pour calculer N_{max} , est un modèle „dose-réponse“ qui permet l'analyse correcte du risque de dégâts en fonction de la

probabilité d'accumulation de neige lourde de quantité donnée. L'indice N_{max} est un **indice du risque** de dégâts qui est pratiquement identique à l'indice S_{cr} de Kato&Nakatani (2000), à deux différences : la façon de calculer le poids de la neige interceptée par le houppier et la façon de calculer la charge admissible de la neige pour l'apparition d'un dégât (S_{cr} est finalement un indice de stabilité, tandis que N_{max} est un indice de résistance, plus approprié pour les arbres de houppiers asymétriques).

En connaissant la probabilité d'accumulation de neige lourde de quantité donnée une année donnée après l'intervention et si on introduit dans le modèle de la SRI l'évolution des paramètres mécaniques (surtout SPOH et diamètres de la tige le long de sa hauteur), il est possible de conduire aussi une analyse dynamique⁵⁷ du risque de dégât, c.à.d. pour les quelques années suivant l'année de l'intervention.

On pourrait croire que toutes les données nécessaires pour l'analyse du risque de dégât de neige lourde sont à disposition pour estimer le risque au niveau de l'arbre individuel et particulièrement pour l'arbre de place, libéré de ces concurrents en éclaircie sélective. Ce n'est malheureusement pas le cas. Jusqu'ici seuls les facteurs relatifs à l'arbre isolé qui ont un effet sur sa vulnérabilité ont été considérés. Au sein du collectif, le risque de dégât pour un arbre individuel dépend apparemment de deux facteurs supplémentaires qui sont en mesure de modifier fortement la vulnérabilité de l'arbre individuel, comme le montre les résultats des essais mécaniques avec arbres sur pied et l'analyse des dégâts de neige. Il s'agit en occurrence de:

1. la probabilité et l'efficacité de support de la part d'un voisin
2. la probabilité et l'efficacité d'un coup dynamique de la part d'un voisin.

Par conséquent, les deux indices (S_{cr} et N_{max}) ne sont applicables que pour l'analyse du risque au niveau de l'arbre **isolé** (c.à.d. considéré hors du collectif de congénères). Puisqu'ils ne tiennent pas compte des interactions entre les arbres (statiques ou dynamiques), donc des possibilités de support ou d'effondrement collectif, ils ne permettent pas une analyse du **risque global** au niveau du peuplement.

7.7.2 Risque au niveau du collectif. Influence de l'effet domino dynamique

- **probabilité et efficacité de support**

La **probabilité** pour un arbre de profiter du support d'un voisin dépend des interactions statiques entre les arbres, qui semblent exprimables par des modèles déterministes (en fonction des VA et des distances entre les arbres, cf. §7.4.3, p.183). A ce propos, l'indice N_{max} présente un avantage décisif par rapport à l'indice S_{cr} qui réside dans sa faculté potentielle d'identifier des interactions statiques potentielles et leur type (support bilatéral ou unilatéral). La probabilité peut donc être calculée et elle est pratiquement égale à 0 ou à 1, si les arbres voisins sont très proches. Autrement il faut tenir compte de la possibilité de glissement entre les deux houppiers.

⁵⁷ par opposition à une analyse statique qui se fait pour un seul moment temporel. A ne pas confondre avec le type de charge (statique ou dynamique). En tout cas, on peut s'attendre qu'à cet âge avancé des arbres, même en les libérant complètement de leurs concurrents, dans les 5 premières années après l'intervention l'amélioration de la SRI suite à l'accroissement en diamètre le long de la tige (augmentation de la rigidité de la tige) sera plus ou moins compensée par l'augmentation de la SPOH (cf. §6.3.2, p.112) (l'arbre pourra accumuler plus de neige). L'évolution des autres paramètres mécaniques (h, hlh, module E) au cours de cette période peut être considérée comme très faible et pratiquement négligeable.

L'efficacité du support est difficile à calculer. Les modèles mécaniques proposés indiquent l'énorme potentiel d'augmentation de la SRC par rapport à la SRI. Même si on est encore loin du calcul de valeurs exactes de la SRC, surtout si plusieurs arbres entrent en contact et forment un système de support commun, l'ordre de grandeur de l'augmentation (de 1 à 8 au maximum) est suffisamment convaincant.

- **probabilité et efficacité d'un coup dynamique**

En ce qui concerne l'efficacité, l'analyse des dégâts de neige ont clairement montré que le coup dynamique d'un autre arbre sur l'arbre en question ne provoque pratiquement qu'un **seul effet – dégât total**. On peut bien sûr s'imaginer que si un arbre très faible s'effondre sur un arbre très fort, le dernier a tout de mêmes des chances à rester intact. Estimer l'effet exact nécessite la mise en œuvre de modèles mécaniques qui tiennent compte de la charge dynamique engendrée par de tels coups.

La **probabilité d'un coup dynamique** présente une nature plus complexe que la probabilité de support.

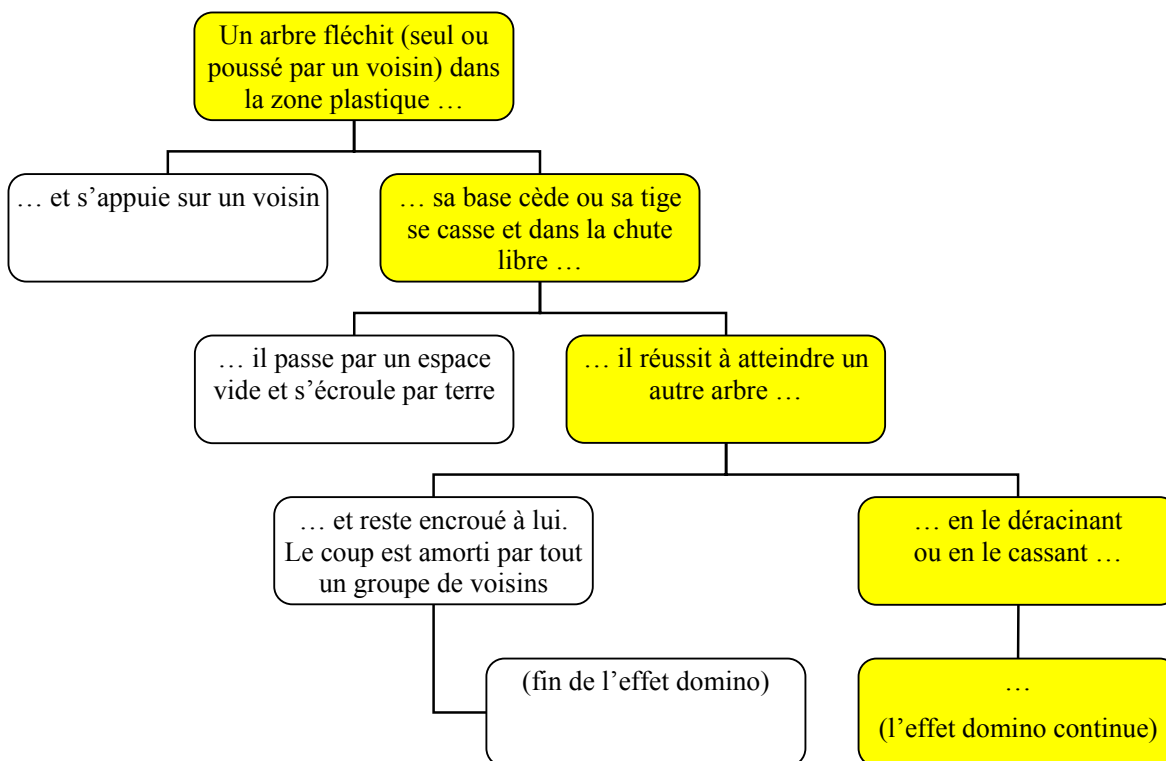


Fig. 144 Algorithme de conditions pour l'apparition et le développement d'un ED dynamique

Elle dépend de (Fig. 144):

- la probabilité de déstabilisation d'un arbre-initiateur (chute libre d'un arbre déraciné ou d'une partie cassée). Cette probabilité peut être estimée à l'aide des modèles de la SRI et de la SRC, en fonction de la probabilité d'accumulation de neige lourde de quantité donnée. N_{\max} peut servir à identifier les arbres-initiateurs potentiels.
- la probabilité qu'un coup dynamique soit porté sur un autre arbre. Cette probabilité dépend apparemment de facteurs spatio-temporels comme la direction de la chute, la distance entre les deux arbres et l'état de déformation momentanée du deuxième arbre sous la charge statique de neige (en fonction du temps d'accumulation).

- c. la probabilité d'arrêt du développement de l'EDD, respectivement de transmission du coup à un arbre suivant le long de la chaîne. Ici l'analyse se complique d'avantage, vu le fait qu'un coup dynamique sur un arbre fléchi sous la charge statique de neige peut sensiblement modifier la direction de chute libre par rapport à sa direction naturelle de fléchissement.

Plus on s'éloigne de l'arbre-initiateur dans une chaîne d'EDD, plus il semble difficile et incertain à prédire si un arbre suivant sera touché ou pas. Le fait que plusieurs chaînes peuvent se développer, bifurquer, se croiser ou fusionner (influencer mutuellement leurs développements) rend le processus très **chaotique**.

Le système statique complexe d'arbres figés et relativement immobiles, fléchissant graduellement sous la charge statique de neige, peut se transformer radicalement en peu de temps et sous certaines conditions assez aléatoires en un système dynamique, où le processus en chaîne d'événements peut être engendré par un acte bénin tel l'enlèvement d'un seul arbre de modeste stature⁵⁸ (cf. Annexe 6, placette 2, effets domino dynamiques 2d et 3d). Quand l'arbre voisin n'est pas atteint (parce que situé trop loin; parce que le coup manque le but; parce qu'il a été enlevé en coupe), il y aura somme toute un seul arbre endommagé et on va constater peu de dégât. Il se peut cependant, si le coup est réussi, qu'un nombre considérable d'arbres soient endommagés. Cette caractéristique est propre aux **systèmes chaotiques**⁵⁹ et est connue sous le nom d'**effet papillon**⁶⁰ (cf. Lorenz, 1963).

Dans les systèmes dynamiques instables (ou systèmes chaotiques) ce ne sont pas les lois au niveau de l'individu qui expliquent le sort du système, mais les interactions entre les individus qui les composent (Prigogine, 1994). Dans le cas étudié, l'analyse des dégâts de neige suggère que le taux des dégâts se laisse expliquer par le nombre d'interactions dynamiques entre les arbres (cf. Fig. 136, p.175). Il paraît qu'il y a assez d'indications pour supposer que le collectif d'arbre sous l'effet de l'EDD représente un système chaotique. Il semble donc justifié d'avancer l'hypothèse que **les dégâts ne peuvent pas être prédits sur la base des caractéristiques des arbres**⁶¹ mais par leurs interactions. En autres termes :

☞ **A l'échelle collective, ce ne sont pas les dimensions et les propriétés mécaniques des arbres qui sont déterminantes pour l'ampleur des dégâts mais bien les interactions dynamiques.**

Il faut souligner que l'hypothèse d'une nature chaotique du processus de désintégration collective nécessite d'être dûment vérifiée par une analyse mathématique soignée⁶². Ceci pourrait faire l'objet de futures recherches.

L'analyse des dégâts dans les placettes a révélé **une tendance de diminution du taux des dégâts avec l'augmentation de la force de l'éclaircie** (cf. Fig. 137 et Fig. 138, p.176),

⁵⁸ ce qui exprime la sensibilité du système collectif aux conditions initiales

⁵⁹ Among the characteristics of chaotic systems [...] is sensitivity to initial conditions (popularly referred to as the [butterfly effect](#)). As a result of this sensitivity, the behavior of systems that exhibit chaos appears to be [random](#), even though the system is [deterministic](#) in the sense that it is well defined and contains no random parameters (http://en.wikipedia.org/wiki/Chaos_theory)

⁶⁰ The **butterfly effect** is a phrase that encapsulates the more technical notion of *sensitive dependence on initial conditions* in [chaos theory](#). Small variations of the [initial condition](#) of a [dynamical system](#) may produce large variations in the long term behavior of the system (http://en.wikipedia.org/wiki/Butterfly_effect)

⁶¹ à l'opposée de l'assertion de Valinger et al. (1993)

⁶² cette analyse doit inclure le rôle du vent non seulement en ce qui concerne la charge qu'il crée mais aussi les modifications dans la direction de fléchissement

contrairement aux constatations de Rottmann (1985) et Kodrik (1972, in Rottmann, 1985). Cette tendance trouve une explication plausible justement si on tient compte de la façon dont les chaînes d'EDD apparaissent et se développent.

Le fait que les EDD peuvent être initiés par des arbres de dimensions inférieures à la moyenne (Fig. 129, p. 172) et l'ordre de grandeur des N_{\max} (Fig. 90, p.135) justifient deux autres conclusions très importantes:

- ☞ **Des précipitations extrêmes de neige lourde ne sont pas nécessaires pour des effets domino dynamiques soient déclenchés. Des précipitations de quantités moyennes peuvent suffire, car les N_{\max} des arbres-initiateurs sont déterminants.**
- ☞ **Par conséquent, des dégâts catastrophiques ne sont pas forcément associés aux précipitations extrêmes. Donc ils sont beaucoup plus probables !**

Une précipitation de quantité moyenne suffit pour causer un dégât sur les arbres moins résistants (Fig. 94 et Fig. 90, p.137-135) et déclencher un EDD.

- **conséquences pour la gestion du risque**

L'analyse du risque indique que la vulnérabilité à l'échelle d'un peuplement récemment éclairci n'est pas une fonction exclusivement des dimensions des arbres restants. L'effet „dose-réponse“ à cette échelle est conditionnée par des facteurs vraisemblablement de nature chaotique ou stochastique, dont le résultat est impossible à prévoir seulement par des modèles mécaniques déterministes (comme chez l'arbre isolé). Cette constatation ne veut pourtant pas dire qu'il est impossible de gérer le risque de dégâts de neige. La présente étude a pu non seulement identifier l'intervention en coupe (cf. §6.7.4, p.165) comme le facteur déstabilisateur le plus important (ce qui confirme seulement les observations de générations de forestiers), mais aussi analyser et reconstituer en détails le processus de destruction individuelle et désintégration collective.

- ☞ **La gestion du risque de dégâts est possible en modifiant la façon d'intervenir (indépendamment de l'événement météorologique dangereux et du temps de décalage de l'intervention) de manière à ne pas augmenter la vulnérabilité des arbres.**

Dans la parcelle d'étude, la placette 6 a le plus souffert des EDD. 22 arbres de place ont subi un dégât total, ce qui fait 27.5% de leurs effectifs. Le taux des dégâts semble à première vue encore acceptable et on peut s'imaginer pouvoir accepter le risque. Autrement dit on peut envisager pouvoir l'intégrer dans la gestion (comme „cost doing business“, selon Birot&Gollier, 2001), étant donné qu'avec le nombre d'arbre de place restants (58 dans la placette, ce qui donne 215 par ha) le but de production est encore dans une certaine mesure atteignable. L'exemple de peuplements avoisinants de plus grande étendue complètement anéantis est significatif à ce propos. L'expression cumulative des interactions dynamiques révèle ici un autre effet de conséquences dévastatrices - l'effet de la boule de neige⁶³. Par conséquent, il ne convient pas de considérer le risque de dégâts d'EDD comme „intégrable“, mais il faut agir de façon appropriée afin de le limiter, voire de l'éviter complètement, si possible. Les propositions concrètes sont faites au §7.8.2.

⁶³ **Snowball effect** is a figurative term for a process that starts from an initial state of small significance and builds upon itself, becoming larger (graver, more serious), and perhaps potentially dangerous or disastrous ... (http://en.wikipedia.org/wiki/Snowball_effect)

7.8 Conséquences pour la gestion forestière

7.8.1 Le coefficient d'élanement comme indice de stabilité contre la neige

Au niveau de l'arbre individuel (comme entité isolé du peuplement), le h/d s'avère peu convaincant pour exprimer la SI d'arbres de houppiers symétriques (issus normalement de peuplements régulièrement traités). Il ne tient pas compte de nombre de facteurs qui influencent la SRI ($C_{\text{houpp+neige}}$, forme de la tige, module E, partiellement SPOH). Il n'est absolument pas approprié pour des arbres de houppiers asymétriques (p.ex. issus de peuplements denses) (cf. Fig. 91 et Fig. 92, p.136), car il ne tient pas compte en plus de la diminution de la RI en fonction de l'excentricité de la charge.

Au niveau de l'arbre individuel (comme élément d'un peuplement) **et à l'échelle d'un peuplement**, le h/d présente deux défauts majeurs :

- il ne tient pas compte des interactions statiques de support (ce qui conduit normalement à une **surestimation** de la vulnérabilité d'un arbre au sein d'un groupe de voisins ou d'un peuplement dense non-traité).
- il ne tient compte du danger d'interactions dynamiques et d'EDD (ce qui conduit à une **sous-estimation** de la vulnérabilité d'un arbre au sein d'un groupe de voisins ou d'un peuplement récemment éclairci, surtout si dans le dernier les arbres de h/d critique ont été éliminés)

En conclusion:

- ☞ **Le coefficient d'élanement s'avère inapproprié comme indice de stabilité (ou de vulnérabilité) d'un arbre isolé de houppier asymétrique, d'un arbre au sein du peuplement ou des arbres à l'échelle d'un peuplement.**
- ☞ **Dans la pratique forestière, sous certaines conditions (§7.8.2), même des arbres individuellement instables, estimé selon leurs valeurs de h/d, peuvent sans risque de déstabilisation directe être désignés comme arbres de place**
- ☞ **Etant donné que le coefficient d'élanement ne serait d'une certaine utilité comme indice de stabilité contre la neige de l'arbre isolé que dans un peuplement où les interactions (statiques et dynamiques) sont exclues (grandes distances entre les arbres), il reste en effet sans grande valeur indicatrice pour la pratique forestière**

7.8.2 Conséquences pour la conduite des interventions tardives

Dans les recherches menées jusqu'ici, l'effet des interventions est évalué en fonction des capacités des arbres restant de réagir pour améliorer leurs caractéristiques ($d_{1,3}$, longueur du houppier, défilement, h/d) au profit de leur stabilité individuelle, tout en espérant à ne pas avoir la malchance de chute de neige lourde dans les premières années après l'intervention. La réaction des arbres pour une amélioration de leurs stabilités individuelles dans cette première période de quelques années est minimale, surtout dans des peuplements plus âgés. Il faut donc se concentrer non seulement sur les éléments du collectif qui restent sur pied mais aussi sur l'effet immédiat de l'absence des arbres prélevés en coupe, et ceci pas nécessairement en fonction du genre d'éclaircie (par le bas, par le haut, éclaircie en ligne) ni en terme de force de l'éclaircie qui s'avèrent des critères d'estimation vagues. **Il faut aller plus en détail, au sein de la cellule d'intervention car c'est à cette échelle que tout ou du moins la majeure partie du sort du peuplement (en ce qui concerne sa survie physique) se décide.** Si on considère le peuplement comme un ensemble d'éléments vivants qui croissent et qui s'adaptent ensemble au cours des années pour s'opposer aux aléas tels le vent ou la neige, il faut se rendre compte que la coupe détruit sur-le-champ certains liens et désactive des

mécanismes invisibles hors la période des événements dangereux (le support mutuel) et crée des conditions de destruction massive (des effets domino) en mettant le collectif dans un nouvel état potentiellement instable. Si l'effet domino entre en ligne de compte, il devient difficile de prévoir les conséquences, qui peuvent être très néfastes.

Les arbres dans les peuplements restés longtemps non-traités ont évolués ensemble. Les asymétries de leurs houppiers se sont ajustés les uns aux autres au profit de la SRC. La diversité dans la direction et l'intensité de l'asymétrie au sein du peuplement favorise les mécanismes de support mutuel. Ces mécanismes compensent la SRI médiocre de la plupart des éléments du collectif. Le peuplement non-traité est une unité „stable“ composée d'un mélange de peu d'unités individuellement stables et résistantes et beaucoup d'unités individuellement instables et peu résistantes. **Voilà pourquoi le passage de l'état dense à l'état éclairci doit être guidé non par le désir de stabiliser, mais par la précaution de ne pas déstabiliser.** Le problème central des éclaircies tardives réside dans le désir de réduire d'un coup la concurrence et effectuer de cette façon un passage abrupt d'un état de support collectif vers un état de résistance individuelle. La désactivation des interactions de support résulte d'abord dans une déstabilisation d'arbres individuels et ensuite, si l'effet domino dynamique est déclenché, dans la désintégration de parties entières du peuplement. **Le rôle de la variation des asymétries des houppiers est inversé par l'éclaircie d'un seul coup de positif en négatif.** L'enlèvement d'un arbre en coupe ne concerne souvent pas que ses voisins immédiats mais indirectement d'autres arbres (cf. Fig. 124, p.168) - plusieurs déstabilisations locales sont activées.

Une intervention en plein qui vise à éliminer avec priorité une certaine catégorie d'arbres individuellement instables, de houppiers trop asymétriques (Grünig, 1963) et/ou trop élancés (Valinger et al., 1993; Río et al., 1997) est en mesure en effet d'activer la déstabilisation à plusieurs endroits dans le peuplement car justement de tels arbres sont en mesure de participer activement dans la stabilisation du collectif. **La fonctionnalité des arbres s'avère plus importante que leurs dimensions dans l'estimation de leur rôle sur la SRC, respectivement de l'effet de leur élimination sur les arbres restants.** Pour cette raison, il convient de compléter la notion d'„arbre d'ossature“ en ajoutant les aspects sur la fonctionnalité.

Il y a incontestablement au sein d'un peuplement non-traité assez d'individus à stabilité individuelle suffisante pour être libérés de leurs plus grands concurrents sans risque de déstabilisation. Mais même ces arbres ne seront pas en mesure de tenir un coup dynamique porté par un voisin. Le vrai risque donc et vraisemblablement le plus grand problème pour la stabilité des peuplements fraîchement éclaircis est lié à l'effet domino dynamique, si on se base sur la constatation que les interactions dynamiques entre les arbres sont responsables en grande partie des taux des dégâts (cf. Fig. 136, p.175). Les mesures pour éviter les dégâts doivent donc se concentrer sur l'élimination des facteurs qui donnent naissance ou qui favorisent le développement des chaînes d'ED dynamique. **Deux approches** possibles se laissent par conséquent formuler:

1. Limiter le nombre d'arbres-initiateurs d'EDD

Il s'agit d'éviter la déstabilisation (l'enlèvement d'un voisin du côté de la plus grande asymétrie) d'arbres présentant une mauvaise constellation de paramètres qui dénoncent leurs vulnérabilités individuelles (en premier lieu grandeur et direction de l'asymétrie (DAH), rapport démesuré entre l'intensité du VA estimé et le diamètre de l'arbre, ev. inclinaison de la tige dans la même direction que celle de l'asymétrie, houppier très court). L'analyse ne doit pas inclure que l'arbre de place choisi, mais aussi tous les arbres autour de l'espace libéré que laissera chaque concurrent enlevé (Fig. 145).

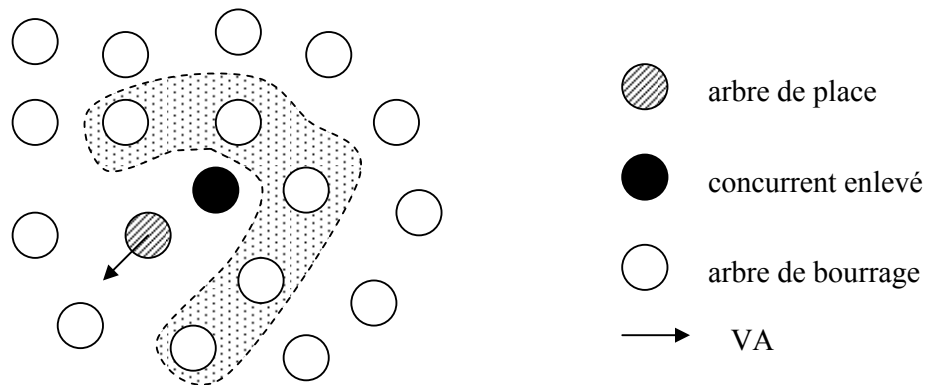


Fig. 145 Zone potentielle de déstabilisation lors de l'éclaircie sélective

En principe, l'arbre de place n'est pas (directement) déstabilisé par la coupe de ses plus grands concurrents - par définition⁶⁴, le houppier de l'arbre de place est le moins développé du côté des concurrents les plus forts, c.à.d. du côté opposé de son asymétrie (=de sa direction naturelle de fléchissement). En autres termes, comme l'expliquent Young&Hubbel (1991) „Trees not at gap edges were more likely to fall away from their near neighbours then toward them”. Par contre les arbres de bourrage, voisins de l'arbre enlevé, peuvent éventuellement être mis en danger. Les interactions de support potentielles entre eux et lui indiquent la gravité de la situation. Un cas de figure du type **a1** ou **a2** (support bilatéral) est particulièrement alarmant (cf. Fig. 114, p.160). Si le risque estimé de déstabilisation d'un arbre de bourrage est relativement grand, il vaut mieux l'éliminer. Dans ce cas, l'analyse des conséquences de son départ doit impérativement inclure tous ses voisins. En général, l'élargissement de l'espace libérée accroît la probabilité de déstabilisation d'un nombre plus élevé d'arbres de bourrage et en même temps la probabilité d'apparition d'interactions dynamiques (cf. Fig. 113, p.158) et doit donc être plutôt une exception qu'une règle. L'enlèvement d'arbres isolés ne laisse pas beaucoup de marge de fléchissement aux arbres restants et l'apparition d'interactions dynamiques est limitée (cf. variantes 100/1 dans P2 et 200/1 dans P4, Annexe 6). Les interventions ponctuelles sont parfaitement justifiées en outre par le fait que pratiquement tous les concurrents (plus de 90%) des arbres de place sont situés à une distance inférieure à 4m (cf. Fig. 49, p. 106). Jusqu'à cette distance les interactions dynamiques sont très restreintes (cf. Fig. 113, p.158). Dans ce rayon le forestier peut jouir d'une liberté d'action sans courir trop de risques, surtout si la distance entre l'arbre de place et un éventuel arbre-initiateur de la zone potentielle de déstabilisation est inférieure à 4m (cf. de nouveau Fig. 145).

2. Limiter le développement des chaînes domino dynamiques

Les chaînes domino peuvent s'arrêter contre un butoir d'éléments stables ou par un espace libre. L'arrêt frontal ne se termine pas sans pertes et l'efficacité de son utilisation semble très douteuse, car la situation d'arbres à demi-couchés sur d'autres n'est qu'un arrêt temporaire des interactions et représente un point de départ d'un effet domino statique lors de la prochaine accumulation de neige lourde. Par contre, les chutes libres dans des espaces libres du peuplement ou bien ne déclenchent pas d'effet domino dynamique, ou

⁶⁴ „Le concurrent direct, c'est donc l'arbre à la fois le plus haut et le plus proche, dans l'environnement immédiat de l'arbre d'élite. En réalité, il est souvent facile à repérer. Il se trouve en effet généralement du côté où le houppier de l'arbre d'élite est le plus déformé” (Schütz, 1990)

bien les chaînes d'EDD restent courtes, s'arrêtant définitivement et sans conséquences pour d'autres arbres. Les espaces libres sont le résultat d'une grande force de l'éclaircie (cf. variante 200/3 dans P3, Annexe 6). Un grand nombre d'arbres individuellement instables sont en même temps éliminés, au lieu d'être déstabilisés. Cette approche implique une interruption radicale du couvert, une sorte d'éclaircie par détournement qui peut à l'extrême ne laisser sur pied que les arbres de place. Une telle structure du peuplement paraît cependant très vulnérable aux sollicitations du vent qui pourrait être un danger dans des peuplements récemment et fortement éclaircis.

Les recommandations données sont de nature générale mais elles touchent à l'essence du processus destructif et donnent des lignes directrices pour sa maîtrise. La parcelle d'étude du présent travail de recherche n'est représentative que pour un peuplement d'âge et de caractéristiques définies (densité, dimensions des arbres) et les variantes de l'éclaircie sélective sont incomplètes et sans répétitions. Par conséquent, des recommandations précises sous la forme de nombres optimaux d'arbres de place et de concurrents à enlever ne seraient pas pertinentes, du moins en ce qui concerne les soucis de déstabilisation. Si les règles déjà énoncées sont respectées, il devrait y avoir plusieurs solutions de passage de l'état dense et l'état éclairci en fonction du cas concret. L'estimation du risque dans chaque cellule de martelage exige la prise en compte de plusieurs facteurs et une bonne aptitude de visualisation de la part de celui qui effectue le martelage, basée sur la compréhension des mécanismes de support. Cette estimation ne permet tout de même que l'identification certaine des cas les plus dangereux. Vouloir libérer au plus haut degré un maximum d'arbres de place rendrait l'analyse de terrain extrêmement complexe sans pour autant prêter plus de garanties. Se concentrer sur un nombre raisonnable d'arbres de place (200/ha en occurrence) et les favoriser en éliminant leurs 1-2 concurrents les plus forts semble la solution raisonnable et pertinente.

7.8.3 Conséquences pour les stratégies de gestion forestière à long terme

Les résultats de ce travail ont aussi des conséquences sur les stratégies de gestion à long terme. L'aspect des risques de dégâts de neige lourde nécessite un changement d'approche fondamental. La question „**quand** est-ce qu'il faut intervenir dans la vie d'un peuplement **afin d'éviter les dégâts**“ devrait être remplacée par la question „**comment** intervenir, à n'importe quel moment de la vie d'un peuplement **et éviter de provoquer des dégâts**“. La solution du problème ne réside pas nécessairement dans la détermination d'un moment opportun ou d'une période optimale d'intervention mais plutôt d'une manière appropriée de conduire l'intervention. La vision qu'avec le temps un peuplement laissé à lui-même devient de plus en plus instable, malgré parfois la large acceptation dont elle jouit dans les milieux forestiers, ne tient debout, rien qu'à cause de l'existence indéniable de peuplements non-traités dans les zones de chutes fréquentes de neige lourde. Les interactions de support que le présent travail met en évidence confèrent à l'ensemble d'éléments en majorité écrasante individuellement instables une stabilité collective suffisante pour la survie du peuplement en tant qu'entité, sans compter les pertes virtuelles incontournables de la mortalité naturelle. **La stabilité collective représente en effet la stratégie naturelle de survie mécanique du peuplement dense non-traité.** Les interactions de support sont en mesure d'augmenter la SRC d'un arbre à tel point que les dégâts de neige seront pratiquement exclus, faute de précipitations de neige lourde de cette ampleur.

La stratégie classique à long terme de préservation d'un peuplement des dégâts, en cohérence avec la règle d'or culturelle „commencer les interventions tôt, les pratiquer fréquemment et avec modération“ (Heyer, 1854, in Rottmann, 1985) qui s'appuie sur la stabilité individuelle reflétée par le coefficient d'élancement et largement appliquée à l'échelle européenne dans les dernières 40 à 50 ans, ne peut pas être jugée fautive en soi. Sa validité a été maintes fois

confirmée. Elle présente toutefois des inconvénients majeurs. Premièrement, elle pose comme but maximaliste de garantir la stabilité individuelle de chaque arbre le long de la vie du peuplement au prix d'énormes investissements. Deuxièmement, quand il s'agit d'interventions de rattrapages que la stratégie classique ne prévoit justement pas mais auxquelles elle se voit confrontée, les principes sur lesquels cette stratégie se base – l'amélioration graduelle de la stabilité individuelle grâce aux meilleures conditions de croissance après l'intervention ne sont plus applicables. Pratiquement tous les chercheurs arrivent à cette constatation (Chroust, 1969b; Johann, 1981; Río et al., 1997; Cameron, 2002). Dans ce cas, une intervention en plein, même si elle consiste dans l'élimination des éléments individuellement les plus faibles (h/d élevé) et qui se veut „stabilisatrice“ peut avoir des conséquences désastreuses suite aux effets domino. Ignorant les mécanismes de défense collective, on les détruit, tout en ayant la bonne volonté de stabiliser. C'est ce qu'on appelle „jeter l'enfant avec l'eau sale du bain“. En autre termes, le problème consiste non dans la vulnérabilité de l'objet, mais dans l'inadéquation, voire la contreproductivité de la mesure appliquée.

Il y a donc une alternative objective à la stratégie classique. La prise en compte des mécanismes de support collectif ouvre de nouveaux horizons dans la planification forestière. Ainsi la façon qu'on recommande de conduire les éclaircies (§7.8.2, variante 1) est en parfaite adéquation avec les nouveaux concepts d'éducation tardive des forêts (Ammann, 2004), basés sur le principe de l'automation naturelle. Ils impliquent, pour l'épicéa, une première intervention faible et ponctuelle (autour les arbres de place) et ensuite une forte intervention. Selon Amman (2004) „Dieses Konzept basiert sich auf der aktiven Nutzung der kollektiven Stabilität, mit einem langsamen Übergang zur Individuellen Stabilität“. Cette affirmation nécessite une légère modification. Premièrement, il est possible, lors de la première intervention, de garder **aussi**, si on l'estime nécessaire, la SRC des arbres de place, tout en éliminant leurs plus grands concurrents. Deuxièmement, lors de la deuxième intervention, le passage s'effectue en éliminant **d'un seul coup** les cellules d'arbres individuellement instables. L'enjeu principal consiste à éviter les états intermédiaires entre le collectif d'éléments qui se supportent et un collectif d'éléments résistant individuellement, à probabilité apparemment maximale d'apparition de l'effet domino, respectivement à un risque élevé de dégâts des arbres de place.

Jusqu'ici il y a eu parfois des difficultés de concilier les stratégies de gestion pour prévenir les dégâts de neige et les dégâts de vent. La première nécessite plus d'espace pour le développement d'individus stables (vision classique) et la deuxième exige un état dense pour garantir la stabilité collective. Remédier aux deux problèmes à la fois veut dire obtenir deux états diamétralement opposés. La solution du dilemme est de différencier les buts dans le temps (Vanomsen, 2006). On parle alors de la „gestaffelte Durchforstung“ (Chroust, 1980, in Vanomsen, 2006; Huss, 1983; Thomasius, 1988; Marsch, 1989; Slodičák, 1995; Burschel&Huss, 1997; Vanomsen, 2006) et consiste à ouvrir (vers une Hdom de 12m) le couvert du peuplement en jeunesse et vers le haut perchis réduire et finalement arrêter les interventions pour assurer les effets bénéfiques de l'état dense. Le concept de la „gestaffelte Durchforstung“ exclue des interventions tardives - d'une part il est trop tard d'espérer que les arbres vont devenir assez vite assez résistants pour s'opposer à la neige, d'autre part il devient dangereux d'intervenir du point de vue du vent. Finalement, la prise de conscience du rôle de la SRC contre la neige montre qu'il n'y a pas de divergences mais tout au contraire – il y des synergies dans la gestion du risque contre les deux types d'événements naturels nuisibles.

7.9 Conclusion finale

L'objectif du présent travail est à l'intersection de quelques disciplines différentes – mécanique et résistance des matériaux, météorologie, gestion forestière, analyse et gestion du risque. Il a exigé une nouvelle approche sur la question des dégâts de neige. L'étude se solde par une première esquisse de la **théorie de la stabilité, de la résistance et de la désintégration collectives** d'un peuplement sous le poids statique de neige lourde en fonction de sa densité. L'étude est la première à distinguer assez clairement entre interactions statiques et interactions dynamiques entre les arbres. Trois expressions de ces interactions ont été identifiées et étudiées - support collectif, effet domino statique et effet domino dynamique.

Il a fallu aborder, du moins en partie, les multiples aspects de la SRC et de la désintégration collective afin de proposer une solution pratique à l'objectif du travail de recherche. La base de données restreinte, le besoin de perfectionner certaines méthodes de saisie et de traitement des données, la complexité et les multiples aspects peu explorés du problème ont limité la portée générale des résultats. Néanmoins, l'étude montre que les problèmes liés à la stabilité et la résistance des forêts à la neige lourde méritent d'être mieux étudiés et que certains postulats nécessitent une profonde remise en question.

Curriculum vitae

- 1974 Geboren am 5. August in Sofia, Bulgarien
- 1981-1988 Primarschule in Sofia
- 1988-1993 Lycée de Langue Française „Alphonse de Lamartine“ (Sofia)
Baccalauréat en langue française
- 1993-1998 Studium der Forstwissenschaften, Forsttechnische Universität, Sofia
Master Forstingenieur
- 1997-1998 Mitarbeiter, Bulgarisch-Schweizerisches Forstprogramm
- 1999-2001 Referent für die internationale Zusammenarbeit, Nationale
Forstverwaltung am Ministerium für Land- und Forstwirtschaft der
Republik Bulgarien
- 2001-2007 Doktorand an der Professur Waldbau, ETH Zürich
- 2003-2006 Assistent und Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Waldbau
der ETH Zürich (bei Prof. Schütz)

Annexe 1. Terrestrial 3-dimensional measurements of tree crowns

Texte intégral de l'article, présenté à la session ordinaire de la division „Production forestière” de l'Union allemande des stations de recherche forestière
(29-31.05.2006, Staufen, Allemagne)

Dimiter Ivanov, Chair of Ecosystem Management, Department of Environmental Sciences, ETH Zurich,
dimiter.ivanov@env.ethz.ch

Martin Sauerbier, Chair of Photogrammetry and Remote Sensing, Institute of Geodesy and Photogrammetry,
ETH Zurich, martin.sauerbier@geod.baug.ethz.ch

Key words: close range photogrammetry, 3D measurements, crown orthogonal projection, crown increment, Scots pine

Abstract

In the frame of a PhD thesis, conducted at the former Chair of Silviculture (ETH Zurich) in cooperation with the Chair of Photogrammetry and Remote Sensing, two alternative versions of a photogrammetric method for crown studies of standing trees were developed and investigated. Photogrammetry allows for a non-contact measurement of 3D coordinates of stem, branches and shoot points on a tree. These data can be used for the delineation of the crown orthogonal projection and for the determination of the crown increment for a given period backwards. In this project, trees with heights of 20-23m from a 50 years old Scots pine high-pole stage stand were investigated.

With this method, field work for data acquisition can be accomplished by one person in about 10 minutes per tree, under ideal weather conditions. We used conventional digital cameras (3.3 and 5 Megapixels), with the option to work with either one or two cameras. In the first case, two cameras were fixed to a metal bar and mounted on a camera stand (tripod). The 3D coordinates of the projective centers were determined by measurements toward the focal tree. In the second case, nadir images of the crown periphery and oblique images of the tree stem and crown were acquired. Additionally, the coordinates of two reference points at the stem base were measured.

Photogrammetric image processing then was conducted using PhotoModeler Pro (<http://www.photomodeler.com>), a commercially available photogrammetric software package. The images were oriented relatively and a 3D model was measured. Beforehand, camera calibration had to be conducted, which also could be performed in PhotoModeler Pro. A tree crown projection can be delineated by 30 – 80 points, whereas processing time is not influenced significantly by the number of points. Absolute orientation of the 3D model can be achieved by means of the acquired coordinates of the projective centers in the first case and by means of distance and orientation with respect to the reference points in the second case. The coordinates of the crown points were exported after measurement and further processed using MS-Excel, MS-Access, ArcGIS (ESRI) or special visualization software.

The generation of a 3D crown projection model for one tree consumes about 1-4 hours for an experienced operator, additionally 1-2 hours for the delineation of the crown increment. The accuracy of the coordinates under optimal conditions can be estimated as about 1cm in horizontal direction and 1-4cm vertically. For this reason, the hitherto most accurate method for tree crown modeling was developed. It could serve also for:

- detection of trees slightly damaged by wet snow (small crown shift due to local exceeding of the plasticity limit of the stem)
- studying inter- or intra species concurrence between individual deciduous trees

1. Introduction

In forestry, crown width in different directions and crown orthogonal projection (COP) area are important parameters for the elaboration of competition indices (RÖHLE et al., 1985). To obtain a reliable value of the COP-area of an individual tree, the tradition for decades past in forest research studies was to make plumb-line measurements of a number of crown radii, the minimum ranging from 8 to 16, depending mostly on the crown shape (BAE et al., 2000; RÖHLE et al., 1985). The more irregular the crown shape is, the higher number of radii has to be measured to get accurate results of the COP-area. The precision of a plumb-line crown radius measurement is reported to be about 1-2 cm. (RÖHLE et al., 1985). However, achieving this precision and the huge work volume make the field data collection very time-consuming (ZÖHRER, 1967, in RÖHLE et al., 1985), expensive and exhausting, according to our own experience. To obtain 3D data of the crown, when studying crown volume or tree architecture, special instruments as hypsometer, terrestrial laser scanner, tachymeter or real-time kinematic GPS are required and usually used, with additional tremendous efforts for climbing on to trees or employing a lifting platform (PYYSALO, 2004). On the base of a literature review on some specialized applications we had the impression that in recent times the majority of remote sensing studies on forests are concentrated mostly on data taken from airborne laser scanning systems (LIDAR). Relatively few studies still deal with terrestrial images on tree crowns, such as the one from PYYSALO (2004), where he carries out one-image crown and tree parameters measurements on lateral photographs from two tree sides.

The present study aims at investigating the application of terrestrial stereo image processing for building 3D crown models, especially for obtaining some crown parameters like the COP-area and COP-increment on the base of very accurate 3 dimensional feature point measurements. Although method efficiency was not a first priority aim in this study, some attempts to improve this aspect of this technique have been also carried out. Two versions of the method have been tested and evaluated within a PhD dissertation dealing with individual and collective tree stability against wet snow load after delayed selective thinning (IVANOV, in preparation).

2. Materials

2.1 Test area

Individual trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from a recently thinned 50-years old high-pole stage stand, located in western Bulgaria, served as study object. The trees are 20-23 meters high, with widest crown part situated at about 14-17 meters above the ground. In spring 2003 totally 41 trees have been studied by method version 1 and in spring 2005 totally 26 trees by version 2, some of them being the same in both years.

2.2 Instruments and software

Version 1 (2003)

Two digital cameras (Nikon Coolpix 900 and Nikon Coolpix 950) were mounted on a fixed base with a water-level to maintain it horizontal (Figure 1) and on a camera stand, forming this way a capturing device (Figure 2, right). Crown images are taken from ground with a nadir view which was made easier by the special form of the lenses by this camera type. Maximum image size, 2048x1536 pixels, was utilized for image acquisition.



Figure 1. Two digital cameras, fixed on a metal bar (water level in the centre). Behind – the field carrying case

Version 2 (2005)

One digital camera Nikon Coolpix 5000 has been used to take lateral images of a whole tree (stem and crown) and crown images with a nadir view. Again maximum image size, 2560x1920 pixels, was utilized during image acquisition. For both method versions during the field work the camera was manually focused to eternity. For camera calibration and image processing we used special software – Photo Modeler Pro (Eos Systems Inc., <http://www.photomodeler.com/>), digital photogrammetric software, suited for processing of close range imagery with convergent camera station configuration.

3. Method

3.1 Image capture location, field measurements and types of images

Version 1

Images have been taken from two locations under the tree crown of each tree, i.e. 4 images per tree (Figure 2, left, Figure 3). For both device positions, additional measurements were carried out in order to reconstruct the coordinates of cameras stations afterwards, needed for absolute orientation (Table 1). The distance between both mounted cameras is known from the beginning, as they were fixed on the metal bar.

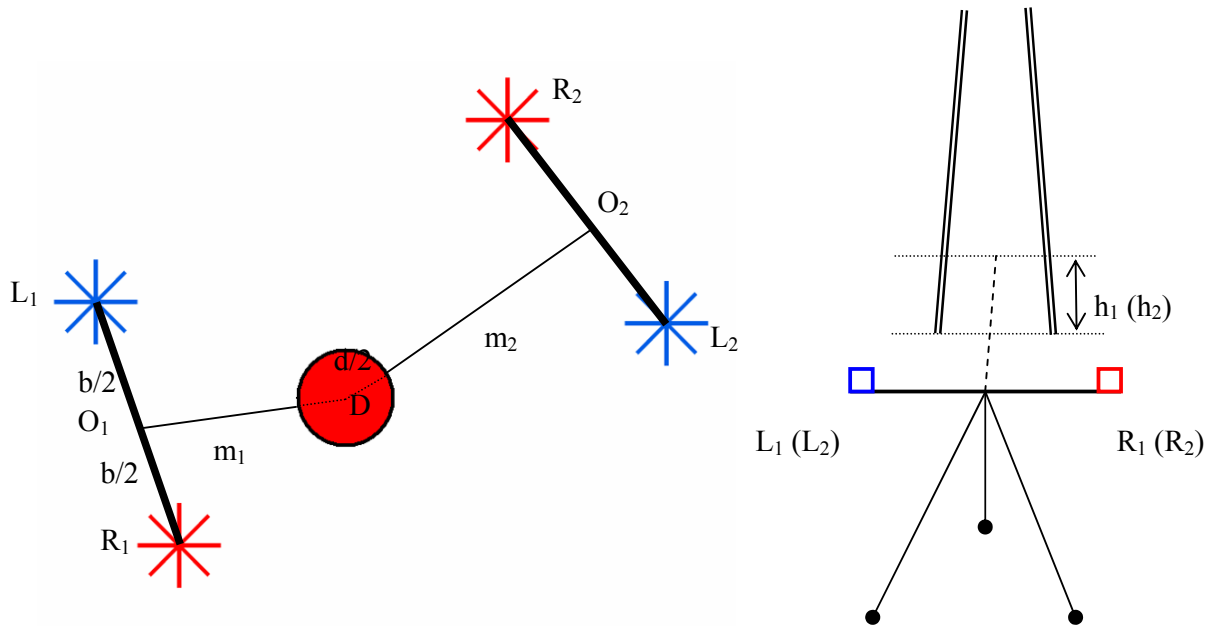


Figure 2. Left – camera stations (view from above). L_1 , R_1 (L_2 , R_2) – left and right camera position at the first and at the second capture device location. O_1 (O_2) – centre of the metal bar, m_1 (m_2) – distance from the point O_1 (O_2) to the tree stem. Red circle – tree base cross section. Right – the capturing device (two cameras on a metal bar on a stand, lateral view) and its position toward the focal tree.

Table 1. Additional field measurements by version 1

Height of the metal bar toward the stem base level, estimated precision $\pm 10\text{cm}$	$h_1; h_2$
Azimuth of the bar centre toward the stem axis, precision $\pm 1^\circ$	$O_1 \rightarrow D; O_2 \rightarrow D$
Azimuth of the left camera to the right camera, precision $\pm 1^\circ$	$L_1 \rightarrow R_1; L_2 \rightarrow R_2$
Distance from the bar centre to the tree stem, estimated precision $\pm 2\text{cm}$	$m_1; m_2$

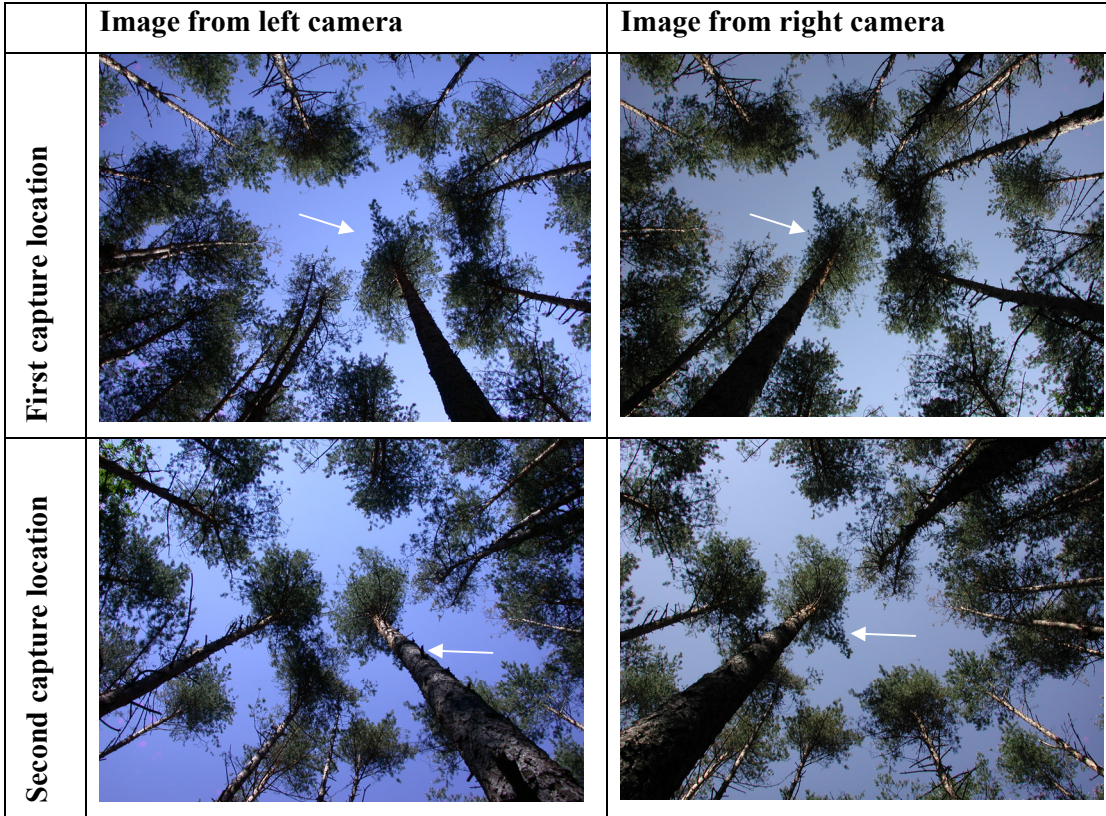


Figure 3. Nadir view images from both camera stations. The focal tree is pointed out.

Version 2

In this case, no field positioning of the camera stations had to be performed. For the determination of scale and absolute orientation, the relative position of one reference point, close to the stem base, was measured (Table 2).

Table 2. Additional field measurements by version 2

Reference	Measurements
Plumb-line axis with special points on it (Figure 10), visible on lower stem images	<ul style="list-style-type: none"> • azimuth (precision $\pm 1^\circ$) and distance from the plumb-line axis to the focal stem base axis (estimated precision $\pm 2\text{cm}$); • relative height of one special point toward the focal stem base (estimated precision $\pm 2\text{cm}$); • distance between every two special points (precision $\pm 0.5\text{mm}$) on the plumb line (Figure 10), measured or checked only once a day

Three types of images have been made – lower and upper stem images and crown images (Figure 5). The lower and upper stem images have been captured from at least 3 (better 4) freely selected locations from only one tree side, in such a way that the angle between the outlying camera stations and the stem axis as vertex is as close as possible to 90°, in order to achieve an optimal camera network design (Figure 4). The tree stem should be situated in the middle of the image. This is important in the first place for the accuracy of the point coordinates used for scale determination and partial transformation of the 3D model. There should be at least 20% longitudinal overlap (common area captured) between the lower and the upper stem images, in order to enable tie point measurement and to allow a common processing of all images in a bundle adjustment. The crown images were made using the maximum optical zoom of the camera (4x). The position of projective centres is approximately under the crown edge, where the tips of the longest branches should be projected orthogonally on the horizontal plane, or slightly lateral. The crown is taken in sections by successive images clockwise or counter-clockwise. The number of crown images varies from 5 to 7, maximum 10 per tree, according to the crown dimensions.

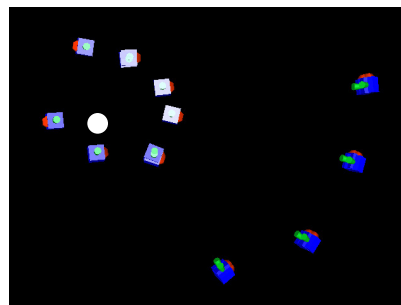


Figure 4. Camera stations (oblique view from above) – for acquisition of crown photos around the tree stem (left) and for acquisition of lower and upper stem photos (right)



Figure 5. Types of images in version 2 – lower stem image (left), upper stem image (middle) and crown image (right). The focal tree is pointed out.

3.2 Weather requirements

Images must be taken only at perfect wind calm, both in the region of the crown (where are the shoots) and at the stem base (where is the reference scale plumb-line). The youngest shoots rock slightly at the least breath of air. We would recommend taking images of the crowns at sunny weather, having a blue sky as background for a good contrast between crown and sky.

3.3 Data processing and workflow

3.3.1 Camera calibration

The first step after collecting all the field data (images and measurements) is camera calibration. This could be done of course also before the field work and is required in order to

determine highly accurate the interior orientation of the used camera at high accuracy, i.e. the focal length (camera constant), the coordinates of the principal point and the parameters for correction of the lens distortion. The cameras have been calibrated by means of the Camera Calibrator, a user friendly built-in wizard of Photo Modeler, which allows the calibration of one camera within 1 to maximum 2 hours. In versions 1 and 2 the cameras have been calibrated being manually focused to eternity, in version 2 the camera has been calibrated additionally for the maximum optical zoom (4x), which was used for the crown images.

3.3.2 Image orientation and generation of the 3D model

The generation of a 3D model requires the relative and absolute orientation of the images and measurement of the positions of features in each image. Relative orientation means the determination of the projective centres of the images in an arbitrary spatial coordinate system by measurement of at least 5 homologous points, while absolute orientation means their orientation in a certain object coordinate system, which can be achieved by measurement of control points (points with known coordinates in both systems) (KRAUS, 2004).

In **version 1** and version 2 the common points for the relative orientation of the crown images have been marked on the tips of shoots (buds) or branch stubs.

Version 2

The stem bark pattern or branch stubs of the focal tree and of its neighbours can be used as common points between the stem images. The easiest way to work was to mark and reference common points between the lower stem images first and then to calculate the image orientations, which is done by bundle adjustment in Photo Modeler. Then one by one the upper stem images were added, using the overlapping area between them for tie point measurement. The crown images are connected through common points and processed separately. Following the capture succession turned out to be the best way of practice. The more difficult operation was the connection of the stem and the crown images. The operator should have a very good 3D orientation feeling and the ability to recognize identical irregular shaped objects, captured under different angles and in different scales.

3.3.3 Crown periphery delineation

Version 2

The location of image capturing guarantees that the visible points (shoot tips) on the crown periphery (in the contrast zone with the sky) belong to its widest part on the correspondent tree side and reflect exactly the COP. For each crown photograph this is valid only for the zone between the stem and the camera station (Figure 6). The feature point is first marked there and then it is referenced, when possible, on the other images. There is a possibility to check visually the suitability of these points for describing the crown periphery (Figure 7).

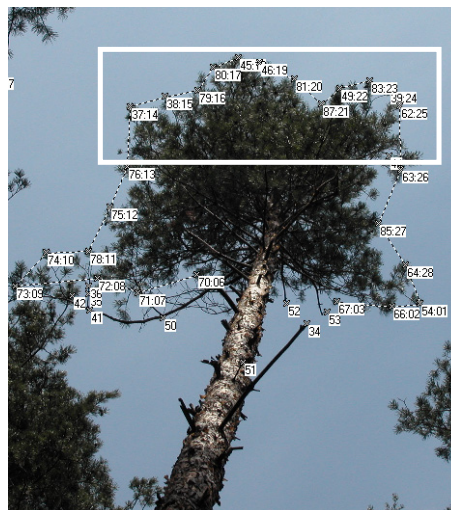


Figure 6. Usable zone of a single crown image for initially marking of a feature point

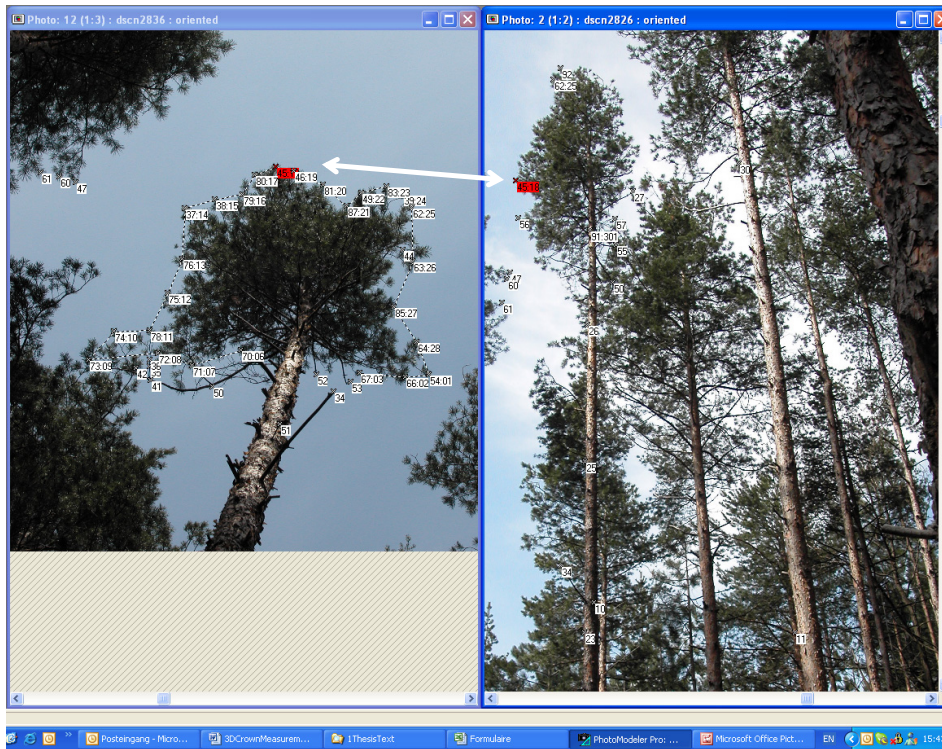


Figure 7. Suitability of the crown feature points to describe the COP. The red point is obviously situated in the widest part of the crown on this side (version 2)

Version 1

By this version, the same rules for crown periphery delineation as in version 2 had to be respected (Figure 8).

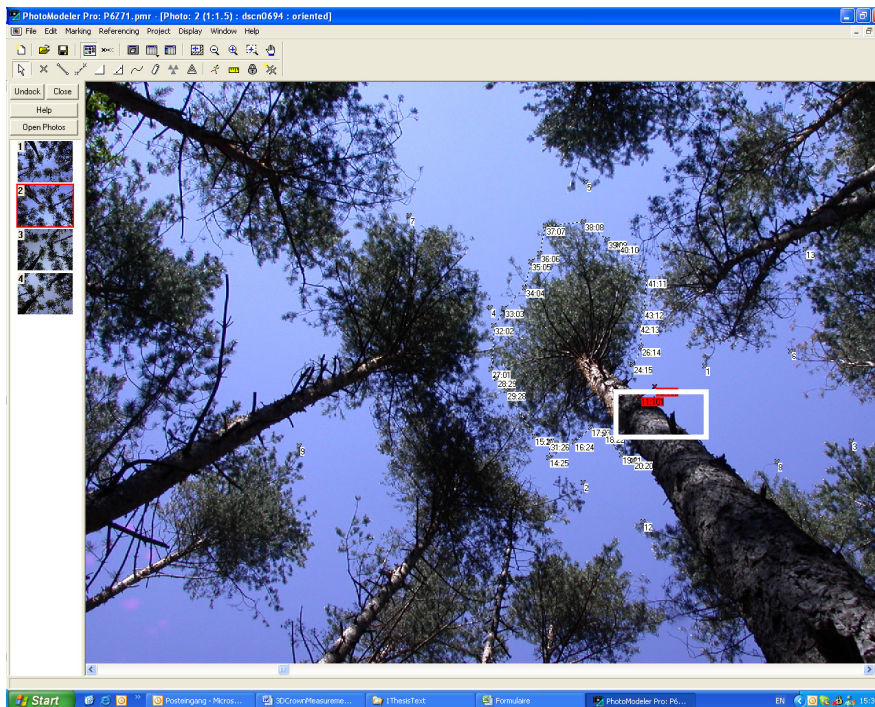


Figure 8. View of a tree crown with delineated periphery. Points in red (101, 102) served for the improvement of point coordinate transformation (version 1)

3.3.4 Crown increment delineation

The crown radial increment could be delineated only by **version 2**, thanks to the zoom and the higher image resolution (Figure 9, left). The challenge was to identify the limit (pseudowhorl) between contiguous shoots (annual twig increments). This appeared to be relatively difficult but possible. On the one hand, the field observation showed that needles persist on the twigs by these study trees for 2 or 3 years. On the other hand, the limits between two shoots appear on the image usually as dark black dots along the twig central or lateral axis. On this basis we could successfully delineate the crown radial increment for a period of 3 years backwards for the whole crown periphery, what actually fitted the purposes of the dissertation (determination of the COP increment for 3-years period backward) in the frame of which the method was developed. By higher image resolution and/or bigger amount of zoom, the identification could be done even more precisely.

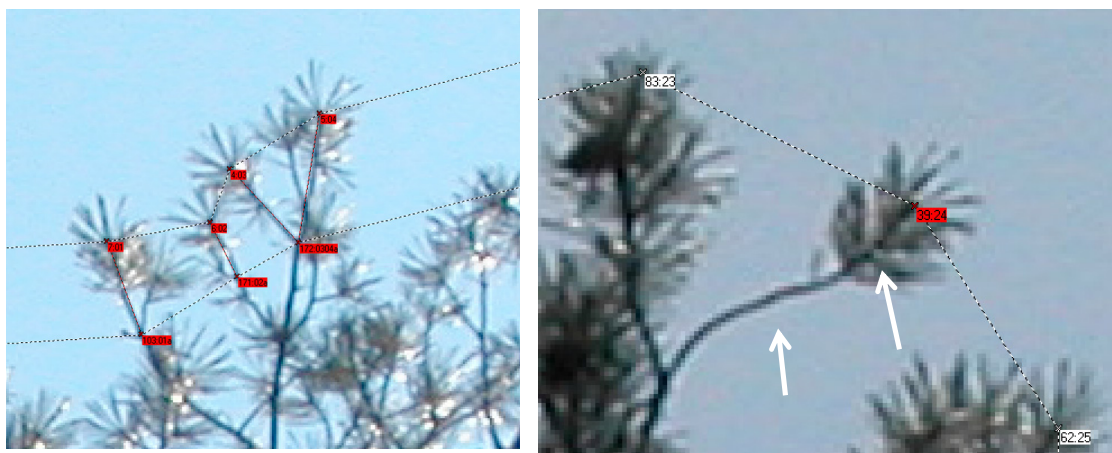


Figure 9. Crown increment delineation for 3-years backward period (left). Limit (pseudowhorl) between two annual increments (right)

3.3.5 Determination of scale, 3D model transformation

Once all the images of a focal tree were connected by homologous points in a so called project (in Photo Modeler) and successfully processed (relatively oriented in an arbitrary coordinate system), we obtain a 3 dimensional model of the crown periphery. In order to achieve a realistic model, it should be scaled and oriented absolutely.

Version 1

Determination of scale and orientation of the model take place in this method version simultaneously through a point coordinate transformation, after exporting the 3D point coordinates from the Photo Modeler project. For this purpose we used the real image capture positions (camera stations, see 0 and Figure 2, right) as target points and the coordinates of the same points from the non-oriented and non-scaled 3D model in the arbitrary coordinate system as source points.

Version 2

The determination of scale and the partial transformation of the model in this method version were performed in Photo Modeler, before exporting the 3D model, due to the fact that points with known coordinates exist in the images.

The scale is added through two of the special reference scale points on the plumb-line (Figure 10). The 3D model was partially transformed by



Figure 10. Plumb-line with some special points at the focal tree base

passing the vertical Z-axis of the right handed coordinate model system through the special points which are closer to the ground. The correct rotation of the model in the horizontal X-Y plane was performed after export of the 3D model and introduction of the real crown orientation to the cardinal points. This was done by transformation of point coordinates in Excel (MS Office). By this transformation, the Z-coordinates are „shifted” so that the base of the tree can be at the zero level (i.e. the tree base lies in the horizontal plane).

4. Results

4.1 Time investment

To mark the feature points by the crown periphery delineation and create the 3D model, we invested about 1 hour by version 1 and 3-4 hours by version 2. For crown increment delineation by version 2 some 1-2 hours were needed.

4.2 Method applications

4.2.1 Crown periphery description

In **version 2**, the crown periphery was described with an average of 51 points/tree (min 30, max 90).

In **version 1**, the crown periphery was described on some sides more roughly, in view of the smaller number of crown photos, the biggest distance to the object (no zoom) and the smallest image resolution (Figure 8). Nevertheless, in the majority of cases it was possible to delineate the crown periphery well with an average of 26 points/tree, the absolute minimum was 15 points. The number varies according to crown dimensions from 17 to 36 points/tree.

4.2.2 3D crown periphery model and COP-area

The 3D model of the crown, represented by the line segments that connect the crown feature points, can be visualised using the 3D viewer of Photo Modeler (Figure 11). Additionally, it is possible to export the 3D model to VRML format for visualization using other software. The COP-area (Figure 12) has been calculated as the area of an n-sided polygon in ArcMap (ESRI).

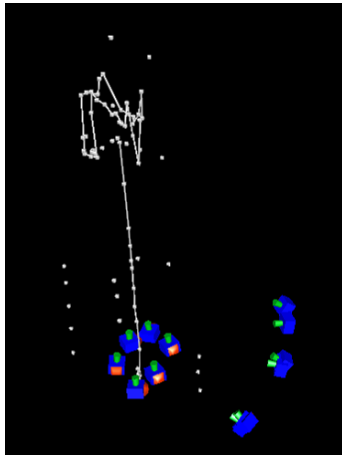


Figure 11. 3D tree model - crown periphery and stem (side view, snapshot from Photo Modeler 3D viewer)

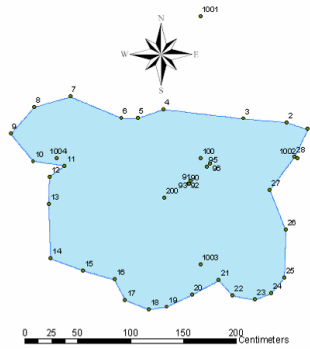


Figure 12. COP-area (ArcMap)

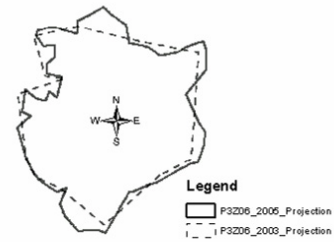


Figure 13. Comparison between COP-areas of one and the same tree from both versions. Version 1 – dashed line, version 2 – thick line.

4.2.3 Comparison between COP-areas from version 1 (2003) and version 2 (2005)

In only one case, by one and same tree, it was possible to identify three identical feature points (tips of dead branches) in both versions, having the same real 3D coordinates. We took the coordinates of those points from the scaled and oriented 3D model from version 2 and used them to scale and orient the 3D model by version 1 directly in Photo Modeler (Three Points Scale and Rotation). The comparison between both COP-areas can be estimated on Figure 13. We consider the results quite satisfying.

4.2.4 COP increment for 3-years backward period

The COP increment for 3-years backward period was calculated as the difference between the COP-area in 2005 and the COP-area in 2002, the latter being calculated again as the area of an n-sided polygon in ArcMap (ESRI) (Figure 14).

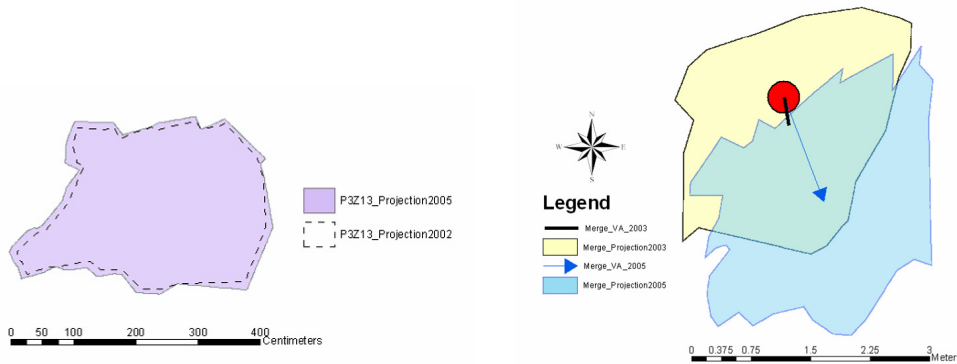


Figure 14. COP-increment

Figure 15. COP of a tree in 2003 (yellow) and 2005 (blue). The red circle is the crown base cross section

4.2.5 Snow damages detection

By comparison of two COPs from 2003 and 2005, we could discover some little crown shifts due to plasticity deformation of the tree stem under snow load (Figure 15).

4.3 Coordinate accuracy of crown feature points

In general, in our stereo measurements the accuracy was highly influenced by the stereo angle. As the captured object is situated far from the camera stations and the latter are relatively close to each other, this often resulted in very poor stereo-angles of the crown feature points by **version 1** (4-8° on average, and up to 10-12° in the best cases, by distances between the capturing device and the focal tree stem bigger than 1.5 meters). **By version 2**, the average stereo angle of the crown feature points was 19° (average minimum 11°, average maximum 38°). Compared to the marginal average stereo angle of 15°, recommended by Photo Modeler (EOS SYSTEMS, 2000), our results by version 2 already cover the minimum reliability requirements. As a rule, for bigger crowns the stereo angle and respectively the coordinate accuracy, increases. The highest values of stereo angle could be obtained for points which could be referenced also on some upper stem images. We have to stress that the points, used for determination of scale and orientation in the 3D model in version 2, had excellent quality parameters (stereo angles from 45 to 88°).

Version 1

Since the 4 source points, used for the coordinates transformation (the real camera stations), lie almost in one plane and since there are very little differences (about 0.5 m) in one of their coordinates (in the vertical direction), little measurement errors in the relative height of the metal bar toward the stem base result in relatively big displacements (transformation errors) of the crown feature points. In order to minimize these errors and make the transformation process more stable, we introduced a 5th source point into the transformation matrix - one point which is situated on the stem of the focal tree, at the base of a branch stub (Figure 8, the red points). This point has additionally the advantage to have the most accurate coordinates of all points in the 3D model, being closer to the cameras and thus having a bigger stereo angle. It has been used for manual fitting of the transformation (changing slightly the Z-coordinate of the cameras from one of the capturing device position and observing the corresponding changes by the COP), knowing that in an orthogonal projection this point should be situated at a distance from the tree axis of half the diameter of the tree at the corresponding height. The diameters of trees at this height were taken from data about the stem swelling of trees from the same forest stand of similar dbh (diameter at breast height) to the focal tree. Where possible, a second point on a branch stub of the same whorl but on the opposite side would facilitate the manual fitting...

In this method version, a direct accuracy assessment cannot be carried out since there are no known points in the images (i.e. it is not possible to add scale and rotate the 3D model in PhotoModeler), which could serve as a reference. However, after transformation of the point coordinates, we selected three points with good quality parameters for one tree project and used them for an approximate absolute orientation of the 3D model in Photo Modeler (3 Points Scale and Rotation). Then we got about the accuracy:

- 1-10 cm in the horizontal X-Y plane
- 8-17 cm in the vertical direction (Z-axis)

However, these figures do not show exactly the same as obtained in version 2. They rather give an idea of the accuracy in a scale which is influenced additionally by the accuracy of the coordinate transformation (see 0). Nevertheless, they correspond greatly to those we obtained from the 3D model of version 1, scaled and oriented using coordinates of identical points from version 2 (see 0):

- 1-8 cm in the horizontal X-Y plane
- 3-11 cm in the vertical direction (Z-axis)

Version 2

The accuracy of the coordinates of each point is calculated directly by Photo Modeler during bundle adjustment. In our case, for optimally located cameras stations, after adding the scale and transformation of the model, for the crown feature points we obtained an accuracy in object space of $\pm 0.5 \div 1.5$ cm for X and Y coordinates and $\pm 1.0 \div 4.0$ cm in Z direction, respectively. These figures describe the dimensions of an ellipsoid, where the real point coordinates fall into with a probability of 95% (EOS SYSTEMS INC, 2000) and are a criterion for the accuracy of image measurements.

4.4 Error analyses

Various parameters have an influence on the accuracy of photogrammetric measurements, namely the interior orientation parameters of the camera, the accuracy of feature point measurement, the precision of the field measurements, and the photogrammetric network configuration, to mention the most important ones.

Version 1

The potential error sources in this method version are, on the one hand, the errors in the reconstructed camera stations coordinates, since the field measurements, carried out for this purpose (Table 1) are far from being enough precise. On the other hand, the second error source is the camera stations coordinates in the 3D model.

In this method version, the accuracy assessment is made by a transformation software tool, developed at the Institute of Geodesy and Photogrammetry (REMONDINO, not published). The applied transformation is a 7-parameter 3D similarity, according to the following formula:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

where:

- X, Y, Z are the object coordinates in the new XYZ-coordinate system
- X_0, Y_0, Z_0 are the coordinates of the origin of the xyz-system
- m is the scale factor between the xyz- and the XYZ-coordinate system
- R is the matrix of the spatial rotation from the xyz-system into the XYZ-system, consisting of 3 rotation angles.

By using at least 4 control points with known coordinates in both systems, we obtain a redundancy which allows for the computation of standard deviations for the point coordinates, which is the only means in order to assess point accuracy in this case.

The mean standard deviation of X and Y coordinates after the point coordinate transformation for all 3D models was 9 cm, ranging from 5 to 18 cm

Version 2

Additionally, we can identify two main error sources which were not taken into account by the accuracy analysis, calculated in Photo Modeler:

- Errors due to scale determination

The errors from the added scale are reflected proportionally to all other coordinates of the 3D model. Unfortunately, we got the poorest accuracy in Z-direction, which has been used for scaling. As we have in the model 3 reference segments with known lengths, measured with a precision of ± 0.5 mm (Figure 10), we can use them to check directly the errors due to the scale

adding. The relative difference (%) between the length of a line segment in the scaled project and its real length ranges from -0.2 to 3.3%, being 0.8% on average. Thus, average relative length difference of less than 1% results in a maximum error of less than 5 cm for a crown width of 5 meters, and in a maximum error of less than 1 mm for a crown radius increment for 3-years period of 10 cm.

- Errors due to model transformation

Using the special points on the plumb-line for rectifying the 3D model helped us afterwards using directly the (x; y) coordinates of the crown feature points as their orthogonal projection on the horizontal plane, thanks to the perpendicularity of the plumb-line (corresponding to the Z-direction) to the horizontal plane. Errors in the coordinates of the special points in the 3D model lead to crown feature points projection on a plane which is not exactly horizontal. We found out that for the special points which have not been used for partial transformation, the deviation from the introduced „vertical” line are in the range of 3mm for 50 cm line segment length. For an average real distance of 15m from the camera station to the crown feature point, the latter results in deviation of about 9cm of the introduced Z-axis from the real perpendicular line, raised from the ground through the same point. In this case we would have an angle α of 0.34° between the projection plane and the horizontal plane (Figure 16), which could lead to underestimation of line segment lengths (distances between two successive crown feature points) and of the COP-area depending on the cosine of the angle between both planes. Since the angle is very little and therefore cosine is close to 1 ($\cos 0.34^\circ = 0.99998$), the biggest possible underestimation of line segment lengths and of the COP-area is less than 1% of their real values.

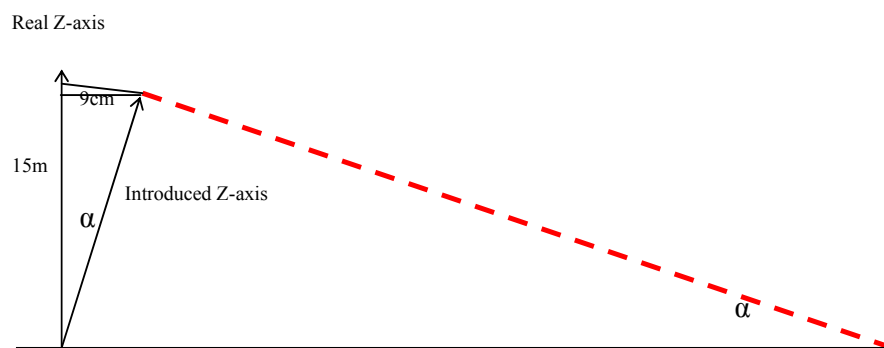


Figure 16. Difference between the real horizontal plane (thick line) and the model projection plane (dashed line) due to the partial transformation. The sketch is not in a real scale, angle α being exaggerated.

5. Discussion

About stereo crown measurements PYYSALO (2004) states that „A three dimensional model [of a tree crown] could have been extracted by traditional stereo imaging procedure. Reason for not to do that is to keep imaging procedure simple and efficient. Stereo measurements also require common points for relative orientation and known points for outer orientation. With deciduous trees, these points were difficult to find.” We could show by both versions that it is possible to find common points for relative orientation and by version 2 to have known points for absolute orientation with one coniferous specie. We haven’t tried yet to obtain by the same procedure a 3D model of deciduous species, but we do not see any problem to do this, if we take photos when trees are without foliage. We think that the imaging procedure by this method, especially version 2, is simplified at maximum. Learning how to capture images in the field takes about 2 hours, getting familiar with Photo Modeler

and learning with a little, especially created for this purpose „User manual”, how to create projects of 3D tree crown models took to our assistant-operators 3-5 days.

The crown periphery has been described with a sufficient number of points by both versions, although in version 2 it has been even „over-described”. By version 2 the biggest challenge was to „translate” the scale from the lower part of the tree to its crown. This was successfully done thanks to the camera network design (Figure 4). The new method allows also the distance measurement of crown increment for a given period of time backwards by standing coniferous trees. Furthermore, it seems possible to use this method for studying inter- and intra species concurrence between individual deciduous trees.

5.1 Comparison between versions 1 and 2

Actually, version 2 was an attempt to improve version 1, by changing completely the principles for scaling and for orienting the model (directly adding the scale and absolute orientation in Photo Modeler in stead of coordinate transformation) in order to overcome the weak point of version 1, namely the imprecision by the field measurements for the camera stations reconstruction. Although a bigger amount of images has to be processed, version 2 gives very accurate crown feature point coordinates. Field measurements are reduced to the minimum and can be performed more precisely; camera stations are freely selected only depending on tree visibility. The 3D model provides additional information about the stem position. Version 1 was not appropriate for crown increment measurement, due to the accuracy, which is in the same range as the increment values.

5.2 Comparison between the new method (version 2) and the conventional forest practice (Table 3)

Table 3. Comparison between the new method (version 2) and the conventional forest practice

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> • it requires very little time investment for data collecting by suitable weather conditions (see 0) – about 10 minutes/per tree for taking photos and field measurements • it requires very few and simple field measurements • the main working instrument is a non-professional digital camera • it requires minimum professional skills for the work with the digital camera • it provides very accurate results about a lot of tree parameters • big measurement errors are completely excluded • raw data can be stocked and used later for other purposes 	<ul style="list-style-type: none"> • data processing is also relatively time-consuming, even for an experienced operator • precise crown periphery delineation is not possible in dense coniferous stands without canopy intercepts (at least 10-20 cm) between the crowns • special software for data processing is required

5.3 Comparison with other terrestrial imaging methods

We could not find other terrestrial imaging methods except the one of PYYSALO (2004). Comparison between his method and our method would in general show the superiority of

stereo measurements to one-image measurements, for instance regarding accuracy – PYYSALO reports to have maximum errors of vertical and horizontal one-image measurement of 40 cm. From practical point of view, it seems to us easier to take images of a tree in a real forest being not confined to a few possible and suitable image capturing locations. A 3D model of a crown provides naturally more detailed and reliable information about its COP. Unfortunately, we could not find a possibility for work automation by the 3D measurement procedure. Generally, the latter is quite possible, especially the automation of tie point measurements, but was not subject of the present study.

5.4 Ideas for further method improvement

Version 1 could be eventually improved by making the camera stations measurement more precise. By **version 2** the presence in the images of a second reference point near the plumb-line would improve the model orientation (the rotation around the Z-axis toward the cardinal points). Only the azimuth to the plumb-line axis should be additionally measured in the field. This will increase on the one hand the precision of the stem axis location. On the other hand, if the second reference point is positioned in the field in such a way that the azimuth to the first reference point is equal to 180° , this will allow the performance of the whole model transformation in Photo Modeler.

By the finishing of this article a new concept for a third method version was conceived, combining the advantages of version 1 and version 2 (working with only one camera, few field measurements, no direct but more accurate measurement of the coordinates of the projective centers, little number of images, only crown images, adding scale and orienting the 3D model directly in Photo Modeler) which should allow obtaining crown feature points with high accuracy (not more than ± 5 cm) and delineating crown periphery of one tree within about one hour. This third version has to be further investigated.

6. Conclusions

As far as we know, the method, developed in this study, is the first attempt to apply terrestrial stereo measurements on tree crowns for research purposes in forestry. After overcoming some basic difficulties, related with finding common points for relative orientation and known points for absolute orientation by version 2, the building of a 3D crown periphery model with very high coordinate accuracy has been successfully achieved. Therefore, we could state that:

- The new method outmatches the traditional forest practice in all aspects
- The new method outmatches the other terrestrial methods

Issues, related to 3D modeling of crowns of deciduous species or achieving work automation, remain as possibility for further method improvement and enlargement of its application.

Annexe 2. Désignation de l'éclaircie sélective

(document interne de la chaire de sylviculture de l'EPF de Zürich, 2002)

(0. Recherche de tous les candidats)

1. Recherche des arbres d'élites obligatoires

2. Choix des arbres d'élites en partant des arbres d'élites obligatoires

- en **optimisant** les critères suivants :
 - position sociale (si possible dominante)
 - stabilité
 - vitalité
 - qualité
 - $d_{1,3}$ atteint
 - essence
 - répartition et distances
- en tenant compte de la desserte fine présente
- normalement à l'espace final (voir tableau ci-dessous)
- au cas où il n'y a pas assez de candidats pour une sélection sur l'ensemble de la surface, on peut :
 - désigner le meilleur arbre de remplacement comme arbre d'élite
 - renoncer à un arbre d'élite
- le marquage permanent des arbres d'élites peut être opportun

3. Désignation supplémentaire des arbres d'espèces rares à favoriser

4. Détermination et désignation des concurrents les plus forts et des autres concurrents directs

conformément aux effets escomptés de l'intervention (un arbre d'élite peut dans certains cas ne pas avoir de concurrent à éliminer)

5. Détermination et désignation des arbres à éliminer accessoirement:

- Fouettards
- porteurs de maladies dangereuses directement transmissibles

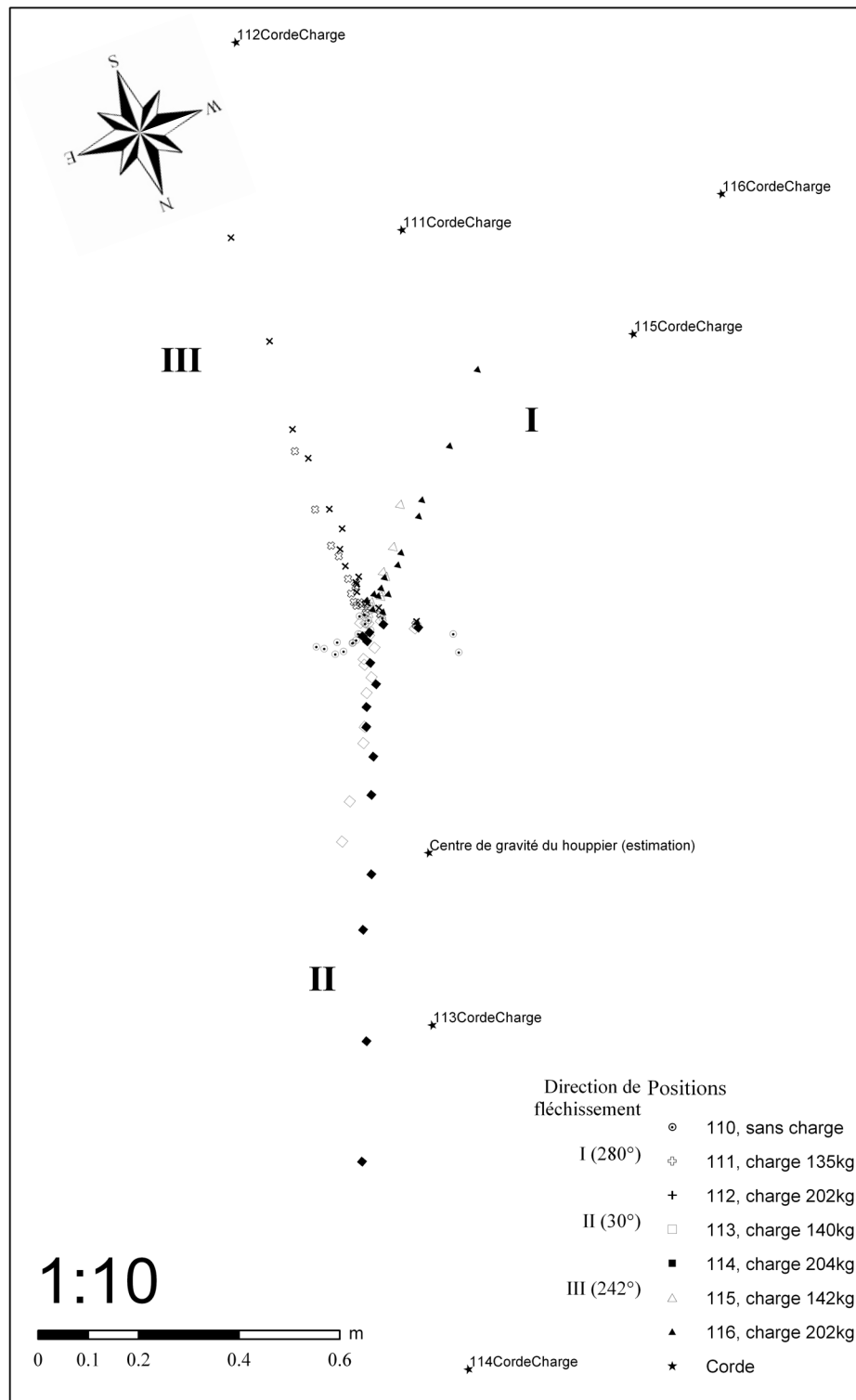
6. Mesures subsidiaires (directement lors de l'exécution):

- intervention en faveur du peuplement accessoire
- élimination des lianes
- correction de lisières

Essences	N/ha final	Espacement final optimal*	Espacement final minimal
ép, sa	200 à 250	7	4
hê, fr, er, mer, ch'rg	100 à 150	9	5
ch'p, ch'r	80 à 100	11	5
pin's	150 à 200	7.5	5
mé	100 à 130	9	5
dou	100 à 150	9	5

* L'espace final optimal donné résulte de l'utilisation totale de la surface du peuplement (ex : ép 250/ha). Lors de nombre final de tiges plus faible, il en résulte des espacements quelque peu plus grands.

Annexe 3. Projection orthogonale de la ligne élastique (arbre K7)

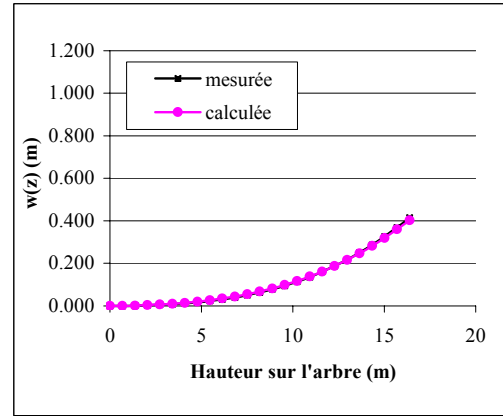
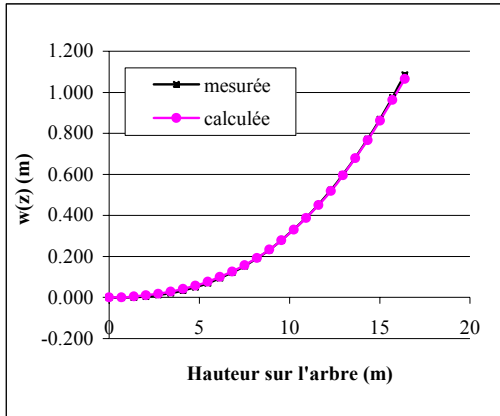


Annexe 4. Calcul des moments en fonction de la position initiale

	<p>δ – flèche e – excentricité G_n – poids propre de la section n M_n – moment par rapport au centre de gravité de la section n w_n – déplacement horizontal du centre de gravité de la section n α – angle d’inclinaison de la tige</p> <p>Pas d’inclinaison de la tige :</p> $M_n^{charge} = P_{charge} (\delta + e - w_n)$ $M_n^{houppier} = P_{houppier} (\delta - w_n)$ $M_n^{poids propre} = (w_{n-1} - w_n) \cdot (G_{n-1} + G_{n-2} + \dots + G_1) + M_{n-1}$
	<p>Inclinaison de la tige et fléchissement <u>dans le même sens</u></p> $M_n^{charge} = P_{charge} (\delta + e + x_n - w_n)$ $M_n^{houppier} = P_{houppier} (\delta - w_n)$ $M_n^{poids propre} = (w_{n-1} - w_n + x_n - x_{n-1}) \cdot (G_{n-1} + G_{n-2} + \dots + G_1) + M_{n-1}$
	<p>Inclinaison de la tige et fléchissement <u>dans le sens opposé</u></p> $M_n^{charge} = P_{charge} (\delta + e - x_n - w_n)$ $M_n^{houppier} = P_{houppier} (\delta - w_n)$ $M_n^{poids propre} = (w_{n-1} - w_n + x_{n-1} - x_n) \cdot (G_{n-1} + G_{n-2} + \dots + G_1) + M_{n-1}$

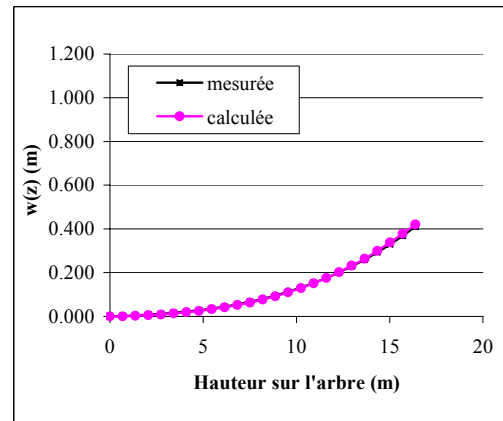
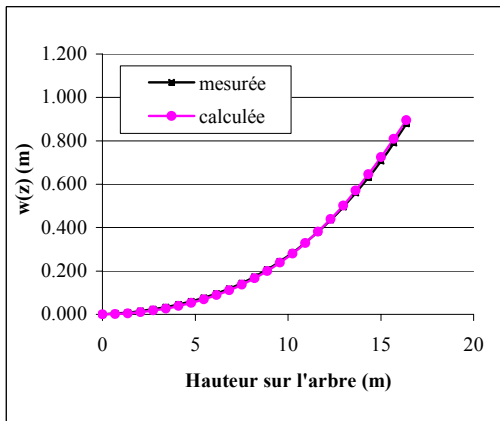
Annexe 5. Calcul du module E (essai de terrain)

Arbre K7. Profondeur d'encastrement (PE) 0m.



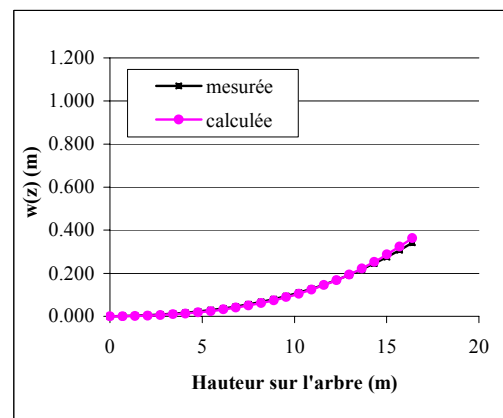
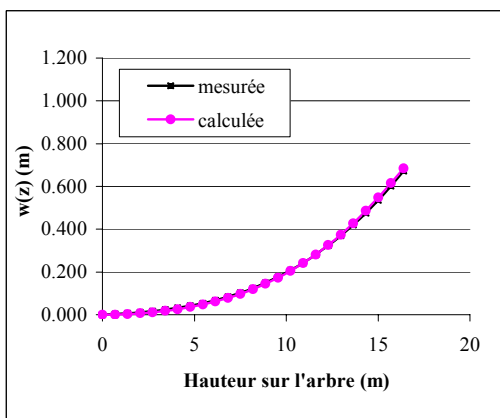
Position 114

Position 113



Position 112

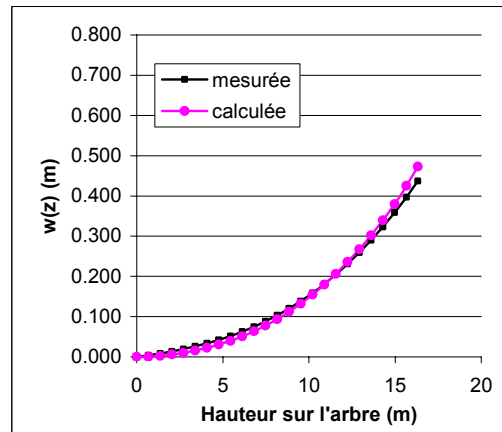
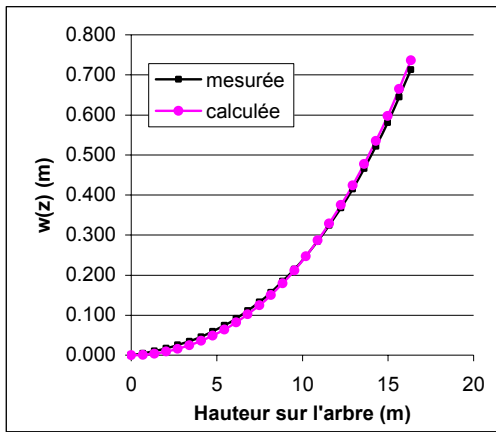
Position 111



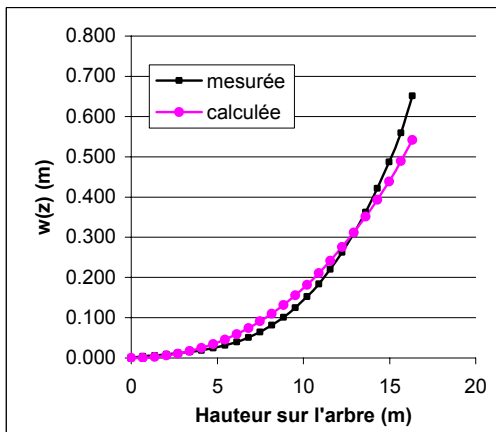
Position 116

Position 115

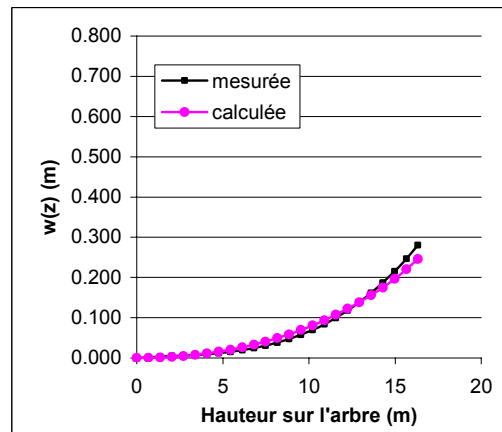
Arbre K4. Profondeur d'encastrement (PE) 0m.



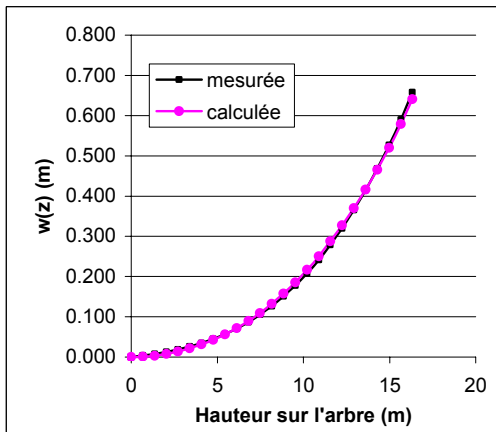
Position 118



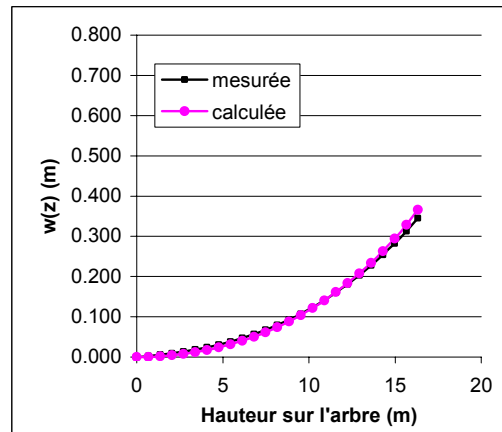
Position 117



Position 120



Position 119



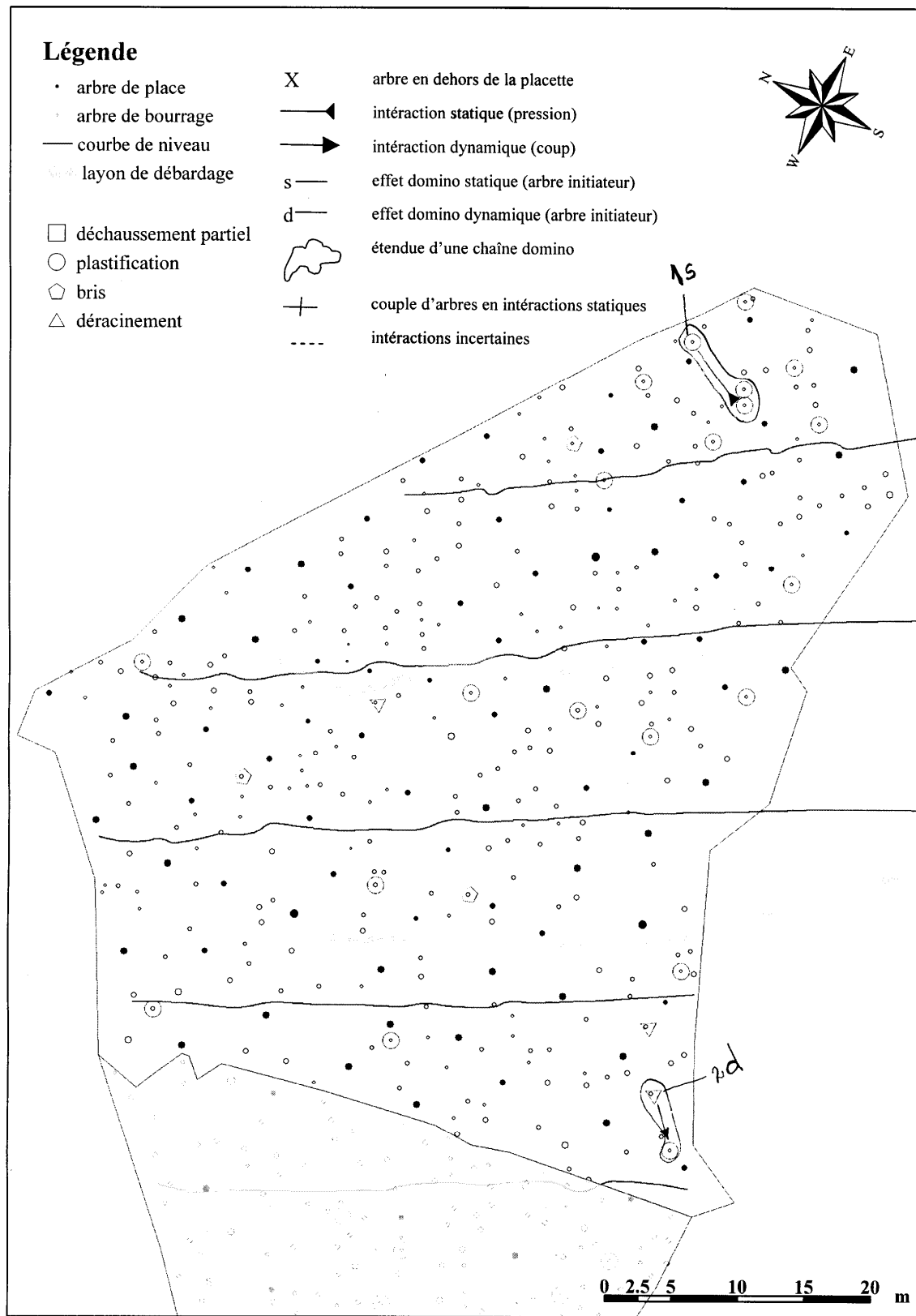
Position 122

Position 121

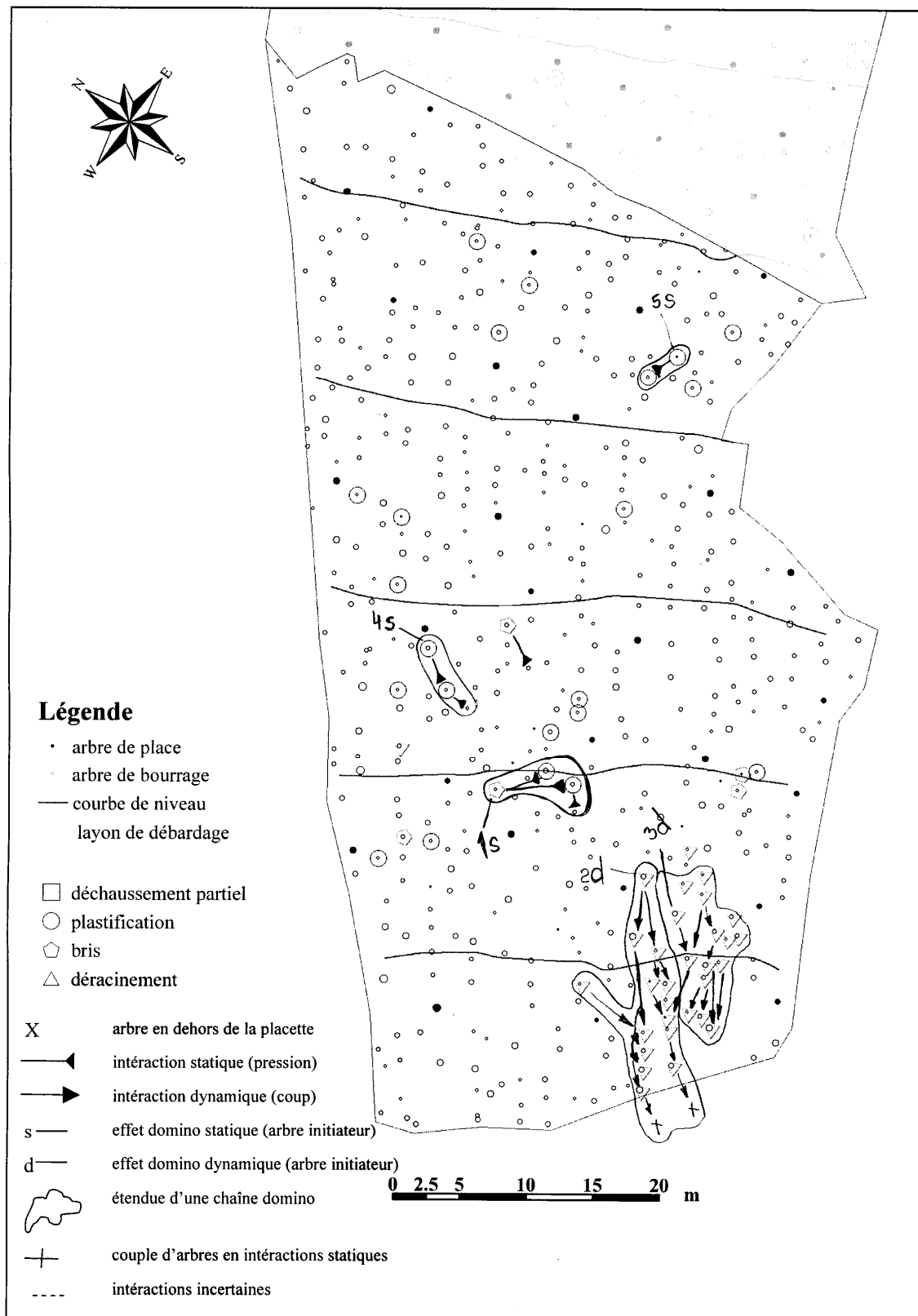
Annexe 6. Dégâts de neige (2005) - genre et répartition spatiale



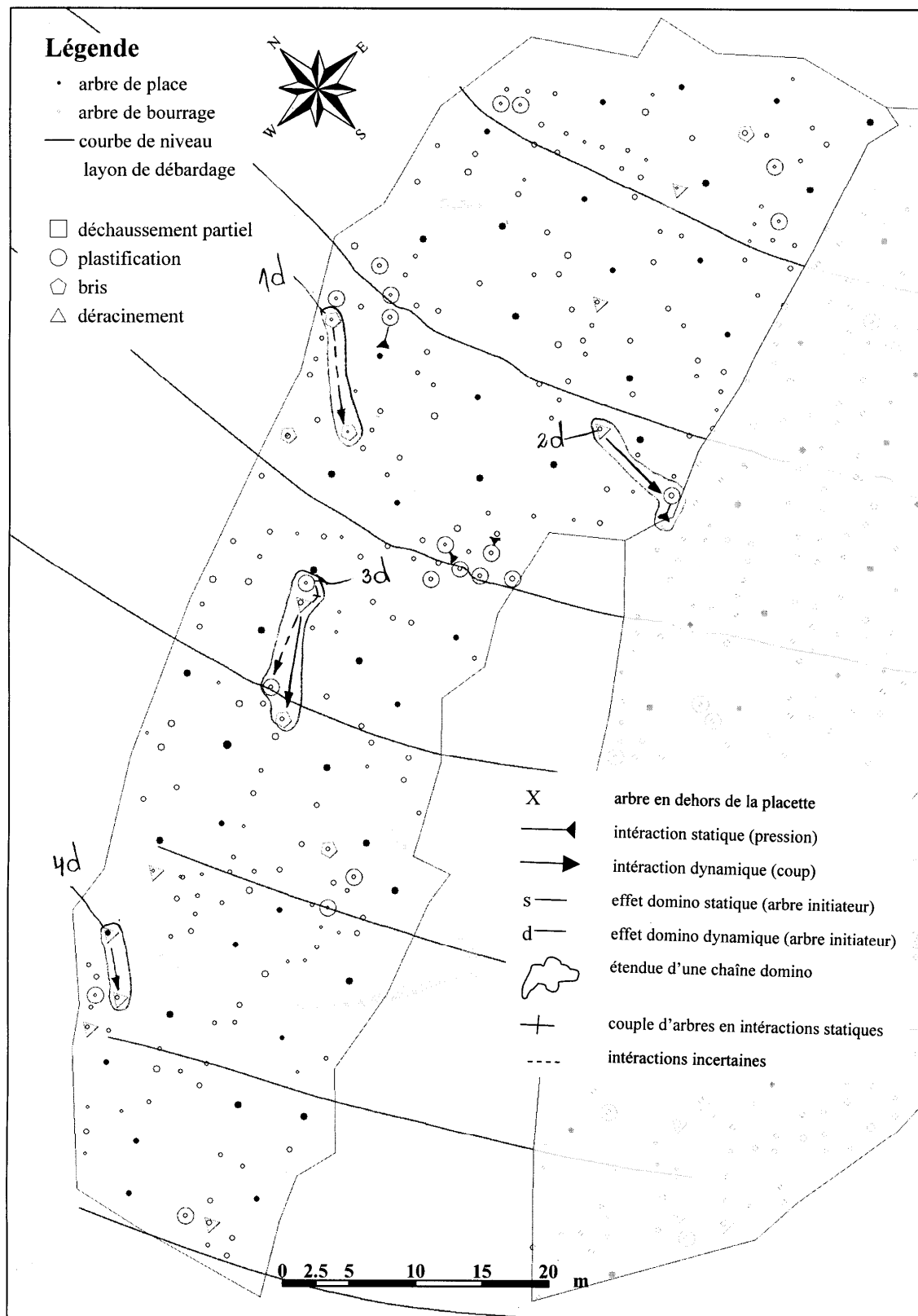
Dégâts de neige en 2005 – placette 1



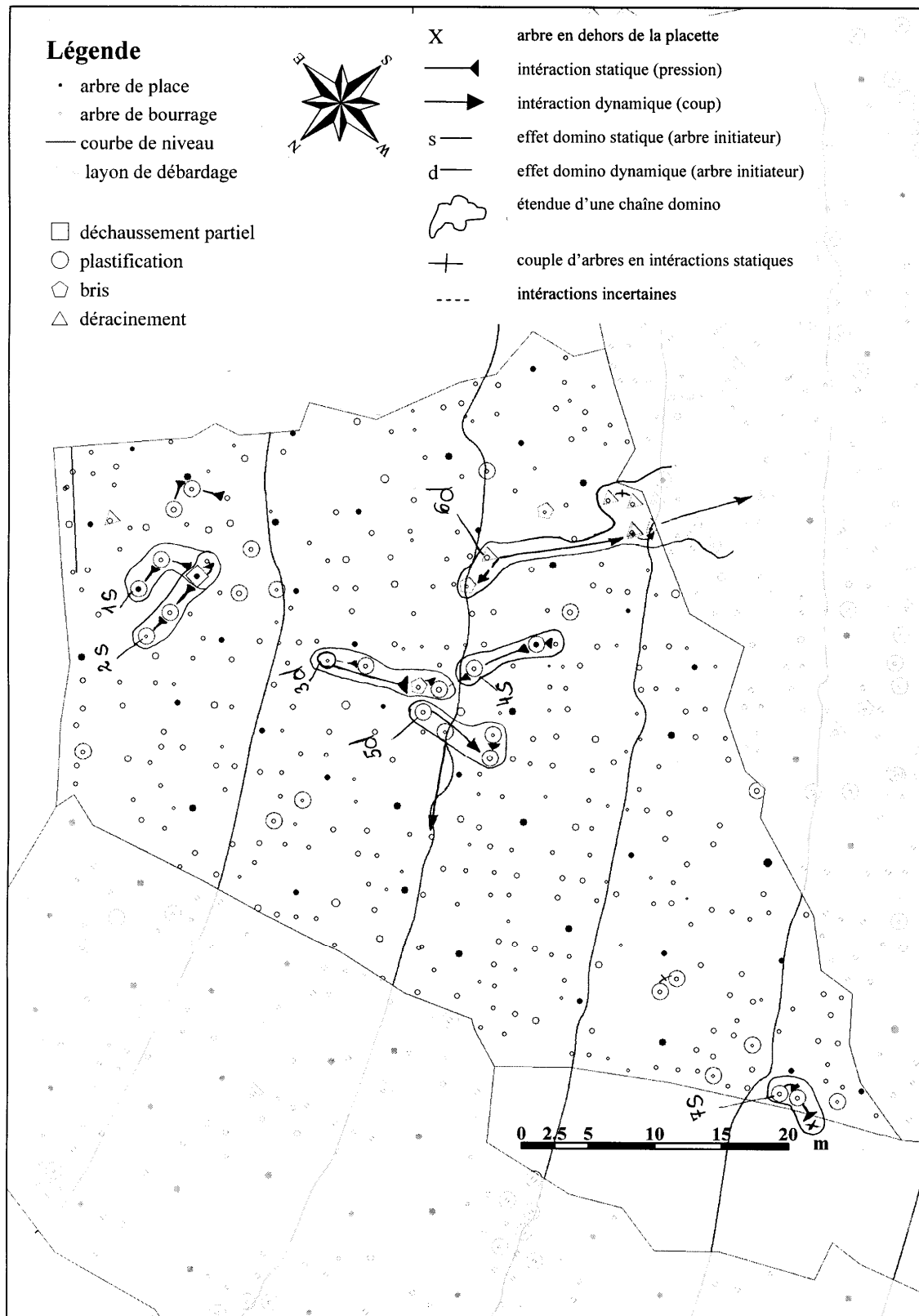
Dégâts de neige en 2005 – placette 2



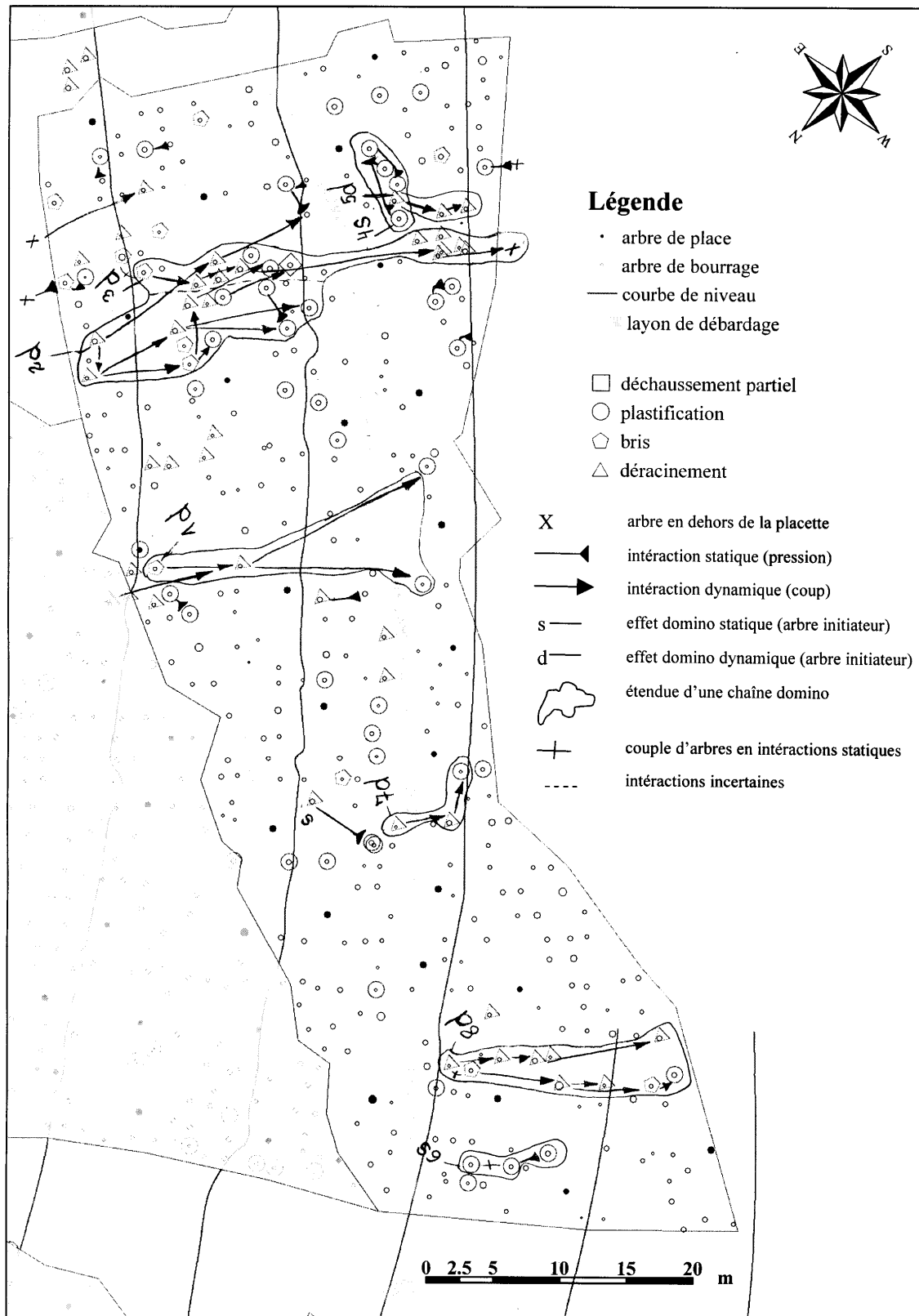
Dégâts de neige en 2005 – placette 3



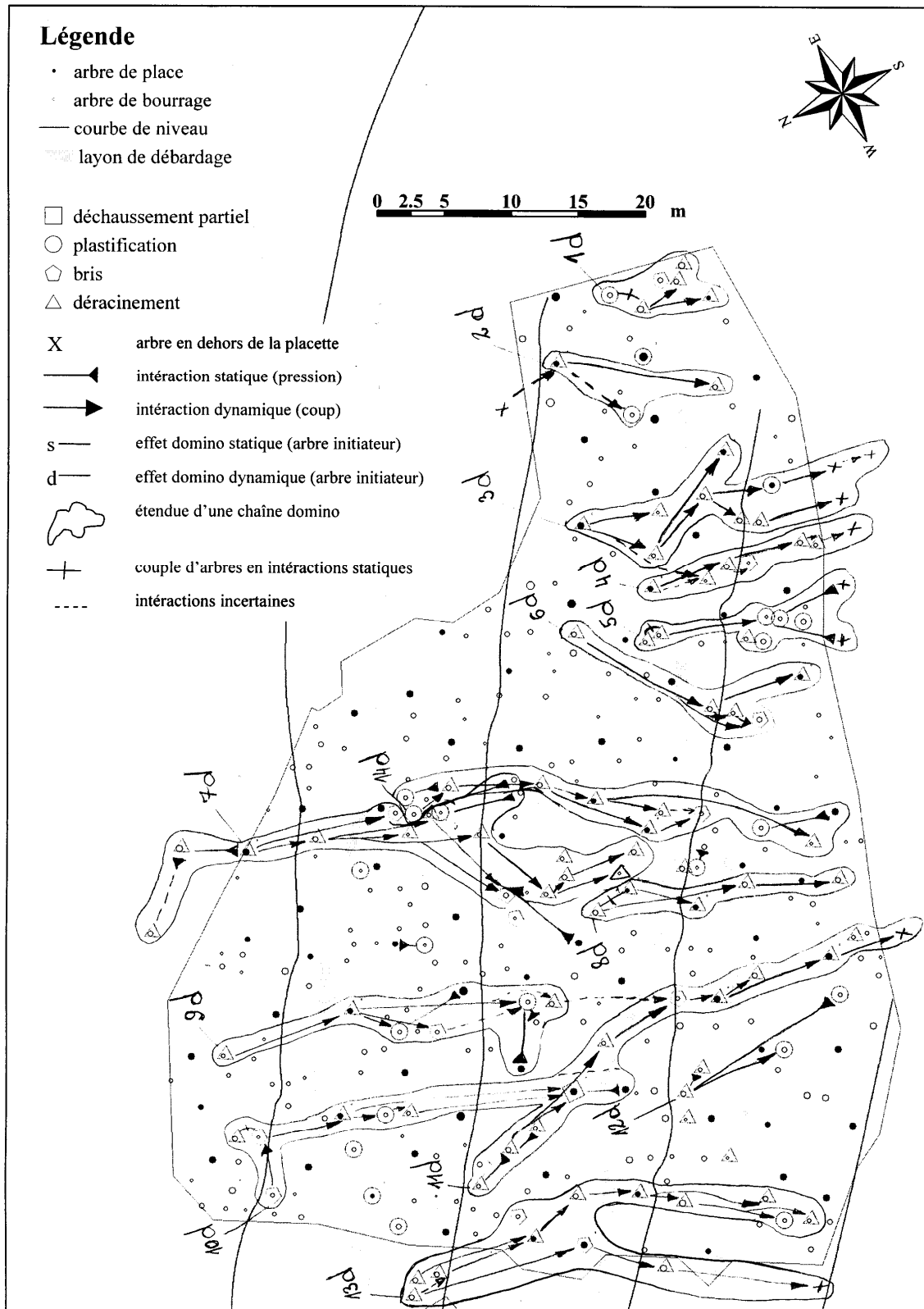
Dégâts de neige en 2005 – placette 4



Dégâts de neige en 2005 – placette 5



Dégâts de neige en 2005 – placette 6



Annexe 7. Dégâts de neige lourde - exemples



Fig. 146 Effet domino statique ou dynamique. Peuplement récemment éclairci dans la région de Godetch. Arbre-initiateur déraciné en avant-scène



Fig. 147 Effet domino dynamique, placette 6. Arbre-initiateur déraciné en avant-scène et premier arbre touché (P6/Z12).



Fig. 148 Arbres de bordure déracinés des deux côtés d'un ravin dans la région de Godetch. Les bordures sont montrées avec une ligne traitillée. Les directions du dégât (flèche) sont toujours vers le centre du ravin. Dégât typique pour la neige lourde (cf. Spellmann et al., 1984)

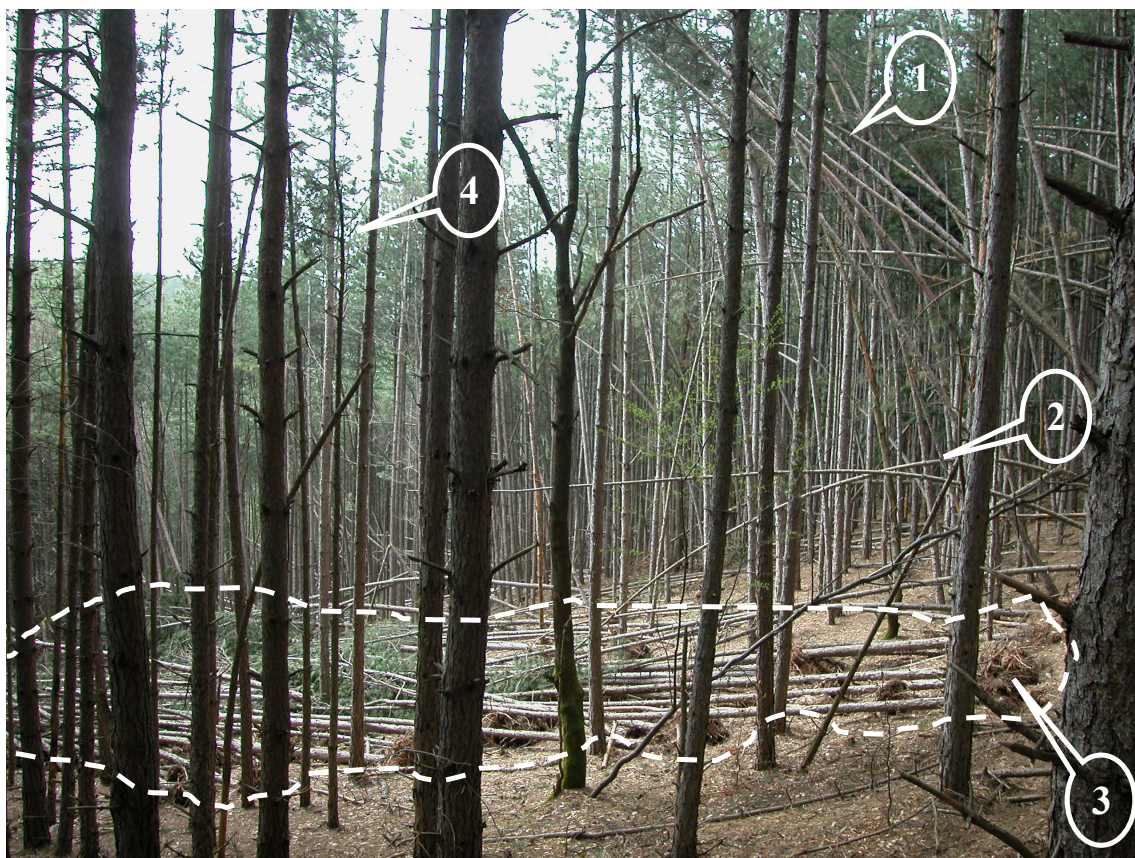


Fig. 149 Effet domino statique. Dégâts par surfaces en forme d'un rectangle (15x25m) dans une plantation de pin noir (env. 40 ans) dense non-traitée, à côté de la placette 2 (visible sur la carte satellite, 43°01'27 N, 23°04'34 E, cf. Fig. 21, objet 1). La trouée est délimitée par une ligne traitillée. Une partie des arbres à la bordure supérieure de la trouée (à droite) sont moyennement plastifiés (2), tout le reste dans la trouée est déraciné (3). Un seul arbre au milieu (4) est resté sur pied.



Fig. 150 Arbre fortement plastifié, avec un déchaussement partiel



Fig. 151 Arbre moyennement plastifié. A noter l'asymétrie du houppier (photo à droite)

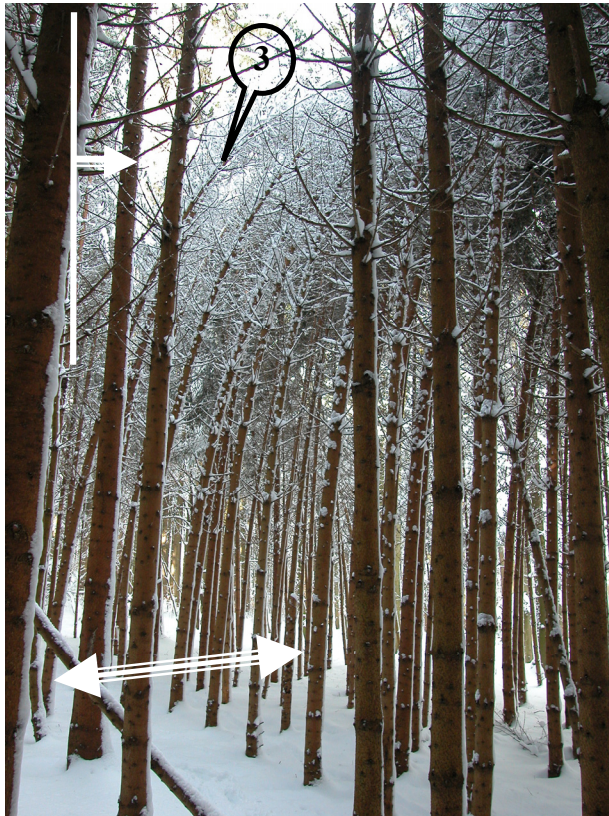


Fig. 152 Début d'un effet domino statique non-réussi (la scène au fond, vue latérale)

Plantation d'épicéa „Hungerberg“ (Affoltern, Zürich), âgée de 34 ans. Partie dense, traitée en éclaircie sélective en 1994.

Neige lourde du 5 mars 2006, photo prise le 7 mars, après la décharge de la neige.

Ligne pleine – bordure supérieure de la trouée qui commence à s'ouvrir dans la direction indiquée par la flèche au sens unique.

Flèche à double sens – étendue du groupe d'arbres en interactions statiques

L'arbre (3) fait partie des arbres-initiateurs



Fig. 153 Début d'un effet domino statique non-réussi (la même scène, vue d'en bas)

Les arbres inclinés qui s'appuient sur leurs voisins de devant sont bien visibles. Les arbres qui prêtent support (1) et (2) ont résisté à la pression sans subir de déformation plastique.

La situation illustre parfaitement

- le fonctionnement de la stabilité collective (du type pression unilatérale/support unilatéral
- le passage vers un effet domino statique

Bibliographie

1. Abetz, P., 1989. Sind Schneebruchschäden unvermeidbare Naturereignisse? AFZ 1/2:29-31
2. Abetz, P., Künstle, E., 1982. Zur Druckholzbildung bei Fichte. Allg. Forst- u.J.-Zeitung. 153, Jg. 7. 117-127
3. Abetz, P., Prange, P., 1976. Schneebruchschäden vom März 1975 in einer Kiefernversuchsfläche mit geometrischen und selektiven Eingriffen in der nordbadischen Rheinebene. AFZ 31, 583-586.
4. Ammann, P.L., 1997. Wie wirksam ist unsere Jungwaldpflege? Wald und Holz, 13.
5. Ammann, P.L., 1999. Analyse unbehandelter Jungwaldbestände als Grundlage für neue Pflegekonzepte. Schweiz. Z. Forstwes. 150, 12: 460-470.
6. Ammann, P.L., 2004. Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbeständen – biologische Rationalisierung der waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, Bergahorn und Buche. Dissertation der ETH Zürich №15761., Shaker Verlag, ISBN 3-8322-4611-8, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=diss&nr=15761>
7. Anonymus, Keler, 1887. Beobachtungen über den Schneedruck vom Winter 1885/86 und 1886/87 in Württemberg. Forstwiss. Centralblatt, 572-591.
8. Bachmann, P., 1999a. Waldwachstum I/II. Skript für die Lehrveranstaltung. Professur Forsteinrichtung und Waldwachstum, ETH Zürich.
9. Bachmann, P., 1999b. Forstliche Planung I/III. Skript für die Lehrveranstaltung. Professur Forsteinrichtung und Waldwachstum, ETH Zürich. Version 1999 mit kleineren Ergänzungen 2000, 2001, 2002 und 2003, Kapitel 5 überarbeitet vom Herbst 2002
10. Bae, S.W., Kim, P. G., 2000. A study of crown measure density and calculation of crown projection for red pine (*Pinus densiflora*) stand. Korean Journal of Forest Measurements 3 (2).
11. Birot, Y., Gollier, Ch., 2001. Risk assessment, management and sharing in forestry, with special emphasis on wind storms. Proceedings of the 14th Convocation of the International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences, Espoo-Finland, 233-266
http://www.forestry.utoronto.ca/socio_economic/conference/birot.pdf
12. Bluskova, G., 2003. Science du bois. Maison d'édition de l'Université des Sciences Forestières, Sofia, ISBN 954-8783-75-4. (en bulgare)
13. Brandt, P., 1981. Erfahrungen mit Schnee- und Eisbrüchen in Kiefernbeständen der Vörderrhön. Allgemeine Forstzeitschrift 36 (6):107-109
14. Brüchert, F., Becker, G., 2000. Biegemechanische Eigenschaften von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen – Grundlagen zur Abschätzung der Stabilität von Bäumen gegenüber mechanische Belastungen durch Sturm und Schnee. Forstarchiv 71, 102-111.
15. Brüchert, F., Becker, G., Speck, T., 2000. The mechanics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. Forest Ecology and Management 135: 45-62
16. Bühler, A., 1886. Untersuchungen über Schneebruchschaden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 8:485-506
17. Bürgermeister, G., Steup, H., Kretschmar, H., 1957-1963. Stabilitätstheorie, mit Erläuterungen zu den Knick- und Beulvorschriften, DIN 4114, Teil 1. Stabilitätsproblem, Spannungsproblem, Verzweigungslasten, Traglasten, Gleichgewichtsmethode, energetische Methode, Biegedrillknickung, Kippung, Näherungsmethoden.
18. Burschel, P., Huss, J., 1997. Grundriss des Waldbaus. Parey Buchverlag Berlin, ISBN 3-8263-3045-5
19. Cain, M.D., Shelton, M.G., 2002. Glaze damage in 13- to 18-year old, natural, even-aged stands of loblolly pines in southeastern Arkansas. In: Outcalt, K. (Ed.), Proceedings of the 11th Biennial Southern Silvicultural Research Conference. General Technical Report SRS-48. USDA Forest Service, pp. 579–583
20. Cameron, A.D., 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. Forestry, Vol. 75, N°1.

21. Chaire de sylviculture de l'EPFZ, 2002. Désignation de l'éclaircie sélective. Aide-mémoire. Document interne.
22. Chroust, L., 1969a. Der Einfluss starker Eingriffe in einem jungen Fichtenbestand. Forstwissenschaftliches Centralblatt 88: 309-319
23. Chroust, L., 1969b. Schneeschäden in den verspätgepflegten Fichtenbeständen. Lesnictvi 15, 701-712. (en tchèque avec résumés en allemand et en anglais)
24. Cremer, K. W., Borough, C. J., 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. New Zealand Journal of Forestry Science 12 (2): 244-268
25. Cremer, K.W., Carter, P.R., Minko, G., 1983. Snow damage in Australian pine plantations. Australian Forestry 46 (1), 53-66
26. Curtis, J. D., 1936. Snow damage in plantations. Journal of Forestry 34: 613-619
27. Dagnélie, P., 1992. Statistique théorique et appliquée. Tome 1: Les bases théoriques. ISBN 2-87016-039-9
28. Dimitrov, E., Beliakov, P., Krastanov, K., Shikov, K., Tzakov, H., Stoikov, H., Alexiev, G, 2003. Tables de production en biomasse pour les plantations de pin sylvestre et les plantations de pin noir (en bulgare). In : Обемни и сортиментни таблици за бяла акация и обикновен габър. Растежно-тегловни таблици за биомасата на бялборовите и чернборовите култури. Brochure de l'Institut des recherches forestières de Sofia, éditée par le Programme bulgare-suisse de coopération dans le domaine de la foresterie (BSFP), Sofia.
29. Donovan, V., 1993. Pédologie forestière/Горско почвознание, ISBN-954-598-013-3 (en bulgare)
30. Dubas, P. Baustatik I., 1983. Skript zur Vorlesung. Publikation N83-4. Baustatik und Stahlbau. ETH Zürich.
31. Duncker, P., Aschoff, T., Spiecker, H., 2006. Fallbeispiel zur quantitativen Druckholzverteilung und Jahringexzentrizität in Abhängigkeit der räumlichen Lage des Schaftes von Fichten. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, J. Nagel (ed.), Göttingen, ISSN 1432-2609
32. Duterme, C.J., 1965. Chablis de neige dans les pinerais. Bull. Soc. Roy. For de Belgique 72 (3) :167-170
33. Eos Systems Inc. 1993-2000, Photo Modeler Pro, version 4.0.
34. Gaffrey, D., Kniemeyer, O., 2002. The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability – a simulation study. Journal of forest science, 48 (2):49-69.
35. Gaffrey, D., Sloboda, B., Fabrika, M., Šmelko, S., 2001. Terrestrial single-image photogrammetry for measuring standing trees, as applied in the Dobroč virgin forest. Journal of forest science 47:75-87
36. Giesch, A., 1863. Der Schneedruck und die Lawinerverheerungen im Winter von 1862 auf 1863. SZF 141-144
37. Goebel, C., Deitschman, G., 1967. Ice storm damage to planted conifers in Iowa. Journal of forestry 65, 496-497
38. González, J., Dorado, F., González, A., Sánchez, C., von Gadow, K., 2004. A two-step mortality model for even-aged stands of *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwestern Spain). Ann. For. Sci. 61:439-448
39. Götze, H., 1961. Untersuchungen über die Festigkeitseigenschaften von Grubenrundholz der Holzarten Fichte (*Picea excelsa*) und Kiefer (*Pinus silvestris*). Archiv für Forstwesen, 10. Band, Heft 4-6.
40. Grünig, P., 1963. Betrachtungen zu den Schneeschäden vom 1./2. Januar 1962. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 114 (4), 229-243
41. Haring, P., Iuga, M., 1970. Untersuchungen über Schneeschäden in Fichten-Beständen in Maramureş-Gebirge. Stud. Cerc. Inst. Cerc. Silvici 27 (2):479-499 (en roumain avec résumé en allemand et en anglais)
42. Haufe, 1934. Die Eisbruchkatastrophe 1933/34 in Sachsen (mit Lichtbildern). Vortrag in: Jahresbericht der Landesgruppe Sachsen des Deutschen Forstvereins 62-95. Selbstverlag

43. Hoadley, B., 1990. Holz als Werkstoff. Ravensburger Buchverlag Otto Mayer GmbH, ISBN 3-473-42560-5
44. Hoffmann, Ch. Unsicherheit und Risiko, Risikoanalyse und Risikomanagement. Allg. Forst-u. J.- Ztg., 165. Jg., 12 (1994): 213-221
45. Huss, J., 1983. Durchforstungen in Kiefernjungbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 102:1-17
46. Huss, J., 1998. Der Fichten-Durchforstungsversuch Göggingen: Eisschäden an Fichten in einem Durchforstungsversuch. AFZ/Der Wald 8: 430-432
47. Ivanov, D., 2003. Définition et estimation du risque de dégâts de neige lourde après une éclaircie. Document interne, Chaire de sylviculture, ETH Zurich.
48. Ivanov, D., Sauerbier, M., 2006. Terrestrial 3-dimensional measurements of tree crowns. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, J. Nagel (ed.), Göttingen, ISSN 1432-2609.
49. Jalkanen, A., Mattila, U., 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data Forest Ecology and Management 135: 315-330
50. Jehle, G., 1995. Welche Konsequenzen sind aus Fichten-Versuchsflächen zu ziehen? AFZ/Der Wald, 20: 1068-1070
51. Johann, K., 1980. Bestandesbehandlung und Schneebruchgefährdung. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt. 67:269-286. 1980.
52. Johann, K., 1981. Nicht Schnee, sondern falsche Bestandesbehandlung verursacht Katastrophen. Allgemeine Forstzeitung, 92 (5): 163-171
53. Jonsson, M.J., Foetzki, A., Kalberer, M., Lundström, T., Ammann, W., Stöckli V., 2006. Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes. Plant soil 285:267-277
54. Kato, A., 1988. Snow damage of Sugi plantations in Japan. In: Proceedings of the Japan and New Zealand symposium on forestry management planning, Forest Research Institute, Rotorua.
55. Kato, A., 2005. Examination of thinning effect on snow damage of Japanese cedar stands using a new risk index of the damage. Proceedings of the XXII IUFRO World Congress, Brisbane.
56. Kato, A., Nakatani, H., 2000. An approach for estimating resistance of Japanese cedar to snow accretion damage. For. Ecol. Manage. 135: 83-96
57. Kenk, G., Weise, U., 1998. Zu: Beobachtungen zur Bestandesstruktur undurchforsteter Fichtenbestände. AFZ/Der Wald 18: 937-939
58. Kissiov, I., 1978. Résistance des matériaux. Edition „Tehnika“, Sofia. (en bulgare)
59. Knight, C., Raev, I., Staneva, M., 2004. Introduction. In: Drought in Bulgaria. Ashgate Publishing Company, ISBN 0-7546-4215-1, 3-10
60. König, E., 1964. Prevention of snow damage by helicopter – potentialities and limitations. Forestry abstracts 025-03666
61. Kostov, G., Nédélin, B., 1996. Guide d'exercices en sylviculture, Ръководство за практически занятия по общо лесовъдство, Sofia. ISBN 954-8733-11-8 (en bulgare)
62. Kostov, I., 1971. Les chutes de neige lourde, les verglas et leurs conséquences sur les plantations de conifères à Strandja/Мокрите снеговалежи и поледиците и влиянието им върху иглолистните култури в Странджа. Gorsko stopanstvo 11, 7-11. (en bulgare)
63. Kovtunov, V/Ковтунов, В., 1963. Массовый снеголом в Ивано-Франковском лесхоззаге. Лесное хозяйство, 16 (6): 23-24/ Large scale snow breakage in the Ivano-Frankovski forest district. Lesn. Hoz. (en russe)
64. Kramer, H., 1980. Einfluss verschiedenartiger Durchforstungen auf Bestandessicherheit und Zuwachs in einem weitständig begründeten Fichten-Bestand. Schriftenreihe der forstl. Fakultät d. Univ. Göttingen, Bd. 67 (224-235).

65. Krastanov, Kr., Raïkov, R., 1983. Guide de dendrométrie /Справочник по дендробиометрия, Sofia. (en bulgare)
66. Kraus, K., 2004. Photogrammetrie I, Gruyter, 7. Auflage, ISBN 3110177080.
67. Kuboyama, H., Oka, H., 2000. Climate risks and age-related damage probabilities – effects on the economically optimal rotation length for forest stand management in Japan. *Silva fennica* 34 (2):155-166
68. Kufner, M., 1983. Standsicherheit von Bäumen unter Schneelast. *Holz-Zentralblatt*, N146.
69. Kuhl, W.-E., Norra, U.N., 1992. Luftbildgestützte Dokumentation und Auswertung von Eisbruchflächen in Ostwestfalen. *Forstarchiv* 63: 149-154
70. Leibundgut, H., 1943. Über kritische Schneelasten. *Schweiz. Zeitschrift über Forstwesen*, 94 : 61-62.
71. Likar, Otto., 1968. Verformungsmomente und Knicklasten hoher konischer Türme. *Beton- und Stahlbetonbau* 63 (7) : 125-132; 160-165.
72. Lorenz, E., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (2) : 130-141
73. Magahan, W., Steele, R., 1987. An approach for predicting snow damage to Ponderosa pine plantations. *Forest science* 33 (2):485-503
74. Mangold, S., Spellmann, H., 1989. Schneeschäden in Erdmann-Beständen. *Forst und Holz* 4: 90-94
75. Marsch, M., 1989. Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmaßnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Baumart Fichte. Dissertation. Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen der Technischen Universität Dresden.
76. Mason, W. L., Alía, R., 2000. Current and future status of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in Europe. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.: Fuera de Serie* 1, pp. 317-333
77. Mauritz, A., 1980. Die Schneebruchkatastrophen 1956 und 1979. *Allgemeine Forstzeitung* 5: 128-129
78. Merkel, O., 1975. Schneebruch im Fichtenbestand bei 40-jähriger Auslesedurchforstung. *Allgem. Forstzeitung* 30:663-665
79. Mihov, I., 1983. La surface terrière optimale – base pour l’augmentation de la production de bois. *Gorsko stopanstvo* 4 (en bulgare)
80. Milev, M., Iliev, N., 2003. Influence of geographic provenance and plant place schemes in Scots pine forest plantations. I. State, growth and productivity. II. Mechanical stability and resistance. In: Сборник научни доклади международна научна конференция „50 години Лесотехнически университет“, Maison d’édition de l’Univrsité des Sciences Forestières, Sofia: 55-58 (en bulgare avec résumé en anglais)
81. Miller, D. R., Dunham, R., Broadgate, M. L., Aspinall, R. J., Law, A. N. R., 2000. A demonstrator of models for assessing wind, snow and fire damage to forests using the WWW. *Forest Ecology and Management* 135: 355-363
82. Miller, D.H., 1964. Interception processes during snow storms. USDA, For. Service, Res. Paper PSW-18, 24pp.
83. Möhring, B., 1981. Über den Zusammenhang zwischen Kronenform und Schneebruchfälligkeit. *Forstarchiv* 52 (4): 130-134
84. Montero, G., Cañellas, I., Ortega, C., Río, M. del, 2001. Results from a thinning experiment in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) natural regeneration stand in the Sistema Ibérico Mountain Range (Spain). *For. Ecol. Manage* 145:151-161
85. Müller, F., 2002. Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaumbene. Dissertation der Technischen Universität München. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=96742920x&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=96742920x.pdf
86. Nakashima, K., Nitta, R., Fujimori, T., Katsuta, M., 1989. Experimental analysis of resistance to snow load on crown in *Cryptomeria japonica* D. Don. – tests by using an apparatus for artificial snow load on crown. *Bulletin of the forestry and forestry products research institute* 356:1-28 (en japonais avec résumé en anglais)

87. Nakatani, H., 1991. Structural mechanics study on the damage of tree stems caused by snow accumulation in the crown. *J. Toyama Forestry For. Prod. Res. Center* 4, 1-54. (en japonais avec résumé en anglais)
88. Nakatani, H., Kato, A., Hasegawa, M., Aiura, H., Iijima, Y., 1988. Structural Mechanics Study on the Damage of Tree Stem Caused by Accumulating in the Crown III. Distribution of Mechanical Properties in the Tree Stem. *J. Toyama Forestry For. Prod. Res. Center* 1, 25-33.
89. Nakatani, H., Kato, A., Taira, H., Iijima, Y., Sawada, M., 1984. Deflection and resistance performance of tree stems subjected to snow loads in Sugi stands. *Mokuzai Gakkaishi* 30 (11), 886-893 (en japonais avec résumé en anglais)
90. Nicoll, B., Achim, A., Mochan, S., Gardiner, B., 2005. Does steep slope influence tree stability? A field investigation. *Canadian journal of forest research* 35: 2360-2367
91. Niklas, K., 1992. *Plant Biomechanics. An Engineering Approach to Plant Form and Function*. The University of Chicago Press, London, 605 pp. ISBN 0-226-58630-8
92. Nykänen, M.-L., Peltola, H., Quine, C. P., Kellomäki, S., Broadgate, M., 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31(2): 193-213
93. Päätaalo, M.-L., 2000. Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of Scots pine, Norway spruce and Birch. *Scand. J. For. Res.* 15: 530-541.
94. Päätaalo, M.-L., Peltola, H., Kellomäki, S., 1999. Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. *For. Ecol. Manage.* 116:51-70
95. Panayotov, M., 2006. Study of the influence of ecological factors on the growth of tree species from Pinaceae family at the treeline zone, PhD thesis, University of Forestry, Sofia
96. Papesch, A.J., Moore, J.R., Hawke, A.E., 1997. Mechanical stability of *Pinus radiata* trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal of Forestry Science* 27 (2): 188-204
97. Pauwels, D., 2001. Le VERTEX : une nouvelle génération de dendromètres multi-usages. Note technique forestière de Gembloux N1, Faculté universitaires des Sciences agronomiques de Gembloux.
98. Pellikka, P., Järvenpää, E., 2003. Forest stand characteristics and wind and snow induced forest damage in boreal forest. International Conference „Wind Effects on Trees”, September 16-18, 2003, University of Karlsruhe, Germany
99. Peltola, H., Kellomäki, S., 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica*, vol. 27 n° 2: 99-111
100. Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., Granander, M., 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135: 143-153
101. Peltola, H., Nykänen, M.-L., Kellomäki, S., 1997. Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. *For. Ecol. Manage.* 95: 229-241
102. Petri, G., 1976. Schneedruckschäden vom März 1975 in Kiefernjungbeständen der nordbadischen Rheinebene. *AFZ* : 1048-1049
103. Petty, J.A., Worrel, R., 1981. Stability of coniferous trees stems in relation to damage by snow. *Forestry*, Vol. 54(2), 115-128
104. Pflüger, A., 1950. *Stabilitätsprobleme der Elastostatik*. Berlin, Springer Verlag.
105. Pollanschütz, J., 1980. Erfahrung aus der Schneebruchkatastrophe 1979. *Allgemeine Forstzeitung* 91, 124-125.
106. Polley, H., 1995. Beurteilung der mechanischen Stabilität der Waldbäume auf der Grundlage der Bestandesinventur. *Forst und Holz* 50 (19): 594-597
107. Prigogine, I., 1994. Chaos and the Law of Nature. Rapport de conférence, diffusé le 22.04.2007 à la SWR. <http://www.wissen.swr.de/ta/begleit/ta070422.htm>
108. Proles Engineering Ltd., 1999. Plan d'aménagement de l'arrondissement de Godetch.

109. Pyysalo, U.: Tree crown determination using terrestrial imaging for laser scanned individual tree recognition, *Geo-Imagery Bridging Continents, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Vol. XXXV, ISSN 1682-1750, 2004.*
110. Rachner, M., 1969. Der Wasserhaushalt der Schneedecke und seine Bedeutung im Rahmen des Gebietswasserhaushalts der Oberen Bode/Harz. *Abhandlungen der meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik 90 (Band XII)*
111. Remondino, F. 3Dconf - a software for 3D coordinates transformation. Institute of Geodesy and Photogrammetry (not published)
112. Río, M. del, Montero, G., Ortega, C., 1997. Respuesta de los distintos regimenes de claras a los daños causados por la nieve en masas de *Pinus sylvestris* L. en el Sistema Central (The effects of snow damage in stands of *Pinus sylvestris* L.) *Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 6 (1 y 2).* (en espagnol avec résumé en anglais)
113. Robert, A., 2003. Simulation of the effect of topography and tree falls on stand dynamics and stand structure of tropical forests. *Ecological modelling 167: 287-303*
114. Robin, E., Dupré, J.-C., Bremand, F., 2003. La photomécanique au service de la mécanique des arbres. *Forêt-entreprise* №153.
115. Röhle, H., Huber, W., 1985. Untersuchungen zur Methode der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen. *Forstarchiv 56(6):238-243*
116. Rosenfeld, W., 1944. Erforschung der Bruchkatastrophen in den Ostschlesischen Beskiden in der Zeit von 1875-1942. *Forstw. Centralblatt und Tharandter forstliches Jahrbuch, Kriegsgemeinschaftsausgabe, 1:1-31*
117. Rottmann, M., 1985. Schneebruchschäden in Nadelholzbeständen. Beiträge zur Beurteilung der Schneebruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung schneegeschädigter Nadelholzbestände. *J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, ISBN 3 7939 0680 9*
118. Rudnicki, M., Silins, U., Liefers, V. J., Josi, G., 2001. Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interactions among a group of trees. *Trees 15: 83-90*
119. S., C.L., 1951. Dégâts de neige an Haute Ardenne. *Bulletin de la Société forestière de Belgique 58 (3) :119-121*
120. Sanzen-Baker, R., Nimmo, M., 1941. Glazed frost 1940 – damage to forest trees in England and Wales. *Forestry 15 : 37-54*
121. Satterlund, D., Haupt, H., 1967. Snow catch by conifer crowns. *Water resources research 3 (4)*
122. Schmidt, R., Gluns, D., 1991. Snowfall interception on branches of three conifer species. *Can. J. For. Res. 21:1262-1269*
123. Schöpfer, W., 1964. Schneebruchschäden – einmal anders gesehen. *Allgemeine Forstzeitschrift 5: 66-70, 623-625*
124. Schröder, L. M., Eidmann, H. H., 1993. Attacks of bark- and wood-boring Coleoptera on snow-broken conifers over a two-year period. *Scand. J. For. Res. 8: 257-265*
125. Schütt, P., Stimm, B., 1994. *Pinus sylvestris*. In: *Enzyklopädie der Holzgewächse – 45. Erg. Lfg. 9/06, 1-32*
126. Schütz, J.-P., 2003. *Waldbau I. Skript zur Vorlesung der Professur Waldbau der ETH Zürich.*
127. Schütz, J.-Ph., 1990. *Sylviculture 1, Principes d'éducation des forêts. 1st ed. Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse. 243 pages.*
128. Schütz, J.-Ph., 1999. Neue Waldbehandlungskonzepte in Zeiten der Mittelknappheit: Prinzipien einer biologisch rationellen und kostenbewussten Waldpflege. *Schweiz. Z. Forstwes. 150, 12: 451-459*
129. Silins, U., Liefers, J., Bach, L., 2000. The effect of temperature on the mechanical properties of standing lodgepole pine trees. *Trees 14:424-428*
130. Skatter, S., Kucera, B., 2000. Tree breakage from torsional wind loading due to crown asymmetry. *Forest Ecology and Management 135: 97-103*

131. Slodičák, M., 1995. Thinning regime in stands of Norway spruce subjected to snow and wind damage. In Coutts, M. P. & Grace, J. (edc.). Wind and trees, pp. 436-557. Cambridge, Cambridge University Press
132. Slodičák, M., Novak, J., 2006. Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. Forest Ecology and Management 224: 252–257
133. Smith, V. G., Watts, M., James, D. F., 1987. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. Can. J. For. Res. 17: 1080-1091
134. Solantie, R., 1994. Effect of weather and climatological background on snow damage of forests in Southern Finland in November 1991. Silva Fennica 28 (3): 203-211
135. Soubeu et al., 1997. Règlement sur les coupes en République de Bulgarie. Comité des forêts auprès du Conseil des Ministres, Sofia (en bulgare)
136. Spatz, H-Ch., F. Brüchert., 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. Forest Ecology and Management 135: 33-44
137. Spellmann, H., Caspari, C.-O., Michalewski, R., 1984. Analyse von Schneeschäden in Kiefernbeständen unter besonderer Berücksichtigung der Bestandesstruktur. Allg. Forst- u. J.-Ztg, 155. Jg., 6
138. Stauffer, Chr., 1990. Statique et résistance du bois : résistance des matériaux et dimensionnement du bois après la norme SIA 164 avec théorie et exemples
139. Stephani, R., 1933. Bekämpfung von Schneebruchschäden. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 241-254
140. Stiptov, V., Efrémov, R., Azinov, I., 1995. La réduction du nombre de tiges et les éclaircies en lignes, Gora 9 (en bulgare)
141. Stoikov, S., Chimev, K., Dimitrova, G., Nikolova, J., Russeva, L., Spasov, V., Minchev, H., 1992. Manuel méthodique pour résoudre des problèmes de mathématique transcendente. II Partie. Edition „Martilen“, Sofia.
142. Stüssi, F., Dubas, P., 1971. Grundlagen des Stahlbaues. Berlin, Springer Verlag, 658 S.
143. Suominen, O., 1963. Metsiköiden alttius lumituhkan. Tutkimus Etelä-Suomessa talvella 1958-59 sattuneesta lumituhosta. Summary: Susceptibility of stands to devastation by snow. Investigation into snow devastation in South Finland in winter 1958-59. Silva Fenn. 112 (5) :1-35
144. Tchimev, K., 1990. Mathématique transcendente et méthodes statistiques. Nauka i izkustvo, Sofia.
145. Thomas, S. C., Weiner, J., 1989. Unclinging competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. Oecologia 80:349-355.
146. Thomasius, H., 1988. Stabilität natürlicher und künstlicher Waldökosysteme sowie deren Beeinflussbarkeit durch forstwirtschaftliche Maßnahmen (Fortsetzung und Schluss von N38/1988) AFZ 39:1064-1068
147. Umeki, K., 1995. Modeling the relationship between the asymmetry in crown display and local environment. Ecological Modelling 82:11-20
148. Vagin, V., 1995. Natural Mortality of Spruce Stands in Moscow Region. Poster, IUFRO XX World Congress, 6-12 August 1995, Tampere, Finland. <http://www.metla.fi/iufro/iufro95abs/d4pos12.htm>
149. Valinger, E., Fridman, J., 1997. Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. Forest Ecology and Management 97: 215-222.
150. Valinger, E., Lundqvist, L., Bondesson, L., 1993. Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics. Forestry 66 (3): 249-260
151. Valinger, E., Lundqvist, L., Brandel, G., 1994. Wind and Snow Damage in a Thinning and Fertilisation Experiment in *Pinus sylvestris*. Scand. J. For. Res. 9:129-134.
152. van der Meer, P., Bongers, F., 1996. Patterns of tree-fall and branch-fall in a tropical rain forest of French Guiana. Journal of ecology 84:19-29.
153. Vanonsen, P., 2006. Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Dissertation der ETH Zürich №16532, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=diss&nr=16532>

154. Vlashev, V., Dobrinov, Iv., 1956. Dégâts dus à la neige et croissance des plantations de pin sylvestre à UOGS „G.St.Avramov“ en fonction de l'altitude./ Повреди от сняг и растеж на белия бор в културите на УОГС „Г.Ст. Аврамов“ в зависимост от надморската височина. Gorsko stopanstvo 2. (en bulgare)
155. von Berg, 1847. Über den Eis- und Schneebruch in den Gebirgsforsten im Allgemeinen, und über diese Erscheinungen im sächsischen Erzgebirge im Jahre 1843-1844 im Besonderen. Tharandter Forstliches Jahrbuch, 143-173.
156. Vorreiter, L., 1937. Bau und Festigkeitseigenschaften des Holzes der Glatzer Schneebergfichte. Tharandter Forstliches Jahrbuch, 88 (2): 65-126; (4): 235-285; (5): 351-385
157. Vorreiter, L., 1938. Biege- und Druckfestigkeit gefrorenen Fichtenholzes. Tharandter Forstliches Jahrbuch 89:491-510
158. Wessolly, L., 1991a. Struktur- und Materialeigenschaften grüner Hölzer als Voraussetzung zur Ermittlung der Bruchsicherheit an Bäumen. In: Natural Structures, Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature. Proceedings of the II. International Symposium of the Sonderforschungsbereich 230, Part III. Stuttgart. Mitteilungen des SBF 230, Heft 8.
159. Wessolly, L., 1991b. Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 49:99-104
160. White, R.G., White, M.F., Mayhead, G.J., 1976. Measurements of the motion of trees in two dimensions. University of Southampton, Technical report 86.
161. Wonn, H., O'Hara, K., 2001. Height:diameter ratios and stability relationships for four northern Rocky mountain tree species. Western Journal of Applied Forestry 16 (2):87-94
162. Young, T., Hubbel, S., 1991. Crown asymmetry, treefall and repeat disturbance of broad-leaved forest gaps. Ecology, 74 (2), pp.1464-1471
163. Young, T., Perkocha, V., 1994. Treefalls, crown asymmetry, and buttresses. Journal of ecology 82: 319-324
164. Zhu, J., Li, X., Cao, W., Gonda, Z., Matsuzaki, T., 2006. Factors affecting the snow and wind induced damage of a montane secondary forest in Northeastern China. Sylva fennica 40(1):37-51