

Protection à long terme contre les avalanches sur les surfaces de chablis

Etude sur l'efficacité mécanique des arbres au sol



Travail de Master à l'Institut pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (SLF), Davos
Departement Umweltwissenschaften, ETH Zürich

Jean-Marie Putallaz
Novembre 2010

Référent:

Dr. Peter Bebi (SLF), Davos

Superviseurs :

Prof. Dr. Harald Bugmann (ETHZ), Zürich
Werner Gerber (WSL), Birmensdorf

Résumé

Les 27 et 28 février 1990, les vents de l'ouragan Viviane atteignirent les Alpes suisses. Avec des pointes à 269 km/h au Gd-St-Bernard, la tempête ravagea près de 4.9 millions de stères de bois dans les forêts helvétiques. Afin d'étudier l'évolution de ces forêts ravagées, les instituts fédéraux de recherche engagèrent de nombreux projets d'étude sur les forêts, protectrices ou non, ravagées par la tempête. Le déplacement des troncs, la charge qu'ils peuvent supporter, les champignons, la faune ou la végétation sont quelques-uns des nombreux sujets étudiés sur les chablis laissés par Viviane. À Disentis, dans l'Oberland Grisons, se situe l'un des chablis les plus vastes provoqués par l'ouragan.

Le présent travail, mené sur la partie du chablis de Disentis laissée à l'état naturel, a pour objectif primaire d'en évaluer l'état vingt ans après la tempête. En se concentrant sur l'aspect mécanique des troncs, il permet la comparaison entre les deux décennies suivant Viviane. Il fournit deuxièmement, par une mise en relation des données neigeuses de la région, une analyse de l'effet protecteur du chablis en 2010. Il sert troisièmement de base à de futures études sur l'évolution des chablis au cours de la troisième décennie suivant Viviane.

Ce qui est étudié à partir de données fournies par des photos aériennes et d'anciennes études, est le comportement des troncs entre 2001 et 2010. Ceux-ci sont analysés et mesurés in situ à l'aide d'une station totale.

Zusammenfassung

Der Sturm Vivian hatte im Februar 1990 4.9 Festmeter Holz in der Schweiz geworfen. In den folgenden Jahren wurden in ausgewählten Windwurfflächen unter anderem Verjüngung, Stammbewegungen, Belastungsexperimente, Pilze und Wildtiere bei verschiedenen Handlungsalternativen untersucht. Die grösste dieser Fläche, bei welcher auch eine ungeräumte Variante ausgeschieden wurde befindet sich in Disentis. Ziel dieser Arbeit war, 20 Jahren nach dem Sturm, die mechanistischen Eigenschaften der liegenden Bäume dieser ungeräumten Windwurffläche in Disentis neu zu bewerten. Der Vergleich von mechanischen Aspekten der Stämme in den beiden Jahrzehnten wurde ebenfalls beurteilt. Dank eines Vergleichs mit Schneesverhältnissen des Gebiets Disentis, konnte zudem die Schutzwirksamkeit der Windwurffläche diskutiert werden.

Auf der Basis von Ortholuftbilder und einer im Jahr 2001 durchgeführten Untersuchung, wurde die Dislokation der Stämme zwischen 1990 und 2010 analysiert. Die Verschiebungen, Brechpunkte und Wirkungshöhen wurden im Feld von einer Totalstation gemessen. Der Einfluss von Felsen, Vegetation, Hangneigung, Vorsprünge und die kreuz und quer liegenden Stämmen auf die Bewegungen wurden mit Hilfe einer multivariaten Analyse und statistischen Tests analysiert. Die Feldbelastung von zehn Stämmen wurde im Feld gemessen.

La position, le bris et le déplacement des troncs jonchant toujours le sol vingt ans après l'ouragan ont été mis en relation avec cinq facteurs environnementaux principaux : les rochers, la pente du terrain, les ruptures de pente, la végétation et les amoncellements de bois permettent d'analyser le comportement de ces troncs. La statistique et ses tests ont en outre permis de comparer le comportement des bois sur les deux décennies. Parallèlement à ces mesures, des essais de mise en charge de dix troncs ont été conduits in situ, à l'aide d'un tracteur forestier et d'instruments de mesure du WSL. La mesure de la charge appliquée et du déplacement des bois, corrélée à des calculs de statique permirent d'évaluer la résistance. Le taux de décomposition du bois a été évalué suivant la méthode de Sippola et Renvall (1999) ainsi que par des forages réalisés à l'aide d'un Résistographe. Ils ont servi à estimer la dégradation du bois au fil des années. Finalement, les mesures ont été mises en relation avec les données neigeuses de la station de mesure automatique de Disentis. Les temps de retours des hauteurs de neige ont été estimés par la méthode statistique de Gumbel. Par une comparaison de la hauteur de neige supportable par les bois et des données d'enneigement avec les normes de construction paravalanches, des conclusions sur la capacité protectrice du chablis en 2010 ont été formulées.

L'étude montre que les bois se sont en moyenne déplacés de 1.77 m vers l'aval depuis 2001, contre 1.33 m entre 1991 et 2001. Ils se sont en moyenne brisés deux fois de plus entre 2001 et 2010.

Zudem wurden mit Hilfe einer Kombination aus Sippolla und Renvall-Methode sowie mittels Resistographeinbohrungen der zehn in den Feldversuchen verwendeten Stämmen Daten zur Holzvermoderung und Festigkeit erhoben. Die erfassten Daten zur Stabilität der liegenden Stämme wurden dann mit den langjährigen Schneebedingungen des Gebiets Disentis (Gumbel Methode) verglichen, woraus die Schutzfähigkeit der Fläche im Jahr 2010 beurteilt wurde.

Die Stämme haben sich seit dem Jahr 2001 im Durchschnitt um 1.77 m und seit dem Jahr 1990 um 1.33 m bergab bewegt. Stammbrüche ereigneten sich doppelt so häufig seit 2001 als im ersten Jahrzehnt der Beobachtungsperiode. Ihre mittlere Wirkungshöhe hatte seit 1990 um 7.4 cm/Jahr und seit 2001 um 6.9 cm/Jahr abgenommen und betrug im Jahr 2009 noch 0.86 m. Die Stämme haben sich auf felsigem Untergrund und bei hoher Hangneigung signifikant stärker bewegt. In den Felsen betrug die mittlere vertikale Bewegung 4.75 m. Im Gegensatz dazu bremsten die kreuz und quer liegende Stämme die Bewegung von anderen Stämmen. Die mittlere Belastung, welche ein Stamm noch übernehmen konnte, erreichte 16.2 KN, was einer Schneehöhe von 1.78 m entspricht. Im Gebiet Disentis ist ein solches Schneeereignis mit einer Wiederkehrperiode von 60 Jahren zu erwarten. In den letzten 10 Jahren hat das Holz 9 KN Lastwiderstand verloren.

Leur hauteur au sol s'est réduite de 7.4 cm/an entre 1991 et 2001 et de 6.9 cm/an entre 2001 et 2009, ce qui monte leur hauteur effective à 0.86 m en 2009. Le facteur favorisant le plus leur déplacement est la présence de rochers, d'une forte pente. Le déplacement vertical moyen y est de 4.75 m. A l'inverse, les amoncellements de troncs réduisent ce déplacement. Le bois perd l'équivalent de 9 KN de résistance au cours de la dernière décennie. La charge moyenne de 16.2 KN qu'un tronc peut encore supporter en 2010 correspond à une hauteur de neige de 1.78 m ayant, dans la région de Disentis, un temps de retour de 60 ans. Cette charge induit aussi une contrainte moyenne de 1.83 N/mm^2 et correspondant approximativement à 4% de la contrainte du bois sain de qualité moyenne. Les troncs sont décomposés à hauteur de 41%, taux fortement dépendant des conditions environnant le bois, comme la présence de végétation, la hauteur au sol, etc.

Leur hauteur au sol s'est elle aussi réduite d'une manière équivalente sur les deux décennies.

La protection paravalanche dispensée par les troncs est efficace durant la première décennie après Viviane. A la fin de la deuxième décennie, la protection est assurée jusqu'à une hauteur de neige de 0.95 m, équivalant à un temps de retour de 3 ans. Au-delà de 1.78 m, la protection n'est plus assurée. Les bois du chablis réduisent en outre la probabilité d'événements extrêmes.

Die Last (von 16.2 KN) entspricht einer internen Spannung von 1.83 N/mm^2 was nur rund 4% von dem entspricht, was bei gesundem Holz erwartet wird. Die Resistographergebnisse zeigten, dass die Stämme im Mittel zu 41% einen starken Vermoderungsgrad aufweisen, wobei der Vermoderungsgrad an Standorten mit zum Beispiel Boden- oder Vegetationskontakt signifikant stärker war.

Der Lawinenschutz, der durch die liegenden Stämme nach dem Sturmereignis entstand, war während den ersten zehn Jahren sehr effizient. Nach 20 Jahren ist der Schutz bis auf 0.96 m Schneehöhe, was einer Widerkehrperiode von 3 Jahren entspricht, gesichert.

Erst bei Schneedeckenmächtigkeiten von über 1.78 m ist der Schutz gegenüber Lawinenanrissen heute nicht mehr gewährleistet. Während die Wirkungshöhe der Stämme der limitierende Faktor des Schutzes in 2010 ist, kann erwartet werden, dass im Jahr 2020 nicht die Wirkungshöhe sondern der Lastwiderstand die kritische Grösse wird. Da die sich verjüngende Vegetation im Jahr 2010 noch nicht überall den verminderten mechanischen Schutz der Stämme kompensieren kann, wäre im Fall eines Schadenpotentials unterhalb der Fläche eine punktuelle Bepflanzung einer vergleichbaren Windwurffläche rechtfertigt gewesen.

Si en 2010, la hauteur des troncs est le facteur limitant l'effet protecteur, on doit s'attendre à ce qu'en 2020, ce soit la résistance du bois qui devienne le premier facteur limitant cette protection. Les études montrent aussi que la repousse de végétation ne suffit pas en 2010 à compenser la perte de protection dispensée par les bois et pourrait ainsi justifier la plantation d'un chablis similaire, dans le cas où des biens seraient à protéger.

Table des matières

Résumé/Zusammenfassung	3
1. Introduction et description de l'étude	9
1.1 Etat des connaissances actuelles	9
1.1.1 La perturbation de l'écosystème	9
1.1.2 Les ouragans	10
1.1.3 Viviane	10
1.1.4 Etudes menées sur les chablis	11
1.2 Buts du travail et hypothèses	12
1.2.1 Buts du travail	12
1.2.2 Questions et hypothèses de travail	13
2. Matériel et méthodes	14
2.1 Sujet d'étude	14
2.1.1 La région de l'étude : climat et particularités	14
2.1.2 Le terrain d'étude	15
1.1.3 Aperçu général des méthodes	16
2.1 Etude de la dislocation des bois au sol	17
2.1.1 Mesures de terrain	17
2.1.2 Calcul du déplacement	19
2.1.3 Mesure de la hauteur effective des troncs	20
2.1.4 Analyse multivariée et arbre de décision	22
2.1.5 Statistique utilisée	23
2.2 Etude de la résistance du bois	24
2.2.1 Mesures de terrain	24
2.2.2 Données brutes	27
2.2.3 Répartition des contraintes dans le bois	28
2.2.4 Mesure du taux de décomposition	31
2.3 Données nivologiques	33
2.3.1 Calcul de la charge de neige par tronc	33
2.3.2 Comparaison des données neigeuses	35
2.3.3 Traitement des données neigeuses	36

3. Résultats	37
3.1 Dislocation des bois au sol	37
3.2 Etude de la résistance du bois	44
3.3 Données nivologiques	53
4. Discussion	55
4.1 Dislocation des bois au sol	55
4.1.1 Evolution et bris des bois	55
4.1.2 Déplacement des bois	56
4.1.3 Hauteur effective	59
4.2 Résistance du bois	60
4.2.1 Résistance à la charge	60
4.2.2 Taux de décomposition	61
4.2.3 Comparaison entre la mesure du résistographe et la méthode du couteau	64
4.3 Données nivologiques	64
4.4 Effet protecteur du chablis	65
4.5 Vérification des hypothèses	69
5. Remarques finales	71
5.1 Perturbations infligées au milieu	71
5.2 Restrictions de l'étude et questions ouvertes	71
5.3 Synthèse et perspectives sur l'évolution future du chablis	72
6. Remerciements	74
7. Sources et littérature	75
8. Annexes	77

1. Introduction et description de l'étude

Depuis plusieurs décennies, les spécialistes du milieu forestier accordent à la forêt bon nombre de rôles en sus de celui de production de bois. Dans les régions montagneuses, comme la Suisse, les massifs forestiers revêtent une importance toute particulière en matière de protection contre les dangers naturels. C'est notamment le cas de 42.7 % des forêts suisses, selon le dernier inventaire forestier national (Brändli, 2010). Si la majorité de ces massifs fait l'objet d'un entretien régulier et dispense ainsi une protection adéquate, il arrive qu'un cataclysme naturel altère cette fonction, exposant une région entière à de potentiels dangers. Champignons, ravageurs, incendies et ouragans perturbent donc parfois le fonctionnement naturel de ce fragile écosystème qu'est la forêt.

Une perturbation, telle qu'un ouragan, n'est toutefois pas toujours synonyme d'évanouissement total du rôle protecteur. Les processus naturels de régénération ainsi que la présence, parfois consternante, d'arbres morts sur pied ou au sol, prodiguent encore une protection contre avalanches et chutes de pierres. Si la présence d'une protection résiduelle contre les dangers naturels après un ouragan est indéniable, il est en revanche nettement plus difficile d'en quantifier les effets ainsi que son évolution au fil du temps.

Le présent travail vise à évaluer la capacité protectrice que dispensent les arbres laissés au sol, 20 ans après un ouragan dévastateur comme celui de 1990. Il se concentre essentiellement sur l'effet mécanique induit par les troncs des arbres morts et réservera l'étude de la nouvelle végétation à de futurs travaux.

1.1 Etat des connaissances actuelles

1.1.1 La perturbation de l'écosystème

Les écosystèmes, ensembles d'êtres vivants et de leurs relations, sont régis par différentes forces opposées mais interdépendantes entre les éléments qui les composent (Wu et al, 1995). Si ces relations se modifient dans l'espace et dans le temps, il arrive parfois qu'un cataclysme majeur les bouleverse totalement. L'écosystème évolue alors vers un nouvel équilibre des forces, parfois éloigné du précédent.

La science dite *écologie des perturbations* définit la perturbation de l'écosystème comme « un événement relativement discret dans le temps et dans l'espace, qui trouble la structure de l'écosystème, de la communauté ou de la population et modifie la disponibilité des ressources, des substrats ou de l'environnement physique » (White et Pickett, 1985). Incendies, inondations, pullulements de ravageurs, ouragans, etc. représentent ainsi les menaces les plus importantes pour le milieu forestier (Pluess et al, 2010).

Ces perturbations, leurs conséquences ainsi que les enjeux qu'elles induisent constituent un domaine d'étude varié et nécessaire à leur gestion future.

1.1.2 Les ouragans

Les tempêtes de vent sont les cataclysmes forestiers les plus brefs dans le temps. D'une durée de l'ordre de la demi-heure pour les orages d'été à plusieurs jours pour les tempêtes hivernales, ils peuvent détruire des massifs forestiers atteignant parfois les 100'000 km² dans les cas extrêmes (Wohlgemuth, 2010). De caractéristiques différentes, les ouragans en Suisse sont le plus souvent classés en fonction de la vitesse des vents qu'ils occasionnent. Leurs dégâts dépendent de divers facteurs, les plus importants demeurant la vitesse des vents et la surface de forêts susceptible d'être touchée. Généralement, plus un pays est recouvert de forêt et plus les dégâts liés à un épisode venteux de forte intensité sont importants.

La structure ainsi que la composition des massifs revêt aussi une importance quant à la résistance de ces derniers face au vent. Les conifères résistent généralement moins bien aux ouragans que les feuillus ce qui rend nos forêts de montagne, essentiellement constituées de résineux, extrêmement vulnérables lors de forts épisodes venteux.

Au cours des deux dernières décennies, la Suisse dut faire face à deux ouragans majeurs, Viviane en 1990 et Lothar en 1999, qui causèrent d'importants dégâts aux surfaces boisées. Ces cataclysmes fournirent toutefois de nouvelles possibilités d'étude des perturbations de l'écosystème forestier.

1.1.3 Viviane

L'ouragan Viviane, ayant frappé l'Europe en février 1990, s'est formé en période hivernale, à la suite d'un fort gradient de pression et de température entre l'Islande et les Açores (fig. 1) (OcCC, 2003).

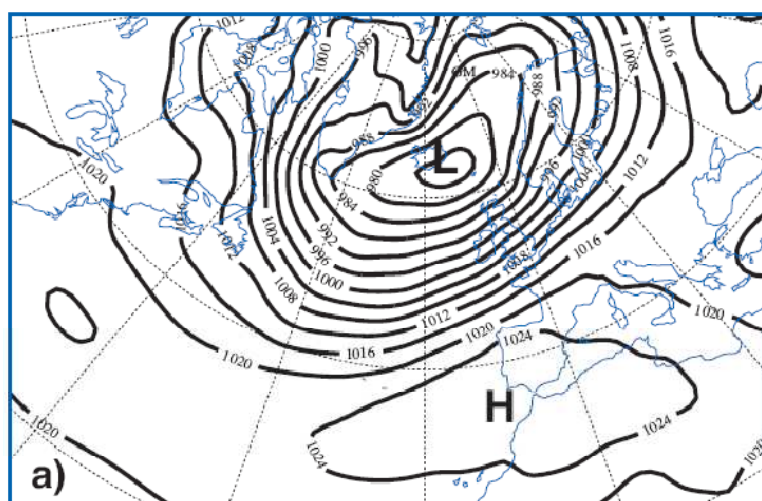


Fig. 1: Situation météorologique du 27.2.1990 impliquant les forts vents de la tempête Viviane (OcCC, 2003)

Les vents qui atteignirent la Suisse les 27 et 28 février 1990 provenaient du nord au nord-ouest, atteignant parfois des vitesses vertigineuses. D'une vitesse de 181 km/h à Covatsch en Engadine (GR), ils atteignent un sommet de 269 km/h au Grand Saint-Bernard (VS).

Balayant de nombreuses forêts et habitations sur son passage, Viviane abattu 4.9 millions de mètres cubes de bois en Suisse, soit la coupe ordinaire de 13 mois d'exploitation. L'ouragan impliqua des investissements de l'ordre des 260 millions de francs tant dans les projets de protection contre les dangers naturels que dans la réparation des dégâts forestiers (Schlüepp et al, 1994).

Suite à la tempête Viviane, les instituts fédéraux ont conservé plusieurs chablis¹ dans leur état naturel afin d'en étudier l'évolution au fil du temps. C'est notamment le cas des forêts d'étude des régions de Disentis (GR), Pfäfers (SG), Schwanden (GL) et Zweisimmen (BE) dans les Alpes suisses.

1.1.4 Etudes menées sur les chablis

Durant la première décennie suivant Viviane, plusieurs études ont été conduites dans ces différentes régions tests. Les thématiques étudiées étant vastes, on peut les regrouper en deux catégories distinctes : d'une part les études concernant la réaction des éléments vivants à la suite de la tempête et d'autre part les études portant sur la modification des fonctions forestières et notamment de la fonction de protection contre les dangers naturels.

C'est ainsi que certaines thématiques comme la végétation et le rajeunissement des forêts ravagées ont été étudiés sur des chablis laissés en l'état, nettoyés ou plantés (Wolgemuth et al, 2002). Les changements et l'évolution des insectes forestiers à la suite de la tempête ont aussi fait l'objet de travaux de recherche (Duelli et al, 2002), de même que les effets de l'abrutissement du gibier au sein des chablis (Moser et al, 2008).

Plusieurs travaux ont évalué les conséquences de différents scénarios de gestion des chablis sur l'effet protecteur d'une forêt ravagée (Schönenberger et al, 2005). La désintégration des troncs par les champignons, leur résistance ainsi que celle des racines aux charges statiques ont été testés dans la région de Schwanden en 2003 (Amman, 2006).

Une étude parue en 2002 a traité en particulier de la résistance et des déplacements des arbres au sol au cours de la première décennie après Viviane (Frey et al, 2002). Par des essais de traction, la charge maximale à laquelle les troncs peuvent résister a été testée. L'étude s'est aussi concentrée sur la position des troncs à la fin de la première décennie. Bon nombre de troncs ont été digitalisés à partir des photos aériennes de 1991 et de 2001.

¹ Le chablis est la caractérisation d'une forêt ravagée par un ouragan.

Certains troncs ont aussi été marqués sur le terrain à l'aide de plaquettes d'aluminium, permettant ainsi une réévaluation ultérieure de l'état des chablis.

Mises en relation avec des mesures de hauteur de neige effectuées in situ et chaque année, des conclusions ont pu être formulées quant au rôle protecteur dispensé par les chablis. Ces études mécaniques menées sur les dix premières années après la tempête semblent montrer que les arbres laissés au sol à la suite de l'ouragan dispensent à eux seuls une protection paravalanche acceptable au moins durant la première décennie suivant une tempête.

De ces projets d'étude résulte une aide à la décision en cas de dégâts en forêt éditée par la Confédération. Ayant comme destinataires les responsables forestiers de tout le pays, cette publication appuie les professionnels dans leurs choix stratégiques à la suite d'un ouragan.

1.2 Buts du travail et hypothèses

1.2.1 Buts du travail

Si les résultats des études menées entre 1990 et 2001 révèlent bon nombre de conclusions quant à l'évolution des chablis au cours de la première décennie après la tempête, ces chablis ont depuis lors poursuivi leur évolution naturelle.

Objectif primaire

Le présent travail vise donc en premier lieu à évaluer l'état de l'une de ces forêts, 20 ans après l'ouragan, afin d'en étudier l'évolution lors de la deuxième décennie. Les conclusions des études précédentes seront réévaluées en se fondant en partie sur les procédés déjà utilisés, de sorte à obtenir des résultats aussi comparables que possible. L'accent sera en particulier porté sur le comportement mécanique des troncs.

Objectifs secondaires

L'état général des troncs sera ensuite mis en relation avec des données neigeuses de la région étudiée. Le travail permettra ainsi d'aboutir à des conclusions quant à l'effet de protection paravalanche naturel dispensé par le chablis deux décennies après Viviane. Finalement, ce travail servira de base à de futures études sur l'évolution des chablis. Il permettra d'étudier la dégradation des bois au cours de la troisième décennie suivant l'ouragan.

1.2.2 Questions et hypothèses de travail

Question 1 : Les bois jonchant le sol se sont-ils déplacés ou brisés au cours de la deuxième décennie?

Hypothèse 1 : Les troncs au sol se sont déplacés et brisés d'avantage au cours de la deuxième décennie suivant l'ouragan que durant les premières années. La raison principale est la dégradation du bois et sa perte de résistance.

Question 2 : Quels facteurs ont le plus d'influence sur les mouvements des bois ?

Hypothèse 2 : La pente est le facteur principal influençant le déplacement des troncs d'arbres au cours de la deuxième décennie.

Question 3 : La hauteur des bois par rapport au sol s'est-elle réduite au cours de la deuxième décennie après Viviane?

Hypothèse 3 : La hauteur effective des troncs au sol s'est réduite au cours de la deuxième décennie, mais dans une moindre mesure que durant les dix premières années suivant la tempête.

Question 4 : Quelle charge neigeuse peut encore supporter un tronc perpendiculaire à la pente en 2010?

Hypothèse 4 : La charge maximale que les troncs perpendiculaires à la pente peuvent supporter s'est fortement réduite en dix ans et est presque inexistante, vingt ans après l'ouragan.

Question 5 : Les bois sont-ils encore capables de protéger contre les avalanches 20 ans après un ouragan et si tel en est le cas, contre quelle intensité d'événement sont-ils capables de protéger ?

Hypothèse 5 : Les troncs plus ou moins perpendiculaires à la pente ne sont plus capables, à eux seuls et 20 ans après la tempête, de prévenir le déclenchement d'avalanche. La construction de paravalanches comblant ce manque est nécessaire.

Autant de questions demeurant encore inexplorées et auxquelles les expérimentations conduites au cours de ce travail tenteront de répondre, tout en mesurant les conséquences d'une absence d'intervention, 20 ans après un ouragan.

2. Matériel et méthodes

2.1 Sujet d'étude

2.1.1 La région de l'étude : climat et particularités

Le présent travail se concentre principalement sur une forêt de la région de Disentis (GR) ravagée par l'ouragan Viviane en février 1990 et devenue dès lors l'un des chablis d'étude des instituts de recherche fédéraux (fig. 2).

Disentis (Mustér) est une région du nord-ouest des Grisons. Non loin d'Andermatt (UR), elle se situe au centre des Alpes suisses, aux sources du Rhin et de la vallée du Rhin antérieur, la Surselva. Situé à une altitude de 1'150 mètres, Disentis possède un climat continental typique du centre des Alpes. La température moyenne y est de 5.9°C pour un total de 1'036 millimètres de précipitations par an, dont la majorité est répartie sur les mois d'été (Meteoschweiz, 2009). La hauteur de neige moyenne avoisine 110 cm et peut atteindre jusqu'à 250 cm avec un temps de retour² de 30 ans (Frey et al, 2002).

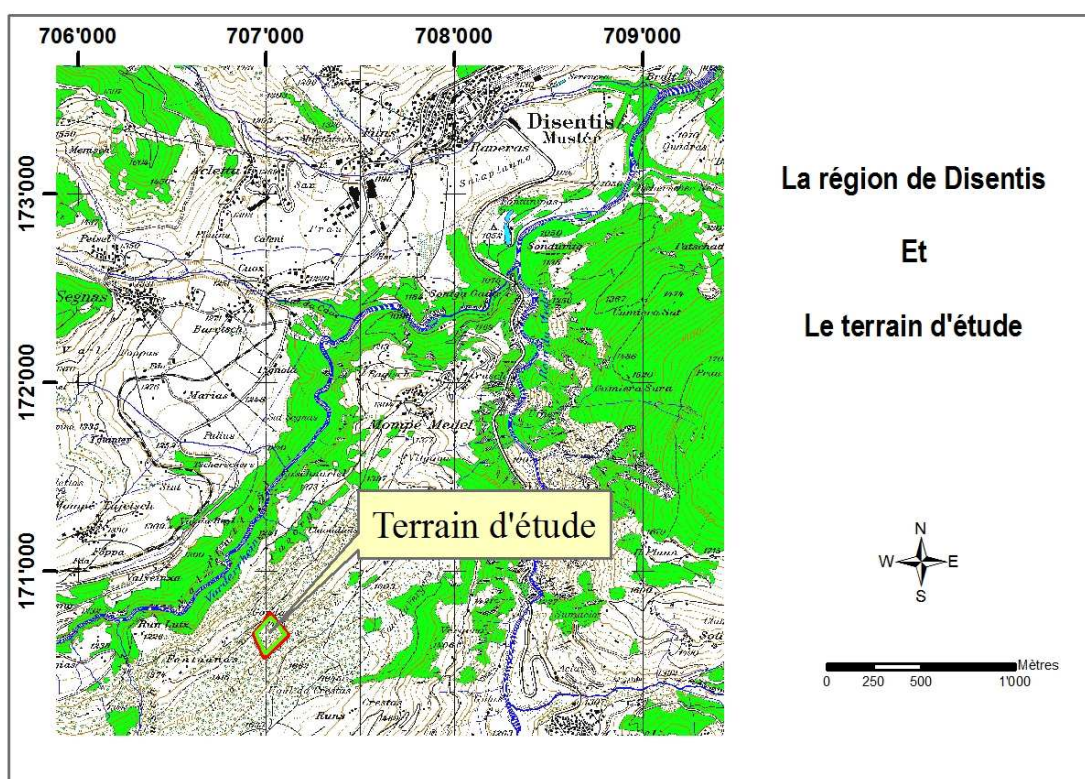


Fig. 2: Carte situant l'emplacement de la zone d'étude dans la région de Disentis

² Le temps de retour est la période de temps à l'issue de laquelle un événement, comme une hauteur de neige, d'une ampleur fixée devrait statistiquement avoir lieu.

2.1.2 Le terrain d'étude

Située au lieu-dit « Uaul Cavorgia Su », à mi-chemin entre Disentis et Curaglia, la forêt ravagée par Viviane était une pessière typique de l'étage haut-montagnard du centre des Alpes. D'une altitude comprise entre 1'400 et 1'550 mètres, elle était principalement constituée d'épicéa (*Picea abies*) de 110 à 150 ans d'âge et était donc particulièrement sensible aux événements venteux (Schönenberger et al, 2005). D'une densité de 363 arbres par hectare, la forêt bénéficia de quelques interventions sylvicoles dès 1972 lesquelles prirent fin, bien sûr, lors de l'ouragan.

Son exposition nord-ouest lui valut d'être fortement touchée par les vents de Viviane lesquels la détruisirent totalement. Sa pente, comprise entre 30° et 50°, son altitude ainsi que la hauteur de neige présente en hiver, rassemblent les conditions idéales au déclenchement et à l'écoulement d'avalanches.

Demeurant l'un des chablis les plus vastes provoqués par Viviane en Suisse, la zone d'étude de Disentis a été divisée en trois zones distinctes durant l'année qui suivit la tempête (fig. 3). La partie centrale de la surface est laissée sans intervention, les troncs jonchant le sol. Les troncs des parties est (fig. 3, partie de gauche) et ouest (fig. 3, partie de droite) ont été exploités et le terrain nettoyé. La partie ouest a en outre été replantée de jeunes arbres. Cette division de la surface du chablis en trois zones distinctes permet d'étudier au fil du temps l'évolution de ce qui pourrait correspondre à trois stratégies forestières différentes.

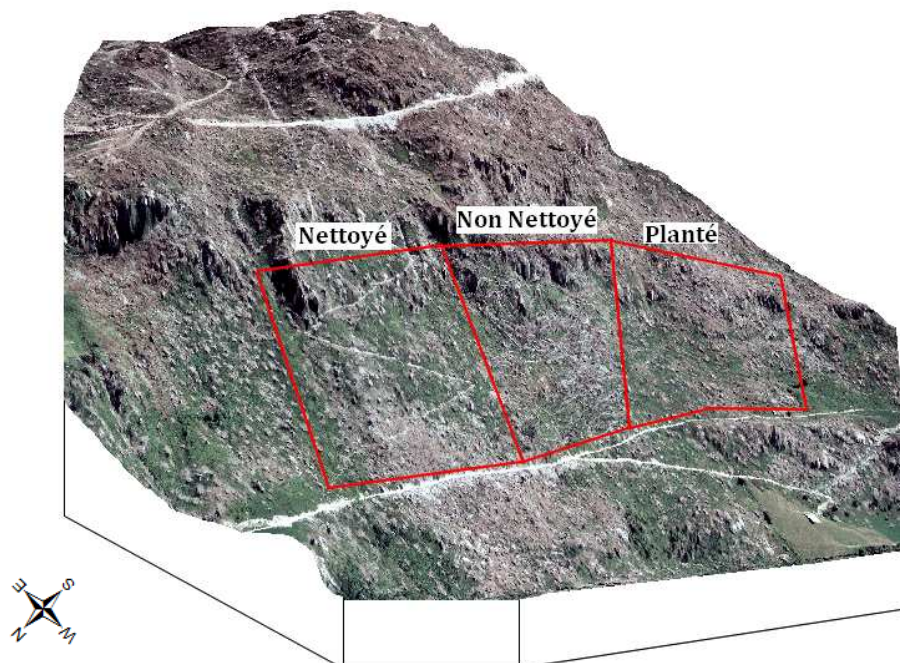


Fig. 3: Les trois différentes parties de la zone d'étude un an après la tempête, en 1991

La surface faisant directement l'objet de l'étude du présent travail est la partie centrale (fig. 3), demeurant inexploitée et dont les troncs jonchent encore le sol, vingt ans après la tempête.

Cette partie de la forêt représente une surface de 2.21 hectares. Elle est délimitée au bas par un chemin agricole permettant l'accès de véhicules motorisés et comporte un chemin pédestre en sommet ainsi qu'en son centre (fig. 4).



Fig. 4 : Configuration du chablis non traité sur la base des photos de 1991. En bordeaux, les chemins pédestres ainsi que le chemin agricole bordant le chablis. Les troncs au sol sont bien visibles.

1.1.3 Aperçu général des méthodes

La méthodologie utilisée consiste à évaluer le comportement mécanique des troncs et se répartit en trois grands thèmes principaux :

Déplacement et dislocation

Le déplacement vertical et horizontal des troncs au cours des dix dernières années sera évalué à l'aide d'une station totale. Bon nombre de troncs marqués d'une plaque d'aluminium en 2001 (Frey et al, 2002) faciliteront cette mesure. La hauteur de ces troncs d'arbre par rapport à la surface du sol ainsi que sa modification seront aussi mesurées à l'aide de méthodes photogrammétriques. Cette hauteur est d'une importance toute particulière pour ce qui est de la protection paravalanche.

Charge de rupture et décomposition

Deuxièmement, le taux de décomposition du bois après deux décennies sera évalué à l'aide d'un appareil nommé résistographe permettant d'obtenir un pourcentage de détérioration des troncs. Ces mesures seront liées à des essais de mise sous charge d'un échantillon de troncs choisis, permettant ainsi d'évaluer leur comportement face à un poids tel que celui du manteau neigeux hivernal.

Enneigement

Finalement, l'étude des conditions d'enneigement de la région étudiée sur la base historique des stations de mesure permettra de tirer des conclusions quant à la protection paravalanche réellement dispensée par le chablis.

Par leur diversité, ces méthodes permettront de mesurer les déplacements et la situation des troncs dans les trois dimensions. Ces mesures, alliées à la mesure des fractures subies par les bois, à leur taux de décomposition et leur résistance aux charges permettront d'évaluer l'état général du chablis et répondront ainsi à l'objectif primaire de l'étude. Une mise en relation des mesures avec les données d'enneigement permettra en outre de mesurer l'efficacité paravalanche des troncs, objectif secondaire du travail. Le tout servira de base à de futures études sur l'évolution du chablis.

2.1 Etude de la dislocation des bois au sol

La première partie de l'expérimentation a pour but d'étudier le déplacement, le bris des troncs ainsi que les facteurs les influençant.

2.1.1 Mesures de terrain

Objets étudiés

Afin de permettre un monitoring efficace et fiable du comportement des bois au sol au cours de la deuxième décennie suivant Viviane, il est indispensable d'identifier les mêmes éléments que ceux étudiés dix ans auparavant au sein du chablis non traité. Les scientifiques qui avaient conduit l'étude de 2001 (Frey et al, 2002) avaient marqué les 25 troncs étudiés à l'époque à l'aide de plaquettes d'aluminium. Cette opération avait été expressément conduite dans le but de faciliter l'identification ultérieure de ces arbres. Ce sont au total 64 points de mesure répartis sur les 25 troncs de 2001 qui durent être recherchés pour cette partie de l'étude.

Matériel utilisé

Le matériel utilisé comprend une station totale de type *LEICA TPS 12 000* de la firme Leica Geosystems SA, Heerbrugg (CH) permettant la mesure précise de points géographiques dans les trois dimensions. Un triple prisme réflecteur fourni par la même firme a été utilisé afin d'améliorer la précision de la mesure. Deux gilets fluorescents ont été portés par les personnes se trouvant dans le terrain afin d'en favoriser le repérage par l'opérateur de la station totale. Deux radios de type Motorola GP300 ont été utilisées afin de permettre la transmission d'information entre l'opérateur et les personnes de terrain.

Préparation des mesures

La préparation des mesures a consisté avant tout en un repérage de terrain, ayant pour but de retrouver la zone où se situaient les plaquettes. Une carte comportant les troncs et les points mesurés en 2001 a été confectionnée à l'aide du programme *ArcGis V.9.3* de la firme ESRI, Redlands (USA). Cette carte a permis de s'orienter dans ce terrain relativement hostile et a servi de base de discussion entre l'opérateur de la station et les personnes se situant dans le terrain.

Principe de mesure

La mesure s'effectue par une levée de points sur les troncs. Les deux extrémités ainsi que l'emplacement de chaque fracture des arbres couchés fait l'objet d'un point de mesure. En reliant ces points de mesure entre eux, il devient possible de retrouver la position des troncs eux-mêmes. La station totale ainsi que son opérateur ont été placés dans un pré situé sur l'autre rive de la vallée à 800 mètres du chablis (fig. 5) et offrant une vue de l'ensemble du chablis. Elle se trouvait aux coordonnées suisses (X 706'480 ; Y 171'273). Deux autres personnes munies de gilets de couleur, du réflecteur ainsi que d'une radio recherchaient les 25 troncs au sein du chablis.

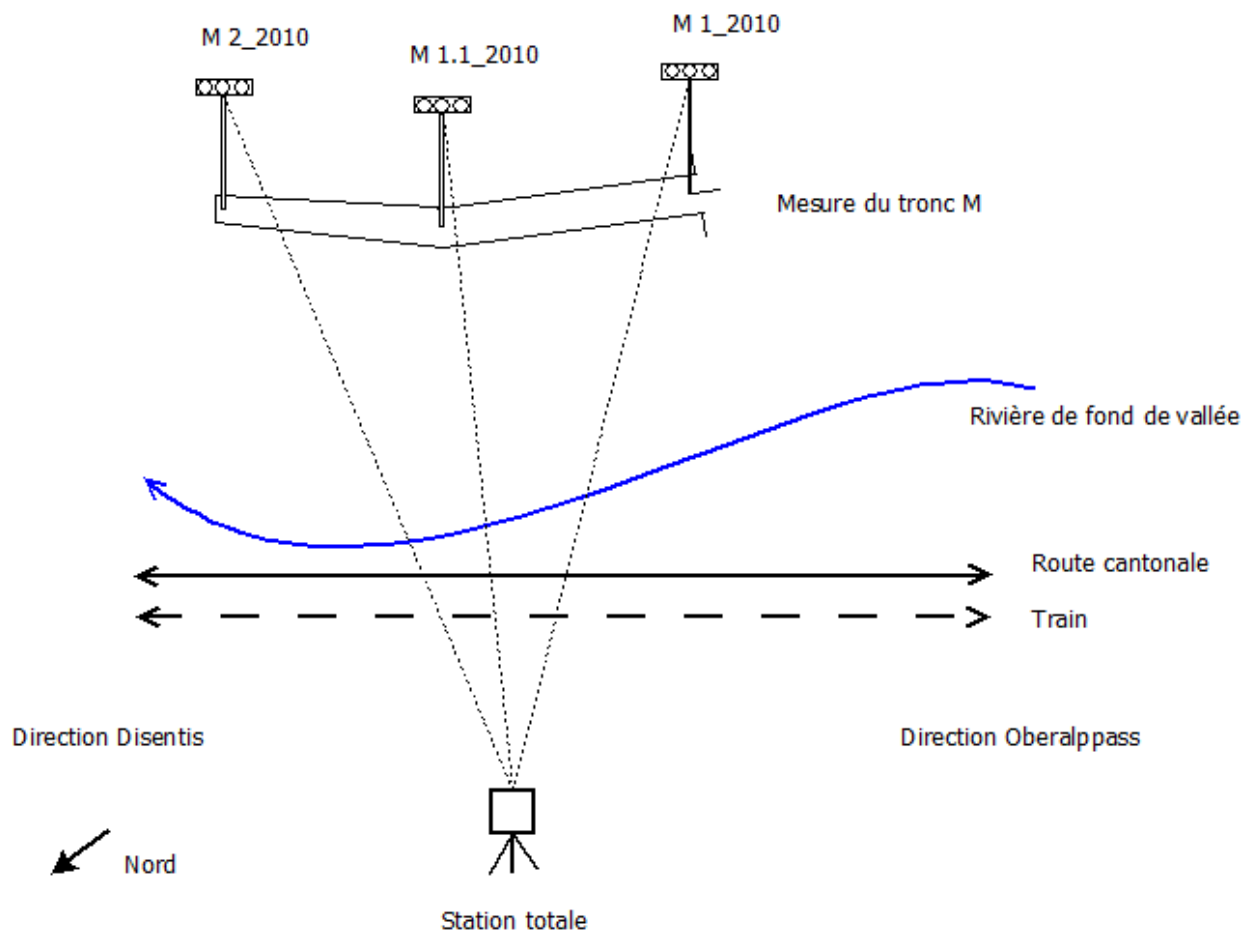


Fig. 5 : Schéma du principe de mesure de l'emplacement des troncs.

Chaque fois qu'un point a été clairement identifié, son appellation fut transmise par radio à l'opérateur de la station totale. La mesure fut effectuée sur le réflecteur positionné à l'aplomb du point. Ses coordonnées furent enregistrées par l'opérateur de la station totale. Le réflecteur était ensuite déplacé au point suivant et la mesure continuait de la sorte. Lorsqu'un point n'était pas visible depuis la station totale en raison de la végétation le masquant, un point de mesure excentrique, selon la technique couramment utilisée par les géomètres, était créé dans une partie plus visible du terrain. Les rectifications à apporter aux coordonnées du point mesuré furent ensuite directement transmises par radio à l'opérateur.

Le système de classification des troncs adopté reprend celui utilisé lors de l'étude de 2001. En 2001, chaque tronc a été désigné d'une lettre majuscule. Cette lettre était ensuite suivie d'un nombre de 1 à 4, distinguant les différents points mesurés et marqués à l'époque d'une plaquette d'aluminium sur le tronc lui-même. La nouvelle classification élaborée en 2010 utilise la même désignation des troncs afin de limiter les confusions (fig. 6). Les plaquettes retrouvées, correspondant aux points déjà mesurés, possédaient déjà une appellation dans le système de 2001. Ces points ont été à nouveau mesurés et distingués de ceux de 2001 par l'ajout de l'année de mesure (2010). Ainsi, le premier point du tronc M (nommé M1 en 2001) a été renommé M1_2010 lors de la nouvelle mesure. Les troncs relevés en 2010 comportaient toutefois de nouvelles fractures apparues au cours de la dernière décennie et qui n'étaient évidemment pas marquées de plaquettes d'aluminium. Ces fractures ont été mesurées et distinguées des anciennes par un numéro supplémentaire. La nouvelle fracture entre M1_2010 et M2_2010 est ainsi nommée M1.1_2010 (fig. 6).



Fig. 6 : Système de classification des points de mesure en 2001 et en 2010

2.1.2 Calcul du déplacement

Contrôle des mesures

Les points mesurés permettent donc une reconstruction virtuelle des troncs. Une fois extraites de la station totale, les coordonnées ont été insérées sous forme de points dans *ArcGis V. 9.3*. En reliant les points d'après leur nom et leurs numérotations les troncs ont été virtuellement représentés par des lignes permettant une meilleure visualisation de leur position.

Les éventuelles erreurs de numérotation ont ainsi pu être corrigées et la conformité des points mesurés contrôlée.

Déplacement effectif

Les points marqués d'une plaquette d'aluminium ayant été mesurés en 2001 à l'aide d'un procédé similaire, il est dès lors possible de quantifier leur déplacement. Le déplacement vertical (Z) est obtenu par une simple soustraction de l'altitude de 2001 par celle de 2010 (formule 1). Par souci de simplification, la lettre Z désigne les coordonnées altitudinales, X les coordonnées suisses orientées au nord et Y les coordonnées suisses orientées à l'est.

$$(1) \quad \Delta_{Vertical} = Z_{2001} - Z_{2010} \quad [m]$$

Le déplacement horizontal (X et Y) est obtenu par une utilisation simple du théorème de Pythagore (formule 2).

$$(2) \quad \Delta_{Horizontal} = \sqrt{(X_{2001} - X_{2010})^2 + (Y_{2001} - Y_{2010})^2} \quad [m]$$

Seuls les points mesurés et marqués en 2001 qui furent identifiés en 2010 avec certitude ont été comparés pour la mesure de déplacement, de manière à éviter les erreurs d'interprétation.

2.1.3 Mesure de la hauteur effective des troncs

La hauteur effective d'un tronc correspond à la distance entre la partie supérieure du tronc couché et le sol (fig. 7). Les éventuelles branches ne sont pas considérées lors de la mesure. La mesure de hauteur des troncs a été effectuée selon trois procédés différents, fournissant ainsi trois sources de mesure différentes :

Mesure à partir d'un TIN

La première découle directement de la mesure des 25 troncs sur le terrain. Lors des expérimentations de 2001, les lignes de niveau du terrain avaient été dessinées à partir de photos aériennes (cf. P.Thee, WSL). A l'aide d'*ArcGis* et à partir de ces lignes, un TIN (Triangulated Irregular Network) a été créé. Le TIN est en réalité un assemblage de triangles de même altitude qui, regroupés, forment une surface d'altitude continue. Les triangles constituent une extrapolation des données altitudinales entre les courbes de niveau. Une partie des altitudes a donc été créée par le programme. Les points des troncs mesurés sur le terrain à l'aide de la station totale comportent, eux aussi, une composante altitudinale.

L'altitude de ces points étant forcément supérieure à l'altitude du sol les supportant, une soustraction de l'altitude d'un point par celle donnée par le TIN à son emplacement permet d'obtenir la hauteur effective du tronc. Cette opération de soustraction a été effectuée à l'aide de l'outil « sample » d'ArcGis.

Mesure photogrammétrique

La deuxième méthode permettant d'obtenir la hauteur effective des troncs est la mesure tridimensionnelle à partir de photos aériennes. Afin de permettre la réalisation de cette étude, une prise de photos aériennes au 1 : 4'000 a été réalisée le 17.08.2009 par Swisstopo, Wabern (BE). Ces photos sont des photos infrarouges permettant non seulement l'évaluation des troncs couchés mais aussi l'étude de la végétation. Le traitement de ces photos a été effectué à l'aide d'un appareil de type *Digital Photogrammetry Station* de la firme British Aviospace Systems, London (GB), ainsi que du software *SOCET SET V.5.41*, de la même firme, permettant une vision tridimensionnelle des images. La mesure de la hauteur effective a été effectuée pour les mêmes points que ceux mesurés in situ sur les 25 troncs. En plaçant le curseur sur le tronc dont on veut mesurer la hauteur, puis en le déplaçant sur le sol avoisinant, la hauteur effective du tronc a été déduite. Selon la définition de la hauteur effective, la mesure devrait avoir lieu au centre du tronc lui-même. Toutefois, la photo aérienne ne permettant pas une vision du sol en cet endroit, la mesure a été effectuée à l'amont ou à l'aval du tronc, sur une partie visible du sol, induisant ainsi une différence de quelques centimètres sur le résultat (fig. 7).

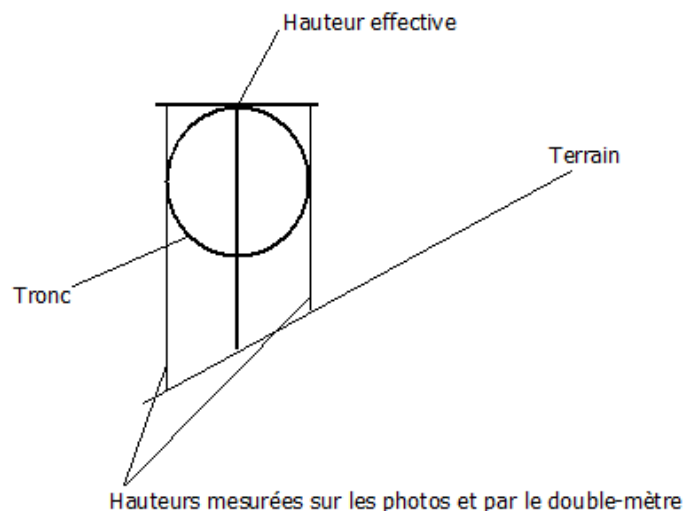


Fig. 7 : Schéma de mesure des hauteurs effectives à l'aide des différentes méthodes.

Le dernier type de mesure effectué est la mesure directe effectuée sur le terrain à l'aide du double-mètre. Là encore, la hauteur mesurée est légèrement décalée par rapport au centre du tronc (fig. 7).

2.1.4 Analyse multivariée et arbre de décision

Le but recherché par cette analyse est d'évaluer l'influence de cinq facteurs principaux sur le comportement des troncs au cours de la deuxième décennie. Elle étudiera donc exclusivement l'influence de ces facteurs sur les 25 troncs mesurés in situ.

Surface analysée

Les 25 troncs, ne sont pas également répartis sur la surface d'étude et se trouvent en réalité concentrés sur une petite partie du chablis non traité. Cette zone a donc été divisée en quatre parties nommées *haut droite*, *haut gauche*, *bas droite* et *bas gauche* (fig. 8). Les limites supérieure et inférieure de la zone correspondent à deux chemins pédestres présents dans les environs. La division interne de la surface a été effectuée à l'aide des photos aériennes de 2009 ainsi que d'*ArcGis*.

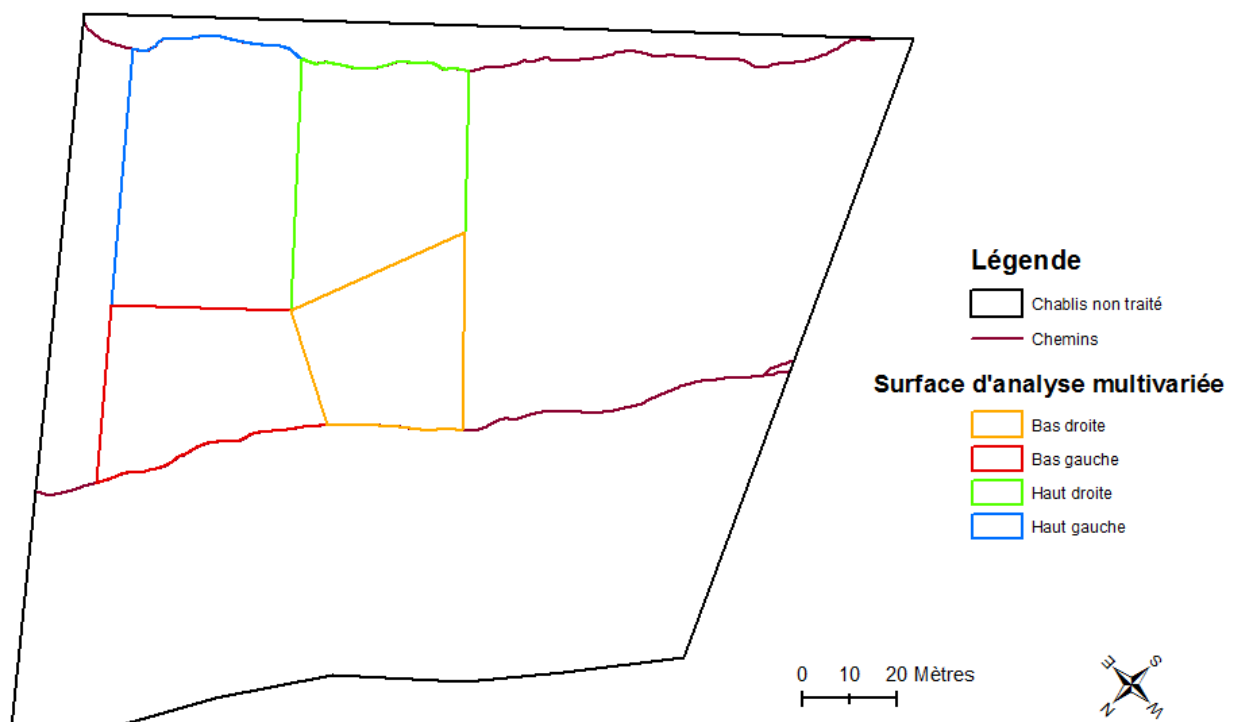


Fig. 8 : Domaine d'étude de l'analyse multivariée par rapport au chablis non traité

Digitalisation des paramètres

Les cinq paramètres retenus pour cette analyse sont (1) les rochers, (2) les ruptures de pente, (3) la végétation (buissons, arbustes et arbres), (4) les enchevêtrements de troncs ainsi que (5) la pente du terrain. La supposition effectuée est que les conditions prédominant au début d'une décennie (1991 ou 2001) sont celles influençant le déplacement durant la décennie à venir.

Les zones du terrain recouvertes par ces paramètres ont ensuite été digitalisées sous forme de polygones, à l'aide d'*ArcGis* et à partir des photos aériennes de 1991, 2001 et 2009. Les ruptures de pente ainsi que les enchevêtrements de troncs présents en 2001 ont été digitalisés à partir des photos de 2001. Les rochers ainsi que la végétation proviennent des photos de 2009, car elles permettent une meilleure visibilité de ces éléments. Les enchevêtrements de troncs présents en 1991 ont quant à eux été digitalisés à partir des photos de 1991. Finalement, la pente du terrain n'a pas été modélisée mais provient des données du TIN précédemment créé.

La date des photos à partir desquelles rochers et ruptures de pente ont été modélisés n'a guère d'influence sur le résultat, puisque ces éléments ne se sont pas modifiés au cours des deux décennies. La végétation n'est modélisable que sur les photos de 2009, car elles sont spécifiquement prévues à cet effet. En outre, peu de végétation est présente sur les photos de 1991 et de 2001.

Influence des paramètres sur les mesures

Chacun des points des 25 troncs mesurés ont ensuite été mis en relation avec la digitalisation des paramètres. Une variable binaire de valeur 1 ou 0 leur a été attribuée selon qu'ils étaient respectivement contenus ou non dans les polygones de l'un des paramètres. Pour chaque point la pente du terrain à son emplacement a été déduite à l'aide d'*ArcGis*. Une fois tous les paramètres réunis, un arbre de décision basé sur les cinq paramètres a été constitué à l'aide du programme *SPLUS V.7* de la firme *Insightful Corporation*, Somerville (USA). L'arbre de décision est une technique regroupant les paramètres et les résultats en groupes les plus homogènes possibles. Il permet la mise en évidence des éléments influençant le plus le déplacement des troncs.

2.1.5 Statistique utilisée

Le traitement des résultats de cette partie fait tout d'abord appel à la statistique descriptive classique. Moyennes, médianes, boxplots et écarts-types ont servi de premiers indicateurs de la valeur des résultats. Le programme statistique utilisé dans ce travail pour le calcul et les illustrations est *GraphPad Prism V.5.01* de la firme GraphPad (USA).

Les déplacements verticaux et horizontaux ont été testés à l'aide du test de Mann-Whitney, permettant de comparer les résultats entre la première et la deuxième décennie. Ce test s'est effectué de manière bilatérale sur des échantillons indépendants. Les résultats de l'analyse multivariée ont été quant à eux analysés au sein de la matrice des corrélations non paramétriques de Spearman.

2.2 Etude de la résistance du bois

2.2.1 Mesures de terrain

Objets de l'étude

Les mesures de résistance demandant une logistique ainsi qu'un personnel considérable, elles durent s'effectuer sur un nombre réduit de troncs. Un échantillon de 12 troncs a donc été choisi au sein du périmètre d'étude et selon trois critères primordiaux :

- les troncs choisis doivent se situer le plus possible le long d'une même ligne droite traversant le chablis ;
- les troncs sont perpendiculaires à la pente ;
- les troncs sont retenus au minimum en deux endroits distincts par des appuis fixes et robustes, telles que des souches, pierres, autres troncs, etc.

Parmi les 12 troncs choisis, seuls 10 troncs ont été testés, (fig. 9) deux d'entre eux ne possédant pas une configuration permettant de réaliser le test.

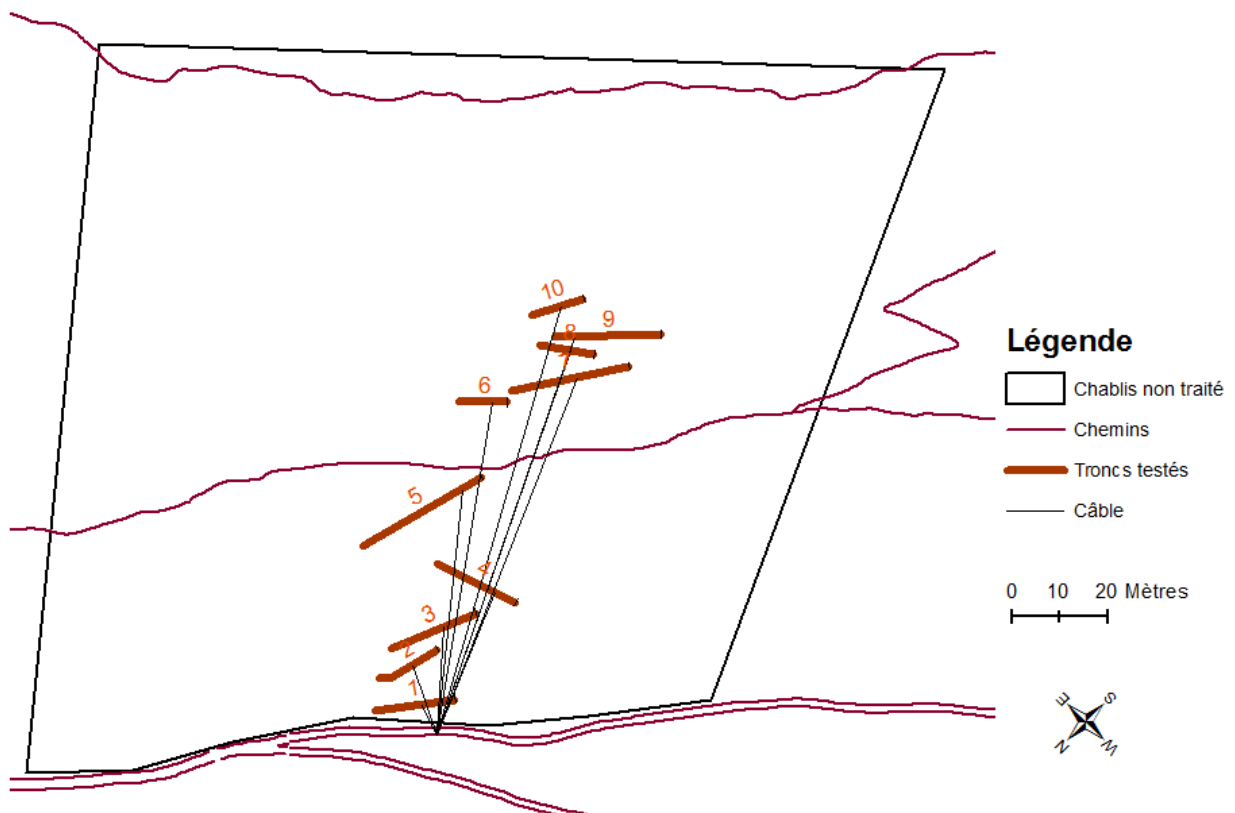


Fig. 9 : Situation des dix troncs testés lors des essais de traction in situ. Au bas du terrain se trouve le chemin agricole sur lequel le tracteur était situé.

Matériel utilisé

La source de force pour les essais de traction a été fournie d'un tracteur forestier appartenant aux services forestiers de Disentis et couramment utilisé pour le débardage de grumes. Il était équipé d'un câble d'une longueur de 150 m produisant une charge maximale de 80 KN, ainsi que d'une télécommande permettant d'actionner le câble à distance. Un appareil de mesure de la force et un trépied sur lequel est monté un appareil permettant la mesure du déplacement des troncs tous deux de fabrication interne au WSL, ont été utilisés pour la mesure de la force appliquée et du déplacement des troncs. Les données sont stockées à l'aide d'un ordinateur portable apporté sur le terrain. Un boîtier électronique, lui aussi fabriqué par le WSL, permet la liaison entre les instruments de mesure et l'ordinateur. Un générateur thermique a aussi été apporté afin de fournir le courant électrique à l'ordinateur.

Parmi le matériel moins lourd, une chevillière, un rapporteur d'angles, un double-mètre et un spray de marquage ont été emmenés afin de mener à bien les petits travaux de préparation.

Préparation des essais

Une fois les dix troncs choisis, la préparation des mesures s'est effectuée par un relevé précis de chaque tronc sur le terrain. Une esquisse a été effectuée pour chacun d'entre eux et les caractéristiques telles que leur longueur, leur épaisseur, leur hauteur effective, leur position azimutale et la pente du terrain ont été relevées. L'aspect de la topographie et de la végétation environnante a aussi été relevé. Si ces grandeurs n'étaient pas directement utiles lors des essais sur le terrain, elles l'ont par contre été pour l'évaluation des résultats. Parallèlement, le fonctionnement et la calibration des instruments ont été réalisés lors d'essais dans la halle d'expérimentation du WSL (fig. 10).



Fig. 10 : Essai du matériel dans la halle d'expérimentation du WSL, Birmensdorf. Ici, un bac de béton de 500 Kg est levé à l'aide d'un palan, permettant ainsi la calibration de l'appareil de mesure situé entre le bac et l'élévateur.

Principe de mesure

Lors de la mesure, le câble de traction a été lié au tronc, en un lieu se situant entre ses deux appuis. Le câble provenait du tracteur situé sur le chemin agricole à l'aval du chablis. Les troncs étant perpendiculaires à la pente, le câble se retrouvait souvent perpendiculaire au tronc testé (fig. 11). L'appareil de mesure de la force relié au boîtier électronique était placé entre le câble de traction et la partie du câble liée au tronc. Le boîtier de mesure du déplacement était disposé à l'amont du tronc (fig. 11) et était relié à celui-ci par une ficelle au bout de laquelle était disposé un fil de nylon résistant à une traction de 15 N. Le fil permettait, par sa rupture, d'éviter que l'installation de mesure du déplacement ne fût emportée avec le tronc dans le cas où il dévalait la pente. Ce boîtier de mesure était aussi relié au boîtier électronique lequel était finalement relié à l'ordinateur (fig. 11).



Fig. 11 : A gauche, l'installation de traction des troncs. Au premier plan (aval du tronc testé) se trouve le câble de traction et l'appareil de mesure de la force. A l'arrière plan (amont du tronc) et sur la photo de droite, on distingue le boîtier de mesure du déplacement, placé sur son trépied et relié au tronc par la ficelle et le fil nylon.

Une fois le système installé, l'angle formé par le tronc et le câble, de même que les longueurs entre le câble et les appuis ont été mesurés. La mise en charge du tronc s'est ensuite effectuée à l'aide de la télécommande actionnant le câble. La charge fut progressivement et régulièrement augmentée, jusqu'à la rupture du tronc ou jusqu'à ce que celui-ci dévale la pente. Une fois un essai terminé, toute l'installation était déplacée au tronc suivant, et ainsi de suite pour l'ensemble des dix troncs.

2.2.2 Données brutes

La force appliquée ainsi que le déplacement du tronc ont été enregistrés par l'ordinateur une fois par seconde et durant toute la durée de l'essai de traction. Il est dès lors possible d'obtenir la variation de la charge ainsi que celle du déplacement en fonction du temps. La charge maximale appliquée est obtenue en isolant la valeur maximale parmi toutes les données d'un essai. La force recherchée pour l'étude est la force tangentielle au tronc, occasionnant une translation ou une rupture du bois. Le câble ne formant pas toujours un angle strict de 90° par rapport au tronc, la composante tangentielle de la force appliquée a été déduite en multipliant la force maximale appliquée par le cosinus de l'angle formé par le câble et la perpendiculaire au tronc. L'énergie emmagasinée par un tronc est quant à elle obtenue en reliant la force appliquée directement avec le déplacement du tronc.

Il en résulte ainsi un graphe comportant la charge en ordonnée et le déplacement en abscisse. L'énergie [J] étant le produit de la force [N] par le déplacement [m], elle correspond exactement à la surface située au dessous de la courbe.

2.2.3 Répartition des contraintes dans le bois

A partir de la charge maximale appliquée, il est possible de calculer l'évolution des contraintes dans le bois, moyennant quelques calculs de statique externe. Pour ce faire, chaque tronç est considéré en tant que poutre de bois sur laquelle une charge ponctuelle est appliquée (fig. 12).

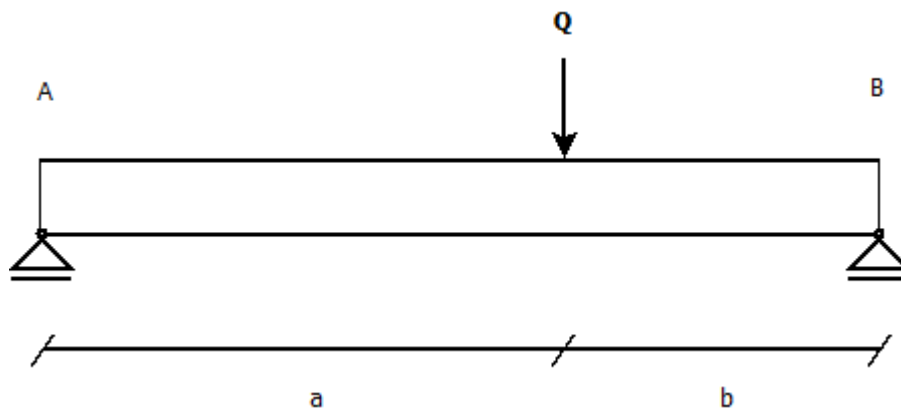


Fig. 12 : Schéma théorique d'une poutre simple de diamètre circulaire D et subissant une charge Q. Les lettres majuscules désignent les appuis, les minuscules les longueurs.

La première étape consiste à trouver la répartition de la charge entre les deux appuis. Cette répartition est donnée par un simple rapport obtenu entre la force et les longueurs (formule 3).

$$(3) \quad R_a = \frac{Qb}{(a+b)} \quad [\text{N}] \quad \text{et} \quad R_b = \frac{Qa}{(a+b)} \quad [\text{N}]$$

Le moment de flexion (M_i) est, quant à lui, calculé en multipliant la charge appliquée sur l'un des appuis par la distance par rapport à l'appui. La répartition des moments dans le cas simple d'une poutre bi-appuyée avec charge ponctuelle est linéaire par rapport à la distance aux appuis (fig. 13). Dans ce cas simple, le maximum des moments est atteint à l'endroit où la charge est appliquée. On calculera la force de réaction de l'appui A si l'on désire le moment en un lieu situé entre A et l'emplacement de Q et la force de réaction de l'appui B si c'est un moment entre B et Q qui est désiré.

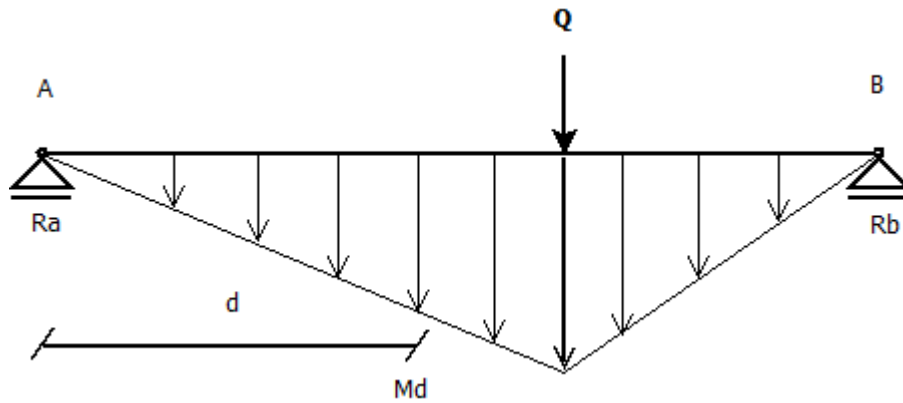


Fig. 13 : Répartition linéaire des moments de flexion le long d'un tronc en charge symbolisé ici par une ligne horizontale. Les moments sont symbolisés par les flèches orientées vers le bas. Le moment à une distance d de l'appui A vaut donc $M_d = R_a \cdot d$

Si le schéma de répartition des moments de flexion est effectué en respectant les proportions (fig. 13), il est possible de connaître le moment de flexion par une simple mesure des longueurs sur le graphique. Le moment d'inertie W est ensuite calculé en fonction du diamètre du tronc. Le calcul de ce moment d'inertie est effectué selon la formule couramment utilisée pour les poutres à section circulaire (formule 4).

$$(4) \quad W = \frac{\pi D^4}{32} \quad [\text{mm}^3]$$

Finalement, la contrainte occasionnée dans le bois est obtenue par division du moment de flexion par le moment d'inertie (formule 5). Si le tronc s'est rompu lors de l'essai, on appellera cette contrainte la contrainte de rupture du tronc, et qui correspond donc à la contrainte maximale que le bois peut supporter 20 ans après l'ouragan.

$$(5) \quad \sigma = \frac{M_f}{W} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Encastrement

Selon la configuration de l'essai, il est possible qu'un tronc de grande longueur induise un effet d'encastrement des appuis qui est considéré lors du calcul du moment de flexion, puisqu'il le modifie. Ce calcul peut être effectué selon les formules usuelles utilisées pour le calcul de l'encastrement maximal théorique. Toutefois, il est ici évalué de manière graphique par un ajustement manuel (fig. 14), permettant d'obtenir le moment de flexion après encastrement à l'emplacement de la rupture du tronc.

Cet ajustement manuel est justifié par le fait que les essais ne sont pas effectués en laboratoire et que les conditions environnantes peuvent l'influencer. De plus, comme il ne s'agit pas d'un encastrement au sens propre, l'utilisation de la valeur maximale d'encastrement est un peu exagérée, une valeur graphique quelque peu inférieure à la valeur maximale semble plus adéquate. L'encastrement permet donc d'adapter le calcul en fonction de la configuration de l'essai, ce que la formule théorique ne permet pas facilement. L'encastrement a été considéré sur un seul côté du tronc, aucun d'entre eux ne justifiant un double encastrement. L'effet de l'encastrement sur le graphique de répartition des moments de flexion est en réalité une modification de la ligne d'origine à partir de laquelle il est calculé (fig. 14).

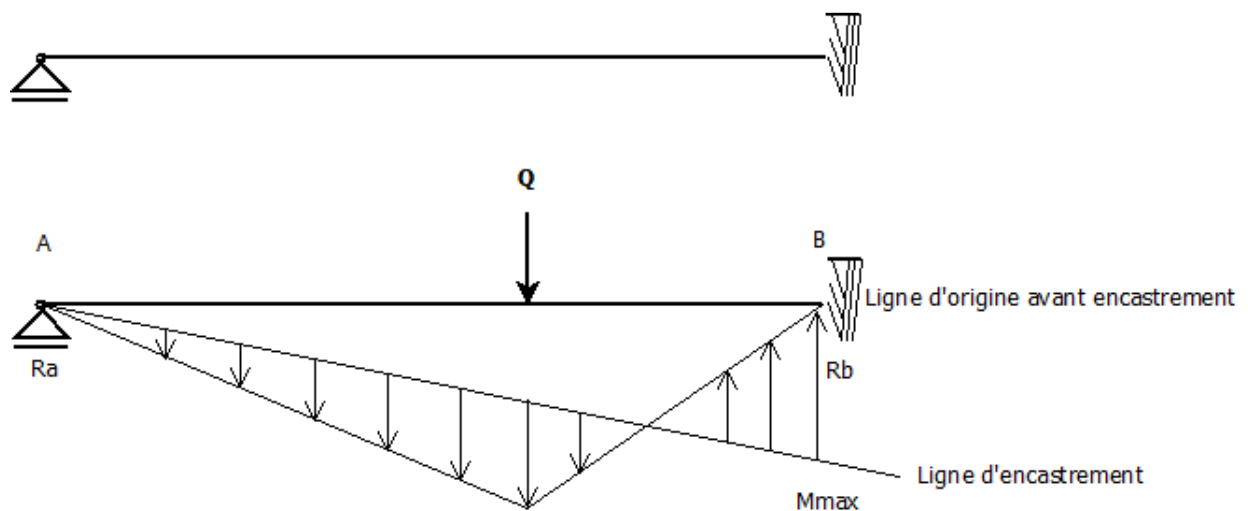


Fig. 14 : Exemple d'encastrement d'un tronc à droite.

Contraintes internes

Les contraintes internes ont aussi été considérées dans le calcul de mise en charge des troncs. A la différence d'une poutre saine, utilisée dans la construction d'ouvrages, le bois est considéré dans ce calcul comme étant partiellement décomposé et opposant donc une moindre résistance à l'effort tranchant. L'effet de la décomposition des troncs fut avant tout considéré comme une perte de capacité élastique du bois. Le calcul des sollicitations internes a donc été effectué une fois pour un tronc type et fut ensuite appliqué à chacun des troncs, indépendamment de leur taux de décomposition. Le détail du calcul se trouve à l'annexe C.

Une fois chacun des paramètres pris en compte et calculé, la résistance du bois peut être encore comparée à celle du bois sain de qualité moyenne, lequel possède une contrainte de rupture de 50 N/mm^2 . Un simple pourcentage permet de se rendre compte de l'ordre de grandeur de la résistance persistant en 2010.

2.2.4 Mesure du taux de décomposition

Deux méthodes distinctes ont été choisies afin d'évaluer l'état de décomposition structurel des troncs en 2010.

Mesure à l'aide du résistographe

La première consiste en une mesure à l'aide du *Résistographe 1410* et de son *coffret de commande* de la firme Rinntech, Heidelberg (DE). La mesure consiste en un forage radial du tronc à l'aide de l'appareil (fig. 15). Le résistographe est en effet muni d'une mèche de 40 centimètres de longueur qui, lorsque l'appareil est mis en fonction, tourne et avance à vitesse constante dans le bois. Le résistographe mesure alors l'intensité du courant électrique nécessaire à la pénétration de la mèche dans le bois. Plus cette intensité est importante, plus le bois est résistant au forage et plus le taux de décomposition est faible. Non moins de 50 points de mesures par millimètre de forage sont enregistrés (Rinn et al, 1996). La vitesse de pénétration de la mèche dans le bois étant réglable, elle a été fixée à 40 centimètres par minute, valeur idéale pour un bois d'épicéa sain (IML, 2008).

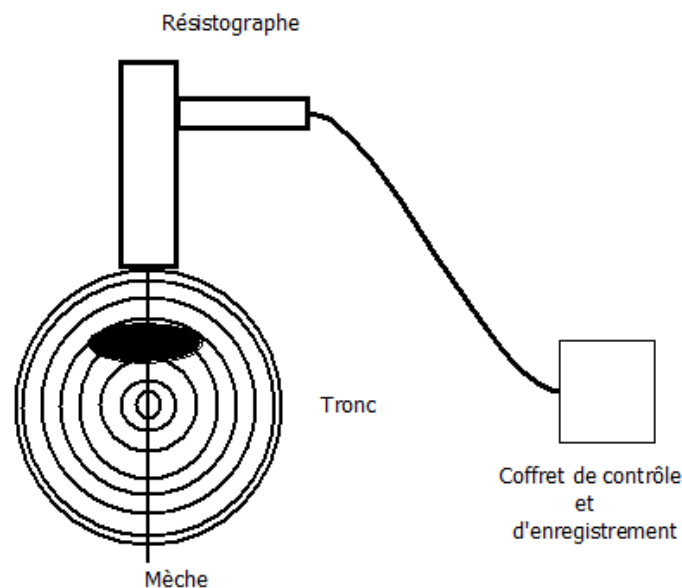


Fig. 15 : Schéma de forage d'un tronc à l'aide du résistographe. La tâche noire représente une partie du tronc qui est décomposée et qui sera détectée par l'appareil.

Pour chacune des mesures, le tronc a été traversé de part en part, pour autant que son diamètre n'excède pas 40 centimètres de la mèche du résistographe. Une mesure de référence a été effectuée sur un épicéa sain, afin d'obtenir une base de comparaison. Les mesures de terrain ont ensuite été conduites sur les dix troncs testés auparavant lors des essais de traction. Un forage a été effectué à chaque extrémité des troncs ainsi que dans le voisinage de chaque fracture occasionnée lors des essais de traction, ce qui monte le total des mesures à 30.

Une fois les mesures effectuées sur le terrain, elles ont été transférées du coffret de contrôle à l'ordinateur à l'aide du programme *B-tools Pro V 1.9 2005* de la firme Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch (DE), puis traitées à l'aide de *Microsoft Office Excel 2007*.

Evaluation des données du résistographe

Afin d'évaluer les données du résistographe, deux méthodes ont été utilisées. La première consiste à comparer les forages des troncs avec celui de l'épicéa sain. Tout segment de forage d'une longueur supérieure à 5 mm et inférieur à la moyenne de référence obtenue en forant l'épicéa sain est considéré comme détérioré. La somme des longueurs de ces parties détériorées mise en relation avec la longueur totale du forage donne la proportion de détérioration du tronc.

La seconde s'inspire de la méthode développée par K.Nötzli, plus complète que la première, mais demandant aussi un plus important travail de traitement des données. Cette méthode consiste à dessiner le graphique du forage en représentant en abscisse la profondeur de forage [cm] et en ordonnée le pourcentage d'amplitude [-] nécessaire à forer le bois et lequel représente le résultat du forage (Nötzli 2002). Chaque cerne intact apparaît alors en un pic d'amplitude, représentant le passage du bois de printemps au bois d'été. Il est alors possible de trouver une valeur d'amplitude moyenne correspondant à un cerne annuel choisi. Une succession de cernes sains, obtenue lors du forage complet d'un tronc, possède parfois une valeur moyenne par cerne plus ou moins similaire. En prenant la moyenne des amplitudes du premier et du dernier cerne d'une série d'un même niveau, il est alors possible de définir une amplitude moyenne pour tout un groupe de cernes, ce qu'on appellera *niveau normal d'amplitude de forage*. Il est toutefois possible que certaines valeurs soient inférieures ou supérieures à ce niveau, dans le cas où la mèche aurait foré respectivement dans du bois décomposé ou dans une branche de l'arbre. Si plusieurs groupes de cernes de niveaux différents sont repérés dans un même graphique, un niveau normal d'amplitude de forage sera défini pour chacun d'entre eux. Le niveau possédant l'amplitude la plus basse parmi ces niveaux normaux est ensuite choisi. En déduisant ensuite la valeur de la déviation standard de tous les points de mesure du forage, on obtient finalement *un niveau de référence*. Tout segment d'une longueur supérieure ou égale à 5 mm et d'une amplitude inférieure au niveau de référence est alors considéré comme dégradé. En mettant en relation la somme des longueurs des segments dégradés et la longueur totale du forage, on obtient finalement le pourcentage de décomposition du tronc testé. Un programme de calcul a été créé à l'aide d'*Excel* afin d'appliquer cette méthodologie à tous les forages réalisés.

Mesure selon la méthode du couteau

La seconde méthode choisie pour la mesure de la décomposition des troncs est dite « Méthode du couteau ». Il s'agit d'une méthode couramment pratiquée sur le terrain, exigeant très peu de matériel. Il suffit de tester la longueur d'enfoncement dans le bois d'une lame de couteau de poche sur laquelle l'opérateur applique une pression constante, selon la méthode utilisée par Sippola et Renvall (Sippola et Renvall, 1999). En fonction de la longueur de pénétration, le niveau de décomposition est donnée sur une l'échelle de 1 à 5 (table 1).

Table 1 : Classification de la décomposition des troncs [1-5] selon la méthode décrite par Sippola & Renvall

Degré de décomposition	Enfoncement de la lame	Aspect général de l'arbre
I	Quelques millimètres	Bois dur et frais avec écorce présente
II	1 à 2 centimètres	Bois dur avec une majorité d'écorce présente
III	3 à 5 centimètres	Bois mi-dur avec peu d'écorce
IV	Lame entière	Bois mou sans écorce
V	Lame entière	Bois très mou, désintégré s'il est levé

Ce test a été effectué aux mêmes emplacements que les mesures du résistographe et a permis de comparer les résultats obtenus par les deux procédés différents.

Statistique utilisée

Afin de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes ci-dessus, l'usage de la statistique descriptive est nécessaire. Moyennes, médianes et boxplots permettent de comparer les groupes de résultats de manière fiable.

2.3 Données nivologiques

2.3.1 Calcul de la charge de neige par tronc

La charge maximale soutenable par un tronc, mesurée lors des essais de traction, peut être mise en relation avec les conditions rencontrées en hiver dans le milieu naturel. Le but du calcul est de convertir la force maximale supportée par le bois lors de l'essai de traction en une hauteur de neige maximale équivalente. Le poids induit par le manteau neigeux sur les dix troncs testés est calculé par une segmentation des troncs en parties longues de 1 mètre (fig. 16). Pour chaque segment, le poids induit dépend essentiellement de la hauteur de neige et de la hauteur effective du segment de tronc (formule 6).

Le calcul nécessite donc de connaître une hauteur effective pour chaque mètre de tronc. Les hauteurs effectives des troncs n'ayant été mesurées uniquement qu'en quelques emplacements sur les troncs, les valeurs pour chaque mètre de tronc sont déduites linéairement de ces mesures.

$$(6) \quad Q = \sum_{i=0.5}^L Q_i \cong \sum_{i=0.5}^L (H_i - H_i')^2 \cdot N \cdot f_c$$

$$\cong (H_{max} - H')^2 \cdot N \cdot f_c$$

(d'après BUWAL, 1990)

Où :

Q	[KN]	est la charge maximale obtenue lors de l'essai de traction
Q _i	[KN/m]	est la charge maximale supportée par un mètre linéaire de tronc lors de l'essai de traction
H _{max}	[m]	est la hauteur de neige maximale que le tronc entier peut supporter (c'est aussi la valeur recherchée par le calcul)
H'	[m]	est la hauteur effective moyenne de tous les segments du tronc
H _i	[m]	est la hauteur de neige maximale sur un segment de tronc
H' _i	[m]	est la hauteur effective d'un segment de tronc
N	[-]	est le facteur de glissement de la neige et vaut 1.2, car la surface est très rugueuse (OFEV, 2007)
f _c	[-]	est le facteur de correction altitudinal et vaut 1 pour une altitude de 1500m (BUWAL, 1990)
i	[-]	est l'incrément par pas de 1 mètre des parties de troncs, 0 < i
L	[-]	est le nombre total de mètres de troncs

La méthode utilisée afin de calculer l'influence du manteau neigeux (formule 6) considère le poids comme étant également réparti le long du tronc. Les essais de traction, quant à eux, occasionnaient une charge ponctuelle sur le bois. Il est difficile de convertir la charge ponctuelle trouvée lors de l'essai en une charge également répartie, puisque la seule condition connue pour ce faire est $Q = \sum_i^L Q_i$. J'ai donc choisi de ne pas calculer l'équivalent de cette charge en hauteur de neige (H_{max}, formule 6) de manière arithmétique, mais par un calcul itératif dans *Excel 2007*. Le problème de la répartition de la charge Q le long du tronc est ainsi évité par l'approximation numérique de l'ordinateur.

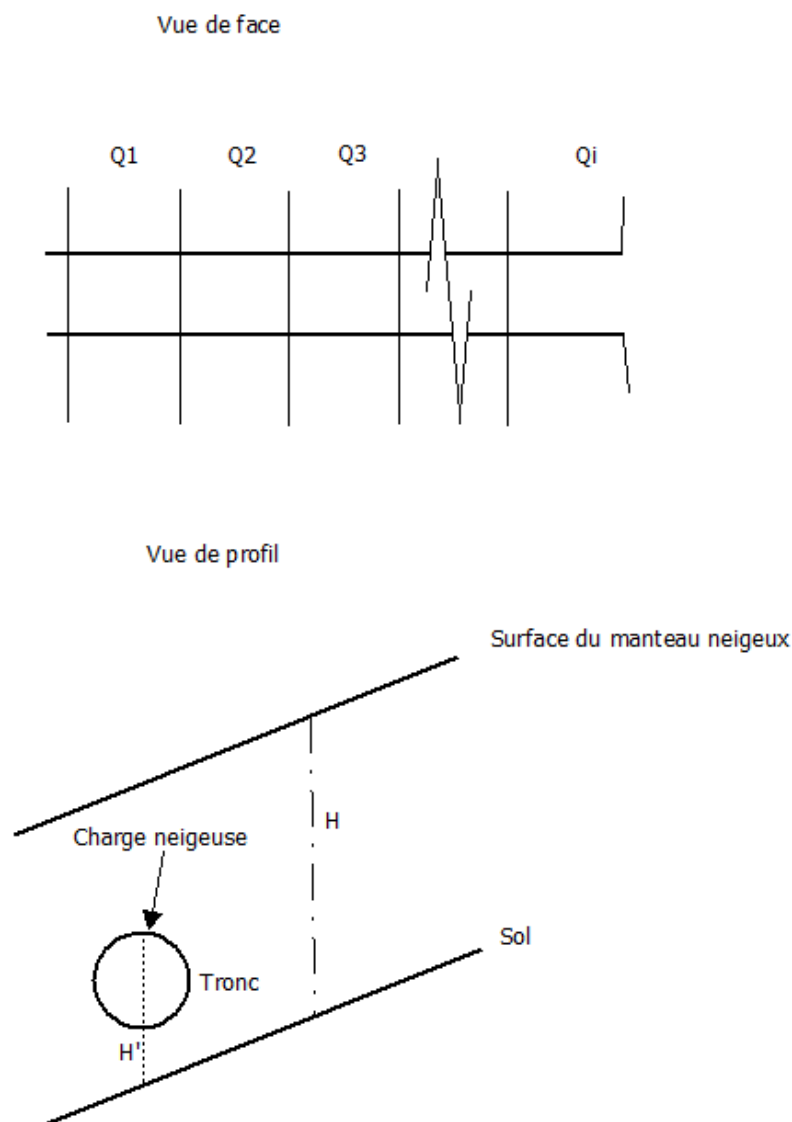


Fig. 16: En haut, vue de face du principe de fractionnement d'un tronc en parties d'un mètre de long. En bas, vue de profil d'un tronc type sous le manteau neigeux. Les grandeurs utilisées à la formule 6 sont aussi présentes (inspiré de Frey et al, 2002)

2.3.2 Comparaison des données neigeuses

Afin de comparer les hauteurs de neige obtenues par calcul avec les conditions rencontrées sur le terrain, les données journalières enregistrées par deux stations nivologiques situées à Disentis et à Curaglia ont été utilisées. Le terrain d'étude se trouve à mi-chemin entre les deux stations de mesure de la neige. La station de mesure de Disentis (1190m) fournit une mesure de hauteur de neige journalière entre 1945 et 2010. La station nivologique de Curaglia (1330m) fournit quant à elle des données semblables entre 1976 et 2010. A l'aide des outils d'*Excel 2007*, une hauteur maximale de neige a été trouvée pour chaque année de mesure.

2.3.3 Traitement des données neigeuses

Les données neigeuses ont ensuite été traitées dans *Excel 2007* à l'aide de la méthode statistique de Gumbel (Magreth, 2009), couramment utilisée pour ce type de mesures. Le but était de trouver un temps de retour pour les différentes hauteurs de neige. Une fois les hauteurs de neige maximales enregistrées par une station classées par ordre croissant, elles ont été numérotées. Le temps de retour initial pour chacune des hauteurs est ensuite calculé en fonction de ce classement (formule 7).

$$(7) \quad T_i = \frac{N+1}{M}$$

Où

T_i est le temps de retour initial avant d'appliquer la méthode

N est le numéro provenant de la numérotation des hauteurs

M est le nombre total de mesures

La variable réduite « y » est ensuite introduite au calcul (formule 8).

$$(8) \quad y = -\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T_r} \right) \right)$$

Un point est dessiné sur l'ordonnée d'un graphique pour chacune des hauteurs de neige mesurées, tandis que la variable y repose sur l'abscisse. Une droite permettant l'extrapolation des données est alors trouvée par régression linéaire. Le temps de retour des hauteurs de neige est finalement obtenu en chaque point de la droite (formule 9).

$$(9) \quad T_r = \frac{1}{1 - e^{-e^{-y}}}$$

Cette méthode a été appliquée pour chacune des deux stations ainsi que pour une valeur moyenne entre les deux stations, puisque le terrain d'étude se situe à mi-distance entre les deux stations de mesure.

3. Résultats

3.1 Dislocation des bois au sol

Parmi les 64 plaquettes d'aluminium placées sur les 25 troncs en 2001, seules 44 plaques réparties sur 20 troncs purent être retrouvées. Un cinquième des troncs et de leurs plaquettes a donc disparu dans la végétation ou se sont désintégrés au cours de la deuxième décennie suivant l'ouragan. Sur les 20 troncs retrouvés, les parties de 4 troncs sont manquantes et n'ont pas été retrouvées. Les plaquettes ne portant aucun signe distinctif permettant de les relier à la numérotation des troncs, leur identification s'est avérée relativement difficile et a été conduite sur la base de la carte emportée dans le terrain. Afin d'éviter les confusions parmi les plaquettes mesurés in situ, une modélisation des troncs sous forme de lignes de même qu'une analyse de détail a été effectuée à l'aide d'ArcGis (fig. 17).

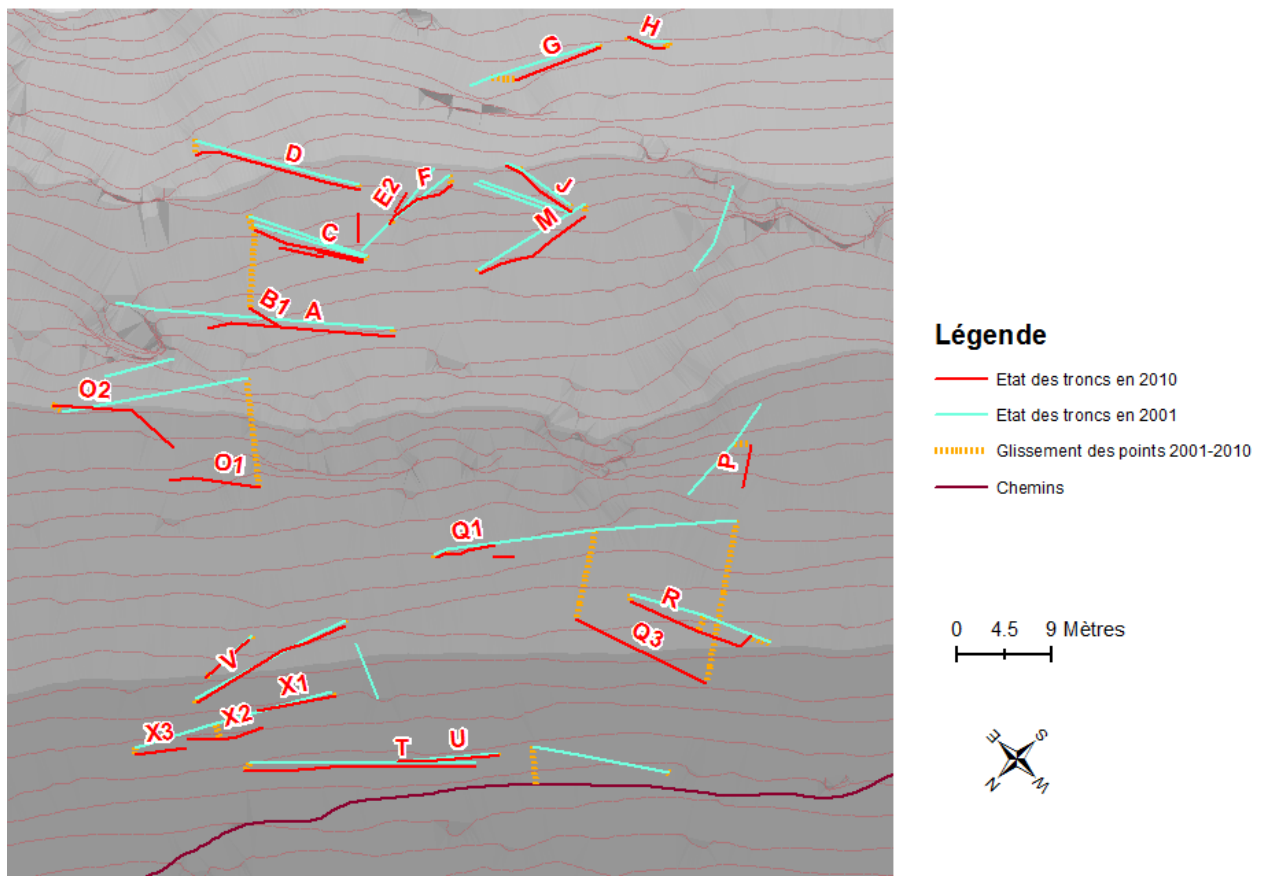


Fig. 17 : Situation des troncs de 2001, des points mesurés en 2010 ainsi que des troncs qui ont pu être reconstitués à partir de ces points. Les parties des troncs morcelés sont différenciées par un chiffre suivant la lettre du tronc. Certains points se sont déplacés vers l'amont, ce qui est possible en raison d'un effet de bras-de-levier joué par le tronc. A l'arrière plan se trouvent les lignes de niveau du terrain.

Chacune des nouvelles cassures survenues sur les troncs entre 2001 et 2010 a aussi été relevée par un point de mesure. Ces cassures montent à 98 le nombre de points totaux levés lors des mesures, nombre qui dépasse largement les 64 points précédemment relevés en 2001. Seuls trois troncs sur les vingt mesurés ne se sont pas brisés au cours des dix dernières années. Trois troncs se sont brisés une fois, 7 troncs deux fois et 7 autres troncs sur les 20 se brisèrent trois fois et plus. En moyenne, un tronc s'est donc brisé 1.94 (médiane 2) fois supplémentaires entre 2001 et 2010, ce qui place le nombre moyen de cassures par tronc à 2.29.

Déplacement des bois

Afin d'éviter les erreurs d'interprétation, l'évaluation du déplacement des troncs s'est effectuée uniquement sur la base des 44 plaquettes retrouvées. Le déplacement horizontal moyen des points entre 2001 et 2010 se monte à 1.77 mètres, avec un écart-type de 3.16 mètres (fig. 18), l'un des points s'étant en effet déplacé de plus de 15 mètres vers l'aval.

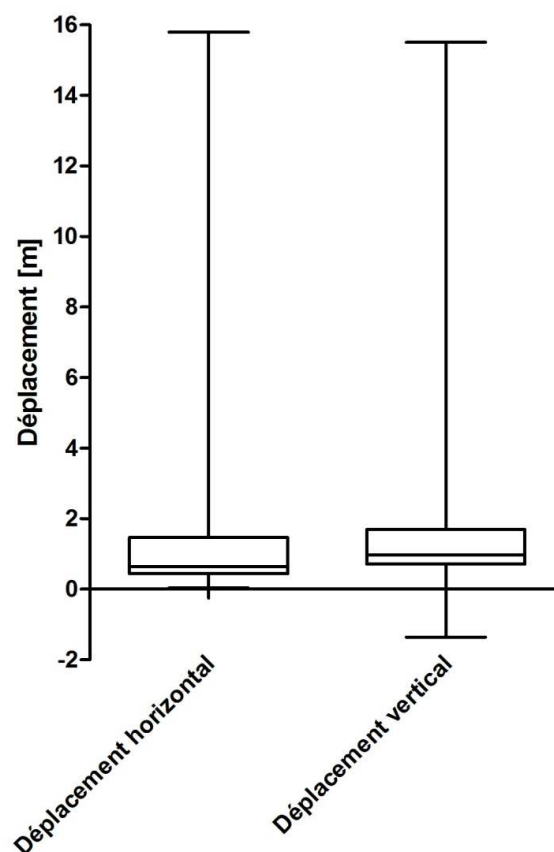


Fig. 18 : Déplacements des points au cours de la dernière décennie. Sur l'abscisse se trouve le déplacement horizontal et vertical, sur l'ordonnée, le déplacement effectif en mètres. Un déplacement vertical négatif signifie que le point s'est déplacé vers l'amont.

Le mouvement altitudinal des troncs atteint une valeur moyenne de 2.06 mètres, avec un écart-type de 3.4 mètres. Les intervalles de confiance sur ces données étant presque impossibles à évaluer, il est préférable de ne pas se risquer à en proposer.

Hauteurs effectives

Les trois différents types de mesures de hauteurs montrent une diversité de résultats. La valeur de hauteur moyenne proposée par le calcul automatique basé sur le TIN est inférieure aux autres et vaut 0.36 m (table 2) pour une déviation standard de 0.66 m. Les mesures effectuées à l'aide du double-mètre possèdent quant à elles une moyenne de 0.94 m avec un écart-type de 0.55 m. La mesure du double-mètre étant très dépendante des conditions rencontrées au sol (végétation, pierres, amoncellements, ...) son intervalle de confiance est relativement grand et peut être estimé à environ 0.3 m. La mesure photogrammétrique fournit quant à elle une hauteur moyenne de 0.86 m ainsi qu'un intervalle de confiance d'environ 0.1 m. Notons que les photos ayant été prises en 2009, la mesure correspond à la hauteur des troncs en 2009, alors que celles mesurées par le TIN et par le double-mètre datent de 2010.

Table 2 : Hauteur effective selon les trois différentes méthodes de mesure [m].

[m]	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Intervalle de confiance
TIN	0.37	0.36	0.66	-
Double-mètre	0.80	0.94	0.50	0.3
Photos	0.80	0.86	0.47	0.1

La comparaison des résultats proposés sur la base du TIN ainsi que ceux des mesures photogrammétriques montre que les résultats sont les plus similaires pour des valeurs de hauteurs effectives comprises entre 0.5 et 1.5 mètre (fig. 19).

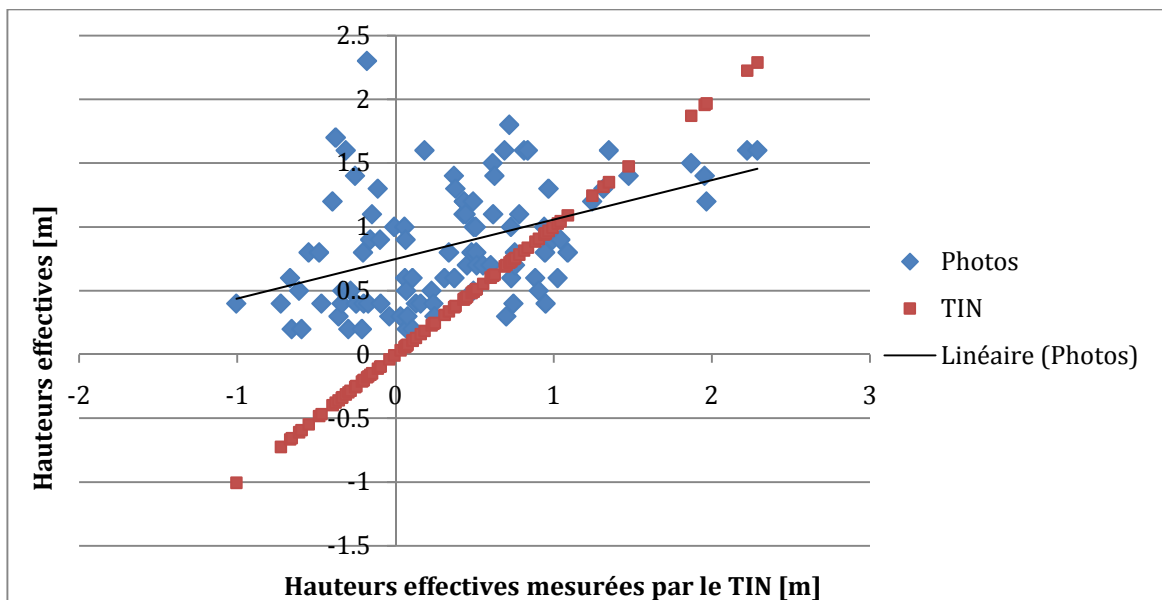


Fig. 19 : Mesures des hauteurs effectives effectuées par le TIN et par photogrammétrie. Sur l'abscisse se trouvent les mesures de hauteurs effectives réalisées sur la base du TIN [m]. L'ordonnée comporte les hauteurs effectives [m]. Sur Comme les mesures effectuées par le TIN se trouvent aussi à l'abscisse du graphique, elles forment une droite (X=Y). Le graphique comporte aussi la droite obtenue à partir de la régression linéaire des mesures photogrammétriques ($Y = 0.3089x + 0.7475$, $R^2 = 0.1916$).

La mesure de hauteur effective par la méthode photogrammétrique a aussi montré que cette hauteur est plus basse pour les troncs se situant en dehors de la végétation (fig. 20). On remarquera aussi que la hauteur effective des troncs se situant sur une rupture de pente est plus élevée que la moyenne.

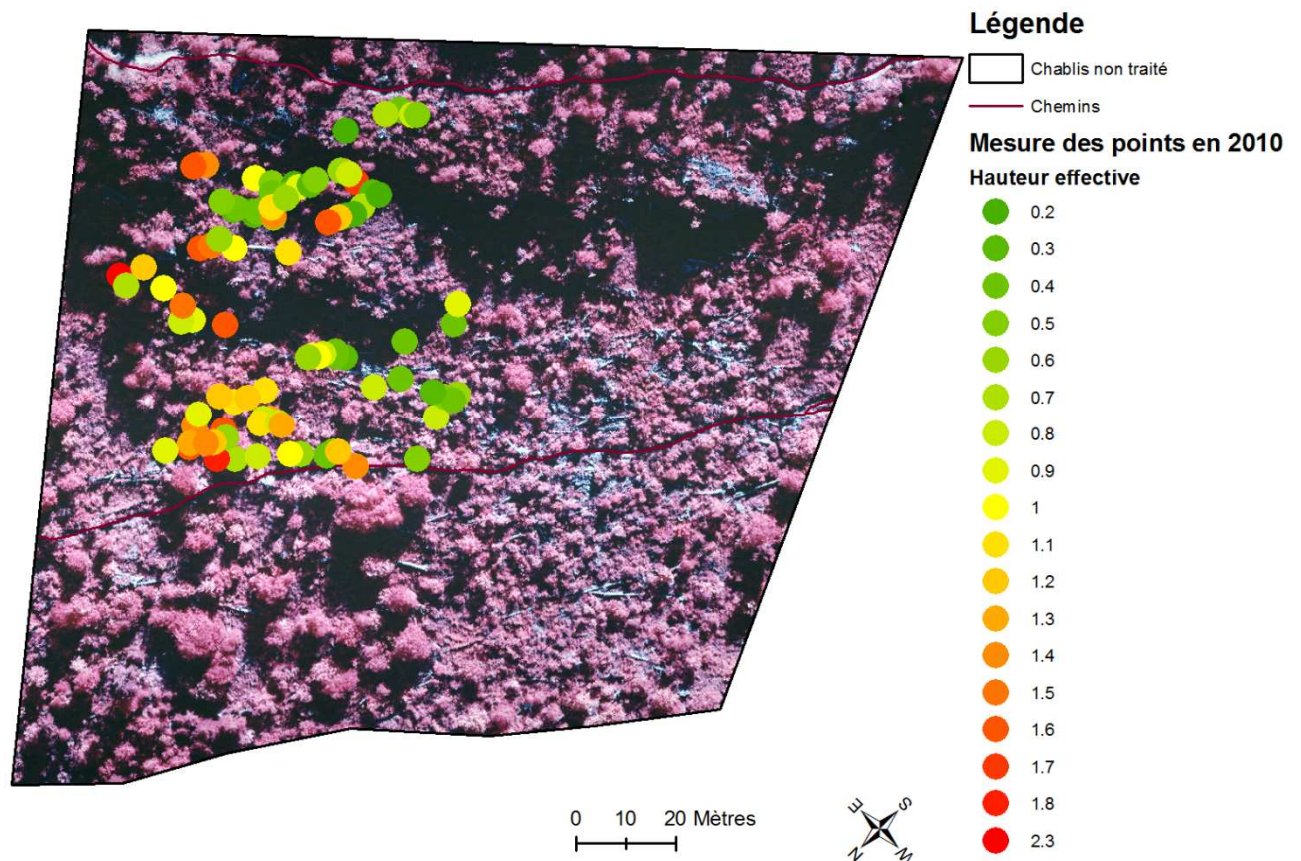


Fig. 20 : Hauteur effective des points de mesure de 2010 [m], mesurés sur la base de la photo aérienne infrarouge de 2009, à l'arrière plan. La figure représente l'ensemble du chablis non traité. Les points se situant sous la végétation, notamment sur les bas de la surface ont des hauteurs effectives plus hautes que les autres.

Analyse multivariée

La digitalisation de quatre des cinq paramètres³ (la pente n'étant pas digitalisable sous la même forme que les autres) nécessaires à l'analyse multivariée permet dans un premier temps de constater que les différents éléments sont répartis de manière non uniforme sur les quatre parties de la surface. Les différences apparaissent principalement entre les parties du haut et celles du bas du terrain étudié par cette analyse (fig. 21).

³ Les cinq paramètres sont les rochers, les ruptures de pente, la végétation, les enchevêtrements de troncs et la pente du terrain elle-même.

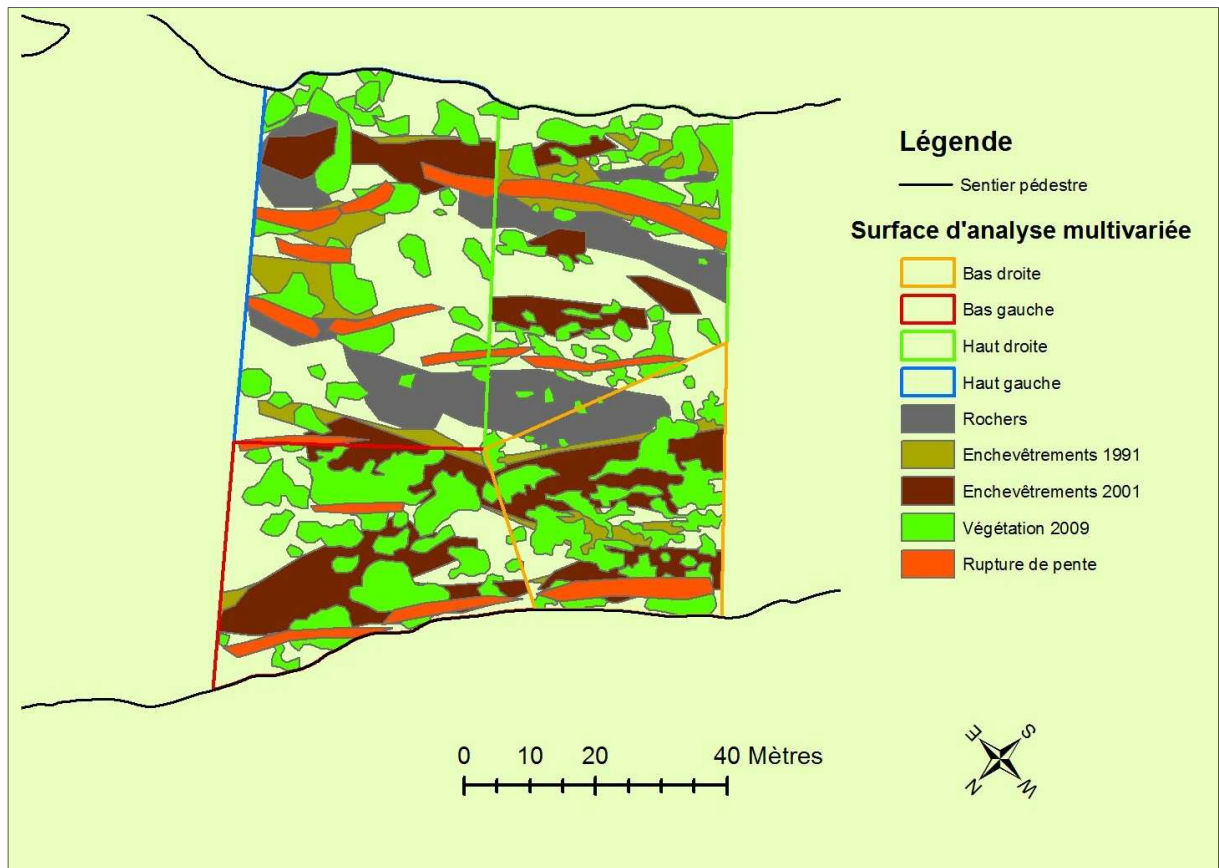


Fig. 21 : Polygones de digitalisation des quatre facteurs nécessaires à l'analyse multivariée. La digitalisation n'a été effectuée uniquement sur une partie du chablis non traité.

En réalité, les deux parties inférieures comportent plus de végétation (39-40 %) que celles du haut (25-29 %) (table 3). Les rochers sont par contre beaucoup plus présents dans les parties supérieures (20-25%) que dans le bas du terrain d'étude (0-12%). Il en découle que les enchevêtrements de troncs sont plus nombreux dans les parties inférieures (45-51%) que dans les parties supérieures comportant les rochers (13%).

Table 3 : Pourcentage de couverture des différents éléments digitalisés par rapport à la superficie totale de chacune des quatre divisions de la surface étudiée par l'analyse multivariée.

	Végétation	Rochers	Enchevêtrements 2001
Haut gauche	25 %	20 %	13 %
Haut droite	29 %	25 %	13 %
Bas gauche	40 %	0 %	51 %
Bas droite	39 %	12 %	45 %

Les valeurs médianes du déplacement des points répartis selon les cinq différents facteurs sont plus élevées pour les facteurs comme les rochers (médiane de 1.5 m selon Z) et les ruptures de pente (médiane de 1.4 m selon Z) par rapport à celles obtenues pour les enchevêtrements de 2001 (médiane de 1.21 m selon Z) ainsi que pour la végétation (médiane de 0.96 m selon Z) (fig. 22). On peut en déduire que rochers, pente du terrain et ruptures de pente sont trois facteurs accentuant directement le mouvement des troncs, tandis que les enchevêtrements ont tendance à le ralentir.

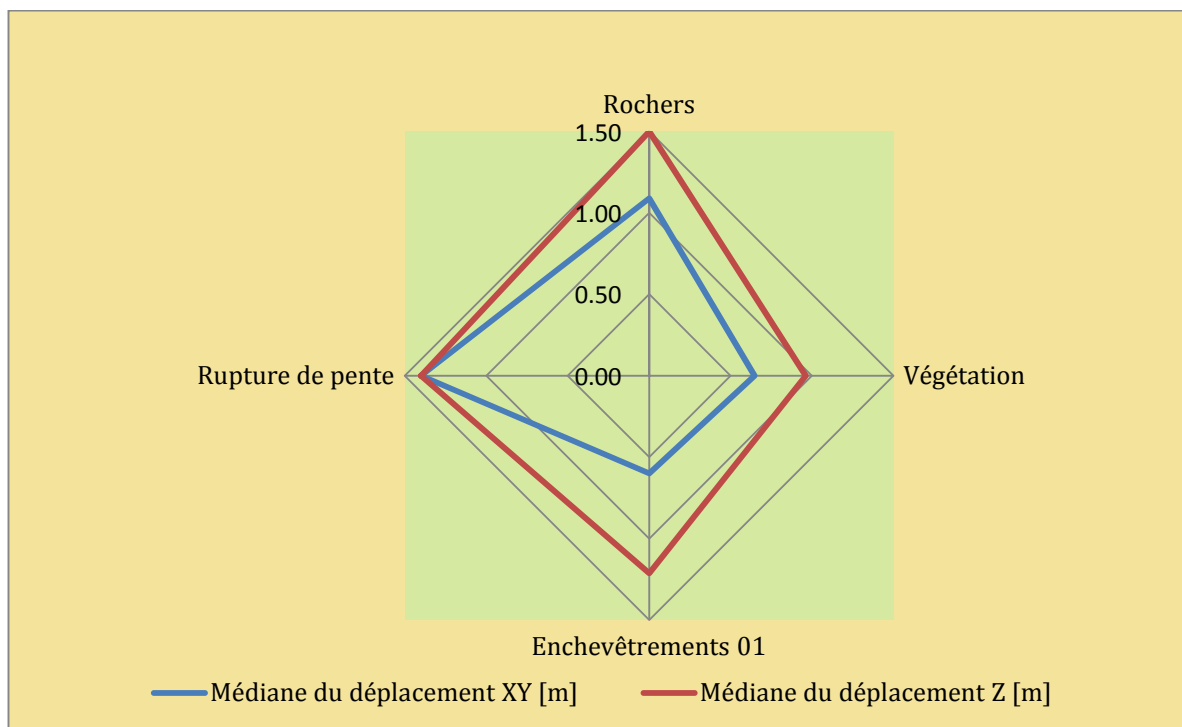


Fig. 22 : Influence des quatre facteurs digitalisés sur les médianes du déplacement [m]. La pente n'étant pas une valeur binaire, elle ne peut pas être représentée ici.

En réalité, l'arbre de décision met en évidence le fait que les rochers ont la plus grande influence sur le déplacement vertical des points, avec une valeur moyenne de 4.75 m (médiane 1.5 m) pour les points se situant dans les rochers en 2001 (fig. 23), contre un déplacement moyen de 2.06 m pour l'ensemble des points mesurés. Le déplacement des points est ensuite directement dépendant de la valeur de la pente du terrain. Il s'agit là du deuxième facteur influençant le déplacement. Les tendances entre les quatre paramètres digitalisés lors de cette analyse et le mouvement des points mesurés sont analysées à l'aide de la matrice des corrélations de Spearman. Cette matrice se fonde non pas sur une relation affine entre les variables, mais plutôt sur le classement des résultats par ordre croissant et sur le rang de ces valeurs classées.

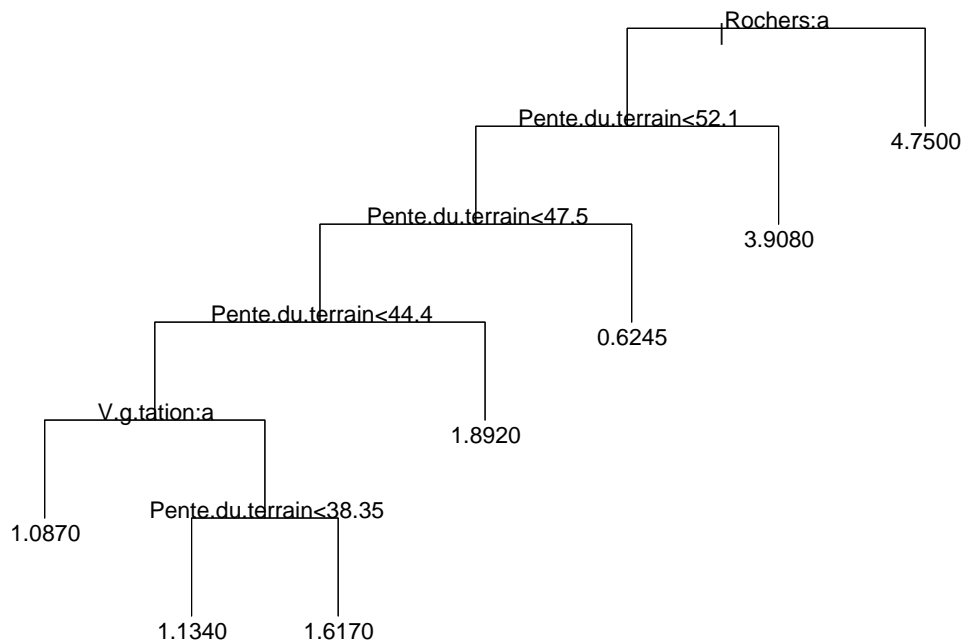


Fig. 23 : Arbre de décision réalisé selon les 5 facteurs choisis. Le résultat aux sorties de l'arbre est le déplacement moyen selon Z [m]. Les rochers apparaissent comme étant le facteur influençant le plus le déplacement vertical des troncs, suivi directement par la pente du terrain [?].

Les corrélations positives indiquent qu'un paramètre favorise un état ou une translation des bois, tandis qu'une corrélation négative implique une diminution de ces déplacements. Parmi toutes les corrélations calculées, certaines se démarquent par leur intérêt. On remarque certaines corrélations positives entre la végétation et les enchevêtrements de troncs de 2001 (0.29) ainsi qu'entre les hauteurs de troncs et les ruptures de pente (0.24). Le déplacement horizontal des troncs est aussi positivement corrélé avec les rochers (0.17) et avec les ruptures de pente (0.12). Une corrélation plus faible mais positive se trouve entre les hauteurs effectives mesurées sur la base photogrammétrique et la végétation (0.06) (table 4). Des corrélations négatives se situent entre les rochers et la végétation (-0.35) ainsi qu'entre les rochers et les enchevêtrements de 2001 (-0.14). On découvre aussi d'autres corrélations négatives entre le déplacement vertical et la végétation (-0.22) ainsi qu'entre le déplacement horizontal et les enchevêtrements de 2001 (-0.13). Aucune corrélation n'existe entre le déplacement horizontal et la végétation (table 4). De plus, une corrélation positive se trouve entre les enchevêtrements de 1991 et le déplacement horizontal (0.14), alors qu'une corrélation négative se trouve entre ces mêmes enchevêtrements et les rochers (-0.1) (table 4).

Table 4 : Matrice des corrélations de Spearman entre les quatre paramètres et le déplacement des troncs. Les cases rouges représentent les corrélations positives particulièrement intéressantes, les cases bleues, les corrélations négatives.

	<i>Végétation</i>	<i>Enchevêtrements 01</i>	<i>Enchevêtrements 91</i>	<i>Rupture de pente</i>	<i>Dépl. Horiz.</i>	<i>Dépl. Vertical</i>	<i>Hauteurs Photos</i>
<i>Rochers</i>	-0.35	-0.14	-0.10	-0.06	0.17	0.25	-0.11
<i>Végétation</i>		0.29	-	-0.14	0.00	-0.22	0.06
<i>Enchevêtrements 01</i>			-	-0.16	-0.13	0.12	-0.06
<i>Enchevêtrements 91</i>				0.10	0.14	-0.06	-
<i>Rupture de pente</i>					0.12	0.04	0.24
<i>Dépl. Horizontal</i>						0.52	-0.21
<i>Dépl. Vertical</i>							-0.04

3.2 Etude de la résistance du bois

Charges, contraintes et énergie par tronc

La mesure du déplacement du tronc tout au long de l'essai de traction permet d'étudier en détail le déroulement de l'expérience sur le terrain (fig. 24). Le déplacement du tronc vers l'aval est souvent lié à une chute de la charge appliquée et donc mesurée. Un tronc s'est parfois rompu en plusieurs petites ruptures successives, la dernière provoquant la cassure définitive du bois. La représentation graphique de tous les essais de traction se trouve à l'annexe B. Les valeurs maximales des charges utilisées pour les calculs sont celles des charges tangentielles aux troncs. Seule la composante tangentielle a été retenue, les autres ayant été déduites d'emblée. La charge tangentielle maximale atteinte par l'un des troncs s'élève ainsi à 27 KN alors que la charge minimale vaut 7.5 KN. La moyenne des charges brutes de tous les essais est de 16.2 KN (table 5).

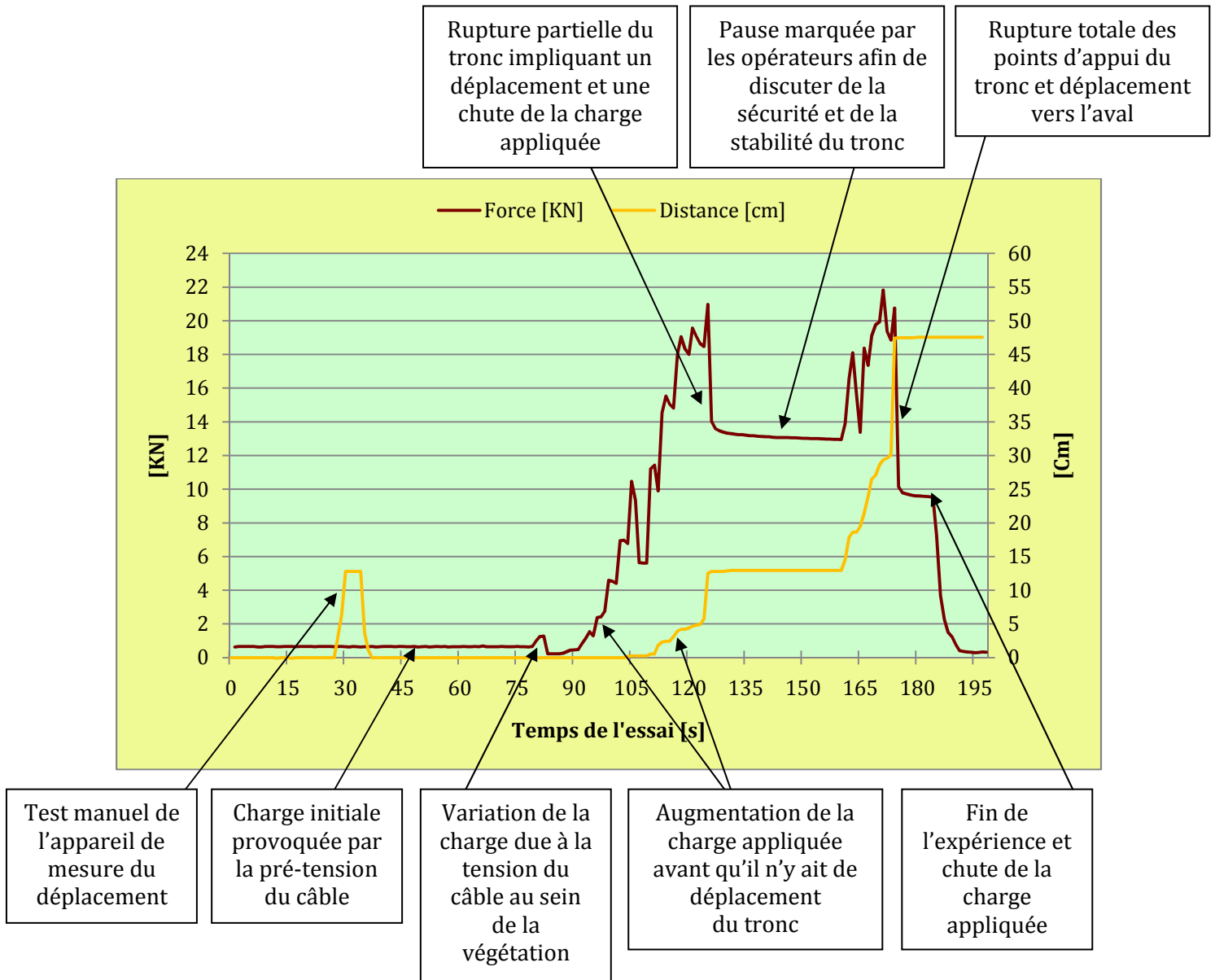


Fig. 24 : Essai de traction du tronc numéro 5. En abscisse, le temps de l'essai [s]. L'ordonnée de gauche représente la charge soumise au tronc [KN], celle de droite le déplacement lors de l'essai [cm]. Le tronc s'est brisé en deux fois, la seconde rupture étant totale. Les étiquettes détaillent, de gauche à droite, les différentes phases de l'expérience visibles sur le graphique.

Parmi les 10 troncs testés, seuls trois (les troncs 2, 8 et 10) ne se sont pas brisés lors de l'essai et n'ont subi qu'un seul déplacement. Pour quatre autres bois (les troncs 1, 5, 7, 9), un calcul d'encastrement influant sur les moments de flexion a été réalisé. Les schémas de configuration des dix essais de traction, ainsi que les calculs d'encastrement effectués se trouvent à l'annexe A. L'analyse des contraintes internes du bois propose de réduire de 7 % le résultat obtenu à la fin du calcul des moments de rupture. Cette réduction est ainsi appliquée à chacun des troncs, indépendamment de leur taux de décomposition (table 5).

Table 5 : Résultats des essais de traction et du calcul des contraintes. Les troncs en bleu sont ceux ne s'étant pas brisés lors de l'essai ; en rouge, ceux pour lesquels un calcul d'encastrement a été réalisé.

Numéro de tronc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Charge max [kN] ^a	21	15	7.5	19	21	7.5	17	19	27	8	16.20
Charge gauche [kN]	17.27	7.81	3.87	6.23	15.92	3.30	15.04	14.41	16.88	3.60	10.43
Charge droite [kN]	3.73	7.19	3.63	12.77	5.08	4.20	1.96	4.59	10.13	4.40	5.77
Moment câble [kNm] ^b	13.81	45.30	35.96	51.08	36.61	16.81	27.07	31.69	25.31	21.98	30.56
Moment réduit cassure gauche [kNm]	7.56	-	-	6.00	19.22	8.80	10.62	-	13.92	-	-
Moment réduit cassure droite [kNm]	9.04	-	9.00	-	21.96	-	6.00	-	6.96	-	-
W câble [10 ⁶ mm ³] ^c	4.58	12.27	7.27	8.95	8.95	8.95	6.28	12.27	4.21	4.97	8.20
W gauche [10 ⁶ mm ³]	4.58	-	-	4.97	10.86	6.28	6.28	-	4.21	-	-
W droite [10 ⁶ mm ³]	6.28	-	16.33	-	12.27	-	6.28	-	4.21	-	-
Contrainte théorique (max) [N/mm ²] ^d	3.02	3.69	4.94	5.71	4.09	1.88	4.31	2.58	6.01	4.42	4.01
Contrainte cassure gauche [N/mm ²]	1.65	-	-	1.21	1.77	1.40	1.69	-	3.31	-	-
Contrainte cassure droite [N/mm ²]	1.44	-	0.55	-	1.79	-	0.95	-	1.65	-	-
Contrainte interne effective [N/mm ²] ^e (après réduction -7%)	1.34	3.43	0.51	1.12	1.65	1.30	0.89	2.40	1.54	4.11	1.83
Contrainte bois sain [N/mm ²]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	-
Contrainte restante après 20 ans [%]	2.68	6.87	1.02	2.24	3.29	2.60	1.78	4.80	3.08	8.22	3.66

a: Charge maximale trouvée par l'essai de traction. Les charges gauche et droite correspondent à la charge répartie sur les appuis gauche et droite.

b: Répartition des moments de flexion aux lieux comportant d'éventuelles cassures à gauche ou à droite du câble. Les moments sont donnés en fonction de la configuration de l'essai et après encastrement. **c:** Moment d'inertie du tronc, dépendant du diamètre de ce dernier. **d:** Contrainte interne du tronc donnée pour chacune des cassures. Pour les troncs ne s'étant pas brisés, la contrainte théorique est acceptée **e:** Plus petite des contraintes à laquelle le tronc a résisté, réduite de 7 % selon le calcul des contraintes internes. Il s'agit de la contrainte finale à laquelle le tronc a résisté.

L'énergie totale qu'un tronc peut emmagasiner est représentée par l'aire située sous la courbe de représentation ayant en abscisse, la distance de traction et la charge en ordonnée (fig. 25). Elle correspond en réalité à l'intégration de la force par rapport à la distance effectuée par le tronc lors de l'essai.

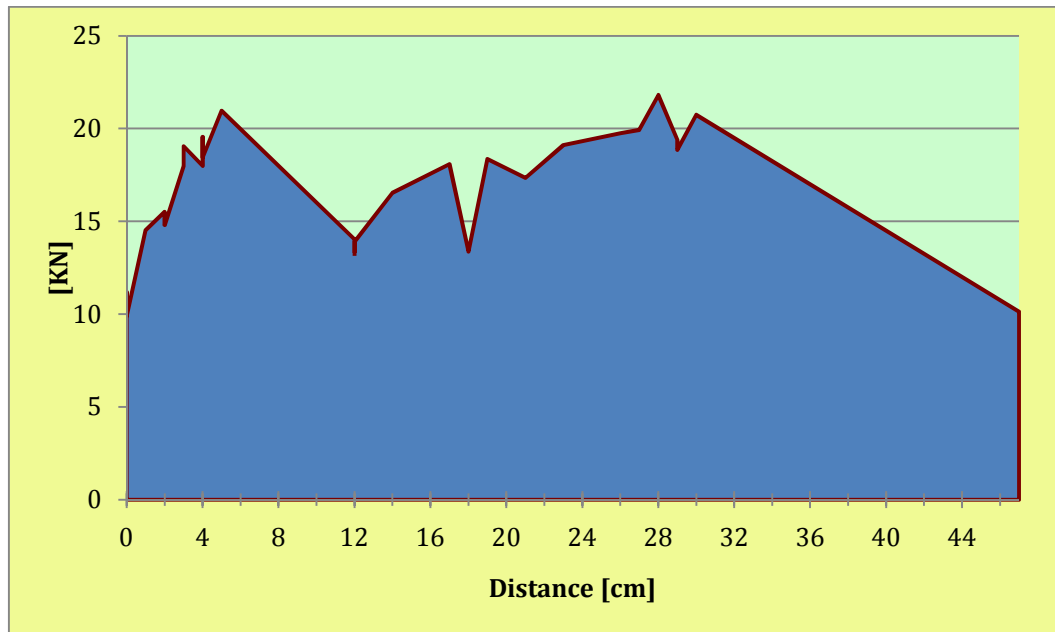


Fig. 25 : Energie emmagasinée par le tronc 5 lors de l'essai de traction. En abscisse se trouve la distance parcourue par le tronc [cm], en ordonnée la charge appliquée [KN]. L'énergie est ici représentée par la surface bleu foncé située sous la courbe.

L'énergie emmagasinée par les troncs lors de l'essai est ensuite transformée en une énergie équivalente par mètre de déplacement du tronc. Cette énergie possède une valeur moyenne de 9.7 KJ/m (table 6) avec un écart-type de 5.1 KJ/m. La plupart des troncs sont donc capables d'absorber une valeur avoisinant 10 KJ par mètre de déplacement, ce qui indique que leur état moyen est relativement semblable. Seuls deux troncs (les troncs 6 et 10) montrent des valeurs nettement inférieures à la moyenne (table 6).

Table 6 : Energie emmagasinée par mètre de déplacement lors de l'essai de traction [KJ/m].

Numéro de tronc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energie par mètre de déplacement [KJ/m]	-	9.31	9.50	14.71	14.68	2.37	14.00	-	-	3.31

Mesure du taux de décomposition

La première mesure effectuée à l'aide du résistographe a pour but d'étalonner la valeur de l'amplitude trouvée pour un épicea sain (fig. 26). Lorsque le bois n'est pas décomposé, les cernes annuelles sont facilement visibles et sont représentées par des pics sur le graphique.

L'essai effectué sur un épicéa sain permet de trouver un seuil moyen pour un épicéa sain équivalent à une amplitude de 14.54 %. Ce forage permet en outre un premier essai d'application de la méthode de Nötzli.

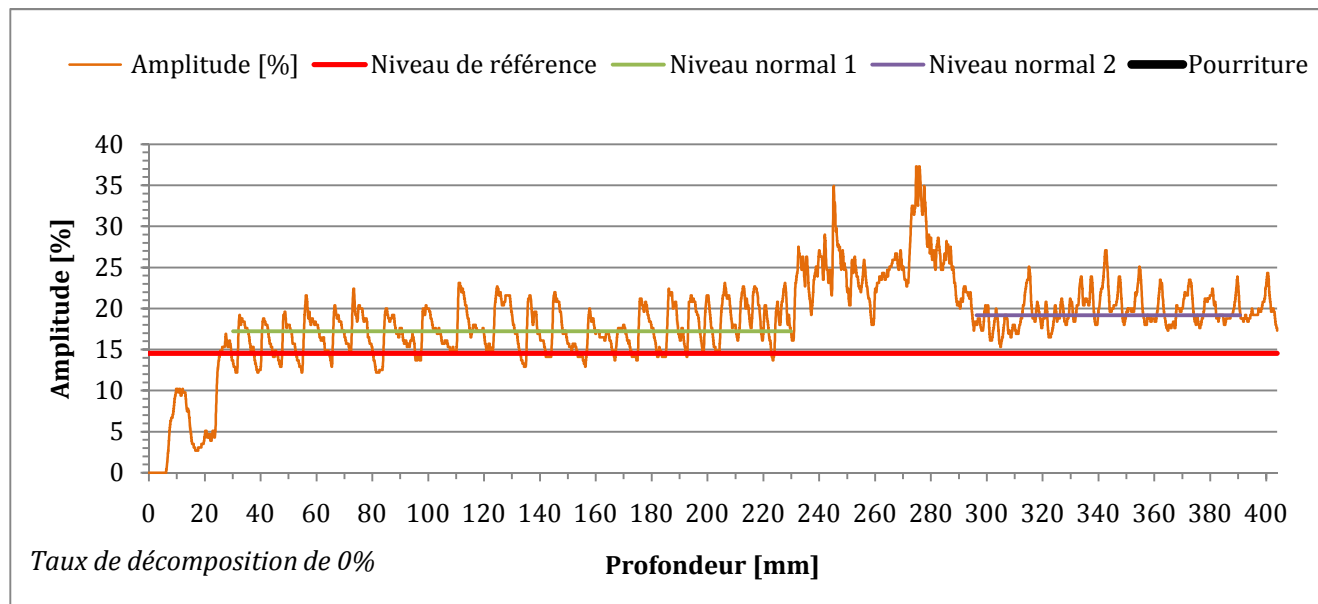


Fig. 26 : Forage au résistographe de l'épicéa sain. En abscisse, la profondeur de forage [mm], en ordonnée le pourcentage d'amplitude [-]. Les deux niveaux normaux, le niveau de référence ainsi que le pourcentage de décomposition du bois ont été trouvés selon la méthode Nötzli.

Au total, 30 forages répartis sur les dix troncs testés lors des essais de traction ont été réalisés. Les résultats sous forme de graphique ainsi que les taux de décomposition selon Nötzli, par rapport au seuil de 14.54 % et selon la méthode du couteau se trouvent en à l'annexe D.

La valeur du taux de décomposition par tronc selon la méthode de Nötzli vaut en moyenne 41 % et possède une médiane à 33%. Les résultats possèdent une grande divergence. La marge d'erreur sur les données dépendant de nombreux facteurs, elle est impossible à chiffrer. Pour six des dix troncs testés, le taux de décomposition moyen se situe entre 40% et 60% (fig. 27). Deux troncs (les troncs 2 et 8) ont des valeurs de décomposition inférieures aux autres. Ce sont aussi deux troncs qui ne se sont pas brisés lors des essais de traction. Le tronc 10 ne s'est pas non plus brisé lors des essais même si son taux de décomposition est toutefois relativement élevé (fig. 27). Les troncs qui se situaient complètement dans la végétation sont plus dégradés (55 %) que ceux se situant que partiellement dans la végétation (46 %) ou hors végétation (31 %).

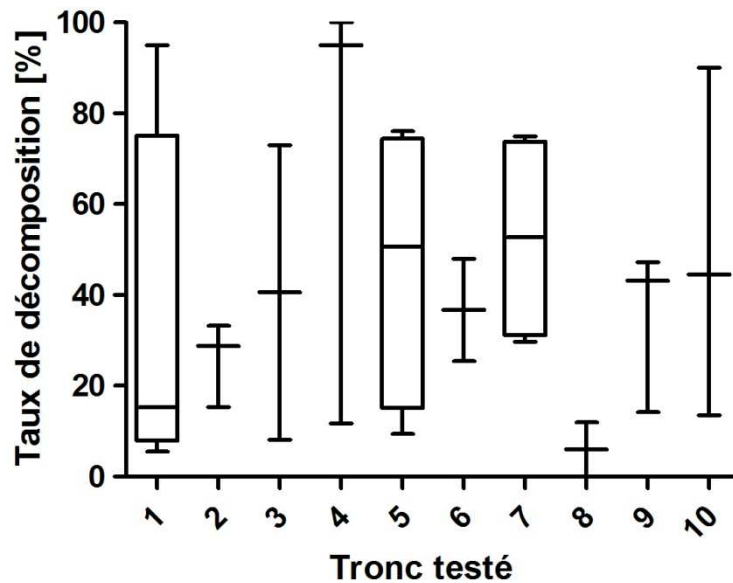


Fig. 27 : Taux de décomposition des dix troncs testés. En abscisse, les numéros des dix troncs et en ordonnée le pourcentage de décomposition par tronc [-].

D'une manière générale, l'évaluation du taux de décomposition des troncs par la méthode du seuil donne des résultats plus élevés que ceux obtenus par la méthode de Nötzli (fig. 28). Cette différence est nettement plus marquée dans les faibles taux de décomposition obtenus par la méthode de Nötzli (jusqu'à 50 % de différence entre les méthodes). Dans les hauts taux (80% et plus), les résultats des deux techniques d'évaluation sont presque identiques (fig. 28).

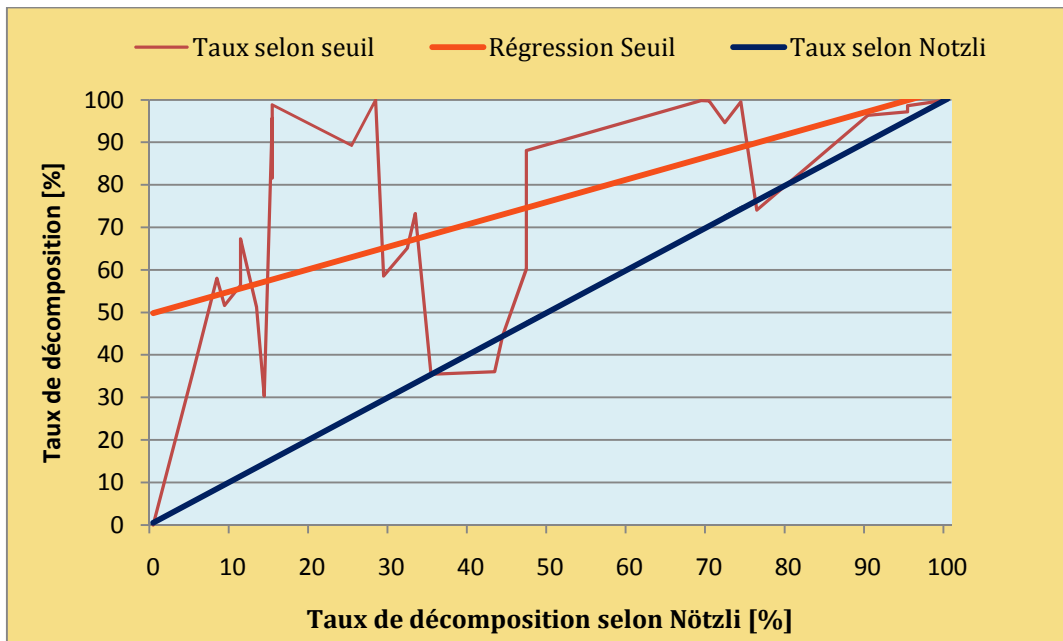


Fig. 28 : Taux de décomposition des troncs selon le résistographe et calculé par la méthode du seuil limite. Sur l'abscisse, les taux de décomposition trouvés par la méthode de Nötzli [-], sur l'ordonnée, les taux de décomposition trouvés par les deux méthodes [-]. Les résultats de la méthode de Nötzli classés par ordre croissant forment une droite de forme X=Y. Idéalement, la droite de régression linéaire ($Y = 0.5272x + 49.81$, $R^2 = 0.3596$) des résultats de la méthode du seuil formeraient une droite similaire, si les résultats avaient été identiques à ceux trouvés par la méthode Nötzli.

Les résultats obtenus par la méthode du couteau au sein d'un même tronc sont très différents. Le calcul de corrélation entre la méthode du résistographe et celle du couteau montre toutefois que les résultats sont positivement corrélés à hauteur de 0.53. Le test du couteau montre donc une tendance concernant la structure interne des troncs, bien que seuls les cinq centimètres extérieurs ne soient testés. Tous les fûts testés ont atteint au minimum une fois la valeur de « II » et de « III » sur l'échelle de classement. Trois troncs ont atteint une valeur de « IV », et 7 troncs une valeur de « I » (fig. 29). Vingt ans après l'ouragan, aucun tronc n'a atteint la valeur maximale de « V » que permet l'échelle.

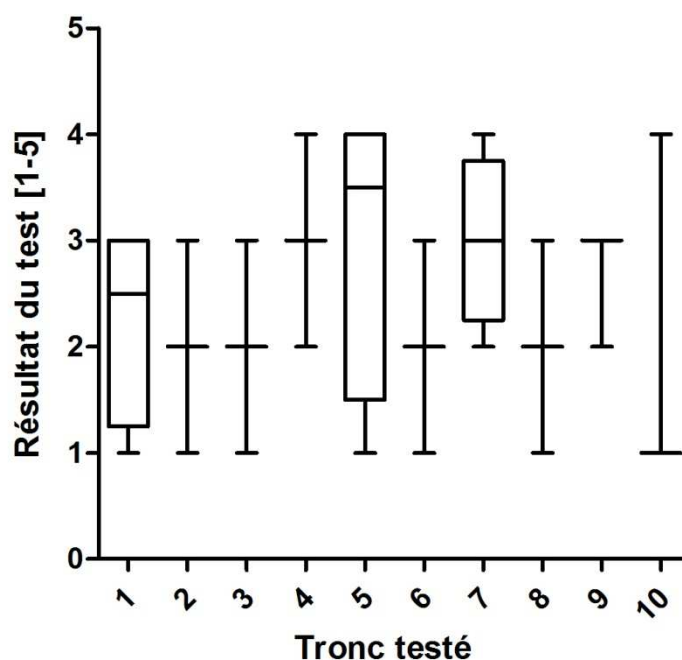


Fig. 29 : Résultats du test du couteau par tronc. Sur l'abscisse, les numéros des dix différents troncs testés, sur l'ordonnée les résultats du test sur une échelle de classement de 1 à 5.

Les résultats obtenus par le résistographe et la méthode de Nötzli diffèrent selon leur emplacement sur le tronc (fig. 30). Trois emplacements sont moins dégradés que la moyenne (pied 34%, câble 15 % et appuis 20%). Les cimes des troncs (75%) ainsi que les lieux comportant une cassure (71%) ont apparemment beaucoup plus souffert de la dégradation durant les deux décennies suivant Viviane. Les différentes caractéristiques relevées sur les troncs lors des essais de traction ont aussi permis le test des liens existant entre les résultats fournis par la mesure du taux de décomposition et les conditions régnant aux environs directs des bois. Ces éléments ont été testés à l'aide de la corrélation de Spearman (table 7).

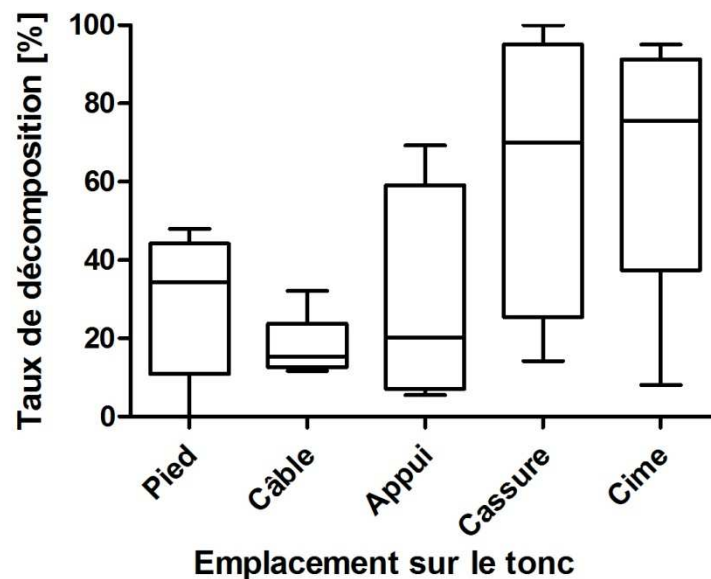


Fig. 30 : Taux de décomposition mesurés par le résistographe en fonction de l'emplacement sur le tronc. En abscisse, le type d'emplacement de la mesure (pied du tronc, emplacement du câble lors de l'essai, appui du tronc et cime). Sur l'ordonnée, le taux de décomposition du tronc [%].

Une corrélation positive de 0.53 se situe entre le taux de décomposition mesuré par le résistographe et celui obtenu par la méthode du couteau. Cette corrélation signifie que plus un tronc est mesuré comme étant décomposé par le résistographe, plus les valeurs du test du couteau sont élevées. Il n'existe aucune corrélation entre résistographe-hauteur effective et résistographe-altitude. Entre le résistographe et le diamètre du tronc, la méthode de Spearman montre une corrélation négative (-0.19). Plus un arbre est épais, moins il est dégradé. Une corrélation de 0.41 est trouvée entre le résistographe et la végétation. Elle indique que plus un tronc est enfoui dans la végétation, plus il est décomposé (table 7).

Table 7 : Matrice de corrélation de Spearman entre les taux de décomposition obtenus et les conditions environnant les troncs. La plage « couteau » représente les résultats obtenus par la méthode du couteau, celle nommée « résistographe », représente le pourcentage de dégradation obtenu par le résistographe. La plage « 5 cm couteau » correspond à la valeur de l'amplitude moyenne du résistographe sur les 5 premiers centimètres de forage. La plage « Moyenne couteau » correspond à la moyenne des amplitudes du résistographe sur la longueur d'enfoncement effective du couteau lors de l'essai (valeur I : 2 mm ; II : 1 cm ; III : 3 cm ; IV : 5 cm). Les cases rouges représentent les corrélations positives intéressantes, les cases bleues, les corrélations négatives.

	<i>Couteau</i>	<i>Hauteur effective</i>	<i>Altitude</i>	<i>Diamètre</i>	<i>Végétation</i>	<i>5 cm couteau</i>	<i>Moy. couteau</i>
<i>Résistographe</i>	0.53	-0.04	0.03	-0.19	0.41	-0.09	-0.23
<i>Couteau</i>		0.08	0.05	-0.04	0.09	-0.13	-0.23
<i>Hauteur effective</i>			0.33	0.00	-0.08	0.01	0.03
<i>Altitude</i>				0.04	-0.32	0.20	0.20
<i>Diamètre</i>					0.10	-0.14	-0.24
<i>Végétation</i>						-0.08	-0.14
<i>5 cm couteau</i>							0.75

Une corrélation positive existe entre l'altitude à laquelle se situe un tronc et la hauteur effective de ce dernier (0.33). Une corrélation négative existe entre « couteau-5 cm » et « couteau » (-0.13) ainsi qu'entre « couteau-moyenne » et « couteau » (-0.23). Elles signifient que plus le résultat du test du couteau est élevé, plus l'amplitude moyenne sur les 5 premiers centimètres, respectivement sur la longueur d'enfoncement du couteau est faible. La corrélation négative de -0.32 trouvée entre l'altitude du tronc et son enfouissement dans la végétation confirme les résultats trouvés lors de l'analyse multivariée (cf. 3.1, table 3) montrant que la végétation était plus importante sur les bas de la surface que sur les hauts. Finalement, le calcul de corrélation entre les résultats du résistographe et la valeur des charges brutes maximales que les troncs peuvent supporter fournit une valeur de -0.15. Elle signifie que plus un arbre est décomposé, plus la charge qu'il peut supporter est faible.

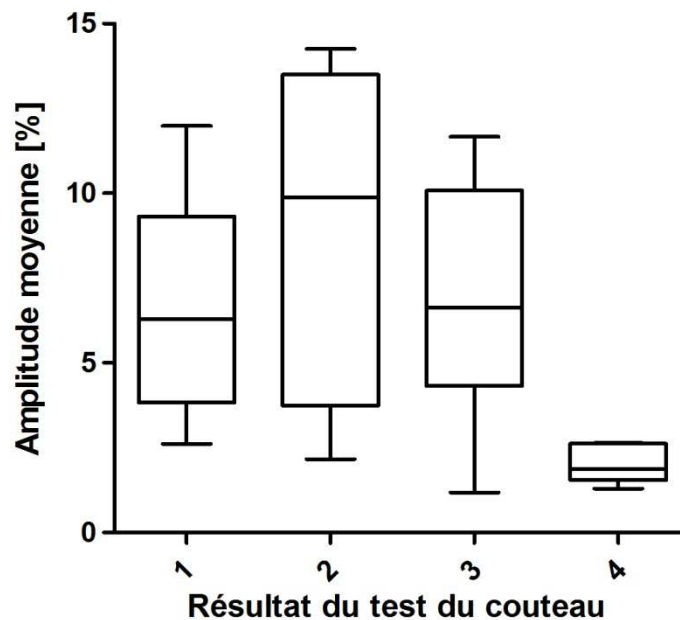


Fig. 31 : Amplitude moyenne sur les cinq premiers centimètres de forage du résistographe, classés selon le résultat du test du couteau. En abscisse, les résultats du test du couteau [1-5], en ordonnée, la moyenne du pourcentage d'amplitude [-] sur les 5 premiers centimètres de forage.

Afin de mieux évaluer le comportement entre la mesure du couteau et celle effectuée par le résistographe, la moyenne d'amplitude sur les cinq premiers centimètres de forage du résistographe est calculée et mise en relation avec les résultats obtenus par la méthode du couteau (fig. 31). La médiane des amplitudes moyennes mesurées comme valeur de « I » par la méthode du couteau est de 6.29 %, avec un minimum de 2.61 %. La médiane des valeurs classées sous II est ensuite plus élevée (9.87 %) pour ensuite diminuer à nouveau sous les valeurs de « III » (6.64 %) et de « IV » (1.86 %). A l'exception de la valeur de « I », plus la valeur du test du couteau est élevée, plus la moyenne d'amplitude est faible.

3.3 Données nivologiques

La hauteur de neige maximale que les dix troncs peuvent en moyenne supporter équivaut à 1.78 m avec un écart-type de 0.33 m. Cette hauteur du manteau neigeux induit une charge équivalente de 16.2 KN (table 8). Le tronc le plus faible supporte une charge se montant seulement à 1.17 m. Le calcul des hauteurs met aussi en évidence que lors d'un événement neigeux maximal, la hauteur du manteau neigeux est en moyenne supérieure de 0.82 m aux troncs. Cette partie n'est donc pas stabilisée par les troncs et peut conduire à une avalanche de plaque. Sur les dix troncs testés, seuls trois seraient incapables de résister à un événement neigeux survenant chaque trente ans.

Table 8 : Hauteur de neige par tronc [m] en fonction des résultats obtenus lors des essais de traction [KN]. Ces résultats sont aussi mis en relation avec les hauteurs de neige et les temps de retour obtenus par la méthode de Gumbel.

Tronc No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy.
Hauteur effective moyenne [m]	0.88	0.94	0.73	0.99	1.19	0.73	0.93	1.22	1.13	0.84	0.96
Résultat essai de traction [KN]	21.14	14.6	7.5	19.24	20.75	7.45	17.7	18.62	26.95	8.01	16.20
Charge neigeuse temps de retour 30 ans [KN]	11.4	8.57	21.01	8.77	8.98	10.2	17.5	2.69	7.22	8.94	10.53
Part supportable de la charge trentennale [%] ^a	185	170	35	219	231	73	101	692	373	89	217
Hauteur de neige maximale supportable par tronc	1.86	1.83	1.17	1.93	1.92	1.47	1.62	2.34	2.1	1.56	1.78
Temps de retour de la hauteur de neige maximale [an] (Station de Disentis)	82	70	6	105	100	18	32	493	201	26	-
Hauteur de neige maximale supérieure au tronc [m]^b	0.98	0.89	0.44	0.94	0.73	0.74	0.69	1.12	0.97	0.72	0.82

a: Pourcentage de la charge ayant un temps de retour de 30 ans que le tronc peut supporter. Trois troncs (3, 6 et 10) sont incapables de supporter la charge trentennale. **b:** Hauteur de neige [m] dépassant la hauteur effective du tronc lors d'un événement d'intensité équivalent à la charge de rupture du tronc.

L'analyse des données neigeuses à l'aide de la méthode de Gumbel montre que la station de mesure de Disentis reçoit généralement plus de neige que celle de Curaglia. Le calcul statistique a été effectué pour les deux stations ainsi que pour la moyenne neigeuse entre les deux stations (fig. 32). Le temps de retour de l'événement maximal supportable par les troncs vingt ans après Viviane équivaut ainsi à 60 ans selon les données de la station de Disentis (400 ans à Curaglia et 80 ans selon la moyenne des stations) alors que le tronc le plus faible ne peut supporter une hauteur de neige d'un temps de retour de 6 ans uniquement.

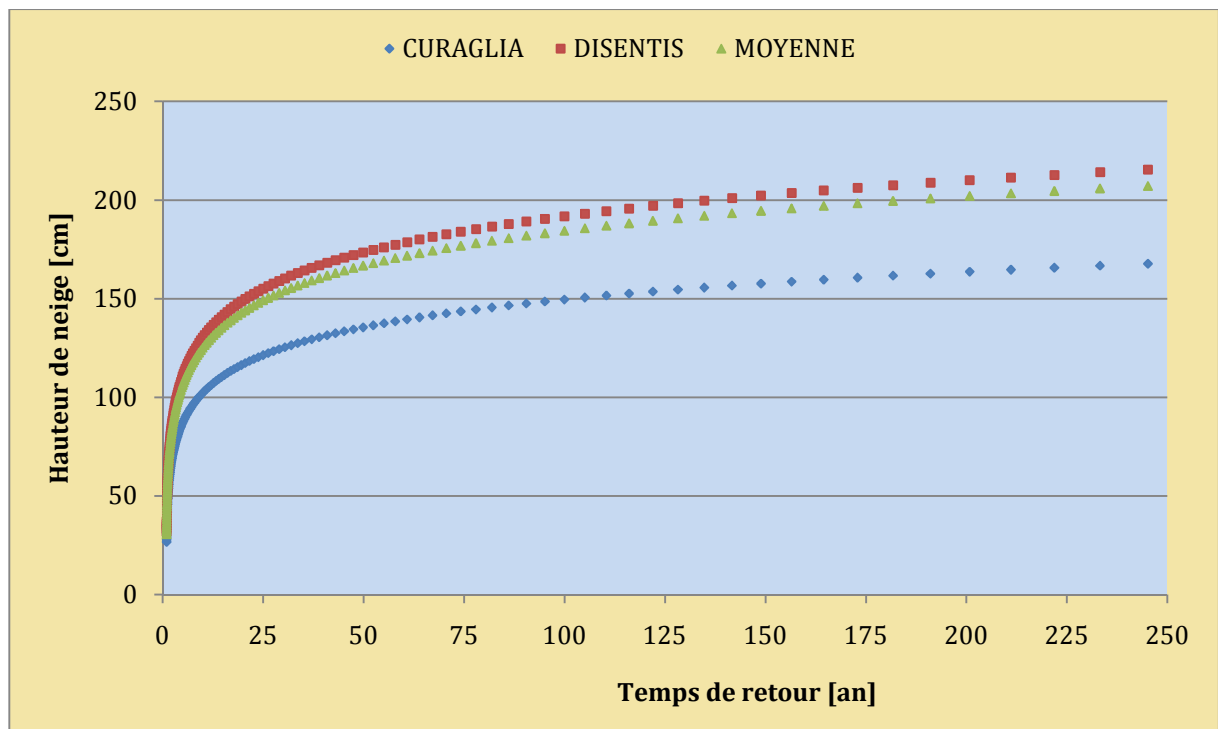


Figure 32 : Temps de retour des hauteurs de neige pour les stations de Disentis et de Curaglia ainsi que pour la hauteur de neige maximale moyenne entre ces stations de mesure. En abscisse, le temps de retour [an], en l'ordonnée la hauteur de neige [cm].

4. Discussion

4.1 Dislocation des bois au sol

4.1.1 Evolution et bris des bois

Si l'obtention de résultats absolus permet une description relativement précise de l'état du chablis en 2010, la mise en relation de ces résultats avec des études déjà réalisées permet, quant à elle, d'évaluer l'évolution du chablis lui-même. Le seul fait que le 30 % des plaquettes posées en 2001 n'ont pas été retrouvées et ont disparu dans la végétation témoigne de l'importante évolution du chablis au cours de la deuxième décennie après Viviane.

Les photos témoignent elles aussi de l'importante croissance d'une végétation essentiellement arbustive, masquant toujours plus les troncs et rendant leur recherche encore plus difficile. Il n'est dès lors pas étonnant que sur les 25 troncs marqués en 2001 (64 plaquettes), seuls 20 furent retrouvés lors des mesures de 2010.

La forte pression imposée par la neige affaiblit les bois, les déplace vers l'aval et les brise. En moyenne, chacun des troncs étudiés s'est brisé 2 fois de plus entre 2001 et 2010, contre une fois entre 1991 et 2001. Les troncs se brisent donc plus au cours de la deuxième décennie qu'ils ne le font au cours de la première. Une des raisons à ce phénomène est qu'ils ne sont plus supportés par leurs branches, celles-ci s'étant décomposées et rompues durant les premières années après Viviane (Frey et al, 2002). Le bris des branches implique une augmentation des espaces vides au-dessous des troncs, lesquels occasionnent des contraintes supplémentaires dans le bois, lors de la présence de charges neigeuses. Ces contraintes provoquent à terme de multiples fractures des bois.

Cette étude, par son analyse multivariée, montre que les fractures dépendent des conditions locales environnant les bois et ne sont donc pas uniformément réparties au sein du chablis. C'est ainsi que les troncs se situant dans les parties fournies de nouvelle végétation sont généralement moins brisés. En moyenne, ces troncs ne se sont rompus qu'une seule fois supplémentaire au cours de la seconde décennie, soit deux fois moins que les troncs se situant hors végétation. Deux possibilités à ce phénomène peuvent être invoquées. Premièrement, soit la végétation dispense un soutien au bois environnant, comblant les interstices provoqués par la rupture des branches et évitant ainsi des fractures qui seraient apparues en son absence. Soit la végétation modifie les propriétés du manteau neigeux au contact direct de ces troncs et abrite les bois face au poids neige (Frehner et al, 2005).

La seconde hypothèse ne semble que peu plausible, car la végétation dépassant les 1.30 m de hauteur est constituée de 69 % d'aulne blanc (*Alnus incarna*) et de 15 % de sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), soit d'une majorité de feuillus (Frankhauser, 2010). L'absence de feuilles en hiver ne leur permet qu'une protection des bois limitée face aux chutes de neige, l'effet de microclimat et d'interception de la neige étant diminués (Magreth, 2004).

4.1.2 Déplacement des bois

Le déplacement horizontal moyen des points mesurés, et donc des bois au sol au cours de la dernière décennie (2001-2010), s'élève à 1.77 m, tandis que durant la première (1991-2001), il se montait à 1.33 m (Frey et al 2002). Les deux durées d'études différant d'une année, le déplacement annuel moyen semble plus judicieux si l'on veut pointer une différence significative entre les deux décennies. Les troncs se sont donc déplacés de 13cm/an en moyenne entre 1991 et 2001 et de 20cm/an entre 2001 et 2010. Il semblerait donc que, d'un point de vue arithmétique, la deuxième décennie soit plus favorable au déplacement des troncs que ne l'est la première. Toutefois, l'étude des données comparables entre les résultats de 2001 (Frey et al 2002), et ceux de 2010 à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney indique une valeur de P de 0.51 (fig. 33). Cette valeur étant supérieure à 0.05, elle indique que les troncs se sont déplacés d'une manière stochastiquement équivalente au cours des deux décennies étudiées, même si certains troncs ont dévalé la pente. Le mouvement annuel moyen des troncs trouvés, n'est donc pas significativement différent entre les deux décennies, par rapport à l'ensemble des données. L'effet de stabilisation induit par des facteurs comme les enchevêtrements de troncs est donc globalement compensé par le bris et la chute de certaines parties de troncs vers l'aval. Les différences induites par les facteurs testés n'ont donc qu'une influence locale sur le déplacement des bois.

Le déplacement vertical moyen des points entre 2001 et 2010 est quant à lui de 2.06 m contre 1.62 m entre 1991 et 2001. Là encore, la valeur P de 0.43 trouvée par le test de Mann-Whitney indique que le déplacement vertical est stochastiquement équivalent entre les deux décennies. Si le déplacement vertical est le même au cours des deux décennies, l'altitude à laquelle se situent les troncs s'est, elle, modifiée en raison des déplacements successifs des bois. En réalité, le test de Mann-Whitney indique que la variation d'altitude subi par les points au cours de la première décennie ($P = 0.36$) ainsi qu'au cours de la seconde ($P = 0.15$) n'est pas significative. Toutefois, le test indique que les troncs se sont significativement déplacés vers l'aval entre 1991 et 2010 ($P = 0.03$).

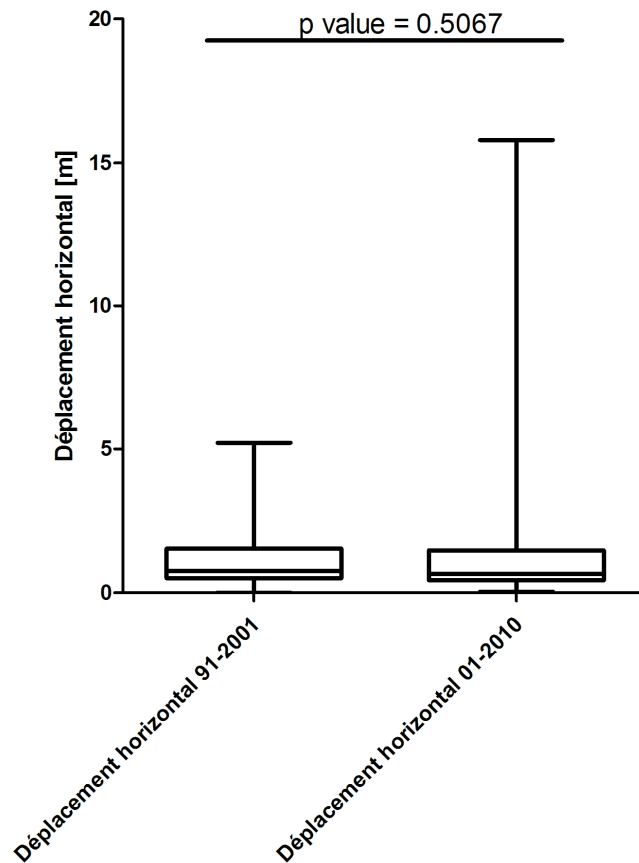


Fig. 33 : Déplacement horizontal moyen des troncs au cours de la première et de la deuxième décennie suivant Viviane. En abscisse, les deux décennies étudiées, en ordonnée, le déplacement horizontal [m]. La valeur P du test de Man-Whitney est de 0.5067.

Avec une moyenne de 4.75 m, (2.06 m pour l'ensemble du chablis) le déplacement vertical est le plus important dans les parties du chablis comportant des rochers. L'arbre de décision (fig. 23) montre clairement que parmi les cinq facteurs analysés, les rochers influencent le plus le déplacement des troncs. Ils sont suivis de près par le facteur de pente qui constitue le deuxième facteur d'influence. Si l'on considère les rochers comme des lieux à forte pente, la pente devient alors le premier facteur influençant le déplacement des troncs. En réalité, la pente induite par les rochers alliée au manque de rugosité du sol ainsi qu'au poids du manteau neigeux hivernal empêche les troncs de se stabiliser et provoque leur déplacement. Au bas des rochers, les troncs ayant dévalé la pente se retrouvent enchevêtrés. Ces enchevêtrements se situent donc aux emplacements ne comportant pas de rochers, d'où la corrélation négative de -0.14 trouvée entre rochers et enchevêtrements. L'enchevêtrement des troncs entre eux induit, quant à lui, un effet d'auto-stabilisation, lequel diminue directement le déplacement des troncs. L'étude montre aussi que les rochers sont défavorables à la présence de végétation.

Si les rochers favorisent le déplacement des troncs, les enchevêtrements qui en résultent la diminuent. La matrice des corrélations montre donc une corrélation négative entre enchevêtrements 2001 et déplacement horizontal (-0.13). Toutefois, les enchevêtrements ayant un effet sur le déplacement des troncs sont uniquement ceux qui sont apparus durant la première décennie suivant Viviane. En effet, les enchevêtrements présents en 1991 juste après l'ouragan n'étant pas issus du glissement des troncs mais de la chute aléatoire des arbres durant la tempête, n'étaient pas stabilisés et encore moins stabilisants. Ces enchevêtrements n'ont aucun effet sur la stabilisation des troncs. La matrice des corrélations montre même une corrélation positive entre les enchevêtrements de 1991 et le déplacement horizontal des troncs (0.14). Une des raisons de cette corrélation est que plusieurs de ces enchevêtrements de 1991 se situe sur les rochers. La corrélation n'est donc pas à considérer entre ces agglomérats et le déplacement, mais plutôt entre les rochers et le déplacement.

Les enchevêtrements sont aussi positivement corrélés avec la présence de végétation (0.29). Par symétrie avec les considérations précédentes, le déplacement vertical et la présence de végétation sont négativement corrélés (-0.22). La relation de cause à effet proposée par cette corrélation doit être interprétée minutieusement car deux possibilités se présentent. Première possibilité, la végétation retient les troncs et agit comme facteur stabilisateur. En se rappelant que la végétation modélisée était essentiellement constituée de feuillus du type de l'aulne blanc (*Alnus incarna*) (Frankhauser, 2010), on peut supposer que la résistance de la végétation est faible et que, par conséquent, elle est incapable de freiner le déplacement des troncs. Si tel est effectivement le cas, il est préférable de choisir la seconde possibilité : c'est justement parce que les troncs sont stabilisés qu'ils offrent une protection à la végétation. Cette protection, notamment contre d'éventuelles chutes de pierres provenant des rochers ainsi que contre les mouvements de neige, offre de meilleures possibilités de croissance à la végétation, laquelle est favorisée par rapport aux autres endroits. De plus, la corrélation négative entre la présence de rochers et celle de végétation (-0.35) s'explique simplement par le fait que la croissance de végétation n'est pas favorisée par la présence de gravats.

Cette analyse du déplacement des troncs permet de saisir en partie la configuration actuelle du chablis étudié. Les rochers étant présents sur la partie supérieure du chablis, ils impliquent un fort déplacement des troncs vers l'aval de la surface au début de la première décennie (Frey et al, 2002) et de la seconde décennie suivant Viviane.

Au pied de ces rochers, où la pente est aussi généralement plus faible, les troncs s'accumulent et s'enchevêtrent, réduisant leur propre déplacement et permettant ainsi à la végétation de croître. La quantité de végétation et d'enchevêtrement de troncs se situent donc majoritairement sur la partie inférieure du terrain étudié.

4.1.3 Hauteur effective

La hauteur effective moyenne des troncs par rapport au sol est équivalente à $0.86 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$ en 2009 et selon la mesure photogrammétrique. Ce type de mesure a été choisi parce qu'elle présente la plus faible incertitude ainsi que le plus faible écart-type des trois méthodes de mesure. En effet, la mesure au double-mètre (0.94 m) est très peu précise et la mesure automatique sur la base du TIN (0.36 m) présente une moitié de résultats impossibles puisque négatifs. Les erreurs détectées dans ce dernier mode de mesure proviennent certainement de la simplification du modèle numérique de terrain intervenant lors de la création des triangles composant le TIN. En effet, le calcul du TIN crée aussi une partie des données pour les lieux situés entre les courbes de niveau. Si les résultats obtenus par la mesure automatique sur la base du TIN sont incertains d'un point de vue de la hauteur effective, ils peuvent toutefois nous renseigner sur la variation de cette hauteur effective au cours de la deuxième décennie. En comparant la hauteur des points de 2001 par rapport au TIN de 2001, puis ceux de 2010 par rapport au même TIN de 2001 et en les soustrayant (formule 10), l'erreur produite par le calcul automatique devrait disparaître.

$$\begin{aligned} (10) \quad & (H_{2001} + Erreur_{Tin\ 2001}) - (H_{2010} + Erreur_{Tin\ 2001}) \\ & \cong H_{2001} - H_{2010} \\ & \cong \Delta H_{effectif} \end{aligned}$$

En supposant que la diminution de la hauteur effective des bois s'effectue de manière régulière chaque année au cours de la décennie, ce calcul indique une diminution de la hauteur effective de 6.9 cm /an entre 2001 et 2009, ce qui ramènerait la hauteur effective des troncs, par simple multiplication, à une valeur de $1.4 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$ en 2001 (1.1 m selon Frey et al, 2002). Durant la première décennie, entre 1991 et 2001, la diminution de hauteur était quant à elle de 0.74 m, soit 7.4 cm/an (Frey et al, 2002). Ce qui ramène la hauteur effective à $2.15 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$ en 1991 (1.8 m selon Frey). Etant donné que la précision des mesures photogrammétriques est de 0.1 m, on peut donc supposer que la modification de la hauteur effective est la même au cours de la première et de la seconde décennie suivant Viviane.

La différence des valeurs entre les deux décennies est de 0.005 m/an, ce qui correspond à une valeur de 0.05 m sur l'ensemble de la décennie, valeur inférieure à la précision de mesures et donc négligeable.

L'analyse multivariée met aussi en évidence que la hauteur effective est plus basse pour les troncs se situant en dehors de la végétation. Comme la majorité de la végétation se trouve sur les bas du terrain étudié c'est aussi sur le bas du terrain que les troncs présentent les valeurs de hauteur effectives les plus importantes. La première explication au phénomène est que cette différence provient d'une erreur systématique de mesure. En effet, les troncs sous la végétation étant plus difficilement visibles que les autres, il se peut que la mesure photogrammétrique soit systématiquement biaisée. Toutefois, les valeurs trouvées par le calcul automatique sur la base du TIN, bien que proposant des valeurs plus basses, montrent aussi que les troncs au sein de la végétation ont une hauteur effective plus élevée comparativement aux autres. Le fait que cette hauteur soit plus importante sous le couvert de végétation peut donc à nouveau être expliqué par le soutien supplémentaire que la végétation apporte aux bois, freinant ainsi la diminution de leur hauteur effective par rapport aux autres. On remarque de plus que la hauteur effective des troncs se situant sur une rupture de pente est aussi plus élevée. La raison en est la pente du terrain, laquelle est soudainement plus importante à l'aval du tronc mesuré, augmentant ainsi le résultat de la mesure.

4.2 Résistance du bois

4.2.1 Résistance à la charge

L'échantillon des dix troncs testés, certes limité par rapport à l'ensemble des troncs du chablis, donne de précieux renseignements sur la manière dont évolue l'état structurel du bois après avoir subi les influences du climat durant deux décennies. La charge moyenne qu'un tronc peut supporter, indépendamment de la configuration de l'essai, se monte à 16.2 KN avec un maximum de 27 KN atteint lors d'un essai. Parmi les dix bois testés, seuls trois ne se sont pas brisés lors de l'application de la charge. Ils ne permettent donc pas de calculer de moment de rupture. Les longs troncs ont été, quant à eux, considérés comme des consoles⁴ encadrées et le calcul adapté en conséquence. Une fois le moment de rupture calculé pour chacun des troncs, il a été réduit de 7 % à la suite du calcul des efforts internes dans un tronc partiellement dégradé. En moyenne, le moment de rupture du bois est donc de 1.83 N/mm², ce qui équivaut à 3.66 % du moment de rupture du bois sain de qualité moyenne.

⁴ Support appuyé contre un mur ou fixé (encadré) à celui-ci.

Lors d'essais similaires réalisés en 2001, la moyenne de la charge brute supportable par le bois était de 25 KN avec un maximum de 37 KN pour l'un des troncs (Frey et al, 2002). Ces essais ont été réalisés en 2001 sur un chablis de Viviane situé à Pfäfers (SG). Ils demeurent toutefois comparables avec les données obtenues à Disentis en raison de la configuration du chablis relativement similaire. En effet, la forêt de Pfäfers était elle aussi constituée essentiellement d'épicéa. Son altitude, son exposition et ses conditions météorologiques étaient semblables à celles rencontrées à Disentis. La différence de charge en neuf années avoisine ainsi les 9 KN (36%) et est essentiellement explicable par la détérioration des bois.

Si la dégradation des bois n'influe pas sur leur résistance au cours de la première décennie après Viviane (Frey et al, 2002), cette détérioration induit de plus lourdes conséquences durant la seconde décennie. La théorie de 2002 qui supposait que les troncs pourraient reprendre la même charge durant 30 ans (Frey et al, 2002) est donc caduque.

Projeter l'évolution des bois dans le futur s'avère relativement difficile. Selon certaines études, il faudrait s'attendre à ce que la perte de densité du bois suite à sa décomposition soit linéaire au fil du temps (Brown et al, 1998). D'autres études décrivent la décomposition comme une relation exponentielle inverse en fonction du temps (Naesset, 1999). La perte de biomasse suivrait, elle aussi, une exponentielle négative (Hytteborn et al, 1987). Les troncs avec un plus faible diamètre se décomposeraient aussi plus rapidement que ceux possédant une plus grande épaisseur (Brown et al, 1996). Aucune étude ne permet toutefois d'évaluer avec certitude la perte de résistance à la charge au fil du temps. Une projection fiable de cette perte de résistance avec les années nécessiterait naturellement une étude plus approfondie laquelle dépasse le cadre de ce travail. En supposant toutefois que la résistance diminue linéairement dans le temps, il faudrait s'attendre à une perte de charge de 9 KN au cours de la prochaine décennie, perte équivalente à celle subie entre 2001 et 2010. La résistance moyenne affichée par les troncs à l'horizon 2020 se situerait donc aux alentours des 7 KN.

4.2.2 Taux de décomposition

Le taux de décomposition moyen trouvé à l'aide du résistographe et de la méthode de Nötzli vaut 41%. Suite à une analyse approfondie des deux techniques d'évaluation des forages, le choix porta sur la méthode de Nötzli, jugée plus nuancée (Nötzli et al, 2002). La raison est que la méthode du seuil définit une limite à partir de laquelle le bois est jugé sain.

Toute partie se situant au-dessous de cette limite, est dès lors considérée comme étant complètement dégradée. Or il est possible qu'une tranche de bois oppose un peu moins de résistance lors du forage et, sans être toutefois dégradée, se situe au-dessous du seuil fixé. Cette partie est dès lors considérée comme étant décomposée, augmentant ainsi de manière insensible le taux final de dégradation. La méthode de Nötzli définit le bois comme sain tant que la structure des cernes demeure visible. Ce sont alors les parties inférieures à la plus basse des parties saines, à laquelle une marge est appliquée, qui sont considérées comme dégradées. Cette méthode plus nuancée prend en compte les différences d'amplitude au sein même des parties saines du bois. Pour cette raison, les résultats des forages du résistographe ont été traités à l'aide de la méthode de Nötzli. Les taux de décomposition étant plus élevés pour les valeurs fournies par la méthode du seuil, il est dès lors logique que la différence entre les résultats fournis par les deux méthodes soit plus importante dans les faibles taux de décomposition que dans les taux plus importants (fig. 28).

Les mesures du résistographe alliées aux relevés de terrain montrent que les troncs se trouvant sous un couvert de végétation comme des buissons, herbes, mousses, etc. sont plus décomposés (55%) que ceux se situant hors végétation (31%). La matrice des corrélations de Spearman montre aussi une corrélation positive de 0.41 entre la présence de végétation et le taux de décomposition des troncs, ce qui confirme les résultats énoncés. Les raisons conduisant à ce lien entre végétation et dégradation des bois sont essentiellement le taux d'humidité et la température. En effet, puisque la végétation protège le bois contre les radiations solaires, elle évite son dessèchement par le maintien d'un taux d'humidité et d'une température favorisant le processus de décomposition par les différents acteurs tels que les insectes, champignons, mousses, lichens, etc. (Otto, 1994). L'effet retardateur de la lumière sur la décomposition est aussi atténué par la végétation. La succession des champignons décomposeurs, souvent invisibles, dégrade aussi le bois plus rapidement lorsque des conditions favorables se présentent (Honold et al, 1999). On remarquera alors que la plus faible température due à l'altitude du chablis retarde les processus de décomposition et maintient les bois dans un meilleur état que s'ils se situaient en plaine (Otto, 1994). En réalité, les conditions locales influent sur la décomposition du bois au sein d'un même tronc. Chaque stade de dégradation des bois fournit un nouvel habitat aux décomposeurs (Maser et al, 1984). C'est ainsi que certaines parties de troncs sont moins décomposées que d'autres. Les pieds des troncs présentent un taux moyen de décomposition de 35 %, soit une valeur inférieure au taux moyen par tronc. Cette faible valeur est en réalité due à l'importante épaisseur des bois à la base de l'arbre, ainsi que par la hauteur effective plus importante due à l'assiette du tronc (Otto, 1994). Plus le bois est en hauteur et plus il est donc éloigné des décomposeurs (Hytteborn et al, 1987).

Le diamètre, toujours supérieur à 0.5 m, protège le centre du tronc contre les influences extérieures, lui permettant de rester bien souvent dans un bon état. Ce phénomène est aussi confirmé par la corrélation de Spearman qui est négative (-0.19) entre le résistographe et le diamètre des troncs. Les troncs se décomposent donc de manière inversement proportionnelle à leur diamètre (Brown et al, 1996). Les deux autres emplacements jouissant de faibles taux de décomposition sont les lieux où le câble fut attaché (15%) ainsi que les appuis des troncs (20%). La raison en est que ces lieux se situent généralement à une hauteur relativement importante par rapport au sol, d'une part parce que les lieux servant d'appui sont appuyés à un élément les maintenant en hauteur, et d'autre part parce que les lieux où le câble a été lié étaient suffisamment dégagés du sol pour le permettre. Cette distance au sol les protège de l'humidité du terrain et de la végétation, ce qui les rend moins exposés à l'humidité et ralentit ainsi leur dégradation (Otto, 1994). Les cimes des troncs (75%) montrent un taux de décomposition plus important. Une des raisons pouvant être invoquée est qu'aucune cime n'est intacte. Chacune étant le résultat d'une cassure précédente. Ces lieux ayant été brisés, ils sont d'avantage soumis aux conditions environnementales et souffrent de dégradation plus que les autres emplacements.

Les emplacements ayant subi une fracture lors de l'essai de traction dénotent aussi d'un taux de décomposition avancé (71%). Ce phénomène allié à l'étude des moments de rupture permet de proposer deux causes principales à la rupture des troncs lors des essais : premièrement, les troncs se sont rompus aux emplacements montrant une faiblesse, comme un fort taux de décomposition. C'est notamment le cas des essais 3 et 4 qui montrent respectivement des taux de 73 % et de 95 % au lieu de cassures. A l'inverse, les troncs étant les moins décomposés, les troncs 2 et 8, ne se sont pas brisés lors de l'essai de traction. On peut donc déduire de ces deux cas précis que le bois des troncs a été plus solide que ne l'ont été les appuis. Deuxièmement, la cause de la rupture des troncs tient à l'effet d'encastrement, impliquant que le lieu de rupture soit parfois situé entre deux appuis (troncs 1, 5, 7, 9), en un lieu apparemment improbable. Seule la cause de la rupture du tronc 6 reste difficilement explicable ; quant au tronc 10, il ne s'est pas rompu en raison de la faiblesse de ses appuis. Le résistographe peut donc localement prédire la cause d'une rupture. Il est toutefois impossible de déduire des forages la charge à laquelle un tronc peut résister, puisque la résistance à la charge dépend de la position et des conditions environnant directement le tronc.

4.2.3 Comparaison entre la mesure du résistographe et la méthode du couteau

La comparaison entre les mesures effectuées au résistographe et celles de la simple méthode du couteau permet de contrôler l'exactitude des résultats. La corrélation positive de 0.53 entre les deux méthodes de mesure indique que les résultats obtenus pour chacune d'elles ont tendance à être semblables. En effet, plus un tronc est décomposé, plus la valeur du test du couteau est haute et plus le pourcentage de décomposition mesuré par le résistographe est élevé, d'où la corrélation positive. Le fait que le résistographe sonde la structure interne, tandis que le couteau se préoccupe uniquement de la structure externe du tronc n'influe donc guère sur le résultat obtenu.

Afin d'observer le comportement du résistographe sur la profondeur effectivement mesurée par le couteau, seuls les cinq premiers centimètres de chaque forage ont été analysés. Les corrélations obtenues entre la moyenne de l'amplitude donnée par le résistographe sur les cinq premiers centimètres avec le résultat du test du couteau est négative. Cette corrélation signifie que plus la valeur du test est grande, plus l'amplitude mesurée par le résistographe est faible. La tendance est en outre confirmée par la figure 31, effectuant le lien entre les deux méthodes. La logique est respectée à l'exception de l'amplitude mesurée pour la classe « I » du test. Le boxplot pour cette valeur montre une amplitude plus faible que pour les valeurs « II » et « III » du test. La raison en est que pour les mesures classées sous « I », le couteau ne s'est enfoncé que de 1-2 mm dans le bois. Considérer la valeur du résistographe sur les cinq premiers centimètres est une approximation encore trop grossière de l'amplitude. Afin d'obtenir un meilleur résultat, il faudrait considérer la valeur de l'amplitude uniquement sur les quelques premiers centimètres de mesure du résistographe, ce qui est impossible, car le moment exact où la mèche pénètre dans le bois n'est détectable que d'une manière trop approximative. Si la corrélation entre les deux méthodes sur la distance effectivement testée par les deux simultanément est bonne, elle confirme une fois de plus la fiabilité des deux méthodes dans la prévision du taux de décomposition.

4.3 Données nivologiques

Les hauteurs de neige trouvées lors du calcul par tronc ont été mises en relation avec les données enregistrées depuis 1945 par la station de mesure automatique de Disentis. La raison pour laquelle la station de Disentis a été préférée à celle de Curaglia et à la moyenne entre les deux est qu'elle mesure des quantités de neige plus importantes que celle de Curaglia. Dans un souci de sécurité en matière de dangers naturels, il est préférable de toujours considérer le cas le plus extrême, raison pour laquelle le choix s'est porté sur la station de Disentis. Cette station fournit en outre des données sur une période beaucoup plus étendue que celle de Curaglia. La qualité du résultat devrait en être d'autant accrue.

La hauteur de neige maximale que les troncs peuvent supporter en moyenne est de 1.78 m. Par rapport aux données neigeuses de Disentis, traitées à l'aide de la méthode de Gumbel, cette hauteur de neige maximale équivaut à un temps de retour de 60 ans.

La hauteur de neige ayant un temps de retour de 30 ans équivaut selon le calcul basé sur la station de Disentis à une hauteur de 1.60 m. Les valeurs trouvées en 2002 à la suite des relevés de neige in situ entre 1991 et 2001 affichent un résultat de 2.5 m pour un événement d'un même temps de retour de 30 ans (Frey et al, 2002). Cette valeur est donc de 0.9 m supérieure à celle trouvée par notre calcul. La raison de cette différence dépend du fait que, entre 1991 et 2001, deux années ont comporté de fortes précipitations neigeuses, faussant ainsi le résultat en raison du manque de recul par rapport à ces données. La méthode de Gumbel utilisée dans ce travail se fonde, elle, sur 65 ans de mesure des précipitations neigeuses et devrait ainsi être plus précise que les données mesurées in situ. Pour cette raison, le travail se fonde sur les données calculées plutôt que sur les valeurs précédemment mesurées in situ.

Parmi les charges que les troncs ont pu supporter lors de l'essai de traction, seuls trois, soit le 30 % des troncs sont incapables de résister à un événement neigeux survenant chaque trente ans (1.6 m de neige). En 2001, tous les troncs testés étaient par contre aptes à supporter ces 1.6 m de neige, non seulement parce que leur résistance à la charge était plus élevée qu'en 2010, mais aussi du fait de leur hauteur effective, qui était nettement plus importante à l'époque. Cette plus grande hauteur les libère ainsi d'une bonne partie du poids du manteau neigeux, puisqu'ils sont plus proches de la surface de la neige (cf. § 2.3.1, formule 6).

4.4 Effet protecteur du chablis

Si jusqu'à présent, la hauteur de neige a été considérée uniquement du point de vue de la charge, les paramètres définissant la qualité de la protection paravalanche sont multiples. En effet, outre le poids et la hauteur maximale du manteau neigeux, le dimensionnement d'ouvrages paravalanches s'effectue notamment en considérant la pente du terrain, la hauteur et la résistance à la charge des ouvrages mais aussi l'espacement entre ces derniers (OFEV, 2007).

En comparant les bois à des ouvrages de protection paravalanche, il est possible de tirer quelques conclusions sur l'effet protecteur. Tout d'abord, la pente du chablis, comprise entre 30° et 50°, est propice au déclenchement et à l'écoulement d'avalanches (OFEV, 2007). Elle nécessiterait, en terrain dégagé, la pose d'ouvrages de protection (Schönenberger et al, 2005).

Du point de vue de la charge, les calculs effectués à la suite des essais de traction montrent que 70 % des troncs sont capables de retenir une hauteur de neige d'un temps de retour de 30 ans (1.60 m). Ce pourcentage tombe à 50 % dans le cas d'une épaisseur de neige égale ou supérieure à 1.78 m, épaisseur correspondant à un temps de retour de 60 ans. Cette hauteur de neige est en outre de 0.82 m supérieure à la hauteur moyenne des troncs.

Si les troncs peuvent supporter une charge équivalent à une hauteur de neige de 1.78 m, ils ne peuvent physiquement retenir cette neige au maximum jusqu'à une hauteur équivalente à leur hauteur effective. Cette hauteur correspond à 0.96 m en 2010 et est atteinte dans la région de Disentis chaque 3 ans en moyenne. Toute chute de neige entre 0.96 m et 1.78 m, soit une couche maximale de 0.82 m, ne peut physiquement plus être stabilisée par les troncs : elle est donc fortement susceptible de provoquer une avalanche. La question est ici d'évaluer la taille qu'aurait une avalanche provoquée par la rupture de 0.82 m de neige. Il est certain qu'une étude approfondie tenant compte de la topographie, de la concentration des chutes de neige en trois jours, etc., serait nécessaire afin de répondre de manière plus précise à cette question. Toutefois, on peut estimer qu'une avalanche provoquée par la rupture de 0.82 m de neige risque de dépasser les environs directs du chablis. Pour cette raison, on peut conclure que la protection paravalanche jusqu'à une hauteur de 0.96 m (temps de retour de 3 ans) est assurée. Au-delà de cette hauteur neigeuse, le niveau de protection diminue et pour ce qui est des avalanches extrêmes, la protection n'est assurée que de manière limitée jusqu'à une épaisseur de 1.60 m de neige (dont 0.64 m supérieurs aux troncs), correspondant à un temps de retour de 30 ans. Pour une épaisseur supérieure à 1.60 m et jusqu'à 1.78 m, la protection est mauvaise. Au-delà de 1.78 m d'épaisseur, la neige pourrait théoriquement provoquer la rupture des troncs et le glissement de l'ensemble du chablis sous forme d'avalanche.

Le dernier facteur à évaluer, déterminant en ce qui concerne le glissement de la neige, est l'espacement entre les ouvrages (OFEV, 2007), en l'occurrence entre les troncs. Selon une rapide évaluation du chablis, la taille des trouées maximales entre les bois ne devrait idéalement pas dépasser les 10 m afin d'assurer une bonne protection (OFEV, 2007). Une évaluation sur la base des photos aériennes montre que seuls deux emplacements situés dans les rochers dépassent cette valeur de l'ordre de 3 mètres. Comme la végétation masque les troncs de manière importante sur le reste du chablis, l'évaluation de l'espacement entre les troncs s'avère donc difficile. Puisque la végétation a passablement repoussé entre les troncs, masquant ainsi d'éventuelles trouées, et au vu de la densité des troncs digitalisés lors des études précédentes (Frey et al, 2002), on peut supposer que le critère d'espacement n'est pas déterminant pour ce qui est de la protection paravalanche. Il est dès lors sans intérêt de s'y attarder.

L'effet protecteur du chablis non nettoyé par rapport à la protection paravalanche est indéniable. Durant la première décennie suivant Viviane, six avalanches ont été relevées sur les deux parties du chablis nettoyé (Frey et al, 2002). Sur le chablis laissé en l'état, aucune avalanche ou coulée neigeuse importante n'est apparue (Schönenberger, 2004). Seules trois reptations neigeuses sont apparues au niveau des rochers ainsi qu'au sein des trouées (Frey et al, 2002). Ces glissements étaient toutefois de très petite envergure et tous furent arrêtés par les bois au sol et dans les limites du terrain. Aucune coulée au cours de la première décennie n'aurait donc menacé des personnes et des biens directement situés en aval du chablis.

Durant la deuxième décennie, l'ampleur des événements est réduite par les bois et la majorité des événements extrêmes devrait être en principe être évitée. Si des personnes et des biens ne sont menacés uniquement par des événements extrêmes, aucune intervention particulière n'est requise. Dans le cas contraire où des personnes et des biens, devaient être directement menacés, la pose d'ouvrages protecteurs à la fin de la première décennie s'avèrerait alors nécessaire. Un chablis non déblayé pose un inconvénient majeur lors de cette construction, car l'accès et le travail sont entravés par les bois entrecroisés. Si la décision de ne pas déblayer un chablis est prise, les responsables doivent toutefois, en fonction de la configuration, être attentifs au risque de dégâts secondaires dus à la pullulation du bostryche et causant des dégâts aux arbres sains (OFEV, 2008). La variante de non-intervention sur un chablis présente en revanche l'avantage de n'occasionner aucun coût de déblaiement des bois et de construction immédiate de paravalanches.

Les deux autres variantes de nettoyage du chablis demandent, quant à elles, une importante main-d'œuvre exposée à de forts risques lors du façonnage des bois (OFEV, 2008). Elles impliquent en outre le remplacement de l'effet protecteur par la construction d'ouvrages paravalanches. Ces constructions, si on ne tient pas compte du coût induit par le déblayage des bois, reviendraient à 625'000 CHF/ha (Schönenberger et al, 2005).

Seule l'étude de l'effet mécanique dispensé par les troncs a été réalisée dans ce travail. Une rapide comparaison des résultats avec d'autres études permet d'évaluer l'influence d'autres facteurs importants comme le rajeunissement et la végétation présents sur le chablis, et dont l'effet sur la rugosité du sol ainsi que sur la protection paravalanche peut être non négligeable (Wohlgemuth et al. 2002). Les études menées en 2010 sur la végétation montrent que les arbres les plus grands présents sur le chablis sont essentiellement des feuillus (Frankhauser, 2010). Les feuillus ne dispensent pas de protection paravalanche de bonne qualité. Premièrement, la perte des feuilles en hiver les empêche de modifier le manteau neigeux, comme expliqué plus haut. Deuxièmement, si les feuillus sont de petite taille, ils plient sous le poids de la neige et ne peuvent la retenir (Frehner et al, 2005).

Leur effet protecteur est donc négligeable. Le rajeunissement des résineux dispensant une meilleure protection que les feuillus prend du temps et n'apparaît en 2010 qu'en faible quantité sur le chablis. De ce fait, la repousse de végétation en 20 ans ne dispense pas d'effet protecteur satisfaisant à elle seule (Netzer, 2010). Selon différentes simulations effectuées, l'effet protecteur de la végétation sur la partie replantée du chablis devrait être meilleur du fait que le rajeunissement y est artificiellement provoqué (Ramming et al, 2007). La phase de dispersion des graines et d'implantation des semis est ainsi artificiellement réduite et l'ensemble du rajeunissement se voit accéléré. Replanter un chablis permettrait de gagner une dizaine d'années sur le rajeunissement naturel (Conzetti, 2010), qui ne semble pas combler la perte de protection dispensée par les troncs au sol 20 ans après Viviane.

Table 9 : Evolution estimative de la protection fournie par les troncs en 2001 et en 2010. La protection directe fait référence à la protection de biens qui se situeraient directement au pied du chablis et menacés par les événements d'amplitude faible à moyenne. La protection éloignée fait référence à des biens éloignés du chablis et menacés seulement par des événements de grande amplitude.

Temps de retour [an]	Hauteur de neige [m]	Protection directe (petit événement)		Protection éloignée (grand événement)	
		2001	2010	2001	2010
2	0.80	OK	OK	OK	OK
3	0.95	OK	Limitée	OK	OK
10	1.30	Limitée	Limitée	OK	OK
30	1.60	Limitée	Mauvaise	OK	Limitée
60	1.78	Limitée	Mauvaise	OK	Mauvaise

En conclusion de cette étude sur la capacité protectrice du chablis, on peut estimer que 20 ans après l'ouragan, une avalanche de moyenne envergure est susceptible de se produire tous les 3 à 5 ans sur le chablis de Disentis, tandis qu'une avalanche de grande ampleur pourrait survenir chaque 60 ans, avec des risques plus élevés lors d'épaisseurs de neige plus importantes apparaissant chaque 30 ans (table 9). En ce sens, la protection perpétuelle de biens qui seraient directement menacés par de petites coulées au pied du chablis n'est pas durablement assurée. Les personnes et les biens qui se situeraient à une distance plus importante du chablis, et qui seraient donc uniquement touchés par un événement de grande ampleur, sont eux généralement à l'abri. Une réponse à la cinquième hypothèse est ainsi fournie : les troncs préviennent encore contre le déclenchement des avalanches, mais de manière plus faible qu'en 2001. Les troncs sont en 2010 encore capables de résister à la charge induite chaque année par le manteau neigeux. Le facteur limitant leur effet protecteur n'est pas le poids du manteau neigeux, mais plutôt la diminution de leur hauteur effective.

La densité des troncs est aussi suffisante afin d'éviter le déclenchement d'avalanches et les reptations de neige entre les troncs eux-mêmes. La végétation naturelle ne suffit pas à compenser la perte de protection des troncs, 20 ans après l'ouragan.

4.5 Vérification des hypothèses

Hypothèse 1 : Les troncs au sol se sont déplacés et brisés d'avantage au cours de la deuxième décennie suivant l'ouragan que durant les premières années. La raison principale est la dégradation du bois et sa perte de résistance.

Cette première hypothèse est partiellement vérifiée. En effet, si les bois se sont brisés deux fois plus au cours de la seconde décennie, ce n'est pas pour autant que leur déplacements en ont été significativement plus importants. Les mouvements sont en outre influencés par des paramètres autres que la dégradation du bois, comme la pente du terrain et la présence de rochers par exemple.

Hypothèse 2 : La pente est le facteur principal influençant le déplacement des troncs d'arbres au cours de la deuxième décennie.

Les rochers sont les lieux impliquant le plus fort déplacement des bois. Cette hypothèse est vérifiée si l'on considère que les rochers sont des endroits à très forte pente.

Hypothèse 3 : La hauteur effective des troncs au sol s'est réduite au cours de la deuxième décennie, mais dans une moindre mesure que durant les dix premières années suivant la tempête.

La hauteur effective des troncs s'est effectivement réduite au cours de la deuxième décennie, mais de manière semblable à la réduction apparue durant la première décennie. Cette hypothèse est donc partiellement infirmée.

Hypothèse 4 : La charge maximale que les troncs perpendiculaires à la pente peuvent supporter s'est fortement réduite en dix ans et est presque inexistante, vingt ans après l'ouragan.

La charge moyenne que les troncs peuvent reprendre est de 16.2 KN. Certes cette charge est plus faible que la charge mesurée en 2001 (- 36 %), mais elle n'est pas négligeable et donc pas totalement inexistante. L'hypothèse est donc partiellement infirmée.

Hypothèse 5 : Les troncs plus ou moins perpendiculaires à la pente ne sont plus capables, à eux seuls et 20 ans après la tempête, de prévenir le déclenchement d'avalanche. La construction de paravalanches comblant ce manque est nécessaire.

Les troncs protègent de manière efficace contre les avalanches jusqu'à une hauteur du manteau neigeux de 0.96 m. De 0.96 m et jusqu'à 1.78 m de hauteur de neige, la protection diminue. Au-delà de 1.78 m la protection est inefficace. Les troncs permettent de réduire la probabilité qu'une avalanche d'une amplitude extrême ne survienne. En fonction de la situation des biens à protéger, on examinera au cas par cas la nécessité de projets de défense.

5. Remarques finales

5.1 Perturbations infligées au milieu

Au cours de cette étude menée sur le chablis, une attention toute particulière a été portée sur les perturbations infligées au milieu naturel. Ces perturbations, en plus de dégrader l'environnement pourraient modifier l'évolution naturelle du chablis sur lequel pourraient se passer de futures études. La mesure des déplacements des troncs au sein du chablis n'a infligé aucune perturbation du milieu. Une perturbation a été, par contre, infligée par les essais de tractions. Les dix troncs testés ont ainsi subi des cassures et un déplacement supérieurs à la normale. Comme il ne s'agit toutefois que de dix troncs sur l'ensemble du chablis, on peut estimer que les perturbations liées à l'étude sont limitées. Les coordonnées approximatives des dix troncs testés se trouvent dans l'annexe B.

5.2 Restrictions de l'étude et questions ouvertes

Cette étude s'est essentiellement concentrée sur l'aspect mécanique des troncs et pourrait être complétée par de multiples thématiques apparentées. Une étude des champignons et des insectes présents au sein des troncs compléterait l'étude de la décomposition des bois. Elle permettrait de mieux saisir l'évolution de la structure du bois au fil du temps.

L'aspect de protection contre les dangers pourrait être complété par l'étude plus approfondie du rajeunissement et de la végétation sur les trois différents chablis, puisque la végétation devrait à terme compenser la perte de la protection dispensée par les troncs. Etudier la densité des éléments en fonction de leur hauteur au-dessus du sol fournirait des données complémentaires sur la rétention des différentes hauteurs de neige. L'observation des coulées neigeuses en hiver ainsi que le suivi du manteau neigeux in situ pourrait contribuer à affiner les conclusions sur l'effet protecteur. La protection contre les chutes de pierres pourrait aussi être abordée et compléterait l'étude des dangers naturels.

Enfin, diverses études touchant plutôt à l'aspect biologique du chablis fourniraient un complément à la thématique de l'évolution des chablis. Parmi elles, la diversité des espèces végétales, l'influence de la faune sur le développement de la végétation ou la microfaune au sein du chablis constitueraient autant de sujets aussi intéressants que variés et complèteraient les connaissances sur ces phénomènes que sont les ouragans.

5.3 Synthèse et perspectives sur l'évolution future du chablis

Malgré l'apparition en moyenne de deux fractures supplémentaires en 10 ans, les troncs ne se sont pas déplacés de manière significativement différente durant la première (1.33 m) et la deuxième décennie (1.77 m). Nombre de troncs ont toutefois dévalé la pente, ce qui n'était que peu arrivé durant les 10 premières années. Etant donné le nombre croissant de fractures sur les troncs, on peut s'attendre à ce que le déplacement des troncs soit plus important à l'avenir, sous réserve bien entendu, de l'effet de la végétation croissante.

De même, la hauteur effective s'est réduite d'une valeur identique au cours de la première (7.4 cm/an) et de la deuxième décennie (6.9 cm/an) après Viviane. Cette hauteur effective constitue le facteur limitant l'effet protecteur du chablis. Les arbres se trouvant en 2010 pour la majorité à une faible hauteur du sol et à même le sol pour certains, cette hauteur effective devrait moins se réduire au cours de la prochaine décennie qu'elle ne l'a fait des deux premières, du fait que les bois sont presque au sol.

L'absence d'étude comparative sur la décomposition des bois rend difficile le suivi de cette décomposition au fil du temps. En 20 ans, les bois ne subissent en moyenne que 41 % de dégradation. La charge à laquelle ils sont capables de résister s'est par contre réduite de 24% en dix ans, mais ce taux moyen de décomposition est fortement augmenté aux endroits ayant subi des cassures, où il avoisine les 70 %.

Puisqu'en dix ans, deux fractures supplémentaires se sont formées sur les troncs, il faut envisager que ces fractures deviennent source de décomposition, affaiblissant d'autant plus les bois au sol. Les bois affaiblis devraient alors moins résister à la pression de la neige, se briser d'avantage et le cycle pourrait ainsi s'accélérer au cours de la décennie à venir. Au vu de ces considérations, il est à envisager qu'en 2020, le facteur limitant l'effet protecteur du chablis ne soit plus la hauteur effective mais la résistance des bois.

Si, durant la première décennie après un ouragan, la protection paravalanche est assurée de manière efficace par les troncs jonchant le sol, le bilan protecteur est nettement plus mitigé à la fin de la deuxième décennie. En effet, les bois retiennent la neige, de manière fiable, jusqu'à une hauteur équivalant à un temps de retour de 3 ans (0.95 m). Le risque qu'une avalanche se produise et atteigne le bas du chablis semble donc élevé et peu acceptable dans le cas où ces coulées menaceraient directement des biens et des personnes.

Là où l'effet protecteur devient intéressant, c'est dans le cas d'événements extrêmes. La protection dispensée par le chablis devrait suffire à éviter une majorité de grosses avalanches menaçant, et les biens directement au pied du chablis, et les personnes situées à une distance plus importante de la forêt, touchées seulement par les événements de grande ampleur.

Les troncs sont donc capables de stabiliser une partie d'un important manteau neigeux. Cette protection contre les avalanches extrêmes semble donc assurée au minimum pour un temps de retour des masses de neige avoisinant dix ans, puis diminue avec l'intensité de l'événement pour être mauvaise à partir d'un temps de retour de 60 ans et plus. La protection contre les événements extrêmes est donc généralement assurée au cours des deux décennies suivant un ouragan.

La végétation, sur le chablis non traité, ne suffit pas à combler la perte de l'effet protecteur des troncs au sol. La lenteur du rajeunissement sur les grands chablis peut être invoquée en réponse à ce phénomène. La variante du chablis replanté semble dès lors intéressante, puisqu'elle permet d'accélérer artificiellement le rajeunissement de la forêt. Une étude plus approfondie de cette variante permettrait d'en évaluer les effets de manière plus détaillée. Evidemment, la difficulté demeure d'estimer l'évolution du chablis au cours de la prochaine décennie. De futures études semblent nécessaires afin de compléter les connaissances des chablis protecteurs, mais seule l'observation des faits à venir pourront en confirmer ou en infirmer les résultats.

La dégradation de l'esthétisme du paysage par des ouvrages paravalanches, l'important coût occasionné par le déblayage des bois et la construction des ouvrages, de même que la dangerosité des travaux de déblayement parlent en faveur de la variante de non-déblayement des chablis. La lenteur du rajeunissement naturel pourrait, quant à elle, justifier une plantation de jeunes arbres dans le cas où un chablis devait assumer un rôle de protection. Le choix de la variante est toujours difficile et ne doit intervenir qu'à la suite de la pesée sérieuse des différents intérêts. Il demeure bien souvent la résultante des deux éléments clés de nos sociétés actuelles : d'une part les responsabilités personnelles en cas de catastrophe, d'autre part les moyens financiers engageables à la réparation des dégâts dus aux ouragans.

6. Remerciements

Je remercie ici toutes les personnes qui ont contribué, par leur aide directe, par leurs idées ou par leur soutien à la réalisation de ce travail et plus particulièrement :

- Messieurs Dr. Peter Bebi, Werner Gerber et Prof. Dr. Harald Bugmann, les trois superviseurs de ce travail qui ont, par leurs connaissances spécifiques, leur expérience et leurs compétences orienté et maintenu ce travail dans la direction souhaitée.
- Mr. Patrick Thee, pour son aide lors des mesures de terrain et pour la supervision technique de la partie SIG et photogrammétrie.
- Mr. Werner Müller, garde-forestier de la région de Disentis, et son machiniste, pour la mise à disposition du matériel et du personnel nécessaire aux expérimentations de terrain.
- Mmes Marylise Putallaz et Catherine Abbet, Mr. Andrea Baumann, pour leur aide précieuse lors des mesures de terrain.
- Mr. François-Xavier Putallaz pour la relecture et la correction des textes.
- Mr. Rouven Sturny, pour son initiation à l'utilisation du résistographe.

7. Sources et littérature

- AMMAN, M. (2006): Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren, ETHZ, Zürich, Diss. ETHZ Nr 16638
- BRÄDLI, U.-B. (2010) : Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006. WSL, OFEV, Berne
- BROWN, P.M., SHEPPERD, W.D., MATA S.A., McCLAIN, D.L. (1998): Longevity of windthrown logs in a subalpine forest of central Colorado. *Can. J. For. Res.* 28: 932-936
- BROWN, S., MO, J., McPHERSON, J.K., BELL, D.T. (1996): Decomposition of woody debris in Western Australia forest. *Can. J. For. Res.* 26, 954-966.
- BUWAL, (1990), (Ergänzt 2000): Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. BUWAL, Bern, WSL, Birmensdorf
- CONZETTI, M. (2010): Les Alpes. Club Alpin Suisse, 11-2010
- DUELLI, P., OBRIST, M.K., WERMELINGER, B. (2002): Windthrow-induced changes in faunistic biodiversity in alpine spruce forests. *Forest Snow and Landscape Research*, 77, 1-2
- FRANKHAUSER, M. (2010): Lawinenschutzwirksamkeit auf Windwurfflächen. Bachelorarbeit, SHL Zollikofen und SLF Davos.
- FREHNER, M., WASSER, B., SCHWITTER, R. (2005): Gestion durable des forêts de protection. OFEV, Berne
- FREY, W., THEE, P. (2002): Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *For. Snow Landsc. Res.* 77, 1/2: 89–107
- HONOLD, A. ; OBERWINKLER, F. (1999): Sukzession saprophytischer und parasitischer Pilze im Fichtentotholz von Sturmflächen. Abschlussbericht PAÖ N 97 003 Mykologie, Botanisches Institut Spezielle Botanik. Universität Tübingen, Tübingen
- HYTTEBORN, H., PACKHAM, J.R. (1987): Decay rate of *Picea abies* logs and the storm gap theory: a re-examination of Sernander plot III, Fiby Urskog, Central Sweden. *Arboric. J.* 11, 299-311.
- IML, (2008): IML-RESI B-Serie, Gebrauchsanweisung. IML Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, Wiesloch
- MAGRETH, S. (2004): Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. *Schutzwald und Naturgefahren*. WSL, Forum für Wissen, pp. 21–26.
- MAGRETH, S. (2009): Vorlesung Schnee- und Lawinenverbauung, ETHZ, Zurich
- MASER, C., TRAPPE, J.M. (1984): The seen and unseen world of the fallen tree. *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep.* PNW-164.
- METEOSCHWEIZ, 2009. Normes climatiques de 1961 à 1990. (www.meteoschweiz.admin.ch)
- MOSER, B., SCHÜTZ, M., HINDENLANG, K.E. (2008): Resource selection by roe deer: Are windthrow gaps attractive feeding places? *Forest ecology and management*, 255, 1179-1185

- NAESSET, E. (1999): Decomposition rate constants of *Picea abies* logs in southeastern Norway. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 372-381.
- NETZER, V. (2010): Langfristige Lawinenschutzwirksamkeit auf Windwurfflächen: Entwicklung der Verjüngung. Masterarbeit, SLF, Davos
- NÖTZLI, K.P. (2002): Ursachen und Dynamik von Fäulen an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau. ETHZ, Zurich, DISS. ETHZ Nr. 14974
- OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung, OcCC (Organe consultative sur les changements climatiques), Bern, ISBN: 3-907630-23-8
- OFEV (2007): Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement. Aide à l'exécution: directive technique, OFEV
- OFEV (2008): Aide-mémoire en cas de dégâts de tempête. OFEV, Berne
- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- PLUESS, A.R., KNAUS, F. (2010): Course on disturbance ecology, FS 2010, Introduction. ETHZ, Zurich
- RAMMING, A., FAHSE, L., BEBI, P., BUGMANN, H. (2007): Wind disturbance in mountain forests: Simulating the impact of management strategies, seed supply, and ungulate browsing on forest succession. *Forest Ecology and Management* 242, 142–154
- RINN, F., SCHWEINGRUBER, F.-H., SCHÄR, E. (1996): RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung* 50, 4: 303–311.
- SCHLÜEPP, M., SCHIESSER, H. H., HUNTRIESER, H., SCHERRER, H.U., SCHMIEDKE, H. (1994): The Winterstorm "Vivian" of 27 February 1990: About the Meteorological Development, Wind Forces and Damage Situation in the Forests of Switzerland, *Theoretical and applied climatology*, 49, 183-200
- SCHÖNENBERGER, W., NOACK, A., THEE, P. (2004): Aus der «Vivian»-Forschung: Schützen Windwurfflächen vor Lawinen und Steinschlag? *Wald und Holz*, 10/2004
- SCHÖNENBERGER, W., NOACK, A., THEE, P. (2005): Effect of timber removal from windthrow slopes on the risk of snow avalanches and rockfall. *Forest Ecology and Management*, 213, 197-208
- SIPPOLA, A.-L., RENVALL, P. (1999): Wood-decomposing fungi and seed-tree cutting: A 40-year perspective. *Forest Ecology and Management* 115, 183-201
- WHITE, P.S., PICKETT, S.T.A. (1985): *The Ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, San Diego.
- WOHLGEMUTH, T., KULL, P., WUTHRICH, H. (2002): Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990., *Snow Landsc. Res.* 77
- WOHLGEMUTH, T. (2010): Course on Disturbance Ecology. Part on winter storms. ETHZ, Zürich
- WU, J., LOUCKS, O.L. (1995): From balance of nature to hierarchical path dynamics: A paradigm shift in ecology. *The quarterly review of biology* 70 (4): 439-466.