



Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « type de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et de submersions marines historiques, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative aux données dendrochronologiques fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relatives aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire a été piloté par Pierre Pouzet (ISEN Yncréa Ouest).

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Marc Andreevsky (EDF), Sabine Cavellec (Cerema), Aurélie Maspataud et Jessie Louisor (BRGM).

Les termes suivis d'un astérisque * sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

Résumé

Cette fiche présente une application de la dendrochronologie permettant d'analyser les hivers récents soumis à des vents puissants tempétueux. Les méthodes de prélèvement et d'analyse dendrochronologiques sont présentées, et les limites de cette méthode sont exposées.

Elle doit être couplée à une chronologie des hivers tempétueux réalisée au préalable, et à des données de réanalyse météorologique (force et direction du vent) pour pouvoir être effective. Ce couplage permet d'assurer la provenance tempétueuse d'un forçage dendrochronologique éolien récent (dernières décennies ou siècles selon l'âge des arbres) observé dans une zone boisée proche du littoral.



Caractéristiques de la donnée

Définition

La dendrochronologie* est une sous-discipline de la dendrologie (sciences des arbres et végétaux) qui cherche à détecter et à dater très précisément des événements passés ayant pu perturber la croissance des arbres. Ces événements sont repérables dans les cernes de croissance*, car à un cerne de croissance correspond une saison végétative* (Schweingruber, 1996 ; Stoffel et Bollschweiler, 2008 ; Stoffel et Corona, 2014 ; Stokes, 1996). Par l'analyse des forçages éoliens détectés sur des arbres localisés sur le littoral, la réaction d'un boisement face aux événements fortement venteux survenus au cours de la vie des arbres étudiés peut être appréhendée (Berthier, 2001 ; Lambert *et al.*, 2010 ; Lebourgeois et Mérian, 2012 ; Shroder, 1980). Lors d'un coup de vent* violent, l'arbre va induire un forçage externe. Durant ses saisons végétatives suivantes, il forcera alors en sens inverse pour tenter de retrouver sa verticalité. Ce forçage de résilience* est alors visible dans les cernes de croissance des végétaux qui seront disproportionnés par rapport aux périodes n'ayant pas été soumises à des forçages externes. L'analyse de la taille des cernes de croissance entre les rayons soumis au forçage (dit compressé) et celui opposé au forçage (dit détendu) permet donc d'extraire l'impact d'un événement venteux passé.

Par comptage des cernes, il est ensuite possible de dater précisément (à une résolution annuelle), la survenue de ces événements passés. Une chronologie d'hivers tempétueux est ainsi établie via le croisement d'analyses dendrochronologiques réalisées sur plusieurs arbres de la zone boisée étudiée. La [Figure 1](#) schématise la méthode de détection d'excentricité dendrochronologique d'un événement venteux extrême que nous mettons en lumière à travers ce travail.

Moyen(s) d'acquisition

A. La méthode de prélèvement dendrochronologique

Dans un premier temps, le choix des arbres à carotter est important. Pour étudier l'impact éolien sur ces végétaux, nous avons choisi d'étudier les arbres les plus exposés, donc ceux situés en marge ouest de la zone boisée face à la mer (le site d'étude est ici localisé à l'ouest de la France). Ensuite, nous avons sélectionné des arbres impactés avec une inclinaison nettement visible à l'œil nu. Enfin, ces arbres ne devaient pas avoir subi d'autres dérangements externes. Nous avons alors sélectionné des arbres isolés d'au moins quelques mètres d'un autre arbre, dont la croissance n'a pas pu être influencée par celle de son voisin. Ces arbres paraissent sains, sans maladie ou infection visible. L'analyse de cartographie ancienne nous permet de sélectionner au préalable des arbres ou groupes d'arbres, isolés, parmi les plus anciens de la zone boisée. L'échantillonnage s'effectuant à hauteur de poitrine, les premières années de pousse de l'arbre ne peuvent pas être prises en compte dans la chronologie.



DONNEES DENDROCHRONOLOGIQUES

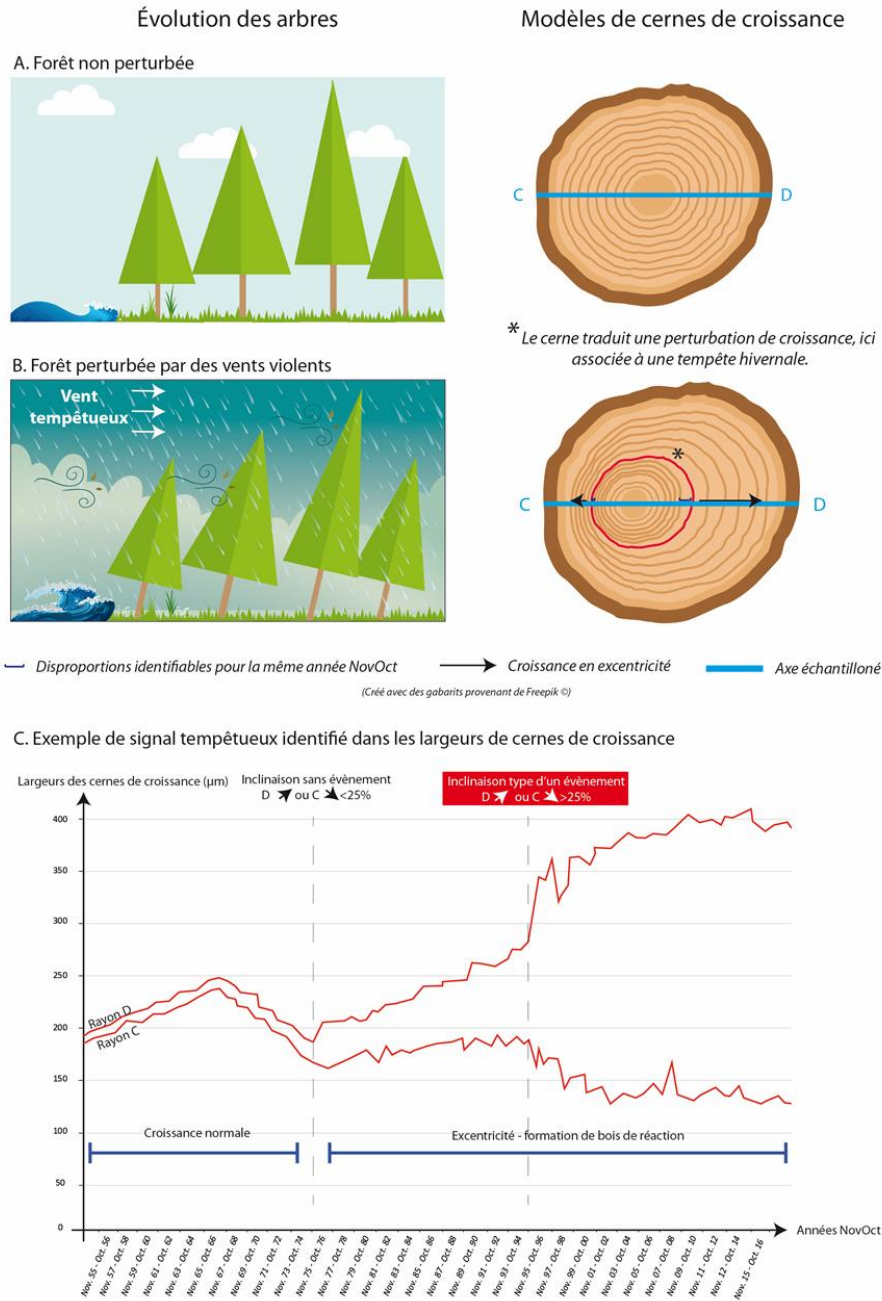


Figure 1 - Hypothèse d'observation dendrochronologique suite à un impact venteux extrême.

Nous avons tout d'abord échantillonné plusieurs arbres impactés par le vent. Sur chacun de ces arbres, un axe passant en son cœur a été prélevé : l'axe appelé « C-D » (Figure 2). Il enregistre les déformations de l'arbre, en partant de la zone compressée C vers celle détendue D. Pour effectuer ces prélèvements, nous utilisons un carottier rotatif Mattson © selon la méthode exposée par Grissino-Mayer (Grissino-Mayer, 2003). La carotte est ensuite stockée dans un tube en plastique droit au diamètre à peine supérieur à celui de la carotte. Ce tube est fermé à ses deux bouts par du ruban adhésif pour le transport. Le diamètre d'une carotte est d'environ un demi-centimètre.



Pour éviter les infections externes ou attaques d'insectes, les trous réalisés dans les troncs sont ensuite rebouchés par de la pâte à bois. Pour connaître la croissance normale des arbres de la zone boisée échantillonnée, et ainsi différencier les accidents de croissance sur cet espace, il est également possible d'étudier des arbres droits. Nous formons ainsi des références sur lesquelles s'appuyer lors de l'analyse des cernes de croissance (échantillons témoins).



Figure 2 – Présentation de l'axe dendrochronologique CD. L'axe AB est perpendiculaire à celui-ci.

B. La préparation des échantillons

Arrivés au laboratoire, les rubans adhésifs présents aux extrémités des tubes protecteurs sont retirés pour pouvoir laisser l'échantillon sécher pendant deux semaines. Nous les laissons dans leurs tubes pour ne pas que les carottes se courbent pendant le séchage. Les tubes sont ensuite ouverts et les carottes sèches sont collées sur un socle en bois prévu à cet effet. Nous respectons un sens précis de collage pour que la fibre de bois soit verticale selon les recommandations de Speer (Speer, 2012). Un label au crayon à papier identifie la carotte sur les socles. Les rondelles sont ponçées au laboratoire à l'aide d'une ponceuse à bois électrique BOSH © de type standard pour que les cernes soient bien visibles à la loupe binoculaire.

Une fois les carottes prêtes à être analysées, les axes étudiés sont repérés et tracés sur les rondelles. La carotte (ou l'axe C-D de la rondelle) est humidifiée et la partie superficielle du bois est coupée à l'aide d'un scalpel pour faciliter la lecture des cernes. Du talc est également inséré sur le chemin de mesure pour améliorer le contraste des couleurs entre la partie de bois précoce (claire) et tardif (foncée) des cernes.



Traitements nécessaires

A. Analyse des tailles des cernes de croissance

La plateforme d'analyse dendrochronologique Lintab Rinntech ©, qui est équipée d'une loupe binoculaire, a été utilisée au laboratoire Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG*) (Figure 3). Elle permet l'analyse longitudinale des cernes de croissance des échantillons prélevés. Pour mesurer la largeur des cernes de croissance, la plateforme est reliée au logiciel TsapWin ©. Le logiciel mesure le déplacement de l'échantillon entre chaque clic de souris effectué, correspondant à une fin de saison végétative. Cette limite marque la fin de la saison végétative précédente identifiée par le bois foncé du cerne (bois tardif, produit entre environ août et octobre) et le début de la nouvelle saison végétative produisant du bois plus clair (bois précoce, produit entre environ mars et juillet). Entre ces deux phases, il y a une période de dormance sans production de bois durant la période hivernale.



Figure 3 - Plateforme d'analyse dendrochronologique.

La largeur précise de chaque cerne est reportée dans le logiciel, qui retrace la croissance complète de l'échantillon à partir de l'année de prélèvement jusqu'au dernier cerne mesuré. Le logiciel fournit une largeur de cerne micrométrique correspondant à une année n , renvoyant à la saison végétative, estimée de mars à octobre.

La Figure 4 présente l'axe carotté C-D comparé à un autre axe non perturbé sur un même tronc, que nous appellerons axe « A-B » (étant perpendiculaire à C-D). L'axe C-D est affecté par le vent, car il est parallèle à la direction des vents violents. L'axe A-B n'est pas affecté, car il a été prélevé dans une direction transverse à ces vents. Cette comparaison nous permet de présenter les différences de largeur de cernes entre deux axes d'un même tronc, et de comprendre comment nous pouvons observer une perturbation par dendrochronologie. L'abscisse de ces graphiques présente les années de la chronologie et l'ordonnée correspond aux largeurs de cernes (en μm). Nous remarquons que l'axe de référence A-B présente deux rayons A et B réguliers et assez semblables. À l'inverse l'axe C-D montre de nombreuses différences. Le rayon C correspond à la partie compressée de l'arbre soumis à perturbation, et le rayon D détendu où les cernes sont plus larges. Cette observation est spécifique des conifères, les feuillus réagissent en sens inverse.

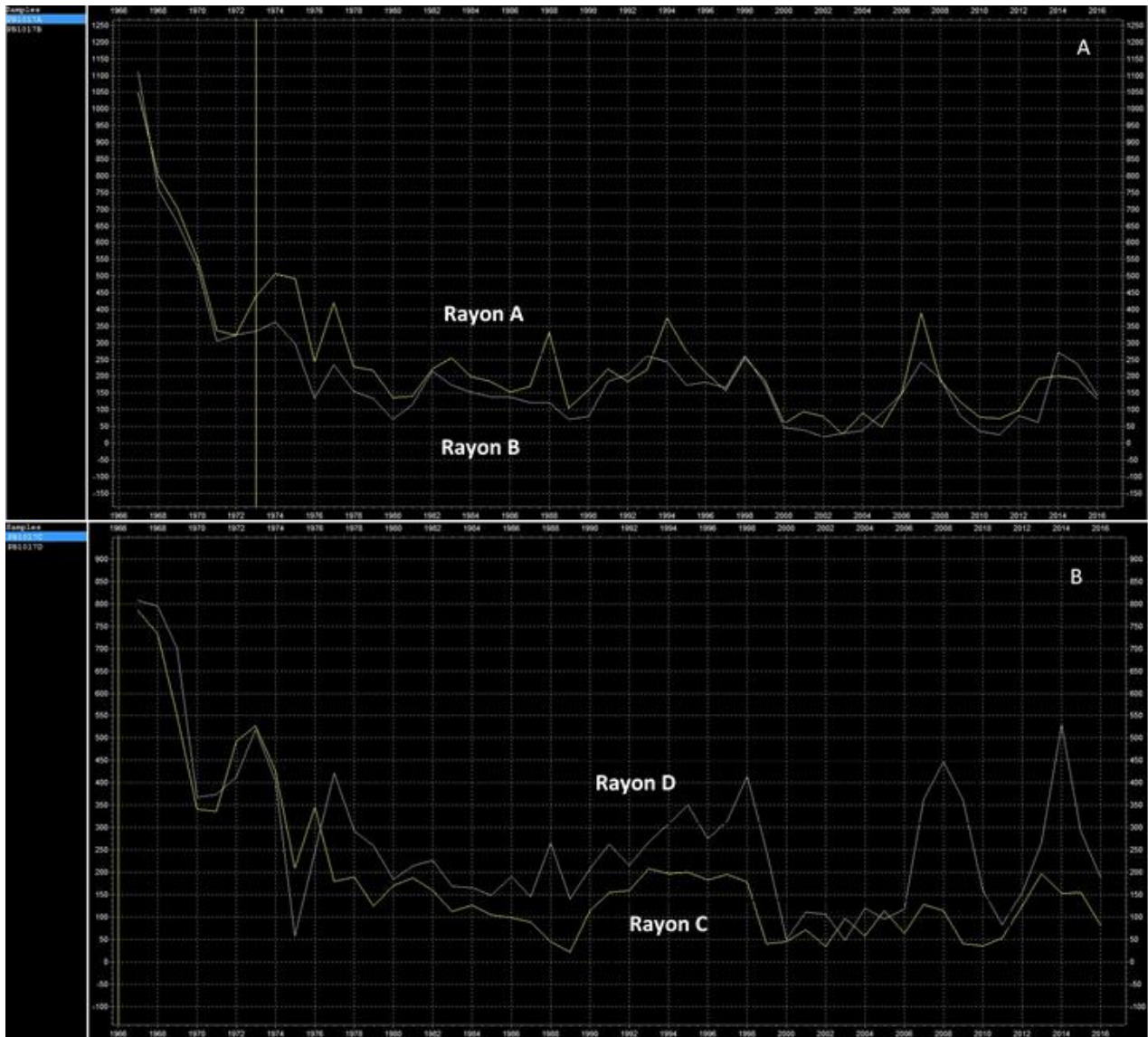


Figure 4 Exemples de courbes dendrochronologiques obtenues à partir du logiciel Tsapwin © pour l'échantillon numéro 10 : (A) Axe A-B non affecté par les vents violents (rayon A en jaune, B en bleu) ; (B) Axe C-D affecté par les vents violents (rayon C en jaune, D en bleu).

B. Calculs de l'indicateur de perturbation végétal

Pour détecter un marqueur de perturbation éolien, nous nous focalisons sur les axes C-D échantillonnés (Pouzet, 2018 ; Pouzet *et al.*, 2018). Nous cherchons à détecter les années avec disproportion entre les axes C et D. Cette disproportion démontre l'effort de l'arbre à reprendre sa position verticale après une période de dormance mécaniquement impactée. Le vent violent va agir sur l'équilibre de l'arbre, induisant une inclinaison de son tronc sous son action durant la (les) tempête(s)* hivernale(s), appelée anémomorphose*. Au cours de la période végétative suivante, l'arbre formera du bois de réaction*, avec du bois de compression* en C (rayon le plus étroit) et un excès de bois en D. Cela lui permet de rétablir son équilibre. Nous pouvons ensuite comparer les années affectées aux données historiques, et ainsi émettre l'hypothèse qu'un évènement éolien ait pu provoquer ce(s) dérangement(s).



Pour les pins maritimes, l'« année NovOct » est l'année étudiée dans l'analyse dendrochronologique. Elle a été estimée comme s'étendant du début du mois de novembre de l'année n-1 par rapport à l'année du cerne visible, à la fin du mois d'octobre de l'année n. Novembre marque le passage de fin de la saison végétative précédente vers le début de la saison de dormance*, avant la nouvelle saison végétative suivante démarrant vers le mois de mars. Comme les tempêtes les plus puissantes surviennent principalement durant l'hiver dans la zone d'étude, le cerne disproportionné par un évènement hivernal se formera au cours de la saison végétative suivante.

Pour un cerne présentant une perturbation sur la saison végétative n, l'évènement hivernal correspondant est celui de la saison de dormance précédant cette saison végétative n, donc l'hiver n-1 – n. Cela peut potentiellement correspondre aux mois de novembre et de décembre de l'année n-1, ou janvier et février de l'année n.

À titre d'exemple, nous présentons l'axe C-D d'un échantillon en [Figure 4](#). Nous remarquons trois gros décrochages dans la régularité des largeurs de cernes. Les deux courbes, correspondantes aux deux rayons C et D prennent des trajectoires opposées durant les années NovOct 1977, 2007 et 2014. Ces années intègrent donc les hivers 1976-1977, 2006-2007 et 2013-2014. Pour cet exemple précis, ces trois hivers ont subi une ou plusieurs tempêtes, ayant fortement impacté le littoral centre Atlantique. De très forts vents provenant majoritairement du sud-ouest ont ponctuellement frappé cette zone boisée. Des impacts marquants sur le littoral ont été recensés dans les données historiques, dont des mentions de forêts ravagées et d'arbres déracinés par la force du vent. L'hypothèse tempétueuse est plausible. La période suivant l'évènement, où le rayon C continue de produire des cernes plus fins que le rayon D, est dit de « bois de réaction ». Il se termine lorsque l'arbre retrouve une forme de résilience en retrouvant sa verticalité relative, et donc jusqu'à ce que les cernes soient plus réguliers.

Étape 1 : Détections de l'excentricité

Pour avoir une réelle validité scientifique, nous avons effectué une analyse globale des perturbations observées sur les arbres carottés. Nous avons croisé l'analyse des perturbations visuelles (observations des décrochages de la courbe) avec une analyse statistique.

Nous calculons les taux d'évolution annuels de largeur de cernes pour chaque cerne détecté dans tous les échantillons. La formule utilisée est celle du taux de variation standard :

$$TELC = (LCn - LCn-1) / LCn-1 * 100$$

Où

TELC est le Taux d'Évolution de la Largeur des Cernes entre les années NovOct n-1 et n, en pourcentage ;

LCn est la largeur du cerne de l'année NovOct n ;

LCn-1 est la Largeur du cerne de l'année NovOct n-1.



Étape 2 : Extraction des signaux d'excentricité majeure

Une perturbation est considérée dans un échantillon si :

- Soit les deux rayons C et D ont des évolutions de largeur de cerne (TELC) contraires, avec une diminution d'au moins 25% pour C et une augmentation d'au moins 25% pour D par rapport à l'année NovOct précédente ;
- Soit le rayon C a une diminution de largeur de cerne (TELC) d'au moins 25% tandis que le rayon D a une augmentation (pouvant être inférieure à 25%) TELC de largeur par rapport à l'année NovOct précédente ;
- Soit le rayon D a une augmentation de largeur de cerne (TELC) d'au moins 25% tandis que le rayon C à une diminution (pouvant être inférieure à 25%) TELC de largeur par rapport à l'année NovOct précédente.

Si une perturbation est enregistrée à deux ou plusieurs années NovOct successivement dans un même échantillon, nous conservons seulement la première année perturbée. Nous considérons que les perturbations suivantes seront dues à ce même évènement. Au moins une année stable (C n'évolue pas d'au moins -25 % et D n'évolue pas d'au moins +25 %) doit être observée entre deux perturbations. Pour que notre analyse statistique soit pertinente, nous conservons comme année de perturbation seulement les saisons végétatives où au moins deux arbres sur les 17 carottés marquent une perturbation.

Enfin, nous démarrons notre chronologie d'analyse à partir de l'année durant laquelle au moins 20% des arbres échantillonnés étaient vivants, celle-ci correspond à 1955 pour notre cas d'étude (5 sur les 25 échantillonnés). Notre analyse dendrochronologique s'établit alors sur une série temporelle allant de l'année NovOct 1955 à celle de 2016, année de l'échantillonnage.

En conclusion, une année NovOct perturbée est caractérisée comme étant :

- Une année NovOct où une perturbation est visible sur les cernes de croissance d'au moins deux arbres échantillonnés ;
- Avec TELC notable : augmentation d'au moins 25% sur le rayon D, ou diminution d'au moins 25% sur le rayon C, ou les deux ;
- Si ces perturbations ne suivent pas directement une année déjà perturbée dans les arbres où elles ont été observées ;
- Depuis qu'au moins cinq arbres échantillonnés sont vivants, correspondant à 20% du total d'arbre échantillonné.

Étape 3 : Détermination des années NovOct probablement tempétueuses

Pour chacune des années NovOct de la chronologie, un pourcentage d'arbres perturbés est calculé par rapport au nombre d'arbres vivants au cours de cette année NovOct. Ce pourcentage nous permet d'évaluer un taux d'arbres perturbés, selon la formule :

$$IPVn = (APn * 100) / AVn$$

Où

IPVn est l'Indice de Perturbation Végétale de l'année NovOct n (en pourcentage) ;

APn est le nombre d'Arbres Perturbés pendant l'année NovOct n ;

AVn est le nombre d'Arbres Vivants durant l'année NovOct n.



C. Comparaisons avec les chronologies historiques d'hivers tempétueux et avec les données de réanalyse météorologiques

Une fois extraites, ces saisons végétatives sont ensuite comparées aux dates de tempêtes reportées lors des hivers récents dans les archives sédimentaires* et historiques (Pouzet, 2018 ; Pouzet *et al.*, 2018). Cela nous permet de certifier l'origine tempétueuse de l'évènement ayant perturbé les arbres, et d'en estimer aussi son intensité. Pour affirmer que les disproportions identifiées sur les cernes de croissance proviennent bien de tempêtes, il est fortement conseillé de comparer l'indice IPVn avec I) une chronologie d'hivers tempétueux préétablie en amont, et II) des données venteuses (force et direction) de réanalyse* météorologique. Ces données nous permettent de comprendre précisément ce qui a pu influencer les différentes disproportions observées (vents maximums instantanés, vents moyens, persistance, direction, etc.) (voir *fiche « vent »*). Les tests pratiqués par le laboratoire LETG montrent des compatibilités moyennes d'environ 80 % entre disproportions de cernes de croissance et hivers tempétueux (Pouzet *et al.* 2018).

Incertitudes et limites

- ➔ La méthode permet seulement d'obtenir une chronologie d'hivers tempétueux produisant des vents puissants suivant une seule direction (celle du carottage). Pour appréhender un historique des hivers tempétueux complets, il sera alors nécessaire de multiplier les axes de prélèvement sur tous les points cardinaux possibles.
- ➔ La méthode est destructive pour les végétaux, si un prélèvement de rondelles de tronc est requis pour établir une chronologie de base, il est alors nécessaire de le faire sur des arbres déjà abattus afin de ne pas à avoir à abattre des arbres pour devoir étudier leur ténacité face aux tempêtes. La méthode est donc opportuniste si l'expert choisit des rondelles en plus des carottes, car elle bénéficie soit de zones d'abattage d'arbres, doit d'arbres naturellement abattus par le vent.
- ➔ Il y a un manque d'information et de bibliographie quant au temps de résilience des arbres suite à ce type d'évènements.
- ➔ La méthode présente une chronologie à l'échelle annuelle, on peut donc seulement estimer des hivers tempétueux, et non des dates de tempêtes précises.
- ➔ Les liens sont assez nets avec les vents violents persistants, mais la corrélation n'est pas linéaire (à hauteur de 80 %), le croisement avec des données historiques et des données de réanalyse météorologique (force et direction du vent) est donc vivement conseillé pour comprendre toutes les réactions végétales observées.
- ➔ Les arbres étudiés doivent tous parvenir du même environnement, et celui-ci doit être parfaitement connu
- ➔ Pour éviter les impacts des maladies ou parasites, il est nécessaire de retenir des arbres sains.
- ➔ Pour les études dendrochronologiques plus anciennes, la connaissance du paléoenvironnement* est plus complexe à établir en amont.



Organisme(s) clés / en jeu

ISEN Yncréa Ouest, Laboratoire L@bisen

UMR CNRS 6554 Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG)

Autres usages de la donnée

- ➔ Reconstructions dendroclimatiques
- ➔ Datations archéologiques
- ➔ Études biologiques
- ➔ Études paléoenvironnementales
- ➔ Étude des aléas anthropiques (pollutions)
- ➔ Etude des aléas naturels (avalanches, chutes de pierres, éruptions volcaniques, laves torrentielles...)

Références clés

Berthier, Stéphane. 2001. « Effets des sollicitations aérodynamiques sur la croissance et le développement du pin maritime (*pinus pinaster* Ait.) : influence sur la morphogenèse aérienne et racinaire, et sur la formation du bois de coeur ». Thèse de doctorat en Sciences physiques et de l'ingénieur, Université de Bordeaux 1.

Grissino-Mayer, Henri D. 2003. « A Manual and Tutorial for the Proper Use of an Increment Borer ». *Tree-Ring Research* 59(2):63-79.

Lambert, Georges-Noël, Vincent Bernard, Jean-Luc Dupouey, Pascale Fraiture, Patrick Gassmann, Olivier Girardclos, François Lebourgeois, Y. Ledigol, Christophe Perrault, et W. Tegel. 2010. « Dendrochronologie et Dendroclimatologie Du Chêne En France. Questions Posées Par Le Transfert de Données de Bois Historiques Vers La Dendroclimatologie. » P. 197-208 in *Panorama de la dendrochronologie en France*.

Lebourgeois, François, et Pierre Mérian. 2012. *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. Nancy: AgroParisTech.

Pouzet, Pierre. 2018. « Étude des paléoévénements extrêmes le long de la côte atlantique française : approches sédimentologiques, dendrochronologiques et historiques ». Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Nantes.

Pouzet, Pierre, Marc Robin, Armelle Decaulne, Bastien Gruchet, et Mohamed Maanan. 2018. « Sedimentological and dendrochronological indicators of coastal storm risk in western France ». *Ecological Indicators* 90:401-15. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.03.022.

Schweingruber, Fritz Hans. 1996. *Tree rings and environment dendroecology*. Berne ;Stuttgart ;Vienna: Haupt.



Shroder, J. 1980. « Dendrogeomorphology: Review and New Techniques of Tree-Ring Dating ». *Progress in*



Physical Geography: Earth and Environment 4(2):161-88. doi: 10.1177/030913338000400202.

Speer, James H. 2012. *Fundamentals of Tree Ring Research*. 2 edition. Tucson, Ariz: University of Arizona Press.

Stoffel, M., et M. Bollschweiler. 2008. « Tree-Ring Analysis in Natural Hazards Research - an Overview ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8(2):187-202. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>.

Stoffel, Markus, et Christophe Corona. 2014. « Dendroecological Dating of Geomorphic Disturbance in Trees ». *Tree-Ring Research* 70(1):3-20. doi: 10.3959/1536-1098-70.1.3.

Stokes, Marvin A. 1996. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Tucson, Ariz: University of Arizona Press.

Fiches en lien

Fiche "Vent" (pour les réanalyses météorologiques)

