

# Dendrochronologie et dynamique forestière au pays des kiwis

Pascal Vittoz

Université de Lausanne, Institut d'écologie - botanique systématique et géobotanique, Bâtiment de biologie, 1015 Lausanne.

Tél: 021 / 692 42 70, Fax: 021 / 692 42 65, e-mail: pascal.vittoz@ie-bsg.unil.ch

**La Nouvelle-Zélande est un paradis pour les écologues intéressés à la vie des forêts vierges: elles couvrent d'immenses surfaces, et sont périodiquement affectées par différents types de perturbations, comme les tempêtes, les tremblements de terre, les insectes ravageurs ou les sécheresses. Une étude en dendrochronologie permet de mieux comprendre l'équilibre naturel entre deux espèces de *Nothofagus*.**

## Nouvelle-Zélande, Kahurangi National Park

Voilà quelques heures que le sentier vous mène à travers cette forêt, et selon votre carte, vous pourriez y marcher encore quatre ou cinq jours sans en sortir. Tout au plus aurez-vous quelques dégagements du bord d'un lac, en traversant une des nombreuses rivières ou en atteignant un des sommets qui borde la vallée. La forêt est dense, vous environnant de troncs de toutes dimensions. Les arbres d'un mètre de diamètre ne sont pas rares, et parfois un géant de deux mètres borde le chemin. Jeunes arbres et buissons forment un sous-bois dense, alors que la strate herbacée est faible et peu diversifiée: des jeunes ligneux, des fougères et quelques rares herbes, comme ces *Uncinia* (Cyperacées), dont les fruits s'accrochent à vos mollets et chaussettes, vous utilisant pour leur dispersion comme substitut des moas<sup>1</sup> depuis longtemps disparus. Mais le sous-bois est particulièrement marquant par l'abondance des arbres morts: des géants couchés (fig. 2), avec un tronc parfois plus haut qu'un homme. La question est incontournable: pourquoi une telle quantité de bois mort au sol, pouvant atteindre un tiers de la biomasse des forêts (Stewart & Burrows, 1994) ? Il y a deux raisons: la première est que vous vous trouvez dans une forêt primaire, où les arbres jamais exploités meurent des aléas du climat, sous les mandibules des ravageurs ou, s'ils ont de la chance, de vieillesse vers 600 ans; la deuxième est qu'une des espèces dominantes, *Nothofagus fusca*, ou "red beech" pour les anglophones (en référence à son bois orangé), possède un bois très difficilement décomposable. Peu de champignons du bois sont capables de dégrader sa lignine, et un gros tronc peut rester un ou deux siècles au sol avant de disparaître (Stewart &

---

<sup>1</sup> Oiseaux aptères pouvant atteindre 2.5 m qui peuplaient l'ensemble de la Nouvelle-Zélande avant leur extermination par les Maoris au 17<sup>e</sup> siècle.

Burrows, 1994). L'autre espèce dominante de ces forêts est *Nothofagus menziesii*, ou "silver beech" (à cause de son écorce argentée).



Figure 1. La Nouvelle-Zélande, un pays riche en forêts primaires.

## Parlons un peu des *Nothofagus*

*Nothofagus* (famille des Fagacées) est un genre important des forêts tempérées de l'hémisphère Sud, tout particulièrement en Nouvelle-Zélande, Tasmanie, Argentine et Chili (Veblen et al., 1996). Le nom, qui signifie "hêtre bâtard", fait référence à la ressemblance de ses fruits avec ceux de nos hêtres (fig. 3). Mais les *Nothofagus* sont aussi les vicariants des hêtres et chênes de l'hémisphère Nord, c'est-à-dire qu'ils occupent les mêmes niches écologiques dans deux parties différentes du monde. Le genre est présent sur tous les continents de l'hémisphère Sud (même sous forme fossile en Antarctique), ce qui montre son origine ancienne, datant du Gondwana, ce grand continent austral de l'ère Secondaire.



Figure 2. La lente décomposition du bois de *Nothofagus fusca* laisse de nombreux troncs au sol.

La Nouvelle-Zélande possède quatre espèces de *Nothofagus*, réparties sur les deux grandes îles en fonction des conditions écologiques et des aléas historiques lors de la recolonisation post-glaciaire. Les deux espèces qui nous intéressent, *N. fusca* et *N. menziesii*, occupent des situations similaires, et forment des peuplements mixtes au nord de l'Île du Sud. On peut donc se demander pourquoi une des espèces ne finit pas par éliminer l'autre. Comment maintiennent-elles un équilibre entre elles ? C'est cette question qui m'a amené à partir dans ce magnifique pays. Plus précisément, c'est le rôle des tremblements de terre dans cet équilibre qui m'intéressait. En effet, si la Nouvelle-Zélande est un pays riche en forêts vierges (environ 20 % du pays), c'est aussi une région géologiquement instable, à la limite entre deux plaques continentales, pouvant subir d'importants tremblements de terre, souvent responsables d'éboulements ou de glissements de terrain (fig. 4).



Figure 3. Feuilles et fruits de *Nothofagus menziesii*.



Figure 4. En 1994, le tremblement de terre d'Arthurs Pass (magnitude 6.7) a ravagé plusieurs vallées en provoquant d'immenses glissements de terrains. La forêt n'a survécu que par îlots, en général endommagés par des éboulements.

## La dendrochronologie, ou l'art de remonter le temps

Il y a deux moyens d'étudier la vie d'une forêt, le renouvellement de ses arbres, ce que nous appelons la dynamique forestière: s'asseoir dans la forêt et y rester suffisamment longtemps pour voir ce qui s'y passe, mais ça peut prendre deux ou trois siècles, ou prélever des carottes dans le tronc des arbres et compter et mesurer les cernes, témoins des conditions de croissance de l'arbre. N'ayant qu'une année à disposition, j'ai choisi cette deuxième méthode.

Six placettes ont été retenues le long de la rivière Matiri, dans le Kahurangi National Park (nord de l'Île du Sud). Le choix de cette vallée était lié à la proximité

des épices de deux tremblements de terre majeurs, mais un magnifique lac rendait les séjours fort agréables (fig. 5). Cette région a été secouée en 1929 par le tremblement de terre de Murchison, de magnitude 7.7, dont l'épicentre était situé à 20 km (Fyfe, 1929; Pearce & O'Loughlin, 1985), et en 1968 par le tremblement de terre d'Inangahua, de magnitude 7.1, avec son épice à 35 km (Adams et al., 1968). Cinquante *Nothofagus* choisis au hasard ont été échantillonnés dans chaque placette, avec deux carottes prises à 1.3 m du sol, si possible jusqu'au centre. C'était la partie sympathique, le plaisir du terrain dans de magnifiques forêts.



Figure 5. Lake Matiri, un joyau dans un écrin de verdure.

La suite, beaucoup moins amusante, a consisté à poncer les quelque 550 carottes pour mettre en évidence les cernes, à compter ceux-ci, afin d'estimer l'âge des arbres (entre 20 et plus de 400 ans), et à mesurer leur largeur (environ 40000 cernes, de 0.02 à 15 mm de large). Sous un climat à saisons marquées, les arbres produisent en général un cerne par année.

Le décompte des cernes donne l'année où l'arbre a atteint 1.3 m (il faudrait y ajouter entre 10 et 25 ans pour avoir l'âge réel). En temps normal, la forêt se régénère de manière continue, et quelques arbres dépassent cette taille chaque année. Cependant, lorsqu'un événement tue un ou plusieurs arbres dans un peuplement, la régénération est alors massive, donnant des années tout à fait repérables sur la répartition des âges du peuplement.

La taille des cernes dépend de la santé de l'arbre et des conditions dans lesquelles il se trouve. Le cerne est plutôt étroit lorsque l'arbre a soif ou froid, s'il est parasité, blessé, situé à l'ombre de ses congénères ou âgé. Inversement, il est plutôt grand quand tout va bien et qu'il est jeune. Les années très mauvaises sont caractérisées par l'absence de croissance de certains arbres. Il manque donc un cerne au décompte final, ce qui peut être source d'erreurs lorsqu'on s'intéresse à des événements ponctuels, tels que les tremblements de terre. L'interdatation permet d'y remédier. Elle consiste à comparer les carottes les unes avec les autres afin de chercher des cernes particuliers présents dans la majorité des carottes. Cela peut être un cerne très étroit au milieu de grands, ou une succession de grands et petits cernes facilement

reconnaissable (fig. 6). Une fois ces repères datés avec certitude sur une carotte, il est possible de les utiliser pour corriger les autres carottes. L'opération est fastidieuse mais indispensable pour une datation précise de chaque cerne. Cependant, ce n'est pas tant la taille individuelle des cernes qui est intéressante, mais les changements brusques de croissance.

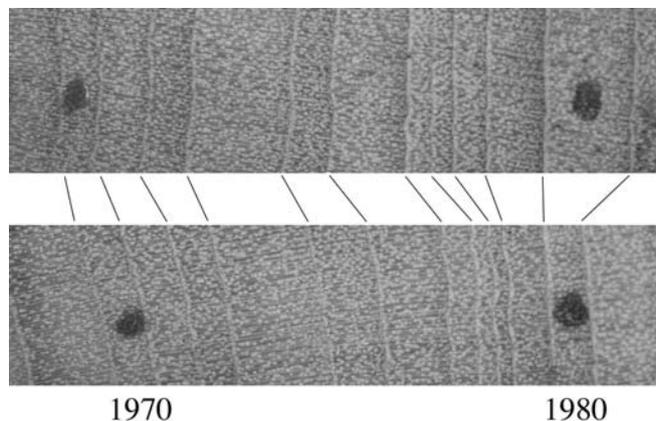


Figure 6. Exemple d'interdatation entre deux carottes de *Nothofagus menziesii* pour la période 1970 à 1980. Chaque cerne commence par une ligne de pores (larges cellules conductrices) visible comme une ligne blanche sur l'image. La présence commune d'un grand cerne en 1973 et de trois cernes étroits entre 1976 et 1978 aide à vérifier que les carottes sont correctement datées.

## Le malheur des uns fait le bonheur des autres

Après quelques mois d'hiver, les yeux jonglant entre la loupe binoculaire et l'ordinateur, c'est enfin la révélation. Lorsque tous les résultats sont mis ensemble, les quelque 290 arbres dévoilent alors leur passé et le chercheur commence à soupirer de soulagement.

Pour ne pas lasser le lecteur, je me limiterai à présenter les résultats de quatre des six stations (pour les autres, voir Vittoz et al., 2001). Ce sont:

- un cône alluvial traversé par un affluent de la rivière Matiri, avec uniquement des arbres de faible diamètre (fig. 7);
- une terrasse alluviale, avec de vieux arbres mais aussi une tache dense de jeunes *N. fusca*;
- une pente raide, avec une forêt marquée par quelques grosses trouées récentes;
- un éboulement de gros blocs, vraisemblablement très ancien à juger du diamètre important des arbres (fig. 8).

En regardant l'âge des arbres (Fig. 9), on remarque tout de suite une répartition irrégulière. Le cône alluvial se démarque des autres peuplements pour n'avoir que des arbres nés après 1937, avec nettement plus de *N. fusca* que de *N. menziesii*. Cette forêt s'est vraisemblablement installée à la suite d'un événement catastrophique. Pour le reste, les deux espèces ne montrent pas une régénération régulière, comme pourrait le montrer une forêt à l'abri de toutes perturbations, mais beaucoup de jeunes *N. fusca* nés au 20<sup>e</sup> siècle dans toutes les stations, alors que *N. menziesii* a eu plusieurs vagues de rajeunissement durant les trois derniers siècles.

L'évolution de la croissance des cernes permet d'aller un peu plus loin dans la compréhension de l'histoire de ces peuplements (fig. 10). À trois reprises pendant le 20<sup>e</sup> siècle beaucoup d'arbres montrent une nette accélération de leur croissance, indiquant une augmentation de certaines ressources, probablement une augmentation de la lumière suite à la mort de congénères. Le premier événement a suivi de peu le début du 20<sup>e</sup> siècle, et correspond vraisemblablement à une tempête qui a frappé l'ouest de l'île en 1905. La deuxième augmentation de croissance commence en 1929, et suit donc le plus important tremblement de terre du siècle. Il y a cependant de grandes différences entre espèces et entre stations. La terrasse alluviale montre la plus forte réaction et *N. menziesii* est le plus sensible. Mais il est surprenant de constater que les arbres ne meurent pas en masse en 1929, après le tremblement de terre, mais les uns après les autres pendant plus de dix ans, avec un maximum après 5-8 ans. Finalement, la troisième vague suit une série de sécheresses printanières entre 1974 et 1978. Ici *N. fusca* réagit fortement et rapidement, alors que *N. menziesii* montre un peu de retard, mais avec un effet sensible sur une dizaine d'années.

Le tremblement de terre de 1968 n'a laissé aucun signe visible dans ces forêts. Moins fort, plus éloigné, il n'a vraisemblablement provoqué que des dégâts mineurs.



Figure 7. Jeune peuplement dominé par *Nothofagus fusca* sur le cône alluvial.



Figure 8. Vieux peuplement mixte (*Nothofagus fusca* et *N. menziesii*) sur l'éboulement de gros blocs.

## Mieux vaut croître sur le roc que sur le sable d'une rivière

Comment interpréter cette diversité de réactions ? Tout d'abord une forêt primaire de Nouvelle-Zélande est tout sauf un endroit paisible où les arbres se font de vieux os. Il est vrai que sur l'éboulement de gros blocs certains approchent ou même dépassent 600 ans. Mais ce sont les rares survivants de nombreuses perturbations, dont pas moins de trois majeures ont marqué le 20<sup>e</sup> siècle: une tempête, un tremblement de terre et une sécheresse. Elles ont tué tellement d'arbres qu'il nous manque de données anciennes pour savoir ce qu'il s'est passé dans les siècles précédents. La régénération des *N. menziesii*, avec plusieurs vagues visibles (fig. 10), témoigne néanmoins qu'ils ont aussi été marqués par d'importantes perturbations.

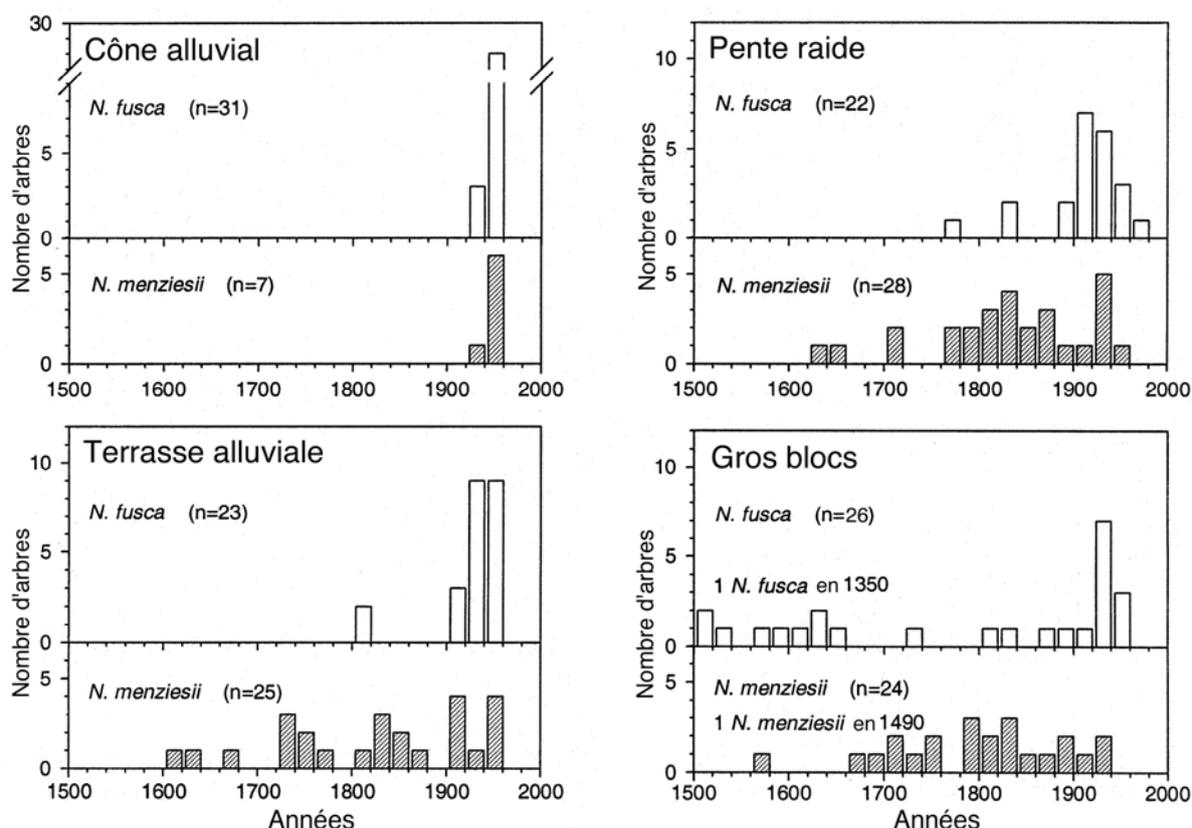


Figure 9. Nombre d'arbres installés dans les peuplements pour chaque période de vingt ans.

Un autre élément qui ressort est que chaque événement majeur affecte différemment chaque peuplement. Le cône alluvial a sans aucun doute été le plus touché, car la forêt actuelle ne comporte que des arbres plus jeunes que 1929. Ce tremblement de terre a fortement marqué la région, avec plusieurs centaines de glissements de terrain (Pearce & O'Loughlin, 1985). La rivière qui traverse le cône a vraisemblablement été obturée par un de ces glissements, pour finalement emporter les sédiments et les déposer en arrivant dans la vallée de la Matiri, détruisant totalement la forêt présente. La recolonisation a été rapide, et septante ans plus tard les arbres mesurent 20 à 25 m. Cependant la canopée est entièrement constituée de *N. fusca*, alors que quelques *N. menziesii*, à croissance plus lente, attendent en sous-bois.

Tout laisse penser que la terrasse alluviale a été passablement malmenée également pendant le tremblement de terre. Il n'y a presque plus de vieux *N. fusca*, et un jeune peuplement dense de cette espèce occupe une bonne partie de la surface. L'étude du sol montre qu'environ 20 cm d'alluvions sableux ont récemment couvert le sol dans ce secteur. Cela paraît peu, mais c'était suffisant pour indisposer les arbres qui en sont morts. Quelques troncs pourris, dressés ou couchés, viennent le confirmer. En revanche, *N. menziesii* a bien survécu à l'événement dans le reste de la station, et en a profité pour accélérer sensiblement sa croissance (fig. 10) et boucher une partie des trouées.

La pente raide se distingue par une régénération de *N. fusca* qui commence déjà au début du siècle. Plus exposée au vent, elle a fortement souffert de la tempête de 1905, qui a laissé quelques trouées suffisantes pour provoquer un rajeunissement. Le tremblement de terre s'est moins fait sentir que dans les peuplements évoqués précédemment, mais il a aussi entraîné la régénération des deux essences et une meilleure croissance de *N. menziesii*. L'étude de la position sociale dans la forêt (canopée ou sous-bois) de *N. fusca* montre que 1929 a surtout permis aux arbres installés après la tempête de croître et boucher les nouvelles trouées, alors que la régénération qui a suivi 1929 attend toujours en sous-bois.

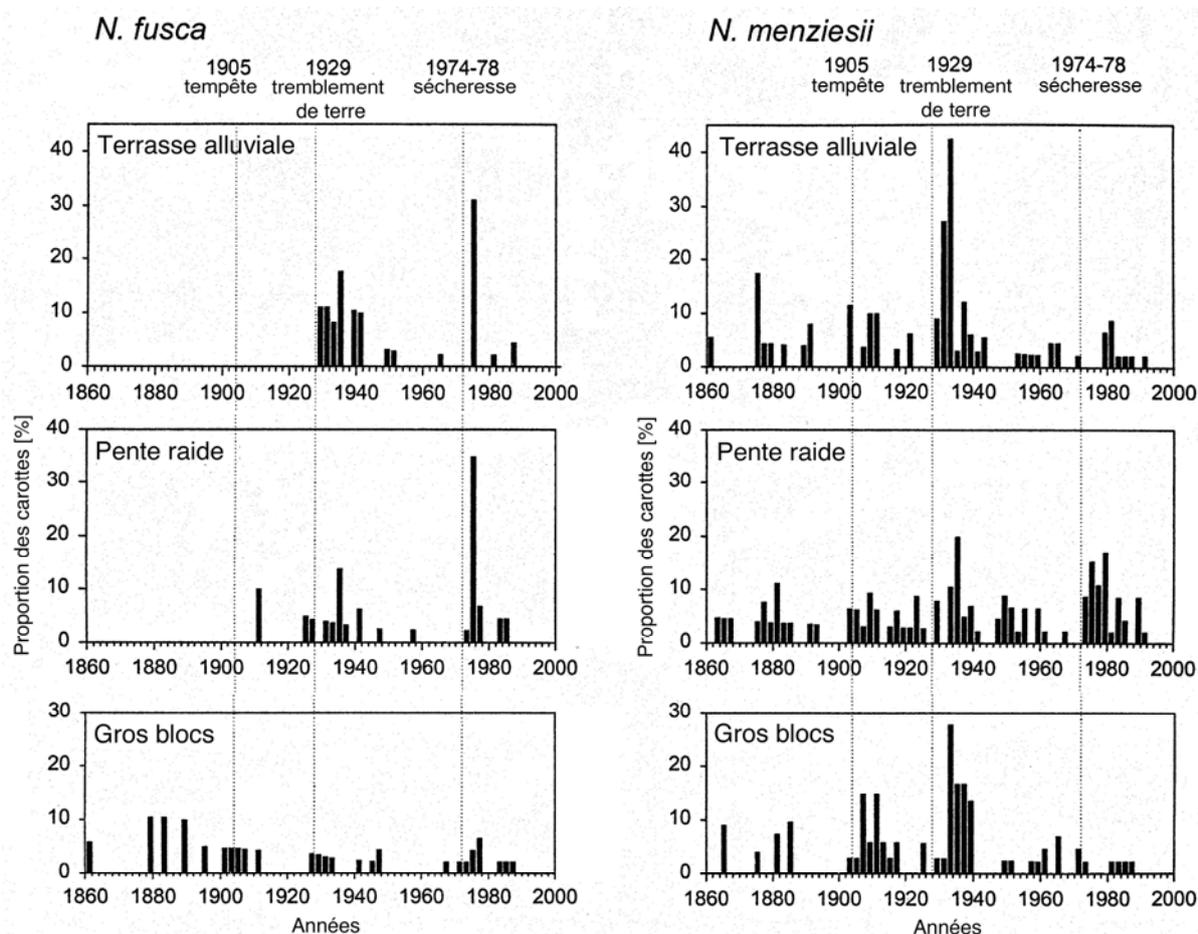


Figure 10. Proportion des carottes (en pour-cent), par périodes de deux ans, montrant une accélération de la croissance.

Finalement, la forêt sur gros blocs est celle qui a le moins souffert durant ce siècle. Malgré la position apparemment instable de bien des arbres, juchés au sommet

d'énormes rochers, les dégâts semblent avoir été faibles, tant durant la tempête que lors du tremblement de terre. Celui-ci a bien été suivi d'une régénération, mais septante ans après, ces jeunes arbres attendent encore leur tour dans les strates basses de la forêt. Les trouées formées, vraisemblablement petites, ont été rapidement fermées par des arbres déjà installés, soit par croissance depuis les strates inférieures, soit par élargissement des couronnes. Dans ce cas, c'est *N. menziesii* qui a le plus profité de l'occasion.

## Les plus petits ne sont pas les plus innocents

Un élément reste cependant surprenant, tant après la tempête qu'après le tremblement de terre. Pourquoi les arbres mettent-ils parfois plus de 10 ans avant de réagir, alors qu'un arbre mis à la lumière accélère sa croissance immédiatement ? L'explication la plus plausible est que la majorité des arbres n'ont pas seulement souffert des dégâts directs (éboulements, branches cassées ou racines cisailées), mais d'une épidémie qui a suivi. Ce phénomène est connu par les anglophones sous le nom de "dieback" (aucune traduction française à ma connaissance). Les arbres âgés, tout comme les humains d'ailleurs, ont plus de peine à se remettre de blessures que les jeunes individus. Cela fait la joie des insectes qui profitent des défenses affaiblies pour pulluler, et achever les malades, souvent avec l'aide de champignons qu'ils transportent. Les bostryches ont fait la même chose en Suisse cet été après l'ouragan Lothar, et leurs dégâts risquent de se poursuivre encore quelques années.

En Nouvelle-Zélande, ce sont d'autres coléoptères, du genre *Platypus*, qui jouent ce rôle. Comme il leur faut deux générations de 2-3 ans pour atteindre une population importante, leurs dégâts sont maximums environ six ans après la catastrophe initiale, puis diminuent par manque de matériel à coloniser. Mais il est important de constater que *N. fusca* est beaucoup plus attaqué par ces *Platypus* que *N. menziesii* (Milligan, 1972).

Ceci montre que tempêtes et tremblements de terre sont capables d'endommager sérieusement des forêts, mais ce sont surtout de petits insectes qui jouent le plus grand rôle dans des peuplements vieillissant naturellement. Des phénomènes semblables se retrouvent dans le monde entier, comme par exemple dans les forêts de *Metrosideros polymorpha* à Hawaii ou dans des pinèdes aux Etats-Unis (Müller-Dombois et al., 1983).

## Sécheresse en pays humide

La Nouvelle-Zélande a la réputation d'être un pays pluvieux, tout particulièrement la côte ouest de l'Ile du Sud qui reçoit entre 2 et 6 m de pluie par année (Walter & Lieth, 1960). Dans la région du Lake Matiri, les précipitations annuelles sont d'environ 2400 mm, avec l'été légèrement plus sec que le reste de l'année (N.Z. Meteor. Serv., 1978, 1984). Mais cela n'empêche pas des périodes de sécheresses, comme durant les printemps 1974 à 1978. Répétées au cours de plusieurs printemps consécutifs, elles ont affaibli les arbres, comme l'a montré une autre étude effectuée à quelque 70 km (Hosking & Kershaw, 1985). À nouveau, c'est

un insecte (*Inglisia fagi*, un homoptère), qui est responsable de la mort des arbres, et à nouveau *N. fusca* s'est montré le plus sensible. Il n'y a donc aucune justice en forêt !

Cependant, la figure 10 montre que c'est *N. fusca* qui semble avoir le mieux profité de cette sécheresse autour du Lake Matiri. En fait, une étude détaillée des positions et réactions respectives des arbres entre 1974 et 1978 montre que les arbres de la canopée des deux espèces ont souffert et ralenti leur croissance. Plusieurs n'ont pas survécu, et on voit encore maintenant dans la pente raide quelques grandes ouvertures, avec l'ancien propriétaire de la place réduit à un énorme tronc mort encore debout ou couché sur le sol. L'accélération de la croissance des voisins, entre 1975 et 1980, vient confirmer que le décès date bien de cette période. Les arbres qui ont survécu ont retrouvé une croissance normale après 1980. Ce sont cependant les jeunes arbres, avant tout *N. fusca*, installés après le tremblement de terre, qui ont tiré le meilleur parti de cette sécheresse. Situés dans la fraîcheur du sous-bois, plus jeunes et donc plus résistants, ils ont profité dès 1975 de l'affaiblissement de leurs aînés (perte du feuillage) pour se développer. Certains n'ont pas eu le temps d'atteindre la canopée avant de se faire recouvrir, et attendent patiemment un prochain événement. Mais beaucoup sont encore en pleine croissance et plus rien ne devrait les empêcher de devenir les prochains dominants.

## Perturbations et dynamique forestière

Mais revenons à la question de départ: comment deux espèces écologiquement très proches peuvent former des peuplements mixtes sans qu'une finisse par éliminer l'autre ? Simplement en tirant parti de petites différences. Dans cet exemple néo-zélandais, *N. fusca* croît un peu plus vite que *N. menziesii* dans de bonnes conditions de lumière. Par contre, *N. menziesii* est moins sensible aux pathogènes et supporte mieux l'ombre. Diverses perturbations peuvent frapper une forêt naturelle, et leur impact varie en fonction de la morphologie du terrain. Il se crée une diversité de situations et de niches profitant alternativement à une espèce ou à l'autre. Sur le cône alluvial comme sur la terrasse alluviale, les gros dégâts dus aux alluvions ont été propices à *N. fusca* qui a rapidement surcimité *N. menziesii*, pourtant arrivé en même temps. Inversement sur les gros blocs, *N. fusca* a plus souffert de l'épidémie alors que plusieurs *N. menziesii*, dont certains végétaient depuis plusieurs siècles en sous-bois, ont pu se développer et atteindre la canopée. Plusieurs jeunes *N. fusca* ont aussi profité de l'occasion pour s'installer, mais ils ont peu de chance de survivre si aucune ouverture n'apparaît au-dessus de leur tête dans le siècle qui suit leur naissance.

Les deux espèces se partagent ainsi l'espace et le temps en fonction des événements qui interviennent. S'ils sont rares mais très destructeurs, c'est *N. fusca* qui envahit, alors que s'ils sont plus fréquents mais avec un impact léger, c'est *N. menziesii* qui prend lentement l'avantage (Ogden, 1988; Stewart & Rose, 1990). En forêt, une perturbation telle qu'un tremblement de terre en Nouvelle-Zélande, Lothar en Suisse, ou un incendie aux Etats-Unis n'est pas seulement une perte financière pour le propriétaire. C'est souvent un facteur d'enrichissement et de diversité pour la forêt.

## Remerciements

Je remercie le Fonds national suisse de la recherche scientifique et la Fondation du 450<sup>e</sup> anniversaire de l'Université de Lausanne pour le financement de ce travail, G. H. Stewart et R. P. Duncan pour leur accueil à Lincoln University et leurs conseils, et C. Berry et A. Wells pour leur aide sur le terrain.

## Bibliographie

- Adams, R. D., G. A. Eiby, M. A. Lowry, G. J. Lensen, R. P. Suggate & W. R. Stephenson (1968). *Preliminary reports on the Inangahua Earthquake, New Zealand, May 1968*. DSIR Bulletin 193, Wellington.
- Fyfe, H. E. (1929). Movement on White Creek Fault, New Zealand, during the Murchison earthquake of 17th June, 1929. *N.Z. J. Sci. Technol.*, 11, p. 192-197.
- Hosking, G. P. & D. J. Kershaw (1985). Red beech death in the Maruia Valley, South Island, New Zealand. *N.Z. J. Bot.*, 23, p. 201-211.
- N.Z. Meteor. Serv. (1978). *Isohyet map of South Island, New Zealand, showing mean annual rainfall for the years 1941 to 1970*. New Zealand Meteorological Service Misc. Publications, Wellington.
- N.Z. Meteor. Serv. (1984). *Rainfall normals for New Zealand, 1951 to 1980*. New Zealand Meteorological Service Misc. Publications, 185, Wellington.
- Milligan, R. H. (1972). A review of beech forest pathology. *N.Z. J. For.*, 17, p. 201-211.
- Müller-Dombois, D., J. Canfield, R. A. Holt & G. P. Buelow (1983). Tree-group death in North American and Hawaiian forests: a pathological problem or a new problem for vegetation ecology. *Phytocoenologia*, 11, p. 117-137.
- Ogden, J. (1988). Forest dynamics and stand-level dieback in New Zealand's *Nothofagus* forests. *GeoJournal*, 17, p. 225-230.
- Pearce, A. J. & C. L. O'Loughlin (1985). Landsliding during a M 7.7 earthquake: influence of geology and topography. *Geology*, 13, p. 855-858.
- Stewart, G. H. & L. E. Burrows (1994). Coarse woody debris in old-growth temperate beech (*Nothofagus*) forests of New Zealand. *Can. J. For. Res.*, 24, p. 1989-1996.
- Stewart, G. H. & A. B. Rose (1990). The significance of life history strategies in the developmental history of mixed beech (*Nothofagus*) forests, New Zealand. *Vegetatio*, 87, p. 101-114.
- Veblen, T. T., R. S. Hill & J. Read (1996). *The ecology and biogeography of Nothofagus forests*. Yale University, New Haven, 403 p.
- Vittoz, P., G. H. Stewart & R. P. Duncan (2001). Earthquake impacts in old-growth *Nothofagus* forests, New Zealand. *J. Veg. Sci.*, 12, p. 417-426.
- Walter, H. & H. Lieth (1960). *Klimadiagramm-Weltatlas*. Fischer, Jena.