

Evaluation du potentiel de la dendrochronologie
sur les Araucariacées
pour l'étude des paléoclimats de Nouvelle Calédonie



*Vincent Lieubeau 2005
INA P-G
IRD de Nouméa*

Résumé

La dendrochronologie est toujours restée en retrait dans la zone tropicale de par l'absence de saisonnalité qui entraîne chez la plupart des espèces l'absence de cernes. Les Araucariacées étudiées présentent des cernes bien visibles et annuels (démonstré pour les *Agathis lanceolata*). Ces arbres présentent sur sol ultramafique des croissances très lentes et sont donc susceptibles d'atteindre des âges de plusieurs centaines d'années pour des diamètres limités. Ces critères en font une famille privilégiée pour étudier les paléoclimats. Cependant, de nombreuses anomalies de croissance, dédoublements et fusions, compliquent l'analyse des cernes.

Pour étudier la croissance de ces arbres et palier à ces difficultés du signal, nous avons développé au cours de ce stage une méthode semi-automatique de mesure de la croissance en deux dimensions du tronc.

Quatre échantillons d'Araucariacées de différentes espèces et poussant dans des milieux différents ont été analysés. Il ressort que les corrélations entre le climat et les largeurs de cerne sont insuffisantes pour établir un modèle prédictif. Nous avons cependant montré que les pluviométries de juin et de juillet de l'année de croissance avaient un effet statistiquement significatif (20% de variance expliquée) sur la largeur des cernes. Les profils de croissance annuelle lissés par fenêtre de vingt ans, font apparaître sur deux échantillons d'*Agathis Lanceolata*, des périodes de forte croissance communes dont la dernière pourrait être reliée à la construction du barrage de Yaté qui aurait induit une remontée des nappes et une meilleure alimentation hydrique des deux arbres.

On a pu enfin montrer une corrélation importante ($> 90\%$) entre le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré et les précipitations annuelles calculées entre Juin (n-1) et Juillet (n) de l'année de la mise en place du cerne. Il résulte des perspectives importantes dans le développement de chronologies hautes résolutions des pluviométries annuelles sur les derniers siècles par l'utilisation de mesure du $\delta^{18}\text{O}$ cellulosique.

Remerciements

Je tiens à remercier personnellement l'IRD de Nouméa pour m'avoir accueilli et plus particulièrement Pierre Genthon, pour l'encadrement remarquable de mon stage et pour les concepts qu'il m'a aidé à assimiler, ainsi que Guy Cabioch pour l'accueil au sein de l'équipe de recherche Paléotropique. Je remercie aussi Robert Nasi pour son étude et la collecte des échantillons, qui ont constitué la base de mon stage.

Je remercie enfin, mes collègues de bureau, Gregory Lasnes et Benoît Flamand pour leurs conseils et critiques constructives qui m'ont permis d'avancer au cours de ce stage.

Introduction

Prévoir le climat est devenu de nos jours l'un des défis majeurs de la science. A l'échelle globale, le phénomène climatique El Niño prend sa source dans les Tropiques et influence le climat planétaire. Les paléoclimats de Nouvelle-Calédonie ont été jusqu'à présent appréhendés grâce à des enregistreurs océaniques que sont les mesures géochimiques réalisées dans les coraux ou les coquilles de mollusque. Les enregistreurs terrestres tels que les arbres sont susceptibles de fournir une information climatique complémentaire. La compréhension des paléoclimats calédoniens répond donc à plusieurs objectifs : un premier, une meilleure connaissance du climat local et une meilleure gestion des risques associés (cyclones, glissements de terrain) ; un second plus global, un enrichissement des connaissances sur les climats tropicaux et sur leur implication dans les phénomènes climatiques globaux pour une amélioration des modèles de prévision climatique.

Plus modestement, ce stage s'inscrit dans cette problématique globale comme un travail préliminaire de dendrochronologie en Nouvelle-Calédonie, afin d'évaluer le potentiel de l'étude de la croissance et de la géochimie d'échantillons de la famille des Araucariacées pour l'étude des paléoclimats.

Sur le plan personnel, ce stage à l'IRD se déroule dans le cadre d'une césure dans mon cursus d'ingénieur. Ce stage répond à un objectif personnel de formation autour de différentes compétences : la gestion d'un projet de recherche complet, une meilleure maîtrise de la démarche expérimentale, le perfectionnement de mes compétences en programmation et en statistique et enfin, l'acquisition de connaissances en climatologie et en dendrochronologie.

Table des matières

Résumé	1
Remerciements	2
Introduction	3
Table des matières	4
I. Bilan et enjeux de la dendrochronologie à l'échelle globale de la zone tropicale et à l'échelle locale de la Nouvelle-Calédonie	5
1. La variabilité climatique dans le Pacifique tropical et en Nouvelle-Calédonie	5
a. La Nouvelle-Calédonie, localisation et climat	5
b. Le phénomène El Niño	6
2. La dendrochronologie : principes et enjeux	8
a. Structure et mise en place du bois des gymnospermes	8
b. Principe de la dendrochronologie	9
c. La dendrochronologie parmi les autres méthodes utilisées en paléoclimatologie	10
3. Les difficultés posées par la dendrochronologie appliquée aux arbres tropicaux	11
4. L'apport de la géochimie	12
5. Synthèse	13
II. Matériel et méthodes	14
1. Description des échantillons	14
a. Description des deux échantillons d' <i>Agathis lanceolata</i> et de leur environnement de croissance	15
b. Description de l'échantillon d' <i>Agathis ovata</i> et de son environnement de croissance	18
c. Description de l'échantillon d' <i>Araucaria columnaris</i> et de son environnement de croissance	20
2. Méthode d'acquisition et d'analyse des profils de croissance	20
a. Préparation et numérisation des échantillons	20
a.1. Préparation des échantillons	20
a.2. Numérisation des coupes	21
b. Calcul des profils de croissance	21
b.1. Acquisition du profil de croissance de l' <i>Araucaria columnaris</i>	21
b.2. Acquisition des profils de croissance des <i>Agathis lanceolata</i> 12 et 13	25
b.3. Acquisition du profil de croissance de l' <i>Agathis ovata</i>	32
c. Analyse des profils	32
c.1. Analyse des variations globales par moyenne mobile	32
c.2. Analyse statistique	32
c.3. Analyse spectrale	35
3. Analyses isotopiques du $\delta^{18}\text{O}$	35
III. Résultats et discussion	36
1. Résultats des analyses de croissance	36
a. Analyse de la croissance de l' <i>Araucaria columnaris</i>	36
b. Analyse de la croissance des deux <i>Agathis lanceolata</i>	38
b.1. Analyse des corrélations entre la largeur des cernes et le climat	38
b.2. Analyse spectrale de l' <i>Agathis lanceolata</i> 12	41
b.3. Intérêt de la méthode d'acquisition	41
b.4. Comparaison des deux échantillons	42
c. Analyse de la croissance de l' <i>Agathis ovata</i>	45
2. Résultat des analyses géochimiques	48
3. Synthèse et limites de l'étude	48
Conclusion	50
Bibliographie	51
Annexe 1 : Code Matlab du programme de détection des cernes utilisé pour l'acquisition du profil de largeur des cernes de l' <i>Araucaria columnaris</i> .	53
Annexe 2 : Code Matlab du programme de détection des cernes par axes	57
Annexe 3 : Code de la procédure de régression multiple SAS	61

I. Bilan et enjeux de la dendrochronologie à l'échelle globale de la zone tropicale et à l'échelle locale de la Nouvelle-Calédonie

1. La variabilité climatique dans le Pacifique tropical et en Nouvelle-Calédonie

a. La Nouvelle-Calédonie, localisation et climat

L'archipel de Nouvelle-Calédonie est situé entre 20° et 23°S et entre 164° et 167° E, à 1500 km à l'Est de l'Australie et à 1800 km au Nord de la Nouvelle-Zélande, dans la zone tropicale.

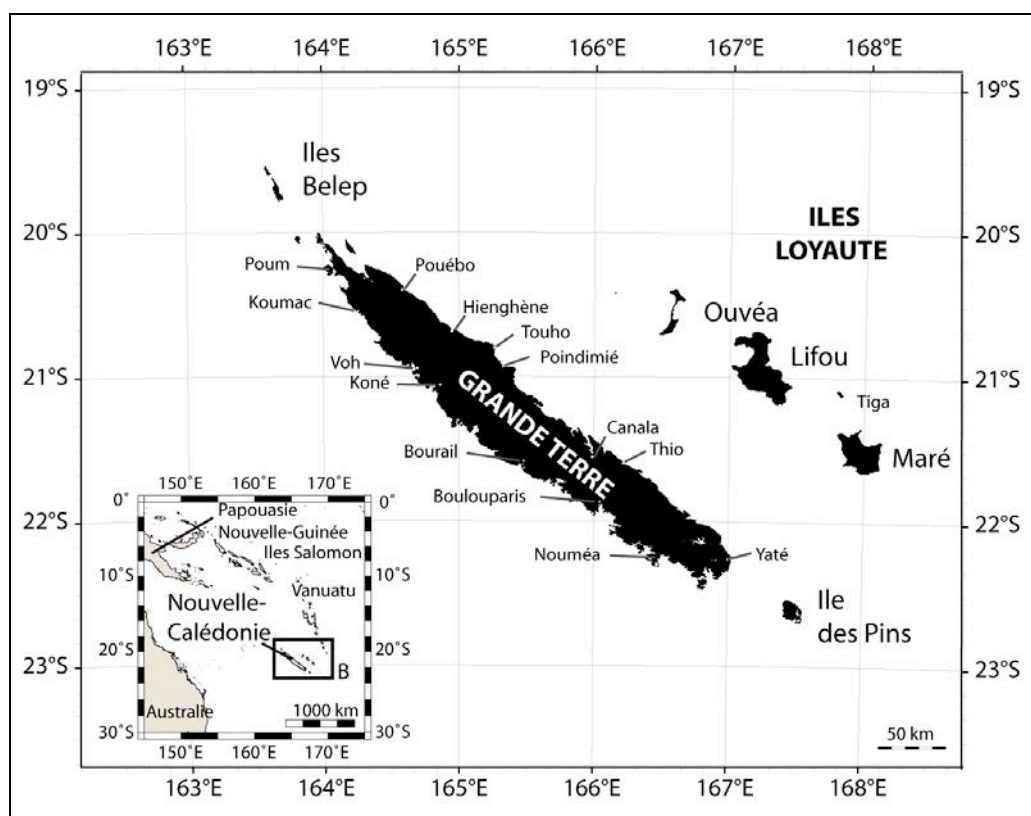


Figure 1 : Localisation de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique Sud-Ouest et des îles et récifs composant l'archipel néo-calédonien

Le climat calédonien se caractérise par des températures douces toute l'année fluctuant entre 19°C en moyenne pendant la saison froide, juillet août, jusqu'à 26°C en moyenne pour la saison la plus chaude en janvier/février. L'année se décline en quatre saisons (Météo France, 1995):

- de décembre à mars : c'est la saison chaude, dite saison des cyclones, on observe dans la zone comprise entre le Sud de l'équateur et l'Est de l'Australie, la formation d'une dizaine (en moyenne) de perturbations tropicales. Elles provoquent des pluies torrentielles et des vents qui augmentent avec l'importance du phénomène.
- avril et mai : c'est une saison de transition. La pluviosité diminue et les températures décroissent sensiblement.

- de juin à août : c'est la saison fraîche, les fronts froids de perturbations d'origine polaire traversent la mer de Tasman et atteignent parfois le territoire. Leur passage s'accompagne de précipitations souvent abondantes, surtout sur le Sud de la Grande Terre et d'une irruption de vent d'Ouest ("coups d'Ouest") soufflant quelque fois en tempête. La température de l'air passe par son minimum annuel entre la mi-juillet et la mi-août.
- de septembre à novembre : c'est une saison de transition. La ceinture anticyclonique subtropicale, qui atteint alors son importance maximale, protège nos régions des perturbations d'origine polaire. L'alizé souffle en quasi permanence, c'est la période la plus sèche de l'année.

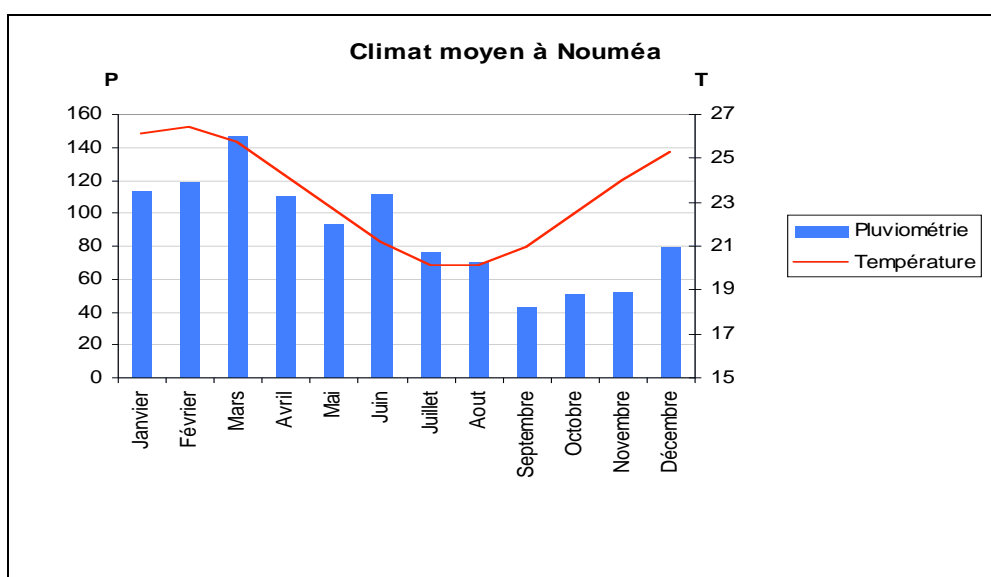


Figure 2 : Température et Pluviométrie moyennes mensuelles à Nouméa (d'après Météo France)

L'un des objectifs de la dendrochronologie consiste à réaliser dans la mesure du possible, une chronologie du climat en Nouvelle-Calédonie sur les derniers siècles pour mieux connaître la variabilité du climat calédonien dans le passé, et ainsi mieux appréhender le climat actuel ou futur. En effet, les conditions climatiques locales ont un impact direct sur notre mode de vie et sur l'économie : les pluies torrentielles peuvent engendrer des glissements de terrains et les sécheresses représentent un risque pour l'agriculture. Une meilleure connaissance du climat est une condition requise pour gérer de tels risques.

b. Le phénomène El Niño

A l'échelle interannuelle, le phénomène climatique ENSO, (El Niño Southern Oscillation) est le premier facteur à l'origine des variations climatiques planétaires. Ce phénomène prend sa source dans la zone intertropicale, il se manifeste tous les 2 à 8 ans et induit périodiquement en Nouvelle-Calédonie et dans tout le Pacifique Ouest, un climat très

sec pendant une durée moyenne de 18 mois. Cet incident climatique n'est que partiellement compris et dépend de nombreux facteurs liés à l'océan et à l'atmosphère.

Le SOI, (Southern Oscillation Index) mesure la différence de pression entre l'île de Tahiti en Polynésie française (haute pression) et Darwin en Australie (basse pression). Cet index est utilisé comme indicateur des périodes El Niño et est largement utilisé dans les modèles de prévision. Cette différence de pression entre le Pacifique Est et le Pacifique Ouest, est à l'origine d'une cellule de convection zonale (Est-Ouest) des masses d'air appelée circulation de Walker. Les alizés soufflant de l'Est vers l'Ouest au niveau de l'équateur entraînent les eaux superficielles chaudes vers l'Ouest. Ce courant est à l'origine d'un Upwelling (remontée d'eau froide profonde) dans l'Est du Pacifique. A ce gradient de température de l'eau est associé un gradient de température de l'atmosphère.

En période normale, à l'Ouest de la zone tropicale Pacifique, l'air chaud et humide en contact avec les eaux de la « Warm Pool » s'élève. A l'Est du Pacifique, le long de l'Amérique du Sud, l'air refroidi et appauvri en humidité, redescend créant un mouvement de convection important renforçant les alizés venant du Sud-Est. L'ascension de l'air dans le Pacifique Ouest crée des conditions de basse pression qui induisent une pluviométrie relativement abondante dans la région Ouest en particulier sur la Nouvelle-Calédonie.

Lors des événements El Niño, la différence de pression entre l'Est et l'Ouest diminue (SOI négatif), ralentissant les mouvements de convection et les alizés. Les courants marins Est-Ouest dont le vent est le premier moteur sont ralentis et s'inversent : les eaux superficielles de la Warm Pool située à l'Ouest s'épanchent alors vers l'Est. Ces

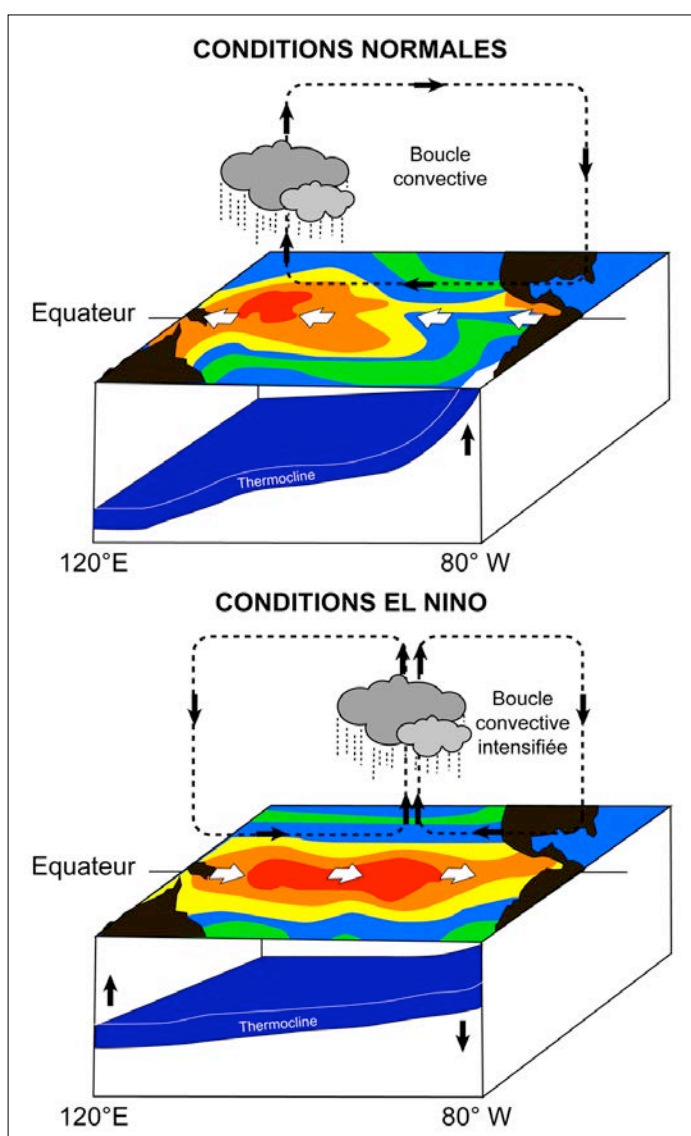


Figure 2 : Schéma du bassin Pacifique en conditions normales et en conditions El Niño. Les couleurs chaudes désignent les températures importantes, les froides, les moindres températures (modifié d'après Boulanger 2001)

mouvements océaniques ont une conséquence directe sur l'atmosphère, la zone de convection qui caractérise le Pacifique Ouest en conditions normales, se déplace vers l'Est sur plusieurs milliers de kilomètres et entraîne une forte baisse des précipitations dans la partie occidentale du Pacifique.

A l'inverse, en période dite la Niña (SOI supérieur à zéro), les mouvements de convection sont accentués par une différence de Pression Est Ouest plus importante renforçant les précipitations et les vents dans le Pacifique Ouest (Corrège, 2002).

Malgré ces éléments d'explication, on manque encore d'une compréhension globale du mécanisme, et, une meilleure connaissance des cycles El Niño passés est nécessaire pour établir des modèles de prédiction plus valides. Ces données paléoclimatiques peuvent être approchées par différentes méthodes parmi lesquelles l'étude des cernes des arbres qui nous offre une fenêtre sur plusieurs centaines d'années dans le passé.

2. La dendrochronologie : principes et enjeux

La paléoclimatologie est l'étude des climats passés. Le cadre de la dendrochronologie se limite à l'échelle historique au moins en ce qui concerne l'étude d'échantillons d'arbres morts très récemment comme ceux étudiés au cours de ce stage. La dendrochronologie consiste à mettre en relation les structures de croissance des arbres avec une échelle de temps et des paramètres environnementaux.

a. Structure et mise en place du bois des gymnospermes

Le bois est un tissu végétal très différencié que l'on trouve chez les angiospermes et gymnospermes ligneuses. Chez les gymnospermes, étudiées dans ce stage, le bois est homoxylé, c'est-à-dire constitué d'un seul type de cellule assurant à la fois le rôle de conduction de la sève et le soutien. Les fibres sont fusiformes, elles sont mises en place par division cellulaire puis différenciation à partir des cellules embryonnaires du cambium, tissu méristématique situé en périphérie de la tige. La particularité des cellules constitutives du bois est leur paroi très épaisse constituée de cellulose et de lignine, un polymère très rigide.

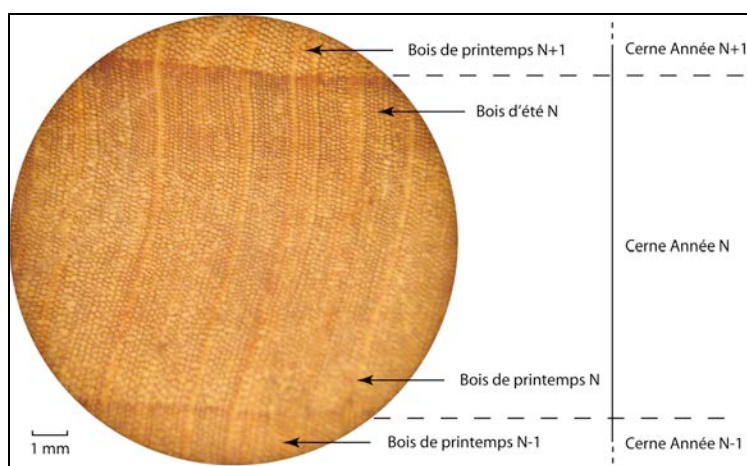


Figure 3 : Structure d'un cerne d'*Agathis lanceolata*, observé à la loupe binoculaire

Dans les cas simples, en régions tempérées par exemple, où les saisons sont très marquées, la croissance des végétaux ligneux fait apparaître sur les coupes transversales de troncs, des structures annuelles de croissance appelées cernes. La mise en place de cernes annuels est liée au fonctionnement saisonnier du cambium. Dans chaque cerne, l'activité du cambium aboutit à la mise en place de fibres de gros diamètres en début de période de croissance, donnant à l'échelle macroscopique un bois clair, le bois de printemps. Plus on avance dans la saison végétative, plus les fibres mises en place ont un diamètre faible et des parois épaisses très lignifiées, c'est le bois d'été. Lors de l'arrêt de fonctionnement du cambium, lié à l'entrée en dormance, les fibres mises en places sont petites et très lignifiées, donnant un bois très dense et coloré donnant à l'œil nu la limite extérieure du cerne (Schweingruber, 1996).

b. Principe de la dendrochronologie

La dendrochronologie est un très vieux concept, on trouve des traces de cette méthode dans l'histoire grecque et dans les travaux de Léonard de Vinci (1452-1519) qui nota une relation entre la taille des cernes d'un arbre et les précipitations. Le sujet a aussi été étudié par Carl Linné au XVIII^{ème} siècle qui retrouva en Suède sur un arbre des cernes de croissance très étroits et les relia à des hivers très rigoureux sur les 300 dernières années. Au début du XX^{ème} siècle, Douglas aux Etats-Unis posa les bases de la dendrochronologie, en mettant en relation la croissance des arbres avec les précipitations en Arizona ; en couplant de nombreux échantillons vivants et des vestiges archéologiques, il effectua une chronologie des précipitations en Arizona jusqu'à l'an 700. Les méthodes furent reprises et développées en Europe dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle par Theodor, Robert Hartig et Bruno Hubert. Aujourd'hui, la dendrochronologie a pris un essor considérable dans la communauté scientifique et de nombreuses chronologies du climat ont pu être établies dans différentes régions du globe, principalement en climat tempéré (Kalela-Brundin, 1999).

La méthode repose sur le principe selon lequel la croissance des arbres est reliée à des paramètres de l'environnement, au premier plan, les paramètres climatiques qui sont dans la majorité des cas les facteurs limitants. Ainsi, on doit pouvoir mesurer les croissances annuelles de l'arbre, pratiquement, les largeurs de cernes, et les corrélérer fortement avec les paramètres climatiques. Une fois un modèle reliant les variables établi, on peut l'utiliser pour retracer le climat passé en ayant simplement connaissance des largeurs de cerne.

Le traitement de multiples échantillons permet d'éliminer les variables de l'environnement local tels que des attaques parasites ou la position de l'arbre dans la canopée et d'extraire, de plusieurs échantillon, la composante de la croissance dépendant du climat. Au préalable, les échantillons doivent être « cross datés », c'est-à-dire que les séries de données extraites de la croissance de chaque échantillon doivent être recalées temporellement. Pour cela, des tests statistiques sont utilisés.

Aujourd'hui la méthode s'est étendue à d'autres paramètres mesurables dans les cernes d'arbres, tels que la densité maximum du bois d'été ou des mesures isotopiques réalisées dans le bois de chaque cerne.

c. La dendrochronologie parmi les autres méthodes utilisées en paléoclimatologie

La dendrochronologie se situe au milieu d'un faisceau de méthodes permettant d'étudier les paléoclimats : l'étude des glaces, l'étude des sédiments lacustres, des spéléothèmes ou des études isotopiques sur les coraux. La dendrochronologie présente l'intérêt supplémentaire par rapport aux autres méthodes d'être applicable sur toute la surface (continentale) du globe étant donné que les arbres sont présents partout.

En Nouvelle-Calédonie, de nombreux travaux de paléoclimatologie ont déjà été menés. Ainsi, Quinn et al. ont établi en 1998 une chronologie depuis 1657 de la température de surface de l'océan (SST) en utilisant le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans les coraux. Corrège et al. en 2001 ont établi une autre chronologie des SST, entre 1700 et 1750 et de 1900 à nos jours, en utilisant un deuxième proxy, la mesure du rapport Strontium/Calcium dans les coraux. Enfin, les travaux sur les sédiments lacustres de Stevenson et al. en 2001 et de Wirmann et al. en 2005 ont permis une reconstitution des paléoenvironnements du quaternaire récent à partir d'analyses de pollen contenu dans les sédiments, et de datations au carbone 14.

En Nouvelle-Calédonie et dans toute la zone tropicale, la dendrochronologie est restée en retrait par rapport aux autres méthodes, du fait de certaines difficultés posées par les arbres tropicaux. Jusqu'à présent, aucune étude de dendrochronologie n'a été réalisée en Nouvelle-Calédonie.

3. Les difficultés posées par la dendrochronologie appliquée aux arbres tropicaux

La dendrochronologie en région tropicale est restée pendant très longtemps en retrait car l'on croyait que la plupart des arbres tropicaux ne créaient pas de cernes de croissance ou alors de périodicité irrégulière, étant données les faibles variations saisonnières du climat tropical. L'absence de saisonnalité ne permet pas, en effet, d'entrée en dormance, pas d'arrêt de croissance et donc pas de cernes annuels. Cette absence de saisonnalité se manifeste par des fluctuations de température journalière qui dépassent la gamme des variations annuelles et par une absence de réelle saison froide dans les Tropiques (Détienne, 1989). L'absence de cernes définis est largement observable dans les arbres tropicaux ; parmi les échantillons collectés avant le stage, le chêne gomme, le bois de fer et le gaiac sont des exemples d'arbres montrant des structures de croissance très mal définies et de ce fait inutilisables par les méthodes classiques de paléoclimatologie. Malgré ces limites, des résultats prometteurs ont déjà été obtenus sur le Tek en Inde (D'Arrigo & Jacoby, 1989), où il a été montré que la taille des cernes était liée de manière significative à la pluviométrie de la saison sèche.

De plus, dans certains cas, lorsque l'environnement est stressant pour l'arbre, des cycles de croissance peuvent apparaître (Gordon & Jacoby 1989), c'est le cas, en particulier, sur les sols ultramafiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie : ce sont des sols sur socle de péridotite, très peu fertiles avec une faible capacité de rétention de l'eau et possédant une litière très mince voire inexistante ; sur un tel sol, la saison sèche serait susceptible de bloquer périodiquement la croissance. L'intérêt supplémentaire de ces sols est qu'ils provoquent une croissance très lente des arbres : pour un même diamètre, les échantillons récoltés sont beaucoup plus vieux que d'autres individus de la même espèce prélevés dans un autre environnement.

De ce point de vue, les Araucariacées, semblent être une famille intéressante pour la dendrochronologie ; en effet, on trouve des populations importantes d'Araucariacées sur les sols ultramafiques de Nouvelle-Calédonie, ces arbres présentent des structures de cerne bien visibles, et enfin arbres sont susceptibles d'atteindre des âges importants. Certains échantillons collectés en Nouvelle-Calédonie d'*Agathis ovata*, *Agathis lanceolata* présentent des structures de cernes bien visibles mais assez irrégulières. Ces troncs présentent des anomalies de croissance, en particulier des fusions, des dédoublements ou des interruptions de cernes difficiles à interpréter, de plus, le caractère annuel de ces structures reste à démontrer. Enfin, la difficulté des échantillons est renforcée par un axe de croissance décentré.

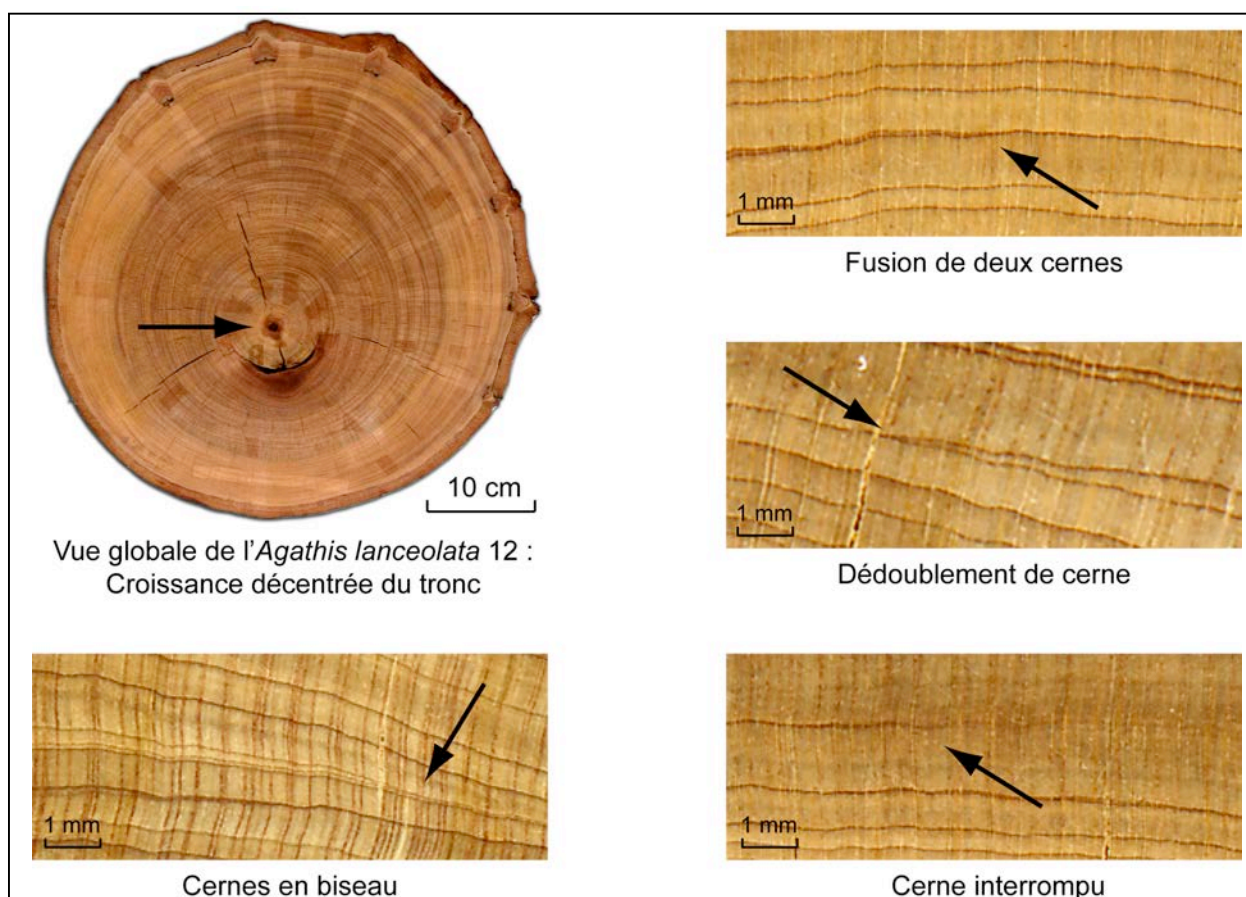


Figure 4 : Anomalies de croissance observées sur l'*Agathis lanceolata*

Un travail préliminaire a déjà été réalisé sur certains de ces échantillons. Une méthode de mesure simple des largeurs de cernes a été utilisée : mesure manuelle des cernes, le long de l'axe de croissance le plus important du tronc ; aucune corrélation importante de la croissance de l'arbre avec le climat n'a pu être établie. L'un des biais de la méthode est la prise en compte que d'un seul axe.

L'un des objectifs majeurs de ce stage est de caractériser la croissance des échantillons d'arbres collectés et de mettre au point une méthode permettant de quantifier la croissance de l'arbre sur l'intégralité de la surface. L'objectif est ensuite d'évaluer la corrélation de ces données synthétiques de croissance avec les données climatiques disponibles afin de déterminer le potentiel de cette méthode pour la caractérisation des paléoclimats de Nouvelle-Calédonie.

4. L'apport de la géochimie

La géochimie fournit une nouvelle approche méthodologique pour aborder la paléoclimatologie. Elle permet de développer des Proxy du climat, c'est-à-dire des mesures fortement corrélées au climat. Le $\delta^{18}\text{O}$ en est un exemple.

Dans la nature, les atomes d'oxygène se trouvent entre autres sous deux formes : le ^{16}O et le ^{18}O en proportion moindre qui en est un isotope stable. Les deux types d'atomes possèdent 8 protons et 8 électrons, le nombre de neutrons varie entre les deux isotopes : 8

neutrons pour le ^{16}O soit 16 nucléons, 10 pour le ^{18}O soit 18 nucléons. Cette différence du nombre de nucléons entraîne une différence de masse entre les deux isotopes.

Les molécules d'eau de l'océan et de l'atmosphère contiennent un atome d'oxygène qui peut être du ^{16}O ou du ^{18}O . Les deux types de molécule d'eau diffèrent en poids et ont, par conséquent, des comportements différents aux changements d'état. Lorsque l'eau de l'océan s'évapore dans l'atmosphère, les H_2^{16}O plus légères passent en phase gazeuse préférentiellement ; cependant, plus la température est élevée au moment de l'évaporation et plus la proportion de H_2^{18}O est augmentée dans la phase gazeuse à cause de l'agitation moléculaire plus importante. Un nouveau tri géochimique s'opère lors de la condensation de la vapeur d'eau en pluie dans l'atmosphère, les H_2^{18}O plus lourdes, se condensent préférentiellement.

Il y a donc un lien étroit entre la température au moment des changements d'état et les proportions de ^{16}O et de ^{18}O dans les phases. On définit le $\delta^{18}\text{O}$ comme un index qui quantifie les proportions $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ par rapport à une référence :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}}}$$

avec $R = \frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}$

et R_{ref} un rapport standard, par exemple le SMOW (Standard Mean Ocean Water)

Cet index est déjà utilisé depuis longtemps dans l'étude des glaces où il est utilisé comme Proxy de la température atmosphérique ou dans l'étude des coraux comme Proxy de la température de l'eau.

Quelques résultats récents ont dès lors été publiés en dendrochronologie : Poussart et Schrag (2005) ont mis en évidence une corrélation significative entre le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans la cellulose, la croissance annuelle de l'arbre et les précipitations de la saison humide sur des échantillons d'arbres de Thaïlande. Raffalli et al. (2003) ont montré une relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ cellulosique des cernes et la température estivale sur des arbres récoltés en Bretagne.

L'un des objectifs du stage est d'évaluer une corrélation potentielle entre le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans la cellulose et les paramètres climatiques en zone tropicale.

5. Synthèse

Ce stage se situe donc comme un travail préliminaire pour évaluer les possibilités d'exploration du paléoclimat de Nouvelle-Calédonie par la dendrochronologie des arbres de la famille des Araucariacées. Dans un contexte de recherche où sont déjà utilisés, la géochimie des coraux et des bénitiers pour retracer les températures océaniques, les

spéléothèmes (concrétions calcaires des grottes) pour la pluviométrie, l'étude de la croissance des arbres ajouterait un nouvel enregistreur terrestre du climat permettant de corroborer et de compléter les résultats obtenus par les autres méthodes.

Les objectifs du stage s'articulent en plusieurs points :

- Mettre au point une méthode de mesure de la croissance globale des arbres permettant de surmonter les problèmes liés aux anomalies de croissance et à la mesure sur un seul rayon du tronc.
- Mieux caractériser la croissance de 3 espèces endémiques : *Agathis ovata*, *Agathis lanceolata*, *Araucaria columnaris*.
- Evaluer les corrélations éventuelles entre la croissance des différentes espèces et différents paramètres climatiques ; établir si les corrélations le permettent un modèle de prédiction des paléoclimats en fonction de la largeur des cernes pour établir une chronologie du climat.
- Analyser les résultats d'analyses isotopiques du $\delta^{18}\text{O}$ dans les cernes d'un *Agathis lanceolata* et évaluer la portée de cette méthode en paléoclimatologie.

II. Matériel et méthodes

1. Description des échantillons

Nous disposons pour l'étude de 4 échantillons d'arbres : deux *Agathis lanceolata* (Kaoris Lancéolés) numérotés 12 et 13, un *Agathis ovata* (Kaori des montagnes) et un *Araucaria columnaris* (Pin colonnaire). Les 3 espèces sont des gymnospermes de la famille des Araucariacées, elles sont toutes les trois endémiques de la Nouvelle-Calédonie. Les échantillons d'*Agathis lanceolata* et *ovata* ont poussés sur sol ultramafique, sol très pauvre dérivé de l'altération de la péridotite.

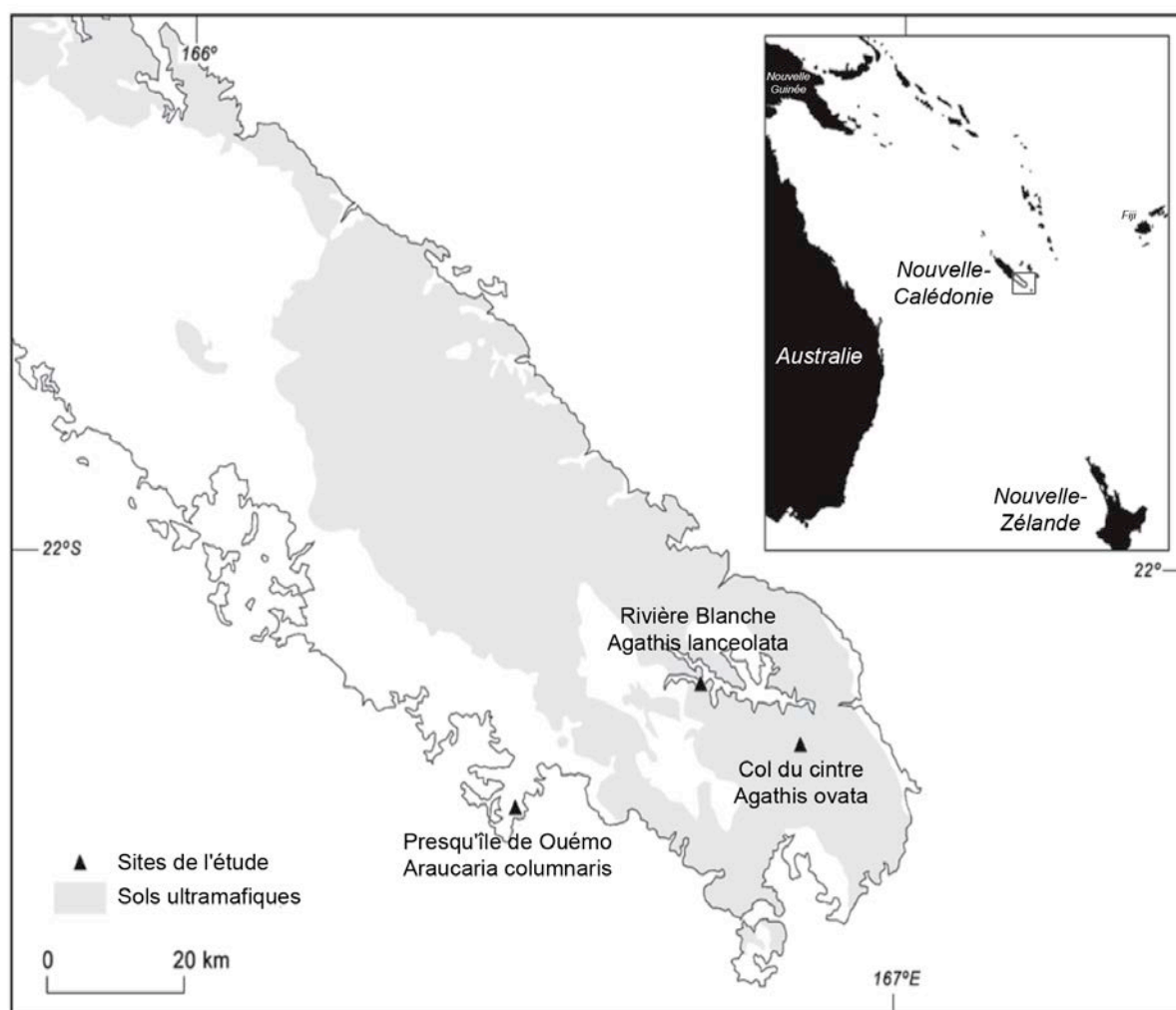


Figure 6 : Sites de prélèvement des échantillons, dans le Sud de la Nouvelle-Calédonie

a. Description des deux échantillons d'*Agathis lanceolata* et de leur environnement de croissance

Les deux échantillons d'*Agathis lanceolata* ont été prélevés au bord de la rivière blanche dans le Sud de la Grande Terre. Ces deux arbres mesuraient une trentaine de mètres de hauteur environ et 45 cm de diamètre. Les échantillons ont été abattus en décembre 1982 dans le cadre d'une étude menée par le centre technique forestier tropical de Nouvelle-Calédonie. Les arbres poussaient à environ 220 mètres d'altitude sur une légère pente, en forêt humide et en bordure d'une zone marécageuse. Le sol est ultrabasique, il dérive de l'altération du socle de péridotite ; cette altération donne des sols rouges très riches en fer mais très carencés en éléments minéraux : magnésium, phosphore, calcium, potassium, conditions stressantes pour l'arbre ; il faut cependant noter la présence dans l'environnement immédiat de plutons granitiques acides et donc beaucoup plus riches en éléments nutritifs. Le climat est plus humide qu'à Nouméa (seules données climatiques disponibles), avec une pluviométrie annuelle d'environ 2500 mm, soit deux fois plus importante mais, le sol présente une très mauvaise capacité de rétention de l'eau. De par leur localisation légèrement au dessus d'une zone marécageuse, la carence hydrique n'a

probablement pas été un facteur limitant à la croissance, du moins depuis 1958. En effet, la mise en place de la zone marécageuse est très probablement liée à la construction en 1958 du barrage de Yaté en aval de la zone étudiée.

Les deux échantillons présentent des cernes bien visibles avec des anomalies de croissance comme décrites dans la partie précédente. Cette cyclicité de croissance observée pourrait être liée de deux manières à l'environnement :

- Une période sèche (septembre à novembre) créant une alimentation hydrique carencée et provoquant un arrêt de croissance.
- La saturation de la nappe en saison humide pourrait provoquer l'asphyxie des racines de l'arbre et induire un arrêt de croissance.

Les deux coupes de tronc présentent de plus une croissance décentrée, l'axe du tronc n'est pas équivalent au centre mathématique du tronc (cf. figure 5). Ceci pourrait être dû à la pente du terrain où poussent les deux arbres.



Figure 5 : *Agathis lanceolata* sur sol ultrabasique



Figure 6 : Environnement humide de croissance des *Agathis lanceolata* à la Rivière Blanche

Les *Agathis lanceolata* 12 et 13 présentent respectivement 375 et 300 cernes, ce qui, si l'hypothèse des cernes annuels se confirme, les fait remonter à avant l'an 1700. Les cernes mesurent en moyenne un demi-millimètre sur l'*Agathis lanceolata* 12 et légèrement plus sur le *Agathis lanceolata* 13.



Agathis lanceolata 12

Agathis lanceolata 13

Figure 9 : Coupes poncées des deux *Agathis lanceolata*

Dans le but d'étudier la périodicité des cernes des *Agathis lanceolata*, les deux arbres ont reçu une marque annuelle pendant la saison froide. Cette marque consiste en l'ouverture d'une fenêtre de 5 cm de long sur 0,5 à 1 cm de large dans l'écorce jusqu'au cambium. La blessure laisse une cicatrice parfaitement repérable sur les coupes de tronc. Les marques ont été faites pendant la période froide, entre mi-juin et fin-juillet, chaque année de 1974 à 1981, dans le cadre d'une étude de l'Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et Forêts menée par Mr Nasi. Les deux arbres ont été abattus en décembre 1981. De ces marques peuvent être déduites deux conclusions importantes pour l'analyse :

- Les cernes des deux *Agathis lanceolata* sont annuels, on note, en effet, la présence d'un seul cerne entre chaque marque.
- Les marques portées au tronc en juillet tombent sur une limite de cerne, ce qui laisse penser que les *Agathis lanceolata* s'arrêtent de pousser pendant la saison froide. Cet arrêt de croissance serait à l'origine des structures de cernes bien visibles. La baisse des températures pourrait constituer un facteur d'entrée en dormance des arbres leur permettant de survivre pendant la saison sèche qui suit ; le cycle végétatif pourrait alors reprendre avec le début de la saison pluvieuse vers décembre.

b. Description de l'échantillon d'Agathis ovata et de son environnement de croissance

L'*Agathis ovata* prélevé, provient du maquis minier, à 520 m d'altitude, sur le col du Cintre dans le Bois du Sud. Le sol est comme dans le cas précédent ultrabasique, carencé en minéraux utilisable par la plante et possède une faible capacité de rétention de l'eau.

L'arbre mesure environ 20 mètres de haut et plus d'un mètre de diamètre. L'intérieur de l'arbre est détérioré par la pourriture et les traces du dernier incendie. Le feu est un facteur de perturbation de l'environnement très important, particulièrement depuis la moitié du XIX^{ème} siècle avec le début de la colonisation européenne ; il est susceptible d'avoir une influence sur la croissance mais l'histoire des incendies en Nouvelle-Calédonie est très mal connue (Perry & Enright 2001). Seule la partie externe non abimée du tronc présente des cernes visibles (environ 150), et par extrapolation du nombre de cernes par rapport à la taille du tronc, on peut estimer que le tronc présenterait 450 cernes au total.

Le maquis minier est susceptible d'être carencé nettement en eau pendant la saison sèche, cela pourrait causer un arrêt de croissance à l'origine de la périodicité des cernes.



Figure 10 : *Agathis ovata* dans le maquis minier, Bois du Sud, Nouvelle Calédonie



Figure 11 : Prélèvement de l'échantillon de l'*Agathis ovata*



Figure 12 : Coupe poncée de l'*Agathis ovata*



Figure 13 : Détail du bois de l'*Agathis ovata*

c. Description de l'échantillon d'*Araucaria columnaris* et de son environnement de croissance

Le troisième échantillon, est un *Araucaria columnaris* (pin colonnaire) planté, il provient de la presqu'île de Ouémo située à proximité de la ville de Nouméa. C'est un arbre de 45 cm de diamètre et d'une hauteur probable d'environ 25 m. Contrairement aux trois autres échantillons, c'est un arbre plus jeune qui a eu une croissance beaucoup plus rapide, le tronc présente environ 50 cernes beaucoup plus larges mais moins bien marquées que sur les autres arbres étudiés.



Figure 14 : Vue générale d'un *Araucaria columnaris*

L'arbre, à faible altitude et sur la presqu'île de Nouméa, a probablement été soumis à un climat légèrement plus doux, un peu moins humide ; et surtout, il a poussé sur un sol de flysch beaucoup plus fertile que les sols ultrabasiques. Les flysch constituent des résidus d'avalanche sous-marine ; les couches sédimentaires de grès et d'argile s'alternent, le sol superficiel est plus profond, plus riche en éléments minéraux nécessaires pour la plante et a une meilleure capacité de rétention de l'eau de par la présence d'argile.



Figure 15 : Coupe poncée de l'échantillon d'*Araucaria columnaris*

2. Méthode d'acquisition et d'analyse des profils de croissance

a. Préparation et numérisation des échantillons

a.1. Préparation des échantillons

Après découpe et séchage, les coupes de tronc ont été égalisées avec une ponceuse à bande au grain 40, puis les échantillons ont été poncés avec des grains de plus en plus fin (40-60-120-150-240) à l'aide d'une petite ponceuse orbitale. Le poli est très important car il

conditionne toute la suite de la méthode, il faut effacer au maximum les coups de scie pour ne pas perturber le programme de reconnaissance d'image par la suite.

a.2. Numérisation des coupes

Les coupes d'arbres ont été passées en plusieurs fois dans un scanner A4 et scannées à la résolution maximum du scanner 1200 dpi. Les photos ont ensuite été assemblées à l'aide de Photoshop. Les photos étant très lourdes, de l'ordre de 400 mégaoctets chacune, il est très important d'optimiser les opérations informatiques.

Les photos sont passées en noir et blanc juste après le scannage du tronc pour réduire la taille des fichiers. Pour réaliser le montage de deux photos, les deux images scannées sont placées sur des calques séparés d'une même image Photoshop puis les photos sont recalées en diminuant l'opacité du calque supérieur à recaler autour de 50 %. L'opération consiste ensuite à recaler parfaitement un point situé autant que possible dans le centre de la photo supérieure, à l'aide de l'outil déplacement de calque. Puis, pour recaler le reste de l'image, on effectue une rotation autour de ce point à l'aide de l'outil transformation manuelle, en déplaçant sur le point recalé précédemment le centre de la transformation. Par rotation, on recalc un deuxième point assez distant du premier et ainsi les deux images doivent être recalées.

On ajoute et recalc ensuite successivement toutes les photos. Une fois le recalage terminé, on peut ajuster la luminosité et le contraste de chaque calque de façon à faire correspondre au mieux les images superposées. Enfin, pour effacer les limites de calque, on peut utiliser une gomme très large (ex : 400 px) avec une forme d'objet très effilée et appliquer cette gomme sur les bordures des calques.

Dans le cas de l'*Agathis ovata*, le tronc étant trop imposant pour un scanner, on s'est contenté de photographier à haute définition (8 méga pixels) et en plusieurs photos, 8 axes placés sur la périphérie du tronc. Les photos de chaque axe ont ensuite été assemblées avec la même méthode définie ci-dessus sous Photoshop.

b. Calcul des profils de croissance

b.1. Acquisition du profil de croissance de l'*Araucaria columnaris*

La difficulté de cet échantillon réside dans la mauvaise visibilité des cernes, par contre les cernes sont assez larges et ne présentent pas d'anomalies comme celles rencontrées sur les autres échantillons (dédoubléments, fusions et interruptions de cernes). Aussi, en rehaussant le niveau de visibilité des cernes, une approche surfacique en travaillant sur le tracé intégral des cernes pour en évaluer leur largeur moyenne est tout à fait concevable. Le nombre de cernes étant faible (moins de 50), on peut tout à fait retracer manuellement les cernes à la main.

Pour traiter l'échantillon, un papier calque a été fixé avec des punaises sur la coupe du tronc et les cernes ont été tracés sur le papier calque de deux couleurs, selon leur niveau subjectif de définition : en bleu, les cernes très marqués correspondant très probablement à des cernes annuels, et en rouge, les cernes moins bien définis, qui sont suspectés être liés à des ralentissements ou des arrêts de croissance pendant l'année. Le calque a ensuite été scanné à 1200 dpi en trois parties puis les photos ont été assemblées sous Photoshop (cf. paragraphe précédent).



Figure 16 : Coupe d'*Araucaria columnaris* et schéma associé pour l'acquisition : en bleu, les cernes très marqués, en rouge, les cernes mal définis.

L'image est ensuite passée en niveaux de gris et stockée dans le répertoire de travail de l'acquisition du pin colonnaire avec le nom « image.jpg ». Le programme permettant de détecter les cernes nécessite, pour commencer et pour chaque cerne, les coordonnées de deux points (A et B) situés au début de la cerne où commence l'acquisition et séparés sur l'image d'environ 50 pixels. En l'occurrence ici, on a utilisé deux points situés à l'extrémité gauche du cerne ; les coordonnées de tous les points sont prises à l'aide de l'outil sélection de Photoshop ; les coordonnées sur l'image apparaissent dans la fenêtre informations de Photoshop. Ces coordonnées initiales sont stockées dans un fichier txt, « coordonnées.txt », dans le même répertoire de travail, où sont déjà placés l'image et le programme, sous la forme suivante :

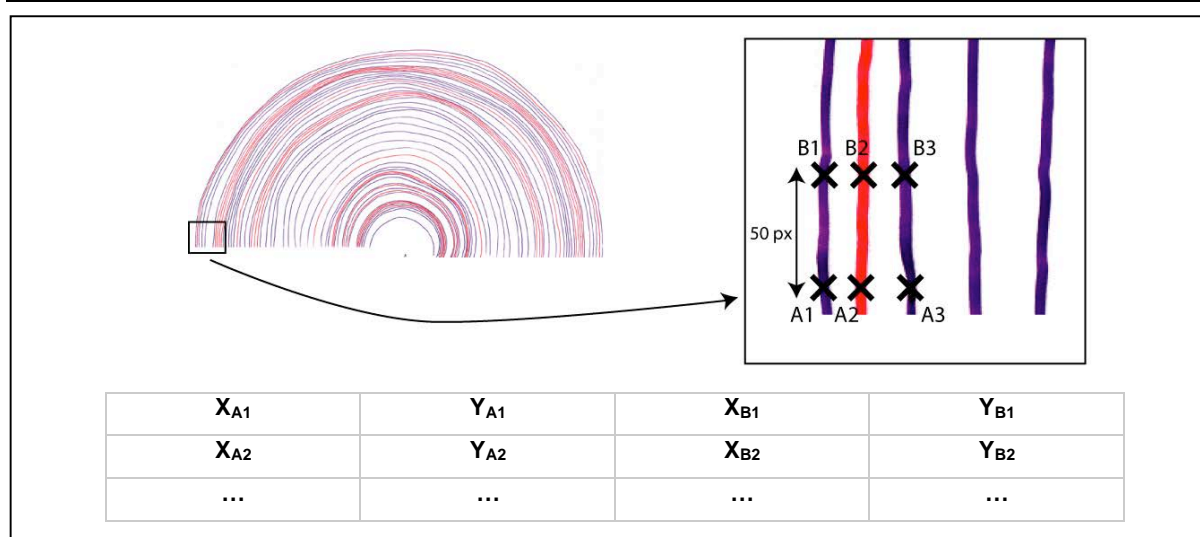


Figure 17 : Placement des points initiaux et organisation du fichier coordonnées.txt

On copie le fichier Matlab « détection.m » dans le répertoire de travail et on modifie les paramètres du programme explicités sur la figure 17 :

- d demi-largeur de l'intervalle en pixels à prospector autour du point C (cf. Figure 17), exemple d=10.
- q demi-hauteur en pixels du parallélogramme, exemple q=2. Si les cernes font 4 pixels de largeur en moyenne sur la photo, on paramètre q=2.
- l distance en pixels entre chaque point calculé, exemple l=50. Pour une forte courbure, on diminue l, pour une faible courbure, on peut l'augmenter.

La somme sur un parallélogramme et la prospection sur un angle défini par l'utilisateur autour de l'axe (AB) utilisées dans le programme permettent de suivre les lignes de plus forte densité colorimétrique en faisant abstraction des structures radiales très colorées tels que les rayons libero ligneux ou les fissures orientées perpendiculairement par rapport à l'axe moyen de détection. Ce programme est susceptible de bien s'adapter à la détection sur des arbres aux cernes bien marqués et sans anomalies de croissance, tels que ceux de nombreuses essences rencontrées en climat tempéré.

Fonctionnement de l'algorithme de détection des cernes

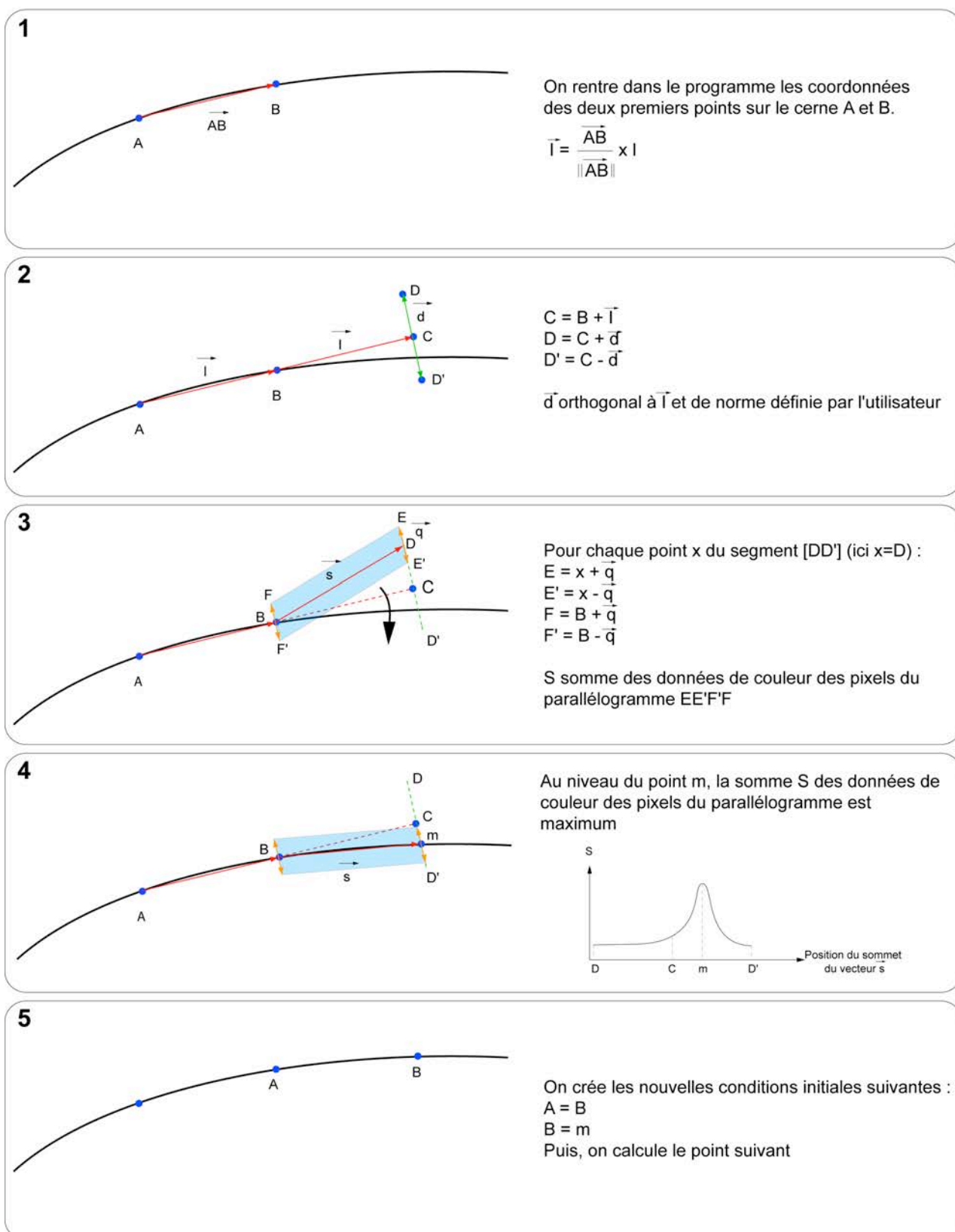


Figure 18 : Fonctionnement du programme de détection de cernes utilisé pour l'acquisition du profil de croissance de l'*Araucaria columnaris*

Un fichier texte appelé « cernes.txt » est automatiquement créé, en sortie du programme, dans le répertoire de travail contenant les coordonnées des points détectés sur chaque cerne. On lance ensuite le programme Matlab « Polaire.m ». On paramètre le programme en entrant les coordonnées du centre de l'arbre obtenues via Photoshop. Ce nouveau programme calcule les coordonnées des points détectés sur chaque cerne du fichier cernes.txt en coordonnées polaires (R, θ), R étant la distance du point par rapport au centre et θ l'angle trigonométrique en degrés par rapport à l'horizontale dirigée vers la droite. Pour chaque cerne, le R moyen est calculé en moyennant les R des différents points détectés sur le cerne, les différents points étant situés à intervalles réguliers. Les R Moyen des cernes sont exportés dans le fichier cernepos.txt

Le fichier est enfin ouvert sous Excel. La croissance associée au cerne est calculée par $R_{moy(n)} - R_{moy(n-1)}$. Le jeu de cernes bleus et de cernes rouges (explicités plus haut) ont été traités dans deux runs du programme distincts, de sorte que l'on puisse essayer des corrélations statistiques avec le climat de jeux de données composites construits en insérant des cernes rouges dans le jeu de cernes bleus (cf. Analyse statistique). Le temps d'acquisition total pour cette méthode et cet échantillon s'élève à environ une journée de travail.

b.2. Acquisition des profils de croissance des *Agathis lanceolata* 12 et 13

Les deux échantillons d'*Agathis lanceolata* présentent des cernes d'une largeur moyenne de 0,5 mm et de nombreuses anomalies de croissance (dédoubléments de cerne, fusions, biseaux) qui compliquent nettement la détection. Des essais de détection ont été réalisés avec le même programme utilisé sur l'*Araucaria columnaris*. Le programme détecte et suit avec succès 50 % des cernes mais, après différents essais d'optimisation du programme pour ce type d'échantillon, la méthode ne semble pas adéquate.

Nous avons donc développé un autre système de détection semi-automatique qui s'appuie sur des détections de cernes sur plusieurs axes et un ensemble de cernes repères tracés manuellement, servant de guide pour recalibrer les données des différents axes.

Tracé des cernes repères

La photo haute définition du tronc est ouverte dans Photoshop. On utilise l'outil plume magnétique de Photoshop pour tracer les cernes repères. Cet outil est tout à fait adapté pour réaliser ces tracés, il adapte le mouvement global de la souris pour suivre la ligne de plus fort contraste la plus proche du pointeur ; il suffit donc de suivre le cerne de façon assez rapide avec la souris au gros zoom pour que le logiciel trace un tracé vectoriel en suivant

parfaitement le cerne. Cet outil présente de plus des options raccourcies très utiles, en particulier la barre d'espace permettant de se déplacer sans quitter l'outil.

Les deux *Agathis lanceolata* présentent respectivement 375 et 300 cernes, on a tracé sur chacun d'eux une vingtaine de cernes, soit un cerne sur 15. Cette valeur semble être un minimum pour pouvoir effectuer un recalage efficace postérieur des différents axes.

Une fois tous les cernes repères tracés, on ajoute un nouveau calque blanc à l'image, on le sélectionne ; puis, on sélectionne le tracé des cernes repères dans la boîte de dialogue tracés. On pixellise, le tracé avec une forme d'objet crayon noir de deux pixels de large avec le clic droit sur le tracé. On enregistre ensuite le nouveau calque blanc avec les tracés en noir dans une nouvelle image : « tracés.jpg ».

Principe du programme de détection sur un axe

A partir de l'image originale et de l'image des cernes repères tracés, le principe du programme consiste à découper dans l'image des rayons de largeur définie par l'utilisateur (ici, 50 pixels) et en nombre défini par l'utilisateur (ici, 10 axes). On définit la direction radiale, la direction de la longueur de la bande et la direction tangentielle, la direction perpendiculaire, c'est-à-dire celle de la largeur. Chaque pixel de l'image niveaux de gris est codé par une valeur entre 0 (couleur noire) et 255 (couleur blanche). De façon générale, pour chaque pixel situé sur la longueur de la bande, le programme somme les données de couleur des pixels situés sur la tangente par rapport à ce pixel. Sur les cernes, les pixels sont très foncés, la somme S est donc très faible ; dans l'inter cerne au contraire, les pixels sont clairs et donc la somme est grande. Lorsque l'on trace la somme en fonction de l'abscisse le long de la longueur de la bande, les cernes apparaissent comme des minima locaux.

Plus précisément, pour améliorer le contraste du profil, la somme ne se fait pas sur une tangente mais sur un axe d'inclinaison égale à la moyenne de l'inclinaison des deux cernes repères situés de part et d'autre de la zone étudiée et pondérée par la position de la zone étudiée entre les deux cernes repères. Enfin, toujours pour améliorer la précision de la détection des cernes, la somme ne se fait pas simplement sur un axe incliné mais sur un parallélogramme de largeur définie par l'utilisateur. La largeur de ce parallélogramme est à adapter en fonction de la largeur des cernes sur l'image.

Le profil (S en fonction de la position radiale) est ensuite recalculé pour être compris entre 0 et 100. Un point est considéré comme un cerne par le programme s'il vérifie trois conditions :

- Le point doit être le minimum absolu du profil sur une fenêtre de largeur définie par l'utilisateur (ici : 10 pixels)

- La différence entre la valeur du profil au point étudié et le maximum calculé sur une fenêtre de largeur définie par l'utilisateur (ici : 8 pixels) avant le point étudié doit être supérieure à une différence minimale définie par l'utilisateur (exemple : 5)
- La différence entre la valeur du profil au point étudié et le maximum calculé sur une fenêtre de largeur définie par l'utilisateur après le point étudié doit être supérieure à une valeur minimale.

Cet algorithme permet une détection satisfaisante des cernes, toutefois, la qualité de la détection n'est pas homogène selon la position de la zone étudiée vers le centre ou vers la périphérie. Pour optimiser la détection et résoudre ce problème, un programme d'optimisation des paramètres a été créé : l'utilisateur compte rapidement le nombre de cernes visibles entre chaque cerne repère sur l'axe vertical, il remplit un fichier texte et lance le programme « optimisation.m ». Le programme calcule automatiquement les paramètres du programme de détection qui minimisent (la plupart du temps à 0) l'écart entre le nombre de cernes réels et le nombre de cernes détectés par le programme. Les paramètres relatifs à un segment (intervalle entre deux cernes repères) sont ensuite utilisés pour ce segment sur tous les axes et permettent d'obtenir des résultats de détection supérieurs à 80 %.

Pour encore améliorer la détection, éliminer les détections aberrantes ou rajouter des détections manquantes, des macros ont été écrites en Excel Visual Basic qui permettent de retoucher les données manuellement grâce à l'interface d'édition des graphiques Excel.

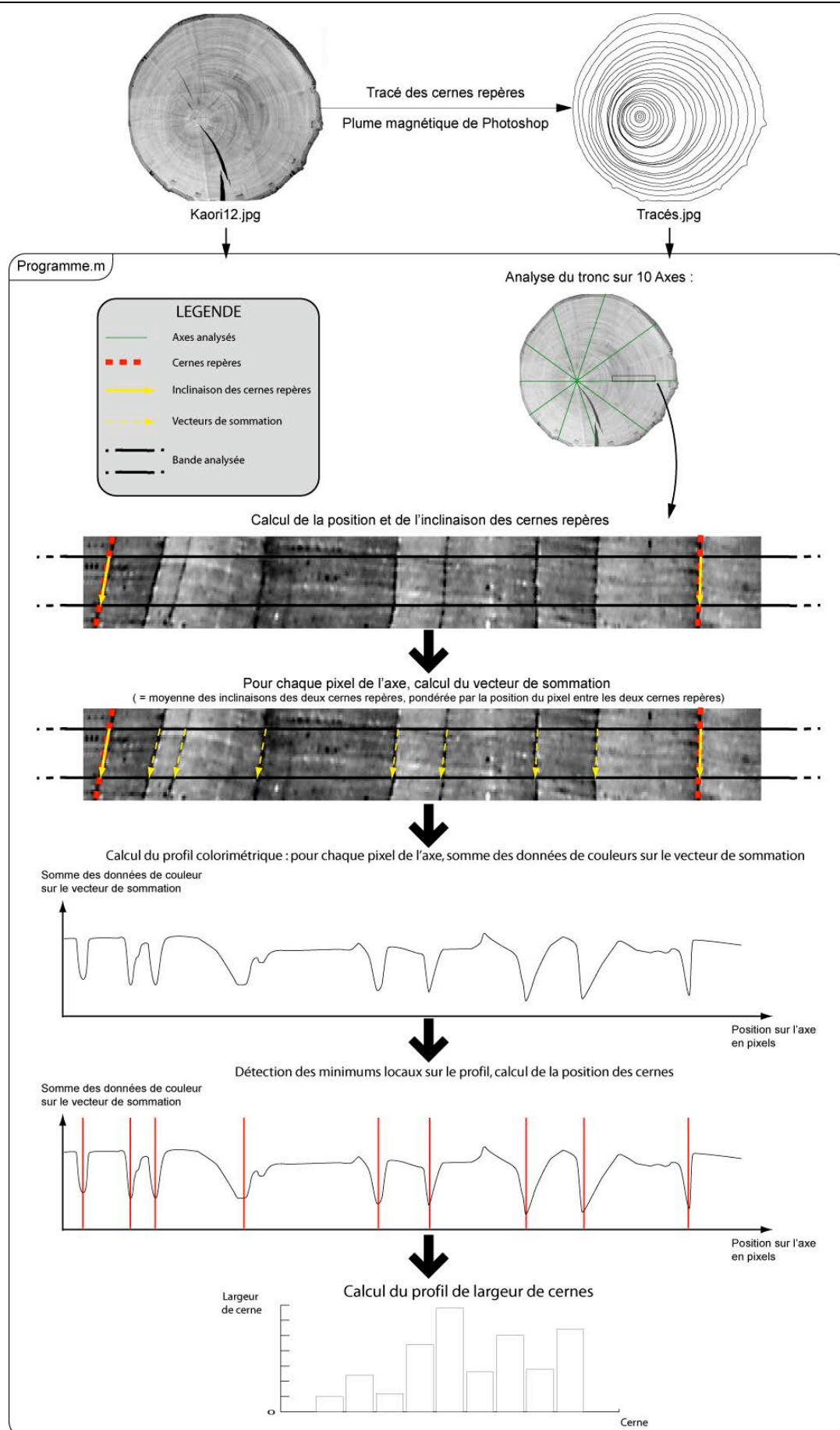


Figure 19 : Principe de fonctionnement du programme de détection de cernes par axes

Principe du programme de recalage des axes les uns par rapport aux autres

Le programme précédent permet d'obtenir pour les 10 axes du tronc le profil de largeur des cernes. Pour avoir une analyse globale du tronc, il faut recaler les axes les uns par rapport aux autres, de façon à pouvoir calculer une largeur moyenne du cerne considéré sur l'ensemble des axes. Certains cernes ne sont pas présents sur l'ensemble des axes, il faut donc insérer des cernes de largeur nulle sur les axes où est absent le cerne en question. Le fonctionnement du programme repose sur l'observation qu'en général les cernes qui disparaissent sur une partie du tronc sont les plus étroits.

Si l'utilisateur a tracé n cernes repères, le programme définit $n-1$ segments, un entre chaque cernes repères. Sur chaque segment, le programme recherche l'axe présentant le maximum de cernes. En partant de cet axe, le programme s'intéresse au segment homologue sur l'axe voisin dans le sens horaire, compare le nombre de cernes détectés sur les deux segments et insère si besoin des cernes vides sur le deuxième axe en face des cernes les plus étroits du premier axe.

Par exemple, si le premier axe possède 10 cernes sur un segment, le deuxième, 8 sur le même segment et que les cernes en troisième et cinquième positions sont les plus étroits sur le premier axe, le programme insère des cernes de largeur nulle en troisième et cinquième positions sur le deuxième axe. Ainsi le nombre de cernes sur les deux axes devient le même et la correspondance des cernes est directe.

Le programme fonctionne ainsi de proche en proche en insérant des cernes vides. Lorsque tous les axes ont été traités pour un segment, le programme passe au segment suivant et effectue les mêmes opérations.

Suppression des faux cernes

L'exécution complète de la méthode aboutit à un tableau de synthèse présentant le profil des largeurs de cernes sur chaque axe recalés les uns par rapport aux autres grâce à l'ajout de cernes de largeur nulle. La question de la validité de la périodicité annuelle des cernes reste levée, particulièrement de ceux qui apparaissent que très localement (largeur nulle sur de nombreux axes) : les cernes qui ne figurent que sur quelques axes doivent-ils être pris en compte ? Une dernière macro Excel permet à partir de ce tableau de générer un seul profil synthétique de tous les axes où sont sommées pour chaque cerne ses largeurs sur les différents axes, et où ne sont retenues que les cernes qui figurent sur au moins n axes. On voit donc que l'on peut générer, si l'on analyse 10 axes, 10 jeux de données :

- Si $n=1$, on retient tous les cernes, y compris les dédoublements de cernes locaux qui ne figurent que sur un axe.
- Jusqu'à $n=10$ où l'on retient exclusivement les cernes « entiers » qui figurent sur l'ensemble des axes.

Utilisation des logiciels

Pour réaliser ce travail d'analyse d'image, différents logiciels sont utilisés pour leurs performances complémentaires : Matlab qui permet de lire les images sous forme de matrices et effectuer les calculs mathématiques ; Scilab pour ses rendus graphiques intéressants et ses capacités de calcul et Excel Visual Basic pour la manipulation facile de tableaux et de graphiques. Le traitement de l'image d'origine consiste donc en un ensemble de programmes, de fichiers d'entrée et de sortie et, d'opérations à réaliser qui sont résumées dans la figure 19. Le code des programmes est disponible en annexe.

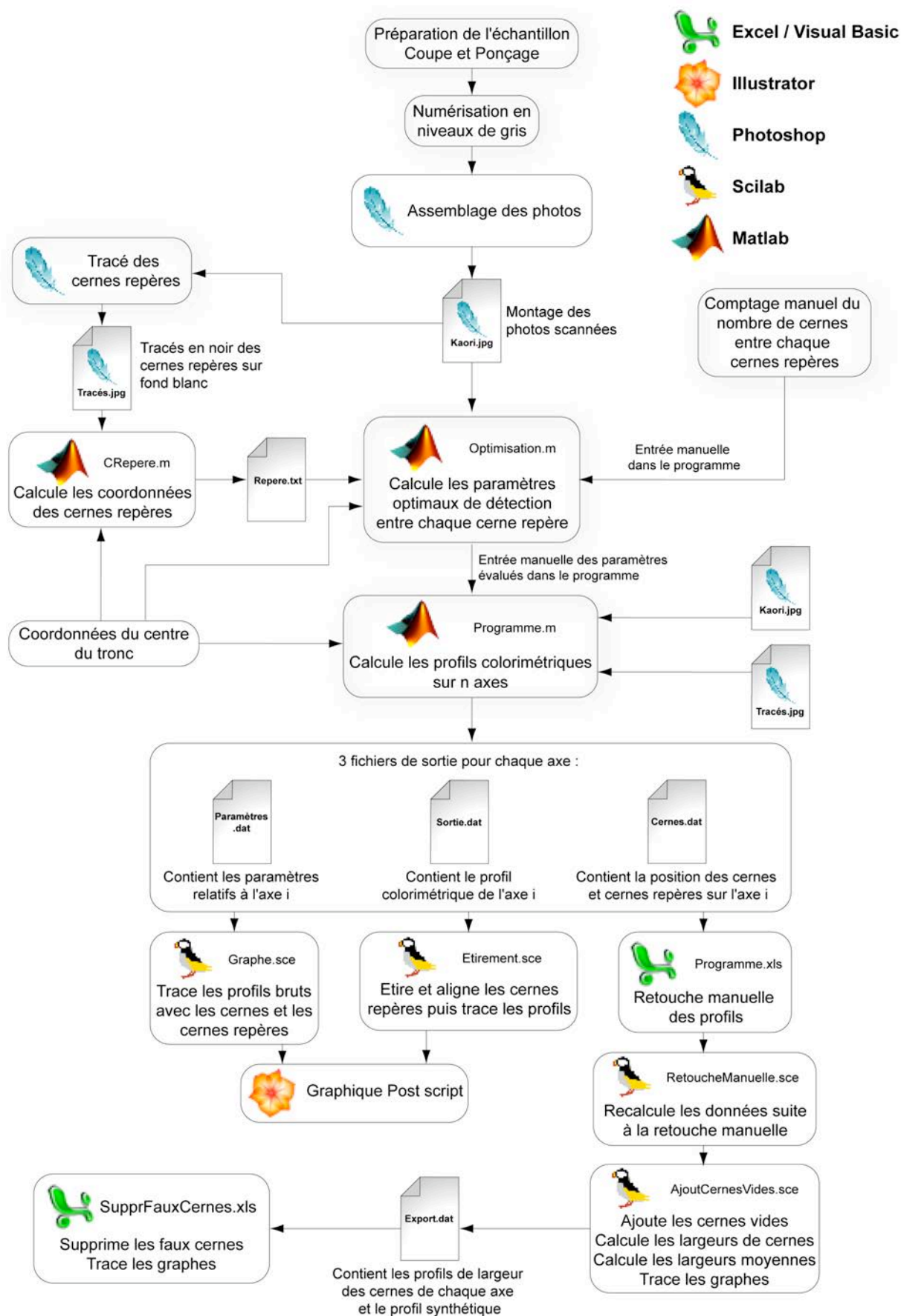


Figure 20 : enchaînement des fichiers de données et des programmes pour la détection des cernes par axes

b.3. Acquisition du profil de croissance de l'*Agathis ovata*

L'échantillon d'*Agathis ovata* présente des difficultés supplémentaires par rapport aux deux échantillons d'*Agathis lanceolata*. Le plus grand diamètre du tronc atteint plus d'un mètre, il est donc difficile à numériser. La continuité des cernes sur la périphérie est perturbée par la pourriture, les dégâts du feu et la pousse d'une branche d'un côté de l'arbre ; autant d'obstacles qui empêchent l'application de la méthode précédente. Cet échantillon a donc dû être traité beaucoup plus simplement en tenant compte d'un seul axe choisi dans une zone bien conservée de l'arbre. L'axe a été photographié à l'aide d'un appareil numérique haute résolution muni d'un objectif macro et les photos ont été assemblées sous Photoshop. On a ensuite utilisé le programme de détection décrit précédemment sur un seul axe pour calculer la position des cernes.

c. Analyse des profils

c.1. Analyse des variations globales par moyenne mobile

L'analyse par moyenne mobile permet d'extraire le signal basse fréquence des profils de largeur de cernes. Un nouveau profil est établi en calculant en chaque point la moyenne de la largeur des 20 cernes voisins (10 de chaque côté du point). On obtient un signal lissé pour chaque échantillon. Le calcul a été réalisé grâce à un programme Scilab sur les échantillons présentant assez de cernes : les deux *Agathis lanceolata* et l'*Agathis ovata*.

Ces variations basse fréquence peuvent être attribuées à différents facteurs :

- Des variations basse fréquence du climat, par exemple un réchauffement global du climat sur 100 ans
- Des variations du statut écologique de l'arbre dans la forêt, dominé sous la canopée ou dominant.
- Des interventions humaines ayant des conséquences sur le long terme sur la croissance de l'arbre, telles que l'abattage d'arbres voisins ou la variation du régime hydrique lié à la construction d'un barrage par exemple.

c.2. Analyse statistique

Données climatiques

Dans un objectif de caractérisation des climats du passé, les profils de croissance des quatre échantillons ont été comparés à des variables climatiques. Les données climatiques ont été collectées dans les archives de Météo France Nouvelle-Calédonie et aux archives territoriales. Les données climatiques mensuelles et annuelles de pluviométrie et de température moyenne pour la ville de Nouméa ont été récupérées jusqu'en 1889 ; les valeurs du SOI (Southern Oscillation Index), paramètre utilisé pour caractériser les périodes

El Niño, ont été relevées sur les 100 dernières années. Les années de cyclones ont aussi été collectées auprès de Météo France sur les cent dernières années mais avec une résolution très faible avant 1960.

Aucune donnée climatique exploitable sur plusieurs décennies et plus proche des lieux de collecte n'était disponible. L'écart entre les lieux de collecte des échantillons et le lieu de mesure des données climatiques induit forcément un biais dans la comparaison des variables, particulièrement lié au fait que les échantillons ont été relevés dans l'intérieur des terres alors que le climat concerne la ville de Nouméa située sur une presqu'île donc présentant un climat plus océanique.

Toutefois, les lieux de collecte des échantillons s'éloignent tout au plus de 30 km de Nouméa et il existe très probablement une corrélation importante entre le climat dans la ville de Nouméa et celui dans l'intérieur des terres.

Suppression des variations basse fréquence

Pour chaque profil de largeur des cernes, un deuxième profil a été généré en retirant les variations de basse fréquence de la largeur des cernes, car ces variations seraient susceptibles de dépendre de facteurs autres que climatiques, comme expliqué ci-dessus (II-3-c-c1). Cette correction a été réalisée en ajustant et soustrayant un polynôme du 6^{ème} degré aux profils de largeur des cernes, en utilisant Matlab.

Outils statistiques

Pour tenter de mettre en évidence un effet significatif du climat sur la croissance de l'arbre, nous avons réalisé des régressions linéaires simples ou multiples sous SAS. Pour chaque échantillon, la variable à expliquer est, soit la largeur des cernes (Variable Cerce du modèle), soit la largeur corrigée des cernes (explication dans le paragraphe précédent).

Les variables explicatives (V_i du modèle ci-dessous) pouvant être intégrées dans le modèle sont la pluviométrie annuelle, la température moyenne annuelle et la valeur annuelle du SOI, les précipitations et la température moyenne de chaque mois, la température moyenne ou la pluviométrie totale par saisons (décembre - février ; mars - mai ; juin - août ; septembre - novembre), le nombre de mois secs (pluviométrie < 60mm) consécutifs dans l'année. Ces variables explicatives introduites dans le modèle peuvent se référer à l'année n de la mise en place supposée du cerne, l'année $n-1$ ou l'année $n-2$.

Le modèle est de la forme suivante :

$$Cerne_i = \beta_0 + \beta_1 V1_i + \beta_2 V2_i + \beta_3 V3_i + \dots + \beta_n Vn_i + \dots + E_i$$

avec

Cerne la variable à expliquer

β_n les paramètres du modèle à estimer

Vn les variables explicatives du modèle

E_i le terme résiduel aléatoire, réalisation de la variable $E \rightarrow N(0, \sigma^2)$

Pour chaque modèle réalisé, les hypothèses du modèle ont été testées et vérifiées, à savoir :

- L'indépendance des résidus assurée par la méthode d'acquisition : la mesure de chaque cerne est indépendante.
- La normalité des résidus a été testée et validée grâce à un test du Khi deux d'ajustement des résidus à une loi normale d'espérance 0 et de variance σ^2 .
- L'homoscédasticité des résidus, c'est-à-dire une variance des résidus (σ^2) constante selon la valeur prédite, vérifiée graphiquement en traçant les résidus du modèle en fonction de la valeur prédite : aucune structure des résidus n'est visible, les résidus se positionnent aléatoirement de part et d'autre de l'axe quelque soit la valeur prédite.

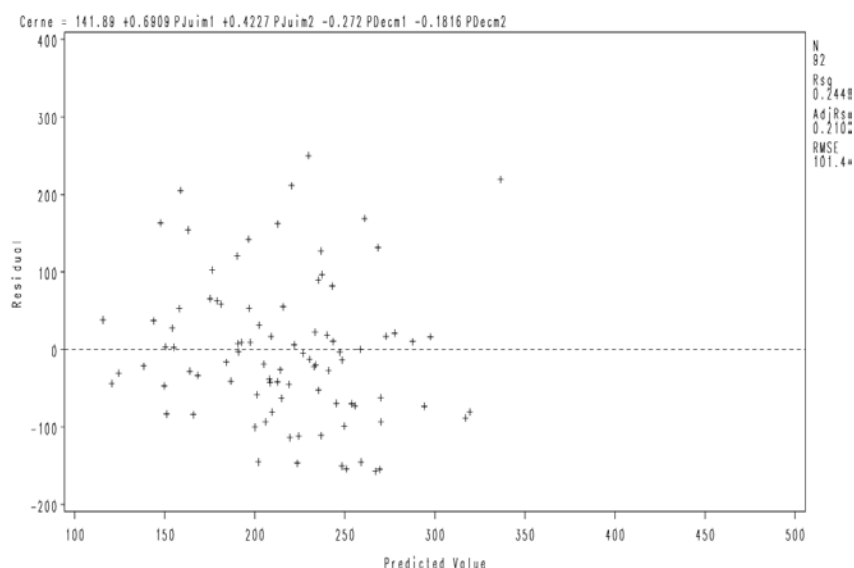


Figure 21 : Exemple de graphique des résidus en fonction de la valeur prédite de la taille des cernes de l'*Agathis lanceolata* 12, montrant la variance constante des résidus

Les paramètres du modèle sont estimés par la méthode des moindres carrés partiels grâce à la procédure REG de SAS (code en annexe). L'analyse systématique des corrélations, entre les variables climatiques et la taille des cernes des échantillons, a été effectuée automatiquement, grâce à l'option stepwise de la procédure de régression multiple REG de SAS.

Le fonctionnement est le suivant (Lebarbier et Robin, 2004):

- Le programme part du modèle $Cerne_i = \beta_0 + E_i$
- Ensuite, le programme introduit dans le modèle la variable explicative réalisant le maximum de coefficient de détermination R^2 (mesure l'ajustement du modèle aux données) du modèle ($Cerne_i = \beta_0 + \beta_1 V1_i + E_i$), puis teste (Test de Fischer) la significativité du nouveau modèle par rapport au modèle nul, puis la nullité du nouveau paramètre β_1 . Si les tests sont significatifs, le programme continue, sinon, le programme s'arrête en indiquant qu'aucune nouvelle variable n'atteint le seuil de significativité (P value du test de Fischer) de 0,05.
- Si les tests étaient significatifs, le programme introduit une nouvelle variable réalisant le maximum du coefficient de détermination R^2 du modèle puis réalise les tests à nouveau...
- A chaque étape, le programme remet en cause la significativité de toutes les variables du modèle et supprime la variable si le test de Fisher de la nullité du paramètre associé est non significatif.

Pour tester l'effet spécifique de certaines variables (par exemple le SOI), des régressions simples ou multiples ont été réalisées sous SAS en précisant manuellement le modèle sans utiliser l'option stepwise.

Pour tester un effet non pas additif mais multiplicatif des variables climatiques sur la croissance des échantillons, les mêmes procédures ont été utilisées pour évaluer les corrélations entre les logarithmes des variables.

$$\ln Cerne_i = \beta_0 + \beta_1 \ln V1_i + \beta_2 \ln V2_i + \beta_3 \ln V3_i + \dots + \beta_n \ln Vn_i + \dots + E_i$$

c.3. Analyse spectrale

Le logiciel Signalysis a été utilisé afin d'étudier les périodicités présentes dans les profils de largeur de cerne. L'idée est d'essayer par cette méthode de repérer d'éventuels cyclicités qui pourraient correspondre à des cycles climatiques tels qu'El Niño.

Le logiciel effectue des analyses de Fourier par fenêtre de la série de données, un filtre de Parzen permet de réduire le bruit de l'analyse. Les paramètres suivants ont été incrémentés pour des séries d'environ 250 valeurs : troncature=100, nombre de passage=1 taille de la fenêtre=50. Tous les échantillons ont été analysés sauf l'*Araucaria culumnaris* car celui-ci ne présentait pas assez de cernes.

3. Analyses isotopiques du $\delta^{18}O$

Parallèlement, des mesures du rapport $\delta^{18}O$ ont été réalisées dans l' α -cellulose de l'*Agathis lanceolata* 12. Une fine tranche d'environ 1cm de hauteur a été découpée

transversalement dans le tronc de l'échantillon. Dans cette tranche, une petite bande, d'environ 3 cm de largeur a été coupée radialement.

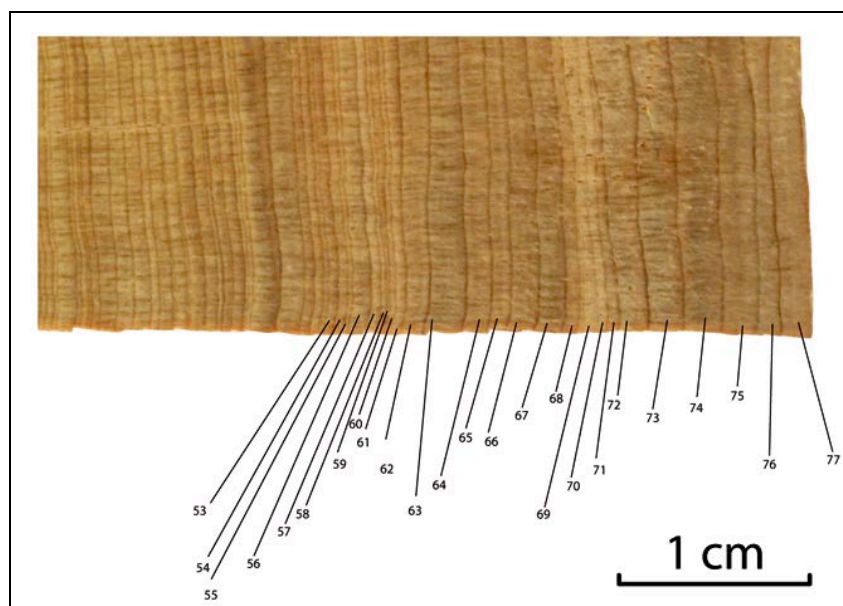


Figure 22 : bande échantillonnée dans le tronc de l'*Agathis lanceolata* 12 et référence des échantillons de bois prélevés

Sur cette bande et à l'aide d'un scalpel, le bois de chaque cerne a été prélevé et mis dans un petit tube. Le prélèvement est facilité par le fait que les plans de cernes sont des plans plus denses donc plus durs et par le fait que les fibres du bois sont orientées dans le sens de la coupe. Les échantillons ont ensuite été numérotés et envoyés au CEA à Paris pour mesurer le $\delta^{18}\text{O}$ par spectrométrie de masse dans la cellulose de chaque échantillon.

III. Résultats et discussion

1. Résultats des analyses de croissance

a. Analyse de la croissance de l'*Araucaria columnaris*

Deux jeux de données ont été générés pour l'*Araucaria columnaris* :

- Un premier profil de largeur de cernes en ne sélectionnant que les cernes très bien définis
- Un deuxième profil où l'on a rajouté des cernes moins visibles sur la coupe de tronc.

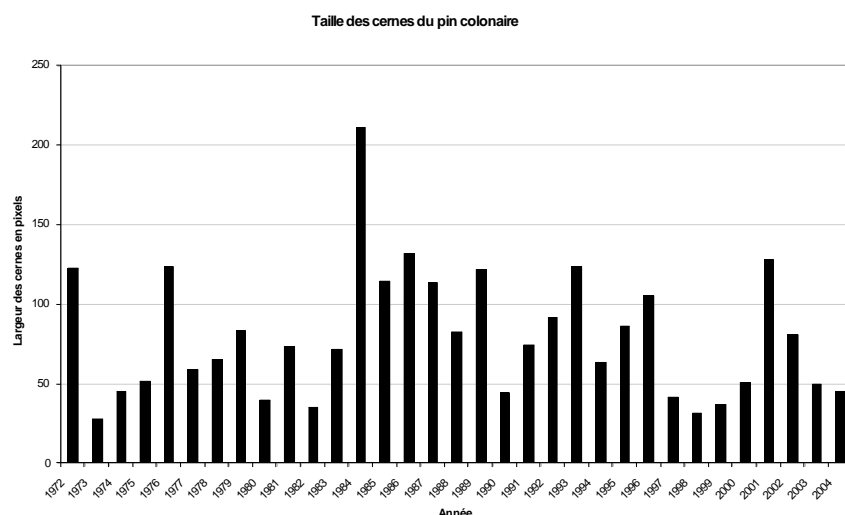


Figure 23 : Profil de largeur des cernes du jeu 1 de l'*Araucaria columnaris*

Différents modèles statistiques ont été testés pour évaluer l'effet du climat sur la croissance de l'arbre, il ressort que peu importe le profil sélectionné, les variables climatiques annuelles, précipitations totales ou température moyenne annuelle n'ont pas d'effet significatif sur la largeur des cernes du pin colonnaire.

Grâce à la procédure stepwise de SAS décrite dans la partie méthode, l'effet des variables de précipitation et de température mensuelles des trois années n , $n-1$ et $n-2$ précédant la mise en place du cerne sur la croissance de l'*Araucaria columnaris* a été testé. La combinaison linéaire des variables Pmai (n), Pjuin (n), Pavril ($n-1$), Pjuillet ($n-1$) expliquent 50% de la variabilité de la taille des cernes observés du profil 1. Cette corrélation positive est faible mais l'effet de chacun de ces 4 facteurs est significatif (P value du test de Fischer < 0,05).

Variable	R carré partiel	R carré cumulé	Fischer	P-value
Pjuin (n)	0,18	0,18	7,03	0,0125
Pjuillet ($n-1$)	0,14	0,33	6,51	0,0161
Pavril ($n-1$)	0,09	0,42	4,5	0,0425
Pmai	0,08	0,5	4,85	0,036

Table 1 : Résultat de la procédure REG Stepwise de SAS pour l'*Araucaria columnaris*

Ce résultat tend à montrer que les précipitations des mois précédents et du début de la saison froide jouent un rôle clé dans la croissance de l'arbre. Cette observation pourrait être liée au fait que ces mois correspondent à la période d'arrêt de croissance de l'arbre qui rentrerait en dormance pendant la saison froide et peut-être pendant une partie de la saison sèche. La baisse des précipitations accompagnant ces quatre mois pourrait être détectée comme facteur d'entrée en dormance ; sous cette hypothèse, si les pluviométries de ces mois sont plus importantes, l'entrée en dormance est retardée, le cycle végétatif allongé et la croissance plus importante.

On n'a par ailleurs trouvé aucune corrélation entre les données climatiques et la taille des cernes du profil 2 qui incluent les cernes moins marqués. Cela signifierait probablement que les cernes rajoutés dans le deuxième jeu de données ne sont pas annuels ; il existerait donc des années où l'arbre aurait formé plusieurs cernes, probablement en lien avec des alternances de conditions favorables et défavorables créant des interruptions temporaires de la croissance.

La valeur de ces corrélations est toutefois limitée par la qualité du recalage ; en effet, n'étant pas sûr du caractère annuel de certains cernes, le recalage des cernes sur les années n'est probablement parfaitement exact et la corrélation s'en trouve largement diminuée.

Les modèles logarithme de la taille des cernes en fonction du logarithme des variables a été testé et n'a pas apporté de corrélations plus importantes.

b. Analyse de la croissance des deux *Agathis lanceolata*

La méthode d'analyse par axes développée a été appliquée à l'acquisition des profils de largeur des deux *Agathis lanceolata*. Après une observation minutieuse des échantillons, seuls les cernes étant présents sur au moins 4 axes, parmi les 10, ont été retenus comme cernes annuels. Cette opération permet d'éliminer les dédoublements locaux liés probablement à des arrêts de croissance pendant la période végétative annuelle. Le choix de la valeur 4 permet de rendre égal environ le nombre de cernes annuels détectés et le nombre de cernes visibles sur le plus grand axe de l'arbre.

Dans un premier temps, les faux cernes ont été supprimés, car on ne sait pas si leur largeur doit être affectée au cerne précédent ou au cerne suivant ; choisir l'une ou l'autre des solutions introduirait probablement un biais. Dans un deuxième temps, les largeurs des faux cernes supprimés ont été ajoutées à la largeur du cerne suivant mais cette opération fait diminuer les corrélations avec le climat.

b.1. Analyse des corrélations entre la largeur des cernes et le climat

La procédure stepwise de SAS a été utilisée pour évaluer la corrélation entre le climat et la taille des cernes. Les variables à expliquer sont la largeur des cernes ou la largeur corrigée des cernes, calculée en retirant un polynôme du 6^{ème} degré au profil de largeur, pour retirer du signal les variations globales de la croissance qui pourraient être indépendantes du climat. Les variables explicatives proposées sont les mêmes que pour l'*Araucaria* plus quelques unes qui ont été ajoutées, à savoir :

- La température annuelle et les précipitations annuelles sur les trois années n , $n-1$ et $n-2$ précédant et l'année de mise en place du cerne

- Les données de précipitations et de températures mensuelles sur les trois années n, n-1 et n-2
- Les données de précipitations et de températures moyennes par saison (décembre - février, mars - mai, juin - août, septembre - novembre) sur les années n, n-1 et n-2
- Le nombre de mois secs (précipitations < 60 mm) consécutifs pendant les années n, n-1 et n-2
- Les valeurs du SOI, paramètre de caractérisation des cycles El Niño, sur les 3 années n, n-1 et n-2

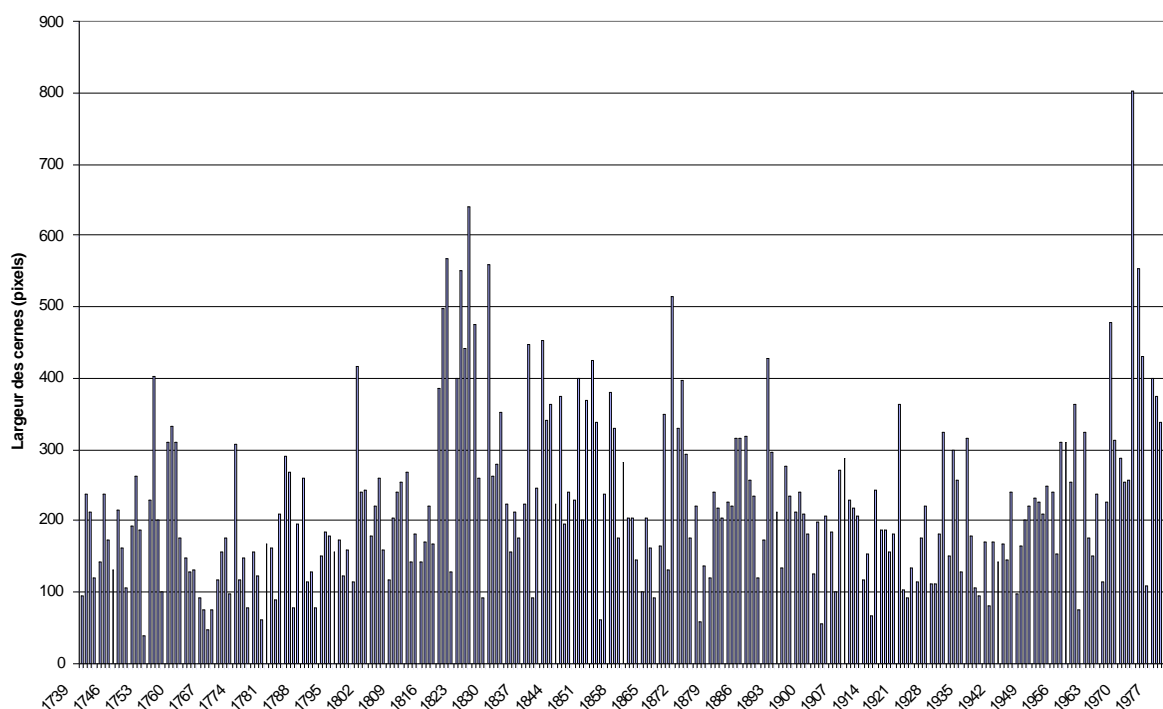


Figure 24 : Profil de largeur des cernes de l'*Agathis lanceolata* 12

Pour les deux échantillons, la largeur des cernes corrigée corrèle moins bien que la largeur brute des cernes. Pour l'*Agathis lanceolata* 12, les variables explicatives retenues par la procédure de SAS et ayant un effet significatif sur la croissance des cernes sont :

Variable	R carré partiel	R carré cumulé	Fischer	P-value
Pjuin (n-1)	0,14	0,14	15,85	0,0001
Pjuin (n-2)	0,06	0,20	6,76	0,0109
Pdécembre (n-1)	0,05	0,25	6,20	0,0147
Pdécembre (n-2)	0,03	0,28	4,61	0,0347
Pjanvier (n-1)	0,04	0,32	4,65	0,0337
Nombre de mois secs (n)	0,05	0,37	3,63	0,0196

Table 2 : Résultat de la procédure REG Stepwise de SAS pour l'*Agathis lanceolata* 12

Pour l13, les variables explicatives retenues par la procédure de SAS et ayant un effet significatif sur la croissance des cernes sont :

Variable	R carré partiel	R carré cumulé	Fischer	P-value
Pjuin	0,05	0,05	1,42	0,0133
Pjuin (n-1)	0,04	0,09	4,05	0,0471
Pjuillet (n-1)	0,04	0,13	4,05	0,0471
Pjuillet (n-2)	0,06	0,19	5,95	0,0167
Pmai (n-2)	0,04	0,23	4,70	0,0328
Pavril (n-2)	0,05	0,28	6,2	0,0147

Table 3 : Résultat de la procédure REG Stepwise de SAS pour l'*Agathis lanceolata* 13

Dans les deux cas, l'effet significatif des pluviométries des mois avril, mai, juin, juillet confirment le résultat obtenu précédemment, à savoir que les mois en fin du cycle végétatif sont déterminants pour la croissance. Dans le cas de l'*Agathis lanceolata* 12, la corrélation avec la pluviométrie de décembre de l'année n-1 et n-2, pourrait indiquer que les mois du début du cycle végétatif sont aussi déterminants pour la croissance.

Les corrélations avec des variables relatives aux années n, n-1 et n-2 peuvent être interprétées de deux manières :

- La réponse de la croissance aux variables climatiques est complexe, la croissance de l'année n peut en particulier dépendre des réserves accumulées au cours des années n-1 et n-2, elles-mêmes dépendantes des conditions climatiques de ces mêmes années. Auquel cas, la corrélation est faible pour chaque variable mais sur l'ensemble de la série de donnée.
- La croissance répond aux variables climatiques de l'année en cours mais nos profils présentent des erreurs de recalage de un ou deux ans. Auquel cas, la corrélation avec les variables des années n-1 et n-2 pourrait être forte localement dans les endroits décalés du profil. Pour l'*Agathis lanceolata* 12 par exemple, les variables P juin (n) et P juin (n-1) sortent avec, à peu près, le même paramètre estimé (différence non significative avec un test de Fischer) ; cette observation permet d'appuyer cette seconde hypothèse.

Cependant, pour les deux échantillons cependant, l'ajustement global du modèle (R^2 cumulé), ne dépassant pas 37 %, il est impossible d'établir un modèle prédictif ; il reste une part très importante de la variabilité observée qui ne s'explique pas par les variables climatiques proposées.

Les autres variables, telles que les variables climatiques annuelles, saisonnières ou le SOI, ne corrélaient pas avec la croissance de l'arbre. Des corrélations du logarithme de la

largeur des cernes en fonction du logarithme des variables explicatives n'améliorent pas les résultats statistiques.

b.2. Analyse spectrale de l'*Agathis lanceolata* 12

Les périodicités des profils de croissance ont été extraites grâce au logiciel signalysis.

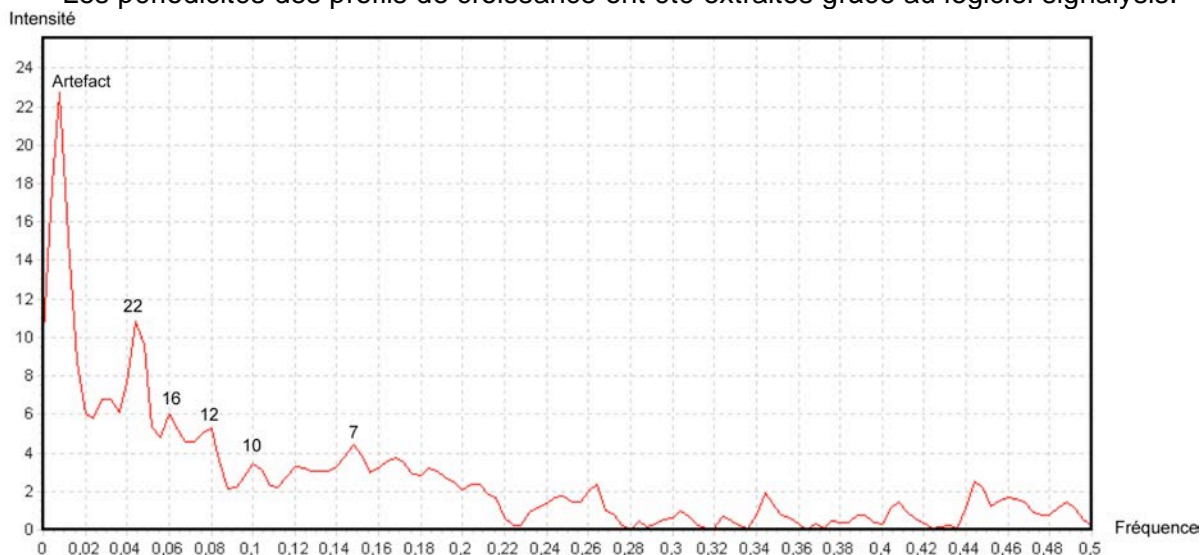


Figure 25 : Analyse spectrale du profil de largeur de cernes de l'*Agathis lanceolata* 12

L'analyse spectrale du profil de largeur de cernes de l'*Agathis lanceolata* 12 fait ressortir quelques périodicités :

- Le premier pic correspond à la largeur de la fenêtre de calcul donc la fréquence la plus basse repérable. Cette périodicité est un artefact lié à la méthode, si l'on change la largeur de la fenêtre de calcul, la fréquence de ce pic change.
- Une période apparaît nettement à 22 ans ; celle-ci pourrait correspondre à une périodicité souvent observée dans les phénomènes naturels, en particulier dans les phénomènes de croissance de végétaux : la période d'inversion magnétique solaire. Cependant, cette périodicité ne se retrouve pas dans la pluviométrie. L'apparition de cette périodicité confirmerait a priori le caractère annuel des cernes.
- Quelques autres périodicités très bruitées apparaissent avec des périodicités entre 5 et 15 ans.

Le signal pour l'*Agathis lanceolata* 13 est beaucoup plus bruité, aucune périodicité ne se distingue vraiment.

b.3. Intérêt de la méthode d'acquisition

Pour évaluer l'intérêt de la méthode de quantification par axe de la largeur des cernes, on peut comparer les résultats de corrélation du profil synthétique avec celui d'un profil de largeur calculé simplement sur un axe.

Parmi les variables P juin (n-1), P juin (n-2), P décembre (n-1), P décembre (n-2) et P janvier (n-1) qui corrôlaient avec la taille des cernes du profil synthétique, aucune n'a d'effet significatif sur la taille des cernes mesurés sur le grand Axe de l'*Agathis lanceolata* 12. Le profil synthétique semble donc apporter une information plus complète qu'un simple axe.

Lorsque l'on soumet largeur des cernes mesurés sur le grand axe à la procédure Stepwise de SAS en proposant dans le modèle les mêmes variables explicatives que dans le paragraphe précédent, une seule variable est significative (pluviométrie totale n-2 mesurée entre août (n-3) et juin (n-2)) et le coefficient de détermination global du modèle dépasse tout juste 5% contre 37% pour le profil synthétique.

La comparaison appliquée sur d'autres axes de l'échantillon indiquent de même des scores de corrélation plus élevés pour le profil synthétique, ce qui prouve bien l'intérêt du signal du tronc entier par rapport à un simple axe

b.4. Comparaison des deux échantillons

Comparaison des variations globales de la croissance

Dans un premier temps, les variations globales de la croissance des *Agathis lanceolata* 12 et 13 ont été comparées en lissant les deux profils par une moyenne mobile.

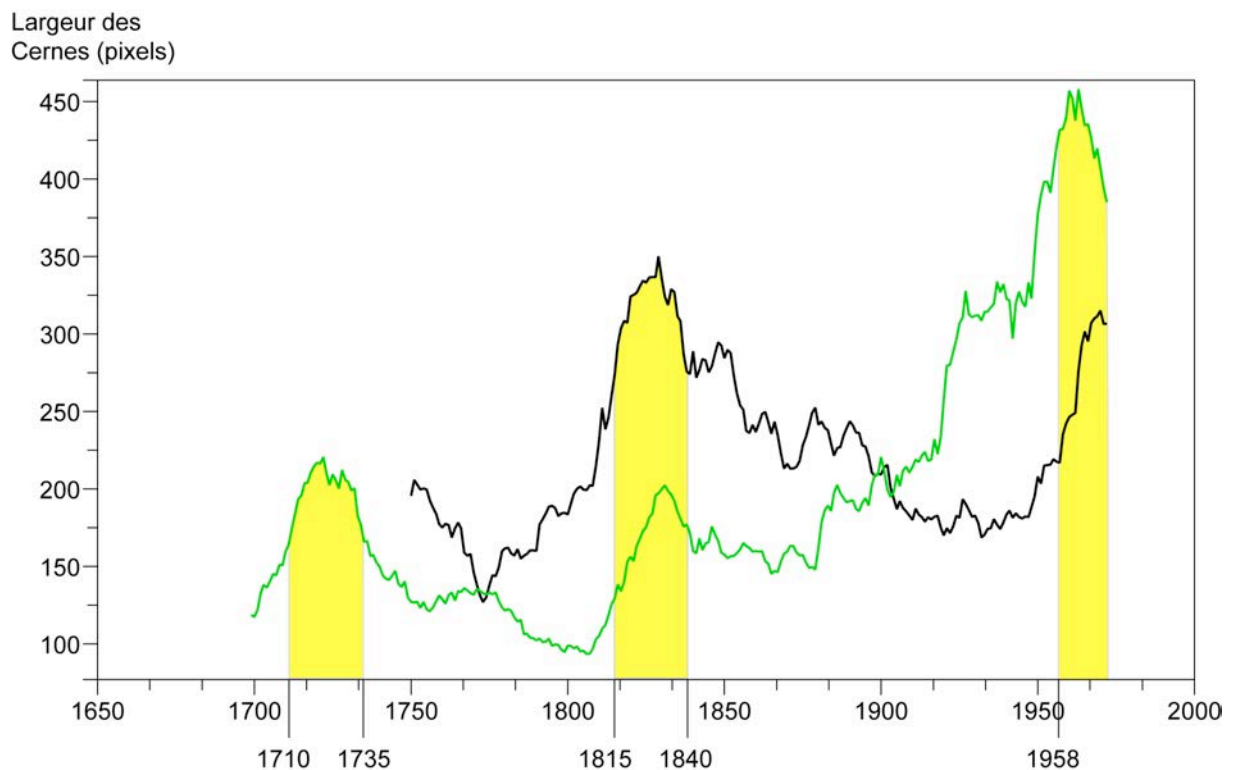


Figure 26 : Analyse des variations globales de la croissance des *Agathis lanceolata* 12 et 13, moyenne mobile de 20 ans. En noir l'*Agathis lanceolata* 12, en vert l'*Agathis lanceolata* 13, en jaune les périodes communes de forte croissance.

Globalement, les profils de croissance lissés sont relativement différents. Cependant, certaines périodes de croissance importante coïncident entre les deux profils :

- Une croissance importante entre 1958 et la mort de l'arbre (1981) pourraient être liée à la construction du grand barrage de Yaté en 1958. En effet, les arbres se trouvant sur le bord de la rivière blanche, juste à côté du lac, la construction du barrage aurait pu causer la remontée de la nappe et donc une croissance plus importante. Le pic de croissance commence plus tôt chez l'*Agathis lanceolata* 13 ; ceci pourrait être lié à la construction du premier barrage dans les premières décennies du XX^{ème} siècle et à la localisation de l'arbre plus en aval que l'*Agathis lanceolata* 12.
- Un pic de croissance est observé entre 1815 et 1840, les causes éventuelles de cette croissance n'ont pas pu être trouvées dans la littérature.
- Une dernière période de forte croissance observée sur l'échantillon 13 se situe entre 1710 et 1735.

Il serait intéressant de s'intéresser à des échantillons récents situés dans la même zone près du lac de Yaté pour analyser la croissance des arbres sur les 20 dernières années.

Comparaison des profils non lissés

Si l'on compare les profils non lissés de l'*Agathis lanceolata* 12 et de l'*Agathis lanceolata* 13, on ne trouve aucune corrélation visuelle. La formalisation de cette observation donne un coefficient de détermination très faible de 11% pour le modèle :

$$Larg eurCer ne_{Agathis12i} = \beta_0 + \beta_1 Larg eurCer ne_{Agathis13i} + E_i$$

Ce très faible coefficient de détermination peut s'expliquer par deux hypothèses :

- Soit, il remet en cause complètement la prédiction des paléoclimats par l'étude de la largeur des cernes des *Agathis lanceolata*, en effet, si deux arbres soumis au même climat ne répondent pas de la même façon, il semble impossible de prédire les paléoclimats à partir d'un profil de largeur de cernes.
- Soit, ce résultat est un artefact lié au fait que nos deux profils sont mal recalés l'un sur l'autre. Autrement dit, la corrélation globale est faible, mais il doit exister des segments décalés où la corrélation est plus importante. On peut essayer de visualiser ceci en effectuant des régressions linéaires par fenêtre et en traçant le graphe suivant :

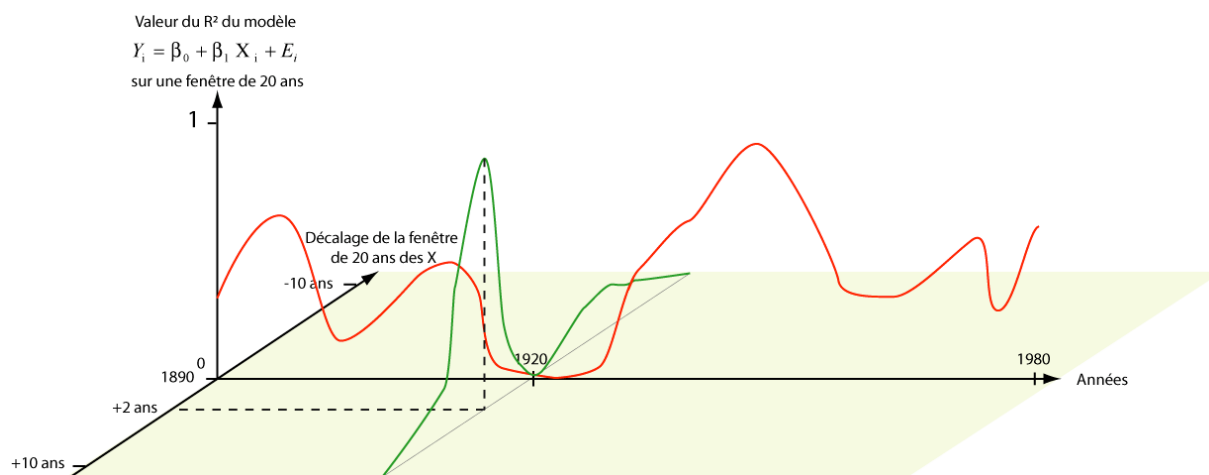


Figure 27 : Principe de lecture du graphe de corrélation par fenêtre avec décalage de la série de donnée de la variable explicative

On calcule le R^2 de la régression entre 2 variables par fenêtre de 20 données. La corrélation globale faible est liée à des corrélations locales fortes (fortes valeurs de la courbe rouge) et des corrélations locales faibles (faibles valeurs de la courbe rouge) car les séries de données sont décalées (exemple ici en 1920). Si l'on décale de plus deux ans les 20 données de la variable explicative, on obtient un très bon R^2 du modèle. Appliquons maintenant cette démarche à nos deux profils de largeur de cerne :

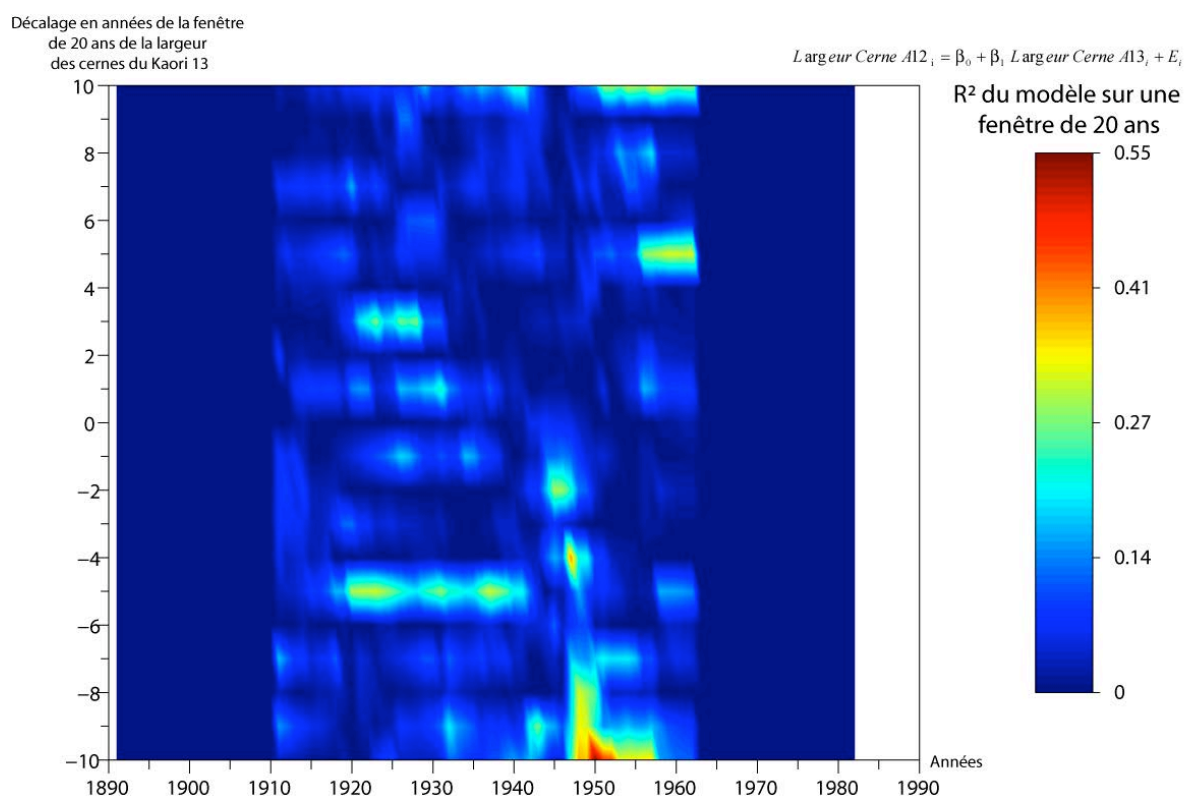


Figure 28 : Régression par fenêtre de 20 ans de la largeur des cernes de l'*Agathis lanceolata* 12 en fonction de celles de l'*Agathis lanceolata* 13. En x, année de centrage de la fenêtre de calcul, en z, valeur du R^2 du modèle, en y, décalage de la variable explicative.

Première observation, quelque soit le décalage et l'année, le coefficient de détermination du modèle ne dépasse pas 0,55 ; ce qui signifie que l'ajustement est dans

tous les cas mauvais. On observe un R^2 relativement fort (environ 35 %) de 1920 à 1940 avec un décalage de moins 5 ans (=le cerne noté 1930 sur l'*Agathis lanceolata* 12 correspondrait au cerne noté 1925 sur l'*Agathis lanceolata* 13), ce qui pourrait témoigner d'un mauvais recalage des deux séries de données. Cependant, si l'on analyse cette régression, l'estimation du paramètre β_1 est négative, ce qui n'a pas de sens ; ce fort R^2 n'a donc aucune valeur. Il n'y a donc aucune relation apparente entre les deux profils de croissance.

La conclusion est donc que les deux échantillons ont des profils de croissance nettement différents et ceci ne semble pas lié à un décalage des deux profils. Dans la mesure où ils ont poussé dans le même environnement climatique, cette observation rend impossible l'utilisation d'un profil de croissance de l'un des *Agathis lanceolata* pour prédire les paléoclimats.

c. Analyse de la croissance de l'*Agathis ovata*

De par la taille de l'échantillon, il a été impossible d'appliquer les méthodes de détection développées au cours du stage. Le profil de largeur de cernes a été obtenu par mesure directe sur un seul rayon du tronc, (en l'occurrence le plus conservé permettant de récupérer le plus d'information).

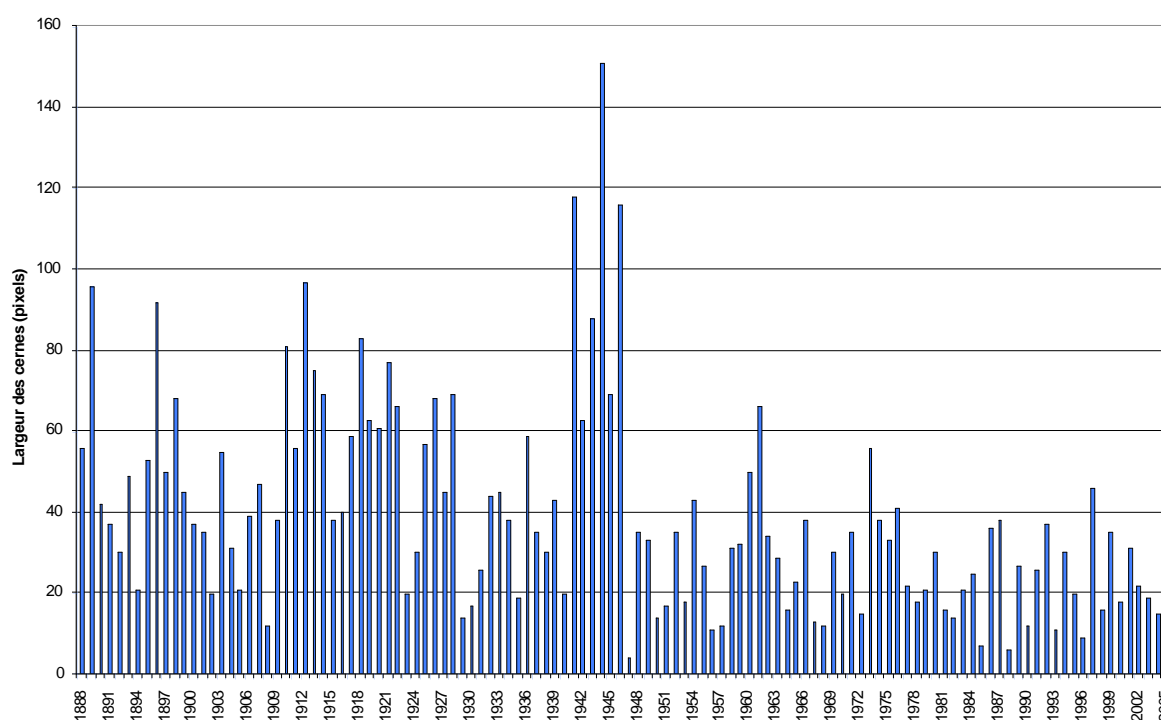


Figure 29 : Profil de largeur des cernes de l'*Agathis ovata*

On utilise comme précédemment la procédure stepwise de SAS ; les variables à expliquer du modèle sont la largeur brute des cernes ou la largeur corrigée par le polynôme ajusté. Les variables explicatives proposées au modèle sont les mêmes que pour les *Agathis lanceolata*.

Les variables ayant un effet significatif sur la largeur des cernes de l'arbre sont :

Variable	R carré partiel	R carré cumulé	Fischer	P-value
Pjuin	0,05	0,05	4,44	0,0379
Pjuin (n-1)	0,05	0,1	4,5	0,0366
Pjuillet (n)	0,05	0,15	5,10	0,0264
Pdécembre (n-2)	0,06	0,21	6,75	0,0110

Table 4 : Résultat de la procédure REG Stepwise de SAS pour l'*Agathis ovata*

Les quatre variables introduites ont toutes un effet statistiquement significatif ($P_v < 0,05$) sur la largeur des cernes malgré le très faible ajustement du modèle. Ces observations vont tout à fait dans le sens des résultats précédents, à savoir que les précipitations de décembre et de juin-juillet auraient une influence sur la croissance de l'arbre. Ce résultat tendrait donc à montrer aussi que les cernes observés sur l'*Agathis ovata* sont annuels et peut sembler contradictoire par rapport à d'autres résultats obtenus récemment : en 2005, Enright et al. ont apportés des preuves qui remettent en cause le caractère annuel des cernes chez *Agathis Muelleri*, une autre Araucariacea du même genre et poussant aussi sur sol ultramafique. En effet, le tronc étudié présentait entre 310 et 380 cernes selon le rayon étudié alors que son centre était daté au carbone 14 à 650 ans plus ou moins 100 ans, ceci montre à priori que l'arbre produit en moyenne un cerne tous les deux ans.

Le profil étudié ici ne correspond qu'à la croissance des cernes observée sur un rayon du tronc car l'acquisition globale était impossible vu la taille de l'échantillon. Ceci constitue une limite à l'analyse statistique, étant donné qu'on a montré dans le II-1-b.3 que l'information d'un seul axe était moins précise que l'information de la surface entière du tronc. De plus, l'ajustement du modèle est vraiment très faible ce qui empêche à priori tout espoir de modèle prédictif des paléoclimats à partir de la largeur des cernes.

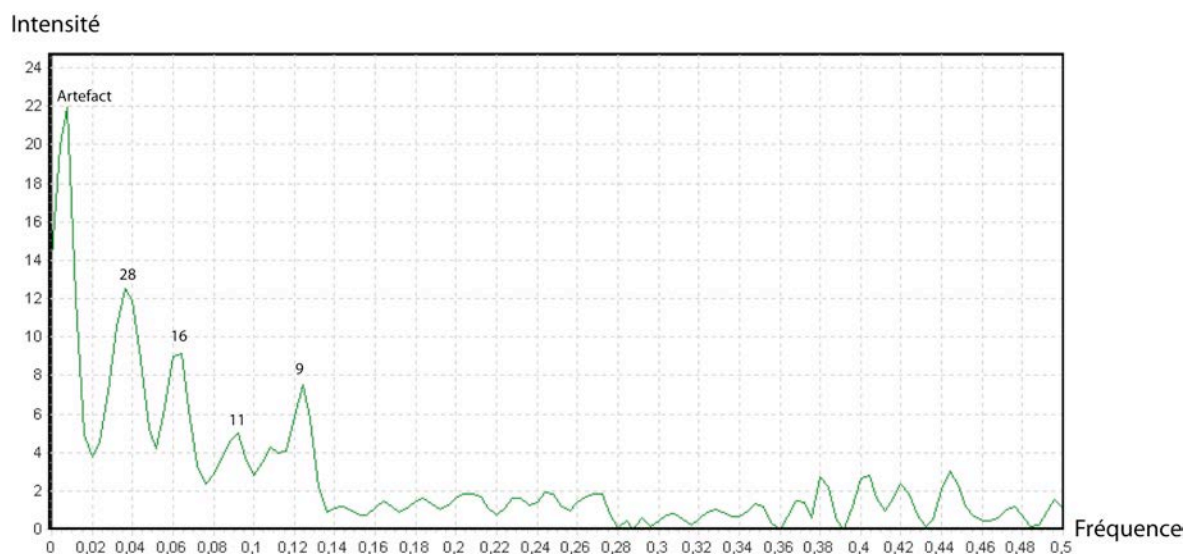


Figure 30 : Analyse spectrale du profil de largeur de cernes de l'*Agathis ovata*

Pour compléter l'étude, on peut réaliser comme précédemment une analyse spectrale du profil de largeur de cerne de l'*Agathis ovata*. Le spectre fait ressortir 4 périodicités importantes dans le signal, de périodes 28, 16, 11 et 9 ans. Premièrement, il faut observer que les périodes sont différentes des périodes trouvées dans le profil de l'*Agathis lanceolata* 12. Les cycles de faible période (9 et 11 ans) pourraient être liés au phénomène climatique El Niño, bien qu'après étude statistique, la relation entre la largeur des cernes et la valeur du SOI ne soit pas statistiquement significative. La signification éventuelle des autres périodicités n'a pas pu être trouvée dans la littérature.

2. Résultat des analyses géochimiques

Les études de géochimie ont porté sur la mesure du $\delta^{18}\text{O}$ dans la cellulose des cernes externes de l'*Agathis lanceolata* 12. Dans un premier temps, 5 échantillons provenant des 5 cernes les plus externes ont été envoyés pour mesure du $\delta^{18}\text{O}$ au CEA de Saclay. Ces cernes sont datés de façon exacte (1977 à 1981) en se référant aux marques annuelles réalisées de 1974 à 1981 sur le tronc de l'*Agathis lanceolata* 12.

Sur ces 5 valeurs, la régression simple de la mesure du $\delta^{18}\text{O}$ sur les précipitations annuelles mesurées entre juillet (n-1) à juin (n) présente un coefficient de détermination supérieur à 90 %. Le modèle est significatif et l'ajustement excellent, ce qui permettrait, si cette corrélation est confirmée sur plus de mesures, d'utiliser le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans les cernes des *Agathis lanceolata* comme proxy des précipitations.

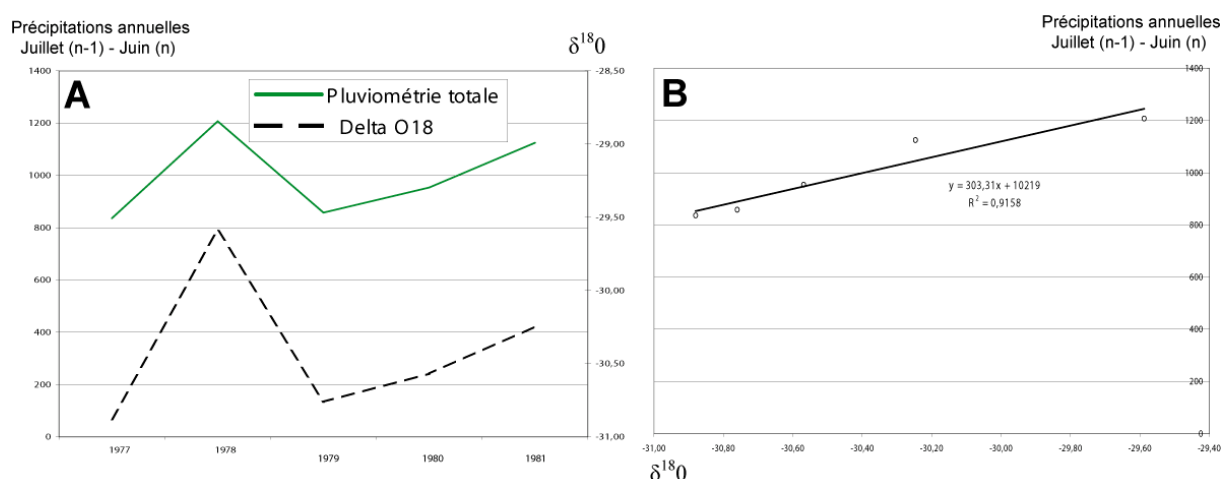


Figure 31 : A- Pluviométrie totale de juillet (n-1) à juin (n) et Delta ^{18}O de la cellulose en fonction de l'année ; B- Régression simple Précipitations annuelles en fonction du Delta ^{18}O

Pour confirmer cette relation très intéressante, 25 autres échantillons de cellulose des cernes suivants de l'*Agathis lanceolata* 12 ont été prélevés et envoyés à Paris pour l'analyse du $\delta^{18}\text{O}$. Cependant, les résultats des analyses ne sont pas arrivés avant la fin du stage.

3. Synthèse et limites de l'étude

Au bilan, la méthode de mesure par axe développée pendant le stage permet d'obtenir efficacement une information sur la croissance de l'arbre. Cette information est plus reliée au climat que la simple mesure des cernes sur un seul axe et présente de ce fait un intérêt.

Cependant, même en optimisant la corrélation entre la largeur des cernes et les variables climatiques, celles-ci n'expliquent qu'une très faible part de la variabilité observée dans la largeur des cernes, ce qui rend impossible l'utilisation de ces largeurs de cernes pour établir un modèle prédictif des paléoclimats. Ce résultat reste relatif aux échantillons étudiés. On peut en particulier penser que cette faible relation de la croissance au climat est

due au fait que les sols ultramafiques où poussaient les 3 échantillons d'Agathis sont très carencés et constituent, de ce fait, à l'instar du climat, le facteur principal limitant la croissance. Pour compléter l'étude, il serait donc intéressant de s'intéresser à d'autres espèces de la famille des Araucariacées mais poussant hors de la zone ultramafique.

En dehors de la problématique paléoclimatologique, la croissance des différents échantillons étudiés semble être sensible aux mêmes facteurs que sont la pluviométrie de juin, de juillet et la pluviométrie de décembre. L'une des hypothèses d'explication serait que le cycle de croissance de ces arbres se déroule de décembre à juin ; des précipitations importantes aux bornes de la période végétative permettrait alors de l'allonger significativement et donc d'augmenter la croissance.

Il existe, d'autre part, des limites à notre approche scientifique. Même si l'approche en deux dimensions de la croissance de l'arbre est plus informative que l'approche une seule dimension d'un axe, elle reste tout de même une approximation de la croissance réelle 3 dimensions du tronc. En particulier, nous avons observé des hétérogénéités de la largeur des cernes le long de l'axe longitudinal du tronc et cette hétérogénéité n'est pas prise en compte par la méthode. L'une des grosses limites de l'analyse statistique est la différence entre la localisation de nos échantillons et le lieu de mesure du climat ; nous savons en effet que la pluviométrie, par exemple, est environ deux fois plus importante vers le lac de Yaté, d'où proviennent trois de nos échantillons, qu'à Nouméa et la corrélation des précipitations des deux lieux n'a pu être vérifiée à cause du manque de données.

La géochimie enfin offre un espoir très important quant à l'utilisation du $\delta^{18}\text{O}$ comme proxy des précipitations annuelles. Ce sujet mérite d'être confirmé et approfondi.

Conclusion

Cette étude a d'abord permis le développement d'un outil de mesure efficace de la croissance bidimensionnelle des arbres qui s'est avéré apporter plus d'information que l'approche basique de quantification des largeurs de cernes sur un seul axe. Cependant, la croissance des Araucariacées étudiées au cours du stage ne semble pas répondre de manière simple aux paramètres climatiques, rendant impossible l'utilisation de ces profils de croissance comme proxy du climat. Il faut nuancer ce résultat par le fait que les échantillons prélevés poussaient sur un milieu très carencé en minéraux, on pourrait donc s'intéresser à d'autres Araucariacées se développant sur des sols plus riches dans le Nord de la Nouvelle-Calédonie pour compléter ce résultat. Il ressort tout de même que les pluviométries des mois de juin, juillet et décembre ont un effet significatif sur la croissance des Araucariacées étudiées, ce qui nous permet d'avancer l'hypothèse que le cycle de croissance de l'arbre se déroulerait de décembre à juillet avec une période d'arrêt de croissance pendant la saison froide puis la saison sèche, à l'origine de la formation du cerne. Les corrélations de la croissance avec le climat, faibles mais significatives sembleraient indiquer que les cernes des *Agathis lanceolata* et *ovata* sont annuels, résultat renforcé chez les *Agathis lanceolata* par les marquages annuels du tronc, alors que l'*Araucaria columnaris* poussant sur sol plus riche serait susceptible de créer plusieurs cernes certaines années. La présence de faux cernes incomplets et d'anomalies de croissance reste la première limite à l'étude statistique en rendant quasi impossible le recalage des largeurs de cerne sur les séries temporelles climatiques. On a aussi pu montrer qu'on retrouvait dans les variations globales de la croissance des 2 *Agathis lanceolata*, des périodes communes de croissance importantes qui pourraient être reliées à des paramètres environnementaux autres que climatiques tels que la construction du barrage de Yaté.

Enfin, les résultats de géochimie, de quantification du $\delta^{18}\text{O}$ dans la cellulose des cernes semblent très prometteurs. La combinaison de la corrélation importante Pluviométrie $\delta^{18}\text{O}$ avec le caractère annuel des cernes permettrait d'offrir un outil précis de mesure des paléoprécipitations, par analyse de la cellulose présente dans chaque cerne d'un échantillon. Ce résultat reste toutefois à confirmer avec plus de mesures et plus d'échantillons.

Les perspectives de développement de la dendrochronologie en Nouvelle-Calédonie sont donc, en priorité, la confirmation des résultats de géochimie, mais aussi l'analyse de la croissance d'échantillons poussant sur sols plus fertiles. La mise au point d'une méthode non destructive d'échantillonnage, par exemple de carottage ou d'exploration acoustique des arbres serait très intéressante car les très vieux échantillons sont actuellement quasi limités aux zones de réserves naturelles protégées. Enfin, une dernière approche serait d'évaluer la corrélation avec le climat d'autres paramètres mesurables des cernes tels que la densité du bois tardif (Late wood density).

Bibliographie

- Boniseгна, J.A., Villalba, R., Amarilla, L., Ocampo, J., Studies on tree rings, growth rates and age-size relationships of tropical tree species in misiones, Argentine. IAWA Bulletin 10:161-169.
- Corrège, Y., 2002, La variabilité climatique interannuelle à inter décennale dans le Pacifique tropical durant l'Holocène : une perspective corallienne. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, IRD Nouméa.
- Corrège, T., Quinn, T., Delcroix, T., Le Cornec, F., Récy, J., and Cabioch, G., 2001. Little Ice Age sea surface temperature variability in the southwest tropical Pacific. Geophys. Res. Lett., 28:3477-3480.
- Daudin, J.J., Robin, S., Vuillet, C., 2001, Statistique inférentielle : idées, démarches, exemples. Presses Universitaires de Rennes.
- Détienne, P., 1989, Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. IAWA Bulletin 10:123-132.
- Eckstein, D., Sass, U., Baas, P., 1994, Growth Periodicity in Tropical Trees. IAWA Journal 16:323-442.
- Enright, N. J., Miller, B. P., Jaffré, T., unpublished, Ecology and population of the endemic New Caledonian conifer, *Araucaria Muelleri* (Araucariaceae).
- Enright, N. J., Miller, B. P., Perry, G. L. W., 2003 Demography of the long lived conifer *Agathis ovata* in maquis and rainforest, New Caledonia. Journal of vegetation Science 14:625-636.
- Jacoby, G., 1989, Overview of tree-ring analysis in tropical regions. IAWA Bulletin 10:99-108.
- Kalela-Brundin, M., 1999, Climate Information from Tree Rings. Thèse doctorale, Université d'Umeå, Suède.
- Lebarbier E., Robin, S., 2004, Exemples d'application du modèle linéaire. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- McCoy, S., Jaffré, T., Rigault, F., Ash, J.E., 1999, Fire an succession in the ultramafic maquis of New Caledonia. Journal of Biogeography, 26:579-594.
- Meteo France, 1995, Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie. Meteo France.
- Nasi, R., 1982, Essai pour une meilleure connaissance et une meilleure compréhension des Araucariacées dans la végétation calédonienne. Mémoire de 3^{ème} année, Centre technique forestier tropical de Nouvelle-Calédonie.
- Perry, L.W., Enright, N.J., 2001, Spatial modelling of landscape composition and pattern in a maquis-forest complex, Mont Do, New Caledonia. Ecological modelling 152: 279-302.
- Poussart, P; F., Shrag, D. P., 2005, Seasonally resolved stable isotope chronologies from northern Thailand deciduous trees. Earth and planetary sciences Letters 235 : 752-765.
- Press, H., Vetterling, W., Teukolsky, S., Flannery, B., 1992, Numerical Recipes in Fortran The Art of scientific computing. Cambridge University Press.

- Quinn, T.M., Crowley, T.J., Taylor, F.W., Hénin, C., Joannot, P. and JOIN, Y., 1998. A multi-century stable isotope record from a New Caledonia coral : interannual and decadal sea-surface temperature variability in the southwest Pacific since 1657 A.D. *Paleoceanography*, 13:412-426.
- Rafalli-Delerce, G., Masson-Delmotte, V., Dupouey, J. L., Stievenard, M., Breda, N., Moisselin, J. L., 2003, Reconstruction of summer droughts using tree-ring cellulose isotopes : a calibration study with living oaks from Brittany (western France). *Tellus B*, 1-15.
- Rigg, L. S., Enright, N. J., Jaffré, T., 1998, Stand structure of the emergent conifer *Araucaria laubenfelsii*, in maquis and rainforest, Mont Do, New Caledonia. *Australian Journal of Ecology* 23:528-538.
- Schweingruber, F., 1996, *Tree Rings and Environment Dendroecology*. WSL/FNP.
- Stevenson, J., Dodson, J.R., Prosser, I.P., 2001, A late Quaternary record of environmental change and human impact from New Caledonia. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 168:97-123
- Stevenson, J., 2004, A late-Holocene record of human impact from the southwest coast of New Caledonia. *The Holocene*, 14.6:888-898
- Stevenson, J., Hope, G., 2005, A comparison of the late Quaternary forest changes in New Caledonia and northeastern Australia. *Quaternary Research*, 64: 372-383.
- Suikura, T., 1989, A method to measure radial increment in tropical trees. *IAWA Bulletin* 10:147-154.
- Wardle, P., Coleman, M.C., 1992, Evidence of rising upper limits of four native New Zealand forest trees. *New Zealand Journal of Botany* 30:303-314.

Annexe 1 : Code Matlab du programme de détection des cernes utilisé pour l'acquisition du profil de largeur des cernes de *Araucaria columnaris*.

```

clear;

cwd = pwd;
cd(tempdir);
pack
cd(cwd)

clf;
z=10; %demi largeur de l'intervalle à prospecter autour de c
q=2; %demi largeur à prospecter pour chaque point pris entre c et d
pli=[30,18]; %distance entre chaque point, successivement les paramètres de remplacement si une erreur apparait
tpt=4; %taille des points sur l'image

%Cerne=dlmread('Cerne.txt','t');
M=imread('pin.jpg','jpg'); %importer M la matrice de l'image
Coordonnees=dlmread('coordonnéestot.txt','t');
sm=size(M);

npc=0
er2=0; %comptabilise le nombre d'erreurs de type 2
er3=0;

for co=52:52

a=[Coordonnees(co,2),Coordonnees(co,1)];
b=[Coordonnees(co,4),Coordonnees(co,3)];
li=pli(1); %attribution de la valeur par défaut du paramètre li en début de cerne
Cerne (npc+1,:)= [co,1,a(1),a(2)];
Cerne (npc+2,:)= [co,2,b(1),b(2)];
npc=npc+2;

en=0; %comptage du nombre de point après erreur

for pt=1 : 500

npc=npc+1;
v=((b-a)/norm(b-a))*li; %avec li la longueur en pixel entre deux points de mesure

c=round(b+v);

x=[-v(2) , v(1)];
x=x/norm(x);

%calcul des points d stockés dans la matrice D
dmax=round(c+z*x);
D=[0,0];
D2=[0,0];
D=chemin(c,dmax);

sD=size(D);
for i=1:sD(1)
    D2(sD(1)+1-i,:)=D(i,:);
end

D2(sD(1)+1,:)= [0,0];
for i=1:sD(1)
    D2(sD(1)+1+i,:)=D(i,:);
end
D=D2;

sD=size(D);

S=[0,0,0,0];

for u=1:sD(1)

```

```

%calcul de la matrice de déplacement horizontal DH
d=D(u,:)+c;
DH=[0,0];
DHinv=[0,0];
DH=chemin(b,d);
DHinv=chemin(d,b);

%calcul de la matrice de déplacement vertical DV
e=round(b+q*x);
e2=round(b-q*x);
DV=[0,0];
DVinv=[0,0];
DV=chemin(e,e2);
DVinv=chemin(e2,e);

sDV=size(DV);
sDH=size(DH);

%Calcul des points du contour du parallélogramme
P=[0,0];
id=1;

for i=1:sDH(1)
    P(id,:)=e+DH(i,:);
    id=id+1;
end

id1=id-1;

for i=1:sDV(1)
    P(id,:)=P(id1,:)+DV(i,:);
    id=id+1;
end

id2=id-1;

for i=1:sDH(1)
    P(id,:)=P(id2,:)+DHinv(i,:);
    id=id+1;
end

id3=id-1;

for i=1:sDV(1)
    P(id,:)=P(id3,:)+DVinv(i,:);
    id=id+1;
end

%Réorganisation de la matrice P en G pour lecture facile par la boucle suivante
sP=size(P);
mi=min(P(:,1));
ma=max(P(:,1));
j=1;
G=[0,0];

for i=mi:ma
    G(j,1)=i;
    t=1;

    for k=1:sP(1)
        if P(k,1)==i & t==2
            X(2)=P(k,2);
            end

        if P(k,1)==i & t==1
            X(1)=P(k,2);
            X(2)=P(k,2);
            t=2;
            end

        end

    G(j,2)=min(X);
    G(j,3)=max(X);

```

```

    j=j+1;
end

%Integration sur le parrallélogramme de la densité de couleur

sG=size(G);
s=0;
np=0;
ET=[0];

for i=1:sG(1)
    n1=G(i,1);
    n2=G(i,2);
    n3=G(i,3);

    for j=n2:n3
        s=s+double(M(n1,j));

        np=np+1;
    end
end

% Construction de la matrice synthèse S pour le calcul du minimum de densité de couleur

S(u,1)=u;
S(u,2)=d(1);
S(u,3)=d(2);
S(u,4)=s/np;

end

sS=size(S);
mi=S(1,4);
Re=1;

for i=1:sS(1)
    if S(i,4)<mi
        Re=S(i,1);
        mi=S(i,4);
    end
end

Cerne (npc,:)=co,pt+2,S(Re,2),S(Re,3)];

a=b;
sC=size(Cerne);
b=[Cerne(npc,3),Cerne(npc,4)];

%%%%%%%%%%%% Test si le point sort de l'image
%%%%%%%%%%%%

if (b(1)<30)|(b(2)<(30))|(abs(b(1)-sm(1))<50)|(abs(b(2)-sm(2))<50)
    'erreur 1 : le point sort de l image'
    'cerne'
    co
    'point='
    b
    break;
end

%%%%%%%%%%%% Test si la trajectoire sort du cerne %%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%

if pt>16

    if li==pli(2)
        en=en+1;
    end

    Y=b;
    X=[Cerne(npc-5,3),Cerne(npc-5,4)];
    O=[Cerne(npc-10,3),Cerne(npc-10,4)];
    x=X-O;
    y=Y-O;
    teta=0;
    Costeta=(x(1)*y(1)+x(2)*y(2))/(norm(x)*norm(y));

```

```

    teta=(acos(abs(Costeta)))*360/(2*pi);
    if (teta>15) & (li==pli(1))
        'erreur 2 : le trajet dévie du cerne'
        'cerne'
        co
        'point='
        b
        er2=er2+1;
        li=pli(2);
        npc=npc-15;
        a=[Cerne(npc-1,3),Cerne(npc-1,4)];
        b=[Cerne(npc,3),Cerne(npc,4)];
        en=1;
    end

    if (li==pli(2)) & (teta>15)
        'erreur 3 : Même en changeant le paramètre, il y a déviation de la cerne !'
        'cerne'
        co
        'point='
        b
        er3=er3+1;
        npc=npc-8;
        break;
    end

    if en==20
        li=pli(1)
        en=0
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
end

%Graphisme du Résultat
for i=1:sC(1)
    a1=Cerne(i,3);
    b1=Cerne(i,4);

    for j=a1-tpt:a1+tpt
        for k=b1-tpt:b1+tpt
            M(j,k)=255;
        end
    end
end

end

Cerne
'Nombre d erreurs de type 2'
er2
'Nombre d erreurs de type3'
er3
imwrite(M,'result.jpg','jpg');
dlmwrite('Cernetemp.txt',Cerne,'\t');

```

Fonction définie dans le même répertoire dans le fichier « chemin.m »

```

function [X]=chemin(a,b)

n=max(abs(b(2)-a(2)),abs(b(1)-a(1)));
y=b-a;

for i=1:n
    X(i,:)=round(i*y/n);
end

```

Annexe 2 : Code Matlab du programme de détection des cernes par axes

```

%%%%%%%%%%%%%% Paramètres du Programme
%%%%%%%%%%%%%% Centre=[12709,10088]; % Coordonnées du centre du tronc en pixel
l=50; % Largeur de la bande à analyser en pixels

r1=1; % Bornes du profil en cernes repères. Numéro de la première cerne repère en comptant depuis le centre
r2=1; % Numéro de la dernière cerne repère en comptant depuis la périphérie

nbp1=4; % Nombre de points inférieurs au max autour du point étudié
nbp2=8; % nombre de points de chaque coté du point étudié qui comptent dans le calcul de la diff max ; doit etre >ou = à 1

ami=0; % angle mini
ama=360; % angle maxi
na=10; % nombre d'axe
dir='Resultattot'; % nom du repertoire ou sont stockées les matrices

lf=100; % Largeur de la fenetre pour l'égalisation du contraste

Diffmin=[6,6,6,4,6,4,4,10,6,7,6,9,6,5,7,8,6,7,9,5,5,6,4,6,6]; % Paramètres issus du programme d'optimisation
I=imread('traces.jpg','jpg'); % importer I la matrice de l'image des tracés
M=imread('kaori12.jpg','jpg'); % importer I la matrice de la photo du tronc
%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%

x0=[0,1];
for ax=1:na

    clear Cernes Axe Repere TraceCernes TraceRepere;
    Teta=ami+((ax-1)*(ama-ami)/na);
    Angle=Teta;

    if Teta==0
        Angle=1;
    end

    Teta=(Teta*2*pi)/360;
    x=[-sin(Teta),cos(Teta)];
    sl=size(I);
    Axe=[0];

    %%%%%%%%%%%%%%% Retrouve la position des cernes repères sur le premier axes dans la base liée à la
    droite%%%%%%%%%%%%%%
    p=Centre;
    n=0;
    t=0;
    Repere=[0,0];
    id=1;
    while (p(1)>1)&(p(1)<sl(1))&(p(2)>1)&(p(2)<sl(2))
        n=n+1;
        p=round(Centre+n*x);
        if (I(p(1),p(2))<10) & (t==0)
            Repere(id,1)=n;
            t=1;
            id=id+1;
        end

        if (I(p(1),p(2))==255) & (t==1)
            t=0;
        end
    end

    Nmax=[n,0];

    %%%%%%%%%%%%%%% Retrouve la position des cernes repères sur le premier axes dans la base liée à la
    droite%%%%%%%%%%%%%%
    y=[-cos(Teta),sin(Teta)];
    Centre2=Centre+l*y;
    p=Centre2;
    n=0;
    t=0;

```

```

id=1;

while (p(1)>1)&(p(1)<sl(1))&(p(2)>1)&(p(2)<sl(2))
    n=n+1;
    p=round(Centre2+n*x);
    if (l(p(1),p(2))<10) & (t==0)
        Repere(id,2)=n;
        t=1;
        id=id+1;
    end
    if (l(p(1),p(2))==255) & (t==1)
        t=0;
    end
end
Repere(:,3)=Diffmin';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Intègre les données de couleur%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sR=size(Repere);
id=1;
Axe=[0];
V=[0,0];
for i=r1:sR(1)-r2

    %Inclinaison des cernes
    d1=Repere(i,2)-Repere(i,1);
    d2=Repere(i+1,2)-Repere(i+1,1);
    v1=(y*1+d1*x); %vecteur inclinaison de la première cerne repere
    no=Repere(i+1,1)-Repere(i,1);
    d=((d2-d1)*x)/(no-1);
    t=0;

    for j=Repere(i,1):Repere(i+1,1)-1
        v=(v1+d*t)/l; %inclinaison pour la somme, moyenne pondérée en fonction de la position des deux cernes repere
        t=t+1;
        origine=Centre+j*x;
        pxorigine=round(origine);
        s=double(M(pxorigine(1),pxorigine(2)));

        for k=1:l
            for p=-l:l
                px=round(origine+v*k+x*l);
                s=s+double(M(px(1),px(2)));
            end
        end

        Axe(id)=s/l+1;
        id=id+1;
    end
end

%Recalcule les données de couleur en pourcentage de la gamme de couleur présente sur l'image
sA=size(Axe);
ma=max(Axe);
mi=min(Axe);
am=ma-mi;
for j=1:sA(2)
    Axe(j)=(((Axe(j)-mi)/am)*99)+1;
end

sA=size(Axe);

for q=r1:sR(1)-r2
    for k=Repere(q,1):Repere(q+1,1)
        Axe(2,k-Repere(r1,1)+1)=Repere(q,3);
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Algorithme qui repère les maximum locaux, les cernes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Cernes=[0];
u=1;

if nbp1>nbp2
    nbp=nbp1;

```

```

else
nbp=nbp2;
end

for i=nbp+1:sA(2)-nbp
diffmin=Axe(2,i);
Ctest=1;
test2=0;
    for k=i-nbp1:i+nbp1
        if Axe(1,i)>Axe(1,k)
            Ctest=0;
        end
    end

m=Axe(1,i-1);
for f=1:nbp2
    if Axe(1,i-f)>m
        m=Axe(1,i-f);
    end
end

m2=Axe(1,i-1);
for f=1:nbp2
    if Axe(1,i+f)>m2
        m2=Axe(1,i+f);
    end
end

if ((m-Axe(1,i)> diffmin) & (m2-Axe(1,i)> diffmin))&&((m-Axe(1,i)> diffmin) & (m2-Axe(1,i)> diffmin))&&((m-Axe(1,i)> diffmin) & (m2-
Axe(1,i)> diffmin))
test2=1;
end

    if (test2==1 & Ctest==1)
        Cernes(u)=i;
        u=u+1;
    end
end

%%%%%% Trace les graphes
sR=size(Repere);
TraceRepere=ones(1,sA(2));

for i=r1:sR(1)-r2
    b=Repere(i);
    TraceRepere(b-Repere(r1,1)+1)=100;
end

sC=size(Cernes);
TraceCernes=ones(1,sA(2));

for i=1:sC(2)
    b=Cernes(i);
    TraceCernes(b)=100;
end

clf;
Subplot(2,1,1);
plot(Axe(1,:), 'k');
hold on;
plot(TraceCernes, 'r');
plot(TraceRepere, 'g');
Subplot(2,1,2);
plot(Axe(2,:));
sA=size(Axe);
Axe=Axe(:,1:sA(2)-1);
sTR=size(TraceRepere);
TraceRepere(sTR)=100;
TraceCernes(sTR)=100;

idr=1;
for i=2:sTR(2)-1
    if TraceRepere(i)==100
        rp=0;
        t=0;

```

```
while t==0;
    if rp<10
        if (TraceCernes(i-rp)==100)
            TraceCernes(i-rp)=1;
            t=1;
            TraceCernes(i)=100;
        elseif (TraceCernes(i+rp)==100)
            TraceCernes(i+rp)=1;
            t=1;
            TraceCernes(i)=100;
        else
            rp=rp+1;
        end
    else
        TraceCernes(i)=100;
        t=1;
    end
end

end
end

Sortie=Axe';
Sortie(:,3)=TraceCernes';
Sortie(:,4)=TraceRepere';
sS=size(Sortie);
ns=0;
nr=0;
id=1;
Cernes2=[0];
for i=1:sS(1)
    if (Sortie(i,3)==100)&(Sortie(i,4)==100)
        ns=ns+1;
        nr=nr+1;
        Cernes2(id,1)=i;
        Cernes2(id,2)=2;
        id=id+1;
    elseif Sortie(i,3)==100
        ns=ns+1;
        Cernes2(id,1)=i;
        Cernes2(id,2)=1;
        id=id+1;
    end
end

end

sC2=size(Cernes2);
Cernes2(1,3)=1;
for i=2:sC2(1)
    Cernes2(i,3)=Cernes2(i,1)-Cernes2(i-1,1);
end

Cernes=Cernes2;
ax2=int2str(ax);
fichier1=strcat(dir,'\',ax2,'Parametres.dat');
fichier2=strcat(dir,'\',ax2,'Sortie.dat');
fichier3=strcat(dir,'\',ax2,'Cernes.dat');
Param=[sS(1),Angle,nr,ns];

    dlmwrite(fichier1,Param,'\t');
    dlmwrite(fichier2,Sortie,'\t');
    dlmwrite(fichier3,Cernes,'\t');
end
```

Annexe 3 : Code de la procédure de régression multiple SAS

```
PROC IMPORT OUT= WORK.Agathis12
    DATAFILE= "C:\Documents and Settings\Vincent Lieubeau\Bureau\Axes Kaori
    12\Statistiques\4.xls"
    DBMS=EXCEL REPLACE;
    SHEET="Mat$";
    GETNAMES=YES;
    MIXED=NO;
    SCANTEXT=YES;
    USEDATE=YES;
    SCANTIME=YES;

RUN;

title 'Regression lineaire multiple';
Proc REG data=Agathis12;
    model Cerne=PJan PFev PMar PAvr PMai PJui PJuil PAou PSep POct PNov PDec /
    selection=stepwise slentry=0.05 slstay=0.05;
    output out=DonneesResidus p=Predite R=residu;
run;

title 'Graphe des residus';
Proc Gplot data=DonneesResidus;
    plot Predite*Residu;
run;
```