AgroParisTech ENGREF
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

FORMATION DES INGÉNIEURS FORESTIERS

Office National des Forêts

Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme

Mémoire de fin d'études

Dorian LELOU
18e promotion (2007-2010)

Juin 2010

Photo de couverture : pins sylvestres guités et présentant un déficit foliaire marqué dans le Verdon (04).

En l’absence de mention contraire, les photographies, figures, tableaux et annexes sont de l’auteur de ce rapport.

AgroParisTech - ENGREF
Formation des ingénieurs forestiers

Office national des forêts

Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme

Mémoire de fin d'études

Dorian LELOU
18e promotion (2007-2010)

Juin 2010

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF	**TRAVAUX D'ÉLÈVES**
TITRE : Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme	**Mots-clés** : dépérissement, pin sylvestre, sapin pectiné, déterminisme spatial, canicule 2003.
AUTEUR : Dorian LELOU	**Promotion :** FIF 18e
Caractéristiques : 1 volume ; 92 pages ; 20 figures ; 32 tableaux ; 8 annexes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office national des forêts – Direction territoriale Méditerranée – Pôle recherche et développement en sylviculture et aménagement.

Nom du responsable : Jean LADIER

Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : Eric Lacombe

Tronc commun ☑ **Option** ☐ **D. d'approfondissement** ☐	**Stage en entreprise** ☐ **Stage à l'étranger** ☐ **Stage fin d'études** ☑ **Date de remise :**	**Autre** ☐

Contrat avec Gref Services Nancy ☐ **OUI** ☑ **NON**

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

☐ **Consultable et diffusable**
☐ **Confidentiel de façon permanente**
☐ **Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable**

Résumé

Ce mémoire porte sur les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné survenus dans les Alpes-Maritimes suite aux épisodes de sécheresse de 2003 à 2007. L'étude vise à identifier les conditions écologiques qui favorisent l'apparition du dépérissement et son intensité. Dans ce but, un modèle comportant plusieurs facteurs du milieu est établi pour le pin sylvestre selon l'approche écologique par échelles emboîtées. Il permet d'améliorer la compréhension du déterminisme des dépérissements et de caractériser les situations où ils pourraient survenir. Les limites du modèle tiennent principalement des données initiales, ainsi que de la démarche mise en œuvre.

Abstract

This report deals with the diebacks of Scots pine and Silver fir that occured in the Alpes-Maritimes after the 2003-to-2007 drought. The study aims at identifying ecological conditions which favour dieback occurrence and intensity. A multi-factor model for Scots pine based on hierarchical scale approach was built for this purpose. It allows better understanding of dieback mecanisms and characterization of places where it could occur in the future. Limitations of the results are mainly due to both available data and methods.

Remerciements

J’adresse mes plus vifs remerciements à Jean Ladier (ONF Manosque), mon maître de stage, pour m’avoir guidé tout au long de cette étude et m’avoir fourni les éléments nécessaires pour la mener à bien.

J’exprime également toute ma reconnaissance à Eric Lacombe (AgroParisTech-ENGREF Nancy) pour avoir pris la peine de se déplacer à plusieurs reprises pour suivre l’évolution du travail, et m’avoir donné des pistes pertinentes pour la poursuite de l’étude.

Je remercie aussi tous ceux qui m’ont apporté des éléments utiles dans le cadre du stage :
Michel Vennetier (Cemagref Aix-en-Provence), Jean-Pierre Renaud (ONF Nancy), Thierry Quesney (ONF Avignon), Lilian Micas (ONF St-André-les-Alpes), Michel Barbey (ONF Sisteron), Hendrik Davi (INRA Avignon), Emilie Paris, Benoît Boutefeu, Paul Kersalé et Caroline Fehlmann (ONF Nice).

Merci enfin à tout le personnel de l’ONF de Manosque pour son accueil, et à celui de Nice pour m’avoir permis de travailler occasionnellement là-bas.

Table des matières

Remerciements 1

Table des matières 2

Introduction 5

1. Contexte et problématique : les dépérissements récents du pin sylvestre et du sapin pectiné dans la région méditerranéenne et dans les Alpes-Maritimes. 6

1.1. Contexte géographique et naturel : les Alpes du sud et le département des Alpes-Maritimes. 6

1.1.1. Le contexte général : les Alpes du sud. 6
1.1.2. La zone d'étude : le département des Alpes-Maritimes. 6
1.1.3. Les principales formations forestières des Alpes-Maritimes 9

1.2. Connaissances sur l'autécologie du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes du sud. 10

1.2.1. Autécologie du pin sylvestre dans les Alpes du sud. 10
1.2.2. Autécologie du sapin pectiné dans les Alpes du sud. 12

1.3. Les conditions climatiques post-2003 et les dépérissements forestiers dans la région méditerranéenne. 14

1.3.1. Le climat de 2003 à 2007 dans la région méditerranéenne. 14
1.3.2. Influence des excès du climat sur les forêts de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (d'après Vennetier et al., 2007). 15

1.4. Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes : dispositifs de suivi et caractérisation. 16

1.4.1. Le dispositif de suivi de l'état sanitaire des forêts dans les Alpes-Maritimes. 16
1.4.2. Etat des lieux de la santé des forêts de pin sylvestre et de sapin pectiné en 2008. 16
1.4.3. Symptômes des dépérissements observés en 2009. 17

1.5. Problématique de l'étude et démarche générale 18

1.5.1. Le contexte de l'étude. 18
1.5.2. La demande de l'Office national des forêts et le sujet du stage. 19
1.5.3. La démarche générale adoptée. 19

2. Méthodologie générale pour l'étude analytique du déterminisme des dépérissements. 21

2.1. Présentation des données disponibles. 21

2.1.1. Les données de dépérissement. 21
2.1.2. Les facteurs écologiques. 21

2.2. Méthode de constitution du jeu de données initial. 22

2.2.1. La méthode de la grille de points et le problème de l'effectif. 22
2.2.2. Les peuplements sains ou dépérissants en tant qu' « observations ». 24

2.3. Traitement statistique des données : étude des relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu. 26

2.3.1. Utilisation de la donnée transformée (quantitative) de taux de mortalité 27

2.3.1.1. Régression linéaire (facteurs quantitatifs). 27
2.3.1.2. Analyse de la variance (facteurs qualitatifs). 27
2.3.2. Retour à la nature initiale du taux de mortalité (variable qualitative en classes). 29
2.3.2.1. Régression logistique (facteurs quantitatifs) 29
2.3.2.2. Test du khi-deux (identification de valeur-seuils). 29
2.4. Présentation des premiers résultats de l'analyse des données et commentaires. 33
2.4.1. Cas du pin sylvestre 33
2.4.1.1. Résultats 33
2.4.1.2. Commentaires. 34
2.4.2. Cas du sapin pectiné. 35
2.4.2.1. Spécificités des données pour le sapin pectiné. 35
2.4.2.2. Résultats 36
2.4.2.3. Commentaires. 36
2.5. Discussion. 37
3. Approche plurifactorielle des dépérissements et construction de modèles d'explication. 38
3.1. Corrélations entre variables et analyses multivariées 38
3.1.1. Analyse en composantes principales et corrélations entre variables quantitatives. 38
3.1.2. Autres relations entre les variables : valeurs des facteurs quantitatifs selon la zone climatique 39
3.1.3. Mise en relation des facteurs quantitatifs avec le taux de mortalité. 39
3.1.3.1. Régression PLS 40
3.1.3.2. Analyse factorielle discriminante 40
3.2. Construction pas à pas d'un modèle d'explication selon la méthode des valeur-seuils. 41
3.2.1. Intérêt de la combinaison des facteurs pour l'explication du taux de mortalité. 41
3.2.2. Méthodologie de construction du modèle d'explication à partir de valeur-seuils. 42
3.2.3. Présentation du modèle obtenu pour le pin sylvestre et éléments d'évaluation. 43
3.3. Analyse des relations entre le taux de mortalité du pin sylvestre et certaines variables climatiques. .. 45
3.4. Construction d'un modèle d'explication du dépérissement selon l'approche par échelles emboîtées. 47
3.4.1. Présentation de l'approche par échelles emboîtées. 47
3.4.2. Utilisation de l'approche par échelles emboîtées pour la construction du modèle d'explication. . 48
3.4.3. Présentation du modèle obtenu pour le pin sylvestre et éléments d'évaluation. 49
3.4.4. Modification des valeur-seuils et analyse de la sensibilité du modèle. 52
3.5. Bilan sur la démarche de construction du modèle d'explication et sur le résultat obtenu. 53
4. Limites et perspectives 54
4.1. Les limites dues aux données initiales et à la démarche de l'étude. 54
4.1.1. Les limites dues aux données initiales. 54
4.1.2. Bilan et limites de la démarche adoptée. 54
4.2. Intérêts et limites des résultats de l'étude, perspectives de validation 55
4.2.1. Intérêt et limites des résultats obtenus pour le dépérissement du pin sylvestre. 55
4.2.2. Possibilités de validation du modèle proposé 56
4.3. Perspectives d'utilisation du modèle pour la planification de la gestion. 57
4.3.1. La caractérisation des stations à risque et la planification de la gestion. 57
4.3.2. Quelles interventions dans les stations « à risque » et dans les peuplements dépérissants ? 59

Conclusion.....60

Références bibliographiques 61

Contacts 63

Table des annexes.....64

Annexe 1 : Carte de la mortalité du pin sylvestre dans les Alpes-Maritimes en 2008. 65

Annexe 2 : Carte de la mortalité du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes en 2008.....66

Annexe 3 : Méthodologie pour l'analyse des relations entre les facteurs du milieu quantitatifs et le taux de mortalité – schéma explicatif. 67

Annexe 4 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (pin sylvestre).....68

Annexe 5 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (sapin pectiné). 75

Annexe 6 : Méthode suivie pour la définition des intensités de mortalité. 82

Annexe 7 : Macro Visual Basic Excel permettant de déterminer l'intensité de mortalité à partir des données initiales selon le modèle pour le pin sylvestre. 83

Annexe 8 : Clé du modèle d'explication de la mortalité du pin sylvestre – version simplifiée. 84

-

Introduction

Dans la région méditerranéenne, berceau de civilisations anciennes, l'action de l'homme a eu depuis très longtemps une influence marquée sur le milieu et sur les forêts en particulier. Il y a quelques siècles encore, une très large part des versants de montagnes et de collines était aménagée en terrasses pour être cultivée, et le pâturage des troupeaux concernait jusqu'aux zones montagneuses reculées et difficilement accessibles. La forêt était alors défrichée pour la mise en culture des terrains, exploitée intensivement pour l'utilisation du bois ou encore pâturée. Le surpâturage des montagnes des Alpes du sud a d'ailleurs conduit aux actions menées dans le cadre de la politique de Restauration des terrains en montagne, à la fin du dix-neuvième siècle dans le but d'enrayer l'érosion de ces zones pentues : mise en défens des montagnes, et reboisement artificiel de certaines zones.
Au siècle suivant, l'exode rural a touché les campagnes méditerranéennes, et l'activité agricole a fortement régressé dans les zones pentues, d'exploitation difficile selon les méthodes modernes. La forêt en a profité pour s'étendre sur ces terrains anciennement cultivés ou pâturés et maintenant délaissés. Cette dynamique forestière de reconquête est d'abord le fait d'essences pionnières telles que les pins ou le mélèze, puis d'autres essences s'installent sous leur couvert et ont vocation à constituer la forêt mature (cas du hêtre ou du sapin pectiné à l'étage montagnard). Ces essences ont un fort tempérament expansionniste, les unes s'exprimant en terrain découvert et les autres prenant la succession des formations pionnières. Le pin sylvestre et le sapin pectiné en sont des exemple-types.

Du fait de cette dynamique forestière de reconquête particulièrement marquée, la région méditerranéenne présente aujourd'hui un taux de boisement nettement supérieur à la moyenne française. C'est notamment le cas du département des Alpes-Maritimes, dont plus de la moitié de la surface est boisée (Inventaire forestier national, 2004). La forêt tient une nouvelle place dans l'économie régionale aujourd'hui très marquée par le tourisme, avec la reconnaissance de sa place majeure dans l'identité des paysages locaux. Les autres services rendus par la forêt (protection contre les risques naturels, protection des sols, des eaux, de la biodiversité, stockage du carbone, économie de la filière forêt-bois locale) sont également aujourd'hui mieux reconnus. La considération de l'importance de la forêt s'est manifestée ces dernières années, lors de la constatation du mauvais état de santé des boisements, par l'inquiétude suscitée chez des acteurs locaux tels que le Conseil général des Alpes-Maritimes et le Conseil régional de Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Ces constatations font état d'un dépérissement se produisant dans de nombreux peuplements forestiers. D'après Landmann (1994), ce terme de dépérissement désigne un phénomène complexe et évolutif, caractérisé par un ensemble d'anomalies indiquant une détérioration de l'état de santé des arbres. Sa complexité tient au fait qu'il n'est généralement pas imputable à une seule cause, mais qu'il se trouve sous la dépendance de multiples facteurs. Ce phénomène évolue dans le temps, souvent de manière relativement lente s'étalant de ce fait sur plusieurs années.
Constaté suite à la canicule de 2003 et aux années de sécheresse qui ont suivi, ce dépérissement a notamment concerné les forêts de pin sylvestre et de sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes. Mais, il ne touche pas l'ensemble des peuplements de la même manière, signe de la complexité du phénomène et de l'interaction de la sécheresse exceptionnelle avec d'autres facteurs. Parmi ceux-ci, cette étude vise à identifier les facteurs écologiques qui peuvent expliquer les différences d'atteinte des peuplements, pour d'une part améliorer la compréhension du déterminisme des dépérissements dans sa composante spatiale (pourquoi apparaissent-ils ici et pas ailleurs ?), et d'autre part proposer des éléments permettant d'anticiper l'évolution du phénomène (notion de station « à risque » de dépérissement).

Ce mémoire présente d'abord le contexte général de l'étude : le cadre géographique et écologique, les deux essences retenues, et les caractéristiques du dépérissement constaté, avant de préciser la problématique et la démarche adoptée. Ensuite, la présentation des données disponibles est suivie par la recherche d'une méthode d'analyse qui leur est adaptée. Celle-ci, une fois identifiée, permet d'obtenir des premiers résultats en considérant chaque facteur écologique indépendamment des autres (approche analytique). L'étude s'attache ensuite à construire pour le pin sylvestre un modèle permettant d'expliquer le déterminisme du dépérissement au moyen de plusieurs facteurs, afin de répondre à la problématique initiale. Le mémoire présente enfin le bilan de la démarche adoptée et des résultats obtenus, en insistant sur leurs limites et leurs perspectives pour l'interprétation du déterminisme du dépérissement et l'identification des situations où il pourrait se manifester à l'avenir.

1. Contexte et problématique : les dépérissements récents du pin sylvestre et du sapin pectiné dans la région méditerranéenne et dans les Alpes-Maritimes.

1.1. Contexte géographique et naturel : les Alpes du sud et le département des Alpes-Maritimes.

1.1.1. Le contexte général : les Alpes du sud.

L'ensemble biogéographique des Alpes du sud (*cf.* figure 1) constitue la zone d'application du *Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du sud françaises* (Ladier & Rey, 2008). Ce domaine recouvre des conditions écologiques diverses, avec une influence méditerranéenne s'estompant vers le nord. Il est cependant toujours caractérisé par un climat contraignant, avec une large amplitude thermique journalière et annuelle, ainsi qu'un régime pluviométrique irrégulier (Ladier & Rey, 2008).

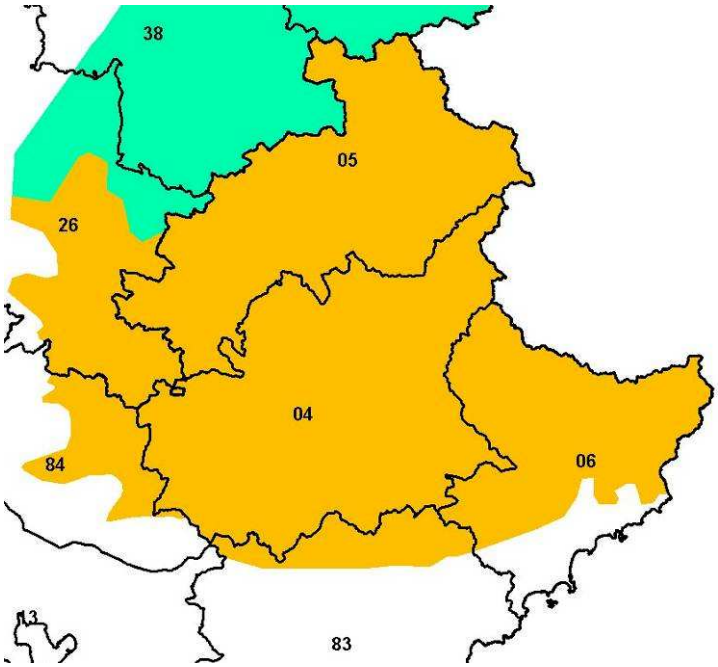


Figure 1 : Les Alpes du sud françaises (en jaune) (Source : Ladier & Rey, 2008).

1.1.2. La zone d'étude : le département des Alpes-Maritimes.

- Situation

Situé dans le sud-est de la France et de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le département des Alpes-Maritimes (06) appartient à l'ensemble biogéographique des Alpes du sud pour la majorité de sa surface, à l'exception d'une frange littorale de basse altitude qui s'élargit vers l'ouest (*cf.* figure 1).
Il est bordé par l'Italie à l'est, la mer Méditerranée au sud, le département du Var (83) à l'ouest et le département des Alpes-de-Haute-Provence (04) au nord-ouest.

- Relief et géologie

Ce petit département (429 378 ha d'après l'Inventaire forestier national, 2004) présente un relief très marqué, les altitudes variant du niveau de la mer à plus de 3 000 m. A cela s'ajoute la diversité des caractéristiques morphologiques et géologiques, d'où une très grande variabilité des conditions écologiques du département.

Le département des Alpes-Maritimes a fait l'objet de plusieurs zonages écologiques, assis sur diverses bases, mais qui sont relativement concordants quant à leur délimitation. Ainsi, l'Inventaire forestier

national (2004) distingue à partir du relief et de la géologie les grandes unités naturelles suivantes (qui sont ensuite subdivisées pour donner les régions forestières) :

- la *Haute-chaîne*, formée pour l'essentiel du massif cristallin et cristallophyllien du Mercantour et de son enveloppe sédimentaire. Ce massif culminant à plus de 3 000 m est constitué de granites, gneiss et schistes cristallins, et il est ceint d'importantes séries de roches sédimentaires (poudingues, grès, argiles, dolomies). Les crêtes de cette région naturelle présentent deux directions principales : est-ouest et nord-sud ;
- les *Préalpes*, localisées immédiatement au sud de la Haute-chaîne, n'excèdent pas 1 800 m d'altitude. Elles sont majoritairement constituées d'assises calcaires et marneuses, avec par endroits des dépôts de flysch ou de grès à ciment calcaire. On y retrouve les mêmes directions de plissement est-ouest et nord-sud ;
- les *coteaux de Grasse et de Nice*, le long du littoral qui ne dépassent guère 600 m d'altitude. La géologie est essentiellement composée de roches calcaires et marneuses, et de faciès dolomitiques, schisteux ou gypseux auxquelles se rajoutent quelques roches de nature détritiques et métamorphiques.

- Climat

Le Cemagref (Boisseau *et al*., 1992) a aussi proposé un zonage écologique de la région méditerranéenne basé sur la définition de types thermiques et pluviométriques, complétée par une analyse de la lithologie. Les ensembles écologiques définis, regroupant des petites régions naturelles, présentent des limites très proches de celles des unités naturelles de l'Inventaire forestier national (voir § précédent), et ils sont respectivement dénommés *Montagnes sud-alpines*, *Préalpes du sud* et *Bas Languedoc et Basse Provence calcaire*.

Le climat de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a également fait l'objet d'une étude spécifique par Panini (1999), qui définit 14 types pluviométriques sur l'ensemble de la région, dont 4 concernent le département des Alpes-Maritimes. Ces types sont délimités géographiquement (*cf.* figure 2), et les zones ainsi formées présentent une correspondance très forte avec celles définies par le Cemagref (Boisseau *et al*., 1992) et l'Inventaire forestier national (2004). Ces correspondances sont données par le tableau 1 :

Auteur	**Panini, 1999**	**Boisseau et al., 1992**	**Inventaire forestier national, 2004**
Critères utilisés	*Précipitations*	*Pluie, température et lithologie*	*Relief et géologie*
Correspondances	4 – Côte d'Azur	Bas Languedoc et Basse Provence calcaire	Coteaux de Grasse et de Nice
	11 – Canjuers-Cheiron	Préalpes du sud	Préalpes
	12 – Mercantour	Montagnes sud-alpines	Haute-chaîne
	13 – Hautes vallées Var-Verdon	Montagnes sud-alpines	Haute-chaîne

Tableau 1 : Correspondances entre les zones écologiques définies par divers auteurs dans les Alpes-Maritimes.

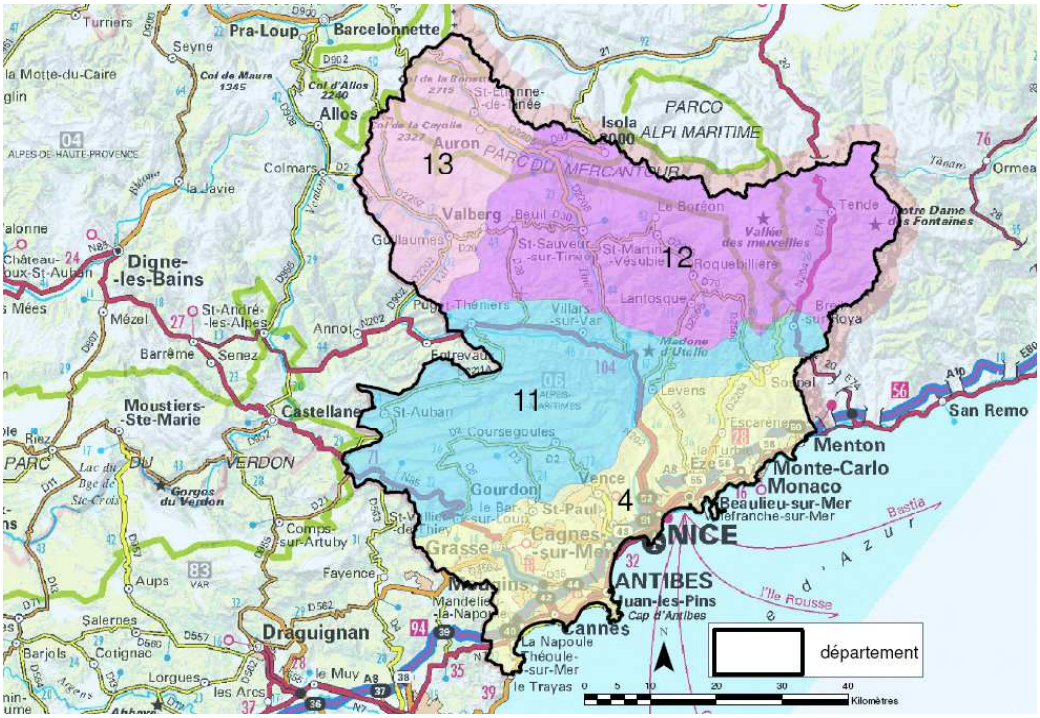


Figure 2 : Situation du département des Alpes-Maritimes et des zones pluviométriques définies par Panini (1999) (fond de carte : Scan1000 de l'Institut géographique national). *Les dénominations correspondant aux chiffres sont données dans les tableaux 1 et 2.*

On note cependant que la zone de *Montagnes sud-alpines* ou *Haute-chaîne* a été découpée en deux par Panini (1999) sur des critères pluviométriques. Cet auteur donne pour les types pluviométriques les caractéristiques suivantes (tableau 2) :

Zone pluviométrique	Régime pluviométrique	Pluies de mai à août	Pluies annuelles
4 – Côte d'Azur	AHPE	166 ± 27 mm	909 ± 83 mm
11 – Canjuers-Cheiron	AHPE	267 ± 26 mm	1 079 ± 110 mm
12 – Mercantour	APHE	306 ± 31 mm	1 023 ± 73 mm
13 – Hautes vallées Var-Verdon	APHE	311 ± 18 mm	1 032 ± 67 mm

Tableau 2 : Caractéristiques des types pluviométriques représentés dans les Alpes-Maritimes (Source : Panini, 1999). *Le régime pluviométrique donne le classement des saisons par hauteur de précipitation décroissante ; les valeurs de pluie sont sous la forme moyenne ± écart-type.*

La hauteur de pluie de mai à août est le critère qui discrimine le plus les zones pluviométriques : elle augmente quand on s'éloigne du littoral pour se rapprocher des montagnes de l'arrière-pays. Ces données permettent aussi de voir que les zones pluviométriques 12 et 13 ont des caractéristiques très proches, ce qui peut justifier leur regroupement dans une zone qui correspondrait aux régions *Montagnes sud-alpines* ou *Haute-chaîne*. Cette zone montagneuse est également caractérisée par d'importantes chutes de neige, d'un mètre en moyenne au dessus de 800 m d'altitude (Inventaire forestier national, 2004).

Pour chacun des ensembles climatiques, les conditions thermiques sont approximativement les suivantes (*cf.* tableau 3) :

Région naturelle	Température moyenne de janvier	Température moyenne de juillet	Nombre de jours de gel par an
Coteaux de Grasse et de Nice	7 à 11 °C	22 à 25 °C	Rare à très rare
Préalpes	3 à 7 °C	20 à 24 °C	70 à 90
Haute-chaîne	-2 à 5 °C	14 à 21 °C	80 à 130

Tableau 3 : caractéristiques thermiques des ensembles écologiques (Source : Inventaire forestier national, 2004, adapté).

A l'échelle du département, les conditions de chaleur et de sécheresse diminuent donc d'autant plus qu'on s'éloigne du littoral en allant vers le nord. Les variations de ces paramètres climatiques restent très importantes entre les Préalpes et la Haute-chaîne.

- Etages bioclimatiques

A une échelle plus fine, les variations climatiques au sein des régions présentant un relief marqué (soit l'essentiel du département à l'exclusion de la zone littorale) sont essentiellement dues à l'altitude et à l'exposition qui influencent à la fois les précipitations et les températures (Ladier, 2004). Généralement, le climat est d'autant plus froid et humide que l'altitude est élevée, avec cependant un décalage dépendant de l'exposition. Ces variations climatiques dues au relief sont synthétisées par la définition d'étages bioclimatiques (ou étages de végétation) représentés sur la figure 3.

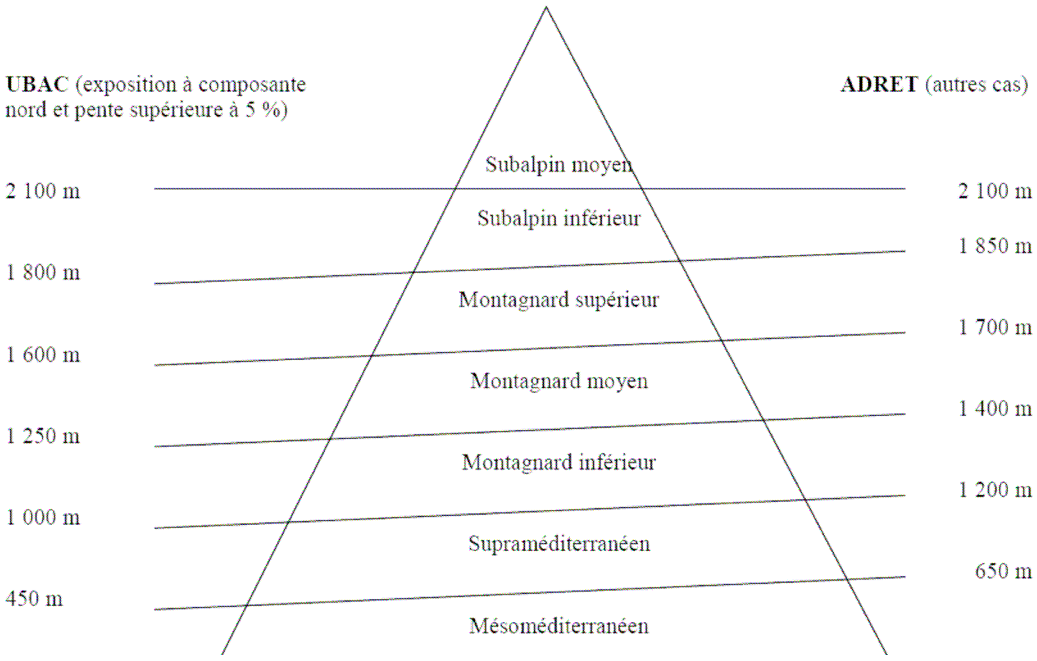


Figure 3 : Les étages bioclimatiques dans les Alpes-Maritimes (Source : Office national des forêts, 2008, modifié).

La grande diversité des conditions écologiques au sein du département se retrouve dans la variété des formations boisées qu'il supporte.

1.1.3. Les principales formations forestières des Alpes-Maritimes

D'après l'Inventaire forestier national (2004), le département des Alpes-Maritimes présente en 2002 un taux de boisement de 52,3 %, nettement supérieur à la moyenne nationale (26,9 %) et supérieur également à celui de 1985 (44,5 %). Les principales formations forestières du département sont récapitulées dans le tableau 4.

Essence(s)	**Surface (ha)**	**Taux (%)**
Pin sylvestre	79 210	43,0
Chênes pédonculé, rouvre, pubescent	27 226	14,8
Mélèze d'Europe	22 423	12,2
Pin d'Alep	13 288	7,2
Sapin pectiné	10 560	5,7

Tableau 4 : Surfaces des formations boisées de production des cinq essences principales les plus représentées dans les Alpes-Maritimes (Source : Inventaire forestier national, 2004).

Des essences typiquement méditerranéennes, adaptées aux conditions chaudes et sèches de basse altitude (pin d'Alep) côtoient d'autres espèces des plus hautes altitudes, très résistantes au froid (mélèze).

Le pin sylvestre est largement dominant dans le département, il a notamment colonisé de vastes surfaces de terrains agricoles abandonnés. Le sapin pectiné arrive en cinquième position. Ces deux essences sont l'objet principal de cette étude, et leur répartition ainsi que leur comportement sont fortement influencés par les facteurs du milieu (ou facteurs écologiques).

1.2. Connaissances sur l'autécologie du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes du sud.

1.2.1. Autécologie du pin sylvestre dans les Alpes du sud.

Le pin sylvestre est l'essence pionnière caractéristique des Alpes du sud, aux étages supraméditerranéen et montagnard ; très plastique et bien adaptée aux perturbations, elle colonise les milieux ouverts qui sont principalement les espaces abandonnés par l'agriculture depuis la fin du 19^{e} siècle (Office national des forêts, 2008 ; Médail, 2001).

- Climat

Essence boréale et montagnarde, le pin sylvestre présente une aire de répartition très vaste, dont il atteint la limite méridionale en région méditerranéenne (Médail, 2001 ; Ladier, 2004). Cette essence est réputée très plastique, notamment vis à vis du climat (*cf.* tableau 5), et très résistante au froid mais sensible aux bris de neige (Office national des forêts, 2008).

Paramètre climatique	**Amplitude**	**Optimum**
Température moyenne annuelle	4 à 12 °C	6 à 9°C
Précipitations moyennes annuelles	700 à 1300 mm	900 à 1000 mm

Tableau 5 : Réponse du pin sylvestre à quelques paramètres climatiques (Source des données : Alexandrian, 1992).

Dans la région méditerranéenne, le pin sylvestre est cependant sensible aux fortes sécheresses (Ladier, 2004). La croissance est ainsi corrélée positivement avec les précipitations de printemps et d'été (Thabeet, 2008 ; Tessier, 1982). Une corrélation positive est également identifiée avec les températures de fin d'hiver (Thabeet, 2008) et de début de printemps (Tessier, 1982), alors que les températures de juin montrent une action défavorable (Thabeet, 2008). Ces études montrent le rôle important du bilan hydrique climatique et notamment du stress hydrique estival sur la croissance du pin sylvestre en région méditerranéenne (Thabeet, 2008).

Dans certains cas particuliers, Tessier (1982) a constaté une corrélation inverse entre la croissance et les pluies automnales, qu'il met en relation avec une nature marneuse du substrat et une situation topographique de fond de vallée et de pente quasi nulle pouvant favoriser l'engorgement du sol.

- Altitude - exposition

La gamme altitudinale occupée par le pin sylvestre va de 500 à 2000 m (Alexandrian, 1992), l'optimum se situant entre 800 et 1500 m (Médail, 2001). Selon ce même auteur, l'essence atteint même 2100 m dans les montagnes méditerranéennes (notamment Alpes-Maritimes et Pyrénées-Orientales).

Dans la région méditerranéenne, le pin sylvestre est essentiellement présent à l'étage montagnard (Médail, 2001) où il remplace le hêtre et le sapin dans les stations sèches (Alexandrian, 1992). Il est également très abondant dans l'étage supraméditerranéen en accompagnement du chêne pubescent, et il se localise en ubac à basse altitude (chaînons calcaires provençaux : Sainte Baume, Sainte Victoire) (Alexandrian, 1992).

De manière générale, le pin sylvestre est peu sensible à l'exposition, même si il est plutôt présent en adret, sans doute en raison d'une concurrence moindre de la part des autres essences forestières (Office national des forêts, 2008).

La croissance du pin sylvestre apparaît meilleure dans l'étage montagnard que dans le supraméditerranéen où il semble souffrir du déficit hydrique estival, les meilleures conditions étant au contraire réunies dans l'étage montagnard supérieur (Office national des forêts, 2008). Selon la même source, aux altitudes plus élevées (subalpin inférieur), c'est le froid qui devient le facteur limitant.

Utilisant la télédétection pour estimer l'état sanitaire de plusieurs peuplements de pin sylvestre de la région méditerranéenne française, Thabeet (2008) a mis en évidence l'importance de variables telles que l'altitude et l'exposition dans les dépérissements observés depuis 2003 : schématiquement, les peuplements les plus atteints fin 2006 sont ceux des altitudes inférieures à 1000-1200 m, et présentent des expositions de secteurs nord et ouest, ou bien sont sur des zones plates. L'auteur interprète cette dernière relation comme un défaut d'adaptation des peuplements de versants frais à la sécheresse, les rendant plus vulnérables à ces évènements climatiques que les populations en expositions chaudes.

- Topographie - sol

Très frugal et résistant à la sécheresse édaphique, le pin sylvestre supporte les sols superficiels, peu fertiles et même compacts, bien qu'il préfère les sols légers, profonds et plutôt acides (Office national des forêts, 2008 ; Alexandrian, 1992).

Cependant, les conditions édaphiques et topographiques locales ont une grande influence sur la fertilité, essentiellement *via* le bilan hydrique édaphique, *ie.* la quantité d'eau disponible pour le système racinaire (Office national des forêts, 2008). Cette variable intègre notamment l'épaisseur du sol, sa charge en éléments grossiers, la pente, la topographie locale (convexe/concave), la position de la station dans la topographie générale (situation dans la pente)…

Le pin sylvestre est par ailleurs sensible à la présence de calcaire actif ($CaCO_3$) dans le sol, ce qui à un effet négatif sur sa croissance (Ladier, 2004).

Les paramètres locaux sont également reliés à l'état sanitaire des peuplements de pin sylvestre : des corrélations significatives (mais moins importantes qu'avec l'altitude et l'exposition) ont été mises en évidence avec la pente, la position dans la pente, et le caractère concave ou convexe du terrain (Thabeet, 2008). L'état sanitaire le plus favorable est rencontré sur les pentes faibles (inférieures à 10-15°), sur les bas de pente et sur les zones concaves.

- Synthèse des potentialités du milieu

A partir de ces éléments, le guide *Sylviculture du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur* (Office national des forêts, 2008) propose une clé simple de détermination de la potentialité du milieu pour la croissance du pin sylvestre à partir des critères suivants :

-étage bioclimatique (croisement de l'exposition et de l'altitude),
-bilan topoédaphique local (volume prospectable et topographie),
-carbonatation de la terre fine.

- Variabilité - adaptations

En lien avec l'étendue de son aire de répartition et la grande diversité des conditions écologiques qu'il occupe, le pin sylvestre présente une grande diversité infraspécifique puisqu'il existe au moins 150 variantes (sous-espèces, variétés, races) décrites, dont huit taxons en région méditerranéenne (Médail, 2001). Cette variabilité génétique peut se traduire par des caractères morphologiques (structure du bois, forme des aiguilles, port général) et également écologiques : il existerait une race méditerranéenne, en situation sans doute relictuelle aux ubacs des chaînons de basse Provence présentant une activité cambiale bloquée lors de la sécheresse estivale et une réaction négative face aux précipitations automnales (Médail, 2001). Par ailleurs, le même auteur cite la possibilité d'hybridation naturelle entre le pin sylvestre et le pin à crochets, des individus intermédiaires ayant été signalés dans les Alpes du sud.

1.2.2. Autécologie du sapin pectiné dans les Alpes du sud.

Le sapin pectiné est l'essence représentative des forêts matures de l'étage montagnard à l'étage subalpin inférieur dans les Alpes du sud, souvent en compagnie du hêtre (sauf dans les Alpes internes) (Delahaye Panchout & Ladier, 2006). Essence d'ombre très expansionniste, elle succède aux espèces pionnières (telles que le pin sylvestre) en se régénérant facilement sous leur couvert, même hors des conditions écologiques favorables à l'espèce (Delahaye Panchout, 2004).

- Climat

Le sapin pectiné, qui présente une répartition très morcelée dans les Alpes du sud (Delahaye Panchout, 2004), y atteint sa limite climatique (Alexandrian, 1992). Très résistant au froid, le sapin pectiné est très sensible à la sécheresse (Alexandrian, 1992). L'extension du sapin en région méditerranéenne est ainsi limitée à des conditions écologiques particulières.

La répartition du sapin pectiné dans les Alpes du sud, et l'influence de paramètres écologiques (notamment climatiques) sur la croissance et l'état sanitaire des peuplements ont été étudiés par Nouals (1999). Ces éléments sont repris dans les tableaux 6, 7 et 8.

Sapinières absentes	Sapinières peu fréquentes	Sapinières fréquentes
- pluviométrie de juillet < 43 mm (sauf si pluviométrie annuelle > 1050 mm	- Alpes internes	- pluviométrie de juillet > 54 mm

Tableau 6 : Paramètres climatiques influant sur la répartition des sapinières (Source : Nouals, 1999).

	Défavorables	Favorables
Valeurs discriminantes	- pluviométrie de juillet < 51 mm - angle de Gams > 60 °	- Pluviométrie de juillet > 60 mm
Régions climatiques	- Alpes internes - Préalpes marno-calcaires - Haut-Esteron	- Roya – Vésubie – Moyenne Tinée - Embrunais – Bassin de Seyne

Tableau 7 : Paramètres climatiques influant sur la croissance en hauteur du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

	Défavorables	Favorables
Valeurs discriminantes	- pluviométrie de juillet < 47 mm - angle de Gams > 60 °	- Pluviométrie de juillet > 54 mm
Régions climatiques	- Préalpes marno-calcaires	- Roya – Vésubie – Moyenne Tinée - Embrunais – Bassin de Seyne - Sud Dauphiné - Ecrins

Tableau 8 : Paramètres climatiques influant sur l'état sanitaire du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

- Altitude – exposition

Le sapin pectiné présente une réponse très forte à l'exposition dans les Alpes du sud : il occupe une place très réduite en versant sud, principalement au dessus de 1550 m, alors qu'il peut occuper une grande partie des versants frais de la base de l'étage montagnard jusqu'au subalpin (Ladier & Rey, 2008). La même source indique que les conditions climatiques optimales se situent dans le montagnard moyen et supérieur : en dessous, la sapinière souffre de la sécheresse et de la chaleur estivale, et au-delà le froid limite sa croissance.

Les connaissances actuelles sont en grande partie basées sur l'étude de Nouals (1999), dont les principaux résultats sont repris ci-dessous (tableaux 9, 10, 11) :

Sapinières absentes	Sapinières peu fréquentes	Sapinières fréquentes
- Expositions autre que secteur nord si altitude < 1500 m - Exposition nord et altitude < 800 m	- Expositions autre que secteur nord	- Expositions plein nord
- Altitude > 2000 m	- Altitude < 1000 m - Altitude > 1800 m	- Altitude entre 1300 et 1600 m

Tableau 9 : Paramètres d'altitude et d'exposition influant sur la répartition des sapinières (Source : Nouals, 1999).

Défavorables	Favorables
- Altitude > 1700 m	-

Tableau 10 : Paramètres altitudinaux influant sur la croissance en hauteur du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

Défavorables	Favorables
- Altitude < 1200 m	-

Tableau 11 : Paramètres altitudinaux influant sur l'état sanitaire du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

- Topographie – sol

Le sapin est peu sensible à la nature du matériau, cependant les terrains acides (notamment les schistes) ainsi que les marnes semblent plus favorables que les substrats calcaires (Alexandrian, 1992 ; Ladier & Rey, 2008).

L'influence des paramètres topographiques et édaphiques a également été étudiée par Nouals (1999), qui obtient les résultats suivants (tableaux 12 et 13) :

	Défavorables	Favorables
Topographie	- Topographie défavorable	- Topographie favorable
Substrat	- Profondeur facilement prospectable < 40 cm - Sol très caillouteux (>60 %) avant 40 cm	- Sol non caillouteux (<10 %) jusqu'à 35 cm

Tableau 12 : Paramètres édaphiques et topographiques influant sur la croissance en hauteur du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

	Défavorables	Favorables
Topographie	-	- Topographie favorable
Substrat	- Calcaires durs - Sols carbonatés - Affleurements rocheux	- Roches siliceuses dures - Sols acides - Sols peu pierreux

Tableau 13 : Paramètres édaphiques et topographiques influant sur l'état sanitaire du sapin pectiné (Source : Nouals, 1999).

- Synthèse des potentialités du milieu

A la suite de l'étude autécologique sur le sapin pectiné réalisée en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Nouals, 1999), plusieurs catalogues des stations forestières pour les sapinières des Alpes du sud ont été élaborés par le même auteur. Chaque document s'applique à une des 5 régions climatiques de la région administrative présentant des peuplements de sapin pectiné, à l'exception des Alpes internes : Préalpes sèches, Sud Dauphiné, Alpes intermédiaires humides, Alpes pré-ligures. Le découpage des ces régions climatiques est basé sur les travaux de Panini (1999) (voir § 1.1.).

A l'intérieur de chaque région climatique, la méthode de structuration adoptée repose sur l'étage bioclimatique (croisement de l'exposition et de l'altitude), la roche (calcaire ou siliceuse), puis les conditions topo-édaphiques locales définies par l'observation de la flore, de la topographie et du sol.

L'intervention de la nature de la roche est justifiée par l'utilisation de groupes floristiques pour déterminer le niveau de structuration suivant (conditions topo-édaphiques locales). Mais si elle conditionne les groupes floristiques présents, cela n'implique pas de réelles différences de potentialités pour le sapin pectiné entre les substrats calcaires et siliceux.

Ces travaux ont constitué une part importante de la base d'un guide de vulgarisation (Delahaye Panchout, 2004) qui propose un outil simple pour déterminer les potentialités du sapin pectiné en un endroit donné des Alpes du sud. Ce discogramme donne les possibilités d'extension du sapin pectiné, le niveau de production, et l'état sanitaire des sapinières en fonction des éléments suivants :

- région climatique,
- étage bioclimatique (dépendant de l'exposition et de l'altitude),
- bilan hydrique local.

- Variabilité - adaptations

En limite climatique dans les Alpes du sud où il présente une aire de répartition discontinue, le sapin pectiné méridional présente des caractères d'adaptabilité à la sécheresse (Delahaye Panchout, 2004) : ainsi, certains peuplements font l'objet de mesures de conservation génétique (par exemple sur la montagne de Lure).

En dépit de comportements très différents au premier abord, ces deux essences ont présenté des signes récents de dégradation de leur état sanitaire en région méditerranéenne après des épisodes climatiques extrêmes.

1.3. Les conditions climatiques post-2003 et les dépérissements forestiers dans la région méditerranéenne.

1.3.1. Le climat de 2003 à 2007 dans la région méditerranéenne.

Dans la région méditerranéenne, les conditions climatiques de l'année 2003 ont été marquées par des températures très élevées de mai à août (+ 2 à 6°C par rapport aux normales saisonnières), combinées à une absence totale de précipitations sur la même période (Vennetier *et al*., 2007).

Suite à la canicule de 2003, les années 2004 à 2007 ont montré une succession de périodes de sécheresse printanière, sécheresse qui s'est maintenue sur la saison estivale en 2004, 2005 et 2007 (Vennetier *et al*., 2007). 2007 a été l'une des années les plus sèches en région Provence-Alpes-Côte d'Azur depuis que les données climatiques existent (Girard, 2009 ; Vennetier *et al*., 2007). La sécheresse est de plus accentuée par le niveau des températures, bien supérieures aux normales sur cette même période (Girard, 2009 ; Vennetier *et al*., 2007).

Ces phénomènes sont sans précédent connu en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, tant en ce qui concerne l'intensité de la sécheresse pour 2007, le niveau des températures en 2003 que la répétition ininterrompue d'années de sécheresse forte en 5 ans (2003 à 2007), d'après Vennetier *et al*. (2007).
Au total, sur ces 5 années, le cumul des déficits de pluie correspond à 1,5 année de pluviométrie normale, dont la répartition est donnée par le tableau 14 :

Année	2003	2004	2005	2006	2007
Déficit pluviométrique	10-20 %	35-50 %	10-20 %	20-30 %	45-60 %

Tableau 14 : Déficits pluviométriques annuels sur la période 2003-2007 en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Source : Vennetier *et al*., 2007).

Mais les données de pluie annuelle ne suffisent pas pour apprécier l'influence du climat sur la végétation, qui dépend plutôt des pluies mensuelles et saisonnières ainsi que des températures. L'action combinée des précipitations et des températures peut se traduire par le calcul du bilan hydrique climatique, dont l'évolution mensuelle est donnée par la figure 4 :

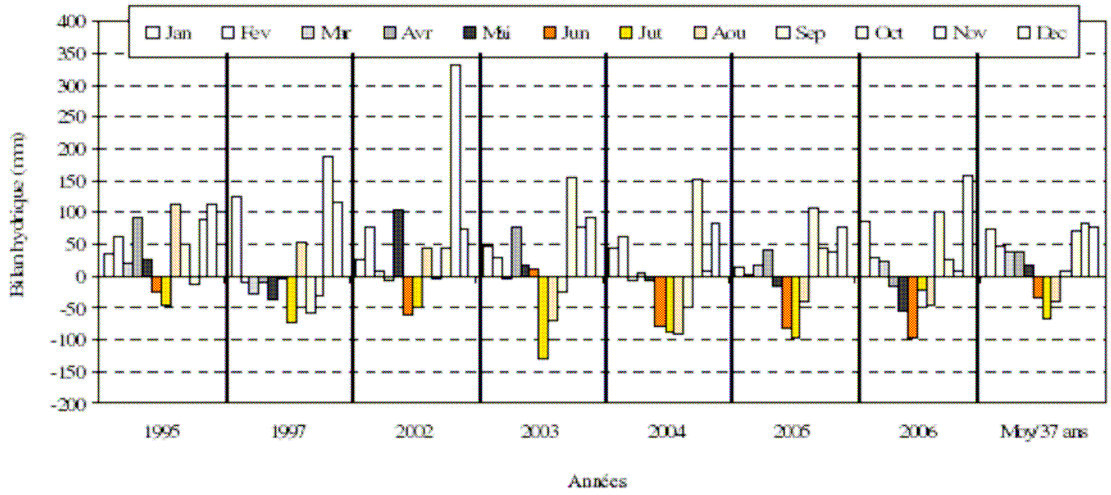


Figure 4 : Bilans hydriques mensuels des années 1995, 1997 et 2002 à 2006 calculés selon la méthode de Thornthwaite – données 1970-2006 (37 ans) de la station météorologique de Castellane (Alpes de haute-Provence) (Source : Thabeet, 2008).

On remarque l'importance des déficits estivaux suite à 2003, en termes de valeur élevée de déficit et de nombre de mois secs. Les valeurs du bilan hydrique printanier sont également nettement inférieures à la normale. En 2007 (non représenté), 7 mois consécutifs sont déficitaires (Vennetier *et al*., 2007).

La canicule de 2003 a provoqué un stress hydrique intense pour la végétation. Les conditions climatiques des années qui ont suivi n'ont pas permis à la végétation de récupérer de ce stress, mais elles ont au contraire amplifié ce phénomène (Vennetier *et al*., 2007).

1.3.2. Influence des excès du climat sur les forêts de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (d'après Vennetier et al.*, 2007).*

En 2003, la croissance des conifères a été stoppée au cours du printemps par le stress hydrique intense, et ils ont perdu une proportion importante de leurs aiguilles (40-60 %) au cours de l'été. Si l'état sanitaire des forêts a été affecté, la mortalité immédiate a été faible, cantonnée aux jeunes individus d'espèces sensibles (notamment pin sylvestre et sapin pectiné) et aux stations les plus défavorables.

En plus de l'incidence directe de 2003, il y a également des séquelles pluriannuelles liées à l'affaiblissement des végétaux, que viennent encore accentuer les sécheresses de 2004 à 2007. L'état sanitaire des forêts subit de ce fait une dégradation généralisée. Les pins sylvestres ont présenté une importante mortalité en 2004 dans les montagnes de basse Provence et dans l'arrière pays méditerranéen, où ce sont les stations *a priori* favorables (versants frais et hautes altitudes) qui ont été majoritairement touchées. Cette mortalité s'est développée en 2005 et poursuivie en 2006, concernant diverses situations d'altitude et d'exposition. Le sapin pectiné subit également des mortalités massives, notamment dans les Alpes-Maritimes.

Les symptômes de ces mortalités différées sont un dessèchement et jaunissement progressifs des aiguilles du haut vers le bas des houppiers, indices d'un fort stress hydrique. Les insectes xylophages n'ont provoqué que des dégâts très localisés et surtout à partir de 2006, et n'auraient donc quasiment aucune responsabilité dans ces mortalités différées.

Depuis 2003, les houppiers des pins présentent une transparence anormale due à un déficit foliaire marqué, accompagné de microphyllie et d'une faible ramification des branches. De 2004 à 2007, leur croissance en diamètre et en hauteur est très faible, et on observe un déficit important de fructification.

1.4. Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes : dispositifs de suivi et caractérisation.

1.4.1. Le dispositif de suivi de l'état sanitaire des forêts dans les Alpes-Maritimes.

Face aux dépérissements forestiers constatés sur le territoire départemental, le Conseil général des Alpes-Maritimes, l'Association départementale des communes forestières et l'Office national des forêts ont organisé un colloque sur le dépérissement forestier le 7 novembre 2005. Suite à cet événement, le Conseil général a décidé de financer la mise en place d'un dispositif intitulé « *Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes »* qui comprend trois volets (Office national des forêts, 2007) :

1- Cartographie périodique (tous les 3 ans) des dépérissements sur l'ensemble des forêts des Alpes-Maritimes, pour les peuplements de diverses essences résineuses (dont le sapin pectiné et le pin sylvestre, les cartes correspondantes sont données en annexes 1 et 2) ;

2- Cartographie des zones à risque de dépérissement forestier dans les Alpes-Maritimes pour le pin sylvestre et le sapin pectiné, basées sur les connaissances sur l'écologie des espèces et les stations forestières, et sur les données cartographiques récoltées.

3- Suivi phytosanitaire des principales espèces forestières des Alpes-Maritimes (en 2009 : pin sylvestre et sapin pectiné), pour suivre l'évolution au cours du temps de l'état de santé des forêts à partir de mesures sur des placettes permanentes.

Le volet 1 permet de dresser un état des lieux surfacique de la santé des forêts à l'échelle du département pour les essences concernées. Il sert de base au volet 2 dans lequel s'inscrit le stage. Les mesures du volet 3 effectuées en 2009 ont également pu être traitées pendant le stage (Office national des forêts, 2010), afin de préciser la nature des dépérissements et les symptômes associés, ainsi que le début d'évolution constatée pour le sapin pectiné (première campagne de mesures en 2008).

1.4.2. Etat des lieux de la santé des forêts de pin sylvestre et de sapin pectiné en 2008.

La cartographie des dépérissements décrite ci-dessus dans le volet 1 code le taux de mortalité (proportion d'arbres morts) dans les peuplements de l'essence ciblée (selon l'Inventaire forestier national) en six classes (*cf*. tableau 15). Il ne s'agit donc pas véritablement d'une cartographie des dépérissements, car ces phénomènes intègrent des symptômes touchant les arbres vivants (déficit foliaire, coloration anormale, *etc*.).

Qualification	Classe de mortalité
Pas de dégâts	0 %
Dégâts faibles	0 à 10 %
Dégâts moyens	10 à 30 %
Dégâts forts	30 à 50 %
Dégâts très forts	50 à 75 %
Peuplements complètement détruits	Plus de 75 %

Tableau 15 : Classes de mortalité utilisées pour la cartographie des dégâts dans les Alpes-Maritimes (Source : Office national des forêts, 2007).

L'analyse rapide des résultats de la cartographie fait ressortir les surfaces suivantes dans chacune des classes, pour le pin sylvestre et le sapin pectiné (*cf.* tableau 16).

Essence	Pin sylvestre		Sapin pectiné	
Classe de mortalité	**Surfaces (ha)**	**%**	**Surfaces (ha)**	**%**
0 %	40 054	86,4 %	7 001	71,2 %
0 à 10 %	2 859	6,1 %	1 172	11,9 %
10 à 30 %	1 612	3,5 %	789	8,0 %
30 à 50 %	1 177	2,6 %	706	7,2 %
50 à 75 %	609	1,3 %	84	0,9 %
Plus de 75 %	4	0,0 %	76	0,8 %
Total	46 315	100 %	9 828	100 %

Tableau 16 : Répartition des surfaces des forêts de pin sylvestre et de sapin pectiné entre les différentes classes de mortalité dans les Alpes-Maritimes en 2008.

Nota : l'Inventaire forestier national (2004) donne 79 210 ha de formations boisées de production dont le pin sylvestre est l'essence dominante en 2002 (*cf.* § 1.1.). L'écart avec le chiffre donné ici (46 315 ha) s'explique par le fait que seules ont été prises en compte pour la cartographie les surfaces de « futaie de pin sylvestre », à l'exception des autres forêts mélangées, lâches ou des garrigues et landes. En ce qui concerne le sapin, la même manière de procéder a été appliquée, mais l'écart entre les deux chiffres est minime.

Sous réserve de l'exactitude de ces données (*cf.* § 2.1.1.), aucune mortalité n'a été notée sur la très grande majorité des surfaces (plus de 85 % pour le pin sylvestre, et plus de 70 % pour le sapin pectiné). Les surfaces concernées par des taux de mortalité importants (supérieurs à 30 % par exemple) ne concernent qu'une proportion relativement faible des surfaces totales : moins de 5 % pour le pin sylvestre, et inférieure à 10 % pour le sapin pectiné. Cela indiquerait une importance relativement modérée du phénomène de mortalité à l'échelle départementale, sachant qu'il s'agit tout de même de surfaces non négligeables. Enfin, toujours selon ces données, le sapin pectiné serait nettement plus atteint que le pin sylvestre, en proportion par rapport à la surface totale de chaque essence.

Outre la cartographie des peuplements en fonction du taux de mortalité des arbres, les mesures effectuées dans le cadre du suivi sanitaire des forêts dans les Alpes-Maritimes permettent de préciser l'ensemble des symptômes du dépérissement observables sur le terrain, qui comprend de nombreux paramètres observables sur les arbres vivants.

1.4.3. Symptômes des dépérissements observés en 2009.

- Echantillonnage et mesures (Office national des forêts, 2010)

Vingt placettes de mesure ont été implantées en 2008 dans des peuplements de sapin pectiné, dans les Préalpes de Grasse et dans les vallées de la Roya, de la Vésubie et de la Tinée. Dans chacune de ces régions, les placettes ont été installées selon des transects altitudinaux pour explorer le maximum de la variabilité pressentie.

En ce qui concerne le pin sylvestre, 15 placettes ont été implantées en 2009 dans les Préalpes de Grasse, dans la haute vallée du Var et dans les vallées de la Roya et de la Tinée. N'ayant pas de connaissances *a priori* sur les paramètres écologiques structurants pour l'état sanitaire du pin sylvestre, les placettes explorent des conditions écologiques très variées dans chacune de ces régions.

Il est important de noter que la taille des échantillons (15 et 20 placettes) ainsi que le choix de leur implantation (zones accessibles, dépérissantes, en forêt publique sans intervention programmée dans les prochaines années) ne permet pas de tirer des résultats généralisables des mesures effectuées.

Sur chaque placette sont relevés des paramètres stationnels, des caractéristiques dendrométriques ainsi que des informations sur l'état sanitaire selon un protocole inspiré de celui du Département de la santé des forêts. Ces dernières informations sont relevées sur chaque arbre de chacune des placettes (320 arbres pour le sapin pectiné et 299 pour le pin sylvestre) et comprennent des notes individuelles de déficit foliaire, de mortalité de branche et de coloration anormale du feuillage, la présence de microphyllie et l'infestation par le gui.

- Principaux résultats en 2009 (Office national des forêts, 2010)

Les mesures effectuées en 2009 sur ces placettes ont été traitées durant la première partie du stage. Les principaux résultats concernant les symptômes de dépérissement sont récapitulés ci-dessous :

- *sapin pectiné :*

Sur les placettes de mesure, le critère le plus marquant du dépérissement du sapin pectiné est le déficit foliaire, la moyenne des notes des 320 arbres observés s'établissant à près de 17 %. Vient ensuite la mortalité de branche (11 %), puis la coloration anormale du feuillage (8 %). Le gui est également bien représenté sur les placettes, puisqu'il parasite près de 40 % des arbres.
Ces placettes ayant déjà fait l'objet de mesures en 2008, la comparaison des résultats a montré une légère amélioration de la coloration anormale, alors que la mortalité de branche et le déficit foliaire vont plutôt en augmentant, de même que l'infestation par le gui. Cependant, il s'agit de faibles variations relatives, qui sont vraisemblablement non significatives au vu de la précision des mesures. Un recul de plusieurs années sera nécessaire pour analyser l'évolution de l'état sanitaire.

- *pin sylvestre :*

Comme pour le sapin pectiné, le déficit foliaire est le symptôme majeur du dépérissement sur les placettes de pin sylvestre, avec une note moyenne de près de 29 % sur les 299 arbres observés. La note moyenne de coloration anormale atteint 13 %, et la mortalité de branche 10 %. Les symptômes de microphyllie restent rares (à peine 4 % des arbres) alors que le gui infeste près de 20 % des individus.

- Informations complémentaires (Girard, 2009)

Des mortalités diffuses dans un peuplement de pins sylvestres majoritairement âgés (plus de 80 ans) sont rapportées en août 2009 dans la région des Préalpes de Grasse. Les individus restants présentent des houppiers très clairs (déficit foliaire supérieur à 50 %) et pour certains d'entre eux des aiguilles très courtes. Les arbres morts ou mourants montrent des galeries de scolytes (hylésine) et de cérambycidés.

Un autre peuplement de sapin pectiné est décrit, dont certains individus sont relativement âgés et présentent des houppiers très transparents (déficit foliaire et microphyllie). Le gui est présent dans les houppiers, mais il n'y a pas d'attaque visible d'insectes ou de champignons pathogènes.

Dans chaque situation sont mis en évidence :
- les facteurs prédisposants : la station (altitude, sol) et le peuplement (âge, densité),
- les facteurs déclenchants : la succession de sécheresses de 2003 à 2007,
- les facteurs aggravants : insectes parasites ou champignons pathogènes, pour l'instant peu présents à l'exception du gui, surtout sur le sapin pectiné.

1.5. Problématique de l'étude et démarche générale

1.5.1. Le contexte de l'étude.

Face aux dépérissements qui surviennent depuis 2003 dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, touchant notamment les peuplements de pin sylvestre et de sapin pectiné, des interrogations légitimes ont émané des Unités territoriales de la Direction territoriale Méditerranée de l'Office national des forêts, ainsi que des communes forestières concernées.

Dans les Alpes-Maritimes, un *Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes* (*cf.* § 1.4.1.) a été mis en place. Ses grandes orientations sont rappelées ici (Office national des forêts, 2007) :

1- Cartographie périodique des dépérissements pour diverses essences forestières sur tout le département,
2- Cartographie des zones à risque de dépérissement forestier à l'échelle du département pour le pin sylvestre et le sapin pectiné,
3- Suivi phytosanitaire des principales essences forestières des Alpes-Maritimes.

Ce dispositif poursuit les objectifs suivants :

- assurer un suivi de l'étendue du phénomène, de ses caractéristiques et de son évolution (volets 1 et 3),
- améliorer la compréhension du processus de dépérissement, et notamment la connaissance de ses facteurs explicatifs de manière à pouvoir prendre en compte ce phénomène le plus efficacement possible dans le cadre de la gestion forestière (volet 2).

La mise en œuvre pratique de ce dispositif a été confiée à l'agence interdépartementale Alpes-Maritimes – Var de l'Office national des forêts. Le pôle « Recherche et développement en sylviculture et aménagement » de la Direction territoriale Méditerranée intervient en appui technique de l'agence sur ce dispositif, notamment pour l'élaboration des protocoles et l'analyse des données.

La poursuite du deuxième objectif (volet 2) a déjà fait l'objet de travaux (Office national des forêts, 2009) qui ont soulevé de fortes interrogations méthodologiques, essentiellement dues à la nature des données disponibles pour l'étude (il s'agit des données récoltées dans le cadre du volet 1). C'est pourquoi l'Office national des forêts a proposé un stage sur ce thème.

1.5.2. La demande de l'Office national des forêts et le sujet du stage.

La demande initiale était d'étudier le déterminisme des dépérissements à partir des données disponibles, puis de réfléchir à l'articulation possible des résultats avec la gestion. La commande concernait les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné, deux essences très différentes quant à leur comportement et leurs exigences écologiques. Le cadre géographique, initialement centré sur les Alpes-Maritimes, devait ensuite s'étendre à l'ensemble des Alpes du sud.

Par la suite, la zone d'étude a été restreinte au département des Alpes-Maritimes, point de départ de l'étude et objet principal de la demande, du fait de l'hétérogénéité des données de dépérissement disponibles entre ce département et le reste de la zone, et surtout du manque de temps nécessaire à la poursuite du travail. Pour la même raison, la réflexion sur la deuxième partie du sujet (lien avec la gestion) n'a été qu'entamée.

La nature des données disponibles permettait d'étudier les relations entre les dépérissements et divers facteurs du milieu. L'identification de conditions écologiques dans lesquelles se produisent préférentiellement des phénomènes de dépérissement peut permettre une interprétation écologique du déterminisme de ces phénomènes. Ainsi, si le climat récent est reconnu comme étant le facteur déclenchant des dépérissements, il s'agissait plutôt ici d'identifier les facteurs écologiques prédisposants (*cf.* § 1.3. et 1.4.3.) qui peuvent expliquer les différences de réponse des peuplements.

Le résultat final recherché par l'Office national des forêts est la caractérisation des situations « à risques de dépérissement ». Ces stations « à risques » sont des zones qui peuvent être actuellement indemnes, mais qui se trouvent dans des conditions similaires à celles d'autres peuplements dépérissants, du point de vue de facteurs du milieu jugés significatifs pour le déterminisme du dépérissement. Ce résultat serait un premier outil à destination des gestionnaires, leur permettant de prendre en compte ce risque lors de la planification de la gestion.

1.5.3. La démarche générale adoptée.

L'étude a débuté par une phase bibliographique permettant d'acquérir des connaissances sur l'écologie générale de la zone d'étude, l'autécologie du pin sylvestre et du sapin pectiné dans le contexte des Alpes du sud, ainsi que sur les phénomènes récents de dépérissement survenus dans la région.

Ensuite, pour étudier le déterminisme des dépérissements, il a fallu réfléchir aux points suivants :

- d'une part trouver une méthode pour croiser les données cartographiques de dépérissement avec des facteurs du milieu spatialisés,
- et d'autre part identifier les traitements statistiques applicables au jeu de données ainsi constitué.

Cette phase méthodologique a été menée sur les données concernant le pin sylvestre, puis appliquée au cas du sapin pectiné.
Le traitement des données a d'abord abouti à la caractérisation des relations entre le dépérissement et chacun des facteurs du milieu pris indépendamment des autres, ce qui constitue un premier résultat.

Dans un deuxième temps, une méthodologie permettant de prendre en compte plusieurs facteurs a été élaborée. L'évaluation régulière de la pertinence des résultats obtenus a parfois conduit à infléchir la démarche pour améliorer leur fiabilité. Cette méthodologie a été éprouvée sur le pin sylvestre, pour lequel elle a permis d'obtenir un modèle d'explication du dépérissement. Elle sera prochainement appliquée au cas du sapin pectiné.

Les limites de la démarche et des résultats obtenus, ainsi que leur utilisation possible dans le cadre de la gestion ont enfin été abordées.

2. Méthodologie générale pour l'étude analytique du déterminisme des dépérissements.

2.1. Présentation des données disponibles.

Les données disponibles pour l'étude les données de dépérissement, et les facteurs écologiques. Il s'agit dans les deux cas de données spatialisées (cartographie).

2.1.1. Les données de dépérissement.

Il s'agit des cartographies de dépérissement réalisées pour le pin sylvestre et le sapin pectiné sur le département des Alpes-Maritimes (*cf.* § 1.4.1.). Elles ont été élaborées en 2008, et ne sont donc valides que cette année-là. Il faut également rappeler qu'il ne s'agit pas d'une cartographie des dépérissements proprement dite, car seules des classes de mortalité (6 classes, *cf.* tableau 15, § 1.4.2.) ont été cartographiées sans prise en compte des symptômes de dépérissement touchant les arbres vivants.

La cartographie devait initialement reposer sur une « reconnaissance aérienne par hélicoptère avec photographies et report sur carte » (Office national des forêts, 2007). Cependant, les photos aériennes n'ont pas pu être exploitées pour réaliser la cartographie des classes de mortalité. Pour cela, il a été demandé aux personnels de terrain de l'Office national des forêts de délimiter manuellement et de caractériser les peuplements présentant des mortalités. Cette délimitation est classiquement réalisée à partir d'un point de vue extérieur au peuplement (souvent depuis le versant opposé) avec report à la main sur un fond de carte, et la classe de mortalité est précisée d'après une appréciation depuis l'intérieur du peuplement.

Ainsi, seuls les peuplements présentant des dégâts (mortalités) ont été cartographiés et caractérisés par cette méthode. Les peuplements « sains », qui représentent la majeure partie de la surface, n'ont pas été relevés sur le terrain. Leur connaissance était cependant nécessaire à l'étude du déterminisme des dépérissements. Ils ont donc été cartographiés par défaut d'après la carte des types de peuplements de l'Inventaire forestier national (réalisée par photo-interprétation) : aux peuplements de « futaie de pin sylvestre » ont été superposés la cartographie des dépérissements réalisée depuis le sol, et les peuplements où aucune mortalité n'a été signalée ont été qualifiés de « sains ».

Il faut donc garder à l'esprit que la multiplicité des observateurs lors de la phase de cartographie et que l'origine différente des données entre les peuplements sains et ceux touchés par des mortalités concourent à des données de base hétérogènes. Leur fiabilité est également incertaine : la méthode de constitution des données cartographiques complètes ne permet pas d'avoir la certitude que les peuplements dits « sains » le sont vraiment, ils n'ont seulement pas fait l'objet d'un signalement de mortalité.

2.1.2. Les facteurs écologiques.

Parallèlement à la cartographie des dépérissements, divers facteurs du milieu spatialisés sont disponibles. Ces données sont d'ordre climatique, topographique, géologique et édaphique, représentant ainsi différents niveaux de variabilité écologique. Elles sont répertoriées dans le tableau 17.

Cela appelle les commentaires suivants :

- les zones climatiques 12 et 13 selon Panini (1999) ont fait l'objet d'un regroupement justifié par la proximité de leurs caractéristiques, la petite taille de la zone 13, et la confrontation avec d'autres études (*cf.* 1.1.2.) ;
- l'angle de Gams (ou angle de continentalité hydrique) est un indicateur de sécheresse qui dépend du quotient des précipitations et de l'altitude (Gauquelin & Courbaud, 2006). Il est utilisé pour définir des zones « internes » sèches (valeurs élevées, > 50°) et des zones « externes » humides (valeurs faibles, < 40°) ;
- la courbure du terrain donne la forme convexe (valeur positive) ou concave (négative) du relief ;

- le type de roche a été regroupé en 4 grandes catégories : calcaires siliceux ou dolomitiques, calcaires « purs », roches marneuses et argileuses, roches acides ;
- l'indice de climat lumineux (ikr) exprime l'énergie lumineuse reçue en une station donnée en pourcentage de l'énergie reçue par un plan horizontal de référence de même surface (Ripert & Vennetier, 2002). A l'échelle de la région méditerranéenne, il dépend de l'exposition et de la pente. Il a été calculé au moyen de la formule suivante (Ripert & Vennetier, 2002) :

ikr = sin (0,8203 – atan (*pente* x cos (*exposition*)))/sin (0,8203), avec la pente et l'exposition en radians.

Facteurs écologiques	**Format**	**Résolution**	**Source de données**	**Observations**
Zone climatique	*Vecteur*	-	Panini, 1999	-
Température moyenne annuelle	*Vecteur*	-	Panini, 1999	En classes
Température minimale annuelle	*Vecteur*	-	Panini, 1999	En classes
Nombre de mois de gel par an	*Vecteur*	-	Panini, 1999	-
Pluie de printemps	*Raster*	5 km	Météo-France	-
Pluie d'été	*Raster*	5 km	Météo-France	-
Pluie d'automne	*Raster*	5 km	Météo-France	-
Pluie d'hiver	*Raster*	5 km	Météo-France	-
Pluie annuelle	*Raster*	5 km	Météo-France	-
Angle de Gams de printemps	*Raster*	5 km	Office national des forêts	Issu de Météo-France (pluie) et Institut géographique national (altitude)
Angle de Gams d'été	*Raster*	5 km	Office national des forêts	
Angle de Gams d'automne	*Raster*	5 km	Office national des forêts	
Angle de Gams d'hiver	*Raster*	5 km	Office national des forêts	
Angle de Gams annuel	*Raster*	5 km	Office national des forêts	
Altitude	*Raster*	50 m	Institut géographique national	-
Courbure du terrain	*Raster*	50 m	Issu de l'altitude	-
Pente du terrain	*Raster*	50 m	Issu de l'altitude	-
Indice de climat lumineux (exposition)	*Raster*	50 m	Issu de l'altitude	-
Type de roche	*Vecteur*	-	D'après BRGM	-
pH de l'horizon A	*Raster*	1 km	AgroParisTech-ENGREF - IFN	-

Tableau 17 : les facteurs écologiques disponibles pour l'étude et leurs caractéristiques.
Vecteur : données sous forme d'ensembles homogènes délimités (polygones) ; Raster : données sous forme de grille de valeurs (pixels) ; BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières ; IFN : Inventaire forestier national.

Afin d'étudier le déterminisme des dépérissements, il est ensuite nécessaire d'analyser les relations entre les données de mortalités dans les peuplements et les facteurs du milieu.

2.2. Méthode de constitution du jeu de données initial.

La variable à expliquer (classe de mortalité dans les peuplements) se présente sous la forme de polygones, ensembles homogènes délimités et caractérisés (format *vecteur*). Les variables explicatives (facteurs du milieu) sont pour certaines sous la même forme, les autres variant de manière continue dans l'espace selon une grille de valeurs caractérisée par sa résolution (format *raster*). Face à ces différences de structure de données, comment croiser la variable à expliquer avec les variables explicatives ? Les limites des différentes données *vecteur* ne correspondent pas, et les données *raster* sont variables au sein des polygones des autres données *vecteur* (*cf.* figure 5). Il est cependant nécessaire d'extraire les combinaisons entre ces variables pour étudier les relations qui peuvent exister entre elles.

2.2.1. La méthode de la grille de points et le problème de l'effectif.

Une première solution est de plaquer une grille de points sur la zone d'étude, et d'extraire à l'endroit de chacun de ces points la donnée de mortalité ainsi que les valeurs des divers facteurs du milieu. C'est cette solution qui a été utilisée par l'Office national des forêts (2009). Ce type de manipulation peut être réalisé simplement au moyen d'un Système d'information géographique (logiciel informatique capable de gérer des données spatiales) tel *Arcmap-Arcview* (ESRI). Il permet de constituer un jeu de données mettant en regard les variables explicatives et la variable à expliquer sur un certain nombre de points, jeu de données qui peut

ensuite être analysé pour étudier les relations entre ces variables. Ces points deviennent ainsi les « observations », les individus de l'échantillon statistique auquel on s'intéresse.

Cette approche présente cependant des inconvénients, principalement en ce qui concerne l'effectif de l'échantillon constitué : il dépend des surfaces concernées et de la maille de la grille de points utilisée (densité de points). Pour cette dernière raison, l'opérateur a l'entière maîtrise du nombre d' « observations » qu'il obtient. Or, les résultats des tests statistiques ne sont pas indifférents à ce paramètre.

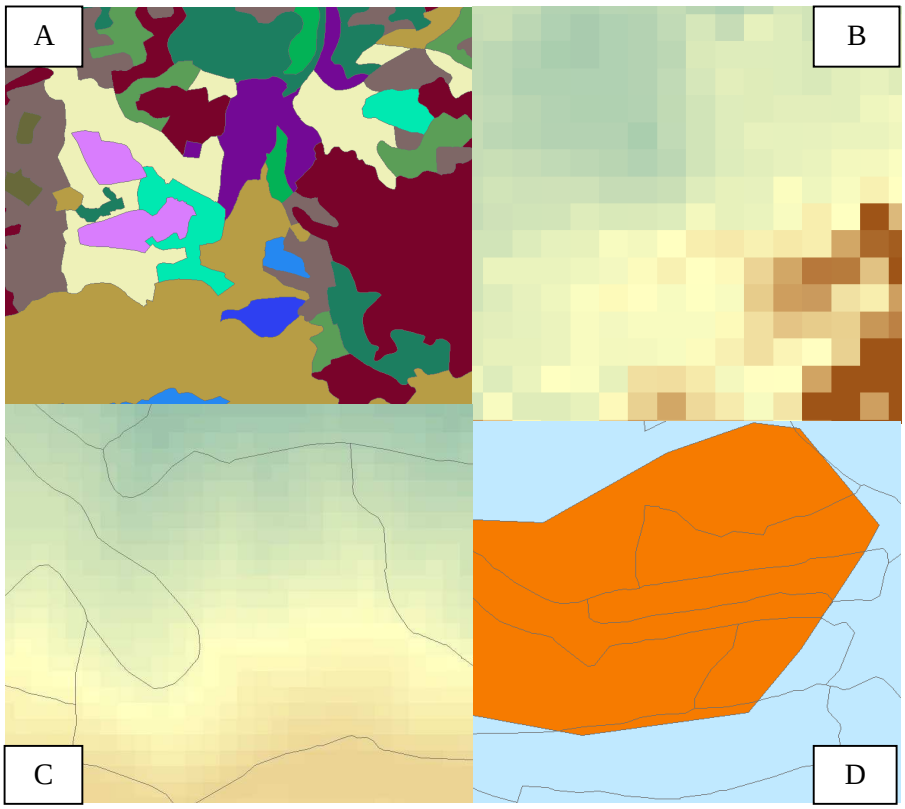


Figure 5 : les différents formats de données et les résultats de leur croisement.
A : données vecteur (polygones) ; B : données raster (grille de valeurs) ; C : croisement vecteur-raster ; D : croisement vecteur-vecteur.

L'influence de l'effectif sur les résultats des tests statistiques peut-être illustré par les deux exemples suivants (d'après Scherrer, 1984) :

- les tests *t* de comparaison de moyennes

Ces tests utilisent l'écart-type de la moyenne pour apprécier l'écart entre sa valeur calculée (sur un échantillon) et sa valeur théorique (fixée par hypothèse). Dans le cas de la comparaison des moyennes de deux échantillons indépendants, on compare la différence entre les deux moyennes calculées à la valeur théorique de 0 (hypothèse nulle d'égalité des moyennes). L'écart-type, paramètre de dispersion, permet de juger si l'écart constaté excède les fluctuations « normales » d'échantillonnage, donc si l'on peut raisonnablement accepter l'hypothèse concernant la valeur théorique de la moyenne.

Mais l'écart-type de la moyenne est inversement proportionnel à la racine carrée de l'effectif : plus l'effectif est grand, plus l'écart-type de la moyenne est faible. Donc plus l'effectif est important, plus le test est « puissant » : la grande taille de l'échantillon permet de considérer comme significatifs de faibles écarts de la moyenne à sa valeur théorique.

- le test du khi-deux de comparaison de proportions (ou d'indépendance entre deux variables qualitatives)

Ce test repose sur l'appréciation de l'écart entre les effectifs observés dans les modalités de deux variables qualitatives et des effectifs théoriques. Ces derniers correspondent aux valeurs d'effectif qui seraient observées si les deux variables étaient indépendantes. La réalisation du test repose sur le calcul d'un critère dont la forme mnémotechnique est rappelée ci-dessous :

$$X^2 observé = \sum_{Modalités} \frac{(Nobservé - Nthéorique)^2}{Nthéorique}$$

La somme porte sur les effectifs (N) observé et théorique pour l'ensemble des modalités croisées entre les deux variables. Ce critère est ensuite comparé à des valeurs tabulées qui dépendent du niveau de risque acceptable et du nombre de termes de la somme. S'il excède la valeur correspondante, le test permet de rejeter l'hypothèse initiale d'indépendance entre les variables.

La formule ci-dessus permet de juger de l'influence des effectifs sur le résultat du test. Si le nombre global d'observations est multiplié par 10 (selon la même proportion dans chacune des modalités des variables), alors dans chaque cas les effectifs observé et théorique sont de même multipliés par 10. L'élévation au carré du numérateur contre le terme simple au dénominateur retransmet intégralement le facteur multiplicatif à chacun des quotients. Le critère, somme des quotients, est ainsi également multiplié par 10. Par contre, les valeurs tabulées pour le test du khi-deux ne dépendent pas de l'effectif, mais seulement du nombre de modalités croisées qui reste inchangé. Ainsi, la modification des effectifs peut avoir une incidence considérable sur le résultat du test.

En fait, le test du khi-deux ne s'applique qu'aux proportions exprimées sous la forme d'un rapport d'effectifs, et non pas aux proportions d'autres grandeurs (ici analogue d'une surface, l'effectif de points dépend en effet de l'étendue et du pas de la grille), car le résultat dépend alors notamment de l'unité choisie.

Dans la mesure où le seul choix de la densité de points (nécessairement subjectif et critiquable) a une influence forte sur le résultat des tests statistiques, l'extraction des données au moyen d'un maillage prédéfini ne semble pas être une méthode appropriée en vue de constituer un jeu de données utilisable en l'état pour l'analyse statistique.

2.2.2. Les peuplements sains ou dépérissants en tant qu' « observations ».

Il est préférable de revenir aux « observations » initiales que sont les polygones de peuplements dépérissants (*cf.* § 2.1.1.), en extrayant pour chacun d'entre eux une seule combinaison du taux de mortalité et de la valeur des facteurs du milieu. Cette approche permet de résoudre les questions soulevées à propos de l'effectif, qui ne dépend ici que des données initiales. Elle est appuyée par l'avis d'un biométricien de l'Office national des forêts sollicité à ce stade de la réflexion.

Cependant, il reste une difficulté : la variabilité des facteurs du milieu au sein des polygones de dépérissement, observable en superposant les données de différentes natures (vecteur et raster, *cf.* figure 5). Or, dans le cadre de cette approche, il ne faut retenir qu'une valeur de chacun des facteurs du milieu par polygone de peuplement dépérissant.

Cette démarche paraît acceptable si les polygones sont de petite taille et relativement homogènes vis-à-vis des facteurs du milieu. L'échelle de variabilité spatiale des facteurs écologiques est d'ailleurs très variable : les facteurs du climat général (précipitations, températures) varient peu à l'échelle d'un peuplement forestier, alors que l'altitude, la courbure du terrain ou encore le pH et la roche peuvent varier dans des proportions beaucoup plus importantes.

- la variabilité de la taille des polygones

La forte hétérogénéité des données de mortalité a été soulignée (*cf.* § 2.1.1.), due à la multiplicité des opérateurs et à la combinaison de diverses sources de données. Elle se répercute naturellement sur la taille

des polygones, qui est très variable depuis des surfaces inférieures à l'hectare jusqu'à des étendues de plusieurs centaines d'hectares, voire plus de mille hectares. De plus, la répartition des surfaces entre les différentes classes de mortalité n'est pas homogène : schématiquement, il y a d'autant moins de grands polygones que le taux de mortalité est fort (*cf.* figure 6).

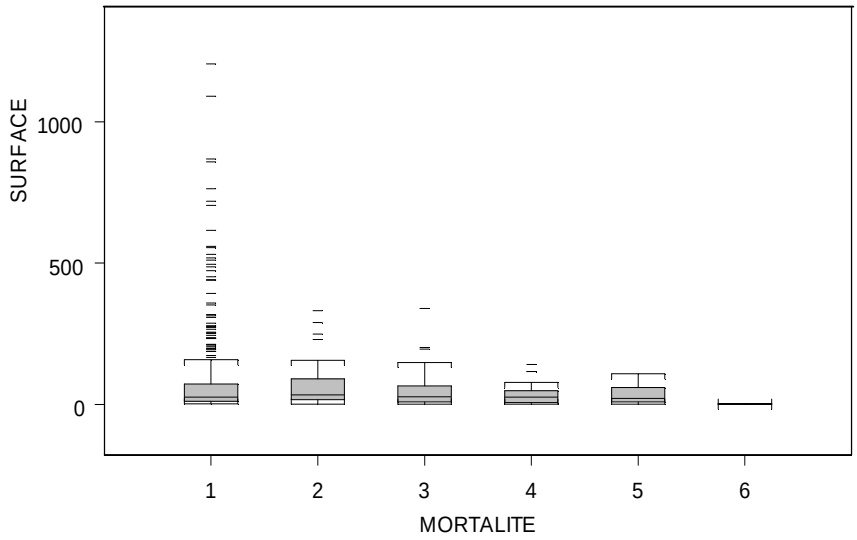


Figure 6 : Distribution des surfaces des polygones selon les classes de mortalité (pin sylvestre). *Les classes de mortalité sont numérotées de 1 à 6 par taux de mortalité croissant ; les boîtes à moustaches figurent la valeur médiane, les premier et troisième quartiles et les valeurs adjacentes inférieure et supérieure.*

On peut émettre à ce propos les hypothèses d'explication suivantes :

- si la mortalité n'est pas diffuse, mais plutôt par bouquets (< 1 ha), plus le polygone est petit et centré sur le foyer de mortalité, plus il se verra attribuer un taux de mortalité élevée. Les différences entre les observateurs vis-à-vis de la précision de cartographie peut alors intervenir à ce stade ;

- les polygones dont le taux de mortalité est non nul sont plutôt de petite taille, car ils ont été délimités depuis le sol. Le champ de vision est alors limité, et dépend notamment du relief. Par contre, les polygones de peuplements « sains » n'ont pas été relevés sur le terrain (*cf.* § 2.1.1.). Ils sont issus de la carte des types de peuplement de l'Inventaire forestier national, qui est réalisée par photo-interprétation et présente donc des polygones de toutes tailles : de quelques hectares à plus de mille hectares. Dans la cartographie des dépérissements de pin sylvestre, tous les polygones dont la taille dépasse 400 hectares portent un taux de mortalité nul. Ils proviennent donc de cette carte des types de peuplement.

Cette variabilité de la taille des polygones se rajoute à celle des facteurs du milieu pour compliquer les combinaisons entre le taux de mortalité et les facteurs écologiques.

- extraction des combinaisons entre les variables

Pour extraire ces combinaisons, il existe plusieurs possibilités, notamment les suivantes :

1- choisir dans chaque polygone un point sur lequel sont extraites les valeurs des facteurs du milieu et le taux de mortalité (le centroïde du polygone, par exemple) ;
2- prendre pour chaque polygone la valeur moyenne des facteurs du milieu sur l'ensemble de sa surface.

La première option présente l'intérêt statistique d'un tirage aléatoire des combinaisons entre variables, mais elle ne permet pas de représenter la variabilité spatiale des facteurs du milieu au sein d'un polygone. Elle peut potentiellement produire des valeurs extrêmes ou isolées de ceux-ci, non représentatives des conditions écologiques générales sur le polygone.

La deuxième possibilité permet au contraire d'extraire ces conditions écologiques moyennes à l'échelle du polygone, et d'éviter ainsi des valeurs extrêmes ou non représentatives qui peuvent perturber l'analyse des données. Cependant, elle ne permet pas non plus de représenter la variabilité interne des

facteurs du milieu. De plus, elle est soumise à un biais potentiel du fait de la variabilité des surfaces des polygones : plus la surface est grande et plus la moyenne tend à lisser les valeurs des facteurs écologiques très variables dans l'espace, ce qui concernerait *a priori* plutôt les peuplements sains de grande taille. Cependant, sous réserve de l'exactitude des données (*cf.* § 2.1.1.) qui conditionne de toute façon toutes les analyses réalisables, un polygone présentant un taux de mortalité homogène devrait également se situer dans des conditions relativement homogènes du point de vue des facteurs du milieu déterminant le dépérissement.

Pour ces raisons, c'est la deuxième possibilité qui a été retenue et appliquée aux facteurs du milieu de nature quantitative (variables numériques) dont on peut calculer la valeur moyenne. Pour ceux-ci, les valeurs minimales, maximales et médianes ont été également calculées sur les conseils du biométricien, en vue de tenter de prendre en compte la variabilité interne des facteurs du milieu. Mais ces valeurs n'ont pas pu être utilisées dans les analyses pour des raisons pratiques (nombre de variables), et les résultats sont de plus très délicats à interpréter. Pour les autres facteurs, de nature qualitative (variables en modalités ou en classes de valeur), le calcul d'une moyenne n'a pas de sens. On aurait pu choisir la modalité le plus représentée dans le polygone, mais la manipulation s'avérait délicate en pratique, et c'est la première option présentée plus haut qui a été utilisée.

D'un point du vue technique, cette méthode a été appliquée en utilisant la grille de points initiale : sur chaque point sont extraites les valeurs de l'ensemble des variables quantitatives et les caractéristiques des polygones à l'aide du Système d'information géographique. Le traitement de cette base sous tableur permet ensuite de calculer les valeurs moyennes des facteurs du milieu par polygone. Parallèlement à cela, les centroïdes des polygones sont extraits et utilisés pour récupérer les valeurs des variables qualitatives. La concaténation des deux bases aboutit au jeu de données comportant les valeurs des facteurs écologiques en regard des taux de mortalité.

C'est sur ce tableau que vont ensuite porter les analyses statistiques permettant d'étudier les relations entre ces différentes variables. On dispose pour le pin sylvestre de 557 observations, et de 237 pour le sapin pectiné.

2.3. Traitement statistique des données : étude des relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu.

Disposant d'un jeu de données, il s'agit maintenant de savoir comment l'analyser. Dans un premier temps, l'objectif poursuivi est d'étudier les relations entre le taux de mortalité et chacun des facteurs pris indépendamment des autres. Pour cela, le choix de la méthode statistique utilisable dépend avant tout de la nature des données. Parmi les facteurs du milieu disponibles pour l'étude (*cf.* tableau 17, § 2.1.2.), certains sont qualitatifs (les variables comportant des modalités et celles réparties en classes : zone climatique, températures, type de roche) et les autres, majoritaires en nombre, sont quantitatifs. Quant à la variable de réponse (le taux de mortalité), elle se présente initialement sous la forme de classes de valeurs (*cf.* tableau 15, § 1.4.2.), elle est donc qualitative. Cette variable qualitative est dite *ordinale*, car elle présente des modalités ordonnées : les 6 classes de valeur parfaitement jointives qui caractérisent les peuplements sains jusqu'à ceux complètement détruits.

Ces variables ordinales en classes peuvent, moyennant quelques approximations, être substituées par une variable quantitative discrète prenant pour valeurs les médianes des classes initiales. Cela n'a pas d'incidence sur les tests si la distribution des données initiales était effectivement centrée sur la médiane de chaque classe (les résidus s'annulent alors dans chaque classe), condition difficilement vérifiable *a posteriori* même si elle est approchée dans le cas d'effectifs suffisamment grands. Le grand intérêt de cette transformation est l'obtention d'une variable quantitative, ce qui permet d'une part de la représenter graphiquement, et d'autre part d'utiliser des méthodes statistiques spécifiques dont les potentialités sont très intéressantes.

2.3.1. Utilisation de la donnée transformée (quantitative) de taux de mortalité.

Si la variable de réponse est quantitative, alors les méthodes statistiques univariées utilisables sont les modèles linéaires : la régression linéaire simple si le facteur est également quantitatif, et l'analyse de variance si le facteur est qualitatif. Les deux méthodes ont été employées sur le jeu de données selon la nature des facteurs du milieu.

2.3.1.1. Régression linéaire (facteurs quantitatifs).

Les relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu quantitatifs peuvent être projetées sur un graphique, illustré par la figure 7.

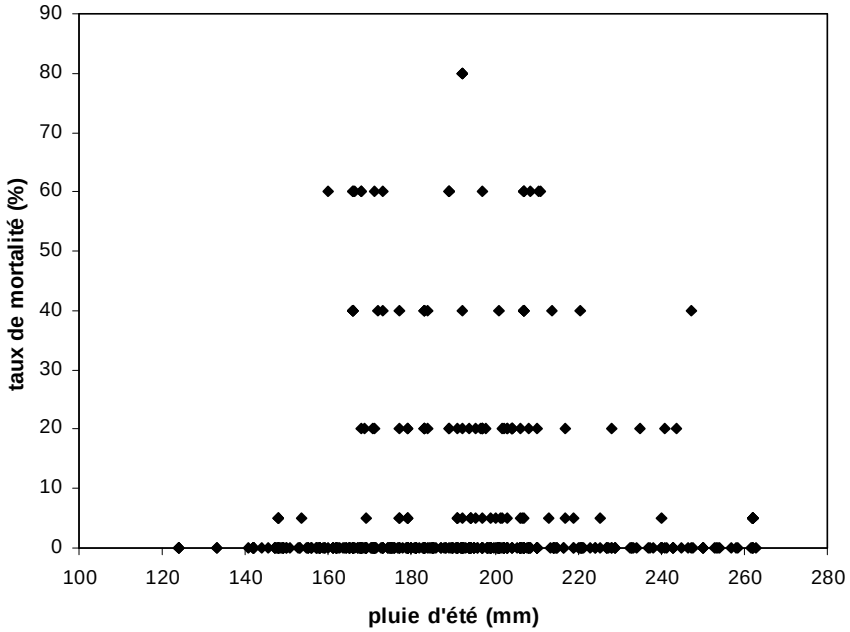


Figure 7 : Taux de mortalité en fonction de la pluie d'été (pin sylvestre).

La transformation des classes de taux de mortalité en une variable quantitative est immédiatement visible dans la forme du nuage de points, ceux-ci étant tous alignés sur les centres des classes. La forme de ce nuage de points n'évoque aucune relation évidente entre les variables, et la régression linéaire qui permet de modéliser les relations entre variables par des fonctions mathématiques paraît mal adaptée dans ce cas précis. De fait, la régression linéaire n'identifie aucune relation significative entre le taux de mortalité et l'ensemble des facteurs du milieu quantitatifs pris un à un, quelle que soit la forme de la relation testée (linéaire, polynomiale, racine, logarithme, *etc.*).

L'influence des facteurs qualitatifs sur le taux de mortalité peut ensuite être testée grâce à l'analyse de variance.

2.3.1.2. Analyse de la variance (facteurs qualitatifs).

Cette méthode permet de tester par exemple si le taux de mortalité varie entre les 4 types de roche (appelés groupes). Le résultat de ce test est donné par la figure 8 :

ANALYSE DE VARIANCE

Source des variations	*Somme des carrés*	*Degré de liberté*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Probabilité*	*Valeur critique pour F*
Entre Groupes	2300,980111	3	766,9933704	3,6468	0,0126031	2,6209932
A l'intérieur des groupes	116517,6579	554	210,3206821			
Total	118818,638	557				

Figure 8 : Taux de mortalité selon le type de roche – tableau d'analyse de la variance (pin sylvestre).

D'après les résultats (F > Fcritique, P < 0,05), il faudrait rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle tous les types de roche ont le même taux de mortalité. La conclusion serait donc qu'il y a au moins deux types de roches qui présentent des taux de mortalité différents (avec un risque d'erreur de l'ordre de 1 %).

Cependant, l'analyse de la variance repose sur des hypothèses statistiques qui doivent être vérifiées pour le test soit valide (Scherrer, 1984) :

- l'additivité du modèle : pour chaque individu, le taux de mortalité s'écrit comme la somme de la moyenne générale, d'un écart lié au type de roche et d'un écart résiduel propre à l'individu (résidu) ;
- la distribution normale des résidus, d'espérance nulle et de variance constante (homoscédasticité) ;
- l'indépendance des résidus.

Le respect de ces hypothèses peut dans un premier temps être apprécié graphiquement par l'examen des résidus (*cf.* figure 9), et éventuellement faire l'objet de tests statistiques si nécessaire.

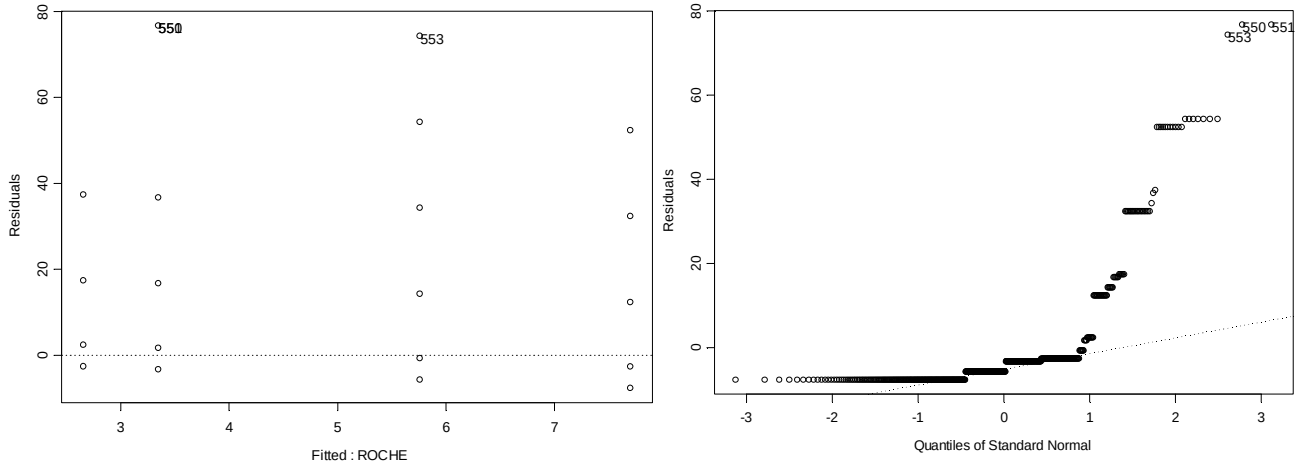


Figure 9 : Graphiques des résidus de l'analyse de variance. *A gauche, les résidus en fonction des valeurs prédites (les taux de mortalité moyens de chacune des 4 modalités de roche) ; à droite les résidus en fonction des quantiles de la loi normale centrée et de même variance.*

Le premier graphique de la figure 9 montre une dispersion des résidus qui ne paraît pas homogène entre les différentes valeurs prédites (condition d'homoscédasticité). On y remarque également que la distribution de ces résidus est fortement dissymétrique de part et d'autre de la valeur 0, il est donc peu probable qu'ils suivent une loi normale d'espérance nulle. Le second graphique permet d'examiner plus précisément cette condition de normalité, et l'on voit que les résidus s'éloignent très fortement des quantiles de la loi normale qu'ils devraient suivre sous les hypothèses de l'analyse de variance (ligne pointillée).

Les constatations graphiques peuvent si nécessaire être confortées par des tests statistiques. L'homoscédasticité peut ainsi être évaluée grâce au test de Lévène, qui consiste à refaire une analyse de variance sur la valeur absolue des résidus : s'ils varient significativement entre les modalités du facteur, la condition d'homoscédasticité n'est pas respectée (ce qui est le cas ici : P < 0,001). La normalité peut être jugée au moyen du test de Kolmogorov-Smirnov qui évalue l'adéquation des résidus à une loi normale de paramètres connus (espérance nulle et variance calculée sur les résidus). Le test est ici encore très significatif, démontrant la non-normalité des résidus que l'on pouvait aisément prévoir à partir du graphe.

Les conditions du test sont donc mises en défaut, et il n'est pas possible de conclure quant à l'influence du type de roche sur le taux de mortalité. La solution à laquelle on recourt habituellement dans ce cas est le changement de la variable de réponse, à laquelle on applique une transformation susceptible de résoudre les problèmes rencontrés (hétéroscédasticité, non-normalité, *etc*.). Mais ici, les transformations usuelles ne sont d'aucun secours, soit parce qu'elles ne sont pas applicables à une variable qui peut s'annuler (logarithme, inverse, *etc*.), soit parce qu'elles n'améliorent en rien le respect des hypothèses de l'analyse de variance.

Comme dans le cas du type de roche, l'analyse de variance ne s'applique à aucun des facteurs du milieu qualitatifs disponibles pour l'étude lorsqu'on veut évaluer leur influence sur la variable quantitative du taux de mortalité. La responsabilité en revient très certainement à cette dernière variable, et il est donc préférable de revenir à la nature initiale de cette donnée : il s'agit fondamentalement d'une variable qualitative ordinale en 6 classes.

2.3.2. Retour à la nature initiale du taux de mortalité (variable qualitative en classes).

Si l'on considère maintenant le taux de mortalité comme une variable qualitative à 6 modalités, il faut envisager d'autres méthodes statistiques pour le traitement des données.

2.3.2.1. Régression logistique (facteurs quantitatifs).

Lorsque la variable à expliquer est qualitative et que les variables explicatives sont quantitatives, on peut utiliser une méthode de la famille des modèles linéaires généralisés : la régression logistique. Cette régression est très employée en écologie, par exemple lorsqu'il s'agit de déterminer la niche écologique d'une espèce végétale : on étudie alors les relations entre une variable binaire de présence/absence de l'espèce et des facteurs du milieu quantitatifs. La modélisation par régression porte dans ce cas sur une transformation logistique (par le logarithme) de la probabilité de présence de l'espèce. Cette dernière s'écrit donc réciproquement sous la forme suivante (x : facteur écologique ; p : probabilité de présence de l'espèce ; f : fonction polynomiale) :

$$p(x) = \frac{1}{1 + \exp(f(x))}$$

Cette fonction de réponse donne une courbe de probabilité de présence en fonction du facteur écologique considéré de forme générale gaussienne (courbe « en cloche »), mais qui peut être tronquée (courbe croissante, décroissante), et présenter un ou deux modes.

Si la forme de ces fonctions peut éventuellement correspondre aux données (*cf.* figure 7, § 2.3.1.1.), la régression logistique qui permet de modéliser des données binaires peut difficilement s'appliquer au cas du taux de mortalité en 6 classes. Il serait nécessaire de regrouper arbitrairement des classes entre elles pour transformer cette variable en donnée dichotomique.

Une autre méthode a donc été préférée pour l'analyse des données, beaucoup plus simple et fondée sur l'observation des relations graphiques entre les variables. Elle repose sur le test du khi-deux.

2.3.2.2. Test du khi-deux (identification de valeur-seuils).

Il est au préalable nécessaire de rappeler certaines caractéristiques des données initiales. La démarche d'analyse des données sera ensuite illustrée par des exemples.

- la répartition des effectifs et le regroupement de modalités

La répartition des observations entre les différentes modalités du taux de mortalité est très inégale (*cf.* tableau 18) : les données de peuplements sains sont très majoritaires, et les observations sont ensuite d'autant moins nombreuses que le taux de mortalité est élevé.

Taux de mortalité	0 %	0 à 10 %	10 à 30 %	30 à 50 %	50 à 75 %	Plus de 75 %	**Total**
Effectif	435	40	38	23	18	3	557

Tableau 18 : Répartition des données selon les classes de taux de mortalité (pin sylvestre).

Ce déséquilibre marqué a une incidence forte sur les tests pour les variables qualitatives, qui sont toujours plus performants si les effectifs dans chacune des modalités sont proches, sinon identiques. Pour parer à cet inconvénient, il est en pratique souvent nécessaire de regrouper des classes, au moins celles dont les effectifs sont les plus faibles (à partir de 30 % de mortalité par exemple).

Cependant, ces regroupements peuvent avoir une influence très importante sur le résultat du test, dont on constate qu'il varie fréquemment selon le choix de regroupement effectué. Il est donc très important de bien choisir la manière de regrouper les données, et il semble plus raisonnable que ce choix s'appuie sur les données initiales plutôt que sur une décision arbitraire de l'opérateur.

Les représentations graphiques des relations entre les données peuvent guider ce choix. Elles sont théoriquement plus délicates dans le cas d'une variable de réponse qualitative, mais on peut tout de même utiliser des graphiques tels que la figure 7 (§ 2.3.1.1.). Il faut cependant à l'esprit que les ordonnées ne sont pas des valeurs absolues du taux de mortalité, mais seulement les modalités ordonnées de la variable qualitative du taux de mortalité.

- application de la méthode aux facteurs quantitatifs

La méthode adoptée peut être utilisée dans le cas des variables quantitatives. Elle est également applicable aux températures minimale et moyenne annuelles, réparties initialement en classes mais qui ont pu être transformées en données quantitatives sans altérer leur structure.

La démarche suivie est illustrée à partir de l'une de ces données : la température minimale annuelle.

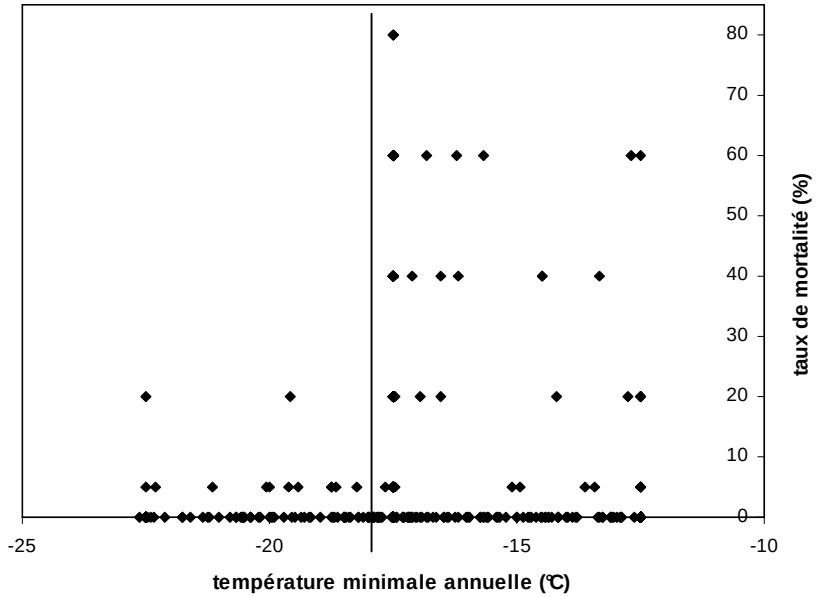


Figure 10 : Relation entre le taux de mortalité et la température minimale annuelle (pin sylvestre) – mise en évidence d'une valeur-seuil.

Sur la figure 10 ci-dessus, on remarque que les valeurs très basses de température minimale ne sont jamais concernées par les forts taux de mortalité (supérieurs à 30 %), et peu représentées par les taux de dégâts compris entre 10 et 30 %. On peut identifier graphiquement pour tous ceux-ci une valeur-seuil de température (ici voisine de -17,5 °C), et remarquer qu'elle semble par contre sans incidence pour les peuplements sains (0 % de mortalité), et les peuplements dont le taux de mortalité est inférieur à 10 %.

Si le taux de mortalité et la température minimale annuelle étaient deux variables indépendantes, la distribution des températures (moyenne, dispersion) devrait être la même dans chacune des modalités de taux de dégât. On doit cependant tenir compte du fait que les effectifs sont très différents entre les classes de mortalité (*cf.* tableau 18), c'est pourquoi on peut difficilement conclure grâce au seul examen de la densité de points sur le graphique. Mais il faut déterminer s'il est « normal » que, eu égard au faible effectif de peuplements présentant plus de 10 % de mortalité, ceux-ci ne soient pas représentés dans les températures très basses. La question est donc la suivante : la proportion d'observations dont la température est inférieure à la valeur-seuil (ou, de manière symétrique, supérieure à celle-ci) est-elle significativement différente entre les modalités du taux de mortalité ?
Le test du khi-deux (comparaison de proportions) permet de répondre à cette question.

Cependant, ce test comporte des hypothèses qui doivent être vérifiées pour que les résultats soient valides. Il est fondé sur l'approximation d'une loi binomiale (distribution d'échantillonnage d'une proportion) par la loi normale. Cela nécessite notamment des effectifs suffisants dans chaque modalité du taux de mortalité (les conditions exactes seront données par la suite). Ici, on ne peut effectuer le test directement sur les 6 modalités du taux de mortalité, il faut donc procéder à des regroupements.

Comme cela a été expliqué plus haut, il est préférable d'effectuer ces regroupements sur la base de l'observation des données, en rapprochant les modalités qui ont un comportement similaire. Dans le cas de figure illustré ci-dessus, il semble judicieux de regrouper ensemble tous les taux de mortalité supérieurs à 30 % d'une part, et les peuplements sains et ceux touchés par une mortalité inférieure à 10 % d'autre part. Les peuplements dont le taux de dégât est compris entre 10 et 30 % sont intermédiaires, et l'on peut choisir de les rapprocher d'une catégorie ou de l'autre, ou encore effectuer un test sur chaque possibilité. Ici, on les regroupera avec les observations dont le taux de mortalité est le plus élevé en remarquant qu'ils présentent une distribution des températures fortement dissymétrique par rapport à la valeur-seuil.

On peut alors dresser le tableau des effectifs observés, pour une valeur-seuil de température fixée graphiquement à –17,6 °C (*cf.* tableau 19).

Effectif	**Taux de mortalité**		
Temp. minimale	**< 10 %**	**> 10 %**	**Total**
< -17,6 °C	94	2	96
> -17,6 °C	381	80	461
Total	475	82	557

Tableau 19 : Table d'effectifs des combinaisons du taux de mortalité avec la température minimale (pin sylvestre).

La réalisation du test du khi-deux se base sur cette table d'effectifs « observés ». Elle nécessite également le calcul des effectifs « théoriques » pour chacune des combinaisons, qui est l'effectif attendu sous l'hypothèse d'égalité des proportions de valeurs de températures inférieures au seuil fixé entre les deux modalités regroupées du taux de mortalité. Cet effectif théorique se calcule pour chacune des cases en effectuant le produit des effectifs totaux des ligne et colonne, divisé par l'effectif total. Par exemple, pour la modalité « mortalité < 10 % & Tmin < -17,6 °C », l'effectif théorique est de (96 x 475)/557.

La véritable condition d'application du test concerne ces effectifs théoriques : ils doivent tous être supérieurs ou égaux à 5 (ce qui est vérifié ici). Il faut ensuite calculer le critère du test (*cf.* formule au § 2.2.1.), et le comparer aux valeurs tabulées pour un nombre de degré de liberté (ici, 1) et un risque de première espèce (rejet à tort de l'hypothèse nulle) donnés. Ici, le test est significatif avec un risque d'erreur inférieur à 1 %, ce qui permet de conclure que la proportion de valeurs basses de température minimale est significativement différente entre les 2 classes regroupées de mortalité.

Le test traite de façon parfaitement symétrique les lignes (modalités de température) et les colonnes (classes de mortalité), le même test du khi-deux peut donc être utilisé pour tester l'indépendance entre deux variables qualitatives : la température minimale (2 modalités) et le taux de mortalité (2 modalités également). La conclusion peut ainsi être formulée de la manière suivante : les variables de température minimale (selon les modalités définies) et de taux de mortalité (idem) ne sont pas indépendantes.

Conformément à l'objectif initial, une relation a donc été identifiée entre le taux de mortalité et un facteur du milieu : sur la base des données disponibles, on peut affirmer que dans des conditions de température minimale annuelle inférieure à –17,6 °C, les mortalités supérieures à 10 % sont statistiquement beaucoup plus rares qu'ailleurs.

Appliquée aux facteurs quantitatifs, cette méthode consiste donc en l'identification graphique d'un seuil permettant de transformer ces facteurs en variables qualitatives. On teste ensuite l'indépendance de ces variables avec le taux de mortalité dont les modalités sont regroupées, également sur la base d'un examen graphique des données. Cette démarche d'analyse est illustrée en annexe 3. Il est aussi possible d'utiliser le test du khi-deux pour tester l'indépendance entre les facteurs qualitatifs et le taux de mortalité.

- application de la méthode aux facteurs qualitatifs

Cette même démarche est aussi applicable aux facteurs du milieu qualitatifs, pour lesquels il n'est pas besoin d'identifier de seuils puisqu'ils se présentent déjà sous la forme de modalités. Il est cependant toujours nécessaire d'effectuer des regroupements des classes de mortalité, et on peut tester pour cela plusieurs possibilités. L'analyse de la relation entre le taux de mortalité et le type de roche permet d'illustrer ce cas de figure.

Effectif	**Taux de mortalité**		
Type de roche	**< 10 %**	**> 10 %**	**Total**
calcaire siliceux ou dolomitique	94	9	103
calcaire	200	50	250
marne ou argile	109	16	125
roches acides	72	7	79
Total	475	82	557

Tableau 20 : Table d'effectifs des combinaisons du taux de mortalité avec le type de roche (pin sylvestre).

Le tableau 20 récapitule les effectifs observés. Le regroupement des classes de mortalité est ici le même que précédemment. Comme le nombre total de modalités croisées des deux facteurs est supérieur à 4 (ici 8), le test est valide si au moins 80 % des effectifs théoriques sont supérieurs ou égaux à 5 (règle de Cochran, d'après Scherrer, 1984). Les conditions de validité du test sont satisfaites, et le résultat de celui-ci est significatif avec un risque d'erreur inférieur à 5 % (nombre de degrés de liberté = 3). On obtient d'ailleurs le même résultat en regroupant ensemble toutes les observations dont le taux de mortalité est supérieur à 0, comparées aux seuls peuplements sains. La répartition des observations entre les deux modalités de taux de mortalité dépend donc du type de roche.

Mais ce résultat ne suffit pas pour l'interprétation : il serait par exemple intéressant de savoir quels sont les types de roche les plus concernés par les taux de mortalité supérieurs à 10 %. On peut répondre à cette question par l'examen des contributions au khi-deux : il s'agit de la part du critère final du test due à chacune des combinaisons (cases du tableau d'effectifs), ce critère étant la somme des contributions sur toutes les cases (*cf*. formule au § 2.2.1.). Plus la contribution d'une case (croisement des modalités des variables) est importante, plus l'effectif observé dans cette case est éloigné de l'effectif théorique, et plus elle contribue à rendre le test significatif, c'est-à-dire au rejet de l'hypothèse nulle d'indépendance des variables.

Contributions	**Taux de mortalité**		
Type de roche	**< 10 %**	**> 10 %**	**Total**
calcaire siliceux ou dolomitique	0,432	2,505	-
calcaire	0,817	4,781	-
marne ou argile	0,054	0,314	-
roches acides	0,320	1,843	-
Total	-	-	11,015

Tableau 21 : Contributions au khi-deux des modalités de type de roche et de taux de mortalité (pin sylvestre).

Le tableau 21 montre que les plus fortes contributions au khi-deux sont, par ordre décroissant, la combinaison des taux de mortalité supérieurs à 10 % et des roches calcaires, celle des mêmes taux de mortalité avec les calcaires siliceux ou dolomitiques, puis celle avec les roches acides. En comparant ces constats avec les proportions observées (tableau 20), on constate que les roches calcaires se distinguent nettement par une proportion de taux de mortalité dépassant 10 % très supérieure à la moyenne, alors qu'elle est en deçà de la moyenne pour les calcaires siliceux ou dolomitiques et les roches acides. Par contre, les roches marneuses ou argileuses ne se démarquent quasiment pas de l'effectif attendu.

Cette même démarche peut être menée sur les zones climatiques (*cf*. § 1.1.2. et 2.1.2.). On se heurte cependant au faible nombre d'observations situées dans la zone littorale (*cf*. tableau 22). Il n'est alors pas possible de prendre en compte les données de la zone littorale dans l'étude de la relation entre le taux de mortalité et la zone climatique, car les conditions de validité du test du khi-deux ne sont pas respectées. L'analyse ne peut donc porter que sur les deux autres zones climatiques (effectif de 547).

Zone climatique	Effectif
Littoral (4)	10
Préalpes (11)	260
Montagnes sud-alpines (12 et 13)	287
Total	557

Tableau 22 : Répartition des données selon les zones climatiques (pin sylvestre).

La méthode exposée ci-avant a ainsi été appliquée à l'ensemble des facteurs du milieu disponibles pour l'étude, afin d'étudier les relations qu'ils présentent avec le taux de mortalité, indépendamment les uns des autres.

2.4. Présentation des premiers résultats de l'analyse des données et commentaires.

Cette méthode a d'abord été appliquée aux données pour le pin sylvestre, puis à celles du sapin pectiné. Les graphiques et tableaux permettant d'illustrer les relations entre les facteurs du milieu et le taux de mortalité sont donnés dans les annexes 4 (pin sylvestre) et 5 (sapin pectiné).

La méthode conduit à identifier d'une part les modalités qui présentent une proportion trop élevée de taux de mortalité forts (*ie*. supérieurs à un seuil qui dépend du regroupement effectué), et d'autre part les modalités caractérisées par une part trop faible de ces taux de mortalité élevés. Certaines modalités ne se retrouvent dans aucune de ces deux catégories, lorsqu'elles ne se distinguent pas par une proportion anormale de forts taux de mortalité (cas des marnes et argiles ci-dessus).

Selon les regroupements de taux de mortalité effectués, l'analyse permet de distinguer les peuplements sains des autres, ou bien différentes intensités de mortalité (forts taux de mortalité comparés aux faibles taux de dégâts).

2.4.1. Cas du pin sylvestre.

2.4.1.1. Résultats.

Les résultats de tous les tests significatifs parmi ceux réalisés sur les observations de pin sylvestre sont récapitulés dans les tableaux 23 et 24 ci-après.

Facteur écologique	Modalités peu concernées par des mortalités supérieures à la valeur-seuil	Valeur-seuil de taux de mortalité	Significativité
Zone climatique	Montagnes	10 %	*
		50 %	**
Pluie d'hiver	> 320 mm	0 %	**
Pluie d'été	> 222 mm	30 %	*
Pluie d'automne	> 335 mm	0 %	**
Pluie de printemps	> 300 mm	0 %	**
		10 %	**
Pluie annuelle	> 1180 mm	0 %	**
	> 1150 mm	0 %	**
Angle de Gams d'hiver	> 49 °	10 %	*
Angle de Gams d'été	> 53 °	0 %	**
		10 %	**
		30 %	**
Nombre de mois de gel	> 5,1/an	0 %	**
Température minimale	< -17,6 °C	10 %	**
Altitude	> 1230 m	10 %	**
		30 %	**
Pente	< 50 %	0 %	**
		10 %	**
		30 %	**
pH	< 6,5	0 %	*
Type de roche	Calcaires siliceux ou dolomitiques	0 %	*
		10 %	*
		30 %	**
	Roches acides	10 %	*
		30 %	**

Tableau 23 : Modalités des facteurs écologiques caractérisées par un défaut de mortalités (pin sylvestre). *La significativité est symbolisée par ** si le test présente un risque d'erreur < 1 %, ou par * si le risque d'erreur est entre 1 et 5 %.*

Facteur écologique	Modalités fortement concernées par des mortalités supérieures à la valeur-seuil	Valeur-seuil de taux de mortalité	Significativité
Zone climatique	Préalpes	10 %	*
		50 %	**
Indice de climat lumineux	< 0,5	0 %	**
Courbure du terrain	> 0,2	0 %	*
Type de roche	Calcaires	0 %	*
		10 %	*
		30 %	**

Tableau 24 : Modalités des facteurs écologiques caractérisées par un excès de mortalités (pin sylvestre). *Idem ci-dessus.*

Aucun résultat significatif n'a été obtenu avec la température moyenne annuelle, ni avec les angles de Gams de printemps, d'automne et annuel.

2.4.1.2. Commentaires.

- Variables climatiques

Les valeurs les plus élevées de pluie annuelle comme des pluies saisonnières sont statistiquement nettement moins touchées par les mortalités. Il en est de même des valeurs basses de température minimale, des valeurs élevées de nombre annuel de mois de gel et des altitudes élevées. Ces facteurs hydriques et thermiques d'ordre climatique sont liés : de manière générale, l'augmentation de l'altitude va de pair avec la diminution des températures et l'augmentation des précipitations. Ainsi, d'après l'analyse des données, les zones froides et humides sont statistiquement moins touchées par le phénomène de mortalité que les autres.
Ce constat est concordant avec les connaissances sur l'autécologie de l'essence, de tempérament plutôt montagnard et donc peu adaptée aux conditions chaudes et sèches des altitudes basses (*cf.* § 1.2.1.).

Mais il est perturbé par d'autres résultats :

- Les fortes valeurs d'angle de Gams (été et hiver) sont également moins touchées par les mortalités. Les angles de Gams élevés caractérisent des secteurs dits « internes » où les précipitations sont faibles eu égard à l'altitude. Il s'agit donc de zones sèches, ce qui va en sens inverse des précédentes constatations.
- En ce qui concerne l'indice de climat lumineux, variable synthétique calculée à partir de la pente et de l'exposition (*cf.* § 2.1.2.), les faibles valeurs se trouvent les plus sévèrement touchées par la mortalité, et aucune répartition anormale n'est repérée dans les valeurs élevées. Le constat est donc que ce sont les expositions très fraîches (ubacs marqués) qui sont préférentiellement concernées par les phénomènes de mortalité, se démarquant ainsi des expositions chaudes (adrets). Ce résultat est également délicat à interpréter du point de vue des conditions hydriques et thermiques, les adrets étant *a priori* plus défavorables. Cependant, il est confirmé par les observations ou résultats d'autres études (Thabeet, 2008 et Vennetier *et al.*, 2007 : *cf.* § 1.2.1. et 1.3.2.).

- Variables topographiques et édaphiques

Les valeurs élevées de courbure du terrain s'avèrent très touchées par les phénomènes de mortalité. Or elles correspondent à des topographies convexes, donc à des situations où le drainage hydrique latéral est défavorable (sécheresse édaphique).

Les valeurs de pente faible présentent très rarement des mortalités. La pente influe généralement sur le drainage hydrique latéral, mais également sur l'épaisseur du sol qui est rarement importante sur les pentes fortes où les matériaux sont difficilement stabilisés. Ce sont deux paramètres importants du bilan hydrique stationnel. Ripert et Vennetier (2002) citent le seuil critique de 27° (soit 51 %) de pente comme étant fréquemment identifié dans les études autécologiques. Le seuil identifié à partir des données de l'étude est très proche de cette valeur, ce qui conforte ce résultat.

Les valeurs de pH bas sont moins touchées par les mortalités, ce qui concorde avec l'autécologie de l'espèce, qui « préfère » les sols acides et supporte mal les sols calcaires. Les résultats concernant le type de roche reflètent également cela, mais ils sont potentiellement liés à d'autres données pédologiques (profondeur et nature du sol). Les calcaires présentent beaucoup plus de mortalités (et notamment de mortalités importantes) que les autres modalités de roche, alors que les roches acides ou les calcaires siliceux ou dolomitiques sont relativement épargnés.

- Zone climatique

Les zones climatiques ont d'abord été définies sur des critères climatiques, mais elles sont également potentiellement représentatives des conditions générales de relief et de géologie (*cf.* 1.1.2.) si bien qu'elles peuvent être considérées comme une synthèse des principales conditions écologiques à l'échelle des Alpes-Maritimes.

Les peuplements de pin sylvestre des Préalpes sont nettement plus touchés par les mortalités, et notamment les fortes mortalités (supérieures à 50 %) que ceux de la zone montagneuse. Or, les Préalpes présentent un climat plus chaud et plus sec (*cf.* § 1.1.2.) que la zone des Montagnes sud-alpines. Elles présentent également des altitudes inférieures, et une géologie dominée par les calcaires et marnes (*cf.* § 1.1.2.), autant de facteurs *a priori* défavorables au pin sylvestre (*cf.* § 1.2.1.).

2.4.2. Cas du sapin pectiné.

2.4.2.1. Spécificités des données pour le sapin pectiné.

Les données de taux de mortalité du sapin pectiné sont de même nature que celles du pin sylvestre, le croisement avec les facteurs écologiques a donc été réalisé de la même manière que celle décrite au § 2.2.. Les données ont ensuite fait l'objet des mêmes traitements statistiques. Il convient cependant de souligner quelques spécificités des données concernant le sapin pectiné.

La répartition des observations entre les différentes classes de mortalité est très différente de celle du pin sylvestre : les données de peuplements sains ne sont plus extrêmement majoritaires (*cf*. tableau 25).

Taux de mortalité	0 %	0 à 10 %	10 à 30 %	30 à 50 %	50 à 75 %	Plus de 75 %	**Total**
Effectif	83	13	51	69	12	9	237

Tableau 25 : Répartition des données selon les classes de taux de mortalité (sapin pectiné).

La distribution des surfaces de polygones selon les modalités de taux de mortalité est par contre semblable à celle présentée par les données du pin sylvestre (*cf*. § 2.2.2.).

Une autre spécificité des données pour le sapin pectiné est le faible nombre d'observations (21) dans la zone climatique des Préalpes, où le sapin est très peu représenté.

2.4.2.2. Résultats.

Les résultats des tests significatifs sont donnés dans les tableaux 26 et 27 ci-dessous, selon les mêmes modalités que pour le pin sylvestre.

Facteur écologique	**Modalités peu concernées par des mortalités supérieures à la valeur-seuil**	**Valeur-seuil de taux de mortalité**	**Significativité**
Pluie d'hiver	> 290 mm	0 %	**
		30 %	*
Pluie d'été	> 230 mm	0 %	**
Pluie d'automne	> 335 mm	0 %	**
Pluie de printemps	> 308 mm	0 %	**
	> 296 mm	30 %	**
Pluie annuelle	> 1120 mm	0 %	**
Angle de Gams d'hiver	> 46,5 °	0 %	**
Angle de Gams printemps	> 45 °	0 %	**
Angle de Gams automne	> 42 °	0 %	**
		10 %	**
Angle de Gams annuel	> 46,5 °	0 %	**
Nombre de mois de gel	> 5	0 %	**
Température moyenne	< 8 °C	0 %	**
Altitude	> 1430 m	0 %	**
		10 %	**
		30 %	**
Pente	< 55 %	0 %	**
		10 %	**
		30 %	*
		50 %	*

Tableau 26 : Modalités des facteurs écologiques caractérisées par un défaut de mortalités (sapin pectiné). *La significativité est symbolisée par ** si le test présente un risque d'erreur < 1 %, ou par * si le risque d'erreur est entre 1 et 5 %.*

Facteur écologique	**Modalités fortement concernées par des mortalités supérieures à la valeur-seuil**	**Valeur-seuil de taux de mortalité**	**Significativité**
Indice de climat lumineux	< 0,5	0 %	**
	< 0,8	0 %	**
Courbure du terrain	> 0,4	0 %	**

Tableau 27 : Modalités des facteurs écologiques caractérisées par un excès de mortalités (sapin pectiné). *Idem ci-dessus*.

Aucun résultat significatif n'a été obtenu avec la zone climatique, le type de roche, l'angle de Gams estival, la température minimale annuelle et le pH de l'horizon A.

2.4.2.3. Commentaires.

On retrouve de nombreux résultats similaires à ceux obtenus pour le pin sylvestre (*cf*. § 2.4.1.2.), même si les valeur-seuils varient un peu. Il en est ainsi des précipitations, des angles de Gams, des

températures, de l'altitude, de la pente, de l'indice de climat lumineux et de la courbure du terrain. Ces résultats appellent donc globalement les mêmes commentaires et remarques que celles du § 2.4.1.2.

Il faut cependant remarquer l'absence de la zone climatique (test valide, mais non significatif), du type de roche (idem) et du pH, alors que ces paramètres auraient pu apparaître, au vu de l'autécologie de l'espèce (*cf.* § 1.2.2.).

2.5. Discussion.

L'analyse statistique des données a conduit à identifier dans certains cas des relations de non-indépendance entre les facteurs du milieu et le taux de mortalité. Ces relations significatives concernent des modalités basées sur la définition graphique de seuils, pour les facteurs quantitatifs mais aussi pour les classes de taux de mortalité (regroupement des classes de part et d'autre du seuil). En ce qui concerne les facteurs qualitatifs, leurs modalités initiales ont été conservées dans l'analyse. Il est donc évident que les résultats dépendent fortement de la méthode utilisée, des seuils qui ont été identifiés et testés. L'ensemble des combinaisons possibles n'a pas pu être testé, en raison du nombre infini de tests qu'il aurait fallu réaliser. De plus, la méthode choisie sous-tend que la relation entre les variables se base sur des valeur-seuils. Cette forme n'est peut-être pas adaptée pour toutes les variables, certaines relations pouvant être plus progressives, ou bien comporter plusieurs seuils successifs.

Les résultats obtenus dépendent également des données initiales. Il faut rappeler ici que ces données ont une origine double (*cf.* § 2.1.1.) : les polygones dont le taux de mortalité est strictement supérieur à 0 % ont réellement été observés sur le terrain, alors que les autres, « sains », ont été obtenus par défaut à partir des peuplements non signalés dans la catégorie précédente (ils n'ont pas été observés). On ne peut donc avoir aucune certitude quant à la réalité des taux de mortalité nuls, ils peuvent présenter des mortalités sans avoir été observés sur le terrain. Cela est d'autant plus possible que les peuplements sont isolés, de petite taille, difficilement accessibles, et que l'essence ne suscite pas un intérêt marqué de la part des forestiers locaux (cas du pin sylvestre, par opposition au sapin pectiné). Or, dans de nombreux cas, le regroupement des classes de taux de mortalité sépare les peuplements « sains » (0 %) des autres (> 0 %), et le test conduit à rejeter l'indépendance de cette variable avec les modalités d'un facteur écologique. Même dans les autres cas, le poids des données saines reste très important du fait de leur effectif. Dans l'incertitude où l'on se trouve vis-à-vis des données « saines », la validité des résultats de ces tests est profondément mise en doute. Cependant, les données du sapin pectiné sont certainement plus fiables que celles du pin sylvestre, car l'intérêt patrimonial et sylvicole des sapinières du département est bien reconnu.

Au vu de tous ces éléments, de nombreux biais ou effets parasites peuvent potentiellement influencer ces résultats, dont certains seront illustrés dans le paragraphe suivant (*cf.* § 3.3.). Il s'agit donc de premiers résultats « statistiques » correspondant à une méthode d'analyse particulière, *qu'il ne faut surtout pas sortir de leur contexte en les considérant valides et utilisables en l'état*.

D'autre part, même si on peut avancer un début d'interprétation possible pour certains résultats (*cf.* § 2.4.1.2.), on ne peut pas parler d'effet de tel ou tel facteur sur l'intensité de la mortalité. En effet, outre les incertitudes qui entachent les résultats, les facteurs ne sont pas indépendants entre eux. La variation de l'un d'entre eux s'accompagne de la variation de ceux qui lui sont corrélés (par exemple, l'altitude et la température), et les liens de cause à effet sont dans ce cas très difficiles à établir. La relation observée entre le taux de mortalité et un facteur écologique peut également dépendre de la valeur d'autres paramètres, ce qui n'a pas été pris en compte. Il s'agit dans ce cas d'un phénomène d'interaction (par exemple, relation avec l'altitude différente selon la zone climatique).

Ainsi, il apparaît maintenant nécessaire de considérer les facteurs ensemble, et non plus un-à-un indépendamment des autres, afin de prendre en compte ces corrélations et ces interactions dans l'analyse de la relation entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu. Les analyses ultérieures seront également l'occasion d'évaluer la pertinence écologique des résultats obtenus.

3. Approche plurifactorielle des dépérissements et construction de modèles d'explication.

3.1. Corrélations entre variables et analyses multivariées

L'utilisation de techniques statistiques particulières permet d'une part de visualiser l'organisation générale d'un jeu de données, ses principaux axes structurants et les corrélations entre les variables, et d'autre part d'étudier les relations entre une variable et toutes les autres prises ensemble.

3.1.1. Analyse en composantes principales et corrélations entre variables quantitatives.

L'analyse en composantes principales permet de résumer un tableau de variables quantitatives en formant à partir de celles-ci des variables composites synthétiques, non corrélées entre elles, et telles que la projection du nuage de points sur les axes définis par ces variables synthétiques soit la meilleure possible (la plus conforme aux données initiales). Cette méthode présente un grand intérêt lorsque de nombreuses variables initiales peuvent être synthétisées par un petit nombre de variables composites, ce qui permet de visualiser graphiquement l'organisation des données. L'analyse des relations entre les axes ainsi formés et les variables initiales met en évidence les facteurs structurants des données (qui représentent le mieux la dispersion des données), et les corrélations entre les variables initiales.

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les variables quantitatives du jeu de données du pin sylvestre. Les variables qualitatives ne peuvent cependant pas être prises en compte par la méthode (zone climatique, type de roche et classe de taux de mortalité). L'analyse a été conduite sur les données centrées-réduites (ou « normées ») pour supprimer l'influence de l'hétérogénéité des variables initiales, qui sont exprimées dans des unités différentes.

L'analyse donne les résultats suivants : la première composante, *ie.* la première variable composite explique 33,3 % de la variance (ou inertie) totale, la deuxième 22,3 %, et la troisième 8,3 %. Les composantes sont ordonnées par proportion décroissante d'inertie expliquée, et il semble dans ce cas qu'on puisse obtenir une représentation correcte des données avec seulement deux composantes (56,5 % de l'inertie totale).

Ce graphique en deux dimensions peut également figurer les variables initiales et les corrélations qu'elles présentent avec chacune des composantes (*cf.* figure 11). La représentation graphique permet de mesurer les corrélations entre les variables initiales : deux variables sont indépendantes selon les deux premières composantes si les flèches qui les représentent dans la figure sont orthogonales (car les axes ne sont pas corrélés), elles sont fortement corrélées si l'angle entre les flèches est proche de 0° (corrélation positive très forte) ou de 180° (corrélation négative très forte). Les variables les mieux représentées par les deux premières composantes sont celles dont les flèches sont les plus longues. On peut alors remarquer que :

- l'altitude est fortement corrélée aux températures et au nombre de mois de gel, résultat qui est peu surprenant (gradient thermique altitudinal, *cf.* § 1.1.2.). Ces variables sont également bien corrélées aux angles de Gams de printemps et annuel, et à la pluie d'été ;
- peu liées aux précédentes, les autres pluies sont bien corrélées entre elles ainsi qu'à la pente et à l'angle de Gams d'été ;
- les variables de courbure du terrain, de pH et d'indice de climat lumineux sont peu liées aux deux premières composantes.

Ainsi, on retrouve sur les données du pin sylvestre un gradient thermique nettement lié à l'altitude. Par contre, les précipitations semblent peu dépendantes de l'altitude, hormis celles de la période estivale. De manière générale, les pluies saisonnières et annuelle sont assez corrélées entre elles, sauf avec la valeur estivale, et cette tendance se retrouve sur les angles de Gams. Enfin la pente, paramètre de relief n'est pas reliée à l'altitude selon les deux premières composantes.

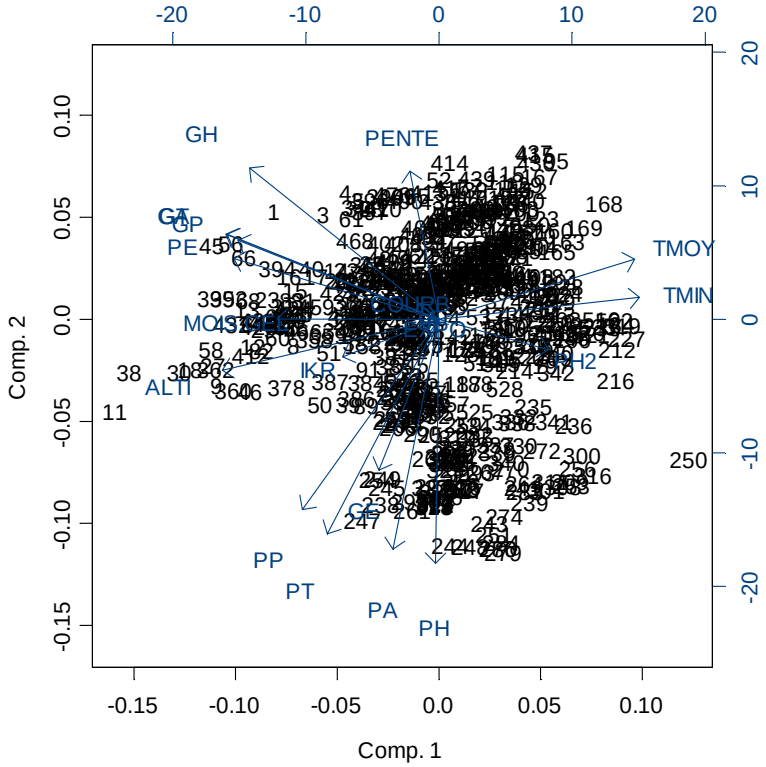


Figure 11 : Analyse en composantes principales normée – projection des données sur les composantes principales 1 et 2 et contributions des variables initiales aux axes (pin sylvestre). *Variables : altitude (ALTI), nombre de mois de gel (MOIS GEL), angles de Gams de printemps, d'été, d'automne, d'hiver et annuel (GP, GE, GA, GH, GT), pluies (PX, idem GX), températures moyennes et minimales (TMOY, TMIN), pente (PENTE), courbure du terrain (COURB), indice de climat lumineux (IKR), pH (PH2).*

On peut également étudier les relations entre les variables du jeu de données initial au moyen d'autres méthodes.

3.1.2. Autres relations entre les variables : valeurs des facteurs quantitatifs selon la zone climatique.

Les zones climatiques décrites au § 1.1.2. représentent une synthèse régionale des conditions écologiques. Basées initialement sur des critères climatiques, elles intègrent également d'autres facteurs écologiques, notamment le relief et la géologie.

Des analyses de variance ont été réalisées pour savoir si les valeurs des facteurs écologiques quantitatifs disponibles pour l'étude sont les mêmes dans les deux zones climatiques (Préalpes et Montagnes sud-alpines), sur la base du jeu de données utilisé pour le pin sylvestre. Les résultats sont significatifs avec tous les facteurs, sauf la courbure du terrain, l'indice de climat lumineux, et la pluie de printemps. Selon les données de l'étude, il apparaît donc que les zones climatiques sont caractérisées par les conditions climatiques (températures, angles de Gams et pluies, sauf pluie de printemps), mais aussi par l'altitude, la pente et le pH. Les Préalpes présentent ainsi un climat plus chaud et plus sec, des altitudes et des pentes inférieures, et des pH plus élevés que les Montagnes sud-alpines.

3.1.3. Mise en relation des facteurs quantitatifs avec le taux de mortalité.

Plusieurs méthodes existent pour analyser les relations entre une variable et un ensemble de facteurs qui peuvent présenter des corrélations entre eux comme c'est le cas ici. Il s'agit notamment de la régression PLS (ou régression « des moindres carrés partiels ») si la variable de réponse est quantitative, et de l'analyse factorielle discriminante si elle est qualitative.

3.1.3.1. Régression PLS

La régression PLS modélise la relation entre une variable et un ensemble de facteurs, tous deux étant quantitatifs. Cette méthode présente l'avantage de bien gérer des facteurs multiples intercorrélés, contrairement à la régression linéaire multiple. Cependant, elle ne peut s'appliquer ici qu'à la variable transformée de taux de mortalité, quantitative.

Le modèle final élaboré grâce à la régression PLS et soumis à une validation croisée explique un peu moins de 31 % de la variance, ce qui est faible. Le modèle obtenu est donc relativement peu explicatif, mais le défaut majeur de la méthode est qu'elle s'applique à la variable de taux de mortalité transformée en donnée quantitative. Les analyses menées précédemment ont montré les problèmes posés par l'utilisation de cette variable transformée (structure des résidus, *cf.* § 2.3.1.), c'est pourquoi cette méthode ne semble pas pertinente pour l'étude.

Il faut donc trouver une méthode s'appliquant au cas d'une variable de réponse qualitative.

3.1.3.2. Analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante a pour objet la séparation de groupes à partir des valeurs d'un ensemble de variables quantitatives. Les groupes sont constitués par les modalités d'une variable qualitative, ils correspondent ici aux classes de taux de mortalité. Cette méthode, proche de l'analyse en composantes principales, conduit à former des variables composites appelées fonctions discriminantes, ordonnées selon leur pouvoir discriminant décroissant et non corrélées les unes aux autres.

La mise en œuvre de l'analyse factorielle discriminante a été effectuée sur les données du pin sylvestre. Seules les trois premières fonctions discriminantes sont significatives. La qualité de la méthode pour la ségrégation des classes de dégât peut être appréciée par la représentation graphique des données des différentes modalités dans les plans formés par les fonctions discriminantes (*cf.* figure 12). Ces dernières visent en effet à distinguer les différents groupes, qui devraient donc être graphiquement distincts.

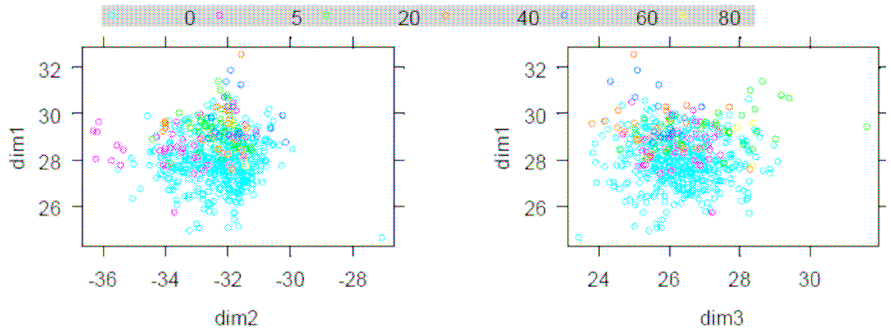


Figure 12 : Analyse factorielle discriminante – projection des données séparées par classe de mortalité selon les fonctions discriminantes (*dim*) 1 et 2, et 1 et 3 (pin sylvestre). *Codes des classes de taux de mortalité : 0 = 0 %, 5 = inférieur à 10 %, 20 = 10 à 30 %, 40 = 30 à 50 %, 60 = 50 à 75 %, 80 = plus de 75 %.*

La figure 12 ci-dessus montre que les fonctions discriminantes ne parviennent pas à discriminer nettement les différentes classes de taux de mortalité, qui se trouvent largement superposées sur les graphiques. Cette méthode ne semble donc pas capable de différencier les différents taux de dégâts au moyen des facteurs écologiques quantitatifs disponibles.

Au-delà de cet aspect descriptif, les fonctions discriminantes (formées par combinaisons linéaires des variables) peuvent être utilisées pour prédire l'appartenance à un groupe à partir de valeurs des variables quantitatives. On peut ainsi utiliser ces fonctions pour réaffecter les données de départ entre les différentes classes de taux de mortalité. Les modalités prédites peuvent alors être comparées aux modalités réelles, pour juger de la qualité de la discrimination (*cf.* tableau 28). C'est la méthode de *resubstitution*, qui présente cependant l'inconvénient de sous-estimer le taux d'erreur car les données reclassées sont les mêmes qui ont servi à déterminer les fonctions discriminantes.

		taux de mortalité prédit					
		0	**5**	**20**	**40**	**60**	**80**
Taux de mortalité réel	**0**	420	3	1	6	4	1
	5	31	8	0	1	0	0
	20	31	0	8	0	0	0
	40	17	0	2	2	2	0
	60	12	0	0	1	5	0
	80	2	0	0	0	0	1

Tableau 28 : Resubstitution des données au moyen des fonctions discriminantes (pin sylvestre). *Les codes de taux de mortalité sont les mêmes que ceux de la figure, les chiffres du tableau correspondent aux effectifs.*

Une discrimination efficace des groupes se traduit par une prédiction relativement conforme aux données initiales, et donc par une répartition des effectifs proche de la diagonale du tableau. Or les fonctions discriminantes conduisent à affecter la très grande majorité des peuplements dont le taux de mortalité est non nul à la classe des peuplements sains (*cf*. tableau 28). Ce résultat est précisément contraire à l'objectif initial, qui est la discrimination des données présentant des mortalités par rapport aux données saines.

Ainsi, les méthodes statistiques d'analyse de données multivariées ne paraissent pas adaptées aux données de l'étude. Il est donc nécessaire de trouver une autre solution, afin d'identifier les facteurs les plus explicatifs vis-à-vis du taux de mortalité, et de trouver les combinaisons de valeurs de ces facteurs qui caractérisent des forts taux de mortalité, ou au contraire des données saines.

Ce résultat recherché peut d'abord servir de base à l'interprétation du phénomène de dépérissement, en termes de facteurs écologiques prédisposants (*cf*. § 1.5.2.), et avoir ensuite une application directe pour la prédiction de l'occurrence de mortalités dans les stations « à risque » identifiées. En raison de son application possible pour l'interprétation du phénomène, le résultat recherché sera par la suite dénommé *modèle d'explication*.

3.2. Construction pas à pas d'un modèle d'explication selon la méthode des valeur-seuils.

L'approche adoptée ici consiste en l'utilisation de la méthode retenue pour l'analyse des relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu considérés indépendamment les uns des autres. Cette méthode est basée sur l'identification de valeur-seuils et sur le test du khi-deux (*cf*. § 2.3.2.2.). Le cadre d'utilisation est cependant différent ici de celui du § 2, car il est maintenant nécessaire de prendre en compte plusieurs facteurs.

3.2.1. Intérêt de la combinaison des facteurs pour l'explication du taux de mortalité.

Pour prendre en compte plusieurs variables et les combiner dans un modèle, il est tout d'abord souhaitable de connaître les relations qu'elles présentent entre elles. Il s'agit tout d'abord des corrélations entre variables (*cf*. § 3.1.1.). En effet, si deux variables sont fortement corrélées, l'information qu'elles portent est redondante, et il peut s'avérer suffisant de ne prendre en compte qu'une seule de ces deux variables dans le modèle. C'est par exemple le cas de l'altitude et des températures moyennes et minimales pour les données du pin sylvestre.

Mais il n'est pas suffisant de tenir compte de ces corrélations, les variables peuvent également présenter des interactions entre elles. C'est-à-dire que la relation entre un facteur et la variable à expliquer peut dépendre de la valeur d'un autre facteur. Ce phénomène d'interaction est illustré par la figure 13 ci-après. Elle montre que dans la zone climatique des Montagnes sud-alpines, on observe une relation assez nette entre le taux de mortalité du pin sylvestre et l'indice de climat lumineux (*ikr*) : les mortalités importantes (> 30 %) ont toutes des valeurs d'*ikr* inférieures à 1 (ce qui correspond aux ubacs), alors que les données saines ou celles dont le taux de mortalité est plus faible sont représentées aussi bien en adret qu'en

ubac. Dans les Préalpes cependant, on n'observe aucune relation similaire. Donc la relation entre le taux de mortalité et l'indice de climat lumineux dépend de la zone climatique.

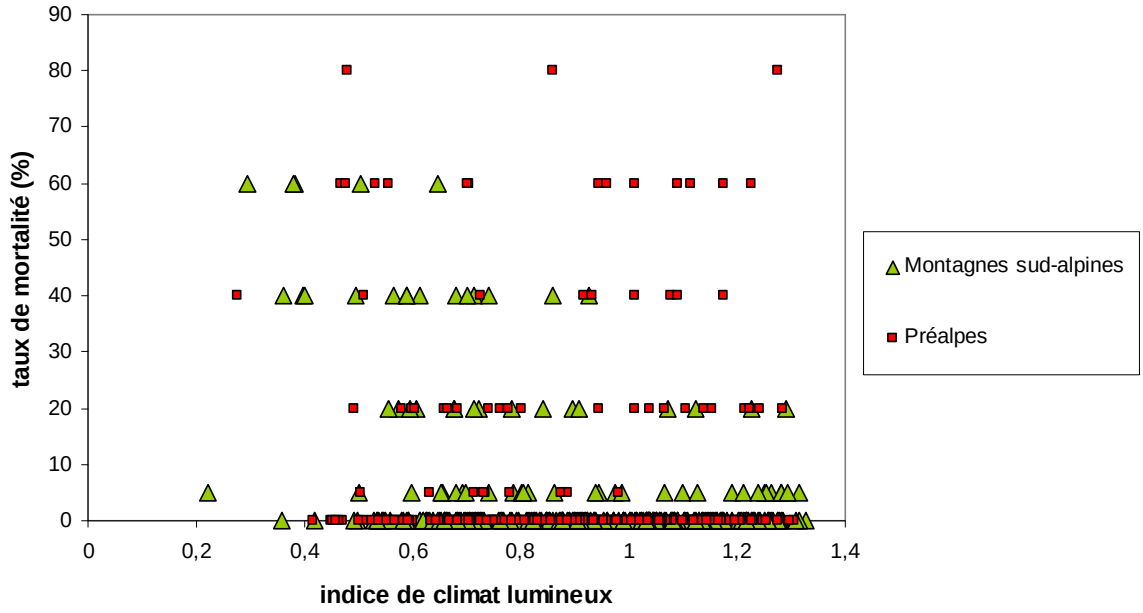


Figure 13 : Relation entre le taux de mortalité et l'indice de climat lumineux – distinction des deux zones climatiques (pin sylvestre).

Les corrélations et les interactions entre variables sont deux éléments à prendre en compte dans la construction du modèle d'explication à plusieurs facteurs.

3.2.2. Méthodologie de construction du modèle d'explication à partir de valeur-seuils.

La méthode basée sur les valeur-seuils et le test du khi-deux (*cf.* § 2.3.2.2. et 2.4.) conduit à séparer les données en deux : une partie caractérisée à la fois par un net défaut (ou un net excès) de forts taux de mortalités et par des valeurs définies du facteur considéré (inférieures ou supérieures au seuil s'il est quantitatif), et l'autre partie qui contient encore toutes les modalités de taux de mortalité en proportions importantes. Ainsi, avec l'exemple de la figure 13 ci-dessus, on peut facilement isoler dans les Montagnes sud-alpines les valeurs d'indice de climat lumineux supérieures à 1, caractérisées par un net défaut (et même une absence) de taux de mortalité supérieurs à 30 %. Il reste donc les valeurs inférieures à 1, qui contiennent un nombre important de taux de mortalités élevés, mais également de nombreuses données saines ou dont le taux de mortalité est faible. Ces données ne sont pas donc nettement caractérisées, et l'on peut chercher à distinguer parmi elles différentes intensités de mortalité au moyen d'un autre facteur, qui les discriminera plus facilement que l'indice de climat lumineux.

Ainsi, la méthode des seuils permet, à partir d'un facteur du milieu, de caractériser immédiatement une partie des données du point de vue de l'intensité de la mortalité, et parmi le reste des observations, on pourra sans doute en caractériser certaines au moyen d'un autre facteur écologique, et ainsi de suite. Cela forme un emboîtement de modalités (seuils) de facteurs écologiques successifs qui permet de discriminer différentes « intensités de mortalité ». Celles-ci ne correspondent plus aux modalités initiales du taux de mortalité, mais aux caractéristiques des données isolées par chacune des étapes (proportion de forts taux de mortalité notamment).

Afin de réaliser cet emboîtement de facteurs, il convient cependant de définir une règle établissant l'ordre d'intervention des différentes variables, car cela a évidemment une influence très forte sur le résultat obtenu. En première approche, la règle retenue est de conserver à chaque étape le facteur qui est le plus efficace, *ie*. celui qui permet de caractériser immédiatement le plus grand nombre de données par une intensité de mortalité déterminée. Le processus s'arrête lorsque les facteurs ne permettent plus d'isoler une partie des données (variables non discriminantes ou effectif trop faible pour les tests du khi-deux).

Les groupes de données isolés à chaque étape n'ont été précisément caractérisés qu'à la fin, en les comparant les uns aux autres sur la base des critères suivants (cf. annexe 6) :

- valeur maximale de taux de mortalité,
- nombre de données,
- proportion de données dont le taux de mortalité est nul ou inférieur à 10 %,
- moyenne des médianes de chaque classe de taux de mortalité pondérée par leurs effectifs.

Grâce à ces critères, les groupes de données ont été répartis à dire d'expert en plusieurs classes d' « intensité de mortalité » (3 ou 4 classes selon la diversité des situations rencontrées). Il s'agit uniquement d'un classement relatif, qui permet de situer chaque groupe de données par rapport aux autres.

Enfin, pour essayer de tenir compte des interactions entre facteurs (*cf.* § 3.2.1.) et des relations entre les variables (*cf.* § 3.1.2.), la zone climatique en tant que variable écologique synthétique a été retenue comme premier niveau de séparation des données. Dans la pratique, un modèle pour le pin sylvestre a donc été construit dans chaque zone climatique. Cependant, la zone littorale n'a pas été prise en compte, en raison du très faible effectif des données (10) disponibles, et du fait qu'il ne s'agit que de taux de mortalité nuls.

3.2.3. Présentation du modèle obtenu pour le pin sylvestre et éléments d'évaluation.

Le modèle obtenu selon la méthode décrite dans le paragraphe précédent est représenté par la figure 14. Il se présente sous la forme d'un dendrogramme dichotomique constitué par l'emboîtement des facteurs successifs, où une partie des données est isolée et caractérisée à chaque étape. La zone climatique constitue le premier critère de séparation des données.

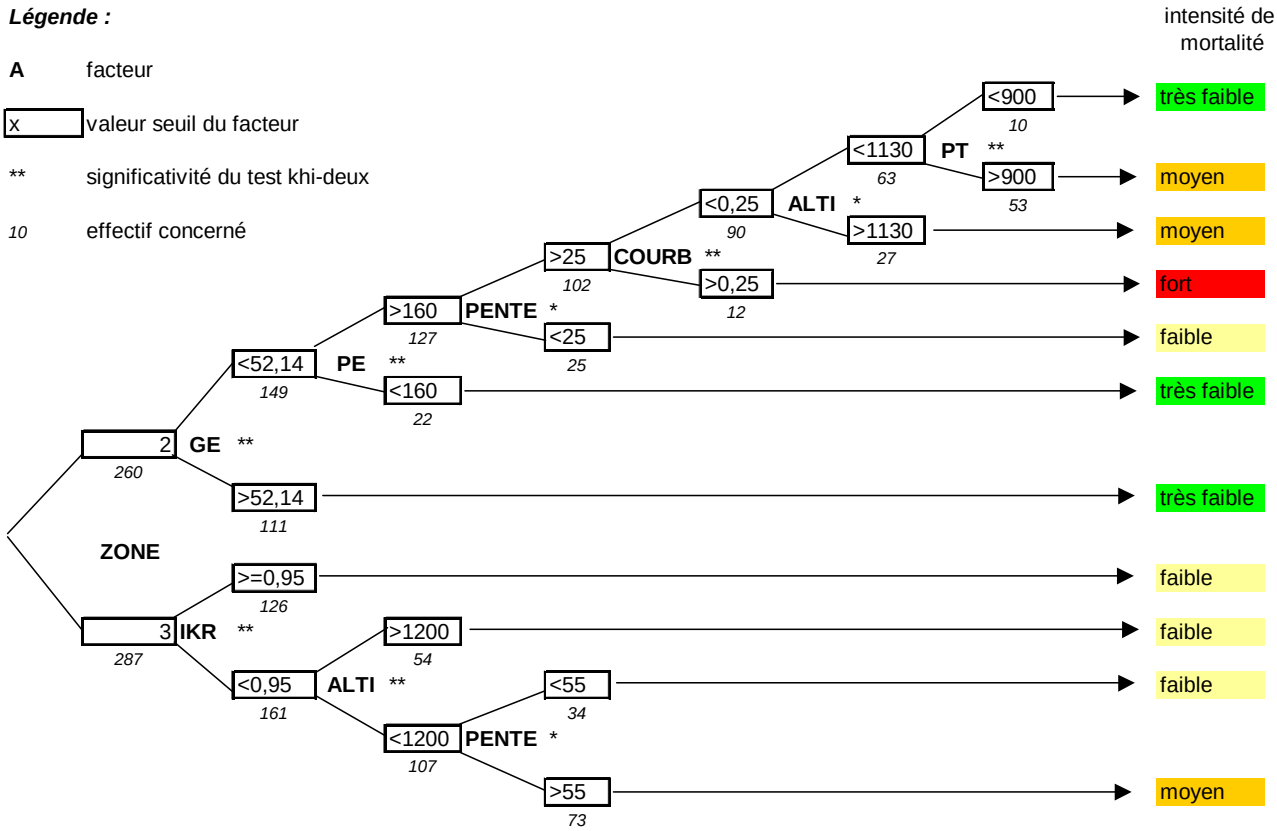


Figure 14 : Premier modèle d'explication de l'intensité de la mortalité (pin sylvestre). *Facteurs : ZONE = zone climatique, IKR = indice de climat lumineux, ALTI : altitude, COURB : courbure du terrain, PE, PT : pluie d'été, pluie annuelle, GE = angle de Gams d'été. La zone 2 correspond aux Préalpes, la zone 3 aux Montagnes sud-alpines.*

Les modalités d'intensité de mortalité sont au nombre de 4, de très faible à fort. Le modèle présenté est très différent entre les deux zones climatiques : de nombreux facteurs apparaissent dans les Préalpes, au premier rang desquels figurent deux facteurs climatiques (angle de Gams et pluie d'été) qui permettent de distinguer assez finement différentes modalités d'intensité de dépérissement (les 4 modalités y sont

représentées). Les facteurs sont au contraire peu nombreux dans les Montagnes sud-alpines, et sont d'ordre topoclimatique et topographique. Ils ne permettent pas de former des modalités très tranchées en terme d'intensité de mortalité (très faible ou fort).

Dans cette zone montagneuse, les premiers niveaux du modèle peuvent être représentés graphiquement. La figure 15 détaille les relations entre le taux de mortalité, l'altitude et l'exposition, que l'on peut mettre en lien avec le modèle proposé : les adrets (indice de climat lumineux supérieur à 0,95) sont peu touchés par la mortalité, au contraire des ubacs pour lesquels les altitudes inférieures semblent les plus endommagées.

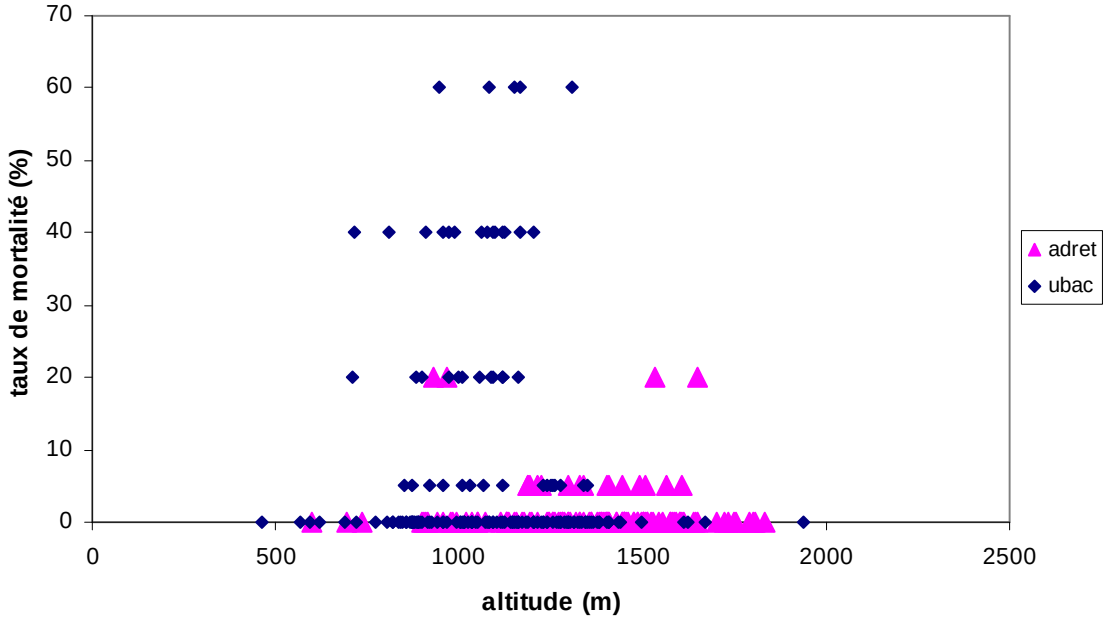


Figure 15 : Relation entre le taux de mortalité, l'exposition et l'altitude dans la zone climatique des Montagnes sud-alpines (pin sylvestre). *Adret : indice de climat lumineux supérieur à 0,95, ubac : indice de climat lumineux inférieur à 0,95.*

Même si le modèle a fait l'objet de tests statistiques à chaque étape (tests du khi-deux), on peut juger de sa qualité au moyen de la méthode de resubstitution employée pour l'analyse factorielle discriminante (*cf.* § 3.1.3.2.). On utilise donc le modèle pour prédire l'intensité de mortalité à partir des données initiales. Cela est réalisé très simplement grâce à une macro développée sous Visual Basic Excel. Les résultats de la resubstitution sont donnés dans le tableau 29.

		intensité de mortalité				
	Effectifs	**1**	**2**	**3**	**4**	**Total**
taux de mortalité (%)	**0**	138	198	87	2	425
	5	5	26	9		40
	20		10	22	6	38
	40		3	19	1	23
	60		1	15	2	18
	80		1	1	1	3
	Total	143	239	153	12	547

Tableau 29 : Resubstitution des données au moyen du premier modèle obtenu (pin sylvestre). *Les modalités d'intensité de mortalité sont ordonnées de 1 (très faible) à 4 (fort).*

Ce tableau montre que l'efficacité du modèle est assez satisfaisante, car les effectifs sont approximativement répartis autour de la diagonale. La qualité du modèle est donc bien meilleure que celle de l'analyse discriminante (*cf.* § 3.1.3.2.).

Cependant, il ne faut pas oublier la dissymétrie du modèle entre les deux zones climatiques, qui fait notamment que les intensités de mortalité prédites 1 et 4 (très faible et fort) ne proviennent que des données des Préalpes. Le modèle y est beaucoup plus efficace que dans les Montagnes sud-alpines, et cela tient

principalement à des variables climatiques telles que l'angle de Gams d'été, la pluie d'été ou encore la pluie annuelle. Le modèle pourra certainement être amélioré, ou en tout cas plus facilement interprété si l'on parvient à comprendre les relations que ces facteurs entretiennent avec le taux de mortalité.

3.3. Analyse des relations entre le taux de mortalité du pin sylvestre et certaines variables climatiques.

Des variables climatiques telles que l'angle de Gams d'été sont très efficaces pour discriminer de très nombreuses données saines (taux de mortalité nul) par rapport aux autres, toutes classes de taux de mortalité confondues (*cf.* figure 16).

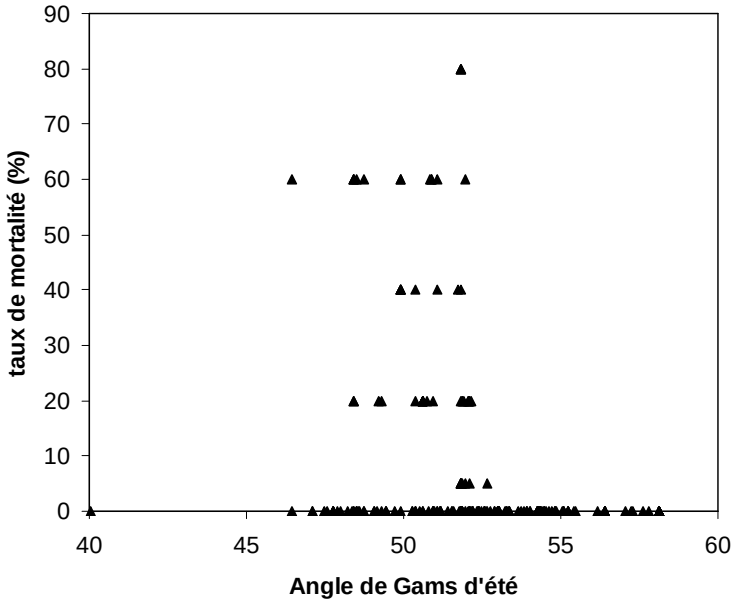


Figure 16 : Relation entre le taux de mortalité et l'angle de Gams d'été dans les Préalpes (pin sylvestre).

Or, il faut rappeler la double origine des données (*cf.* § 2.1.1.) : seules les observations de taux de mortalité supérieurs à 0 ont été relevées sur le terrain, les données saines étant récupérées par défaut à partir de la cartographie des types de peuplement de l'Inventaire forestier national. Soit ces dernières données sont réellement saines, soit elles ne le sont pas et n'ont tout simplement pas été relevées. Cette incertitude qui touche les données dont le taux de mortalité est nul incite à considérer avec précaution les variables qui montrent une relation avec le taux de mortalité similaire à celle de l'angle de Gams d'été.

Dans certains cas, lorsque les facteurs du milieu présentent une variation spatiale seulement sur de grandes distances (cas des variables climatiques), on peut chercher des éléments d'appréciation de la validité des données et de leur relation avec les facteurs écologiques directement sur la cartographie à l'échelle du département ou de la zone climatique. Le cas de l'angle de Gams d'été sera illustré dans la suite.

Les premiers résultats de l'analyse des données pour le pin sylvestre (*cf.* § 2.4.1.1.) font état d'un seuil d'angle de Gams d'été de 53° : au-delà, les taux de mortalité non nuls sont significativement plus rares. En considérant les seules données de la zone préalpine, on retrouve un seuil très voisin (légèrement supérieur à 52°), les valeurs plus élevées portant systématiquement un taux de mortalité nul.

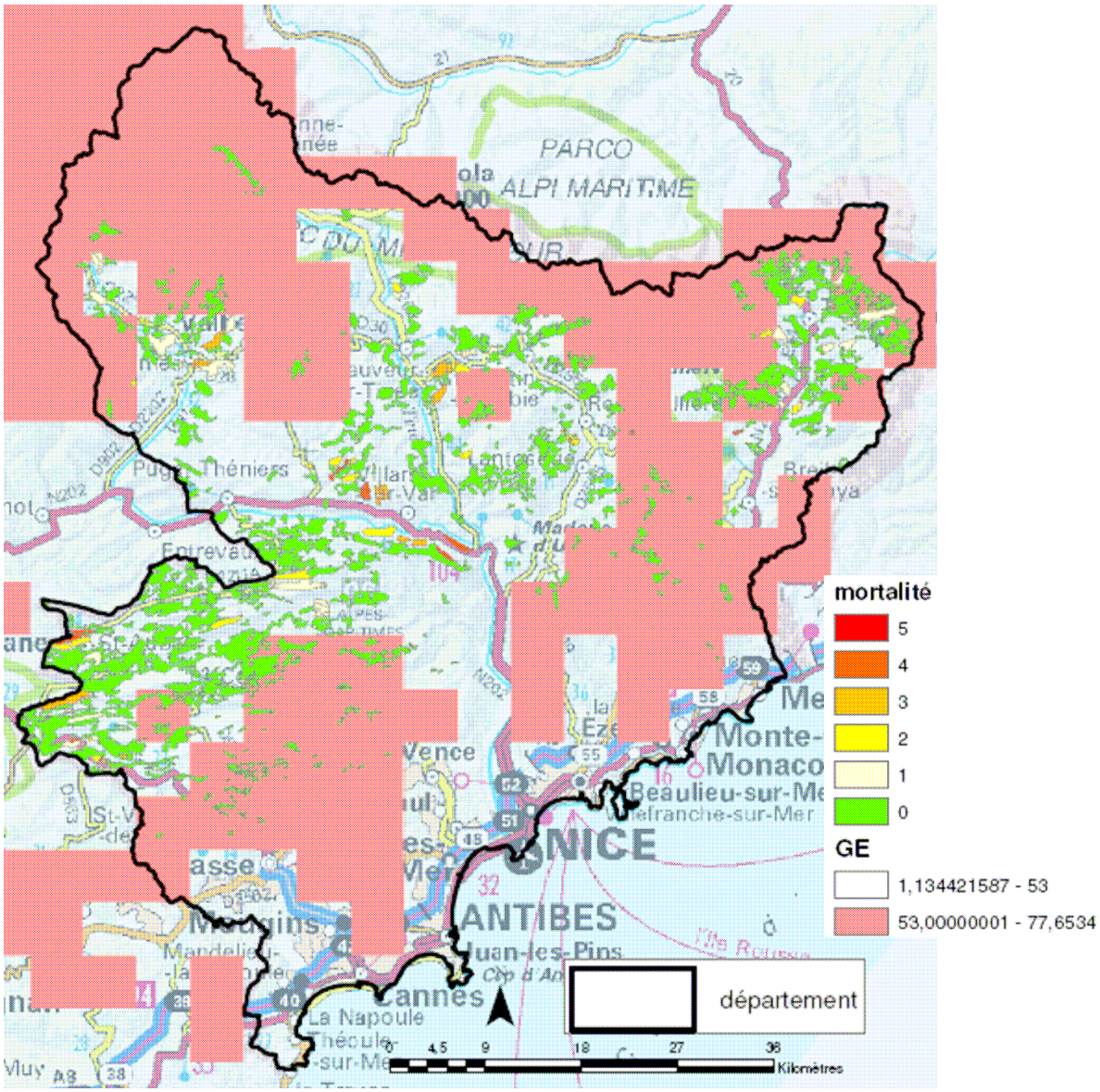


Figure 17 : Relation spatiale entre le taux de mortalité et l'angle de Gams d'été (pin sylvestre) (fond de carte : Scan1000 de l'Institut géographique national). *Les classes de taux de mortalité sont codée de 0 (0 % de mortalité) à 5 (plus de 75 %) ; les valeurs d'angle de Gams d'été (GE) supérieures à 53° sont de couleur rose (pixels de 5 km de côté).*

L'examen de la relation spatiale entre le taux de mortalité et l'angle de Gams estival (*cf.* figure 17) révèle que les valeurs de celui-ci supérieures à 53° concernent des peuplements majoritairement de petite taille, aux altitudes inférieures (à proximité de la zone littorale : arrière-pays de Grasse, Nice, Menton) et en même temps en limite méridionale de la répartition de l'espèce, ou au contraire aux altitudes les plus élevées (chaîne du Mercantour, au nord du département et à proximité de la frontière italienne). Il s'agit de zones limites par rapport à l'écologie du pin sylvestre (*cf.* § 1.2.1.), ce qui se traduit sur la carte par des peuplements morcelés, de petite taille, et souvent isolés des zones où l'espèce tient une place significative.

Il ne s'agit donc pas *a priori* de zones écologiquement favorables au pin sylvestre, or tous ces peuplements portent un taux de mortalité nul. On a déjà insisté à plusieurs reprises sur l'origine de la cartographie des peuplements sains (*cf.* § 2.1.1.), et sur l'incertitude qui touche leur état sanitaire réel. Deux cas de figure sont alors envisageables :

-Soit tous ces peuplements sont réellement sains, alors le modèle présenté plus haut est valable, et l'on pourrait avancer une hypothèse d'adaptation de ces peuplements en limite d'aire de répartition à des conditions écologiques particulières (une sécheresse climatique dans le cas de l'angle de Gams),

-Soit ces peuplements ne sont pas tous sains, et ils n'ont tout simplement pas été visités, du fait de leur petite surface, de leur répartition géographique isolée, d'une accessibilité difficile (hautes altitudes) et du manque d'intérêt des gestionnaires pour cette essence très répandue, colonisatrice et difficilement valorisable. Dans ce cas d'inexactitude des données de départ, le modèle élaboré est complètement remis en cause, étant principalement fondé sur l'angle de Gams d'été qui a montré les limites exposées ci-dessus.
Ce problème d'exactitude des données initiales est ici amplifié par la méthode de croisement des données, qui a finalement retenu une observation par peuplement : ceux dont il est question ici sont très nombreux, mais représentent une surface faible. Cependant, aucune autre solution satisfaisante n'avait été identifiée (*cf.* § 2.2.).

Etant donné les conditions de collecte des données de classe de mortalité, la deuxième hypothèse paraît la plus probable, et remet donc en cause le modèle proposé au § 3.2.3. pour la zone préalpine. Le seuil d'angle de Gams estival identifié correspond trop bien aux situations limites pour l'espèce qui ont pu passer inaperçues. Cela illustre d'ailleurs le fait que le climat général est globalement le premier facteur explicatif de la répartition d'une espèce à une échelle spatiale assez vaste.

Si la justesse des données de mortalité peut remettre partiellement en cause toutes les analyses réalisables sur celles-ci, certains autres facteurs correspondent sans doute moins à ces situations particulières. Il peut s'agir notamment de ceux qui varient beaucoup plus rapidement dans l'espace (variables topographiques par exemple). De plus, il paraît prudent de s'appuyer sur des éléments extérieurs plus fiables pour guider l'analyse du jeu de données, afin de se prémunir des biais ou erreurs qu'il peut provoquer (telle celle mise en évidence ci-dessus). Ces éléments extérieurs fiables sont principalement les connaissances scientifiques ou empiriques sur l'autécologie de l'espèce (*cf.* § 1.2.), et les méthodes usuelles de structuration écologique du milieu.

3.4. Construction d'un modèle d'explication du dépérissement selon l'approche par échelles emboîtées.

La méthodologie classique des analyses de milieu est un élément important à prendre en compte pour guider le traitement des données. Elle est souvent utilisée pour l'étude des potentialités forestières, mais elle peut également s'appliquer pour l'analyse d'autres réponses des essences aux conditions écologiques que la croissance, notamment l'état sanitaire.

3.4.1. Présentation de l'approche par échelles emboîtées.

La méthodologie générale recommandée pour les analyses de milieu va du général vers le particulier, à des échelles de précision croissantes : on parle d'une approche par échelles emboîtées (Ripert & Vennetier, 2002). Cette méthode a été utilisée par de nombreuses études écologiques dans la région méditerranéenne (Nouals, 1999 ; Delahaye Panchout, 2004 ; Ladier, 2004 ; Office national des forêts, 2008) pour expliquer la croissance des peuplements, mais également leur état sanitaire. Elle semble donc pouvoir s'appliquer dans le cadre de cette étude.

Schématiquement, cette approche repose sur plusieurs niveaux d'analyse du milieu (Ripert & Vennetier, 2002) :
- caractérisation au sein de la zone d'étude de régions naturelles plus homogènes, sur la base de critères climatiques, de grands ensembles de relief ou de géologie,
- découpage des régions naturelles en unités écologiques, assises sur la topographie, l'altitude, l'exposition,
- étude, au sein de ces unités, de la variabilité écologique à l'échelle de la station forestière, qui dépend de la géologie, du sol et de la microtopographie.

On peut essayer de reproduire avec les données de l'étude cette approche, qui présente l'avantage d'être solidement éprouvée, et également d'être structurée donc plus facilement lisible et interprétable.

3.4.2. Utilisation de l'approche par échelles emboîtées pour la construction du modèle d'explication.

L'application possible de l'approche par échelle emboîtées aux données de l'étude est confortée par les observations faites dans la zone des Montagnes sud-alpines quant à la relation entre le taux de mortalité, l'exposition et l'altitude (*cf.* § 3.2.3. et figure 15).

Les facteurs écologiques disponibles pour l'étude semblent pouvoir représenter, au moins en partie, chacun des niveaux de cette approche :

- la zone climatique peut représenter le premier niveau d'échelle. Etant donné qu'elle est représentative des conditions climatiques (*cf.* § 1.1.2. et 3.1.2.), les paramètres élémentaires de pluie, d'angle de Gams et de température ne seront plus considérés pour l'analyse. Leur faible précision (5 km) ne permet d'ailleurs pas une caractérisation du climat réellement plus fine que celle des zones climatiques. De plus, cela permet d'éviter les biais potentiels induits par certaines variables climatiques (*cf.* § 3.3.) ;

- l'altitude et l'exposition représentent le deuxième niveau, et rendent compte à une échelle plus détaillée des variations du climat dues au relief, en accord avec leur précision de 50 m ;

- la courbure du terrain, la pente et la géologie interviennent en dernier lieu, à l'échelle de la station forestière. La précision de 50 m des deux premières variables permet de descendre jusqu'à un niveau assez fin, qui correspond en général à l'échelle spatiale d'évaluation des potentialités du milieu. Il manque essentiellement à ce niveau des données pédologiques, non disponibles à l'échelle du département sous Système d'information géographique. Cependant, elles sont indirectement représentées par la pente et la courbure du terrain (Ripert & Vennetier, 2002 : la profondeur du sol est généralement plus faible sur reliefs convexes et pentes fortes) qui jouent également sur le bilan hydrique lié à la topographie, et par la géologie (nature du matériau parental, carbonaté ou non, et type d'altération donc nature et profondeur du sol).

Le modèle construit selon l'approche par échelles emboîtées reproduit donc ces trois niveaux. Cependant, il est toujours nécessaire de trouver des modalités de chacun des facteurs emboîtés qui, une fois combinées, permettent de caractériser les données par un niveau de mortalité identifié. C'est l'objectif même du modèle « d'explication » du phénomène.

Il faut ainsi identifier des valeur-seuils, dans le cas des facteurs quantitatifs. Cela n'est pas toujours possible lorsque l'ordre d'intervention des facteurs est prédéterminé, comme c'est le cas ici. Pour pallier à cela, la méthode retenue consiste à utiliser des modalités prédéfinies pour les facteurs des deux premiers niveaux (les modalités de la zone climatique, qualitative, étant déjà fixées, il s'agit de l'altitude et de l'exposition). Le choix des variables du troisième niveau et des seuils correspondants est ensuite réalisé afin de discriminer au mieux différentes intensités de mortalité à partir des données, comme cela a été réalisé précédemment (*cf.* § 2.3.2.2. et 3.2.2.).

Les modalités prédéfinies d'altitude et d'exposition sont :
- pour l'exposition (indice de climat lumineux : *ikr*), on distingue les ubacs (exposition nord et pente supérieure à 5 %, soit un *ikr* inférieur à 0,95) et les adrets (autres cas, donc *ikr* supérieur à 0,95) ;
- pour l'altitude, on retient les limites des étages bioclimatiques, qui varient selon la zone climatique et l'exposition (source : Ladier & Rey, 2010).

La combinaison des deux critères au sein de chaque zone climatique conduit donc à distinguer les compartiments bioclimatiques, qui représentent la synthèse de la variation des conditions climatiques dues au relief et son influence sur la végétation (notion d'étage de végétation, Ripert & Vennetier, 2002).

Cependant, dans la grande majorité des cas, le passage des deux premiers niveaux divise tellement les effectifs des groupes qu'ils ne sont plus suffisants pour réaliser les tests de comparaison de proportions (certains effectifs théoriques sont inférieurs à 5, *cf.* § 2.3.2.2.). La valeur-seuil discriminant différentes intensités de mortalité est alors uniquement déterminée graphiquement, sans validation par le test du khi-deux. Mais ces considérations graphiques sur les données de l'étude sont confrontées aux connaissances pré-établies sur l'autécologie de l'essence (§ 1.2.), et aux publications concernant l'influence des facteurs du

milieu sur les potentialités forestières (essentiellement Ripert & Vennetier, 2002). Cela permet d'évaluer leur pertinence et d'éviter de subir d'autres biais potentiels des données initiales (*cf.* § 3.3.).

La caractérisation des groupes de données isolés par le dernier niveau du modèle se base sur le même principe que ce qui a été présenté au § 3.2.2.

3.4.3. Présentation du modèle obtenu pour le pin sylvestre et éléments d'évaluation.

Le modèle obtenu pour le pin sylvestre est représenté par la figure 18 ci-après, les deux zones climatiques étant distinguées. Il comporte les trois niveaux d'analyse de l'approche par échelles emboîtées, dont la combinaison permet de déterminer une intensité de mortalité définie à partir des données disponibles.

L'examen du modèle montre les tendances suivantes :

- la zone préalpine est globalement plus touchée que la zone montagneuse (plus de modalités 3 et 4 d'intensité de mortalité) ;
- les ubacs de la zone de Montagnes sud-alpines sont plus touchés que les adrets, alors que la zone des Préalpes ne montre pas de tendance similaire ;
- de manière générale, les altitudes élevées sont plutôt moins touchées que les altitudes inférieures ;
- les valeurs de pente fortes et celles de courbure de terrain élevées (les valeurs positives correspondent à des reliefs convexes) portent plutôt des peuplements dont le taux de mortalité est élevé, il en est de même des calcaires par rapport aux autres types de roche.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus précédemment à partir des données, et à la bibliographie sur le phénomène de dépérissement, sur l'influence des facteurs écologiques sur les potentialités du milieu et sur l'autécologie de l'essence.

Le modèle a été élaboré sans aucun test statistique, mais on peut tout de même évaluer son efficacité grâce à la méthode de resubstitution. La prédiction par le modèle de l'intensité de mortalité à partir des données initiales est réalisée au moyen d'un macro développée sous Visual Basic Excel (*cf.* annexe 7), elle donne les résultats récapitulés dans le tableau 30.

		intensité de mortalité				
	Effectifs	**1**	**2**	**3**	**4**	**Total**
taux de mortalité (%)	**0**	204	105	104	12	425
	5	20	9	11		40
	20		7	24	7	38
	40		2	15	6	23
	60		2	6	10	18
	80		1		2	3
	Total	224	126	160	37	547

Tableau 30 : Resubstitution des données au moyen du modèle d'explication de la mortalité selon l'approche par échelles emboîtées (pin sylvestre). *Les modalités d'intensité de mortalité sont ordonnées de 1 (très faible) à 4 (fort).*

La répartition des effectifs est relativement proche de la diagonale du tableau, le modèle semble donc être efficace pour discriminer différentes intensités de mortalité correspondant approximativement aux taux de mortalité des données initiales :

- l'intensité de mortalité « 1 » ne comprend que des données dont le taux de mortalité est inférieur à 10 %, dont une très grande majorité de peuplements sains ;
- l'intensité de mortalité « 2 » présente de nombreuses données dont le taux de mortalité est nul ou faible, mais elle comprend également quelques observations dont le taux de mortalité est relativement important (supérieur ou égal à 20 %) ;
- l'intensité de mortalité « 3 » est relativement proche de la précédente, mais elle présente proportionnellement un plus grand nombre d'observations de peuplements nettement dépérissants (20 % de mortalité ou plus) ;
- l'intensité de mortalité « 4 » comprend très peu de peuplements sains ou faiblement dépérissants, alors qu'elle concentre les forts taux de mortalité.

Les résultats peuvent également être analysés en distinguant les zones climatiques (*cf.* tableau 31), et il apparaît que l'efficacité du modèle est relativement voisine entre les Préalpes et les Montagnes sud-alpines. L'intensité de mortalité la plus élevée (« 4 ») est plus représentée dans les Préalpes, ce qui est en accord avec les résultats de l'analyse préalable.

Effectifs	taux de mortalité (%)	intensité de mortalité				
		1	2	3	4	Total
Préalpes	0	91	50	53	10	204
	5	4	2	3		9
	20		2	14	6	22
	40		1	3	5	9
	60		2	3	8	13
	80		1		2	3
Total Préalpes		95	58	76	31	260
Montagnes sud-alpines	0	113	55	51	2	221
	5	16	7	8		31
	20		5	10	1	16
	40		1	12	1	14
	60			3	2	5
Total Montagnes		129	68	84	6	287
Total général		224	126	160	37	547

Tableau 31 : Resubstitution des données au moyen du modèle d'explication de la mortalité selon l'approche par échelles emboîtées (pin sylvestre) – distinction des zones climatiques.

On peut observer que dans certains cas, le modèle ne fait intervenir aucun facteur topographique ou géologique pour discriminer les données selon leur taux de mortalité (*cf.* figure 18). Les données de l'étude ne permettaient alors pas de poursuivre l'analyse, soit parce qu'elles portaient toutes un taux de mortalité nul, soit car les facteurs écologiques disponibles (pente, courbure, roche) étaient impuissants à caractériser plus finement les données.

Par ailleurs, les effectifs de certains groupes isolés par le modèle sont très faibles : en l'absence de tests statistiques, il est difficile de savoir à quel niveau il faut s'arrêter. Les facteurs écologiques ont cependant été utilisés sur des effectifs faibles, dans la mesure où ils pouvaient améliorer la précision du modèle, et que leur influence était conforme aux résultats des précédents traitements des données ainsi qu'à la bibliographie.

Un avantage non négligeable de ce modèle est qu'il ne comporte que des facteurs que l'on peut déterminer sur le terrain ou à l'aide d'une carte, pour identifier les stations où une forte intensité de mortalité est prédite. Pour tenter d'adapter la clé du modèle à cet usage possible, il est cependant nécessaire de retravailler les seuils, ce qui permettra également d'analyser la sensibilité de ce modèle.

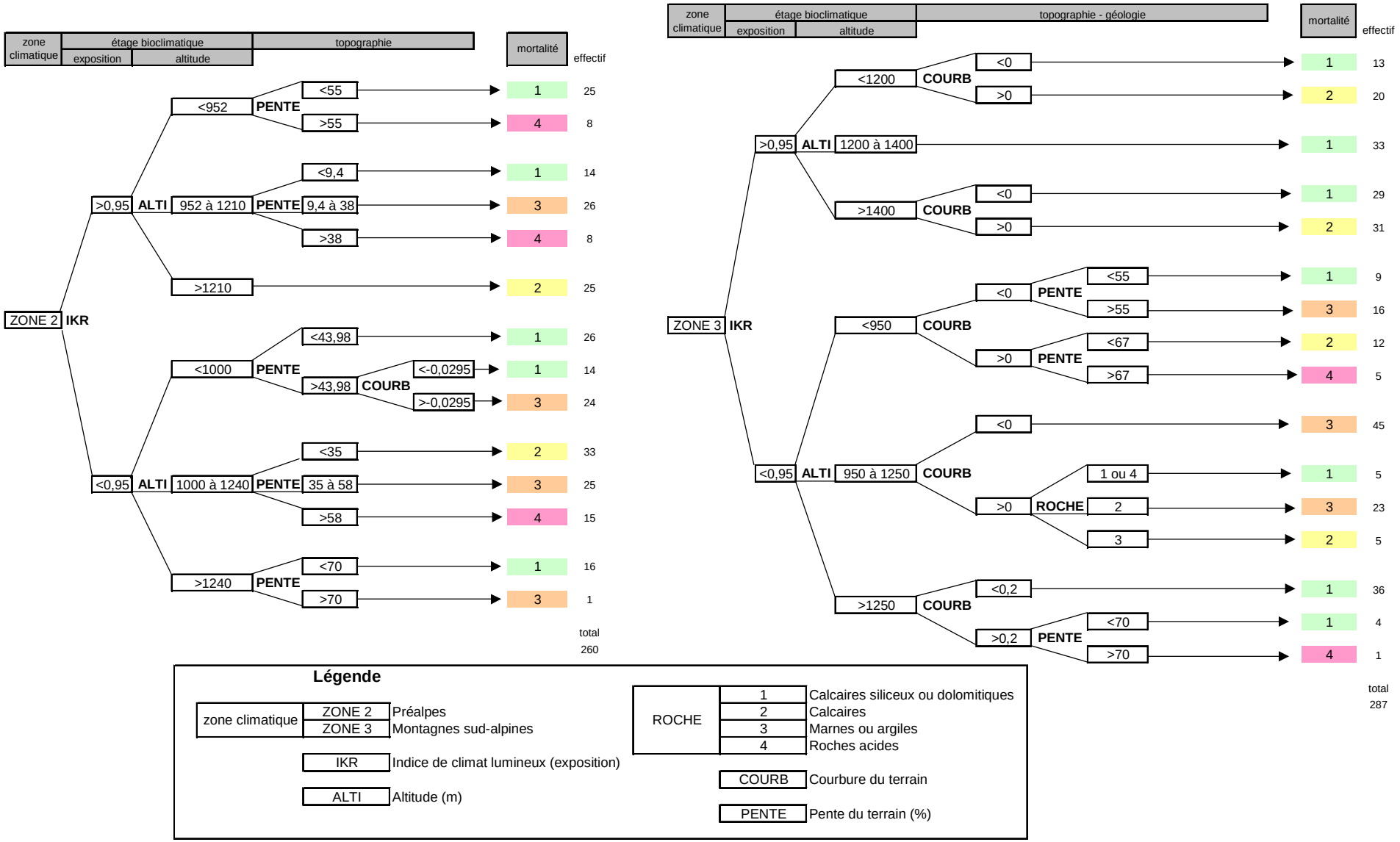


Figure 18 : Modèle d'explication du dépérissement selon l'approche par échelles emboîtées (pin sylvestre). *Les différentes intensités de mortalité sont ordonnées de 1 (très faible) à 4 (fort).*

3.4.4. Modification des valeur-seuils et analyse de la sensibilité du modèle.

Pour que le modèle puisse être utilisé facilement, il faut arrondir les valeur-seuils des facteurs selon la précision avec laquelle ils peuvent être mesurés ou appréciés sur le terrain, ou bien déterminés à partir d'une carte. Pour cela, les modifications suivantes ont été réalisées :

-le seuil d'indice de climat lumineux à 0,95 a été conservé, il correspond à la caractérisation d'un ubac par une exposition nord et une pente supérieure à 5 %, qui peuvent être déterminées avec une boussole et un clisimètre ;

-les valeurs d'altitude sont arrondies à 50 m, et peuvent être connues à partir des cartes au 1/25 000 de l'Institut géographique national ;

-les pentes sont arrondies à 5 %, et sont mesurables grâce à un clisimètre ;

-les valeurs de courbure du terrain ne sont pas mesurables, elles ne peuvent faire l'objet que d'une appréciation qualitative. Les valeur-seuils ont été homogénéisées, et calées sur des valeurs pouvant correspondre à des limites de modalités qualitatives (*cf.* figure 19). Ces limites restent cependant totalement arbitraires.

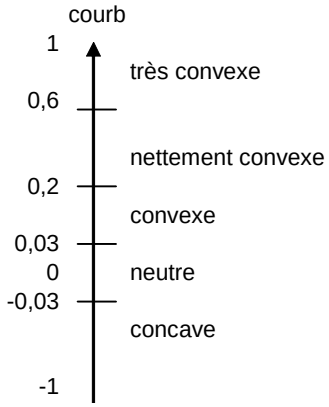


Figure 19 : Définition des modalités de courbure du terrain (*courb*) à partir des valeurs numériques.

Le modèle ainsi obtenu par l'arrondi des valeur-seuils et l'homogénéisation des valeurs de courbure du terrain est présenté en annexe 8. Il réalise, à partir des données initiales, les prédictions d'intensité de mortalité données dans le tableau 32.

		intensité de mortalité				
	Effectifs	**1**	**2**	**3**	**4**	**Total**
taux de mortalité (%)	**0**	201	104	110	10	425
	5	20	9	11		40
	20	2	7	24	5	38
	40		2	15	6	23
	60		2	8	8	18
	80		1	1	1	3
	Total	223	125	169	30	547

Tableau 32 : Resubstitution des données au moyen du modèle d'explication de la mortalité après arrondi des valeur-seuils (pin sylvestre).

Les résultats obtenus sont très peu différents de ceux du modèle initial (comparaison des tableaux 30 et 32). Le modèle est donc peu affecté par une légère modification des seuils, ce qui témoigne de sa robustesse : les résultats dépendent peu d'une très grande précision des données initiales ou des mesures réalisées.

3.5. Bilan sur la démarche de construction du modèle d'explication et sur le résultat obtenu.

L'élaboration du modèle est basée sur les données initiales de l'étude (*cf.* § 2.1.), mais également sur d'autres éléments afin de guider l'analyse et de minimiser l'influence des biais que peuvent présenter les données initiales (*cf.* § 3.3.).

Ce modèle donne en sortie, selon les valeurs de divers facteurs écologiques, différents niveaux d'« intensité de mortalité » définis à partir des données initiales. Ces différents niveaux correspondent à une proportion plus ou moins élevée de forts taux de mortalité parmi les données regroupées par le modèle sur la base des facteurs écologiques retenus. Ces groupes ne sont cependant pas homogènes, et ils comportent notamment tous des données dont le taux de mortalité est nul. La dispersion au sein de chacun d'eux correspond à la part de la variabilité des données initiales qui n'est pas expliquée par le modèle. Il ne s'agit cependant pas uniquement d'un défaut du modèle car celui-ci s'est parfois volontairement écarté des données lorsque leur validité paraissait suspecte, appuyé en cela par d'autres éléments jugés plus fiables.

Les facteurs écologiques jugés déterminants pour l'explication de la mortalité, et donc retenus par le modèle représentent les différents niveaux d'échelles emboîtées classiquement utilisés pour les études de milieu dans la région méditerranéenne (Ripert & Vennetier, 2002) : la région naturelle (climat général et grands ensembles géomorphologiques), l'étage bioclimatique (altitude et exposition), et les conditions écologiques locales (sol, roche mère, topographie stationnelle).

En ce qui concerne le pin sylvestre, les Préalpes présentent plus de mortalités que les Montagnes sud-alpines. Cela peut s'expliquer par le climat plus sec, les reliefs moins accentués et la géologie (calcaires et marnes) de la zone préalpine, *a priori* moins favorables à l'essence. Les altitudes inférieures sont généralement plus touchées par les mortalités, ce qui correspond au tempérament montagnard du pin sylvestre.

Les expositions qui concentrent les mortalités sont les ubacs, uniquement dans la zone de Montagnes sud-alpines. Ce résultat paraît difficile à interpréter, l'évapotranspiration de l'eau étant plus intense sur les adrets, mais il est confirmé par plusieurs auteurs (Thabeet, 2008 ; Vennetier et al., 2007) et pourrait s'expliquer par un défaut de l'adaptation des peuplements d'ubac à la sécheresse : ces derniers seraient habitués à des conditions d'alimentation en eau favorables, et donc moins résistants aux sécheresses exceptionnelles que les peuplement d'adret accoutumés à des conditions plus contraignantes.

En ce qui concerne les paramètres écologiques locaux, les pentes fortes et les formes de topographie convexes paraissent favoriser la présence de mortalité, ce qui est conforme à leur influence négative sur le drainage de l'eau (assèchement du sol) et sur le sol lui-même (profondeur, pierrosité). Ce dernier élément dépend également du type de roche, qui influence aussi la nature chimique du sol, et l'on retrouve une réponse négative du pin sylvestre aux substrats calcaires dans la zone de Montagnes sud-alpines où la géologie est très variée.

Ces facteurs ont principalement trait au bilan hydrique, dans ses composantes climatiques, topographiques et édaphiques, et la prédominance de ce critère pour l'explication des potentialités forestières en région méditerranéenne est reconnue (Ripert & Vennetier, 2002).

Cependant, le recours aux différents facteurs reste guidé par le jeu de données initial, qui dans certains cas ne permet pas d'employer des critères plus précis que la classe altitudinale. Ces cas de figure sont liés aux données disponibles plutôt qu'à l'absence d'influence des autres facteurs. Dans d'autres cas, l'intervention d'un facteur écologique supplémentaire peut sembler abusive au vu du faible effectif des données ; ce facteur a alors été rajouté sur la base d'éléments multiples et concordants (analyse préalable et littérature), pour ne pas être trop influencé par les seules données initiales dont la précision et l'exactitude sont potentiellement insuffisantes.

4. Limites et perspectives

4.1. Les limites dues aux données initiales et à la démarche de l'étude.

4.1.1. Les limites dues aux données initiales.

Une part importante des limites de l'étude et des résultats obtenus tient à la fiabilité des données initiales de taux de mortalité. Ces données et leur origine ont été présentés au § 2.1.1., les principaux points à retenir étant l'hétérogénéité des observations quant à leur précision (due à la multiplicité des observateurs), la méthode approximative de cartographie (depuis le versant opposé) et surtout la fiabilité très incertaine des données de peuplements sains, récupérées par défaut à partir de l'absence de signalement de mortalité et non vérifiées sur le terrain.

Outre leur hétérogénéité et leur fiabilité, ces données ne répondent que partiellement à l'objectif d'étude du dépérissement. Le dépérissement n'est en effet pas assimilable à un taux de mortalité, car il comporte des symptômes concernant des arbres vivants (déficit foliaire, descente de cime, coloration anormale du feuillage, *etc*.) qui n'entraînent pas forcément une mortalité rapide.

D'autre part, l'étude est également dépendante des données écologiques disponibles et de leur précision. Ainsi, les facteurs climatiques présentent une précision très faible (résolution de 5 km), et d'autres données potentiellement intéressantes ne sont pas disponibles : il s'agit notamment de données pédologiques précises indiquant les capacités de stockage de l'eau et d'enracinement des essences : la réserve utile, ou la profondeur de sol, la pierrosité, la structure et la texture des horizons…

Enfin, l'étude devait porter sur le déterminisme spatial des dépérissements, mais il ne s'agit pas uniquement des conditions écologiques. D'autres facteurs peuvent influencer l'évolution des peuplements et leur état sanitaire. Il s'agit notamment de variables descriptives du peuplement, de son historique, de sa gestion… Un facteur aggravant reconnu concernant l'état sanitaire global d'un peuplement est sa densité et son degré de pureté : la compétition entre les arbres pour l'accès aux ressources (dont l'eau en période de sécheresse) est exacerbée dans les peuplements purs et denses. Ces deux paramètres dépendent de la station (essences adaptées, croissance), mais aussi de la sylviculture (prélèvements, dosage des essences). Inversement, les peuplements pionniers, très lâches et sur terrain découvert, ne sont pas les mieux armés pour résister à la sécheresse, et les peuplements de seconde génération, ayant crû dans une ambiance forestière peuvent se révéler plus adaptés. Ces éléments concernent l'historique et la dynamique de la végétation. L'âge des individus peut également avoir une incidence forte sur leur capacité de résistance aux aléas climatiques.

4.1.2. Bilan et limites de la démarche adoptée.

En tenant compte de la nature des données cartographiques de taux de mortalité et de celle des facteurs du milieu spatialisés disponibles pour l'étude, il a fallu ensuite trouver un moyen de croiser ces informations afin de constituer un jeu de données pour l'analyse ultérieure. Aucune solution simple et efficace n'a été identifiée pour ce faire, et la méthode retenue présente en elle-même des limites. Elle conduit à retenir une valeur de chacun des facteurs du milieu par donnée de taux de mortalité, alors que cette relation unique n'existait pas initialement du fait de la structure spatiale des données. Cette méthode revient donc à lisser artificiellement les variations spatiales des facteurs écologiques en ne retenant qu'une valeur moyenne pour chaque donnée de mortalité. L'effet de ce lissage est d'autant plus marqué que ces facteurs varient rapidement dans l'espace, et que la précision de la cartographie du taux de mortalité est faible. Le jeu de données constitué est donc naturellement hétérogène et d'une fiabilité incertaine, sous la double influence des données initiales et des difficultés de croisement de ces données avec les autres variables.

Ensuite, pour l'analyse de ces données, les méthodes statistiques usuelles ou « automatiques » n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Une autre méthode a donc été employée, rustique mais robuste, basée sur la définition manuelle de modalités pour chacune des variables et sur la réalisation d'un test sur les

effectifs de données correspondants. Le principal inconvénient de cette méthode est la part importante de subjectivité qui intervient lors de la définition graphique des modalités (cas des facteurs quantitatifs). De plus, elle ne prend en compte qu'un seul facteur à la fois, et ne tient pas compte des corrélations et interactions entre les variables écologiques. Pour remédier à cela, une approche dérivée de cette méthode a été employée et permet d'enchaîner les facteurs afin d'obtenir des résultats relativement satisfaisants. Elle dépend cependant entièrement de la fiabilité des données initiales, il est donc nécessaire de guider l'analyse au moyen d'éléments extérieurs pour éviter de subir les biais potentiels dus à ces données et présenter un résultat relativement fiable.

Le résultat final est donc un modèle d'explication de la mortalité du pin sylvestre basé sur divers facteurs écologiques, construit à partir des données initiales et conforme à ces éléments extérieurs tirés de la bibliographie. Ce modèle présente cependant des limites dans la mesure où les données de l'étude n'ont pas permis dans certains cas une analyse aussi fine que le suggéraient les études existantes. De plus, le modèle n'est pas assez performant pour différencier jusqu'aux modalités initiales de taux de mortalité, il permet d'isoler des groupes de données qui doivent ensuite être caractérisés du point de vue de la mortalité. Différentes « intensités de mortalité » ont ainsi été définies, et l'hétérogénéité de ces modalités peut être interprétée comme la variabilité résiduelle, celle que le modèle ne parvient pas à expliquer. Cette variabilité peut provenir du fait que le modèle ne considère pas l'ensemble des facteurs explicatifs (variables manquantes), éventuellement d'une mauvaise définition des modalités des facteurs (valeur-seuil), et également de l'inexactitude des données initiales. Pour cette dernière raison, la variabilité résiduelle constatée ne semble pas être uniquement le signe d'un défaut du modèle. D'ailleurs, la considération d'éléments autres que les données pour guider l'analyse a parfois conduit à creuser l'écart entre le modèle final et les données initiales, donc à augmenter cette variabilité résiduelle, lorsque les données semblaient incohérentes ou biaisées. L'objectif était donc d'identifier les principaux facteurs écologiques structurant les données vis-à-vis du taux de mortalité (les facteurs explicatifs) et leur influence sur la variable à expliquer, plutôt que de coller au mieux aux données initiales grâce à un modèle artificiel et peu fiable.

La démarche adoptée, ainsi que les méthodes employées sont spécifiques à cette étude, et elles diffèrent en cela de l'approche scientifique habituelle. Dans le cadre de cette dernière approche expérimentale, on définit d'abord une problématique, *ie.* un objectif en fonction duquel on récolte des données selon un protocole qui assure leur aptitude à répondre à la question posée. Cela sous-tend notamment que les données récoltées peuvent être analysées au moyen de méthodes statistiques identifiées, pour produire des résultats fiables apportant des éléments de réponse à la problématique initiale. Au contraire, les données initiales de la présente étude étaient déjà pré-établies, et elles se sont révélées mal adaptées à l'objectif poursuivi. Il a donc été nécessaire de s'adapter à ces données, de trouver des méthodes particulières pour croiser la variable à expliquer avec les facteurs explicatifs et pour analyser ensuite les données. Les limites de l'étude tiennent pour une grande part de ces nécessaires adaptations qui découlent du manque d'adéquation des données initiales à l'objectif recherché.

Les données initiales et la démarche mise en œuvre ont tout de même permis d'obtenir des résultats, qui concernent principalement le pin sylvestre.

4.2. Intérêts et limites des résultats de l'étude, perspectives de validation

4.2.1. Intérêt et limites des résultats obtenus pour le dépérissement du pin sylvestre.

Le traitement des données a donné globalement des résultats conformes aux connaissances actuelles sur l'autécologie du pin sylvestre (*cf.* 1.2.1.) et sur l'influence des facteurs écologiques sur le bilan hydrique, principal facteur limitant pour la végétation forestière dans la région méditerranéenne (Ripert & Vennetier, 2002). Le fait que les altitudes supérieures présentent nettement moins de mortalité est cohérent avec son tempérament d'essence plutôt montagnarde, et les paramètres impactant le bilan hydrique local montrent une mortalité plus importante dans les stations sèches. La concentration des mortalités sur roches calcaires peut également correspondre à l'influence néfaste reconnue des sols carbonatés sur le pin sylvestre.

Cependant, il y a un facteur qui montre une relation avec la mortalité du pin sylvestre que l'on ne peut pas expliquer par son influence sur le bilan hydrique : l'exposition, représentée par l'indice de climat lumineux. Les versants d'adret présentent nettement moins de mortalités que les versants d'ubac, dans la zone de montagnes où le relief est le plus marqué. Or les versants chauds (adrets) présentent des conditions hydriques moins favorables que les versants frais (ubacs), du fait d'un rayonnement solaire plus intense qui augmente l'évapotranspiration de l'eau. Ce résultat peut donc paraître surprenant, mais il est conforme à ceux d'autres études ou publications (Vennetier *et al*., 2007 ; Thabeet, 2008). L'explication avancée par ces auteurs, que l'on peut reprendre ici, est que les peuplements d'adret sont adaptés à des conditions sèches, c'est pourquoi ils souffrent moins lors des épisodes de sécheresse extrême que les peuplements d'ubac, habitués à des conditions fraîches qui leur font particulièrement défaut lors de ces périodes de climat contraignant.
Ainsi, les peuplements situés dans des conditions de croissance favorables du point de vue du bilan hydrique ont une moindre capacité à répondre favorablement à des épisodes de sécheresse. Les résultats exposés ci-dessus tendraient en effet à montrer que le pin sylvestre résiste le mieux aux fortes sécheresses dans les conditions les plus contraignantes sur le plan hydrique, sur les versants d'adret où sa croissance est la plus faible, du fait de l'adaptation de ces peuplements à une sécheresse « habituelle ». Ce serait donc sur les « mauvaises stations » que les peuplements seraient les plus résistants aux excès climatiques.

Cependant, si l'on applique complètement ce raisonnement, les autres résultats devraient être l'inverse de ce qui a été constaté : les conditions les plus sèches correspondent aux adrets, mais aussi aux altitudes inférieures et aux situations topographiques défavorables. Toutes ces variables montrent une influence sur la mortalité qui est l'opposé de celle de l'exposition, vis-à-vis du bilan hydrique. Des résultats similaires à ceux de la présente étude ont été obtenus par Thabeet (2008), et ils s'avèrent très délicats à interpréter. Pourquoi ce phénomène d'adaptation ne concernerait-il que les expositions chaudes et pas les altitudes les plus basses ? D'autres explications possibles de la mortalité telles que la concurrence d'autres essences (sapin pectiné et hêtre notamment), généralement plus rude en ubac, devraient également concerner les altitudes supérieures.
Il apparaît donc très difficile de proposer une explication à ce résultat, qu'il conviendrait tout d'abord de valider de manière rigoureuse.

4.2.2. Possibilités de validation du modèle proposé.

Etant donné l'inexactitude potentielle des données initiales de taux de mortalité, la validation du modèle proposé pourrait d'abord consister en la vérification sur le terrain de ces données. Il s'agit principalement des peuplements sains, pour lesquels il serait nécessaire de s'assurer qu'ils ne présentent aucune mortalité. Le modèle tendrait à être validé si des peuplements *a priori* sains situés dans des situations écologiques pour lesquelles la clé indique une forte intensité de dépérissement montrent des signes de mauvais état sanitaire. Cela montrerait que les facteurs et les modalités retenues sont pertinents. Cependant, il restera certainement toujours une variabilité résiduelle, car le modèle présente une explication simplifiée et qu'il ne prend pas en compte tous les facteurs potentiellement explicatifs. Ces facteurs peuvent notamment expliquer différentes réponses des peuplements (mortalité à un instant donné, et vitesse d'évolution du dépérissement).

Dans le but de valider (ou non) le modèle, des éléments d'évaluation ont été recherchés dans la base de données du Département de la santé des forêts, qui répertorie tous les signalements phytosanitaires effectués par ses correspondant-observateurs. Cependant, celle-ci ne comporte que 3 signalements de dépérissement pour le pin sylvestre dans les Alpes-Maritimes depuis 2003 (et 7 pour le sapin pectiné), ce qui est nettement insuffisant pour l'évaluation du modèle. Des tournées sur le terrain seraient donc nécessaires pour cela, mais elles sont longues et coûteuses. De plus, cela pose le problème de l'année de validité des données : la cartographie du taux de mortalité a été réalisée en 2008, et il s'agit d'un phénomène qui évolue dans le temps (généralement, le taux de mortalité progresse), les compléments ultérieurs sont donc en théorie non compatibles avec les données initiales. Cependant, comme le modèle est relativement robuste et qu'il ne différencie que 4 modalités d'intensité de mortalité, cela pourrait tout de même permettre d'apprécier le bien-fondé de ce résultat. Mais cela pourrait surtout permettre de juger de la capacité du modèle à prévoir l'apparition ou la progression du dépérissement sur les stations « à risque » identifiées, ce qui constitue une application possible très intéressante (*cf.* § 4.3.)

Le seul moyen réellement rigoureux pour la validation ou l'évaluation du modèle est de collecter des données fiables et facilement analysables, qui permettent alors de construire un autre modèle et de le comparer à celui proposé ici. Il faut alors adopter une démarche scientifique et adapter les moyens à l'objectif recherché, ce qui passe, après la formulation de la problématique, par une réflexion sur l'échantillonnage et le protocole de mesures. Le plus efficace serait certainement de stratifier d'abord l'échantillonnage selon les classes de mortalités de la cartographie initiale, pour assurer une représentation suffisante des taux de mortalité élevés, puis de collecter les données sur des placettes réparties selon une maille systématique dans les peuplements de l'essence étudiée. Ces données seraient d'ordre sanitaire (mortalité, éventuellement autres symptômes de dépérissement) et stationnel (facteurs écologiques). Parmi les facteurs du milieu, certains peuvent être récupérés à partir de données spatialisées sous Système d'information géographique, mais ceux qui peuvent être relevés facilement sur le terrain le seront, pour plus de précision. Selon l'objectif recherché, on pourra également relever d'autres informations (gestion, dynamique, *etc*.). Ces données relevées sur des placettes permettent d'éviter le recours aux approximations pour le croisement des variables, comme ce qui a été réalisé dans le cadre de cette étude. La nature des données (quantitative/qualitative) guidera ensuite le choix des méthodes statistiques pour l'analyse.

La démarche d'analyse des données employée dans la présente étude a tout de même permis de dégager des premiers résultats. Basé sur les données actuellement disponibles, le modèle présenté pour l'explication de la mortalité du pin sylvestre présente des perspectives intéressantes d'utilisation dans le cadre de la planification de la gestion.

4.3. Perspectives d'utilisation du modèle pour la planification de la gestion.

Lorsque des dépérissements de grande ampleur surviennent, ils peuvent entraîner la remise en cause de l'aménagement forestier car les analyses sur lesquelles se base celui-ci, les objectifs de gestion ainsi que les interventions programmées deviennent caduques. Le cadre qui orientait la gestion disparaît, alors que de réelles questions se posent quant aux actions à mener. Mieux anticiper ces phénomènes apparaît donc être une perspective intéressante.

4.3.1. La caractérisation des stations à risque et la planification de la gestion.

Le but initial de l'analyse des données était de caractériser les conditions écologiques dans lesquelles apparaissent préférentiellement des mortalités. Ce résultat peut être interprété comme l'identification des facteurs prédisposants, le facteur déclenchant reconnu étant le climat très sec de 2003 à 2007. Dans ces conditions où l'on observe déjà d'importantes mortalités, il y a de fortes chances pour que les peuplements qui sont encore sains ou faiblement touchés voient leur état sanitaire se dégrader. L'application du résultat obtenu peut donc consister en la caractérisation écologique des stations « à risque » d'occurrence de mortalité. Il s'agit donc de passer d'une vision statique (données cartographiques de 2008) à une vision dynamique de l'évolution probable des dépérissements, ce qui suppose que les peuplements situés dans des conditions écologiques semblables auront une réponse homogène en terme de mortalité, et que la variabilité observée provient essentiellement du délai de réponse des peuplements.

Un outil permettant la caractérisation des stations où le risque d'occurrence de mortalité est fort peut être d'un grand intérêt dans le cadre de la planification de la gestion. L'identification de ces situations lors de la phase de diagnostic préalable du milieu permet de croiser cette information avec les enjeux identifiés sur ces peuplements, et de prévoir ainsi des actions en conséquence. L'intérêt principal de l'outil est de pouvoir anticiper ces phénomènes, ce qui permet d'engager des actions préventives et de planifier la gestion de manière rationnelle en établissant des priorités et en engageant des moyens conformes aux objectifs, plutôt que de se trouver en situation soudaine de gestion de crise.

Cette démarche de diagnostic préalable et d'établissement de priorités d'intervention est celle adoptée par le *Guide des sylvicultures de montagnes – Alpes du sud françaises* dans son premier volume concernant les forêts de protection (Ladier & Rey, 2008) : l'évaluation de la résistance des peuplements (donc de leur évolution présumée) intervient en parallèle de la détermination des risques naturels pour définir

les priorités d'intervention et les règles de gestion (*cf.* figure 20). La priorité est d'autant plus élevée que la forêt assure actuellement un rôle de protection avéré contre les risques naturels, mais qu'elle risque de ne plus assumer efficacement cette fonction à l'avenir, par exemple du fait d'une dégradation forte de son état sanitaire. C'est à ce niveau que peut intervenir la détermination des stations à risque au moyen du modèle proposé.

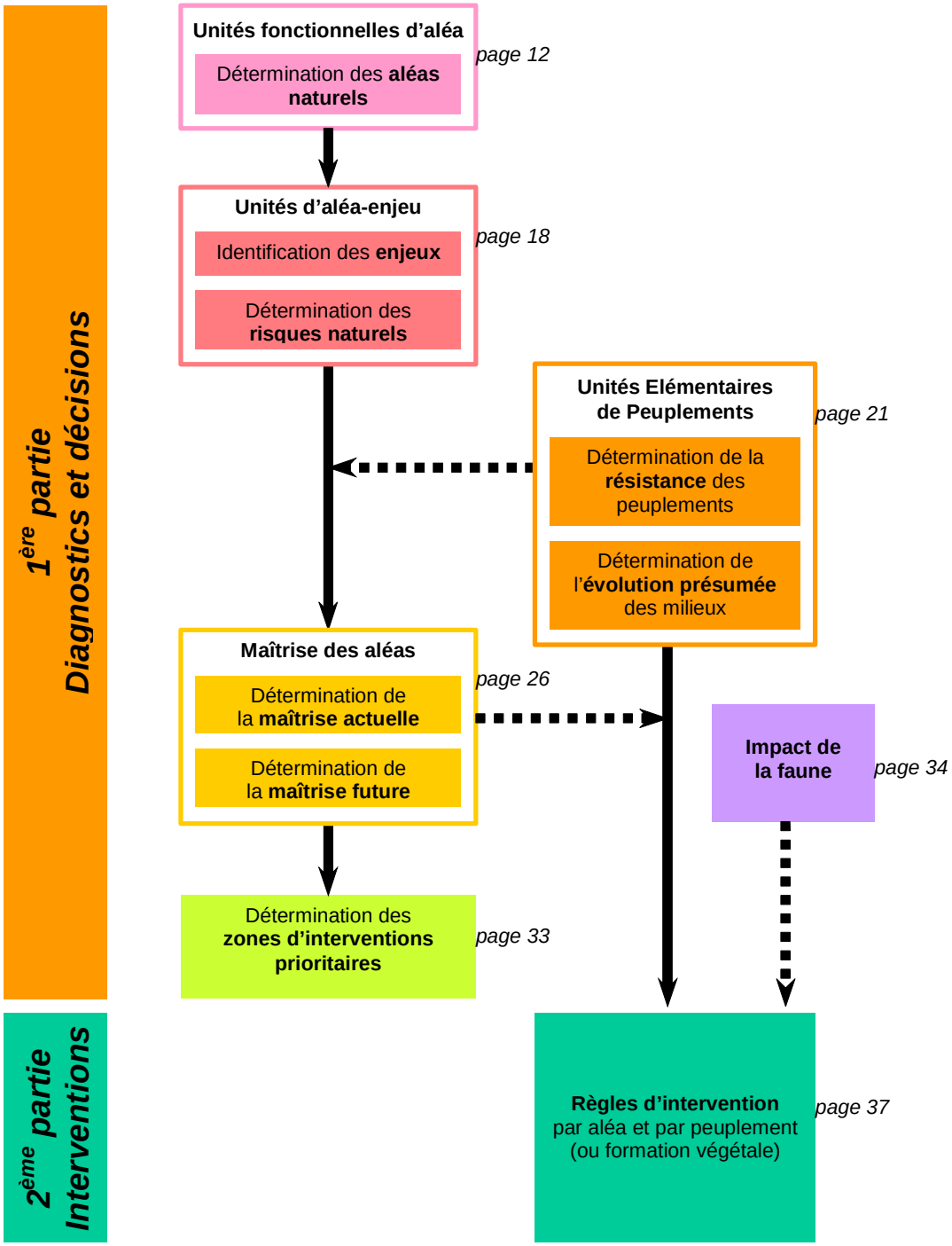


Figure 20 : Démarche de diagnostic du risque et de la maîtrise des aléas par les formations végétales adoptée par le *Guide des sylvicultures de montagne - Alpes du sud* pour les forêts de protection (Source : Ladier & Rey, 2008).

Mais, s'il est déjà intéressant de porter à la connaissance des gestionnaires l'existence d'un risque éventuel de dépérissement sur certaines stations, ce qui leur permet d'anticiper et d'établir au besoin des priorités d'intervention, la principale question qui subsiste concerne la nature des interventions à réaliser dans de telles situations.

4.3.2. Quelles interventions dans les stations « à risque » et dans les peuplements dépérissants ?

Les gestionnaires disposent actuellement de très peu d'éléments concernant la gestion à appliquer aux peuplements qui présentent des signes de dépérissement (interventions visant à limiter l'importance du phénomène constaté ou le résoudre totalement), ou à ceux des stations « à risque » qui ne présentent cependant aucun symptôme (interventions plutôt préventives, pour empêcher que le dépérissement ne survienne).

Dans un but plutôt préventif, la recommandation la plus générale est de favoriser des essences adaptées à la station. Mais la caractérisation des stations favorables pour une essence donnée n'est pas simple. Comment expliquer le fait que les ubacs sont plus concernés que les adrets par le dépérissement du pin sylvestre ? Cela ne correspond pas à la représentation que l'on se fait d'une station inadaptée.

Des recommandations générales ont également été énoncées pour favoriser l'adaptation des forêts aux sécheresses extrêmes dont la fréquence pourrait être augmentée du fait des changements climatiques. Ces grandes orientations sont les suivantes (Guiot *et al*., 2007) :

- favoriser le mélange des essences pour augmenter la résistance des peuplements,
- éclaircir les peuplements afin de diminuer la compétition pour les ressources,
- sélectionner lors des éclaircies les individus les plus vigoureux,
- favoriser les peuplements en limite altitudinale haute de l'aire de répartition, qui seraient moins menacés à court terme.

Ces recommandations ont un caractère préventif, elles visent à préparer les peuplements à des conditions futures plus sèches. Cependant, les références font encore défaut quant au comportement à adopter face à des peuplements qui présentent déjà des signes de dépérissement. Dans ces situations, l'extraction de tous les bois encore sains dans le but de préserver leur valeur commerciale ne semble pas constituer une solution satisfaisante pour assurer la pérennité de la forêt et de ses fonctions. Pour cela, faut-il réaliser des coupes sanitaires et selon quelles modalités, quand est-il nécessaire de réaliser une substitution d'essence, peut-on laisser le peuplement sans intervention ?

Il est donc nécessaire de disposer à la fois d'éléments scientifiques et techniques, et d'une vision à long terme des enjeux liés à la conservation des boisements. Dans le cas où les enjeux le justifient et lorsqu'une solution technique est identifiée, il faut enfin trouver des financements pour mener les actions nécessaires dans ces forêts qui génèrent souvent de très faibles recettes.

Conclusion

L'objet de ce mémoire est l'étude du déterminisme écologique des dépérissements récents du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes.

Pour atteindre ce but, une réflexion méthodologique s'est d'abord avéré nécessaire, pour trouver une démarche d'analyse adaptée aux données disponibles. Grâce à celle-ci, qui s'avère assez originale, des premiers résultats ont été obtenus pour chacune des deux essences. Des difficultés sont cependant apparues, dues aux données initiales et à la démarche adoptée. Afin de proposer des résultats les plus fiables possibles, un modèle d'explication du dépérissement du pin sylvestre a finalement été proposé, se basant sur les données de l'étude mais également sur d'autres éléments. Ce résultat final revêt une forme assez classique, reproduisant les emboîtements d'échelles sur lesquels reposent de nombreuses analyses du milieu.

Ce modèle a été bâti dans un but d'explication du phénomène constaté. Il serait cependant nécessaire de le valider, et cette vérification *a posteriori* permettrait également de juger de son adéquation à prédire l'évolution des peuplements sur les stations « à risque » identifiées. S'il s'avérait valable, cet outil prédictif pourrait être d'une grande utilité pour la gestion, en permettant d'anticiper les effets des crises climatiques dont l'intensification future est redoutée.

Les dépérissements récemment observés ont de quoi inquiéter, ils concernent des surfaces non négligeables et semblent progresser. Mais des perspectives pour les anticiper et pour limiter l'impact du climat sur les peuplements forestiers sont envisageables, même si tous les éléments nécessaires ne sont pas encore connus. Les enjeux ne sont pas négligeables, contrairement à ce que l'on pourrait croire. Si les forêts méditerranéennes sont généralement très peu rentables du point de vue économique, elles assurent des services écosystémiques fondamentaux. C'est le cas de la protection des sols et des eaux, la protection des biens et des personnes contre divers risques naturels. Elles sont le cadre d'activités de tourisme et de loisirs, et recèlent une biodiversité exceptionnelle. Enfin, ces forêts sont une composante essentielle de l'activité économique en milieu rural (exploitation et transformation du bois, sylvopastoralisme…).

Ces phénomènes récents peuvent donc être l'occasion d'une prise de conscience de l'importance de la forêt de la part de l'ensemble des acteurs concernés, et entraîner une participation réelle de ceux-ci à la gestion de ces espaces multifonctionnels.

+++

Références bibliographiques

Alexandrian D., 1992. *Essences forestières*. Guide technique du forestier méditerranéen français, chapitre 3, 2e édition, Cemagref Aix-en-Provence, 96 p.

Boisseau B., Nouals D., Ripert C., 1992. *Stations forestières*. Guide technique du forestier méditerranéen français, chapitre 2, Cemagref Aix-en-Provence, 38 p.

Delahaye Panchout M., 2004. *La sapinière à la reconquête de son territoire*. Office national des forêts, 40 p. (Collection « Les carnets du forestier – Alpes du sud »).

Delahaye Panchout M., Ladier J., 2006. *Le mélézin : un avenir incertain*. Office national des forêts, 50 p. (Collection « Les carnets du forestier – Alpes du sud »).

Gauquelin X., Courbaud B. (coord.), 2006. *Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Nord françaises*. Cemagref – Centre régional de la propriété forestière Rhône-Alpes– Office national des forêts, 289 p.

Girard P., 2009. *Compte rendu de la tournée du 4 Août 2009 dans les Alpes Maritimes : problèmes sanitaires sur divers essences en moyenne montagne méditerranéenne*. Département de la santé des forêts - échelon Sud-est, 7 p.

Guiot J., Guibal F., Huc R., Misson L., Rambal S., Ratte J.P., Vennetier M., Davi H., Denelle N., Edouard J.L., Gaucherel C., Hoepffner M., Joffre R., Makhmara H., Mouillot F., Ourcival J.M., Porte A., Prevosto B., Thomas A., Ripert C., 2007. *Réponse des forêts méditerranéennes françaises aux changements climatiques*. Ministère de l'écologie et du développement durable, 22 p. (Programme APR GICC 2003, rapport de fin de contrat).

Inventaire forestier national, 2004. *Département des Alpes-maritimes – Résultats du troisième inventaire forestier (2002)*. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, 187 p. (consulté sur *www.ifn.fr* en mai 2010)

Ladier J., 2004. *Les stations forestières des Préalpes sèches : définition, répartition, dynamique, fertilité*. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 124 p.

Ladier J., Rey F. (coord.), 2008. *Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Sud françaises ; 1. Forêts de protection*. Cemagref – Office national des forêts, 135 p.

Ladier J., Rey F. (coord.), 2010. *Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Sud françaises*. Cemagref – Office national des forêts. (Version provisoire, non publiée).

Landmann G., 1994. *Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers*. Revue forestière française XLVI (5), pp. 405-415.

Nouals D., 1999. *Le sapin pectiné en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : autécologie – stations forestières*. Office national des forêts - Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur, 74 p.

Office national des forêts, 2007. *Mise en place d'un suivi de l'état sanitaire des forêts dans les Alpes-Maritimes – programme prévisionnel 2007-2011*. Rapport d'étude pour le Conseil général des Alpes-Maritimes. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 9 p.

Office national des forêts, 2008. *Sylviculture du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 65 p.

Office national des forêts, 2009. *Mise en place d'un suivi de l'état sanitaire des forêts dans les Alpes-Maritimes – II. Cartographie des zones à risques de dépérissement forestier*. Rapport d'étude pour le Conseil général des Alpes-Maritimes. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 14 p.

Office national des forêts, 2010. *Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes – Synthèse de la campagne d'observations 2009 pour le sapin pectiné et le pin sylvestre.* Rapport d'étude pour le Conseil général des Alpes-Maritimes. Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée, 46 p.

Médail F., 2001. *Biogéographie, écologie et valeur patrimoniale des forêts de pin sylvestre (*Pinus sylvestris *L.) en région méditerranéenne*. Forêt méditerranéenne XXII, 1, pp. 5-22.

Panini T., 1999. *Etude des potentialités forestières des terres agricoles délaissées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Marseille : Centre régional de la propriété forestière Provence-Alpes-Côte d'Azur, 159 p.

Ripert C., Vennetier M., 2002. *Evaluation des potentialités forestières*. Guide technique du forestier méditerranéen français, chapitre 2 bis. Anthony : Editions Cemagref, 61 p.

Scherrer B., 1984. *Biostatistique*. Montréal : Gaëtan Morin éditeur, 850 p.

Tessier L., 1982. *Analyse dendroclimatologique comparée de six populations de Pinus sylvestris (L.) dans la Drôme*. Ecologia Mediterranea VIII (3), pp. 185-202.

Thabeet A., 2008. *Réponse du Pin sylvestris (Pinus sylvestris L.) aux changements climatiques récents en région méditerranéenne française : spatialisation et quantification par la télédétection et la dendrochronologie*. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 282 p. (Thèse de doctorat en biologie des populations - écologie).

Vennetier M., Borgniet L., Thabeet A., Gadbin-Henry C., Ripert C., Vila B., Prevosto B., Esteve R., Martin W., N'Diaye A., 2007. *Impact de la canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA.* Rapport de synthèse pour le Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cemagref – Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, 22 p.

Contacts

Nom	Fonction	Organisme	Coordonnées
Jean LADIER	Chargé de développement technique	Office national des forêts – Direction territoriale Méditerrannée – Pôle recherche et développement en sylviculture et aménagement	jean.ladier@onf.fr 04.92.70.48.04 Actiplus ZI Saint Joseph 04100 Manosque
Michel VENNETIER	Ingénieur de recherche	Cemagref Aix-en-Provence	michel.vennetier@cemagref.fr 04.42.66.99.22 3275 Rte de Cézanne CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5
Jean-Pierre RENAUD	Biométricien	Office national des forêts – Département recherche et développement	jean-pierre.renaud-02@onf.fr 03.83.23.45.02 les Merises bât. 802 Parc de Haye 54840 Velaine-en-Haye
Lilian MICAS	Agent patrimonial et correspondant-observateur du DSF	Office national des forêts – Agence des Alpes-de-Haute-Provence – Unité territoriale de St-André-les-Alpes	lilian.micas@onf.fr 04.92.89.13.28

Table des annexes

Annexe 1 : Carte de la mortalité du pin sylvestre dans les Alpes-Maritimes en 2008. 65

Annexe 2 : Carte de la mortalité du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes en 2008.....66

Annexe 3 : Méthodologie pour l'analyse des relations entre les facteurs du milieu quantitatifs et le taux de mortalité – schéma explicatif. 67

Annexe 4 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (pin sylvestre).....68

Annexe 5 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (sapin pectiné). 75

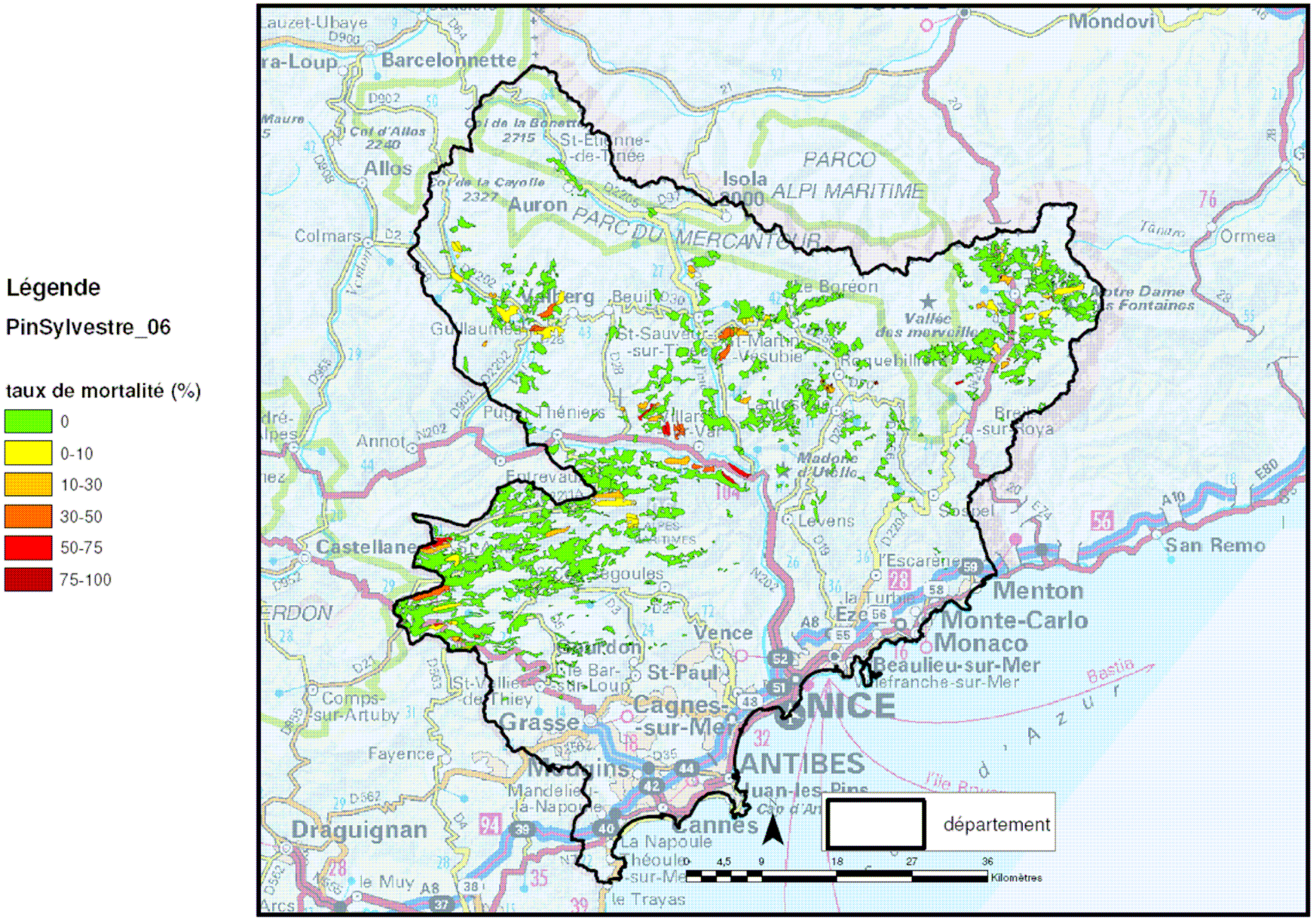
Annexe 6 : Méthode suivie pour la définition des intensités de mortalité. 82

Annexe 7 : Macro Visual Basic Excel permettant de déterminer l'intensité de mortalité à partir des données initiales selon le modèle pour le pin sylvestre. 83

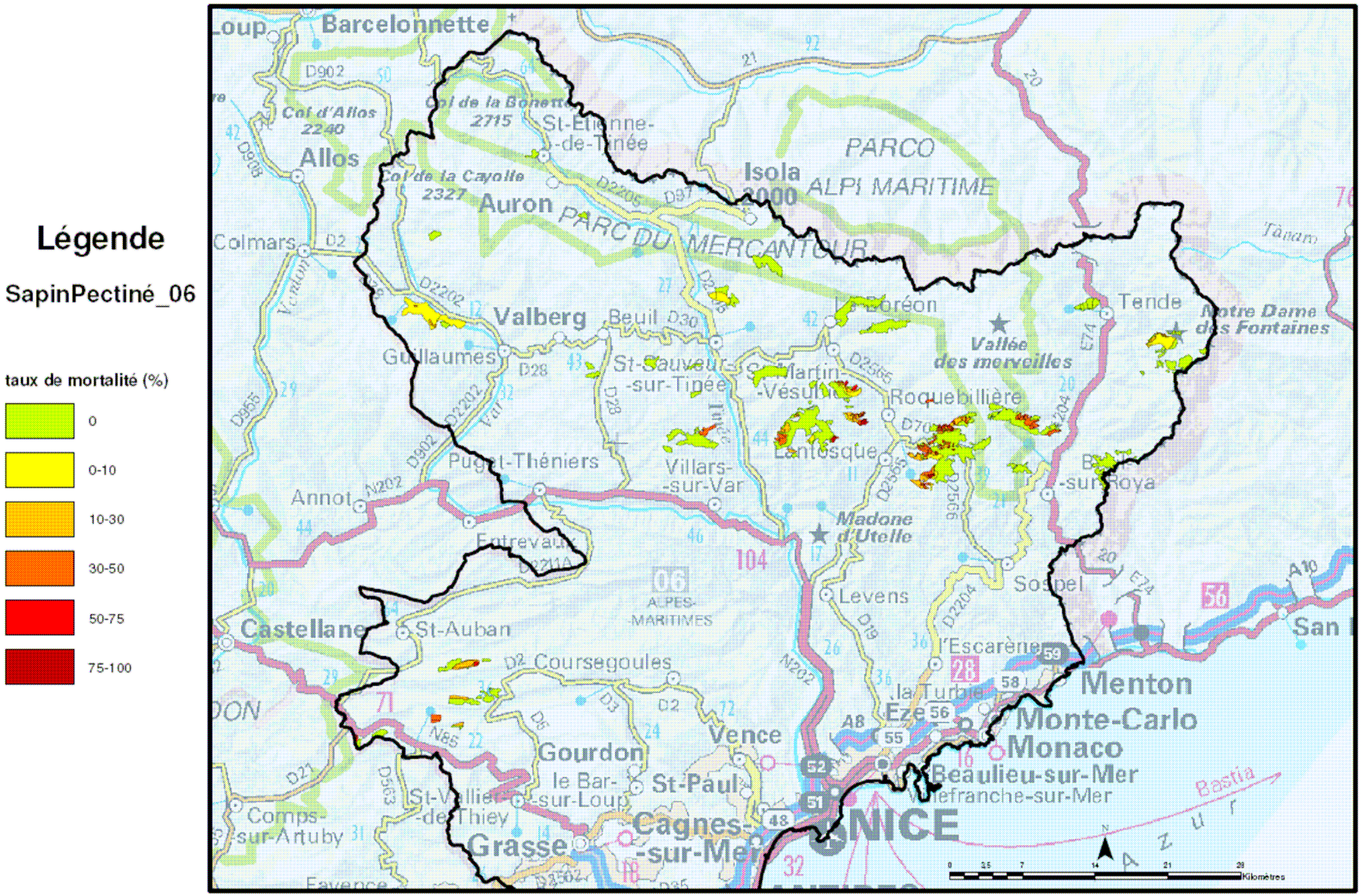
Annexe 8 : Clé du modèle simplifié d'explication de la mortalité du pin sylvestre…….84

Annexe 1 : Carte de la mortalité du pin sylvestre dans les Alpes-Maritimes en 2008.

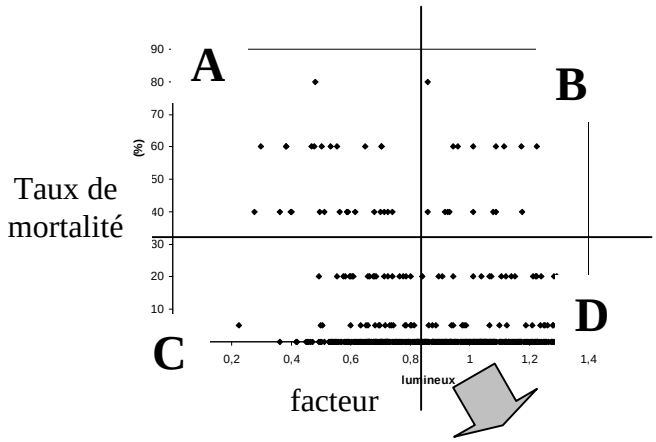
(Données : Office national des forêts ; Scan1000 de l'Institut géographique national)



Annexe 2 : Carte de la mortalité du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes en 2008.
(Données : Office national des forêts ; Scan1000 de l'Institut géographique national)



Annexe 3 : Méthodologie pour l'analyse des relations entre les facteurs du milieu quantitatifs et le taux de mortalité – schéma explicatif.



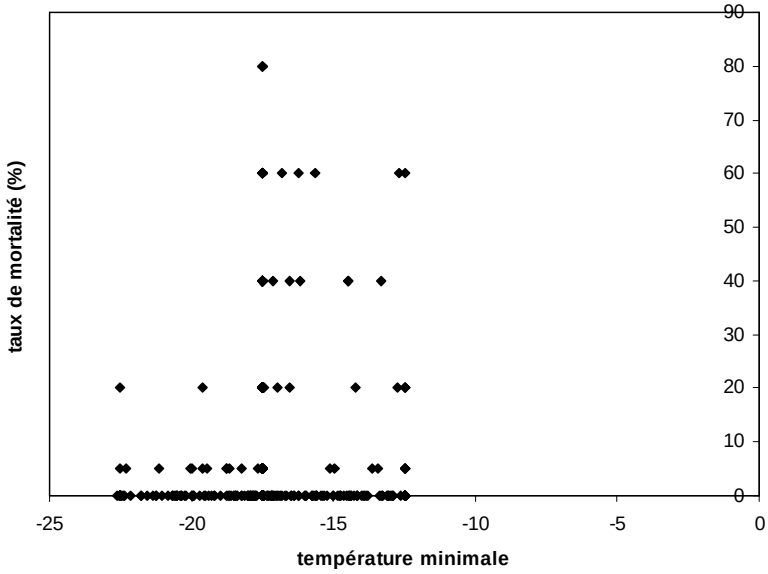
1- Identification graphique de valeur-seuils pour le facteur quantitatif puis regroupement des classes de taux de mortalité (ce qui équivaut à définir un seuil pour le taux de mortalité).

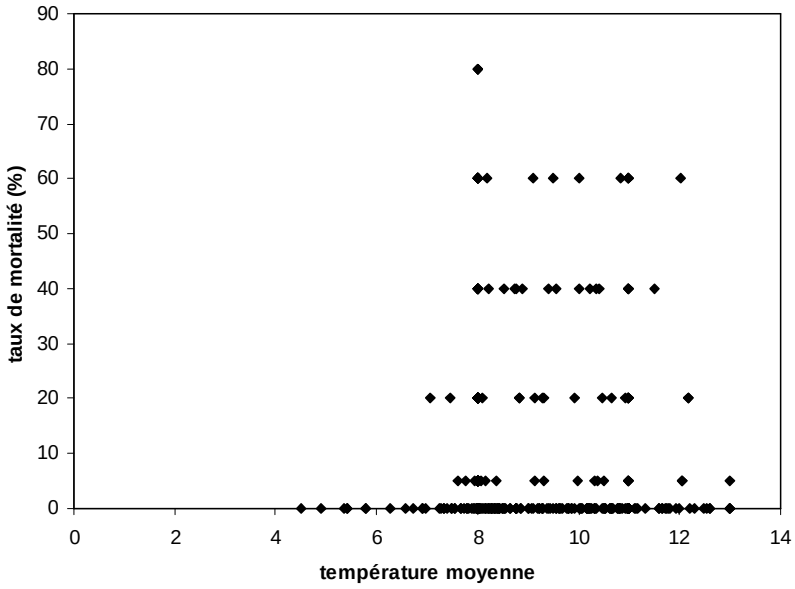
	Modalités de taux de mortalité	
Modalités du facteur	Effectif A	Effectif C
	Effectif B	Effectif D

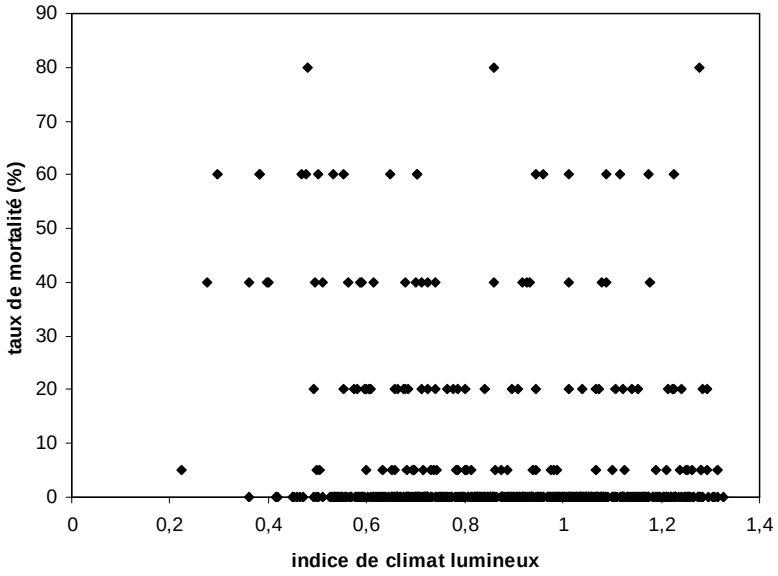
2- Constitution du tableau d'effectifs des modalités ainsi définies.

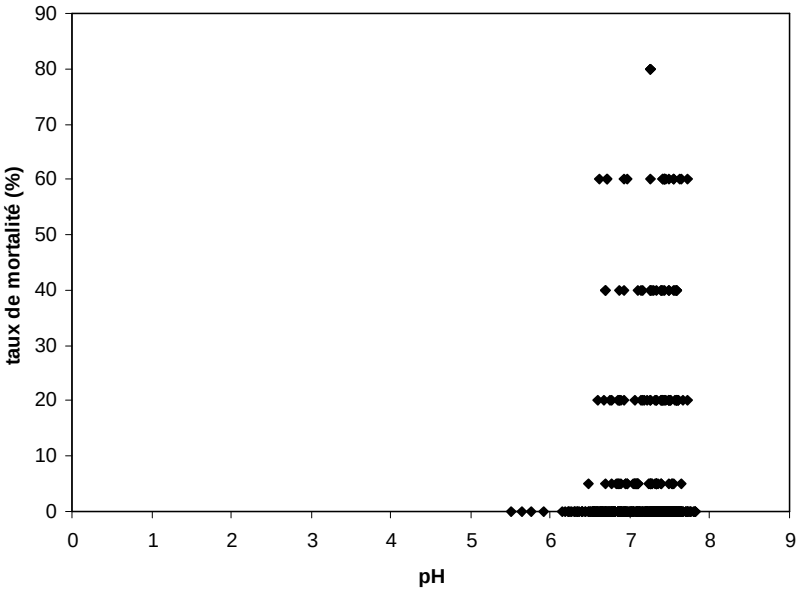
3- Test du khi-deux : est-ce que la proportion de données dont le taux de mortalité est supérieur au seuil dépend du niveau du facteur par rapport à son propre seuil ?
C'est-à-dire : le taux de mortalité est-il indépendant du facteur considéré, selon les modalités définies pour chacun ?

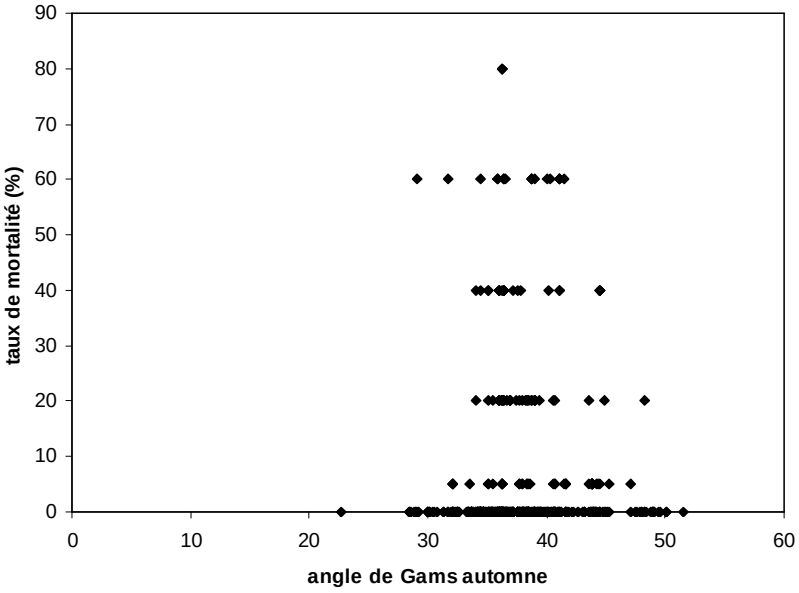
Annexe 4 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (pin sylvestre).

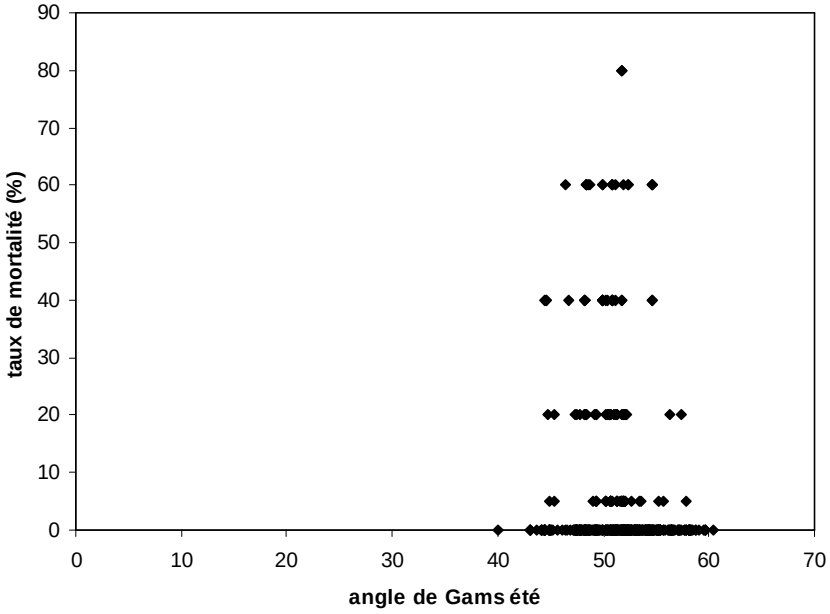


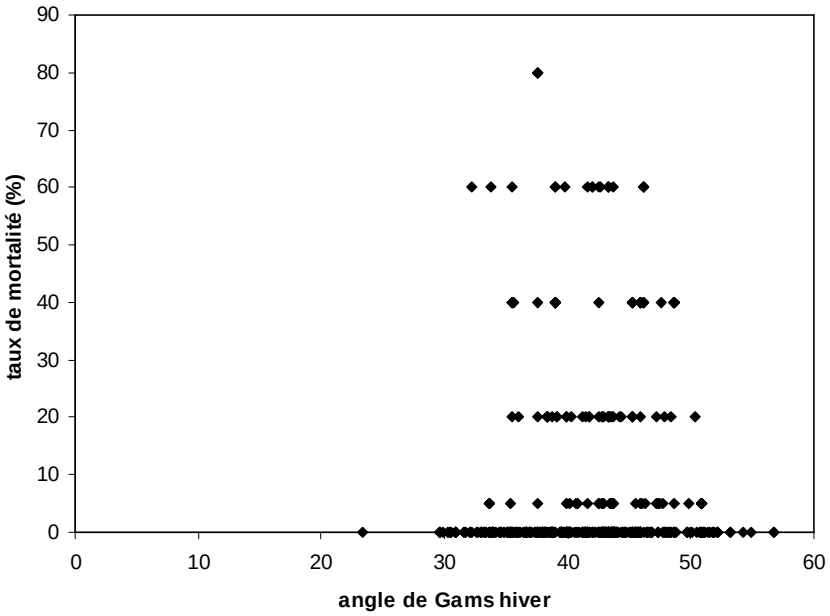


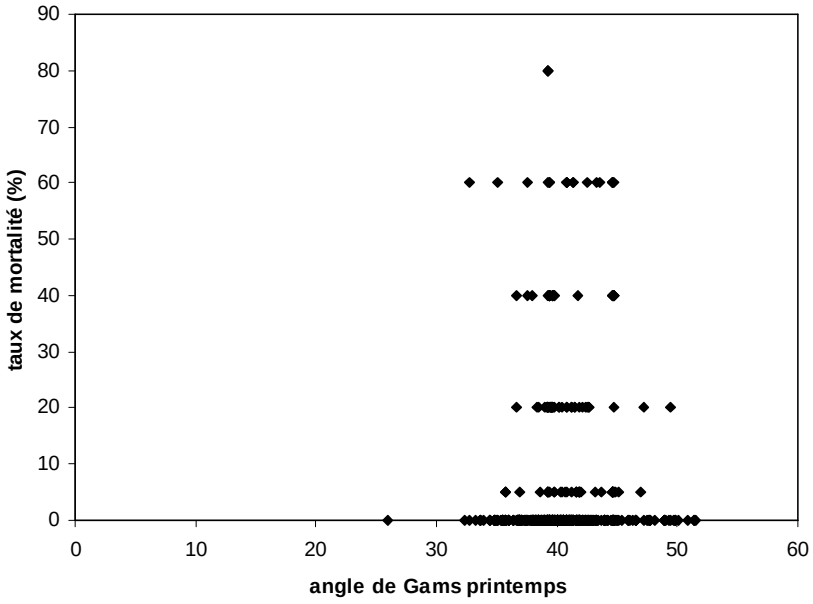


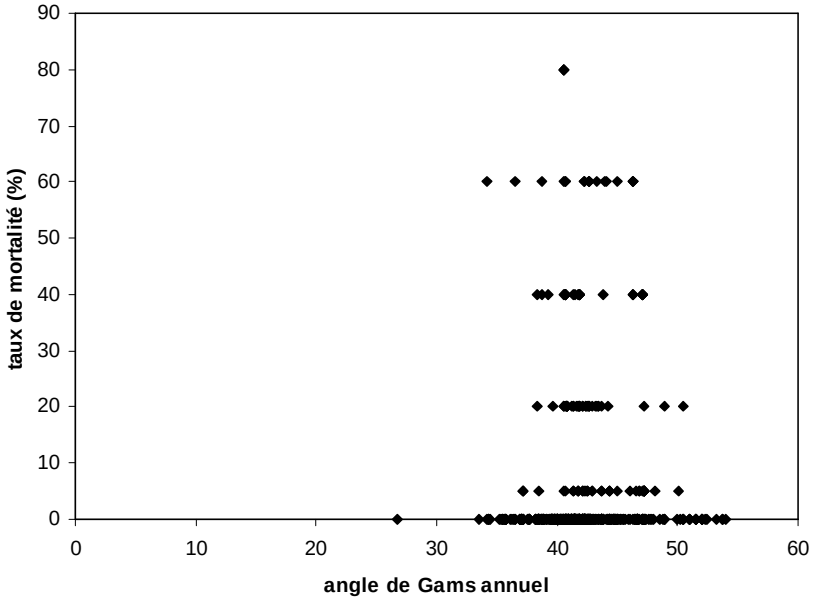

taux de mortalité (%)
pH

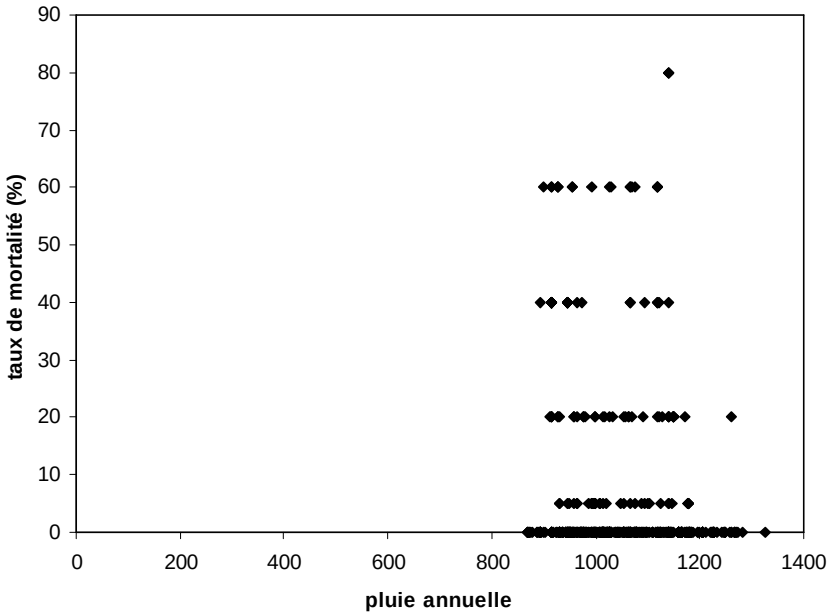

taux de mortalité (%)
angle de Gams automne

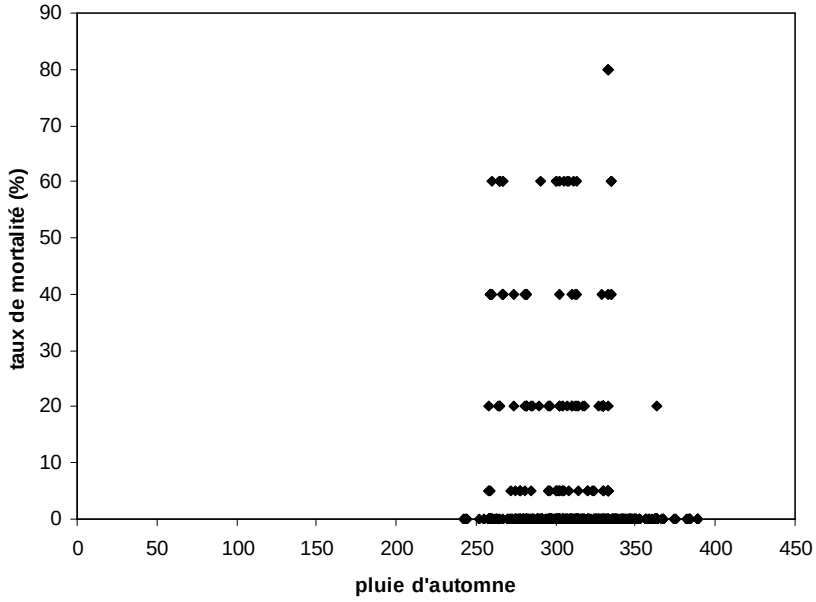

taux de mortalité (%)
angle de Gams été

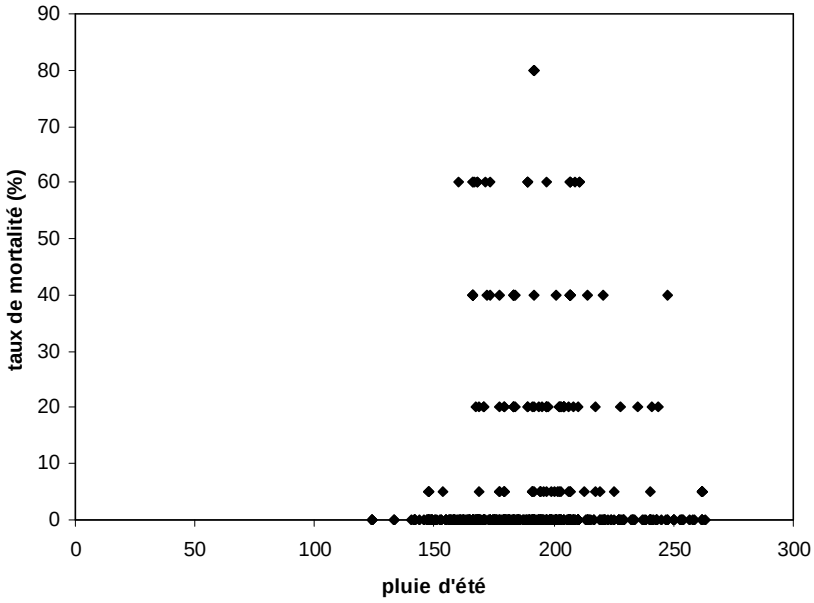

taux de mortalité (%)
angle de Gams hiver

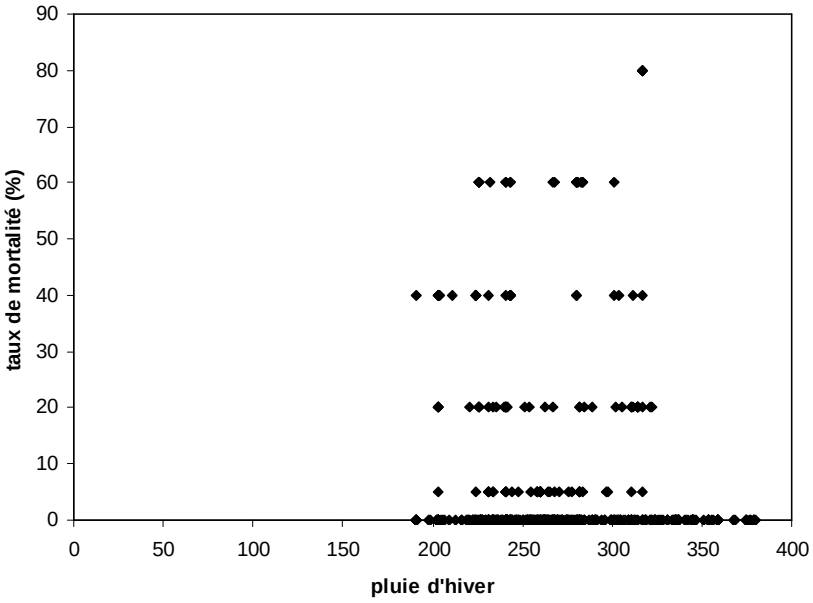

taux de mortalité (%)
angle de Gams printemps

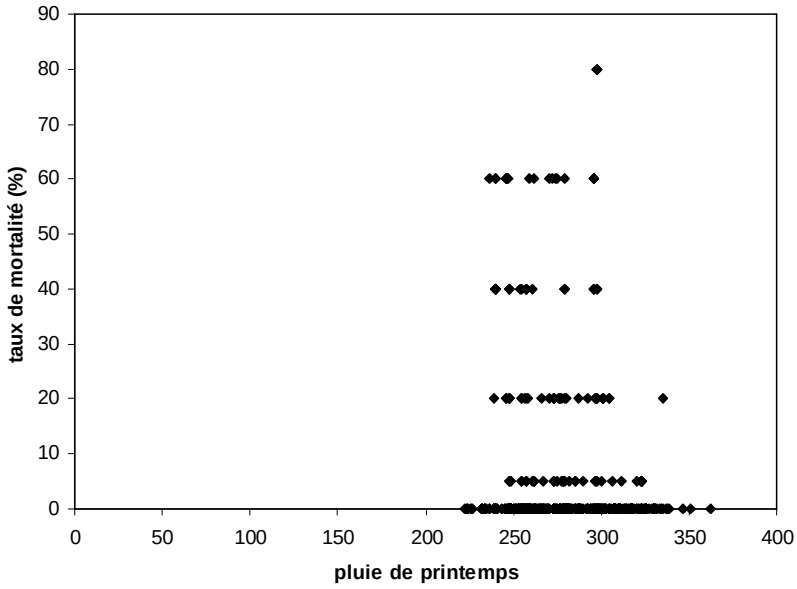

taux de mortalité (%)
angle de Gams annuel

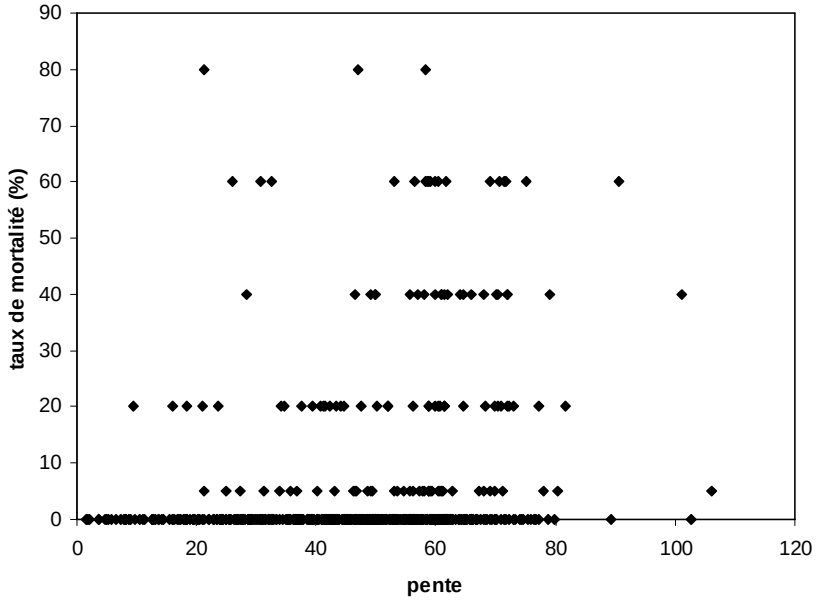

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
pluie annuelle

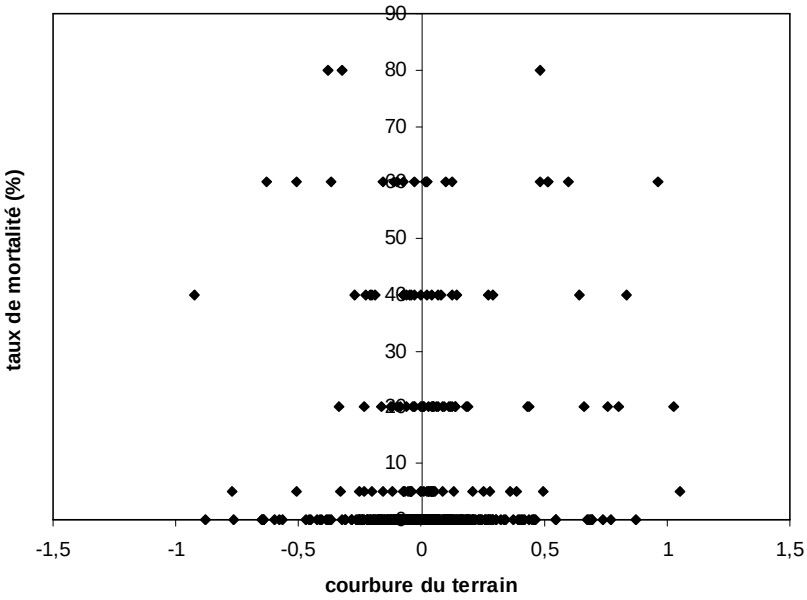

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
pluie d'automne

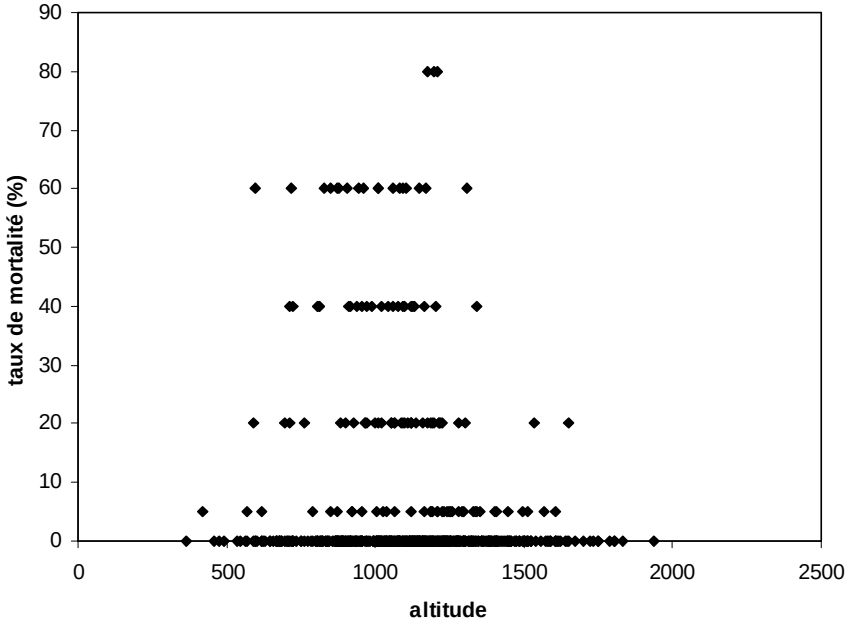

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
pluie d'été

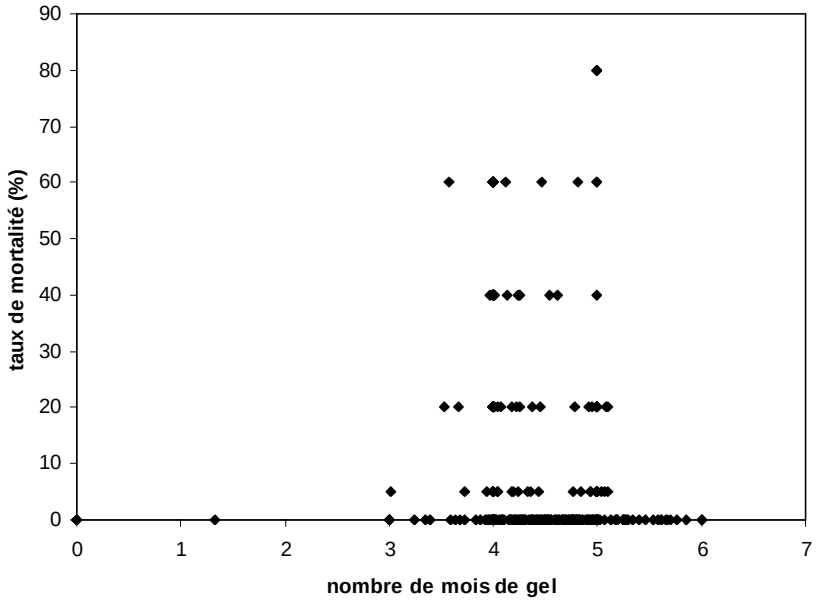

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
400
pluie d'hiver


taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
400
pluie de printemps


taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
20
40
60
80
100
120
pente


taux de mortalité (%)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-1,5
-1
-0,5
0
0,5
1
1,5
courbure du terrain

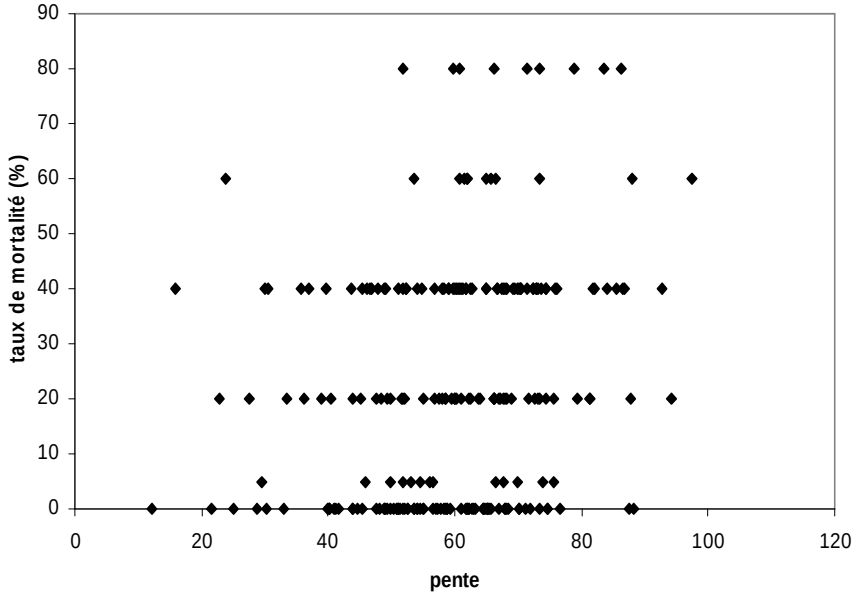

taux de mortalité (%)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500
2000
2500
altitude

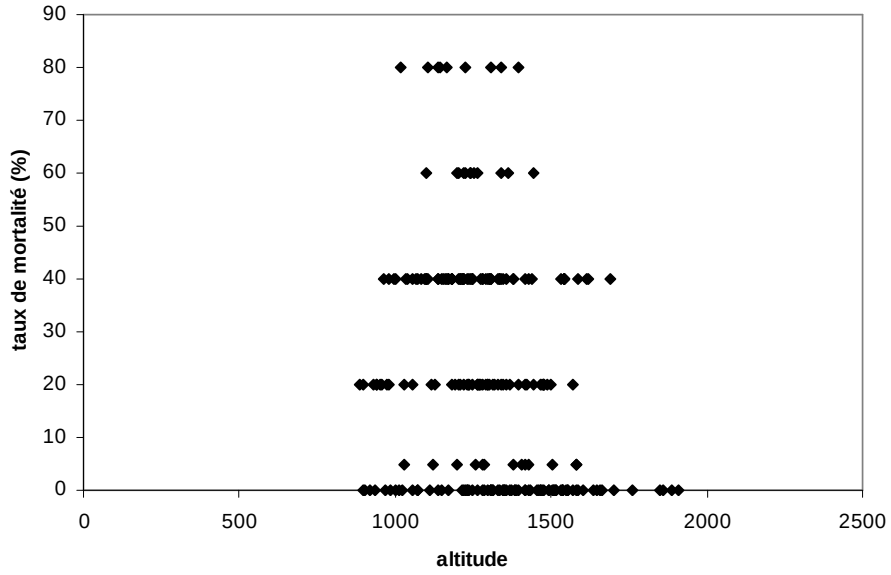

taux de mortalité (%)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
nombre de mois de gel

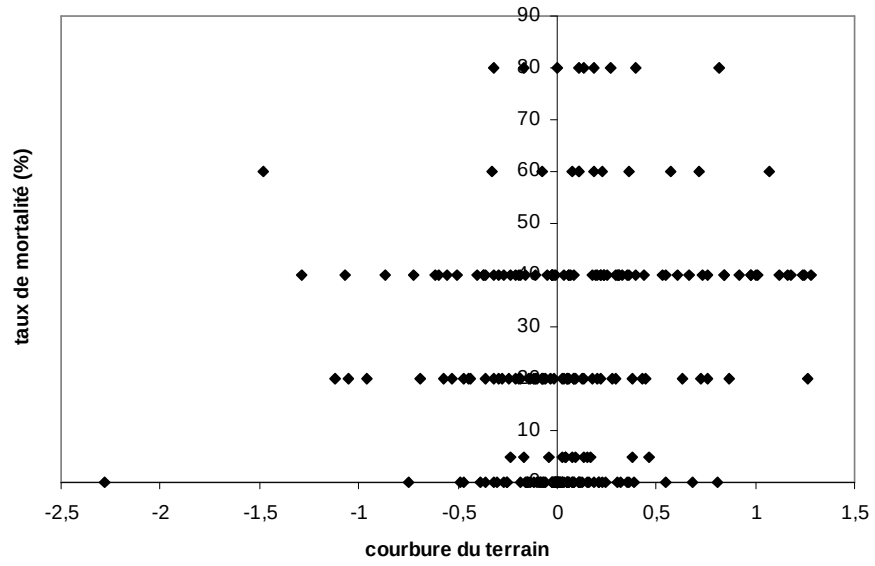
Effectifs	taux de mortalité (%)						
Zone climatique	**0**	**5**	**20**	**40**	**60**	**80**	**Total**
Littoral	10						10
Préalpes	204	9	22	9	13	3	260
Montagnes sud-alpines	221	31	16	14	5		287
Total	435	40	38	23	18	3	557

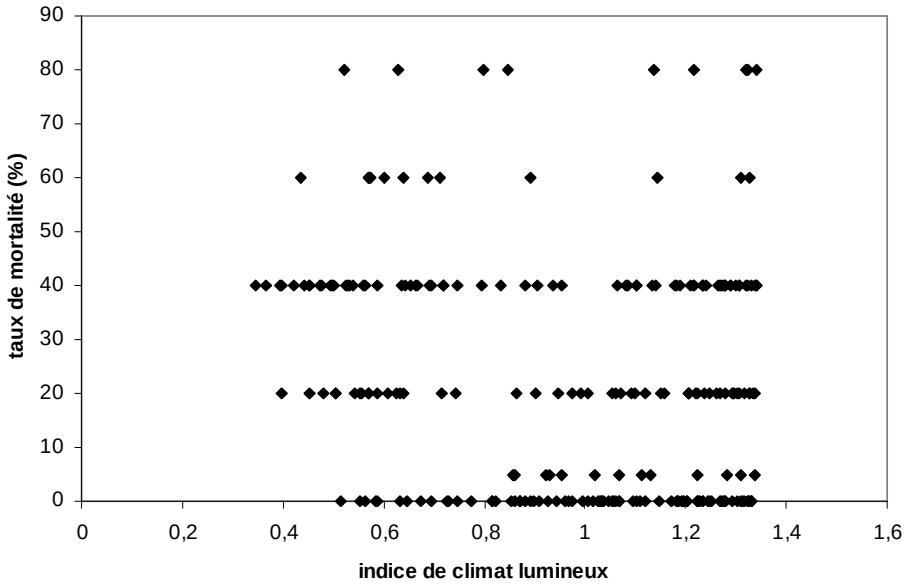
Effectifs	taux de mortalité (%)						
Type de roche	**0**	**5**	**20**	**40**	**60**	**80**	**Total**
Calcaires siliceux ou dolomitiques	89	5	6	1		2	103
Calcaires	183	17	19	20	11		250
Marnes ou argiles	101	8	7	1	7	1	125
Roches acides	62	10	6	1			79
Total	435	40	38	23	18	3	557

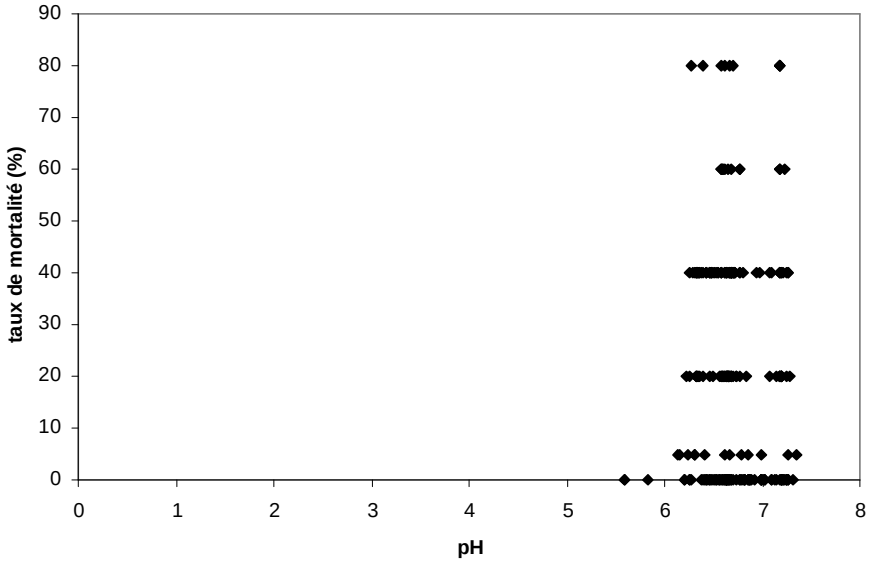
Annexe 5 : Relations entre le taux de mortalité et les facteurs du milieu (sapin pectiné).

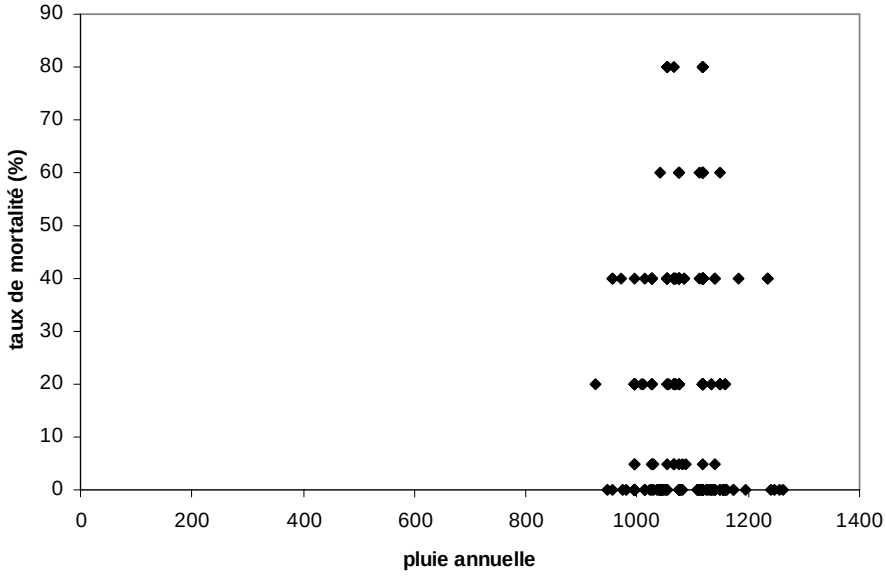


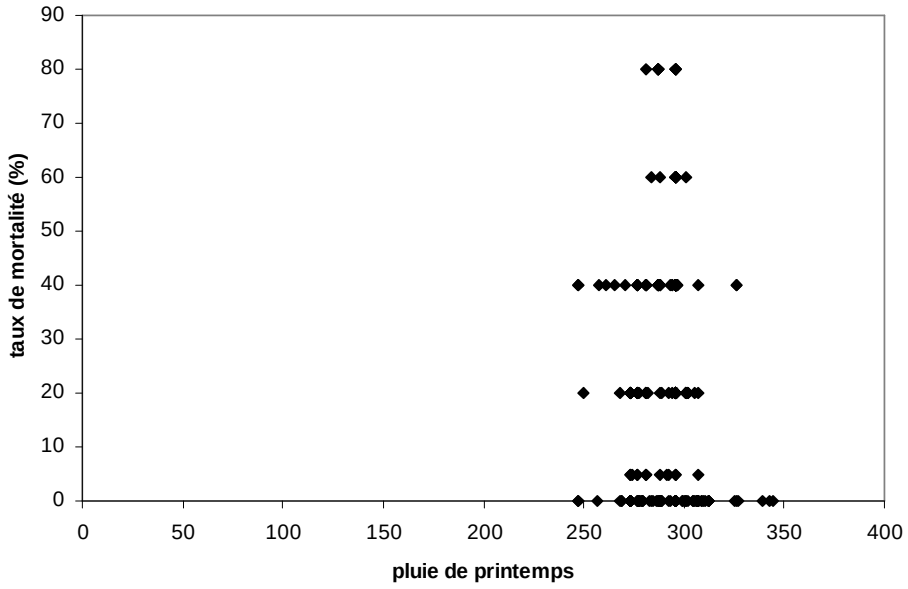


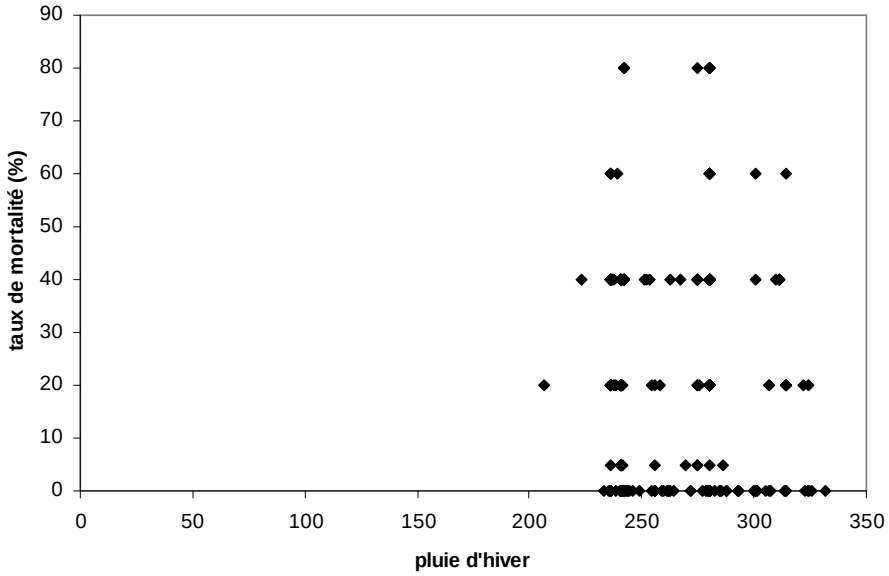


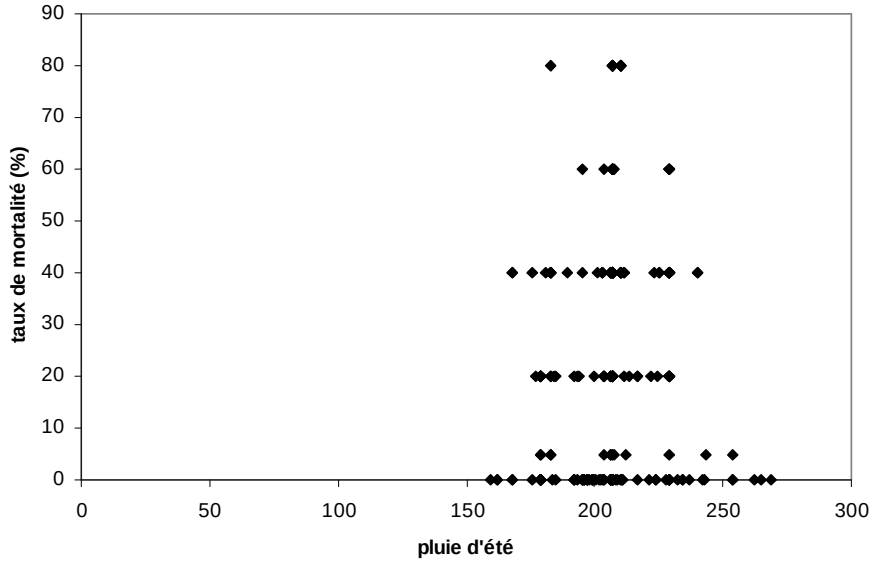

taux de mortalité (%)
indice de climat lumineux

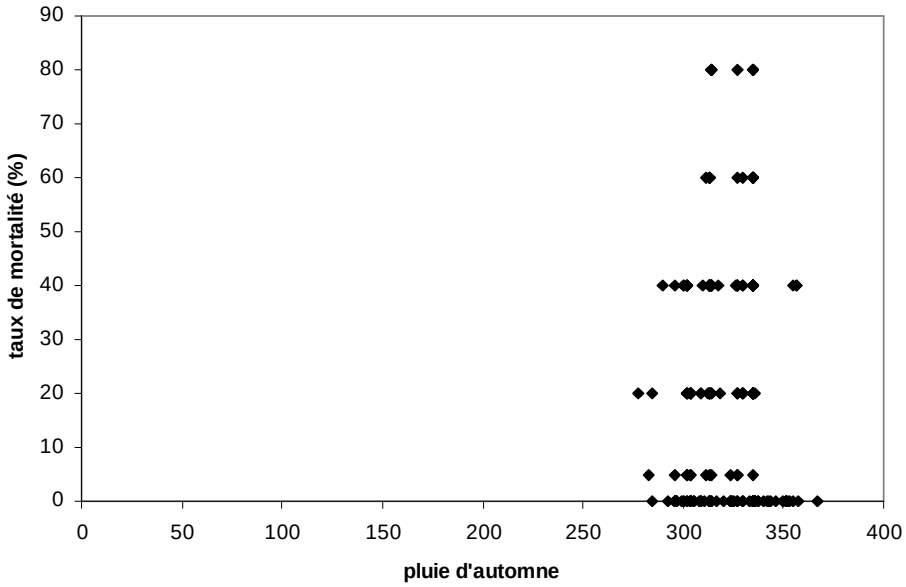

taux de mortalité (%)
pH

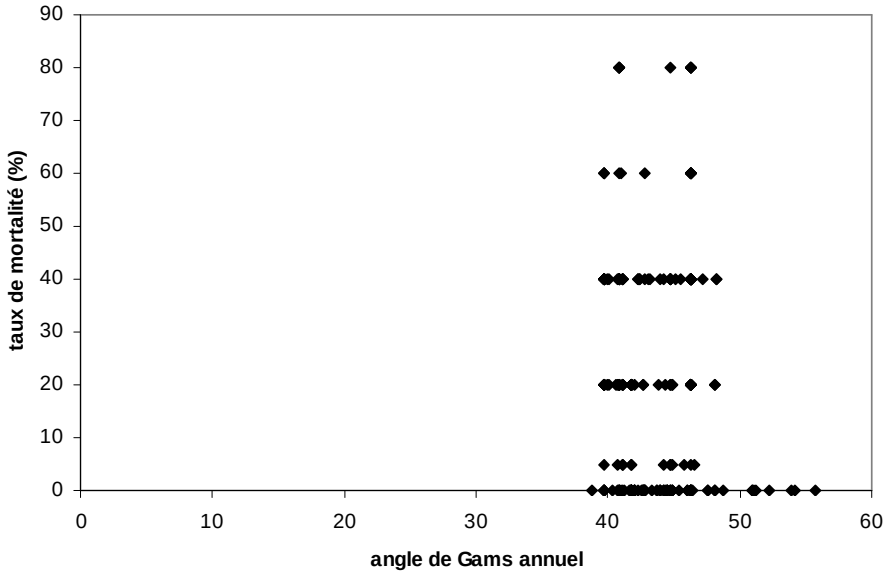

taux de mortalité (%)
pluie annuelle

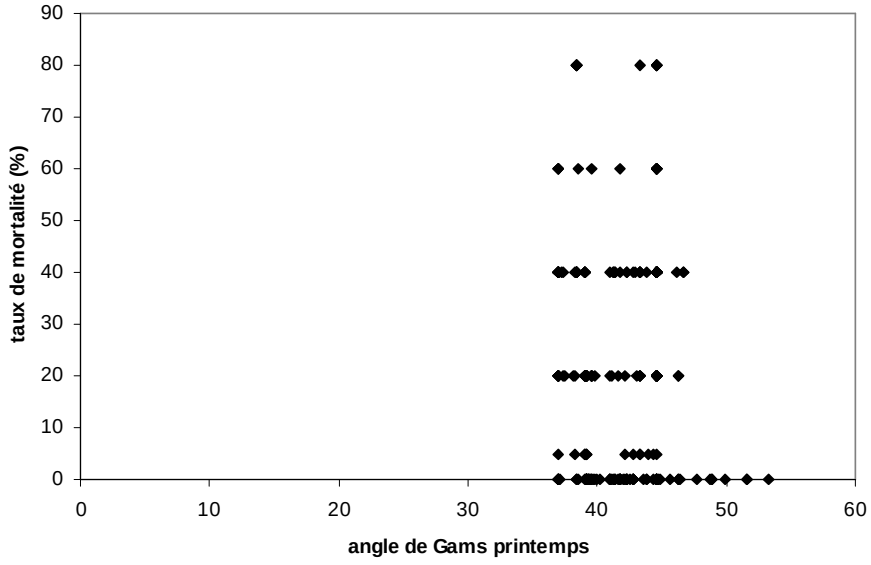

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
400
pluie de printemps

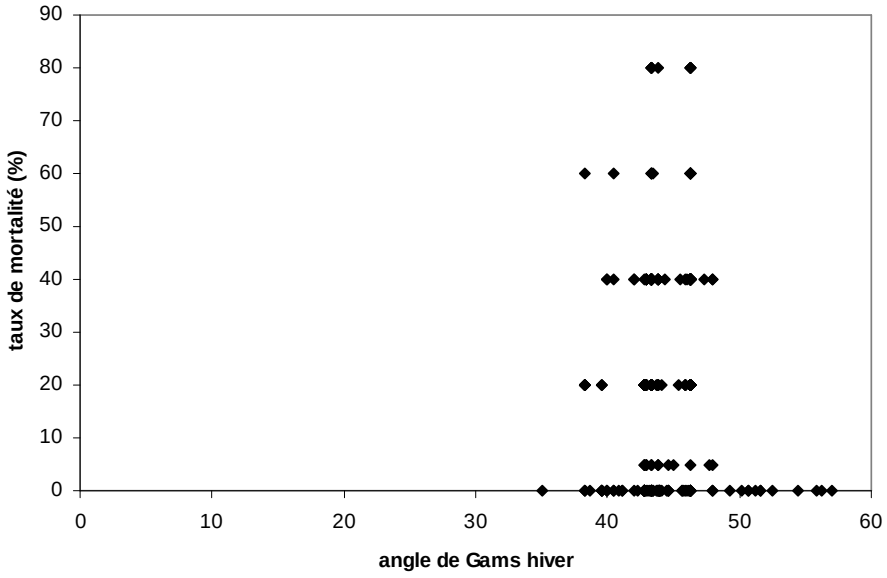

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
pluie d'hiver

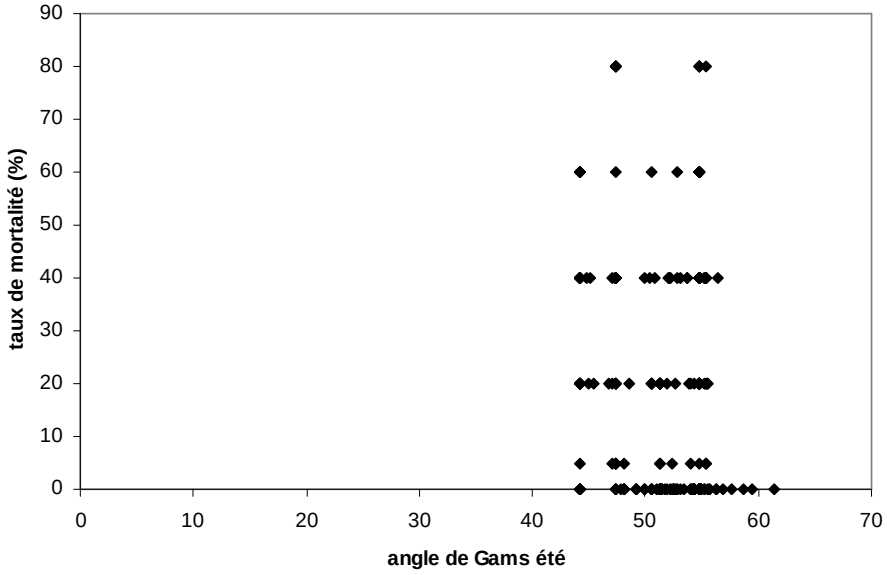

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
pluie d'été

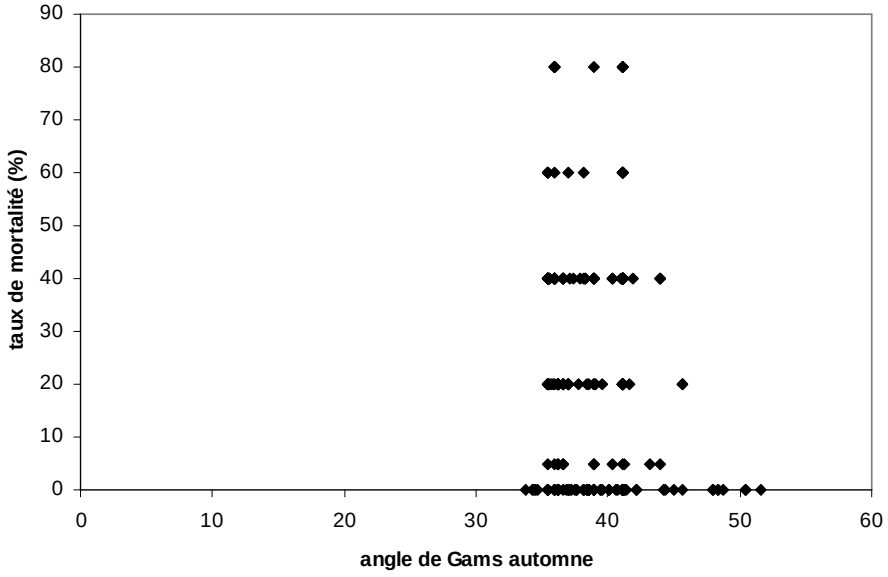

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
50
100
150
200
250
300
350
400
pluie d'automne

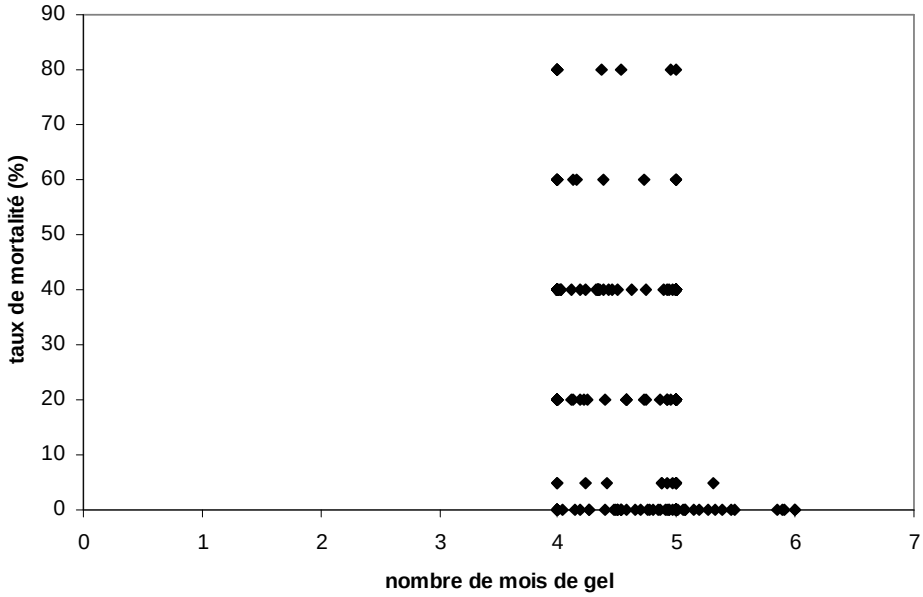

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
10
20
30
40
50
60
angle de Gams annuel

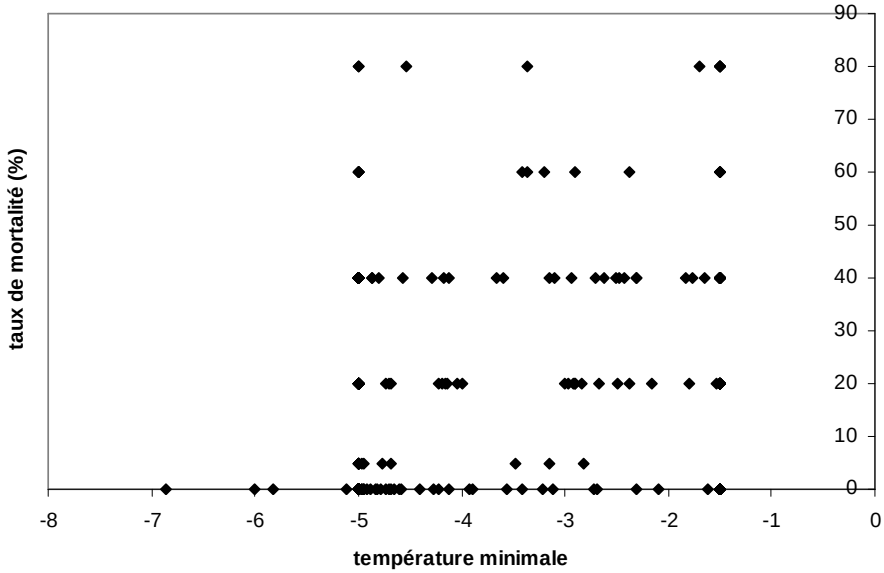

taux de mortalité (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
10
20
30
40
50
60
angle de Gams printemps

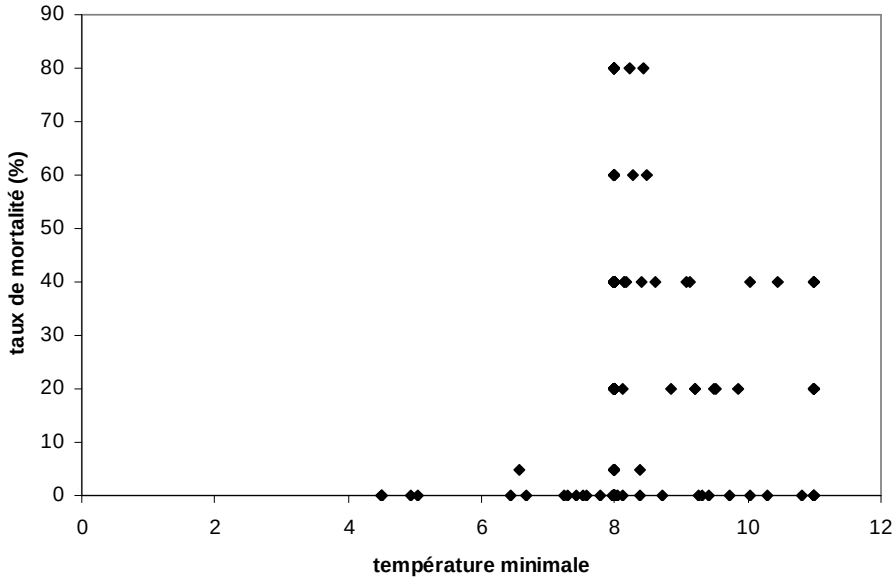

taux de mortalité (%)
angle de Gams hiver


taux de mortalité (%)
angle de Gams été


taux de mortalité (%)
angle de Gams automne


taux de mortalité (%)
nombre de mois de gel


taux de mortalité (%)
température minimale


taux de mortalité (%)
température minimale

Effectifs	taux de mortalité (%)						
Zone climatique	**0**	**5**	**20**	**40**	**60**	**80**	**Total**
Préalpes	10		6	3	2		21
Montagnes sud-alpines	73	13	45	66	10	9	216
Total	83	13	51	69	12	9	237

Effectifs	taux de mortalité (%)						
Type de roche	**0**	**5**	**20**	**40**	**60**	**80**	**Total**
Calcaires siliceux ou dolomitiques	12		9	9	2	1	33
Calcaires	38	6	28	32	10	6	120
Marnes ou argiles	3		3	5			11
Roches acides	30	7	11	23		2	73
Total	83	13	51	69	12	9	237

Annexe 6 : Méthode suivie pour la définition des intensités de mortalité.

Identifiant	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	40	40	60
	40	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0		60	
	40	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	20	0	0	0	0			
	60	0	20	0	0	0	0	0		0	0	0	40	0	0	0	0			
	60	0	20	0	0	0	0	0		0	0	0	60	0	0	0	0			
	60	0	20	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0			
	60	0	20	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0			
	60	0	80	0	0	0	0	20		0	0	0		0	0	0	0			
		0		20	0	0	0	20		0	0	0		0	0	0	0			
		0		20	0	0	0	40		0	0	0		0	0	0	0			
		0		40	0	0	0	40		0	0	0		0	0	0	0			
		0			0	0	0	60		0	0	0		20	0	5	5			
		0			0	0	0	60		0	0	5			0	20	5			
		0			0	0	0	60		0	0	20			0	20	20			
		0			0	0	0	80		0	0	40			0	20	20			
		0			20	0	0			0	0	40			0	40	20			
		0			20	0	0			0	0				0	40	20			
		0			20	0	0			0	0				0	40	20			
		0			20	5	0			20	0				0	40	40			
		0			40	60	5			20	0				0	60	40			
		0			40	60	20				0				0		60			
		20			40	80	20				0				20					
		20			60		20				0				40					
		20			60		20				0				40					
		20					20				0				40					
		60									0									
											0									
											0									
											0									
											20									
											20									
moyenne	47,5	5,38	20	7,27	13,3	9,32	4,2	25,3	20	2	1,29	6,56	24	1,67	5,6	14,3	11,9	40	50	60
nb 0/5	1	21	3	8	15	19	20	7	0	18	29	13	2	11	21	12	13	0	0	0
nb val	8	26	8	11	24	22	25	15	1	20	31	16	5	12	25	20	21	1	2	1
%0/5	0,13	0,81	0,38	0,73	0,63	0,86	0,8	0,47	0	0,9	0,94	0,81	0,4	0,92	0,84	0,6	0,62	0	0	0
max	60	60	80	40	60	80	20	80	20	20	20	40	60	20	40	60	60	40	60	60

Identifiant	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Intensité de mortalité	**3**	**2**	**3**	**2**	**2**	**2**	**2**	**3**	**2**	**1**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**

Les groupes de données isolés à chaque étape sont comparés entre eux sur la base de différents critères :

moyenne = moyenne des médianes des classes de taux de mortalité pondérée par leur effectif
nb 0/5 = nombre de données dont le taux de mortalité est inférieur à 10 %
nb val = nombre total de données
%0/5 = proportion des données dont le taux de mortalité est inférieur à 10 %
max = valeur maximale de taux de mortalité

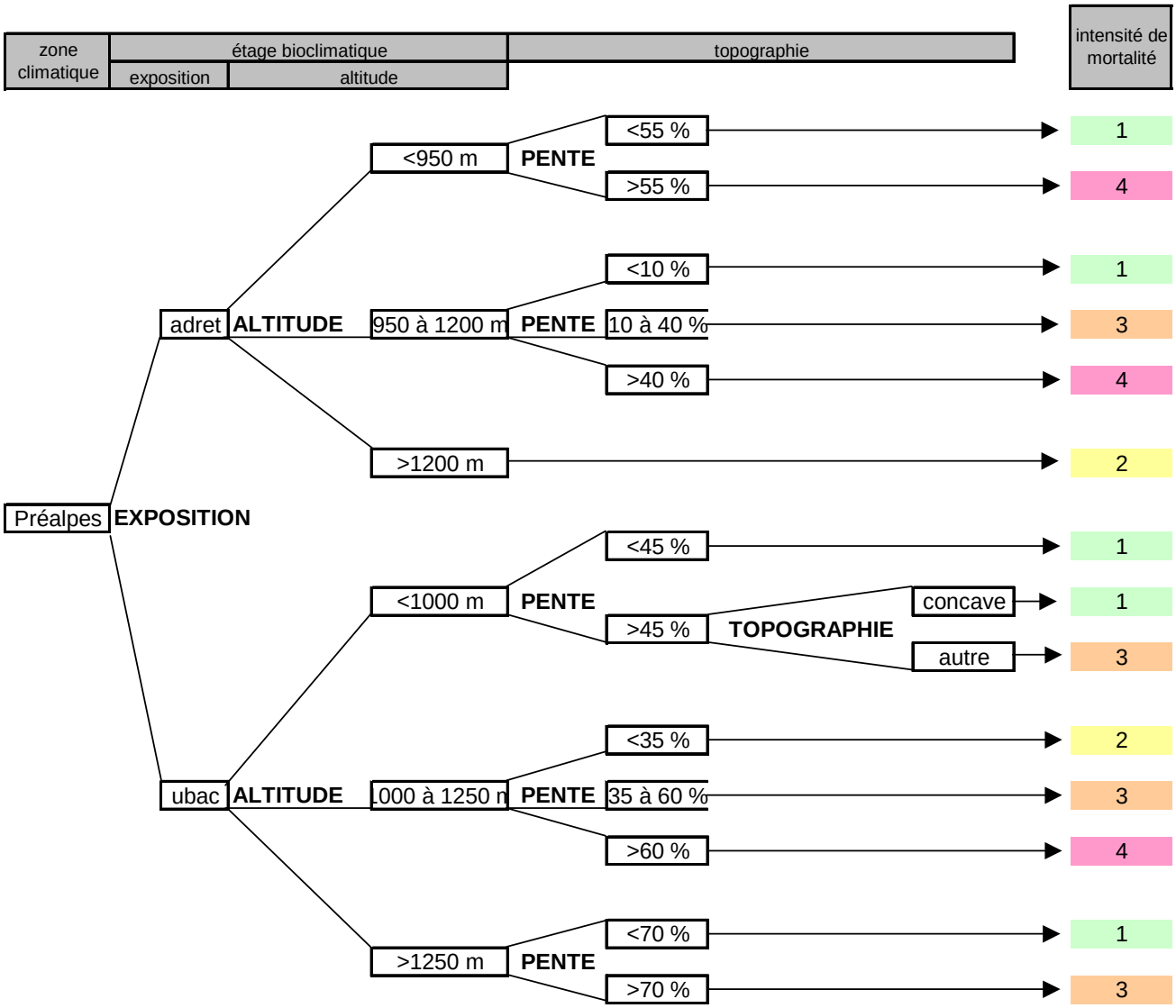
Cela permet de définir différentes intensités de mortalité, ici codées de 1 à 3.

Annexe 7 : Macro Visual Basic Excel permettant de déterminer l'intensité de mortalité à partir des données initiales selon le modèle pour le pin sylvestre.

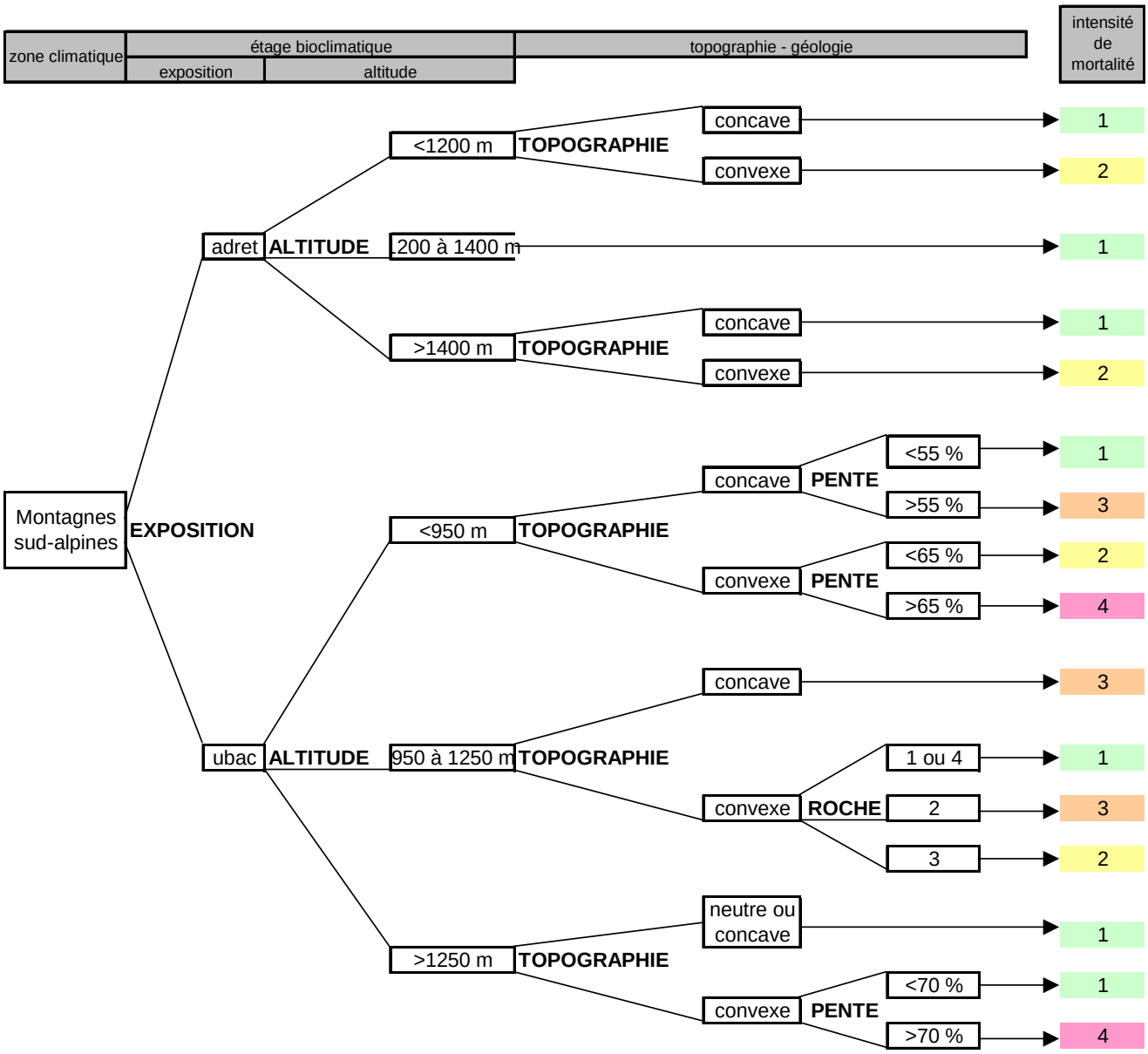
```
Sub modMORT()
' Macro enregistrée le 21/04/2010 par dl41079
' modèle de détermination de l'intensité de mortalité
Dim nbcol, nblig As Integer
Dim zp, ikr, alti, pente, courb, roche As Integer

Selection.CurrentRegion.Select
nbcol = Selection.Columns.Count
nblig = Selection.Rows.Count

For i = 1 To nbcol
Select Case Cells(1, i).Value
   Case "ZONEP"
   zp = i
   Case "IKR"
   ikr = i
   Case "ALTI"
   alti = i
   Case "PENTE"
   pente = i
   Case "COURB"
   courb = i
   Case "ROCHEN"
   roche = i
End Select
Next i

a = nbcol + 1
Cells(1, a).Value = "modMORT"

For k = 2 To nblig

   Select Case Cells(k, zp).Value
   Case 2 'préalpes
      Select Case Cells(k, ikr).Value
      Case Is > 0.95 'adret
         If Cells(k, alti).Value < 952 Then
            If Cells(k, pente).Value < 55 Then
            Cells(k, a).Value = 1
            Else
            Cells(k, a).Value = 4
            End If
         ElseIf Cells(k, alti).Value < 1210 Then
            If Cells(k, pente).Value < 9.4 Then
            Cells(k, a).Value = 1
            ElseIf Cells(k, pente).Value < 38 Then
            Cells(k, a).Value = 3
            Else
            Cells(k, a).Value = 4
            End If
         Else
            Cells(k, a).Value = 2
             End If
      Case Else 'ubac
         If Cells(k, alti).Value < 1000 Then
            If Cells(k, courb).Value > -0.0295 And Cells(k,
pente).Value > 43.98 Then
            Cells(k, a).Value = 3
            Else
            Cells(k, a).Value = 1
            End If
         ElseIf Cells(k, alti).Value < 1240 Then
            If Cells(k, pente).Value < 35 Then
            Cells(k, a).Value = 2
            ElseIf Cells(k, pente).Value > 58 Then
            Cells(k, a).Value = 4
            Else
            Cells(k, a).Value = 3
            End If
         Else
            If Cells(k, pente).Value > 70 Then
            Cells(k, a).Value = 3
            Else
            Cells(k, a).Value = 1
            End If
         End If
      End Select

   Case 3 'montagne
      Select Case Cells(k, ikr).Value
   Case Is > 0.95 'adret
         If Cells(k, alti).Value < 1200 Then
            If Cells(k, courb).Value < 0 Then
            Cells(k, a).Value = 1
            Else
            Cells(k, a).Value = 2
            End If
         ElseIf Cells(k, alti).Value < 1400 Then
            Cells(k, a).Value = 1
         Else
            If Cells(k, courb).Value < 0 Then
            Cells(k, a).Value = 1
            Else
            Cells(k, a).Value = 2
            End If
         End If
      Case Else 'ubac
         If Cells(k, alti).Value < 950 Then
            Select Case Cells(k, courb).Value
            Case Is < 0
               If Cells(k, pente).Value > 55 Then
               Cells(k, a).Value = 3
               Else
               Cells(k, a).Value = 1
               End If
            Case Else
               If Cells(k, pente).Value > 67 Then
               Cells(k, a).Value = 4
               Else
               Cells(k, a).Value = 2
               End If
            End Select
         ElseIf Cells(k, alti).Value < 1250 Then
            Select Case Cells(k, courb).Value
            Case Is < 0
               If Cells(k, pente).Value < 60.5 Then
               Cells(k, a).Value = 3
               Else
               Cells(k, a).Value = 3
               End If
            Case Else
               If Cells(k, courb).Value > 0 Then
                  Select Case Cells(k, roche).Value
                  Case 1, 4
                  Cells(k, a).Value = 1
                  Case 2
                  Cells(k, a).Value = 3
                  Case 3
                  Cells(k, a).Value = 2
                  End Select
               Else
                  Cells(k, a).Value = 3
               End If
            End Select
         Else
            If Cells(k, courb).Value < 0.2 Then
            Cells(k, a).Value = 1
            ElseIf Cells(k, pente).Value > 70 Then
            Cells(k, a).Value = 4
            Else
            Cells(k, a).Value = 1
            End If
         End If
      End Select
   Case Else
   End Select
Next k
End Sub
```

Annexe 8 : Clé du modèle d'explication de la mortalité du pin sylvestre – version simplifiée.

-Préalpes



-Montagnes sud-alpines



ROCHE	1	Calcaires siliceux ou dolomitiques
	2	Calcaires
	3	Marnes ou argiles
	4	Roches acides

Résumé

Ce mémoire porte sur les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné survenus dans les Alpes-Maritimes suite aux épisodes de sécheresse de 2003 à 2007. L'étude vise à identifier les conditions écologiques qui favorisent l'apparition du dépérissement et son intensité. Dans ce but, un modèle comportant plusieurs facteurs du milieu est établi pour le pin sylvestre selon l'approche écologique par échelles emboîtées. Il permet d'améliorer la compréhension du déterminisme des dépérissements et de caractériser les situations où ils pourraient survenir. Les limites du modèle tiennent principalement des données initiales, ainsi que de la démarche mise en œuvre.