Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen :

la Maturation Sylvigénétique des Pinèdes pionnières.

Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux

Rapport Final



Photo ONF

- Office National des Forêts

Service Départemental Vaucluse, et Groupes Techniques de Bedoin et Sault STIR Méditerranée

Direction Régionale PACA : - Cellule Régionale d'Appui Technique (Manosque)

- Cellule « Directive Habitat » (Aix-en-Provence)

- Institut National de la Recherche Agronomique

Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes - UR 629 (Avignon) (coord.) Unité Expérimentale AgroClim (UE 1116) (Avignon)

- Institut Méditerranéen d'Écologie et Paléoécologie

UMR CNRS 6116 - Université Aix-Marseille III

Équipe « Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes » - thème « Écologie du paysage »

Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen : la maturation sylvigénétique des pinèdes pionnières.

Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux

Rapport Final

Table des matières

Préambule

O Le Mont-Ventoux O Les Composantes de la Biodiversité	
O La Zone Géographique	
O Formations forestières - Types de Peuplements - Types de Gestion	
♦ Plan sommaire du rapport scientifique final	
	•••••••
1 ^{ère} Partie : Les 9 tâches du projet : méthodes mises en œuvre et résultats primaires	.6
Tâche 1: Carte de la dynamique du Hêtre, du Sapin et de la régénération des Pins	
1. Objectifs	
2. Présentation des types de peuplements rencontrés	
3. Méthodologie	
3.1. Première campagne de relevés	
3.2. Seconde campagne de relevés	
3.3. Troisième campagne de relevés	
1. Résultats	10
4.1. Dynamique des semis sous futaie de pin noir	10
4.1.1 Semis de hêtre	
4.1.2 Semis de pin noir	
4.1.3. Dynamique des feuillus divers	
4.2. Dynamique des semis sous futaie de pin à crochets	
4.2.2 Semis de pin à crochets	
4.2.3. Dynamique des feuillus divers	
4.3 Dynamique des semis sous futaie de pin sylvestre	
4.3.1. Semis de hêtre	
4.3.2 Semis de pin sylvestre	
4.3.3 Dynamique des feuillus divers	
4.4. Dynamique du sapin pectiné	
5. Discussion	
Essai de qualification des situations où la régénération semble avoir la meilleure dynamique en terme d'eff	ectifs
et de mélanges d'essences	20
Niveau de régénération naturelle des espèces en fonction de l'altitude	
6. Conclusion	23
Tâche 2: Harmonisation des Protocoles et Choix Définitif des Sites d'Étude	24
Objectif initial	24
Mode de choix des sites	24
Cohérence des protocoles	
	25

Variante « 1 », en versant Sud		
,		
Passé sylvicole		
Site dédié à l'évaluation des dégâts d'ex	ploitation sur la régénération	28
Tâche 3 : Description de la Structure des	s Peuplements	29
Objectif initial		
•	es de terrain. Méthodes d'analyse	
Peuplement adulte	o do tortuna moniodos d dindiyos	
·		
•)	
Semis échantillons		
· ·		
•	à 1,30 m]	
-	pier vert - Diamètre à 1,30 m]	
	ier - Longueur du houppier vert]	
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	lei - Longueur du nouppier vent j	
•		
_		
-		
_	gée de Pin noir et de Hêtree de hauteure	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	ation des projections de houppiers	
VARIANTE 1 bis, stade 3 : Régénér	ation de Hêtre très abondante, et quasi-absente pour le Pin noir	37
Répartition par catégorie de hau	teur	37
•	ation des projections de houppiers	
_	ngées de Sapin, Hêtre, et Pin sylvestre	
Répartition par stade et e	catégorie de hauteur	38
•	nterprétation et hypothèses	
	£	
	Érable à feuille d'obier, Alisier blanc, Chêne pubescent	
	écifique et complexité structurale	
·	antes au divers stades de la Variante 1	
-	ole des variantes	
Synthèse - Conclusions		49
Tâche 4: Dynamique des Peuplements	3	51
-	nis en place	
	sance	
	on	
_	ıl - Influence des coupes	
_	ur la croissance en hauteur de la régénération	
• •	uplements environnants	
	piononia orana manta	

Mortalité		57
Mortalités observées		57
Relation de mortalité pour les arbr	res adultes et les semis de hauteur >= 5 m	58
Relation de mortalité pour les sem	nis de hauteur comprise entre 0 et 30 cm	58
Relation de mortalité pour les sem	nis de hauteur comprise entre 30 cm et 5 m : seuil de croissance relative	58
Structure du modèle provisoire de dyn	namique	59
Relations constitutives du modèle)	59
Mode de fonctionnement du modè	ele	60
Conclusion		60
Tâche 5: Description des Stations fo		
	ologique des sites d'étude - Description des humus	61
Objectif et Méthode		61
Objectifs		61
Méthode pour l'acquisition des doi	nnées	61
Méthode d'analyse		61
Remarque sur l'opposition de vers	sants	61
Caractérisation écologique de chaque	site - Homogénéité intra-site	62
Comparaisons des sites		64
Tanha C. Culul mildiand and an annual and		
Tâche 6 : Suivi météorologique		
Objectif		
	mis en place	
	mesure	65
Mesures		67
Variables calculées		69
Résultats		69
	nnées météorologiques recueillies	
-	urnalières manquantes	
_	rées	
	nesure	
Température		
Précipitations		72
Rayonnement Bilan climatique		73
Conclusion		
	nter- peuplements	
Mise en garde	ner- peuplemens	
Humidité de l'air		
Risque de gel printanier		
Températures de l'air et du sol		76
Températures du sol		77
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	sous abri	
•	ar le couvert végétal	<i>79</i>
Synthèse - Conclusions		80
Bibliographie		81
Annexes		81
Tâche 7 : Étude de la Diversité Phyto	écologique	ΩΛ
-	ogique	
_	e forestière	
	néenne d'altitude	
	mis en place	
Méthodologie générale	Signato d'abandana	
 Inventaires 400m² avec coef. 	ficients d'abondance	85

Quadrats	87
Logiciels employés pour l'analyse des données	88
Résultats & discussions	88
Approche floristique (taxons)	88
Observations générales : beaucoup d'espèces peu fréquentes et/ou peu abondantes	
Commentaires sur chaque site	
Indices de diversité	
Indice de similitude de composition de Jaccard	
Organisation de la végétation	
□ Résultats généraux en présence-absence	
□ Importance des espèces peu abondantes (« rares au niveau de la placette »)	
□ Importance des espèces peu abordantes (« rares au niveau du massif »)	
□ Résultats en abondance	
Organisation générale	
Spectres biologiques	100
Les versants	100
Les stades du versant sud	100
Les stades du versant nord	
Indices de diversité basés sur les attributs vitaux	103
Approche écologique (SOPHY)	104
Synthèse - Conclusions	106
Bibliographie	106
Tânha O . Olmulationa	400
Tâche 8 : Simulations	108
Objectif	108
Méthodes mises en œuvre	108
Simulation rétrospective à des fins d'analyse	108
Simulations prospectives : Démarche adoptée	110
Objectifs des simulations	
Plate-forme de simulation CAPSIS	111
Connexion avec le Système d'Informations Géographiques de l'ONF	
Notion d'Unité d'Analyse - Informations d'entrée et Initialisation des Simulations	
Simulations prospectives : Structure de données et fonctionnement	
Structure de données du module « Ventoux » de CAPSIS 4 - Mode de spatialisation	
Fonctionnement de la simulation sur une UA seule (c'est-à-dire sur un peuplement unique, pris isolément)	
Fonctionnement de la simulation sur un ensemble d'UAs	
Simulations prospectives : Premières simulations	
Simulation des interventions sylvicoles	
Simulation de l'évolution d'un peuplement, pris isolément	116
Conclusions	118
	110
Tâche 9: Analyse conjointe - Synthèses.	
Présentation de l'action de recherche	
Objectif initial	
Méthodes envisagées pour l'Organisation des Informations	119
Méthodes d'Analyse envisagées	119
Résultats	119
Tâche supplémentaire : Synthèse cartographique et délimitation de la zone d'étude	120
Synthèse cartographique des typologies de peuplement et de station forestière	
- Aliminana nasira Biraksis dan makana Bana ana kambanasira at ana arminasi sasantasa sasantasa sasantasa masi	120
Délimitation de la zone d'étude	
Délimitation de la zone d'étude	120
Historique des reboisements et antécédents culturaux	120 121
 	120 121 121B

Carte synthétique des antécédents culturaux	121C
Carte synthétique des reboisements successifs	121C
2 ^{ème} Partie : Résultats élaborés. Approches transdisciplinaires. Perspectives pour la gestion forestière122	
D.1. Diagnostic : Stade actuel de la dynamique de régénération :	
influence des peuplements-sources et du bioclimat sous couvert	124
D.1.1. Niveau de régénération et proximité des peuplements sources	
Résultat obtenu pour le Hêtre	
Résultat obtenu pour le Sapin	
D.1.2. Niveau et croissance de la régénération et bioclimat sous couvert : des tendances à préciser	
D.2. Diagnostic: Diversité floristique et diversité structurale des peuplements actuels	
D.3. Diagnostic : Diversité floristique actuelle : influence des peuplements et de la gestion actuelle et passée	
D.3.1 Diversité floristique et Humus/Sol	
D.3.2. Diversité floristique et Bioclimat sous couvert	
D.3.3. Diversité floristique, Structure, Âge et Historique des peuplements	
P.1. Pronostic : Évolution des peuplements : tendances prévisibles selon les scénarios de gestion	
Commentaires	
P.2. Pronostic: Perspectives pour la gestion forestière	142
3 ^{ème} Partie: Perspectives méthodologiques et scientifiques144	
Perfectionnements nécessaires du modèle de dynamique forestière	145
Apport possible d'une approche fonctionnelle stricto sensu : bioclimat et écophysiologie	
Dispersion des graines et invasion	
La diversité faunistique	147
Conclusion148	
Annexes	
Impact de la remontée biologique du hêtre sur l'organisation de la biodiversité des communatés de Coléoptère massif du Mont Ventoux (Vaucluse) - Étude exploratoire [2000]	
Fiches synthétiques par site	n.p.

Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen :

la Maturation Sylvigénétique des Pinèdes pionnières.

Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux

Rapport Final

Juillet 2001

Préambule

Ce projet de recherche entre dans le cadre du Programme « Biodiversité et Gestion Forestière » mis en place en commun par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et le GIP ECOFOR.

Des conventions séparées ont été établies entre le GIP ECOFOR et les partenaires du projet : ONF, INRA, IMEP. La coordination du projet dans son ensemble est à la charge de l'INRA-URFM (Ph. Dreyfus).

- Office National des Forêts

Service Départemental Vaucluse, et Groupes Techniques de Bedoin et Sault STIR Méditerranée

Direction Régionale PACA : - Cellule Régionale d'Appui Technique (Manosque)

- Cellule « Directive Habitat » (Aix-en-Provence)

- Institut National de la Recherche Agronomique
Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes - UR 629 (Avignon) (coord.)
Unité Expérimentale AgroClim (UE 1116)¹ (Avignon)

- Institut Méditerranéen d'Écologie et Paléoécologie

UMR CNRS 6116 - Université Aix-Marseille III

Équipe « Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes » - thème « Écologie du paysage »

Les résultats des travaux menés depuis Juillet 1998 par l'ensemble des partenaires ont été présentés à Avignon les 25 (exposés) et 26 (visite de terrain) Juin 2001, journées auxquelles ont notamment participé des représentants (à divers titres) du GIP ECOFOR (J.C. Bergonzini, C. Gauberville, M. Gosselin).

Nous présentons ici ces résultats de manière plus complète et plus détaillée.

anciennement : Service Technique d'Étude des Facteurs Climatiques de l'Environnement - US 481

Introduction - Rappel du contexte, des objectifs et des situations forestières étudiées

O En région méditerranéenne, plus qu'ailleurs peut-être, la gestion forestière est amenée à tenir compte des fonctions multiples que les peuplements doivent assurer de manière durable.

Pour des raisons historiques, socio-économiques, et dans un contexte écologique à fortes contraintes, certains grands types de formations forestières ou pré-forestières montrent une évolution significative.

Dès lors, la connaissance de l'impact des interventions sylvicoles sur la biodiversité et du rôle de cette dernière dans la pérennité et dans l'équilibre des formations est une préoccupation majeure pour les décideurs et les acteurs de la gestion forestière, ainsi que pour la société dans son ensemble.

Notre projet a pour ambition de contribuer de manière significative à l'acquisition de cette connaissance.

O La restauration de peuplements forestiers dans l'arrière-pays méditerranéen a été réalisée avec succès par les générations passées. Après la reconstitution d'un sol et d'une ambiance forestière grâce à des essences pionnières - aux premiers rangs desquelles on trouve plusieurs espèces de Pins -, la forêt est entrée dans un processus lent de maturation sylvigénétique se traduisant, dans l'étage montagnard sub-méditerranéen, par l'apparition ou la réapparition d'essences telles que le Hêtre ou le Sapin.

Cette dynamique concourt au renforcement de l'état forestier. Mais ses conséquences en termes de biodiversité et les implications pour la gestion sont difficilement appréciables dans l'état actuel des connaissances.

O Le Mont-Ventoux a été, comme de nombreux autres sites montagneux de la région (Lure, Préalpes de Digne ...), un des hauts-lieux de la reforestation et de la lutte contre l'érosion, induite au siècle dernier par la surexploitation pastorale et forestière. Comme les autres territoires portant désormais des boisements importants de Pins, pionniers en avant-garde, il est maintenant le théâtre de l'évolution précitée.

Une Réserve de Biosphère MAB a été créée sur le Mont-Ventoux en septembre 1994. Les objectifs de notre projet s'accordent bien avec ceux de cette structure.

Le Mont-Ventoux est aussi le lieu d'opérations innovantes en matière d'aménagement et de gestion forestière, initiées et mises en œuvre par l'Office National des Forêts, à l'échelon local et régional. La Direction Régionale PACA de l'ONF y consacre des moyens importants, y compris en personnel permanent : Cellule Régionale d'Appui Technique (à Manosque), chargés de mission, etc.

Les scientifiques sont interrogés par les gestionnaires sur les orientations les plus appropriées.

O Notre projet concerne l'impact de la gestion forestière sur la biodiversité dans le contexte de la lente maturation sylvigénétique (« remontée biologique »), signalée par le retour du Hêtre, du Sapin pectiné (dans certaines situations) et des feuillus (Érable à feuilles d'obier ...) dans les peuplements de Pins (Pin noir, Pin à crochets, Pin sylvestre) de l'étage montagnard sub-méditerranéen du Mont-Ventoux ; cette évolution est le plus souvent considérée comme porteuse d'un enrichissement au plan de la biodiversité et comme étant favorable à une meilleure pérennité de la forêt ; mais il ne s'agit pas de certitudes et il convient d'en faire l'étude scientifique afin de déboucher sur des principes et des règles de gestion opérationnelle permettant d'accompagner cette évolution plus ou moins inéluctable.

O Les Composantes de la Biodiversité

La diversité des essences (principales ou secondaires) d'un peuplement forestier est déjà en elle-même une composante de la diversité globale ; il a été démontré dans de nombreux cas qu'elle influence la diversité de la faune et de la flore associées. Le cadre d'un tel projet ne permet évidemment pas de prendre en compte toutes les composantes de la biodiversité.

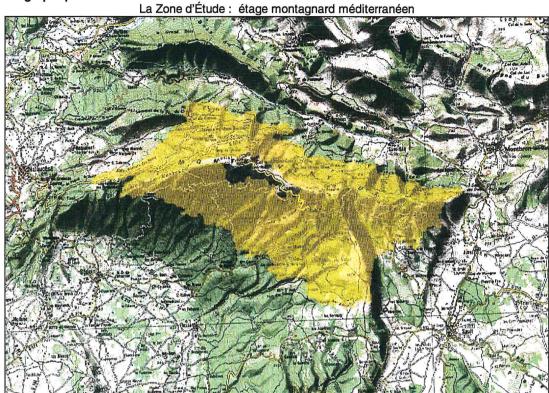
En plus du peuplement d'arbres, nous avons choisi de prendre en compte les végétaux supérieurs (phanérogames et ptéridophytes), placés à la base des chaînes trophiques ; leur étude est essentielle pour disposer des fondements nécessaires à la prise en compte des composantes animales dans une recherche à plus long terme. Cette étude est prise en charge par l'Institut Méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie (Université Aix-Marseille - CNRS).

O Le projet comporte un volet consacré à la **dynamique des structures**, et se démarque ainsi d'une approche uniquement descriptive et statique. Compte tenu de la durée courte du projet, cette prise en compte de la dynamique s'appuie essentiellement sur une approche synchronique.

En combinant description statique et simulation dynamique, nous nous fixons comme objectif d'acquérir les connaissances scientifiques permettant en fin de projet de prévoir avec une précision raisonnable l'évolution des structures de peuplement et de donner une esquisse de la biodiversité future (pour les composantes prises en compte) à un horizon de 15 ans qui correspond à la durée de validité des plans d'aménagements, et qui est donc le pas de temps de la gestion.

Soulignons enfin qu'une très large partie du périmètre d'étude se situe en forêt domaniale, ce qui est propice à une pérennité des sites d'étude et autorise une perspective à plus long terme, au-delà du présent projet.

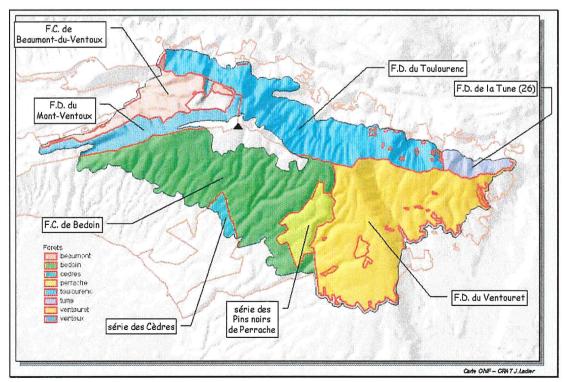
O La Zone Géographique



Carte ONF / CRAT J. Ladie

- Il s'agit, sur le Mont-Ventoux, d'un secteur couvrant une partie des <u>Forêts Domaniales du Mont-Ventoux, du Ventouret, du Toulourenc, de la Tune</u> et des <u>Forêts Communales de Bedoin et de Beaumont-du-Ventoux</u>. L'enveloppe de la zone d'étude couvre une superficie de près de 5 000 ha.

Les 6 Forêts concernées



- <u>Les Habitats pris en compte</u>: Hêtraie méridionale principalement; Hêtraie à influence médio-européenne; faciès à Sapin pectiné; pelouses calcaires mésophiles et xérophiles. Tranche altitudinale: 1000-1800 m.

- Aire de représentativité :

Les situations étudiées couvrent une vaste surface dans l'arrière-pays méditerranéen. On peut estimer qu'elles sont représentées sur une superficie dépassant 50 000 ha en région PACA pour l'évolution étudiée. Les résultats devraient être assez aisément transposables à d'autres sites dans ce vaste domaine.

O Formations forestières - Types de Peuplements - Types de Gestion

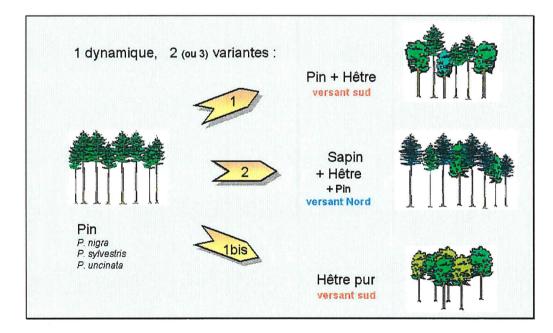
Les peuplements concernés par la maturation sylvigénétique sont principalement des peuplements de **Pins** (Pin noir, Pin à crochets, Pin sylvestre), purs et d'origine artificielle, qui évoluent vers des mélanges par l'arrivée du **Hêtre** en versant Sud - **variante 1** de la dynamique de maturation -, du **Hêtre** et du **Sapin pectiné** en versant Nord, - **variante 2** de la dynamique de maturation. Au stade « ultime », lorsque le sylviculteur a coupé les derniers pins du peuplement planté, il subsiste une régénération puis un peuplement adulte mélangé : Hêtre et Pin en versant Sud, Sapin, Hêtre et Pin minoritaire en versant Nord.

Pour un versant donné, la dynamique ne semble guère influencée, à première vue, par l'espèce de Pin constituant le peuplement artificiel en cours de colonisation. Néanmoins, par précaution, nous avons choisi d'étudier la dynamique dans des peuplements de Pin d'une seule espèce par versant ; le choix des sites nous a ainsi conduit à retenir le Pin noir en versant Sud (variantes 1 et 1 bis de la dynamique) et le Pin sylvestre en versant Nord (variante 2).

En versant Sud, la position altitudinale semble jouer un rôle particulier quant à la dynamique des Pins :

- en situation altitudinale intermédiaire dans la zone d'étude, il semble que ni le Pin noir, ni le Pin à crochets ne se régénèrent; installés artificiellement, ils ne seront probablement pas replantés, dans un contexte où le Hêtre est dans son optimum; nous avons ainsi distingué une variante 1 bis, qui diffère de la variante 1 par l'absence du Pin noir dans la régénération, qui est donc constituée uniquement de Hêtre (+ semis d'essences disséminées).
- plus bas (Pin noir), et plus haut (Pin à crochets), les Pins ont au contraire une dynamique de régénération importante, ce qui peut permettre leur maintien face au Hêtre ou avec le Hêtre, selon les situations stationnelles (« distance » de chacune des espèces en compétition à son optimum écologique) et selon la gestion forestière pratiquée.

En versant Nord, la régénération de l'une ou l'autre des espèces de Pins est presque toujours possible. Le Sapin pectiné accompagne le Hêtre.



Les variantes de la dynamique étudiée

La gestion forestière tient compte de ces éléments, ainsi que des conditions stationnelles et topographiques (pente, exposition), et présente donc une grande variété de modalités, depuis la non-intervention jusqu'au maintien de peuplements de Pins purs ou prépondérants ou de Hêtre pur, en passant par l'accompagnement du retour du Hêtre dans de nombreux cas.

Pour comprendre son impact sur la structure du peuplement et sur la biodiversité, il est nécessaire de décrire précisément et de manière quantifiée la gestion actuelle et les interventions récentes ainsi que - dans la mesure du possible - la gestion passée.

Plan sommaire du rapport scientifique final

La suite de ce document présente :

(1ère partie) le détail des méthodes mises en œuvre et des résultats primaires obtenus pour chacune des tâches du projet :

Tâche 1. Carte de la dynamique du Hêtre, du Sapin et de la régénération des Pins	7
Tâche 2. Harmonisation des Protocoles et Choix Définitif des Sites d'Étude	24
Tâche 3. Description de la Structure des Peuplements	29
Tâche 4. Dynamique des Peuplements	51
Tâche 5. Description des Stations forestières	61
Tâche 6. Suivi météorologique	65
Tâche 7. Étude de la Diversité Phytoécologique	84
Tâche 8. Simulations	108
Tâche 9. Analyse conjointe - Synthèses	119

Une **tâche supplémentaire** (p. 120), qui n'avait pas été envisagée à l'origine est également présentée ; elle comporte deux volets :

- la synthèse cartographique des typologies de peuplement et de station forestière, réalisée pour l'ensemble des forêts concernées, permettant ainsi une vision plus globale de la zone étudiée ;
- l'examen des archives (de l'ONF et départementales) pour la recherche d'information sur les usages antérieurs aux reboisements ; cette recherche a débouché sur une carte partielle des antécédents culturaux, dont l'influence sur la diversité floristique s'est confirmée en cours de projet.

(2ème partie, p. 122) les résultats élaborés issus des approches transdisciplinaires et de la complémentarité entre les tâches ; sont présentées les **avancées les plus probantes** issues de la conjonction des informations et des savoir-faire, ainsi que les perspectives pour la gestion forestière.

(3^{ème} partie, p.144) une discussion critique sur la démarche utilisée et les résultats obtenus, et la présentation des **perspectives** et de la **conclusion.**

1^{ère} Partie

Les 9 tâches du projet :

méthodes mises en œuvre

et

résultats primaires

Tâche 1 : Carte de la dynamique du Hêtre, du Sapin et de la régénération des Pins ONF (STIR, SD Vaucluse, CRAT) + INRA

Service exécutant : ONF (STIR Méditerranée + SD Vaucluse)

Responsable: Ph. Bourdenet

La réalisation est à la charge de l'ONF. La participation de l'INRA consiste à :

- aider à préciser les objectifs, c'est-à-dire les questions auxquelles cette cartographie doit permettre de répondre ;
- participer à la mise au point du protocole.

1. Objectifs

Cette tâche vise à acquérir un quatrième élément cartographique permettant le choix définitif des sites à étudier, en complément de la carte des peuplements forestiers, de celle des habitats naturels et de celle des stations forestières,

Elle permet également d'appréhender l'ensemble des situations rencontrées en matière de dynamique des essences et de replacer les sites retenus dans la dynamique globale du hêtre, des pins pionniers (pin noir, pin sylvestre et pin à crochets) et du sapin en versant Nord.

Elle se propose ensuite de préciser les situations où la régénération naturelle des pins est actuellement absente ou semble difficile à venir et où le renouvellement des peuplements ne semble être possible que grâce aux feuillus (le hêtre essentiellement, l'érable à feuille d'obier, l'alisier blanc et le chêne pubescent dans une moindre mesure).

Elle doit permettre enfin de mieux qualifier l'état actuel des peuplements en fonction de leurs potentialités d'évolution sans intervention ou sous l'effet de sylvicultures : celle actuellement pratiquée (ou programmée) et une sylviculture alternative à préciser.

2. Présentation des types de peuplements rencontrés

Les types de peuplements sont composés essentiellement de reboisements de pins d'origine entièrement artificielle réalisés à la fin du XIXème et début du XXème siècle .

La répartition des peuplements est la suivante :

- futaie de pin noir	1 499 ha
- futaie de pin à crochets	883 ha
- futaie de pin sylvestre	346 ha
- futaie de cèdre	144 ha
- futaie de hêtre	465 ha
- taillis de hêtre	457 ha
- taillis de chêne pubescent	344 ha
- hêtraie-sapinière	137 ha
- futaie de pins mélangés	100 ha

Total 4 375 ha

Le hêtre correspond à l'écotype local qui a pu se maintenir malgré les défrichements et le sur-pâturage d'avant 1860, sur des zones refuges (talwegs, crêtes rocheuses, etc.).

3. Méthodologie

Le temps imparti à la réalisation de la phase de terrain ne permettant évidemment pas d'effectuer une description exhaustive de la dynamique de la régénération naturelle des essences forestières présentes, il convenait d'utiliser une méthode d'échantillonnage à même de fournir une photographie globale mais précise localement, de la dynamique de la végétation forestière par grande famille de type de peuplements.

3.1. Première campagne de relevés

Elle a été réalisée sous forme d'échantillonnage systématique basé sur le réseau Lambert de la carte IGN au 1/25 000, agrandie au 1/10 000. Elle a porté sur les forêts Domaniale du Ventouret et Communale de Bedoin, sur une première zone test de 420 hectares (taux d'échantillonnage : 1 placette pour 4 hectares).

On souhaitait disposer pour chaque placette:

- ⇒ de données moyennes dendrométriques minimales permettant de qualifier le peuplement principal (densité, surface terrière, âge, hauteur dominante) ;
- ⇒ des caractéristiques moyennes de la régénération naturelle des espèces forestières arborées.

On a donc effectué les relevés sur des placettes de 400 m², les mesures étant individualisées par cellule de 100 m² afin de caractériser l'hétérogénéité locale.

Pour la régénération naturelle on a noté :

- ⇒ les effectifs par classe de hauteur pour le hêtre, les pins, le sapin et le cèdre (classes : 0-30 cm ; 30-130 cm ; 130-300 cm ; > 300 cm);
- ⇒ les effectifs globaux, sans distinction de classe de hauteur, par cellule des feuillus divers (érable à feuille d'obier, alisier blanc, chênes pubescent et vert, sorbier, etc.).

3.2. Seconde campagne de relevés

Il s'est agit en fait d'une phase exploratoire complémentaire destinée à préciser le meilleur type géométrique pour les placettes, en associant n cellules de 100 m², et offrant le meilleur rapport coût/efficacité: on a donc implanté sur 11 sites représentatifs des principaux peuplements rencontrés, des placettes de 2 500 m², regroupant des cellules de 100 m², numérotées de 1 à 25 selon un schéma constant par rapport au Nord.

On a testé les performances, en matière d'estimation de 2 descripteurs de la régénération de hêtre et de pin noir, de 29 dispositifs géométriques possibles à partir de ce maillage de 25 cellules composés chacun de une à neuf cellules de 100 m²).

Les 2 descripteurs retenus étaient :

- Descripteur global = N1 + 2*N2 +3*N3 + 4*N4
- Nombre de recrutés = N3 + N4

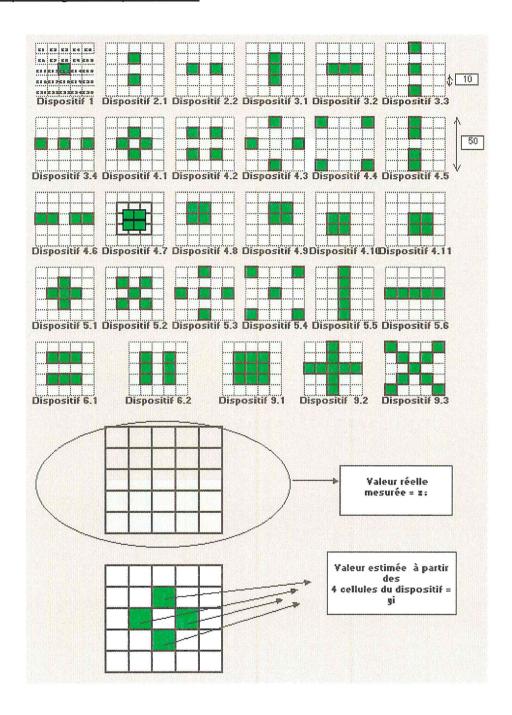
N1: nombre de semis 0 < h < 30 cm

N2: nombre de semis 30 cm < h < 130 cm

N1: nombre de semis 130cm < h < 300 cm

N1: nombre de semis h > 300 cm

Les 29 dispositifs géométriques testés :



3.3. Troisième campagne de relevés

À l'issue de la seconde campagne, il a pu être établi que le meilleur type de placette était un type en croix à 4 cellules de 100 m² (dispositif 4.1), pour obtenir une image fidèle de la régénération du hêtre, un peu moins performant pour rendre compte de la répartition spatiale des semis de pin noir entre cellules de 100 m². Compte tenu du temps nécessaire pour jalonner les placettes, plus important que la description elle-même par cellule, on a finalement retenu un type en croix à 5 cellules (dispositif 5.1) de 100 m² décrites.

Cette dernière campagne a permis d'étudier 97 placettes supplémentaires réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, en prospectant davantage un gradient d'altitude.

Nota Bene:

pour la localisation des 214 placettes, se référer à la *Carte des sites et placettes*, au chapitre consacré à la Tâche 2, page 25 (croix vertes, légendées « relevés de régénération »).

4. Résultats

L'analyse globale des 214 placettes décrites permet de donner les résultats généraux synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Types de	Nombre	Nombre	de semis de	e hêtre /ha	Nombre de	semis de feu /ha	illus divers	Nombre de	semis de	sapin ped	tiné / ha
peuplements décrits	de placettes	moyenn e	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum	Nb placettes	moyenn e	minimu m	maximum
Futale de Pin Noir	88	735	0	6375	1882	20	9680	3	297	4	868
Futale de Pin à crochets	58	705	0	6925	690	0	7100	21	305	4	3440
Futale de Pin sylvestre	26	2457	40	24425	2063	240	7525	7	792	4	3940
Futale de Cèdre	2	160	0	320	2110	140	4080	0	-	-	-
Futale de Hêtre	8	5150	375	11625	1866	0	11625	2 (taillis)	2650	1380	3920
Futale de Sapin	3	273	80	460	1013	580	1680	3	8980	1840	12780

L'analyse des 214 placettes a été réalisée par ACP successives, sur l'ensemble des placettes, puis seulement sur les placettes avec peuplements résineux, sur les placettes avec peuplements de pin noir, sur les placettes avec peuplements de pin sylvestre, sur les placettes avec peuplements de pin à crochets. Pour chaque niveau, on a réalisé l'analyse pour les 22 variables écologiques et dendrométriques, puis en se limitant aux 7 variables dendrométriques.

L'étude a porté sur les semis de hêtre, de pin (noir, sylvestre, à crochets), de sapin et de feuillus divers. On a cherché les liaisons éventuelles entre les variables :

Nbtot : (nombre total de semis de toutes classes de hauteur)

Nbrecr: (nombre de semis de plus de 1,30 m de hauteur) sauf pour les feuillus divers

et les variables écologiques du milieu ou dendrométriques du peuplement principal.

Les principales conclusions sont les suivantes :

Ensemble des placettes

Si on prend en compte l'ensemble des placettes sauf celles relatives aux taillis et futaies de hêtre, soit 203 placettes, on met en évidence :

- ⇒ La corrélation positive entre Nbtot, Nbrecr, pour le hêtre et la densité de hêtres adultes dans le peuplement principal, principaux contributeurs à la régénération de l'espèce "sur place".
- ⇒ La corrélation entre Nbtot, Nbrecr, pour le hêtre et la distance du peuplement de hêtre le plus proche dans lequel se trouvent les contributeurs secondaires à la régénération de l'espèce "sur place".

En revanche, aucune tendance nette n'apparaît pour les autres catégories de semis, résineux et feuillus divers.

4.1. Dynamique des semis sous futaie de pin noir

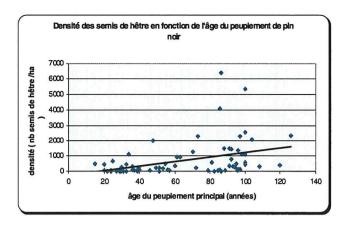
4.1.1 Semis de hêtre

- Influence de l'âge du peuplement adulte

Le nombre total de semis de hêtre est corrélé positivement avec l'âge du peuplement de pin noir.

Il apparaît une tendance assez marquée de l'augmentation de la présence du hêtre à l'état de semis dans les peuplements matures de pin noir : c'est à partir de 60 ans environ que les effectifs de semis de hêtre augmentent au-delà de 2 000 unités par hectare.

Le graphique T1.1 ci-dessous illustre la répartition du nombre de semis total de hêtre :



Graphique N° T1.1

- Influence de la surface terrière du peuplement adulte

À l'analyse, aucune corrélation ne s'exprime entre la présence du hêtre à l'état de semis (total ou recrutés) et la surface terrière du peuplement adulte de pin noir.

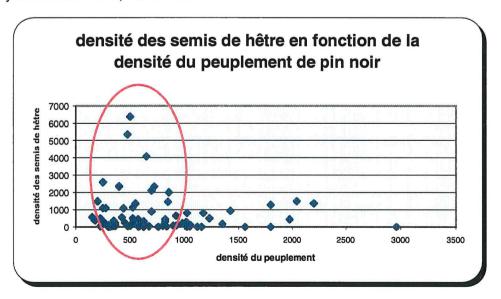
Il semble toutefois que les effectifs de semis de hêtre sont maximaux (au-delà de 2000/ha) dans les peuplements de pin noir à matériel sur pied modéré (dont la surface terrière est comprise entre 15 à 30 m²/ha), il s'agit de peuplements âgés ayant fait l'objet de coupes d'éclaircies ou de coupes d'ensemencement, dans lesquels les conditions de survie et de croissance des semis de hêtre sont meilleures qu'en peuplement trop riche.

- Influence de la densité du peuplement adulte

Il a été mis en évidence une corrélation négative entre la densité totale des semis de hêtre et la densité du peuplement de pin noir, le plus faible niveau de régénération du hêtre s'observe en effet dans les peuplements les plus jeunes ou ceux peu ou pas éclaircis.

Le graphique N° T1.2 montre que les densités maximales de semis de hêtre s'observent dans les peuplements de pin noir dont la densité est comprise entre 150 et 800 tiges/ha, c'est-à-dire ceux ayant fait l'objet de 2 ou 3 passages en coupe d'éclaircie.

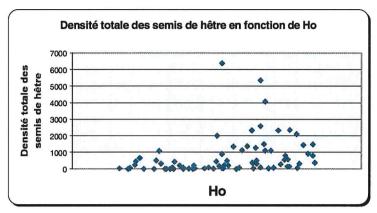
Trois peuplements font exception avec des densités du peuplement principal voisines de 2000/ha, mais dans lesquels la dynamique du hêtre est forte : il s'agit de peuplements assez ou très proches des sources de faînes, la distance du peuplement de hêtre le plus proche y est en effet de 29 m, 108 m et 133 m.



Graphique Nº T1.2

- Influence de la hauteur dominante (notée H₀)du peuplement principal

Une corrélation positive, et inattendue, a été mise en évidence entre H_0 du peuplement principal de pin noir et Nbtot, Nbrecr, de hêtre : elle pourrait être l'expression d'un bilan radiatif favorable ... ou simplement une autre illustration de la relation à l'âge du peuplement de pin noir (graphique T1.1), la hauteur dominante étant bien corrélée à l'âge pour cet ensemble de placettes.



Graphique Nº T1.3

- Influence de la distance du peuplement de hêtre le plus proche

L'influence directe de ce facteur n'a pas été mise en évidence par l'analyse.

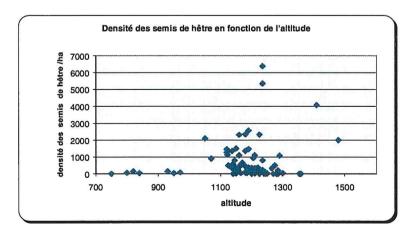
Toutefois, les placettes semblent se répartir en 2 grandes masses :

- ⇒ l'une regroupant des peuplements à fort potentiel de régénération de hêtre, estimé par le nombre de semis de 0 à 0,30m de hauteur, dont la distance au peuplement de hêtre le plus proche est plutôt faible (moins de 300 m).
- ⇒ l'autre regroupant des peuplements à faible potentiel de régénération de hêtre, et de plus éloignés des peuplements de hêtre.

L'action favorable de ce facteur était attendue : les peuplements de hêtre proches participent de façon prépondérante à l'ensemencement des pineraies noires voisines. Cette proximité constitue une condition nécessaire mais cependant non suffisante pour la venue des semis de hêtre.

- Influence de l'altitude

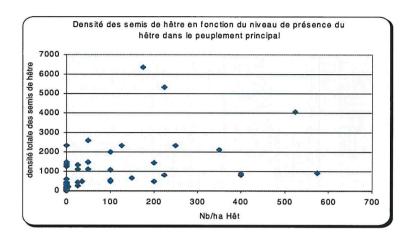
Le graphique N° T1.4 ci-dessous montre que la dynamique d'installation du hêtre s'exprime véritablement à partir de 1000 m environ, ce qui correspond de façon attendue à la répartition actuelle de l'essence sur le massif :



Graphique Nº T1.4

- Influence de la densité/ha en hêtre dans le peuplement principal

Il existe une corrélation positive entre le niveau de présence du hêtre dans le peuplement principal et les effectifs de semis de hêtre(Nbtot, Nbrecr) : on observe une tendance nette d'augmentation de la régénération de hêtre avec l'augmentation de la présence du hêtre dans le peuplement principal : la contribution des semenciers locaux est probablement plus forte que celle des peuplements voisins.



Graphique N° T1.5

4.1.2 Semis de pin noir

- Influence de l'âge du peuplement adulte

L'analyse par ACP ne fournit pas de réponse nette.

Toutefois, on observe comme pour le hêtre, des niveaux de présence de semis de pin plus importants dans les peuplements matures, à partir de 70-80 ans.

- Influence de la surface terrière du peuplement adulte

Le test de Khi² confirme l'effet négatif, sur les effectifs de semis de pin noir, de valeurs élevées de surface terrière : ceci est vrai pour le nombre total de semis mais aussi et surtout pour les "recrutés" (semis de plus de 1,30 m).

De façon plus marquée encore que pour le hêtre, les effectifs maximum de semis de pin noir s'observent dans les pineraies portant un matériel sur pied modéré, c'est-à-dire entre 15 et 35 m²/ha, ce qui confirme les observations faites en gestion forestière pour la mise en régénération des peuplements de pin noir, cette espèce comme la plupart des pins supportant mal un couvert prolongé après son apparition.

- Influence de la densité du peuplement adulte

Le test de Khi² met en évidence l'effet négatif des fortes densités du peuplement principal de pin noir sur les effectifs totaux de semis de cette espèce sous lui-même mais pas sur ceux des semis "recrutés".

Comme pour le hêtre, on observe que les semis de pin noir apparaissent de façon importante, c'est-à-dire plus de 1 000 semis/ha, dans les peuplements de pin noir dont la densité est inférieure à 700 - 800 tiges/ha environ, les conditions d'éclairement devenant favorables à l'installation des semis de pin sans que cette condition ne soit suffisante. Cette observation confirme le tempérament héliophile du pin dès le jeune âge.

- Cas où la régénération du pin noir est difficile ou impossible, en altitude

Des études conduites par L'INRA (Turrel 1979) ont mis en évidence dans les Alpes de Haute Provence l'existence d'un seuil vers 1 200 – 1 250 m à partir duquel la régénération naturelle du pin noir devient très difficile ou même impossible. L'analyse par ACP n'a pas pu le confirmer.

Toutefois, si on examine le niveau de régénération en pin noir dans les 15 placettes les plus basses (entre 750 et 1140 m) et les 15 placettes les plus hautes en altitude (entre 1245 et 1480 m), on peut observer les chiffres suivants :

	Nbtot PNA	Nbrecr PNA
Les 15 plus basses (altitude moyenne : 996m)	719	226
Les 15 plus hautes (altitude moyenne : 1303 m)	321	70

On retrouve donc apparemment une plus grande difficulté à la régénération du Pin noir sous lui-même aux altitudes les plus élevées où celui-ci a été installé. Ce constat est surtout marqué pour les recrutés.

La régénération du pin noir sous lui-même semble davantage conditionnée par les caractéristiques du peuplement principal de pin, notamment son degré d'évolution (peuplements matures les plus favorables, souvent également les plus "ouverts" par les coupes). Il n'est pas confirmé, sur le site du Ventoux, que le facteur altitude ait un rôle limitant pour la régénération du pin noir, principalement parce que les reboisements effectués l'ont été dans la zone "optimale" ou reconnue comme telle, c'est-à-dire à des altitudes comprises entre 1 050 m et 1 300 m (altitude moyenne : 1 173 m), les 4 peuplements faisant partie de l'échantillon dont l'altitude est comprise entre 1 350 et 1 480 m sont des peuplements jeunes, de moins de 50 ans, encore peu ou pas ouverts par les coupes, dans lesquels le niveau de régénération naturelle du pin est encore faible.

4.1.3. Dynamique des feuillus divers

On note globalement une dynamique assez forte des feuillus autres que le hêtre, c'est-à-dire l'alisier blanc, l'érable à feuilles d'obier, et dans une moindre mesure les chênes.

Les moyennes et médianes d'effectifs observés sur les 75 placettes à pin noir sont les suivantes (toutes classes de hauteur confondues) :

Espèces	Moyenne/ha	Médiane/ha
p.m : Hêtre	735	325
Érable à feuille d'obier	748	150
Sorbiers dom. et des oisel.	1	1
Alisier blanc	779	178
Chênes	354	123
Total feuillus divers	1882	940

Il apparaît donc que les feuillus divers ont un rôle à jouer dans la maturation sylvigénétique des pinèdes à pin noir car leur potentiel d'expansion est fort.

Toutefois, l'analyse n'a pas permis de mettre en évidence la ou les variables dendrométriques du peuplement dominant expliquant le niveau total de présence des feuillus divers.

Par ailleurs, les relevés ont privilégié l'étude de la régénération du hêtre et des pins, en distinguant les effectifs par classe de hauteur, ce qui n'a pas été fait pour les feuillus divers, il n'est donc pas possible d'obtenir des indications ou tendances concernant les facteurs conditionnant leur survie et leur croissance.

Des dispositifs expérimentaux spécifiques seront nécessaires pour chercher à apporter des réponses à cette question.

4.2. Dynamique des semis sous futaie de pin à crochets

Les peuplements de pins à crochets occupent une frange altitudinale supérieure à celle du pin noir (altitude moyenne : 1 389 m contre 1 173 m pour le pin noir) et constituent souvent les derniers peuplements forestiers de la "zone de combat" en altitude haute qu'ils colonisent avec le genévrier rampant au détriment des milieux ouverts sommitaux.

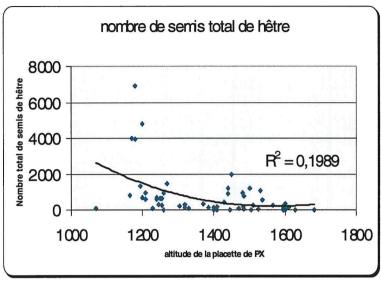
4.2.1 Semis de hêtre

- Influence de l'altitude

L'analyse a mis en évidence une corrélation négative entre l'altitude et les variables Nbtot, Nbrecr, de hêtre : en partie supérieure du massif du Ventoux, la dynamique du hêtre marque le pas, probablement davantage pour des raisons édaphiques

(il s'agit de zones d'éboulis souvent remaniés et à fort dessèchement estival) offrant des conditions peu propices au hêtre et davantage au pin à crochets.

Le graphique T1.6 ci-dessous montre la répartition du nuage de points.



Graphique N° T1. 6

- Influence de l'âge du peuplement adulte

Contrairement à ce qu'on observe pour le pin noir, il n'apparaît pas de liaison nette entre la présence du hêtre à l'état de semis dans les peuplements de pin à crochets et l'âge de ceux-ci.

- Influence de la surface terrière du peuplement adulte

Il n'a pas été mis en évidence de relation entre la présence du hêtre à l'état de semis dans les peuplements de pin à crochets et la surface terrière de ceux-ci.

- Influence de la densité du peuplement adulte

À l'inverse du pin noir, on constate que la dynamique du hêtre n'est pas affectée par la densité du peuplement adulte de pin à crochets que ce soit pour le nombre total de semis de hêtre ou pour nombre total de semis de hêtre recrutés.

- Influence de la distance du peuplement de hêtre le plus proche

Comme dans les peuplements de pin noir, l'analyse met en évidence la corrélation positive entre cette variable et Nbtot et Nbrecr de hêtre.

Comme dans le cas des peuplements de pin noir, ce facteur, dont l'action était *a priori* prévisible, semble agir comme un facteur favorable, les peuplements de hêtre proches participant de façon prépondérante à l'ensemencement des pineraies à crochets voisines. La proximité d'un hêtraie n'est toutefois pas une condition suffisante pour la venue des semis de hêtre.

- Influence de la densité/ha en hêtre dans le peuplement principal

Comme pour le facteur précédent, l'analyse met en évidence la corrélation positive entre cette variable et Nbtot Nbrecr de hêtre, avec une contribution des semenciers locaux plus forte que celle du peuplement constitué de hêtre le plus proche.

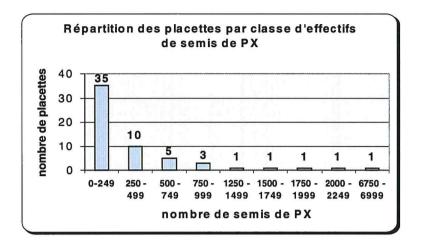
4.2.2 Semis de pin à crochets

- Influence des caractéristiques dendrométriques du peuplement principal

Ni l'âge, ni la surface terrière, ni la densité du peuplement de pin à crochets ne semblent conditionner le niveau de présence de la régénération naturelle de pin à crochets, à l'inverse de ce qu'on observait pour le pin noir.

Si l'on examine la dynamique globale de régénération du pin à crochets sous lui-même, on observe que sa régénération n'est pas très abondante sous peuplement alors que son tempérament pionnier lui permet de conquérir de nouveaux territoires vers l'amont au détriment des pelouses d'altitude grâce - semble-t-il - à l'appui du genévrier dont il exploiterait l'abri pour s'installer.

Le graphique N° T1.7 ci-dessous présente la répartition des placettes en fonction du niveau de régénération du pin à crochets :



Graphique Nº T1.7

On constate que dans 78 % des cas (en supposant que les placettes représentent fidèlement l'ensemble des peuplements), le nombre total de semis de pin à crochets est inférieur à 500 par hectare ; ce pourcentage reste le même pour les peuplements de plus de 80 ans et ceci pour toutes les densités rencontrées, la dynamique des pins se révélant peu influencée par la sylviculture.

4.2.3. Dynamique des feuillus divers

Sous les peuplements de pin à crochets, la dynamique des feuillus divers (= autres que le hêtre) s'exprime de façon moins abondante que sous les peuplements de pin noir, alors que celle du hêtre reste à un niveau comparable.

Les moyennes et médianes d'effectifs observés sur les 58 placettes à pin à crochets sont les suivantes (toutes classes de hauteur confondues) :

Espèces	Moyenne/ha	Médiane/ha
p.m : Hêtre	728	268
Érable à feuille d'obier	268	14
Sorbiers dom. et des oisel.	3	0
Alisier blanc	268	68
Chênes	122	0
Total feuillus divers	661	200

4.3 Dynamique des semis sous futaie de pin sylvestre

4.3.1. Semis de hêtre

Globalement, la régénération du hêtre sous pin sylvestre est très abondante : sur les 29 placettes, la moyenne du Nbtot de semis de hêtre est de 2 301/ha et la médiane de 900/ha.

- Influence des caractéristiques dendrométriques du peuplement principal

Ni l'âge, ni la surface terrière, ni la densité du peuplement de pin à crochets ne semblent conditionner le niveau de présence de la régénération naturelle du hêtre, à l'inverse de ce qu'on observait pour le pin noir.

- Influence de la localisation des semenciers

À l'analyse, la distance du peuplement de hêtre le plus proche ne semble pas avoir d'influence sur le niveau quantitatif des semis de hêtre. Seule la densité de hêtre dans le peuplement principal est corrélée positivement avec Nbtot Nbrecr de semis de hêtre.

4.3.2 Semis de pin sylvestre

Globalement, la régénération du pin sylvestre sous lui-même n'est pas très abondante : Sur les 29 placettes, la moyenne du Nbtot de semis de pin sylvestre est de **246/ha**, la médiane de **60/ha**, ce qui traduit la difficulté de cette essence à supporter la concurrence du hêtre et du sapin comme nous le verrons plus loin.

- Influence des caractéristiques dendrométriques du peuplement principal

L'analyse ne met en évidence aucune corrélation entre l'une des variables (âge, densité, surface terrière) du peuplement principal et le niveau quantitatif des semis de pin sylvestre en ce qui concerne le nombre total de semis à l'hectare et le nombre de "recrutés".

L'altitude ne semble pas davantage constituer un facteur limitant à la régénération naturelle du pin sylvestre sous lui-même.

4.3.3 Dynamique des feuillus divers

Sous les peuplements de pin sylvestre, la dynamique des feuillus divers autres que le hêtre s'exprime de façon moins abondante que sous les peuplements de pin noir, alors que celle du hêtre reste à un niveau comparable.

Les moyennes et médianes d'effectifs observés sur les 29 placettes à pin sylvestre sont les suivantes (toutes classes de hauteur confondues) :

Espèces	Moyenne/ha	Médiane/ha
p.m : Hêtre	2301	900
Érable à feuille d'obier	481	100
Sorbiers dom. et des oisel.	2	0
Alisier blanc	749	340
Chênes	456	250
Total feuillus divers	1689	1300

4.4. Dynamique du sapin pectiné

Elle concerne presque exclusivement le versant Nord du Mont Ventoux, dans les peuplements de pin sylvestre, de pin noir et de pin à crochets. Toutefois, il n'est pas complètement absent du versant Sud.

• en versant Sud

On a relevé la présence du sapin à l'état de semis dans 13 placettes sur 170 avec la répartition suivante :

Nombre de semis de sapin/ha	Nombre de placettes concernées
4	3
12	1
20	6
60	1
140	1
868	1

Cette présence est relativement discrète, elle est limitée aux altitudes supérieures (altitude moyenne des 13 placettes : 1 368 m contre 1 246 m pour l'ensemble des placettes du versant Sud).

La distance moyenne des 13 placettes au peuplement de sapin le plus proche est de 1 500 m. On peut donc imaginer que la présence des semis est majoritairement due à l'apport de graînes d'un sapin semencier proche que la faible surface des placettes n'a pas toujours permis d'identifier.

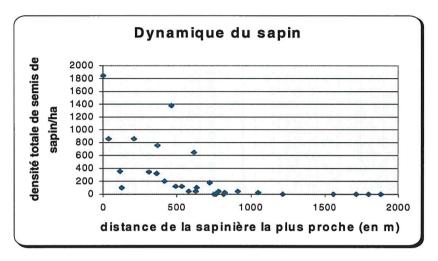
En effet, dans 2 placettes sur 13 seulement, on a inventorié un sapin dans le peuplement principal, il s'agissait de placettes de 2 500 m² en Forêt communale de Bedoin.

• en versant Nord

Sur les 44 placettes mesurées en versant Nord, on en note 26 comportant au moins 1 semis de sapin, ce qui ramené à l'hectare, correspond à 20 semis/ha (placettes de 500 m²).

- Influence de la distance au peuplement de sapin le plus proche

On note une influence très importante de ce facteur : au-delà d'un éloignement de plus de 700 m, il n'y a presque plus de semis de sapin, comme le montre le graphique N° T1.8.



Graphique Nº T1.8

- Influence des caractéristiques dendrométriques du peuplement

Ni la surface terrière, ni l'âge du peuplement ne semblent avoir d'influence sur le niveau quantitatif des semis de sapin, ce qui n'est guère étonnant compte tenu du caractère sciaphile de l'espèce.

- Influence du type de peuplement

Le tableau ci-dessous fournit des moyennes sur la dynamique du sapin en fonction des types de peuplements et de quelques paramètres de composition de ceux-ci :

		Peuplements	s futaies de :	
	Pin noir	Pin à crochets	Pin sylvestre	Sapin
Nombre de placettes	12	19	5	3
Éloignement moyen				
d'une sapinière	2452	1240	307	0
Pente moyenne	54	53	47	55
Nb /ha de hêtre	0	11	40	100
Nb /ha de sapin	0	15	268	480
Nb tot semis de hêtre	308	379	360	275
Nb tot semis de Pin noir	705	38	52	6
Nb tot semis de Pin sylvestre	18	31	284	0
Nb tot semis de Pin à crochets	0	186	0	0
Nb tot semis de sapin	2	321	1104	8980

Il apparaît que la dynamique des semis de sapin est la plus forte dans les sapinières, puis dans les pinèdes de pin sylvestre, puis dans celles de pin à crochets. Dans celles de pin noir, la régénération de sapin est pratiquement nulle : on retrouve en fait la prépondérance du facteur "éloignement des sapinières" pour expliquer la dynamique du sapin.

On voit également que la colonisation du pin sylvestre par le sapin est déjà ancienne car la présence du sapin dans le peuplement principal est assez forte dans les pinèdes sylvestres avec une valeur moyenne de 268 tiges/ha (les sapins inventoriés au titre du peuplement principal ont un diamètre à 1,30 m supérieur à 7,5 cm).

Si on distingue les sous-groupes de placettes :

- sans semis de sapin,
- avec semis de sapin

Les premières placettes n'ont pas de semencier sapin dans le peuplement principal et sont à une distance moyenne de 2 641 m du peuplement de sapin le plus proche.

Les secondes ont de 0 à 640 (138 en moyenne) semencier sapin dans le peuplement principal et sont à une distance moyenne de 317m du peuplement de sapin le plus proche

Le tableau suivant donne les caractéristiques "dynamique et composition de peuplements" de ces deux sous groupes.

		Densité/ha dans le peuplement principal					Nombre total de semis /ha				
		Hêtre	PNA	PS	PX	SAP	Nbtot het	Nbtot PNA	Nbtot PS	Nbtot PX	Nbtot SAP
Avec semis	Moyenne	128	15	85	627	138	773	74	111	136	1722
Avec semis	Médiane	10	0	0	340	0	180	0	0	0	330
Sans semis	Moyenne	0	646	71	566	0	332	421	8	2	0
Sans semis	Médiane	0	390	0	0	0	140	0	0	0	0

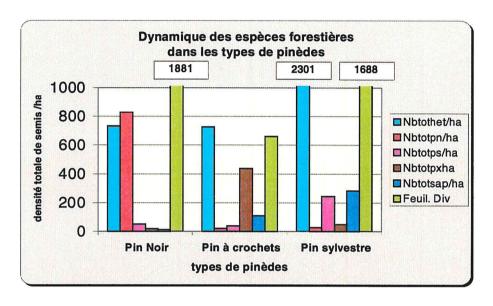
Les placettes "avec semis de sapin" sont en même temps celles ou la dynamique des semis de hêtre, de pin sylvestre et de pin à crochets est la plus forte et celle du pin noir la plus faible : il s'agit des peuplements purs ou mélangés de pins à crochets et de pin sylvestre

Les placettes "sans semis de sapin" sont en même temps celles où la dynamique des semis de pin noir est la plus forte : il s'agit des peuplements de pin noir et de pin à crochets de la Forêt Domaniale du Toulourenc, caractérisés par un éloignement des peuplements de sapin de plus de 750 m

5. Discussion

Essai de qualification des situations où la régénération semble avoir la meilleure dynamique en terme d'effectifs et de mélanges d'essences :

Le graphique N° T1.9 ci dessous synthétise les moyennes d'effectifs de semis observées dans chaque groupe de pinède :



Graphique Nº T1.9

Les pinèdes à pin sylvestre apparaissent comme les plus mélangées en terme d'essences forestières au stade de la régénération naturelle, le hêtre et le sapin assurant l'avenir des peuplements car le niveau moyen de régénération naturelle du pin sylvestre est assez médiocre ; les feuillus divers représentent également un fort potentiel à valoriser.

Les pinèdes à pin noir présentent une diversité un peu inférieure car le sapin en est absent que ce soit en versant Sud ou en versant Nord. Il apparaît toutefois que le hêtre et les feuillus divers représentent un potentiel important, en mesure de participer à des peuplements mélangés au pin noir dans le futur, là ou les conditions écologiques peuvent devenir limitantes pour le pin noir (exemple : l'altitude).

Les pinèdes à pin à crochets représentent une situation intermédiaire, assez originale car les potentialités des espèces s'expriment différemment selon les forêts comme l'indique le tableau ci-dessous :

peuplements de pin à crochets									
Nbtot de semis/ha sthet stpna stps stpx stsap Sst fo									
FC de Bedoin	291	9	33	710	13	207			
FD du Toulourenc	462	80	0	11	14	315			
FD du Ventouret	1770	23	58	352	0	1764			
FD du Ventoux	304	0	58	344	258	250			

En versant Sud, on constate, que la régénération naturelle du Pin à crochets est la plus dynamique en Forêt communale de Bedoin, avec une dynamique " moyenne " du hêtre, les autres pins et le sapin étant quasiment absents et les feuillus divers assez peu dynamiques.

En Forêt Domaniale du Ventouret, ce sont le hêtre et les feuillus divers qui présentent la dynamique la plus forte, la dynamique du pin à crochets se situant à un niveau très moyen.

En versant Nord, en Forêt Domaniale du Ventoux, les dynamiques sont plus équilibrées, avec une contribution importante du sapin pectiné.

Dans la Forêt Domaniale du Toulourenc, on note une présence relativement importante du hêtre et des feuillus divers, le pin à crochets ne se régénérant pratiquement pas : cette situation correspond à des peuplements jamais éclaircis. La densité moyenne sur les 9 placettes de pin à crochets est de 1678 tiges/ha ! On se trouve par ailleurs sur des substrats très superficiels, avec éboulis et pierriers alimentés en permanence, peu réceptifs à la régénération, quelle que soit l'espèce concernée.

Niveau de régénération naturelle des espèces en fonction de l'altitude :

Le tableau suivant présente, par tranche d'altitude, et par versant, la dynamique des espèces appréciée par le nombre total de semis /ha :

		Nombre de semis total moyen à l'hectare										
Altitude	Versant	Hêtre	Pin noir	Pin sylv.	Pin à Cr.	Sapin	Feuil. div.	Total				
	NORD	71	843	0	0	0	3246	4160				
750 à 1000 m	(7)											
	SUD	•	-	-	-	-	-	-				
	(0)							****				
	NORD	495	98	55	7	213	2547	3415				
1000 à 1250 m	(11)											
	SUD	1468	563	86	46	8	1956	4127				
	(108)											
	NORD	966	126	121	106	2063	538	3920				
1250 à 1500 m	(20)											
	SUD	1208	42	95	469	6	730	2550				
	(47)											
	NORD	137	0	0	230	197	87	651				
Plus de 1500 m	(6)											
	SUD	940	0	0	195	5	48	1188				
	(13)											

(entre parenthèses : le nombre de placettes)

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

En versant Nord :

En partie basse (750-1000 m), les peuplements concernés sont exclusivement les peuplements de pin noir de la Forêt Domaniale du Toulourenc : la dynamique perceptible est celle du Pin noir, le hêtre étant présent de façon discrète ; il se trouve d'ailleurs probablement ici en limite de station ce qui doit inciter à la prudence quant à une éventuelle sylviculture visant à le favoriser.

On note en revanche une très forte dynamique potentielle des feuillus divers, qu'une sylviculture appropriée devrait permettre de valoriser.

Cette tranche d'altitude n'est pas décrite en versant Sud, car elle se trouve hors zone d'étude et correspond à la partie haute du chêne pubescent.

Plus en altitude: 1000 à 1250 m

La dynamique du hêtre devient plus marquée, celle du pin noir est moins forte, le sapin apparaît. Les feuillus divers restent très présents, les autres pins relativement peu représentés.

<u>C'est dans la tranche altitudinale 1250-1500 m</u> que l'on trouve les situations les plus diversifiées en terme de mélange d'essences : le hêtre se trouve à un niveau important (alors que parallèlement la présence des feuillus divers diminue sensiblement), le pin sylvestre et le pin à crochets arrivent à un niveau un peu supérieur mais qui reste modeste, à parité avec le pin noir ; le fait le plus marquant est l'explosion du sapin qui trouve ici son optimum, principalement, comme nous l'avons vu, dans les peuplements de pin sylvestre et de pin à crochets (Forêt Domaniale du Mont-Ventoux) ; on peut donc raisonnablement envisager, dans le futur, de faire jouer un rôle important à cette essence, en mélange avec le hêtre dans ces conditions d'altitude et d'exposition.

<u>Au delà de 1500 m</u>, le pin à crochets et le sapin constituent les essences sur lesquelles on devra s'appuyer pour le renouvellement des peuplements, au côté du hêtre, malgré une difficulté générale de régénération pour l'ensemble des espèces, déjà signalée et liée à la mauvaise qualité des substrats, à laquelle s'ajoute la menace que fait peser sur l'avenir des régénérations (surtout celles de sapin) l'augmentation des populations de grands ongulés.

En versant Sud:

En partie basse de la zone d'étude (altitude : 1000 à 1250 m) : Dans cette frange, la régénération naturelle du Pin noir se situe à un niveau assez élevé, les conditions de son apparition, de sa survie et de sa croissance étant liées aux caractéristiques du peuplement principal (G/ha, densité). Parallèlement la dynamique du hêtre est très forte, sous réserve de la proximité des arbres ou peuplements sources de graines. Celle des feuillus divers est également très forte.

On se situe donc dans des conditions relativement optimales, dans lesquelles le gestionnaire aura la possibilité de valoriser ces essences dans le futur, en adoptant, en fonction du ou des objectifs assignés à la forêt, un mélange plus ou moins équilibré entre le pin (noir et sylvestre) et les feuillus.

En partie basse de la frange (vers 1000 m), au contact du chêne pubescent, il sera prudent d'examiner le comportement des peuplements adultes de hêtre avant de prendre des options sylvicoles favorisant cette essence et engageant l'avenir.

<u>Aux altitudes intermédiaires à supérieures : (1250 à 1500 m)</u> Le hêtre conserve le même potentiel, mais c'est le pin à crochets qui prend progressivement le relais du pin noir, les feuillus divers pouvant participer au mélange d'essences dans le futur grâce à leur dynamique qui reste importante à ces altitudes.

<u>Au dessus de 1500 m</u>: Le hêtre conserve encore une dynamique importante et pourra donc pallier, le cas échéant, une difficulté du pin à crochets à se régénérer, cette seule espèce pouvant, parmi les pins, participer de façon plus ou moins active aux peuplements mélangés à venir.

Il faut noter que les feuillus divers marquent le pas à ces altitudes, et qu'ils ne pourront donc jouer, à ce niveau, qu'un rôle marginal.

6. Conclusion

La présente étude de la dynamique de régénération des différentes espèces présentes sur le massif du Mont-Ventoux permet d'affiner les connaissances à l'échelle du massif.

Les niveaux constatés de régénération naturelle obéissent à plusieurs facteurs, dont l'état d'ouverture des peuplements lié à la sylviculture pratiquée, les paramètres géographiques, (exposition, altitude), mais aussi et surtout la proximité des sources de graines.

Elle confirme, sans en préciser les modalités de valorisation, les très fortes potentialités que représentent le hêtre et les feuillus divers dans la participation à des peuplements mélangés futurs.

Elle conforte enfin la pertinence des choix effectués par les reboiseurs de la fin du XIX ème siècle et la bonne adaptation des pins aux conditions naturelles difficiles du massif, ces espèces conservant en effet de réels atouts pour constituer avec les feuillus les futurs peuplements issus des reboisements d'il y a un siècle.

Les itinéraires sylvicoles restent toutefois à inventer, ce qui nécessite la mise en place de suivis expérimentaux visant à quantifier l'efficacité de choix sylvicoles sur la formation de peuplements mélangés stables.

Tâche 2 : Harmonisation des Protocoles et Choix Définitif des Sites d'Étude (tous les partenaires)

Service exécutant : tous partenaires du projet.

Responsable: Ph. Dreyfus - INRA-URFM, équipe « Croissance et conduite des Peuplements Forestiers »

Objectif initial

O Aboutir à des protocoles conçus dès le départ non seulement pour acquérir les données nécessaires à chaque domaine de compétence mais aussi de manière à pouvoir articuler ces connaissances d'un domaine à l'autre (mesures complémentaires permettant de se raccorder aux informations recueillies par tel ou tel autre partenaire du projet).

Ainsi, après la phase d'acquisition des données par chaque partenaire, la phase d'analyse conjointe sera facilitée et ne se heurtera pas, pour l'agencement en interdépendance des divers types d'informations, à des « maillons manquants ».

O Déterminer les sites retenus de manière définitive en fonction des informations cartographiques et de la connaissance du passé sylvicole.

Mode de choix des sites

Plusieurs visites de terrain ont eu lieu dès le tout début du projet, en 1998 ; elles ont concerné tous les partenaires du projet, simultanément ou par groupes de 2 ou 3 entités partenaires.

Par leur connaissance de ces forêts, les personnes en charge des divers échelons de gestion et de terrain de l'ONF nous ont guidés vers des parcelles forestières représentatives des différents situations rencontrées sur le massif. En complément, les cartes existantes (types de peuplement adulte, stations forestières, habitats) ont été soigneusement examinées, ainsi qu'un jeu récent (1997) de photos aériennes (en IR fausses couleurs) et, bien entendu, les cartes topographiques.

Ces visites nous ont permis de discerner les différents stades et les différentes variantes de la dynamique à étudier, puis de dégager un consensus - au vu des connaissances et des exigences scientifiques et pratiques des partenaires du projet - sur le choix des 4 premiers sites étudiés, en versant Sud ; ils correspondent à la variante 1 de la dynamique.

Ce choix n'a donc pas été fait de manière systématique comme envisagé de prime abord. D'une part, parce que la cartographie de l'état actuel de la régénération n'était pas encore disponible, mais surtout parce que le choix de sites selon un critère de représentativité en terme de surface concernée sur le massif s'est avéré non pertinent : bien que le retour du Hêtre soit général dans le secteur étudié, les stades les plus avancés de la dynamique qui conduit - partant d'une pinède - à des peuplements adultes mixtes de Pin et Hêtre ou purs de Hêtre sont encore peu représentés en surface. Or, aussi « rares » soient ces situations, il est du plus haut intérêt de les prendre en compte dès maintenant, puisqu'elles préfigurent le futur.

Les stades théoriques suivants ont été définis :

- stade 1 : pinède plantée où la régénération est encore absente ou à peine débutante ;
- stades 2a et 2b : la régénération est abondante (stade 2a) puis atteint plusieurs mètres de hauteur (stade 2b) ;
- stade 3 : la régénération dépasse une dizaine de mètres et la pinède artificielle a été complètement enlevée (ou bien les quelques arbres restant seront enlevés d'ici quelques années) ;
- stade 4 : cette régénération s'est transformée en un peuplement adulte, « mature ».

Ces stades se déclinent selon les variantes 1 (régénération mélangée Hêtre & Pin), 1 bis (régénération pure de Hêtre), 2 (régénération mélangée Sapin, Hêtre & Pin) présentées brièvement en introduction de ce rapport et de manière plus détaillée dans la suite de ce chapitre.

Les sites installés en versant Nord (variante 2) ont été choisis en concertation avec F. Sagnard, en thèse dans l'équipe « Génétique » de l'URFM (INRA Avignon) : son travail porte sur la dynamique de recolonisation de la hêtraie-sapinière sur le Mont-Ventoux, et particulièrement sur les liens entre la structure des peuplements et la variabilité génétique des nouvelles populations de Sapin pectiné. Les sites ont été installés et décrits en commun.

Le site retenu pour la variante 1bis, en versant Sud, qui conduit vers des peuplements purs de Hêtre, en absence de régénération de pin, a été retenu parmi une liste de peuplements répondant à ces définitions (pinèdes à régénération pure de Hêtre) et identifiés grâce aux placettes installées dans le cadre de la Tâche 1.

Cohérence des protocoles

Dans le cadre de la Tâche 3 « Description de la structure des peuplements », la surface de chacun des sites choisis est complètement « quadrillée » par une grille de cellules carrées de 100 m² (10 m x 10 m), matérialisées par des piquets aux coins.

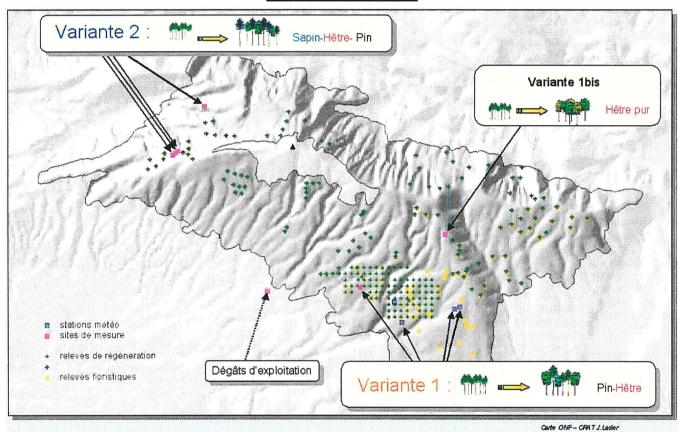
Il a été convenu que les autres tâches s'appuieraient sur cette grille pour l'étude de ces sites :

- 3 cellules par sites (sur 3 sites), sélectionnées pour l'installation de capteurs de paramètres météorologiques (Tâche 6) ;
- pour l'étude floristique, groupes de 4 cellules (400 m²) répartis de manière systématique sur la grille (Tâche 7) ;
- description de l'hétérogénéité stationnelle intra-site en se calant sur la grille et sur les cellules décrites au plan floristique (Tâche 5) ;
- dynamique des peuplements : échantillons de semis remesurés, dans chaque cellule (Tâche 4).

Localisation des sites - Stades représentés

La carte ci-dessous présente la position des sites principaux étudiés (description du peuplement et de la régénération + relevés floristiques, de sol et humus) (cf. Tâches 3, 4, 5 et 7), des 43 relevés floristiques supplémentaires (cf. Tâche 7), des 214 placettes correspondant à la Tâche 1 (croix vertes), des sites équipés pour le suivi météo (cf. Tâche 6).

Carte des sites et placettes



Variante « 1 », en versant Sud :

Futaies plantées de Pin noir du versant Sud du Mont-Ventoux, évoluant vers des mélanges avec le Hêtre.

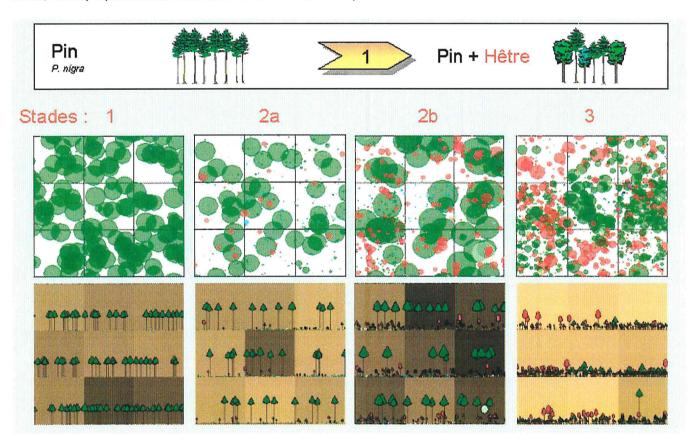
Sites	Stade de la dynamique	Forêt	Parcelle	Altitude	Pente	Exposition	Surface
							(hors cell.
							périph.)
1	Plantation de Pin noir d'Autriche	FD du Ventouret	102	1 210 m	négli-	(ouest)	0,49 ha
	encore jeune et dense. Niveau de				geable		
	régénération très faible.						
2a	Plantation de Pin noir d'Autriche	FD du Ventouret	88	1 200 m	négli-	(ouest)	1,04 ha
l	éclaircie à plusieurs reprises.				geable		
1	Régénération mélangée significative :						
	Pin noir et Hêtre, principalement						

2b	Plantation de Pin noir d'Autriche	FD du Ventouret	93	1 120 m	négli-	(sud-ouest)	0,49 ha
	éclaircie, à couvert refermé.				geable		
	Régénération mélangée avancée :						
	Hêtre prédominant (plusieurs mètres)						
	et Pin noir, principalement						
3	Plantation de Pin noir d'Autriche au	FC de Bedoin	15	1 150 m	16 %	sud-est	1,00 ha
	stade des dernières coupes de						
i	régénération. Régénération mélangée						
	très avancée: Hêtre et Pin noir,						
	principalement, dépassant 10 m de						
	hauteur						

Installés lors d'une première campagne de terrain (été et automne 1998, *cf.* Tâche 3 « Description de la structure des peuplements »), ils correspondent aux premiers stades de la dynamique Pin->Pin+Hêtre :

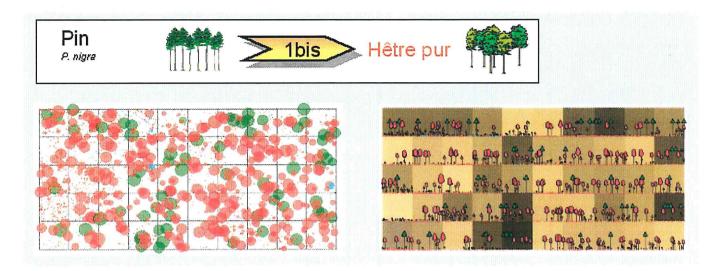
- Stade 1 : peuplement de Pin noir « fermé », où la régénération n'est qu'à l'état de « traces ».
- Stade 2a : peuplement de Pin noir, plus ouvert (coupes d'éclaircie) où la régénération mélangée (pin noir et hêtre, principalement) est significative.
- Stade 2b : idem, régénération mélangée plus avancée : semis hauts de plusieurs mètres.
- Stade 3 : régénération mélangée très avancée, le peuplement adulte de Pin noir a très largement disparu (coupes de régénération).

Pour le stade 4, stade « ultime » de cette dynamique en versant Sud, correspondant à un mélange de Pin et de Hêtre devenu adulte, aucun peuplement satisfaisant, de surface suffisante, n'a pu être trouvé.



Variante « 1 bis », en versant Sud :

Pour cette variante qui, à première vue, ne diffère de la variante 1 que par l'absence du pin dans la régénération, un seul site a été retenu. Il correspond au stade 3, donc à un stade déjà avancé ; le peuplement résiduel de Pin adulte est fortement réduit (134 tiges/ha).

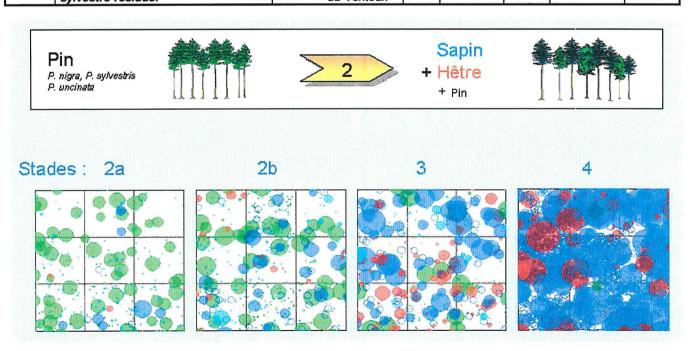


Variante « 2 », en versant Nord :

Futaies plantées de Pin sylvestre du versant Nord du Mont-Ventoux, évoluant vers des sapinières-hêtraies, à pin résiduel. La même situation se retrouve dans des plantations de Pin à crochets.

Pas de site retenu pour le stade 1 : en absence de régénération de Hêtre et de Sapin, il n'est pas toujours possible de savoir si cela est dû à la structure du peuplement et du couvert, à la couverture du sol, à des facteurs limitants abiotiques ou bien simplement si les flux exogènes de graines sont nuls ou très faibles.

Sites =	Stade de la dynamique	Forêt	Par-	Altitude	Pente	Exposition	Surface
Stades			celle				
2a	Plantation de Pin sylvestre éclaircie	FD du Mont-Ventoux	34	1300 m	36 %	nord-ouest	0,55 ha
	à plusieurs reprises. Régénération						
	mélangée significative : Sapin, Hêtre et						
	Pin sylvestre						
2b	Plantation de Pin sylvestre éclaircie	idem	idem	idem	idem	idem	0,60 ha
	à plusieurs reprises. Régénération						
	mélangée avancée: Sapin, Hêtre et						
	Pin sylvestre						
3	Plantation de Pin sylvestre éclaircie	idem	idem	idem	idem	idem	0,60 ha
	à plusieurs reprises. Régénération						
	mélangée très avancée : Sapin, Hêtre						
	et Pin sylvestre						
4	Sapinière-Hêtraie irrégulière à Pin	FC de Beaumont-	5	970 m	47%	idem	0,91 ha
l	sylvestre résiduel	-du-Ventoux					



Pour chaque site, une fiche synthétique rassemble les informations principales concernant sa localisation, sa situation topographique et stationnelle, ainsi que les caractéristiques du peuplement adulte et quelques éléments sur la régénération. Ces fiches sont fournies en annexe de ce rapport.

Pour des informations climatiques sur la zone d'étude, voir Tâche 6.

Pour des informations sur le sol, l'humus, la station forestière, voir Tâche 5.

Passé sylvicole

L'examen des archives de l'ONF, en particulier des catalogues de vente des coupes, ont permis de rassembler les éléments disponibles sur les interventions sylvicoles passées : date de marquage et/ou d'exploitation, importance moyenne du prélèvement sur l'ensemble de la parcelle (inventaire des tiges marquées, par catégorie de diamètre et essence).

Cette opération est difficile, notamment à cause de la modification du parcellaire (renumérotation, voire redécoupage des parcelles) d'un document d'aménagement au suivant. De plus, sur une parcelle donnée, une coupe peut être vendue en 2 ou plusieurs lots, dont l'exploitation peut intervenir à des dates différentes ; or, il est arrive que l'on ne puisse pas déterminer dans quel lot se trouve le site que nous avons installé.

Les renseignements pris auprès des personnels de terrain (agents et techniciens des groupes techniques de Sault et Bedoin) permettent souvent de lever certaines incertitudes.

Il reste néanmoins des zones d'ombre.

Site dédié à l'évaluation des dégâts d'exploitation sur la régénération

Dans un contexte sylvicole actif, impliquant dans la vie du peuplement une succession de coupes d'éclaircie, puis de coupes destinées à favoriser la régénération, la dynamique de cette dernière ne peut pas être décrite correctement sans la prise en compte des dégâts d'exploitation. Pour l'essentiel, la littérature sur ce thème concerne soit l'exploitation des forêts tropicales, soit la prise en compte des dégâts (ou de l'impact sur le sol) par des statistiques établies sur un grand nombre de peuplements. La description spatiale des dégâts au sein d'un peuplement est peu étudiée.

Bien que cela n'ait pas été prévu initialement, nous avons donc choisi d'aborder cette question par la mise en place d'un site dédié à la caractérisation de ces dégâts. Naturellement, ceci devrait être complété par la prise en compte d'autres coupes représentant diverses conditions (structure du peuplement et de la régénération, type de coupe, mode d'exploitation, etc.) ; il s'agit à ce stade d'une étude méthodologique et exploratoire.

Du fait du gel des coupes lié aux surcroît de volume mobilisé en France à la suite des tempêtes de fin 1999, il n'a pas été possible de trouver une coupe satisfaisante (coupe sur régénération bien développée) dans la zone d'étude. La coupe retenue se situe dans la Série des Cèdres de la Forêt Communale de Bedoin, un peu en dessous de la zone d'étude, dans un peuplement où le Cèdre est majoritaire, tant dans le peuplement adulte de semenciers que dans la régénération. Les autres essences sont le Pin noir d'Autriche, le Chêne pubescent, le Pin sylvestre ; très petite proportion d'alisiers blancs et érables à feuille d'obier ; très peu de hêtres. Les résultats attendus ne pourront probablement pas mettre en évidence d'éventuelles différences de sensibilité entre les espèces principales de ce projet.

La description est réalisée sur 0,5 ha, sur une grille de cellules de 10 x 10 m, subdivisées chacune en carreaux de 2,5 m x 2,5 m.

Elle porte sur l'état avant et après exploitation. La description après exploitation vient de se terminer et il est trop tôt pour en présenter ici les résultats.

Tâche 3 : Description de la Structure des Peuplements

INRA URFM, ONF

Service exécutant: INRA - UR 629 (Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes - Avignon)

(+ ONF STIR : participation à la mise au point des protocoles).

Responsable: Ph. Dreyfus - Équipe « Croissance et conduite des Peuplements Forestiers »

Objectif initial

Parvenir à une description des dimensions, des âges, de la démographie et de la répartition spatiale, horizontale et verticale (couvert), pour le peuplement adulte et la régénération.

Dans le type de peuplements étudiés, le plus souvent hétérogènes au plan de la composition spécifique et de la structure spatiale, la répartition horizontale doit être appréhendée au minimum à 2 niveaux d'échelle : l' « élément homogène » et le site d'étude, qui est une mosaïque d'assemblage de ces éléments homogènes.

Toutes les espèces d'arbres et arbustes sont prises en compte.

Structure des dispositifs

Dès le début du projet, la définition de types d' « éléments homogènes » - sur une série de critères dendrométriques, floristiques, stationnels -, puis leur cartographie calée sur une grille et le choix d'un échantillon d'éléments représentatifs de la mosaïque, sont apparus trop subjectifs. Cette méthode a été abandonnée au profit d'une description systématique par cellules de 100 m² (10 m x 10 m), en pavage continu sur tout le site. La superficie des sites étudiés varie de 0,49 à 1,04 ha (de 0,64 à 1,50 ha si l'on inclut la rangée de cellules périphériques).

Au sein d'une cellule, aucun relevé cartographique n'est réalisé: au niveau d'un site, on aboutit donc à une information semi-spatialisée, où la position des arbres et des semis est connue avec la précision correspondant à la taille d'une cellule unitaire.

Le peuplement adulte, la régénération, la couverture au sol sont décrits selon le protocole présenté ci-dessous. Les mesures sont saisies sur le terrain (appareil de saisie portable Husky FS/2 TM).

Installation, levé topographique

Après le choix définitif de l'emplacement et un levé approximatif, la surface de chaque site choisi est complètement « quadrillée » par une grille de cellules carrées de 100 m² (10 m x 10 m), repérées par un codage ligne (lettre) x colonne (nombre), matérialisées par des piquets de bois aux coins. Un levé topographique précis est ensuite effectué.

En fin de projet, des bornes de géomètres ont été installées aux coins extrêmes de la grille; sur les côtés les plus longs, des bornes intermédiaires ont été intercalées. Ceci permettra de reconstituer complètement la grille, même en cas de disparition d'un grand nombre de piquets. L'objectif est de pérenniser les sites dans l'optique de remesures à court et moyen termes.

Protocole pour l'Acquisition des Données de terrain Méthodes d'analyse

Peuplement adulte (pour chaque cellule)

- inventaire en circonférence (au mm) du peuplement sur pied, par espèce ;
- remarques éventuelles (individu mort, état sanitaire particulier, fourche basse, chablis ...).
- inventaire des souches, en notant pour chacune : l'essence présumée, le diamètre sur écorce (au cm) ; dans certains sites, il a été possible de distinguer les souches provenant d'une exploitation très récente de celles qui sont plus anciennes.

Dans un second temps :

- mesure de la hauteur totale et de la hauteur de la base du houppier (dendromètre Vertex ™, Häglof, Suède) sur un échantillon couvrant toute la gamme de circonférence (environ 30 arbres par site).
- vérification de l'âge du peuplement adulte : sur quelques arbres, sondage à la tarière à 10 cm du sol, ou comptage sur rondelle de souche en cas d'exploitation récente de date connue.

Régénération

Pour chaque cellule, un inventaire exhaustif de la régénération est effectué.

Pour chaque semis, on note:

- l'essence,
- la classe de hauteur : 0 30 cm (les plantules de l'année, à feuilles cotylédonaires, sont exclues), 30 130 cm, plus de 130 cm,

- le diamètre, à 1,30 m du sol, pour tout semis dépassant cette hauteur
- toute remarque particulière (mort, individu couché à la suite d'une exploitation, cassé, fourchu...).

Lorsque l'on a affaire à des cépées (Hêtre, Chêne pubescent, Érable à feuille d'obier, Alisier blanc), on note pour chacune d'elles :

- l'essence,
- le nombre de brins dans chaque classe de hauteur (en notant le diamètre à 1,30 m du sol de chaque brin dépassant ce niveau).
- la présence de fourches et/ou de marcottes (nous avons constaté que ces dernières ne sont pas rares chez le Hêtre),
- toute remarque particulière concernant chaque brin (mort, cassé, fourchu...).

Couverture au sol et strate arbustive

Des pourcentages de recouvrement sont estimés (d'après une méthode proche de celle de FOLK L., 1951 A comparison chart for visual percentage estimation. *Journal of sedimentary petrology*, 21, 1:32-33.).

Les éléments estimés sont :

- sol nu;
- litière ;
- bois mort (y compris rémanents d'exploitation) ;
- espèces graminiformes (essentiellement des graminées, parfois quelques cypéracées) ;
- ensemble regroupant les dicotylédones herbacées et les mousses.

La somme des recouvrements de ces éléments est théoriquement de 100 % ; dans la pratique, du fait de leur imbrication et de la difficulté d'estimation qui en résulte, la somme des estimations peut s'écarter un peu de ce total théorique (si l'écart dépasse 15 %, les estimations sont reprises immédiatement ; sinon, la correction éventuelle n'est opérée qu'a posteriori).

Le dernier élément dont la couverture a été estimé est la strate arbustive (la liste des espèces qui la composent est dressée).

Semis échantillons

Dans chaque cellule, il s'agit des 5 plus grands (ou des 6 ou 7 plus grands, cf. détails dans le protocole à la Tâche 4 « Dynamique des Peuplements »).

Outre les mesures d'accroissement réalisées au cours de ce projet (cf. Tâche 4) ou qui proviendront de remesures ultérieures, ces échantillons constituent un élément supplémentaire de caractérisation de la régénération.

Méthodes d'Analyse

- calcul des statistiques concernant le peuplement adulte (caractéristiques dendrométriques classiques), la régénération (espèce par espèce) ;
- cartes présentant la répartition spatiale intra-site d'une variable ou de plusieurs variables (dans le but de déceler des liaisons entre ces variables) ;
- graphique de tendances, corrélations statistiques simples ;
- régressions ;
- Analyses en Composantes Principales.

Une partie seulement des résultats des analyses sont présentés ci-dessous (les résultats des Analyses en Composantes Principales, notamment, peu concluants, ne sont pas présentés).

Relations allométriques

Des relations « allométriques » reliant des variables dimensionnelles individuelles telles que la hauteur totale, la hauteur de base du houppier, le diamètre de la tige au niveau de référence à 1,30 m du sol, le diamètre du houppier, ainsi que des relations entre la hauteur totale et l'âge, ont été établies pour les essences étudiées à partir de mesures d'échantillons sur les sites d'étude. Ces relations ont permis de compléter (par des estimations) la caractérisation dimensionnelle des arbres (y compris la régénération) sur les sites étudiés ; elles ont aussi servi à générer des fichiers décrivant ces peuplements et permettant l'entrée dans l'outil de simulation (cf. Tâche 8).

Ces relations ont été ajustées par des méthodes de régression, souvent non linéaires (formes : mono-moléculaire, Lundqvist-Matérn ...), parfois linéaires.

Elles sont présentées ci-après, essentiellement sous forme graphique (les statistiques des ajustements ne sont généralement pas indiquées). La plupart n'ont de validité que ponctuelle (c'est-à-dire pour un site donné et à la date des mesures effectuées) : les liens entre les variables considérées dépendent aussi, entre autres, du passé sylvicole ou de la rapidité de croissance radiale, qui peuvent varier d'un site à un autre ou d'un moment à un autre dans la vie du peuplement.

Ces relations « locales » sont utiles pour détecter les facteurs les plus importants, pour comparer les espèces et les stades, ainsi que pour compléter les fichiers d'entrée pour les simulations (cf. Tâche 8).

Par contre, leur généralisation, c'est-à-dire l'élargissement de leur champ de validité, reste à faire, sans doute dans un cadre géographique et sylvicole plus large que celui de notre zone d'étude sur le Mont-Ventoux. Ceci permettra de les intégrer dans le modèle de dynamique en cours de mise au point.

Déclinées par site et/ou par espèce, ces relations sont nombreuses. Quelques-unes sont présentées ici.

Relation [Hauteur totale - Diamètre à 1,30 m]

N.B.: sur les figures ci-dessous:

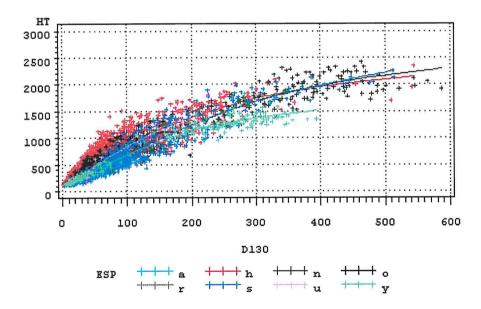
- hauteur totale HT en cm et diamètre D130 en mm :
 - codes espèces : a = alisier blanc, h= hêtre, n = pin noir, o = érable feuille d'obier, r = pin à crochets, s = sapin,

u = chêne pubescent, y = pin sylvestre;

- codes des sites :

Variante et Stade	Code parcelle	Variante et Stade	Code parcelle	Variante et Stade	Code parcelle
V 1 - Stade 1	102				
V 1 - Stade 2a	88			V 2 - Stade 2a	34 (_1)
V 1 - Stade 2b	93			V 2 - Stade 2b	34 (_2)
V 1 - Stade 3	15	V 1bis - Stade 3	23	V 2 - Stade 3	34 (_3)
				V 2 - Stade 4	5

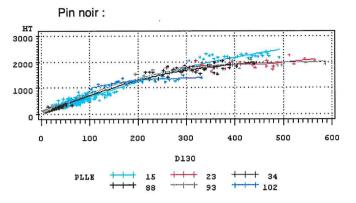
Positionnement relatif des espèces :

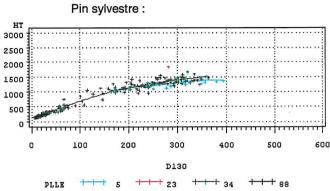


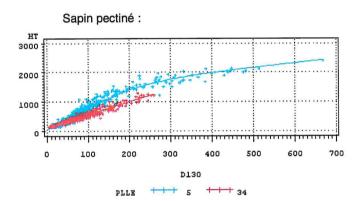
On note le fort élancement du Hêtre par rapport aux autres espèces, particulièrement pour les diamètres inférieurs à 10 cm correspondant, pour les sites étudiés, à des grands semis sous couvert.

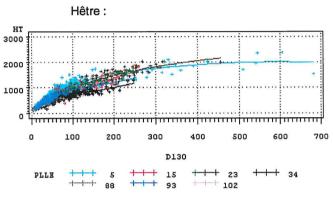
Ceci peut être mis en relation avec la faculté de cette essence à une croissance en hauteur relativement plus active que la croissance radiale de la tige, lorsqu'elle est située sous couvert; on peut encore interpréter ce comportement comme une propension du Hêtre à privilégier la croissance en hauteur (recherche de la lumière) dans une telle situation.

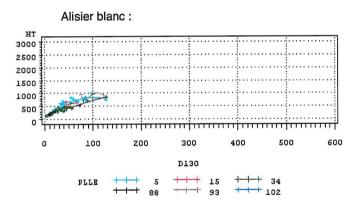
Les graphiques ci-dessous présentent les données disponibles pour chaque espèce ; les nuages de point correspondant à chaque site sont signalés par une couleur différente (et une courbe de lissage représente l'allure générale du nuage).

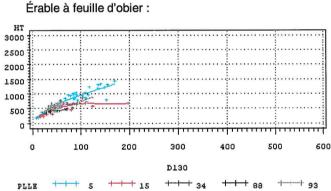






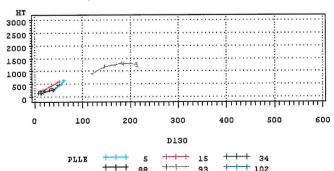






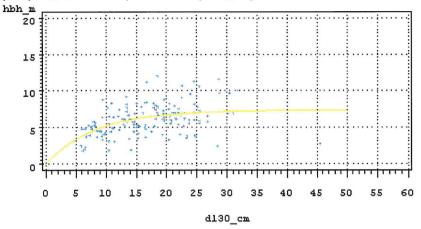
Chêne pubescent :

N.B. : on remarque que l'Érable peut atteindre des dimensions importantes (surtout en versant Nord ?).



• Relation [Hauteur de base du houppier vert - Diamètre à 1,30 m]

Exemple du Hêtre, stade 3 de la variante 1 bis, site où une large gamme de dimension est représentée : Hauteur de base du houppier (hbh_m, en mètres) et diamètre (d130_cm) en cm.

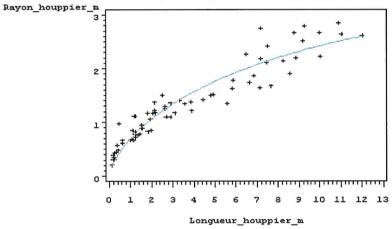


(hbh_m = 7.28 • (1 - exp (-0.12 • d130_cm)), écart-type résiduel = 1.82 m - 150 observations.)

Des relations du même type sont disponibles pour le Pin noir, le Pin sylvestre, le Sapin. Pour le Pin noir, une relation générale a été établie par ailleurs.

Relation [Rayon maximal du houppier - Longueur du houppier vert]

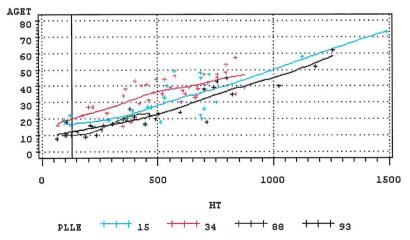
Exemple du Sapin, stades 2a, 2b, 3 de la variante 2 - Rayon et longueur du houppier en mètres :



Pour le Pin noir, une relation générale a été établie par ailleurs.

Relation [Âge - Hauteur totale]

Cette relation permet d'estimer un âge pour tout individu de hauteur connue (pour une espèce et un site donnés). Cas du Hêtre : âge total (AGET) en fonction de la hauteur (HT en cm) :



^{« 88 » :} Variante 1, stade 2a ; « 93 » : Variante 1, stade 2b ; « 15 » : Variante 1, stade 3 ;

^{« 34 » :} Variante 2, stades 2a, 2b, 3. N.B. : les lignes représentées sont des courbes de lissage.

On note qu'une hauteur donnée semble atteinte plus tardivement dans la variante 2 en versant Nord, au moins dans la parcelle où sont étudiés les stades 2a, 2b, 3 ; ceci ne paraît pas imputable à des conditions de couvert plus défavorables, mais plus probablement à des conditions climatiques plus difficiles.

Âge

Peuplement adulte de Pin (planté)

Cette composante est équienne (sauf regarnis éventuels, dont nous n'avons pas connaissance, ou semis naturel, provenant de peuplements naturels avoisinants, de Pin sylvestre par exemple, ou de plantations plus anciennes).

L'âge est obtenu par comptage des cernes (au laboratoire, au besoin sous loupe binoculaire) :

- soit à partir de sondages au cœur à la tarière sur quelques arbres (leur nombre est augmenté si les valeurs obtenues sur les 1^{ers} individus sondés sont dispersées), à 30 cm du sol ;
- soit sur rondelles prélevées sur des souches datant d'une coupe très récente lorsque la date d'exploitation est connue de manière certaine ;
- pour l'un des sites (stade 2a de la variante 1, parcelle 88 F.D. du Ventouret), grâce à des analyses de tiges réalisées sur une ancienne placette de production qui coïncide en partie avec le site actuel .

Pour le site correspondant au stade 4 de la variante 2 (sapinière-hêtraie, avec quelques pins sylvestres), le peuplement est inéquienne. Les seules âges disponibles ont été mesurés à 1,30 m du sol par l'équipe « Dendroécologie » de l'IMEP.

Régénération

Les mesures d'âge des régénérations sont obtenues à l'occasion de reconstitutions de croissance en hauteur (cf. Tâche 4).

Lorsqu'elles sont réalisées de manière non destructive, sur pied (cas du Pin noir, du Pin sylvestre et du Sapin, tous monocycliques et à pseudo-verticilles de branches bien marqués au sommet des pousses annuelles), les âges connus sont :

- l'âge compté à 30 cm du sol, hauteur jusqu'à laquelle (en partant du sommet de l'arbre) les niveaux de branches sont généralement encore lisibles sur les espèces concernées, dans les sites étudiés ;
- l'âge compté à 1,30 m du sol, pour les individus qui dépassent cette hauteur.

Pour le Hêtre, la reconstitution de croissance en hauteur a été réalisée de manière destructive et il a donc été possible de compter les cernes sur une rondelle de souche et d'approcher ainsi l'âge total (en plus des âges à 30 cm et à 1,30 m); la lecture n'est pas très aisée; toutefois, l'occurrence de faux cernes chez le jeune Hêtre semble rare ¹ et les risques de surestimation de l'âge sont donc faibles. La possibilité de cernes manquants n'est signalée que sur des individus adultes dominés ².

Âge maximum d'après reconstitution de croissance en hauteur :

Variante	Stade	Pin noir (à 30 cm)	Hêtre (total)	Pin sylvestre (à 30 cm)	Sapin pectiné (à 30 cm)
1	1	_ (1)	_ (1)		
1	2a	14	26		
1	2b	14	62		
1	3	34	73		
1 bis	3	· ⁽²⁾	75-92 ⁽³⁾		
2	2a		46	21	25
2	2b		47	22	35
2	3		57	19	40
2	4		_ (4)	_ (4)	_ (4)

- (1) pas de reconstitution de croissance du fait de l'effectif très faible de semis (tous de hauteur < 1,30 m)
- (2) quasi-absence de semis de Pin noir : 2 individus sur 0,5 ha, de hauteur inférieure à 30 cm.
- (3) il s'agit d'estimations à partir de la relation Âge total [hauteur], pour le Hêtre, présentée plus haut :
 - arbre dominant (de la population de hêtres) : ht = 16.7 m -> âge maxi estimé : 75 ans ;
 - individu le plus haut : ht = 20.9 m -> âge maxi estimé : 92 ans ;
 - 4 individus de hauteur totale entre 18.1 m et 18.4 m : pour le plus haut : ht = 18.4 m -> âge maxi estimé : 82 ans ;
- ... à comparer aux 101 ans d'âge total du peuplement résiduel de Pin noir adulte.

(4) pas de données disponibles pour l'âge de la régénération (N.B. : à ce stade, c'est le peuplement « adulte » qui constitue la composante étudiée dans le cadre de la dynamique de maturation : elle représente ce qu'est devenue la composante « régénération » des stades antérieurs).

¹ GRUBER F., 1997. Kombinierte Altersbestimmung von Jungbuchen (*Fagus sylvatica* L.). *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 168, 82-88. GRUBER F., 1998. Kombinierte Altersbestimmung und Altersentwicklung von Jungbuchen - *Fagus sylvatica* L. - nach morphologischen und anatomischen Merkmalen. *Flora (Jena)*, 193, 59-73.

² BERNABEI M., PIOVESAN G., 1997. Alcune osservazioni sugli accrescimenti anulari del faggio (Fagus sylvatica L.) del Lazio settentrionale. Monte e Boschi, 48, 52-56.

Caractéristiques du peuplement adulte

Rappel, pour chaque variante, les stades représentés dans les sites étudiés sont les suivants :

↓ Variante / Stade ⇒	1	2a	2b	3	4
1	Х	Х	Х	Х	
1 bis				X	
2		Х	Х	Х	Х

Nota Bene:

<u>Pour chaque site, une fiche synthétique</u> rassemble les principales caractéristiques du peuplement adulte et quelques éléments sur la régénération.

Ces fiches sont fournies en annexe de ce rapport.

Tableau des caractéristiques dendrométriques :

Variante et Stade	Code parcelle	Année	Âge	Hdom 50 (m) (1)	Hdom (m)	Hg (m)	Cdom (cm)	Cg (cm)	N/ha	G/ha (m²)	V/ha (m³)	S%
V 1 - Stade 1	102	1998	38	17.0	13.7	13.0	87	65	1216	41.4	195	22.5
V 1 - Stade 2a	88	1998	67	14.7	17.8	16.9	112	94	406	28.8	151	30.0
V 1 - Stade 2b	93	1998	78	14.7	19.3	18.0	138	105	467	40.6	237	25.8
V 1 - Stade 3	15	1998	106	15.0	22.3	22.2	132	126	136	17.3	113	41.3
V 1bis - Stade 3	23	2000	101	13.1	19.4	19.2	140	133	134	18.8	113	47.9
V 2 - Stade 2a	34_1	1999	93	12.3	13.5	12.2	89	69	513	19.4	85	35.1
V 2 - Stade 2b	34_2	1999	93	12.3	13.5	12.4	88	71	345	14.0	60	42.9
V 2 - Stade 3	34_3	1999	93	12.2	13.4	12.6	86	75	187	8.3	44	58.6
V 2 - Stade 4	5	2000	100		18.4	13.7	123	65	1160	38.7	213	17.1

^{(1):} Pin noir pour les variantes 1 et 1 bis ; Pin sylvestre pour les stades 2a, 2b, 3 de la variante 2 (au stade 4, ce sont le Sapin et le Hêtre qui forment l'étage dominant).

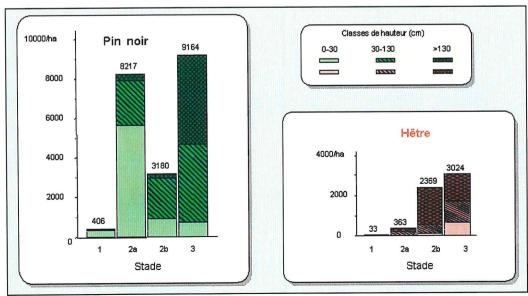
Régénération des essences principales

Sont présentés ici, de manière synthétique, les données concernant les effectifs de la régénération par espèce et par classes de dimension, des éléments sur la répartition spatiale intra-site, ainsi qu'une analyse et une interprétation.

Le tout, variante par variante. L'interprétation s'appuie en partie sur des éléments présentés sur les fiches synthétiques par site (en annexe du rapport), éléments qui ne sont pas repris ici.

VARIANTE 1 : Régénération mélangée de Pin noir et de Hêtre

Répartition par stade et catégorie de hauteur

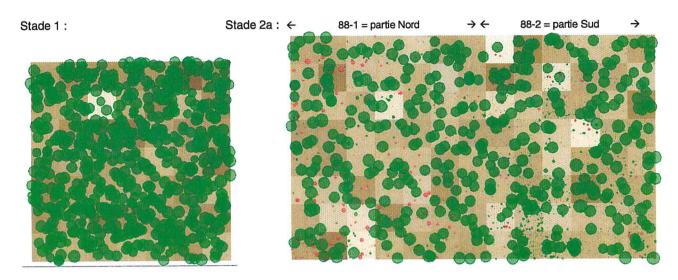


Cartes obtenues à partir d'estimation des projections de houppiers :

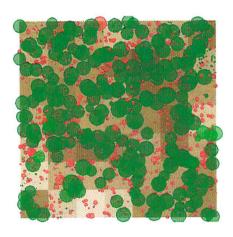
Pin noir figuré en vert et Hêtre en rouge ; la couleur de fond des cellules est d'autant plus foncée que la surface terrière totale (toutes essences, tous diamètres, régénération comprise) est élevée.

Rappel : la position des individus dans chaque cellule est représentée de manière totalement aléatoire ; les plus gros houppiers correspondent aux pin noirs adultes du peuplement planté.

Variante 1:



Stade 2b:



Stade 3:

Analyse et Interprétation

Sur la base des éléments présentés ci-dessus et des fiches synthétiques par site.

Stade 2a:

La régénération est en cours d'installation avec une moitié sud (88-2) de la parcelle où la « jeune » régénération (h = 0-30 cm) de Pin noir est abondante et une moitié nord (88-1) où la régénération de Pin noir est faible mais où le Hêtre est un peu plus abondant. Les plus grands semis de Pin noir sont presque tous antérieurs à la dernière éclaircie ; mais peu d'entre eux sont antérieurs à l'éclaircie de 1985 : la plupart ont dû apparaître à la suite de celle-ci.

La répartition actuelle, par cellule, de la surface terrière ne permet pas d'expliquer la différence de régénération entre les deux moitiés de la parcelle.

L'analyse de la répartition des souches ne permet pas d'attribuer ce contraste à une ouverture plus importante et/ou plus précoce dans la partie où les semis de Pin abondent, différence qui aurait été gommée par l'éclaircie de 1994 (à noter toutefois qu'il n'a pas été fait d'inventaire séparé des souches correspondant à cette dernière éclaircie et des souches plus anciennes). L'examen des cartes de couverture au sol (non présentées), en particulier des graminées (qui forment dans certaines cellules un tapis presque complet) ne permet pas non plus d'expliquer cette différence.

Stade 2b:

La dominance du Hêtre, plus tolérant à l'ombrage que le Pin noir, est en accord avec le caractère relativement fermé du peuplement. L'abondance relative des semis de Pin noir, généralement de très petite taille, permet de supposer que la régénération de cette essence est devenue abondante à la suite de l'éclaircie de 1981, mais que l'ouverture du couvert aurait été trop faible et/ou sa refermeture trop complète pour que ces semis survivent, se développent et atteignent des dimensions importantes; 17 ans après cette éclaircie, la régénération de Pin noir apparaît fragile et vieillissante. Ce qui ne préjuge pas de son destin ou de son renouvellement lors de la prochaine coupe (programmée en 2001 dans le document d'aménagement en vigueur, et repoussée à 2003 pour permettre une remesure des semis-échantillons 5 ans après l'installation du dispositif).

À noter que les peuplements de Hêtre susceptibles d'être les sources de graines sont ici beaucoup plus proches que pour les autres sites étudiés dans cette variante.

Stade 3:

Les caractéristiques et l'hétérogénéité de la régénération sont en partie calquées sur l'hétérogénéité du couvert.

Le contraste est maximal entre des cellules sans semenciers (tous coupés) occupées par des fourrés denses de Pin noir (d'ailleurs dépressés dans d'autres parties de cette parcelle 15 ; nous avons choisi une zone non dépressée) et des cellules à couvert encore dense où des semis de Hêtre sont très grands mais en nombre beaucoup plus réduit. Dans certaines zones, la régénération est encore peu abondante et basse.

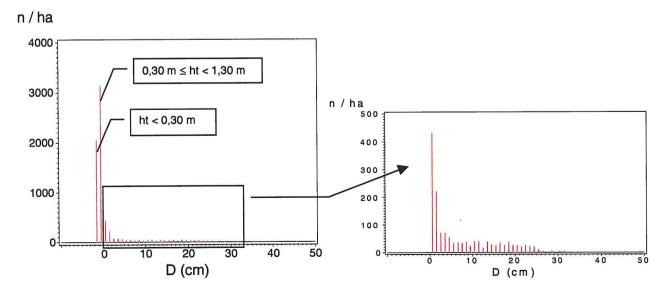
Déduire de ce constat qu'il y a une relation de cause à effet très nette entre la disparition du couvert et l'abondance ou le stade d'avancement de la régénération serait un peu rapide : au cours des coupes successives, l'action du forestier a consisté en grande partie à supprimer le couvert de pins adultes là où la régénération était acquise, accentuant ainsi une tendance qui pouvait être à l'origine beaucoup plus ténue.

Comparaison entre les stades de la variante 1 :

La composante « Hêtre » de la régénération augmente du stade 1 au stade 3. À noter un déséquilibre très fort en faveur du Hêtre au stade 2b du fait de la conjonction entre une grande proximité des sources potentielles (une futaie et un taillis de Hêtre à moins de 200 m) et d'une fermeture prolongée du couvert (pas de nouvelle coupe depuis 1981). Le site représentant le stade 3 est proche aussi de hêtraies-sources mais, par contre, 2 coupes ont eu lieu depuis celle du début des années 1980, ce qui a sans doute permis au Pin noir de garder une importance comparable à celle du Hêtre.

VARIANTE 1 bis, stade 3 : Régénération de Hêtre très abondante, et quasi-absente pour le Pin noir

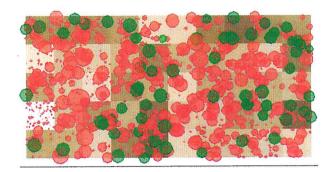
Répartition par catégorie de hauteur

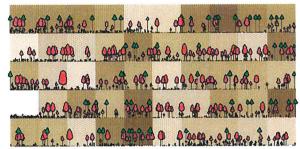


Cartes obtenues à partir d'estimation des projections de houppiers :

Pin noir figuré en vert et Hêtre en rouge ; la couleur de fond des cellules est d'autant plus foncée que la surface terrière totale (toutes essences, tous diamètres, régénération comprise) est élevée.

Rappel : la position des individus dans chaque cellule est représentée de manière totalement aléatoire.





Analyse et Interprétation

La quasi-absence du Pin noir pourrait être attribuée à des conditions limitantes pour la régénération de cette espèce, telles que celles, altitudinales, signalées par TURREL (1979) ³ dans les Alpes-de-Haute-Provence. Pourtant, les cônes sont très abondants et il sera nécessaire de rechercher la cause : graines vaines ? mortalité précoce des semis pour des raisons climatiques ? couvert trop dense de la régénération de Hêtre ?

Quant au Hêtre, il semble s'être installé très tôt dans cette plantation de Pin noir : on a vu plus haut (page 34) que l'âge estimé (à partir des hauteurs atteintes) est situé entre 75 et 92 ans pour les plus grands hêtres. Le Hêtre est présent dans une très large gamme de dimensions, ce qui laisse penser que son installation s'est poursuivie constamment (N.B. : les peuplements-sources externes sont proches : 130 m), y compris probablement à partir des individus arrivés les premiers, devenus fructifères.

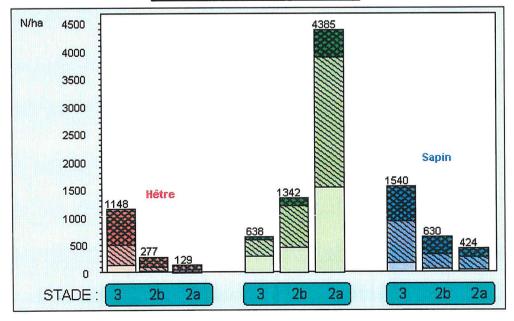
VARIANTE 2 : Régénérations mélangées de Sapin, Hêtre, et Pin sylvestre

Stades 2a, 2b, 3:

Répartition par stade et catégorie de hauteur

La présence de semis de Pin sylvestre vient naturellement du fait que le peuplement adulte est constitué de Pin sylvestre. Des peuplements de Hêtre et de Sapin pectiné sont situés non loin du site (au Nord). Ceci explique l'abondance de semis naturels de ces deux espèces.

Abondance des semis de Hêtre, Pin sylvestre et Sapin par stade et par catégorie (hauteur < 30 cm, 30-130 cm, >130 cm):



³ TURREL (1979), La régénération naturelle du pin noir dans le sud-est de la France (*Pinus nigra* Am. ssp. *nigricans* Host. var. *Austriaca* Endl.) - Étude de quelques peuplements des Alpes-de-Haute-Provence. *Document Interne (INRA Avignon, Station de Sylviculture Méditerranéenne)*, 79/2, 27 pp.

38

Sur cette figure présentant l'état actuel de la régénération, on note que la tendance générale du stade 2a au stade 3 est une augmentation du nombre de semis dans les trois catégories de taille (0-30 cm, 30-130 cm, > 130 cm) pour le Hêtre et le Sapin, mais une diminution pour le Pin sylvestre.

L'abondance des semis de Sapin pectiné et de Hêtre aux stades 2b et 3 s'explique probablement par le fait que les sites correspondants (et surtout le stade 3) sont plus proches des peuplements semenciers adultes du secteur.

Pour le Sapin, l'âge a été examiné sur un échantillon de semis de toutes tailles, pour chaque stade. Il s'agit en fait de l'âge compté à 30 cm du sol en comptant les pousses en hauteur, car un comptage fiable de l'âge total aurait nécessité de couper les semis (remarque : les pousses successives sont mesurées, et pas seulement comptées, en vue d'une étude de la dynamique de croissance de la régénération).

Ces comptages montrent :

- d'une part que l'apparition du Sapin a débuté il y a plus de 40 ans pour le stade 3, 35 ans pour le stade 2b et 25 ans pour le stade 2a ;
- d'autre part que des semis ont continué à apparaître dans chacun des sites au moins jusqu'à l'éclaircie la plus récente (1997).

L'abondance des semis de Pin sylvestre au stade 2a, - qui correspond au stade où le peuplement est le moins ouvert - peut paraître surprenante : en fait, la faible hauteur dominante (et donc la faible hauteur du couvert), le feuillage assez clair du Pin sylvestre (par rapport au Pin noir des sites du versant Sud) et la pente permettent probablement un éclairement suffisant. De plus, le facteur d'espacement est fort (35 %); même avant l'éclaircie la plus récente, il était d'environ 28 % (d'après les comptages de souches), ce qui est relativement fort.

Aux stades 2b et 3, la régénération de Pin sylvestre est moins développée, alors que le peuplement est plus ouvert. Ceci est probablement dû à la forte concurrence de la régénération de Hêtre et de Sapin ; les semis de ces deux essences y sont très nombreux et surtout de taille très supérieure à celle des semis de Pin, comme le montrent les deux tableaux ci-dessous :

Diamètres moyen, minimum et maximum (en cm) des 3 essences, pour les semis dépassant 1,30 m :

Diamètres des Semis > 130 cm :		Dmoy (cm)	Mini	Maxi	N/ha
Stade 2a:	SAPIN	4.9	0.6	15.1	153
	HÊTRE	3.9	0.5	18.2	85
	PIN Sylvestre	1.7	0.3	7.5	489
Stade 2b:	SAPIN	6.2	0. 5	26.2	305
	HÊTRE	4.8	0.3	20.9	188
	PIN Sylvestre	1.7	0.4	8.3	128
Stade 3:	SAPIN	5.8	0.3	25.3	628
	HÊTRE	5.4	0.2	25.5	647
	PIN Sylvestre	1.3	0.3	3.5	45

Hauteurs moyenne, minimum et maximum (en m) des 3 essences, pour l'échantillon des 5 semis les plus grands par cellule d'1 are, qui ont le plus de chances de constituer le futur peuplement adulte :

Hauteur des semis échantillons :		Hmoy (m)	Mini	Maxi	N/ha
Stade 2a :	SAPIN	2.81	0.22	8.58	162
	HÊTRE	4.35	0.65	9.20	53
	PIN Sylvestre	1.68	0.30	5.09	178
Stade 2b:	SAPIN	3.99	0.35	12.15	253
	HÊTRE	5.18	0.58	12.39	98
	PIN Sylvestre	1.59	0.40	5.65	72
Stade 3:	SAPIN	5.17	0.88	12.89	282
	HÊTRE	6.71	0.25	12.95	210
	PIN Sylvestre	1.88	1.88	1.88	2

N.B.: à raison de 5 semis par are, l'effectif par hectare, toutes espèces confondues, est de 500. La somme des effectifs du Sapin, du Hêtre et du Pin n'atteint pas toujours cette valeur, car des essences secondaires (Alisier blanc, Érable à feuille d'obier, voire Chêne pubescent) se sont parfois trouvées parmi les 5 plus grands semis de l'are.

La régénération de Hêtre et de Sapin est bien développée dans les stades où la surface terrière est la plus faible : en dépit de leur caractère sciaphile, ces deux essences trouvent donc des conditions d'apparition et de développement favorables dans les peuplements déjà assez fortement éclaircis.

Analyse des 3 stades - Interprétation et hypothèses :

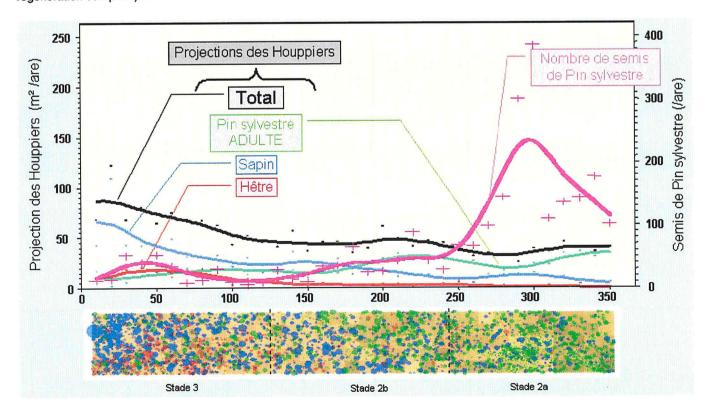
Si l'on considère l'ensemble de ces 3 stades, on peut donner l'interprétation suivante de la composition de la régénération et des dimensions atteintes par les semis des différentes essences :

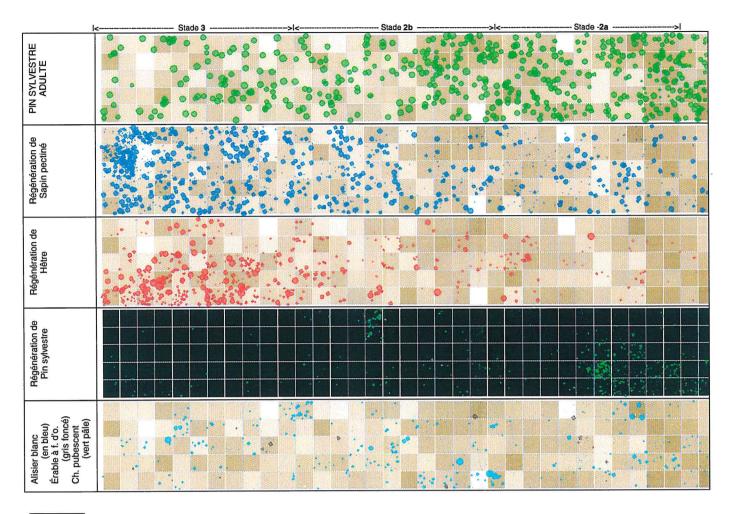
- le Sapin et le Hêtre se sont installés progressivement à partir de peuplements semenciers situés à quelques centaines de mètres, d'où leur plus fort développement sur les sites correspondants aux stades 3 et 2b (Remarque : les graines de Sapin sont probablement disséminées principalement par le vent, souvent très violent en versant Nord du Ventoux ; les faînes sont probablement dispersées principalement par des animaux).
- par les éclaircies, la gestion forestière a probablement favorisé leur installation, et surtout leur croissance, en ouvrant davantage le couvert dans ces sites ; la présence de ces semis, susceptibles de permettre à terme un renouvellement naturel du peuplement artificiel de Pin sylvestre, a incité le forestier à éclaircir plus fortement. Ainsi, certains semis de Hêtre et de Sapin dépassent déjà 12 m de hauteur alors que la hauteur dominante du peuplement de Pin n'est que de 13,5 m.
- sur le site correspondant au stade 2a, plus éloigné des peuplements-sources, Hêtre et Sapin sont encore peu présents ; le couvert n'a alors pas été ouvert aussi rapidement par le forestier ; il est cependant suffisamment clair pour permettre une régénération assez abondante du Pin sylvestre, peu concurrencé par le Hêtre ou le Sapin ; abondants, ces semis de Pin sont cependant de taille beaucoup plus réduite que les semis de Hêtre ou Sapin des stades 2b et 3 ; on peut se demander si une proportion suffisante pourront passer au stade fourré à la faveur de nouvelles coupes.

Le graphique ci-dessous montre que le couvert total, adultes + régénération en place de Hêtre et Sapin, est plus fort au stade 3 : le couvert de Sapin et Hêtre fait donc plus que compenser la disparition du couvert de Pin sylvestre adulte. De plus, ce couvert est plus proche du sol et probablement plus gênant pour la régénération basse, de Pin sylvestre notamment.

Les autres graphiques décrivent la répartition des différentes essences au long du gradient 2a -> 2b -> 3.

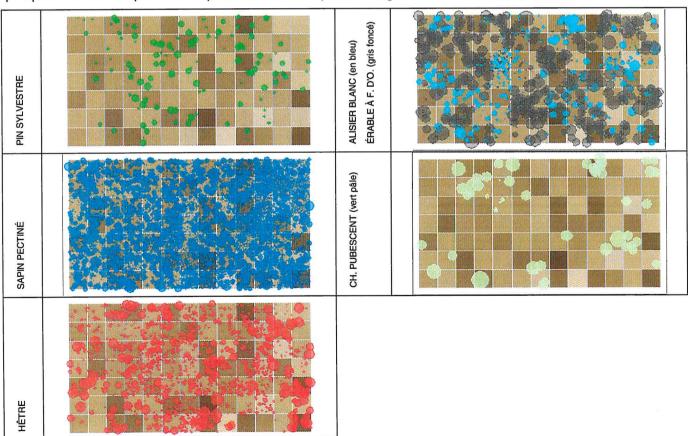
La couleur de fond des cellules est d'autant plus foncée que la surface terrière totale (toutes essences, tous diamètres, régénération comprise) est élevée.





Stade 4:

À ce stade, c'est le peuplement « adulte » qui constitue la composante étudiée dans le cadre de la dynamique de maturation, puisqu'elle est censée représenter ce qu'est devenue la composante « régénération » des stades antérieurs.



On note la prédominance très nette à ce stade du Sapin et du Hêtre. Les pins sylvestres sont pour la plupart des individus plus âgés (d'après une étude dendrochronologique de l'IMEP), correspondants vraisemblablement à un peuplement initial sous lequel se sont installés Sapin et Hêtre, à l'instar de ce qu'on observe aux stades précédents de cette variante 2.

Essences forestières « secondaires » :

- Érable à feuille d'obier (Acer opalus Miller),
- Alisier blanc (Sorbus aria (L.) Crantz),
- Chêne pubescent (Quercus pubescens Willd.)

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux de régénération observés pour ces espèces « secondaires » dans les sites de la variante 1.

On constate que:

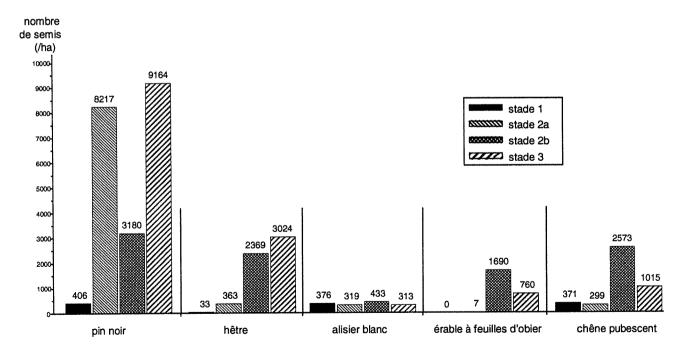
- les effectifs de ces 3 espèces sont loin d'être négligeables ; cumulés, ils sont équivalents ou supérieurs aux effectifs du Hêtre ; ceci rejoint le constat fait à l'échelle de la zone d'étude (cf. Tâche 1).
- comme pour les essences principales, la proportion de semis de grande taille (> 1,30 m) augmente au fil de l'avancement dans le dynamique de maturation.

Notons que le statut du Chêne pubescent est un peu particulier dans la mesure où il se trouve en limite supérieure de son aire.

Les constatations sont similaires pour la variante 2.

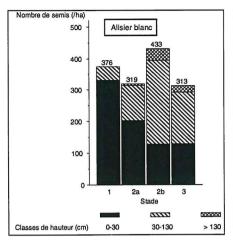
Par contre, sur l'unique site correspondant à la variante 1bis, au stade 3, l'Érable à feuille d'obier est absent et le Chêne pubescent est rare (30 semis/ha); seul l'Alisier blanc (310 semis/ha) est à un niveau comparable à son niveau dans la variante 1.

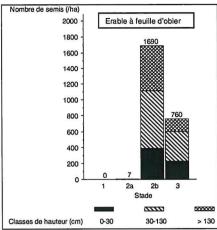
Variante 1 : Abondance comparée (toutes tailles confondues) des semis des 5 essences les plus représentées, par stade :

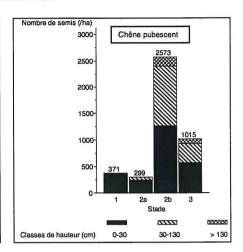


<u>Variante 1</u>: <u>Abondance des semis d'Alisier blanc, Érable à feuilles d'obier et Chêne pubescent,</u>

<u>par stade et par catégorie (h < 30 cm, 30-130 cm, >130 cm) :</u>







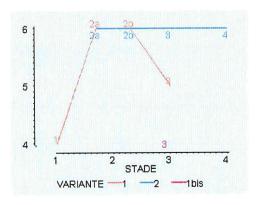
Richesse et Diversité:

composition spécifique et complexité structurale

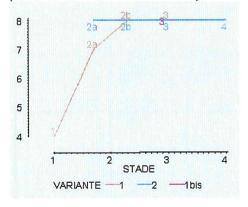
Des indices très simples de richesse et de diversité ont été calculés pour mettre en évidence les différences entre stades, et l'évolution au fil du processus de maturation.

Au plan de la composition spécifique,	Au plan de la structure dimensionnelle,				
7 espèces ont été considérées :	8 catégories de dimension (hauteur totale H ou D diamètre à 1,30 m du so				
	ont été choisies arbitrairement :				
- Pin noir	- H < 0,30 m				
- Pin sylvestre	- 0,30 m < H < 1,30 m				
- Hêtre	- D <= 1 cm				
- Sapin pectiné	- 1 cm < D <= 2 cm				
- Alisier blanc	- 2 cm < D <= 5 cm				
- Érable à feuille d'obier	- 5 cm < D <= 10 cm				
- Chêne pubescent	- 10 cm < D <= 20 cm				
	- 20 cm < D				

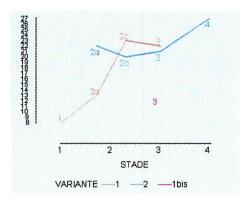
Richesse spécifique **globale** de chaque site : (nombres d'espèces présentes sur le site)



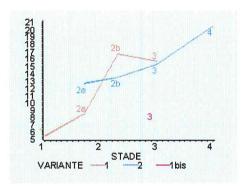
Richesse dimensionnelle **globale** de chaque site : (nombres de classes de dimension présentes sur le site)



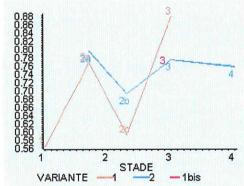
Richesse spécifique et dimensionnelle globale de chaque site (56 combinaisons [espèce x dimension] possibles) :



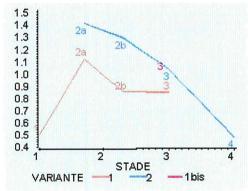
Richesse spécifique et dimensionnelle <u>movenne</u> de chaque site (56 combinaisons [espèce x dimension] possibles) : calculée par la **moyenne** de la richesse spécifique et dimensionnelle des cellules (de 10 m x 10 m) du site.



Diversité spécifique de chaque site : calculée par l'**écart-type** de la richesse spécifique des cellules (de 10 m x 10 m) du site .

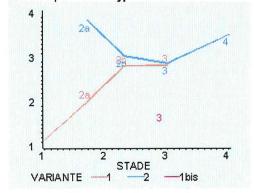


Diversité dimensionnelle de chaque site : calculée par l'**écart-type** de la richesse dimensionnelle des cellules (de 10 m x 10 m) du site.



Diversité combinée spécifique et dimensionnelle **moyenne** de chaque site (56 combinaisons [espèce x dimension] possibles):

calculée par l'écart-type de la richesse combinée spécifique et dimensionnelle des cellules (de 10 m x 10 m) du site.

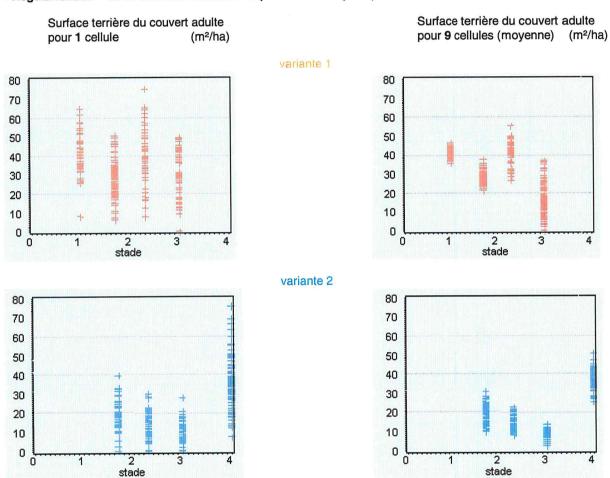


Ces indices confirment globalement que la dynamique de maturation tend à s'accompagner d'une augmentation de la richesse spécifique et dimensionnelle.

En termes de diversité, le résultat est un peu plus nuancé. Pour la variante 2, on note une certaine uniformisation intra-site : au stade 4, la richesse dimensionnelle est élevée mais assez semblable pour l'ensemble des cellules.

Rappelons à cette occasion que la plus ou moins grande homogénéité à l'intérieur d'un site dépend de l'échelle à laquelle elle est appréciée. Les graphiques ci-dessous illustrent le phénomène bien connu de « régularisation » qui apparaît lorsqu'on augmente la taille des cellules unitaires : toujours pour le stade 4 de la variante 2, on remarque ainsi que la diversité des surfaces terrières des cellules est beaucoup plus faible pour une cellule unitaire de 9 ares que pour une cellule unitaire d'un are.

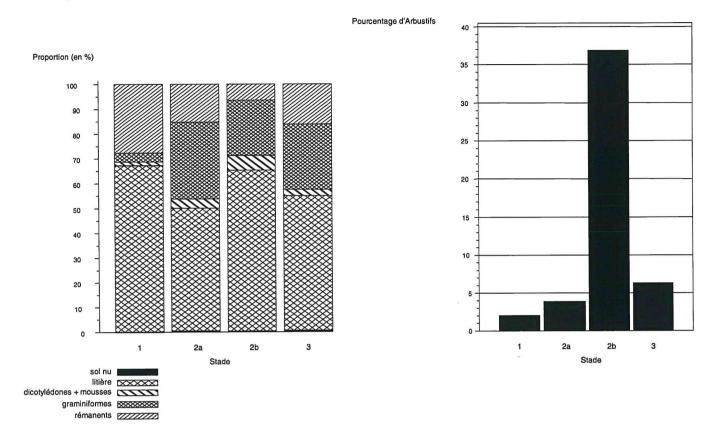
« Régularisation » de la diversité structurelle (...et bioclimatique ?)



À noter que les indices présentés quantifient l'hétérogénéité spatiale intra-site via la diversité inter-cellules, mais la structure de cette hétérogénéité spatiale n'est pas décrite pour autant (cf. plus haut § Structures spatiales intra-site).

Couverture au sol et arbustifs

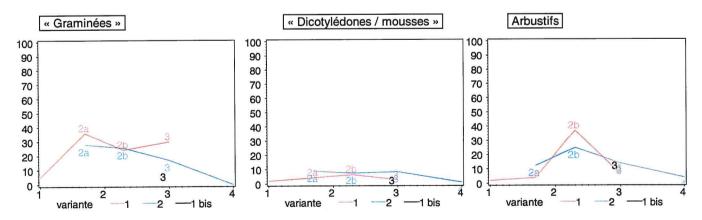
Proportions des différentes composantes au divers stades de la Variante 1 :



À noter que la liste des arbustifs (non présentée) est assez semblable sur les 4 sites. Leur recouvrement est très faible au stade 1 (couvert arboré encore très fermé, à l'exception des cloisonnements). Il est maximal (40 % en moyenne) au stade 2b, site pour lequel la dernière intervention est la plus ancienne (éclaircie de 1981); il est probable que la prochaine intervention supprimera une grande partie de ces arbustifs, (accidentellement lors de l'exploitation ou intentionnellement lors des travaux de remise en état qui suivent la coupe).

Tendances générales pour l'ensemble des variantes :

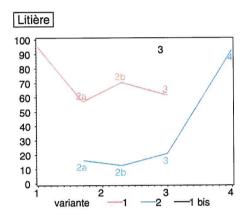
On note un 1^{er} groupe, pour lequel l'abondance est maximale pour les stades intermédiaires, et minimale pour les peuplements les plus fermés ou les moins perturbés par des coupes récentes (stade initial de la variante 1 et stade final de la variante 2).



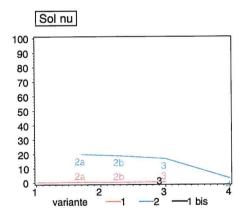
Pour les bois morts et rémanents, la tendance est similaire mais avec une forte subsistance de rémanents au stade 1 de la variante 1, qui correspondent à l'ouverture de cloisonnements en 1991 avec éclaircie dans les bandes restantes : le couvert reste malgré tout assez fermé (et encore bas) et la décomposition est lente.

Bois mort / rémanents 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0 variante 2 3 4 variante

Pour la litière, la tendance est grossièrement inverse, avec des valeurs maximales d'une part pour le stade initial de la variante 1 (tapis d'aiguilles de pin), d'autre part pour le stade final de la variante 2 et le stade 3 de la variante 1 bis (feuilles de hêtre).



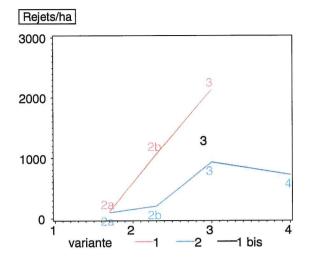
Enfin, pour le sol nu, les valeurs très faibles, en particulier pour la variante 1, ne permettent pas de dégager une tendance interprétable.

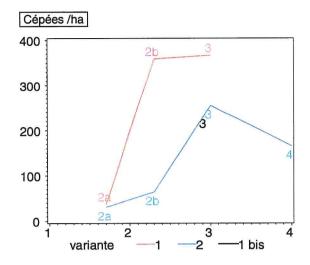


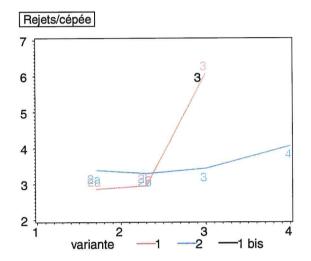
Au stade actuel, la recherche (non présentée ici) des liens entre le couvert actuel (évalué via la surface terrière de chaque cellule, ou des cellules avoisinantes), la couverture au sol, la régénération n'a pas permis de mettre en évidence des relations nettes. Par exemple, la présence d'un tapis de graminées est fréquente quand le couvert actuel est faible, mais les cas de tapis de graminées dans une cellule à couvert dense ne sont pas rares.

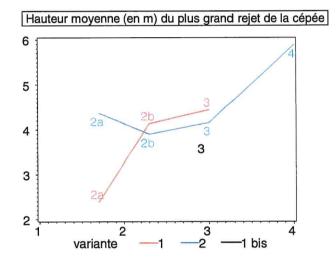
Dans certains cas, les semis sont abondants malgré un fort recouvrement de graminées : il est possible qu'au sein d'une cellule de 100 m², les semis soient situés à l'écart des graminées ; l'absence de spatialisation de l'information à l'intérieur d'une cellule ne permet pas de le savoir sans retour sur le terrain.

Cépées et Rejets de Hêtre









Tous les indicateurs présentés ici augmentent avec le stade d'avancement dans la dynamique, mais aussi avec le nombre d'interventions sylvicoles réalisées. On note d'ailleurs pour la variante 2, et par rapport au stade 3, un nombre de rejets et de cépées un peu plus faible au stade 4 où les coupes ont probablement été moins nombreuses. Toujours pour la variante 2, si on considère la suite 2a, 2b, 3, dans la même parcelle de gestion, et avec les mêmes dates d'intervention, on note un effectif de rejets et de cépées plus élevé là où (stade 3) davantage de pins sylvestres adultes ont été exploités : l'intensité de l'intervention, et probablement l'importance des dégâts occasionnés sur la régénération en place, paraît favoriser la multiplication du Hêtre par rejets.

La capacité à émettre des rejets confère probablement un avantage au Hêtre, y compris sans doute en situation naturelle où divers accidents peuvent amener à la destruction d'un tige de franc-pied et à une reprise à partir de la souche si elle survit. Cet élément est à prendre en compte dans la prévision de la dynamique de la régénération, au moins dans un contexte sylvicole actif.

Synthèse - Conclusions

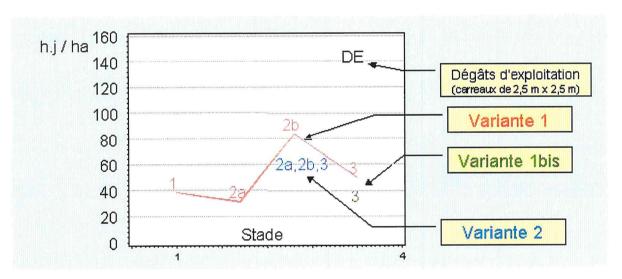
Conformément au « cahier des charges » de cette Tâche 3 « Description de la Structure des Peuplements », inscrit dans son titre, les éléments présentés dans ce bilan sont principalement descriptifs. Toutes les informations recueillies ne sont pas analysables et interprétables à ce stade.

Néanmoins, la comparaison des stades successifs dans la dynamique de maturation, avec ses variantes, a mis en évidence les grands traits qui caractérisent cette évolution : depuis des peuplements monospécifiques d'origine artificielle vers des mélanges d'espèces (hormis la variante 1bis, où il s'agit plutôt d'une succession, d'une substitution naturelle), d'allure plus proche des forêts naturelles (ou de l'image qu'on peut s'en faire).

Au-delà des enseignements qui en sont déjà tirés, l'ensemble des sites installés et décrits constitue de facto un « site-atelier » permettant d'entamer une approche diachronique sur un terme plus ou moins long, par la remesure de certaines caractéristiques.

Cet ensemble est disponible aussi pour accueillir des études portant sur d'autres composantes de la biodiversité ou d'autres approches de la dynamique et du fonctionnement, dès lors qu'elles sont compatibles avec l'échelle spatiale correspondant aux grilles de cellules installées.

Pour donner une idée de l'investissement réalisé, autrement que d'un point de vue financier, la figure ci-dessous présente, en journées de travail, et pour la majeure partie des sites, le coût (en homme.jour/ha) des opérations de description : installation, inventaire et mesure des adultes, des souches, de la régénération, y compris mesures de hauteurs, repérage et mesure des semis-échantillons, la couverture au sol.



S'y ajoutent d'autres opérations :

- description des cellules périphériques (sans la régénération) ;
- reconstitutions de croissance, sur pied ou destructives ;
- topographie, bornage;
- carottes, rondelles pour les estimations d'âge
- échantillons spéciaux : houppier Hêtre, houppier Sapin.

Le total est d'environ 30 semaines à 3 (répartis sur 3 ans).

Il faut encore y ajouter le travail au laboratoire pour la reconstitution de la croissance du Hêtre), l'ensemble du travail réalisé sur le site correspondant au stade 4 de la variante 2 (son installation a débuté avant le projet, dans le cadre de la thèse de F. Sagnard, équipe Génétique de l'INRA, URFM Avignon, ce qui n'a pas permis de comptabiliser le temps sur la même base que les autres sites), les recherches dans les archives, la constitution et le suivi des dossiers (sous forme papier et de fichiers informatiques).

Pour terminer, une remarque sur les structures spatiales intra-site :

Sauf dans les cas de gradients plus ou moins marqués (suite Stades 2a, 2b, 3 de la variante 2 ; Stade 2a de la variante 1), il n'apparaît pas de structure spatiale nette. Pourtant, aucune méthode spécifique d'analyse spatiale n'a été mise en œuvre pour détecter des structures plus diffuses.

Ceci résulte d'un constat et d'un choix :

- le <u>constat</u> que, en-dehors des deux cas cités où un facteur plus ou moins bien identifié imprime fortement la structure sur la globalité du site, les structures spatiales sont brouillées par la superposition d'influences multiples et intervenues tout au long de la vie du peuplement (aléas de l'installation des semis dans un milieu abiotique et une couverture au sol, sous un couvert, tous hétérogènes; coupes successives, y compris les dégâts d'abattage et les perturbations concentrées sur les voies de vidange des bois ...); constat qui débouche sur la conviction qu'il est illusoire de vouloir démêlée des influences à partir de la seule photographie de l'état actuel et d'informations plus ou moins incertaines sur les coupes (on n'a pas toujours pu distinguer les souches correspondant à la coupe la plus récente de celles correspondant à la précédente ou aux précédentes; il reste des incertitudes notables sur les dates précises d'exploitation des coupes).
- le choix de ne pas s'engager davantage dans une démarche descriptive mais au contraire d'investir dans la construction
 progressive d'un modèle de dynamique du peuplement (y compris la régénération) qui permettra à court terme de tester par simulation le poids respectif et les effets combinés des divers facteurs ; naturellement, ce choix suppose que des « segments » de suivi diachronique (périodes de 10 ans environ) permettent d'évaluer et de perfectionner ce modèle. L'investissement réalisé sur les sites décrits ici constitue une base de choix pour réaliser ce suivi.

Tâche 4: Dynamique des Peuplements

INRA URFM, ONF

Service exécutant : INRA - UR 629 (Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes - Avignon)

(+ ONF STIR : participation à la mise au point des protocoles).

Responsable: Ph. Dreyfus (INRA-URFM, Équipe « Croissance et conduite des Peuplements Forestiers »)

Objectif

Il s'agit de quantifier la dynamique actuelle du peuplement dans l'objectif de prévoir l'évolution de la structure des peuplements en fonction des interventions sylvicoles.

Les descriptions statiques fournies par la Tâche 3 permettent de cibler l'échantillonnage (choix des arbres dont la croissance va être mesurée). Les sites de mesure sont les mêmes que pour la Tâche 3.

Certaines relations ont pu être établies dans le cadre de cette tâche 4. Avec d'autres relations établies en dehors de ce projet, et adaptées (de manière simplifiée) au contexte étudié, elles ont été assemblées en un modèle provisoire de dynamique forestière destiné à la réalisation de simulations (cf. Tâche 8 et 2^{ème} Partie du rapport) de la dynamique des peuplements étudiés.

Méthodes mises en œuvre / Protocole mis en place :

Échantillon extensif de semis, en vue de remesures postérieures au projet

Dans chacun des sites étudiés, et pour chaque cellule, les **5 plus grands semis** sont repérés. Si parmi ces semis ne se trouvent pas au moins un individu des espèces principales (Pin noir et Hêtre pour la variante 1, Hêtre pour la variante 1 bis, Sapin, Hêtre et Pin sylvestre pour la variante 2), le plus grand individu de l'espèce (ou des espèces) manquante(s) est ajouté à cette sélection de cinq semis, ce qui porte fréquemment à 6 ou 7 le nombre de semis-échantillons par cellule.

Idéalement, l'échantillon aurait dû englober diverses catégories de statut concurrentiel : nous y avons renoncé faute de moyens suffisants (en pensant notamment au travail de remesure et d'entretien régulier du repérage). Des compléments ponctuels restent possibles.

À la fin de la saison de végétation qui suit la mise en place du site et la définition de cet échantillon, pour chaque semis échantillon, la hauteur totale (en cm) et - lorsque cette hauteur dépasse 1,30 m - le diamètre à 1,30 m du sol (en mm) sont mesurés ; le niveau de mesure du diamètre est matérialisé (peinture) (pour le Pin noir, et la variante 1, l'âge a aussi été estimé par comptage des verticilles de branches).

Les semis échantillons ne sont pas étiquetés, mais situés sur un plan sommaire, établi pour chaque cellule, et repérés par le niveau de mesure.

Ces semis feront l'objet d'une remesure, après 5 ans environ, afin de connaître la croissance pour chaque espèce, en fonction des conditions de compétition (couvert, densité intra-cellule ou groupe de cellules ...) et du statut individuel de chaque semis.

Après remesure, ces semis fourniront une partie de l'information nécessaire pour consolider le modèle provisoire - établi dans le cadre du présent projet - d'évolution des paramètres de structure (dimensions de la tige, du houppier, composition, âges), intégrant des sous-modèles simples de croissance, de régénération ou recrutement et de mortalité.

Reconstitution de croissance en hauteur sur un échantillon ciblé

Sur certains sites d'étude, correspondant aux stades 2a, 2b et 3 des variantes 1 et 2, la croissance en hauteur de semis des essences principales a été reconstituée sur un échantillon de cellules choisies de manière à prendre en compte des surfaces terrières variées. Ces semis appartiennent à toutes les classes de taille, de manière à intégrer l'effet du rang social (et de l'âge), en plus de l'effet du degré de fermeture du peuplement (et de l'historique des coupes).

Ces reconstitutions sont réalisées de manière non destructive, sur pied, pour le Pin noir (variante 1), le Pin sylvestre (variante 2) et le Sapin (variante 2), tous monocycliques et à pseudo-verticilles de branches bien marqués au sommet des pousses annuelles. Ces semis sont repérés sur un plan sommaire et étiquetés : possibilité de remesure, en hauteur et diamètre (y compris pour des individus dominés, ce qui comble en partie la lacune citée plus haut pour l'échantillon extensif) et suivi de leur rang social.

Pour le Hêtre (variantes 1 et 2), la reconstitution de croissance en hauteur a été réalisée de manière destructive (les critères architecturaux ⁴ permettant d'identifier les limites annuelles de croissance en hauteur ne sont pas suffisamment visibles depuis le sol pour des individus dépassant quelques mètres de hauteur).

⁴ NICOLINI É., 1996. Développement architectural et installation de la fourche chez le hêtre européen Fagus sylvatica L. Forêt Entreprise, 110, 37-46.

and the second

Ces données ont permis d'une part de confronter la cinétique de croissance en hauteur aux dates des éclaircies (lorsque la date d'exploitation est connue de manière précise), d'autre part d'analyser et de modéliser la croissance en hauteur récente en fonction du couvert, de la densité intra-cellule ou intra-groupe de cellules, de l'âge du semis et du potentiel de croissance lié à la station.

L'ensemble des données recueillies ont fait l'objet d'un ensemble assez complexe d'analyses, dont une partie des résultats est présentée plus bas (§ Croissance en hauteur de la régénération). Une nouvelle série d'analyses sera réalisée après le projet, en lien avec une approche fonctionnelle (cf. Partie 2 de ce rapport).

Relations décrivant le potentiel de croissance

Il s'agit de relations classiques liant la hauteur dominante d'un peuplement régulier monospécifique à l'âge et à une hauteur dominante de référence. Pour un emplacement donné, cette dernière est estimée via un catalogue de station valide pour le versant Sud du Mont-Ventoux ⁵ qui fournit des indications de hauteur atteinte par les différentes essences. Le même type d'information est obtenu pour le versant Nord, grâce à la synthèse cartographique réalisée par la CRAT (cf. § consacré à cette synthèse, à la fin de la 1 ère partie de ce rapport final, page 120).

Dans le cas présent, où les peuplements sont plutôt hétérogènes, cette relation n'indique pas une croissance réelle mais apporte une information - irremplaçable dans l'état actuel de nos connaissances - sur une croissance potentielle (fonction de l'espèce, de l'âge et de la station écologique) dans une situation qui sert de référence.

Les relations [Hauteur dominante - Âge - Indice de Fertilité] utilisées proviennent des sources suivantes, correspondant à des études menées en région méditerranéenne (mais parfois sur des petites régions, comme l'Aigoual, sans garantie quant à l'extrapolation aux situations étudiées sur le Mont-Ventoux) :

Pin noir d'Autriche:

TOTH J., TURREL M., 1983. La productivité du pin noir d'Autriche dans le sud-est de la France. Revue Forestière Française, 35, 111-121

Hêtre, Pin sylvestre, Sapin pectiné 6:

DUPLAT P., TRAN-HA M. 1986. Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre dans le Massif de l'Aigoual. *Bulletin Technique*, Office National des Forêts, Fontainebleau, France, 86-1, 33 pp. + annexes.

Chêne pubescent:

DUCHÉ Y., 1983. Établissement de classes de croissance des peuplements de chêne pubescent en Provence. Analyse de leurs facteurs explicatifs. 106 pp. + annexes (73 pp.), mémoire de 3ème année ENITEF, Cemagref Aix-en-Provence.

Aucune relation n'étant disponible pour le Pin à crochets - à notre connaissance -, nous avons retenu provisoirement la même relation que pour le Pin sylvestre.

Croissance en hauteur de la régénération

Croissance en hauteur et rang social - Influence des coupes

La figure ci-après, qui représente pour quelques cellules les courbes de croissance obtenues à partir des reconstitutions de croissance en hauteur, illustre deux points :

- d'une part, au sein d'une même cellule, donc sur une surface relativement réduite et a priori relativement homogène au plan de la station écologique et du couvert supérieur, il peut exister pour une même espèce, une forte diversité d'âge et de dynamique individuelle de croissance; ceci résulte en grande partie de la concurrence interne à la régénération : soit qu'ils figurent parmi les premiers semis installés, soit qu'ils aient bénéficié de conditions microlocales plus favorables (par ex., sol

NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.

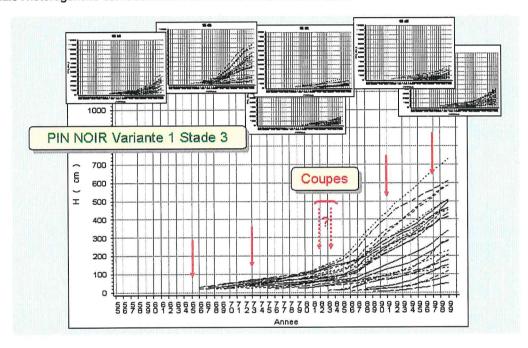
52

Une autre relation est disponible pour le Sapin pectiné dans la région: LAURENS D., 1998. Sylviculture du Sapin pectiné en Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur - Rapport de synthèse. Office National des Forêts, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur., 45 pp. + annexes. Son allure est sensiblement différente (ralentissement plus fort pour un âge élevé) de celle établie pour l'Aigoual. Nous avons choisi cette dernière, par souci de conserver une cohérence stationnelle et un positionnement relatif des 3 espèces, Hêtre, Sapin, Pin sylvestre (ceci dit, rien ne permet d'affirmer que les écarts entre espèces soient les mêmes au Ventoux; une étude récente (NOUALS D., 1999. Le Sapin pectiné en région Provence-Alpes-Côte d'Azur: Autécologie - Stations forestières. ONF-CRAT Manosque - DRONF PACA, 73 pp. + annexes) contient des éléments qui nous permettront peut-être de valider ou non ce choix.

plus favorable, ou absence de dégâts d'exploitation ...), les individus dominants ont tendance à le rester en montrant une croissance moyenne supérieure et une accélération de croissance plus marquée à l'occasion du retrait progressif du couvert supérieur (c'est-à-dire le peuplement de pins adultes, plantés);

- d'autre part, ces accélérations de croissance ne coïncident pas forcément avec les dates des coupes (pour autant qu'on puisse connaître avec précision les dates d'exploitation); il semble que ces coupes, en particulier les coupes progressives de régénération (dont c'est précisément l'une des fonctions), « autorisent » l'accélération de croissance, par la mise en lumière et la diminution de la concurrence racinaire des adultes, mais ne la provoquent pas obligatoirement et immédiatement : soit les semis ont besoin d'un temps de latence et d'adaptation (physiologique, par exemple, par la mise en place de feuilles ou aiguilles mieux adaptées aux nouvelles conditions d'éclairement), soit l'accélération de croissance se produit à l'occasion de conditions météorologiques favorables (par exemple, les fortes précipitations de l'année 1985, pour le cas présenté ici).

On peut noter aussi la diversité des dynamiques de croissance entre les 8 cellules représentées (du même site), même pour les individus les plus vigoureux; Il s'agit ici de cellules du site représentant le stade 3 de la variante 1, qui est particulièrement hétérogène, mais l'hétérogénéité est relativement forte aussi dans d'autres sites.



• Effet de la densité du peuplement sur la croissance en hauteur de la régénération

Pour séparer l'effet du statut concurrentiel individuel des semis de l'effet de la densité moyenne de la cellule, on a d'abord envisagé de n'analyser en premier lieu cet effet « densité » que sur les plus grands semis de chaque cellule où ont été opérées les reconstitutions de croissance. Ceci pose deux problèmes :

- dans une cellule, le plus grand semis de Pin noir (par exemple) n'est pas forcément en position dominante car il peut être en concurrence avec des semis d'autres espèces, plus grands ou aussi grands que lui ;
- pour le Hêtre, les reconstitutions ont dû être réalisées par des méthodes destructives, donc sur des individus moins nombreux (outre le caractère destructif, au sein des sites, l'opération de mesure au laboratoire est plus longue) et l'échantillon est réparti sur un grand nombre de cellules ; pour cette espèce, il est rare d'avoir mesuré des semis de statuts différents dans une même cellule, et il est donc difficile de comparer, dans un second temps, la croissance de semis dominés à celle de semis dominants dans les mêmes conditions locales de densité.

L'alternative choisie a consisté à considérer un accroissement relatif en hauteur, calculé comme le rapport de l'accroissement réel mesuré à l'accroissement potentiel pour l'espèce, pour le même âge et pour la station forestière considérée, estimé à partir de la relation Hauteur dominante [espèce, âge, fertilité stationnelle] (cf. § Relations décrivant le potentiel de croissance, plus haut). Ainsi, l'interférence (éventuelle ... et probable) d'une position concurrentielle défavorable sur la liaison entre croissance en hauteur et densité peut être prise en compte.

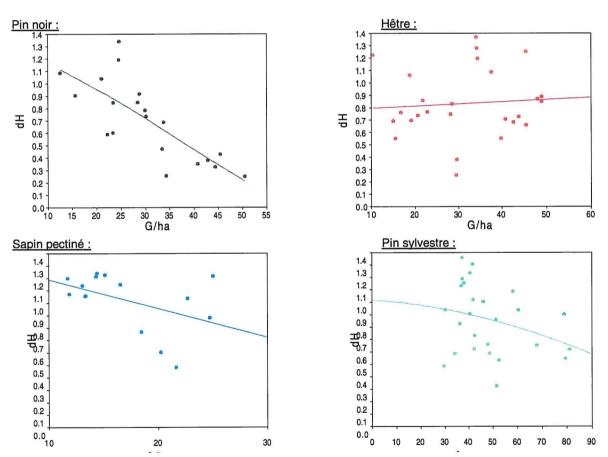
Les analyses ont porté sur la liaison entre d'une part, la croissance et d'autre part, soit la densité de la cellule, soit la densité moyenne de la cellule et des cellules qui l'entourent : dans tous les cas, c'est la densité moyenne des 9 cellules (la cellule considérée + les 8 qui l'entourent) qui paraît influencer le plus nettement la croissance en hauteur. Il n'a pas été possible de

tester une surface plus vaste (ne serait-ce que parce qu'on n'a décrit qu'une rangée de cellules périphériques autour de la grille centrale de chaque site).

La majorité des analyses ont concerné la croissance cumulée des dernières années (depuis la dernière coupe ou sur 5 ans si la coupe est plus ancienne) afin de pouvoir la relier à une densité « actuelle » ; le biais qui subsiste pourra être corrigé à partir d'une approche diachronique (remesure des hauteurs des 5-6-7 échantillons par cellule).

Les graphiques ci-dessous présentent :

- l'accroissement relatif en hauteur (noté dH), pour le semis le plus vigoureux (c'est-à-dire ayant le meilleur accroissement relatif) de la cellule pour l'espèce considérée ; on note que certaines valeurs dépassent 1 : ceci pourrait indiquer une croissance sous couvert meilleure que le potentiel correspondant à des arbres dominants sans couvert supérieur, ou bien que ce potentiel, relié à un type de station forestière, est sous-estimé pour le site considéré ;
- en fonction de la surface terrière rapportée à l'hectare (et notée G/ha) de l'ensemble constitué par la cellule et les 8 qui l'entourent, en incluant aussi bien les arbres adultes que la régénération en place (les semis de hauteur < 1,30 m n'interviennent évidemment pas dans cette surface terrière); en absence d'estimation plus directe du couvert (éclairement relatif, LAI ...), cette estimation de densité, liée à l'importance du couvert supérieur et intégrant le couvert proche de la régénération haute, s'est le plus souvent avérée mieux reliée à la croissance que des estimations moins indirectes du couvert (ces dernières, assez simplistes, utilisent les relations décrivant le diamètre du houppier, la distribution par classes, ainsi que le degré de chevauchement des projections des houppiers estimé à partir du facteur d'espacement relatif).



L'effet négatif de la surface terrière est très net pour le Pin noir.

Par contre, pour le Hêtre, on ne note aucune tendance significative, comme si la densité du peuplement et du couvert n'influençait pas sa croissance.

Pour le Sapin et le Pin sylvestre, les données proviennent du gradient constitué par la suite des stades 2a, 2b, 3 de la variante 2 (cf. Tâche 3).

Pour le Sapin, la tendance est négative et significative, mais beaucoup moins nette que pour le Pin noir.

Pour le Pin sylvestre, le pourcentage de couvert (arbres adultes + régénération, toujours sur les 9 cellules) est mieux relié (négativement) à la croissance que la surface terrière. Ceci s'explique par le fait que la régénération en place de Sapin et de Hêtre, très haute, engendre à surface terrière égale un couvert plus important (et aussi plus près du sol et plus sombre) que les

vieux pins sylvestres adultes, à houppier haut et clairsemé (cf. Tâche 3, page 40); on a vu que c'est la régénération vigoureuse de Sapin et de Hêtre qui paraît expliquer le déficit démographique des semis de Pin sylvestre aux stades 2b et 3, et cette concurrence intense et proche est sans doute aussi responsable d'une croissance réduite.

Ces éléments montrent à la fois l'existence de comportements spécifiques très tranchés et l'importance - évidente notamment dans le cas du Pin sylvestre sur les sites en versant Nord - de la structure verticale du peuplement.

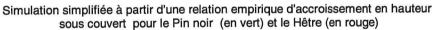
Divers compléments et approfondissements devront être apportés à ces analyses, notamment pour établir un indice plus performant que la surface terrière ou le couvert cumulé des différentes catégories de dimension des individus constituant le peuplement. Ce dernier ne peut être réduit simplement à deux étages bien distincts - couvert supérieur et régénération - car, aux stades 2b, 3 et 4 de la dynamique, se met en place progressivement un continuum depuis le sol jusqu'à l'étage supérieur. Nous envisageons aussi :

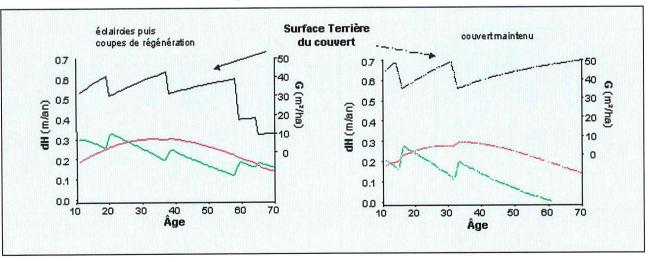
- de donner un poids plus faible à la régénération des 8 cellules entourant la cellule étudiée, considérant que la concurrence pour la lumière exercée par ces cellules voisines correspond principalement à la partie supérieure du peuplement qui les occupent et moins à l'ombre latérale de la régénération;
- de donner un poids différent à chacune de ces cellules voisines selon leur orientation : des essais exploratoires, en versant Sud, d'estimations d'éclairement à l'aide d'un horizontoscope ⁷, dont dispose la CRAT (ONF Manosque), laissent penser que les cellules situées au sud (ou sud-ouest) jouent un rôle plus déterminant que les autres ; des éléments provenant du suivi météo (cf. Tâche 6, page 65) vont dans le même sens (cf. page 128).

Ces deux points pourront être éclaircis par une approche bioclimatologique (cf. Perspectives scientifiques dans la 3ème Partie de ce rapport scientifique).

Notons enfin qu'une meilleure évaluation du potentiel stationnel est nécessaire si l'on souhaite utiliser comme référence un accroissement potentiel lié à l'espèce, à l'âge et à la station.

Les analyses qui viennent d'être présentées ont d'ores et déjà permis de construire des relations provisoires, intégrables au modèle de dynamique destiné aux simulations, décrivant la croissance en hauteur (prenant notamment en compte, par un terme réducteur, le statut concurrentiel des semis et donc applicable aussi pour les semis dominés, non pris en compte dans les analyses ci-dessus). La figure ci-dessous illustre de manière schématique ce que les différences de comportement entre le Pin noir et le Hêtre peuvent impliquer pour la croissance et la survie de l'un et de l'autre dans des situations sylvicoles qui diffèrent par le degré et la durée des ouvertures du couvert : alors que la croissance de semis de Hêtre est peu influencée, celle de semis de Pin noir maintenu sous couvert peut diminuer très fortement si le couvert reste fermé.





⁷ SCHÜTZ J.Ph., BRANG P., 1995. L'horizontoscope : un étonnant outil pratique de sylviculture, notamment en haute montagne. *Bulletin Technique*, Office National des Forêts, Fontainebleau, France, 28, 1-9.

Régénération:

Prise en compte des peuplements environnants

Une hypothèse classique dans le domaine de la modélisation de la dynamique forestière est de considérer que la régénération résulte d'une saturation du milieu par les graines des différentes espèces, mais avec une germination et une survie possibles uniquement pour celles qui y trouvent des conditions favorables.

Il nous est rapidement apparu, même en versant Sud où la régénération de Hêtre est omniprésente dans la zone d'étude, que cette hypothèse n'est pas satisfaisante dans la situation étudiée où l'on assiste à une (re)colonisation des pinèdes par le Hêtre et le Sapin à partir de peuplements-sources souvent très éloignés : de nombreuses observations montrent que le niveau atteint par la régénération ne résulte pas uniquement des conditions d'accueil dans le peuplement récepteur, mais aussi de la distance des sources dont dépend très probablement l'intensité des apports.

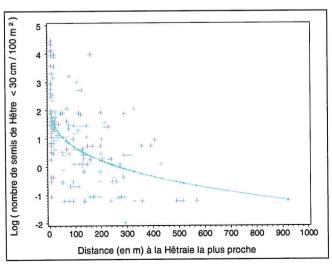
Les travaux menés dans l'équipe « Génétique » de l'URFM (INRA Avignon), en particulier la thèse (en cours d'achèvement) de F. Sagnard (« Dynamique de recolonisation de la hêtraie-sapinière sur le Mont-Ventoux : structure des peuplements forestiers et impacts sur la variabilité génétique des populations de sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) ») qui s'appuie d'ailleurs sur des sites installés et décrits en commun (tous les sites en versant Nord de notre étude), indiquent que les phénomènes de dispersion des graines à longue distance, pour être mal connus et difficiles à quantifier, n'en sont pas moins déterminants dans cette dynamique de recolonisation.

Les observations et comptages réalisés dans le cadre de la Tâche 1 « Carte de la dynamique du Hêtre, du Sapin et de la régénération des Pins », couplées aux informations disponibles dans le SIG de l'ONF (position géographique des différents types de peuplements dans la zone d'étude), constituent des éléments tangibles qui mettent en évidence le lien entre les niveaux de régénération observés et la distance du premier peuplement-source (cf. compte rendu de cette Tâche 1).

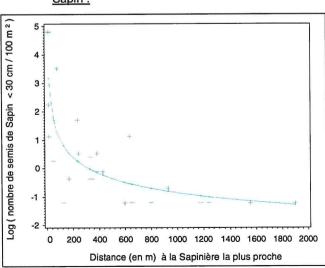
Reprenant ces éléments, nous avons ajusté, pour le Hêtre et le Sapin ⁸, des relations entre niveaux de régénération et distance du premier peuplement-source. Intégrées au modèle de dynamique, elles permettent, en simulation, d'estimer pour chaque cycle de simulation le nombre de semis apparaissant en un point donné par cumul de flux élémentaires issus des peuplements-sources plus ou moins distants. La régénération effective résulte du bilan de cette apparition et de la mortalité qui peut intervenir dès le cycle suivant (cf. § Mortalité, plus bas).

Deux versions successives de ces relations ont été établies, en prenant en compte comme variable explicative la distance au seul peuplement-source le plus proche. Les figures ci-dessous représentent graphiquement la deuxième version des relations obtenues. Le niveau de régénération considéré correspond à l'effectif observé des seuls semis de la classe 0-30 cm, divisé par le temps moyen (6 ans, avec une variabilité forte, contenue principalement dans l'intervalle 2 ans - 8 ans) mis par un Hêtre (nous ne disposons pas de données pour le Sapin) pour atteindre une hauteur 30 cm. Ce temps moyen est calculé à partir des données obtenues à l'occasion des reconstitutions de croissance en hauteur par méthode destructive. En toute rigueur, il faudrait considérer un intervalle de temps plus réduit puisque l'effectif observé correspond à la classe 0-30 cm et non à une hauteur de 30 cm; toutefois, les individus comptés sont situés dans une fourchette plus étroite (rappelons que les plantules de l'année sont exclues); de plus, pour diverses raisons, il nous paru préférable de risquer une sous-estimation des flux plutôt qu'une surestimation.





Sapin:



⁸ N.B. : une relation similaire a été établie pour le Pin noir, à partir du même type de données, et intégrée dans le modèle de dynamique.

56

On note à la fois une tendance nette à la décroissance du niveau de régénération avec la distance, et une très forte variabilité : à faible distance, le niveau de régénération peut quand même être très bas.

Ceci peut s'expliquer par des conditions défavorables dans le peuplement récepteur (un couvert très fermé par exemple, ou des conditions abiotiques, ou de concurrence par la végétation basse, limitantes pour l'espèce dispersée). Mais cette forte variabilité est aussi due au fait que l'on considère seulement le peuplement-source le plus proche alors qu'il n'est pas indifférent que le deuxième plus proche (et le 3ème, etc.) soit à une distance à peine supérieure ou au contraire très éloigné.

Nous ne décrirons donc pas le détail de ces premières tentatives de modélisation de l'apparition de la régénération.

Il est préférable d'envisager une nouvelle approche, décrite dans la 2ème Partie de ce rapport (« Résultats élaborés - Approches transdisciplinaires »), au § « Stade actuel de la dynamique de régénération : influence des peuplements-sources et du bioclimat sous couvert » (page 124), qui prend en compte la densité de peuplements-sources dans un rayon donné pour en déduire l'intensité de la régénération potentielle.

À noter enfin qu'il est envisageable de prendre en compte la puissance des sources : outre l'âge auquel les arbres deviennent fructifères (*cf.* § suivant « Âge de reproduction »), le nombre d'individus producteurs efficaces (souvent inférieur à l'effectif total) et leur niveau de production en lien avec leurs dimensions ⁹ sont des facteurs qui déterminent la puissance du flux émis par le peuplement.

Âge de reproduction

On manque d'information sur l'âge de reproduction des différentes espèces dans les conditions de la zone d'étude ou des situations similaires. Il s'agit sans doute d'un complément d'étude qui sera à réaliser au-delà du présent projet. Pour lors, nous n'avons recueilli qu'une information très fragmentaire issue de quelques références bibliographiques :

- pour le Pin noir, sur le Causse Méjan, Lepart *et al.* (2001) ¹⁰ indiquent une régénération efficace à proximité d'individus dont l'âge atteint au moins une trentaine d'années.
- pour le Hêtre, les valeurs évoquées pour des régions françaises plus septentrionales, de l'ordre de 60 ans, nous ont paru trop élevées au vu des quelques observations très ponctuelles faites dans la zone d'étude.

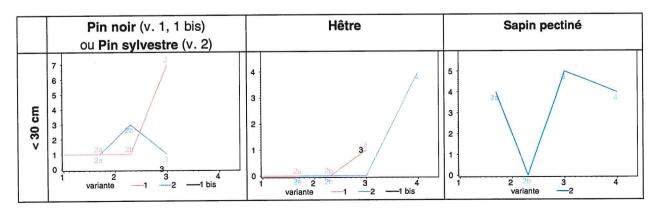
Faute d'information fiable localement, nous avons fixé provisoirement à 40 ans, l'âge correspondant à une reproduction efficace pour toutes les espèces prises en compte dans le modèle de régénération : Pin noir, Hêtre, Sapin pectiné, Pin sylvestre, Pin à crochets.

Mortalité

Mortalités observées

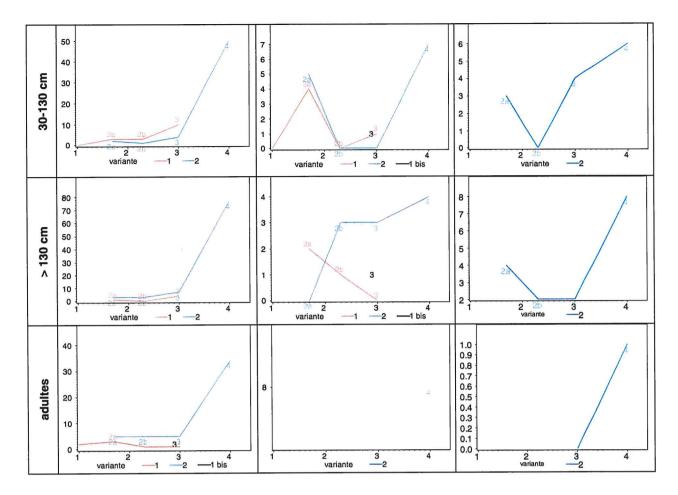
D'une manière générale, il est difficile d'estimer des probabilités temporelles de mortalité dans les peuplements forestiers, même en ce qui concerne les arbres adultes, bien que les troncs puissent subsister longtemps.

Les graphiques ci-dessous présentent les données de mortalité recueillies dans les sites étudiés, exprimées par le rapport (en %) entre le nombre d'individus morts compté au moment de la description d'une part (il ne s'agit donc pas réellement d'un taux de mortalité pour une période connue) et la somme des individus morts et vivants :



⁹ TURREL M., 2000. Production et dissémination des graines de Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Am. ssp. *nigricans* Host.) - Étude de quelques peuplements au Mont-Ventoux (84) et à Chardavon (04). *Document Interne (INRA Avignon, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes*), 16 pp. + annexes.

LEPART J., MARTIN A., MARTY P., DEBAIN S., 2001. La progression des pins sur les Causses: un phénomène difficilement contrôlable ? Forêt Méditerranéenne, 22, 23-28.



Les observations d'individus morts au sein de la régénération sont difficilement exploitables :

- faute d'observation antérieure (l'étude est synchronique), il n'est pas possible de dater la mort ;
- pour les petits semis, la durée de persistance des individus morts est certainement faible, variable et en tous cas inconnue; Pour ces deux raisons, entre autres, et en absence de suivi annuel, il n'est pas possible de déduire des probabilités annuelles de mortalité de la régénération à partir des effectifs observés (morts et vivants).

• Relation de mortalité pour les arbres adultes et les semis de hauteur >= 5 m

Pour la mortalité de ces individus, on utilise dans le modèle de dynamique la relation de probabilité établie pour le Pin noir en peuplements homogènes (cette relation est du type : « Probabilité mortalité annuelle = f (surface terrière du peuplement, statut social (dimension relative) de l'individu) »). La hauteur de 5 m a été choisie car elle correspond à la limite inférieure du domaine de calibration de ce modèle.

Relation de mortalité pour les semis de hauteur comprise entre 0 et 30 cm

Pour la mortalité à ce stade précoce de la régénération, où il est difficile de comptabiliser les individus morts qui disparaissent rapidement (notamment du fait des épisodes neigeux qui se produisent presque chaque année dans la zone étudiée), on tient compte du fait que la relation (cf. § Régénération, plus haut) qui décrit l'apparition de nouveaux semis de 30 cm de hauteur représente en fait un bilan des semis apparus et de ceux disparus : les données ayant servi à la calibrer ne permettent pas de faire la part de ce qui germe et de ce qui meurt.

Par conséquent, il n'a pas été nécessaire de développer une relation prenant en compte la mortalité de ces petits semis.

Relation de mortalité pour les semis de hauteur comprise entre 30 cm et 5 m : seuil de croissance relative

Nous avons fait l'hypothèse que la probabilité de mortalité d'un semis est d'autant plus forte que sa croissance relative en hauteur est plus faible : cette croissance relative est calculée par rapport à un potentiel de croissance (déjà évoqué, page 53, au § « Croissance en hauteur de la régénération ») tenant compte de la station forestière, de l'âge et de l'espèce du semis concerné.

Faute d'éléments suffisants pour modéliser ce lien entre taux de mortalité et croissance relative, nous avons défini arbitrairement un seuil de croissance relative en-dessous duquel la probabilité annuelle de mortalité est de 0,5. Autrement dit, sous ce seuil, il peut subsister des semis (ce qui est en accord avec les observations réalisées), mais leurs chances de survie à long terme sont réduites si leur croissance relative ne s'améliore pas. Il est notoire que le Sapin pectiné peut reprendre une croissance active après éclaircie même s'il a longtemps végété sous couvert : ceci a été intégré en choisissant un seuil

arbitraire plus bas pour cette espèce, ainsi que pour le Hêtre, autre espèce tolérante à l'ombrage. Le seuil est fixé à 30% du potentiel pour les Pins (noir, sylvestre, à crochets), et à 15% pour le Hêtre, le Sapin pectiné.

Au-dessus de ce seuil, la mortalité des semis est considérée comme négligeable; dès que leur hauteur atteint 5 m, on considère que c'est la relation retenue pour les arbres adultes et semis de plus de 5 m qui devient valide.

Il est assez raisonnable de considérer que même s'ils survivent, les semis très peu vigoureux ne contribuent plus de manière significative à la dynamique, ni en exerçant une concurrence significative vis-à-vis d'individus plus vigoureux, ni en participant au futur peuplement adulte, à moins que les conditions ne favorisent pas à nouveau leur croissance. Même dans ce cas, leur contribution restera très réduite dès lors qu'il existe localement des semis plus vigoureux, en position dominante dans la régénération en place.

Il est cependant clair que l'identification de ces seuils, ou plutôt l'évaluation de la probabilité de mortalité en fonction de la croissance relative (par rapport au potentiel défini plus haut), sera une priorité pour l'amélioration du modèle, au-delà du présent projet.

Structure du modèle provisoire de dynamique

Relations constitutives du modèle

Le tableau ci-dessous indique, pour chaque variable prise en compte, l'origine des relations ou des informations disponibles en fin de projet :

- « interne » signifie que la relation a été établie dans le cadre même du projet ;
- « externe » signifie que la relation a été établie dans le cadre d'études antérieures ou concomitantes ;
- « littérature » signifie que l'information retenue est tirée directement de données bibliographiques, ou qu'elle en est déduite, en l'adaptant au contexte étudié.

Variable considérée	Potentiel = f (âge, station, espèce)	Adultes et ht >= 5m	Régénération (avec ht < 5 m)
dHdom	externe		
dH		externe	interne
dD		externe	externe
mortalité		externe	
recrutement			interne
âge de reproduction		littérature	

L'ensemble des relations concernant les arbres « adultes » (à partir d'une hauteur totale de 5 m) proviennent d'études antérieures, portant essentiellement sur le Pin noir d'Autriche en peuplements homogènes. Les mêmes relations sont appliquées aux autres espèces, à l'exception de la relation liant la hauteur dominante à l'âge et aux potentialités du milieu via la hauteur dominante à un âge de référence, pour laquelle on dispose d'une relation pour chaque espèce (sauf pour le Pin à crochets et pour deux essences secondaires : Alisier blanc et Érable à feuille d'obier, cf. page 52).

Soulignons que cette relation *Hdom* [âge, fertilité stationnelle] joue un rôle central dans le modèle pour les peuplements réguliers de Pin noir d'Autriche (comme d'ailleurs dans la plupart des modèles de croissance de type « arbre - indépendant des distances »), sur lequel on s'appuie largement ici : c'est cette relation qui détermine le potentiel de croissance en hauteur et en diamètre. Le fait de disposer d'une version de cette relation pour la plupart des espèces principales concernées ici permet de rendre compte des différences de vigueur entre les espèces ou entre les couples [station, espèce] ; c'est en quelque sorte, et faute de mieux, une 1ère adaptation, grossière mais rationnelle, du modèle Pin noir aux autres essences.

Il n'en reste pas moins que l'utilisation des autres relations, établies pour le seul Pin noir, aux différentes espèces ne peut être qu'une mesure très provisoire ; il est indispensable de combler rapidement les lacunes existant pour les autres espèces dans notre zone d'étude.

Remarques concernant la croissance en diamètre :

- à ce stade, nous ne disposons d'aucunes données d'accroissement individuel en diamètre pour la régénération (ni d'ailleurs pour les arbres adultes); il ne nous a pas semblé raisonnable de remesurer les semis échantillons à la fin de ce projet, car l'accroissement obtenu n'aurait couvert qu'une période de 1 à 3 saisons de végétation, trop peu pour ne pas être tributaire des variations climatiques inter-annuelles; nous avons évité aussi les approches rétrospectives qui, à la différence de celles réalisées pour la croissance en hauteur (au moins pour les résineux étudiés), sont forcément destructives ou traumatisantes

(même s'il s'agit de sondages à la tarière, car les individus sont encore de petit diamètre), sans oublier le biais inévitable lié à l'impossibilité de déterminer très précisément les conditions de concurrence au début de la période d'accroissement reconstitué ;

- au stade de la régénération sous couvert, la croissance en diamètre et le diamètre sont *a priori* moins révélateurs de la progression des semis et de l'avancement de la dynamique que la croissance en hauteur et la hauteur ; nous n'avons donc pas jugé indispensable de combler immédiatement les lacunes sur cette variable ;
- pour les arbres adultes et semis de plus de 5 m, nous avons utilisé une relation d'accroissement radiale du type :
 - dD = POT(espèce, âge indiv., station) x RED1 (densité, couvert) x RED2 (statut concurrentiel individuel)
 - où le terme « potentiel » dépend de l'espèce (via la relation Hdom [âge, fertilité stationnelle]), alors que les deux termes « réducteurs » sont établis pour le seul Pin noir ;
- pour les semis de hauteur comprise entre 1,30 m et 5 m, une relation provisoire a été utilisée ; générique et indépendante de l'espèce, elle fait intervenir une croissance potentielle en diamètre (croissance libre) et en hauteur, ainsi qu'un espacement relatif.

Mode de fonctionnement du modèle

L'ensemble des informations et relations disponibles permet un fonctionnement du modèle, décrit très schématiquement par la succession d'étapes suivante :

- estimation de la régénération (semis de 30 cm, de Hêtre, Pins et, en versant Nord, de Sapin) à partir du cumul des « flux » provenant des peuplements environnants ;
- pour chaque individu:
 - estimation du potentiel de croissance en fonction de l'espèce, de l'âge, de la station forestière (via l'indice de fertilité correspondant et la relation Hauteur dominante [espèce, âge, fertilité stationnelle]) ;
 - estimation de la croissance en hauteur, en fonction de ce potentiel, de la compétition au sein de la cellule, et du statut concurrentiel (fonction de la taille relative de l'individu) ;
 - évaluation de la probabilité de mortalité et élimination des individus concernés ;
 - si survie, estimation de la croissance en diamètre ;
- mise à jour des caractéristiques de chaque cellule et du peuplement.

Ce modèle est de type déterministe, à l'exception de la mortalité : la probabilité étant généralement différente de 0 et de 1, l'application nécessite un tirage aléatoire qui permet de décider (selon la probabilité calculée) de l'élimination ou non de chaque individu concerné.

L'intégration d'autres composantes stochastiques peut être envisagé pour obtenir une meilleure représentation de la variabilité des caractéristiques des peuplements. En revanche, elle rend plus difficile l'évaluation du comportement du modèle. Pour l'instant, nous avons préféré conserver un modèle très déterministe, d'autant que nous ne disposons pas de tous les éléments permettant de décrire et modéliser correctement les composantes aléatoires.

Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de cette Tâche 4 du projet a permis de construire certaines relations provisoires (notamment pour la croissance en hauteur), qui restent à perfectionner, et de dresser un inventaire des relations nécessaires, soit disponibles par ailleurs, soit qui reste à construire pour un contexte écologique du type de celui étudié.

Un premier modèle de dynamique forestière a aussi été construit, en tirant parti des connaissances disponibles, en les adaptant si nécessaire, de la manière qui nous a semblé la plus rationnelle.

Le caractère provisoire de ce modèle est à garder à l'esprit, d'une part pour examiner de manière critique les premières simulations proposées (cf. Tâche 8 et Partie 2 de ce rapport), d'autre part pour définir des priorités pour l'amélioration de ses composantes via l'acquisition de nouvelles données selon des protocoles optimisés et la mise en œuvre d'approches complémentaires (cf. Parties 2 et 3 de ce rapport).

Tâche 5 : Description des Stations forestières ONF CRAT Caractérisation écologique des sites d'étude - Description des humus

Service exécutant: ONF Cellule Régionale d'Appui Technique (Manosque) Responsables: J.Ladier, D. Nouals

Objectif et Méthode

Objectifs:

- 1. S'assurer que les sites d'étude sont dans des biotopes homogènes et comparables sur chaque versant, sachant qu'ils sont censés correspondre à divers stades d'évolution d'une même dynamique végétale.
- 2. Déterminer et quantifier les éventuels facteurs de variation susceptibles d'influencer d'une part la production forestière et la dynamique des peuplements, d'autre part la composition floristique.

Méthode pour l'acquisition des données :

Pour chacun des sites étudiés, les observations suivantes ont été réalisées :

- Ouverture d'une fosse pédologique, à proximité du centre de la placette : description du profil, détermination de la nature de la roche, mesure de l'épaisseur de sol prospectable, observation de la décarbonatation de la terre fine, nature et épaisseur d'une colluvion éventuelle ...
- Observation des humus sur 4 placeaux répartis sur la placette : (l'emplacement des placeaux « humus » coïncide avec l'emplacement des relevés exhaustifs de la végétation, réalisés par l'IMEP; cf. Tâche 7)
 - recouvrement, épaisseur et composition des horizons de litière (Oln, Olt, Olv, OF) ;
 - recouvrement et épaisseur de l'horizon OH ;
 - description de l'horizon A :épaisseur, couleur, carbonatation, structure (forme, taille et netteté des agrégats), compacité, porosité.
- Observation d'espèces indicatrices données par les catalogues de stations.

Méthode d'analyse

Détermination du type de station et des facteurs limitants sur la base des catalogues existants :

O pour le versant Sud :

- « Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux » par Nouals D. et Jappiot M., 1996. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes

O pour le versant Nord :

- « Relations milieu-production, application au Pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales » par d'Épenoux F., 1992. Thèse de doctorat Université J. Fourier, Grenoble I. Cemagref Aix-en-Provence, 226 pp.
- « Étude des milieux forestiers et de la dynamique végétale dans la zone du Pin noir d'Autriche (préalpes du Sud marno-calcaires). 3. Substrats et paysages, première approche des unités écologiques. » par Ladier J., Nouals D., Bonnassieux D., 1996. ONF PACA (CRAT Manosque), 36 pp.

Construction de trois variables synthétiques susceptibles de caractériser simplement la morphologie et le fonctionnement des humus :

- epMO, épaisseur de matière organique en mm : égale à la somme OH+OF+Olv (l'épaisseur de la litière de l'année, Oln et Olt, n'est pas comptée car elle dépend beaucoup de la saison)
- Acti, activité biologique : évaluation du fonctionnement par l'épaisseur et la structure de l'horizon A
 Elle est décroissante de 1 à 3, sachant que la différence entre 1 et 2 est très faible et que la classe 3 indique encore une bonne activité
- carbo, carbonatation: 1 = pas de réaction à HCI, humus décarbonaté
 - 2 = réaction à HCI localisée ou sur grain, décarbonatation partielle
 - 3 = réaction à HCI, humus carbonaté

Remarque sur l'opposition de versants :

Les sites du versant sud et du versant nord se distinguent nettement :

- climatiquement, ils présentent les fortes différences habituellement observées entre adrets et ubac.
- · géomorphologiquement,
- les sites du versant sud sont situés sur une pente douce constituée par des bancs de calcaires compacts du crétacé redressés vers le nord, et en pendage conforme. Les sols se sont généralement formés dans des matériaux peu épais issus de l'altération du calcaire en place.
- les sites du versant nord sont situés sur des pentes fortes, où les calcaires du crétacé affleurent en pendage inverse. Ils sont, sur les versants réglés (où sont implantées les placettes) recouverts de colluvions.

Les versants nord et sud du Ventoux sont d'ailleurs répartis dans deux petites régions naturelles différentes au sens du Cemagref (Ripert, Nouals 1988).

ECOFOR - BGF - Ventoux - 1998-2001 61

Caractérisation écologique de chaque site - Homogénéité intra-site

Variante 1 : Pin => Pin + Hêtre (versant sud)

Document de référence : les stations forestières des plateaux et Monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux (D. Nouals, M. Jappiot 1995).

stade 1 - parcelle 102 - Clare

Type de station : MM2, sous type a (calcaricole de versant à pente faible en climat montagnard inférieur, sur altérite en place).

• Type de sol : calcosol à graviers issu de calcaire dur à silex moyennement fracturé

Profondeur facilement prospectable : 65 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 60 %.

- · Type d'humus
 - Horizons holorganiques de 35 à 60 mm d'épaisseur composés exclusivement d'aiguilles de pin noir. Présence constante d'horizon OF. Présence fréquente d'horizon OH de 5 à 10 mm d'épaisseur.
 - Horizon A Effervescence à HCl nulle à localisée, très forte activité biologique due aux lombrics, structure grumeleuse nette.
 - Humus de type amphimull actif, calcique à carbonaté .
- Pas d'hétérogénéité apparente sur la placette.

stade 2a - parcelle 88 - Clare

- Type de station MM2, sous type a (calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur sur altérite en place).
- Type de sol : calcosol issu de calcaire un peu argileux, fracturé.

Profondeur facilement prospectable: 40 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 70 %.

- · Type d'humus
 - Horizons holorganiques de 20 à 50 mm d'épaisseur, composés surtout d'aiguilles de pin noir (80 %), mais aussi d'herbacées et de feuilles de hêtre. Présence constante d'horizon OF (3 à 25 mm) et présence fréquente d'horizon OH (0 à 20 mm).
 - Horizon A: réaction à HCI nette à forte, structure grumeleuse très nette bonne activité biologique due aux lombrics.
 - Humus de type amphimull carbonaté, actif.
- · Pas d'hétérogénéité apparente sur la placette.

Stade 2b - parcelle 93 - Rocassou

- Type de station MM2, sous type a (calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place).
- Type de sol : calcosol épais, pierrique, à couverture colluviale mince, issu de calcaire crayeux, intensément fracturé.

Profondeur facilement prospectable: > 90 cm.

Charge moyenne en éléments grossiers : 80 %.

- Type d'humus
 - Horizons holorganiques de 25 à 70 mm d'épaisseur, composés de 50 à 90 % d'aiguilles de pin noir, ainsi que de feuilles de hêtre, chêne et divers. Présence constante d'horizons OF de 2 à 25 mm. OH fréquent.
 - Horizon A toujours décarbonaté, à structure grumeleuse nette à très nette, à forte activité biologique due aux lombrics.
 - Humus de type amphimull calcique, actif.
- Pas d'hétérogénéité apparente sur la placette.

Stade 3 - parcelle 15 - Perrache

- Type de station MM2, sous type a (calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place).
- Type de sol : Rendosol pierrique à couverture colluviale, issu de calcaire en plaquettes intensément fracturé.

Profondeur facilement prospectable : > 80 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 60 %.

Type d'humus

- Horizons holorganiques de 45 à 75 mm, composés d'aiguilles de pin noir (20 à 100 %) et de feuilles hêtres (0 à 80 %). Présence constante d'horizon OF (5 à 10 mm) et d'horizon OH (25 à 50 mm).
- Horizon A carbonaté ou non à structure grumeleuse nette à très nette, à activité biologique moyenne due aux lombrics.
- Pas d'hétérogénéité apparente sur la placette.

Variante 1b : Pin => Hêtre (versant sud)

Stade 3 - parcelle 23 - la baraque d'Aurel

- Type de station : S2 (calcicole de versant en pente faible, en climat montagnard moyen sur altérite et colluvion mince).
- Type de sol : calcosol pierrique, issu de calcaire disloqué, avec colluvion mince de calcaire siliceux.
 Profondeur facilement prospectable : > 80 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 70 %.

- Type d'humus
 - Horizons holorganiques de 25 à 30 mm, composés d'aiguilles de pin noir (10 à 20 %) et de feuilles hêtre (0 à 80 %). Horizon OF très mince (1 mm) et irrégulier en surface, horizon OH présent localement (5 mm).
 - Horizon A colluvial décarbonaté, à structure grumeleuse nette, bonne activité biologique due aux lombrics.
- Sol moins épais et plus pierrique dès la surface dans la partie nord-est de la placette.

Variante 2 : Pin => Sapin + Hêtre + Pin (versant nord)

Stades 2a-2b-3 - parcelle 34

- Type de station : colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard moyen d'ubac.
- Type de sol : Rendosol issu de colluvion calcaire caillouteuse sur altérite de calcaire argileux bien disloqué.

Profondeur facilement prospectable: 80 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 60 %.

- Type d'humus
 - Horizons holorganiques : soit épais (70-80 mm) soit semblant absent. Dans ce cas, horizon OF seul, mélangé au pavage de surface, la litière (Oln et Olv) étant absente. Horizon OF constant (20-25 mm). Horizon OH parfois absent, parfois épais (50 mm).
 - Horizons A généralement carbonatés, à structure grumeleuse nette à très nette.
 - Humus de type amphimull carbonaté, actif.
- Hétérogénéité: en apparence, la parcelle présente une hétérogénéité de matériau, puisqu'il existe une partie à aspect d'éboulis vif (pavage continu de pierre et cailloux sans couverture organique). Il semble que cet aspect révèle plutôt un appauvrissement en fines du matériau de surface, dû à des circulations d'eau superficielles empruntant des passages préférentiels. Nous estimons que le matériau est plutôt homogène, et présente des potentialités identiques sur l'ensemble de la placette, mais que l'appauvrissement localisé des horizons de surface peut avoir des effets sur la composition de la strate herbacée, et éventuellement sur la régénération.

Stade 4 - parcelle 5 - Combe de Pré-long

- Type de station : colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard inférieur d'ubac.
- Type de sol : Calcosol issu de colluvion calcaire caillouteuse sur altérite de calcaire compact.

Profondeur facilement prospectable: 50 cm

Charge moyenne en éléments grossiers : 50 %

- Type d'humus
 - Horizons holorganiques : de 35 à 75 mm comprenant 80 % de feuilles de Hêtre, le reste provenant de Sapin pectiné, Pin sylvestre, Érable à feuilles d'Obier.

Présence constante d'horizon OF (10 à 25 mm) et d'horizon OH, sporadique à épais (jusqu'à 35 mm).

- Horizons A carbonatés ou non, à structure grumeleuse nette à très nette. Forte activité biologique.
- Humus de type amphimull actif, calcique à carbonaté.
- Hétérogénéité : la plus grande partie de la placette est recouverte de colluvion, mais l'épaisseur de celle-ci peut varier et notamment descendre en dessous de 50 cm.

ECOFOR - BGF - Ventoux - 1998-2001 63

Au bas de la placette (angle L14-C1), la colluvion est absente, et le matériau est constitué d'altérite en place (argile de décarbonatation et blocs calcaires). Cela représente une faible surface dans la placette.

Comparaisons des sites

Les sites des versants nord et sud sont bien sûr considérés séparément.

Versant sud

Au vu des fosses pédologiques, les potentialités des sites « Perrache » (variante 1, stade 3), « Rocassou » (variante 1, stade 2b) et « baraque d'Aurel » (variante 1 bis, stade 3) sont très proches (calcaire intensément fracturé en profondeur, sur plateau), et certainement meilleures que celles des sites « de Clare » (variante 1, stades 1 et 2a) (présence d'un Horizon C d'altération compact).

Parmi les trois premiers, le site de la baraque d'Aurel se distingue par une altitude plus élevée, en limite de l'étage montagnard moyen, et une décarbonatation un peu plus poussée, qui permet l'apparition d'espèces acidiphiles (*Veronica officinalis*). Ces éléments sont *a priori* plus favorables au Hêtre qu'au Pin noir.

Parmi les sites de Clare, la parcelle 88 (variante 1, stade 2a) semble légèrement moins favorable que la parcelle 102 (variante 1, stade 1) (matériau prospectable plus mince et pente un peu plus nette).

Versant nord

Il est difficile de comparer les deux localisations, car les altitudes et les positions topographiques sont différentes. D'un côté, le site de la parcelle 34 (variante 2, stades 2a, 2b, 3) est situé à la base de l'étage montagnard moyen, et est à priori plus favorable à la survie du Sapin ; de l'autre côté, la situation topographique particulière de la Combe de Pré-long (bas de versant confiné ; variante 2, stade 4) peut compenser la faiblesse de l'altitude (950 m), généralement défavorable à l'état sanitaire des sapinières, même si les croissances peuvent être correctes.

Tâche 6: Suivi météorologique

INRA Agro Clim - INRA URFM

Service exécutant: INRA - Agro Clim (anciennement STEFCE)

Responsable: F. Huard (INRA – Agro Clim)
Participation: A. Porté (INRA – URFM)

Objectif

La régénération et la croissance des arbres en peuplement forestier est largement influencée par les conditions climatiques locales. Il est donc apparu nécessaire de disposer de données climatiques sur les peuplements forestiers représentant les stades de la dynamique de maturation afin d'un part de replacer les sites étudiés par rapport aux types climatiques du Mont-Ventoux et d'autre part de fournir les éléments météorologiques nécessaires à l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre général de l'étude et dans chaque discipline (flore, potentialités forestières).

Des limitations financières n'ont pas permis d'équiper l'ensemble des sites, aussi nous avons restreint l'étude climatologique complète des sites à une analyse exploratoire réalisée sur les trois premiers stades de la dynamique observée en versant Sud du Mont-Ventoux (variante 1, stades 1, 2a, 2b).

Les 3 peuplements correspondant aux trois premiers stades de cette dynamique ont été instrumentés, à raison de trois stations météorologiques par peuplement. Une station de référence en plein découvert a été installée à proximité des peuplements. Nous disposons ainsi de valeurs mesurées entre juin 1999 et octobre 2000. Les valeurs absolues étant fortement assujetties à la courte période de mesure, nous avons commencé par caractériser la période de mesure par rapport aux normales climatiques. Ensuite, nous avons analysé la variabilité intra-peuplement et inter-peuplement des conditions micro-climatiques.

Méthodes mises en œuvre / Protocole mis en place :

Choix des sites et des cellules de mesure :

Les trois parcelles sélectionnées sont les parcelles 102 (variante 1, stade 1), 88 (variante 1, stade 2a) et 93 (variante 1, stade 2b) de la forêt domaniale du Ventouret correspondant, respectivement, aux trois premiers stades de la maturation des peuplements de pins noirs en versant Sud du Mont-Ventoux. La 102 et la 88 sont voisines alors que la 93 est distante de quelques kilomètres mais elles sont toutes situées à une altitude équivalente, ente 1120 et 1210 m (Figure T6.1). Une station météorologique a été installée selon les normes internationales (site plat, dégagé, herbe rase...) afin de constituer une référence sur le site des Tournières, situé à 1270 m d'altitude.

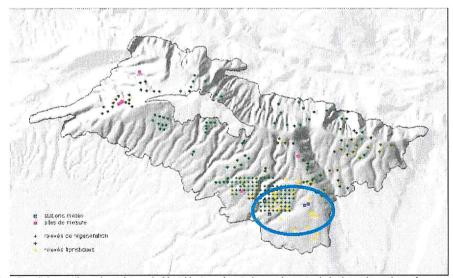
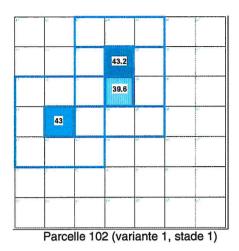
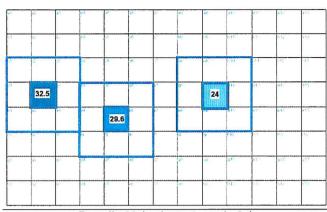


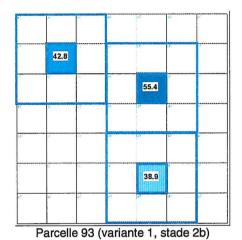
Figure T6.1 : Répartition des sites d'observations du projet sur le Mont Ventoux. Les trois peuplements de la dynamique observée versant Sud qui ont été équipés de stations météorologiques sont indiqués par les carrés situés dans l'ovale.

Pour caractériser l'hétérogénéité intra-peuplement, trois stations météorologiques ont été installées sur chacun. Les cellules ont été choisies afin de représenter des niveaux de couvert faible, moyen et fort. Nous nous sommes basés sur la surface terrière des neufs cellules (cellule cible + 8 cellules adjacentes) pour déterminer ces niveaux de couvert. La figure T6.2 et le tableau T6.1 présentent les positions et caractéristiques de ces cellules.





Parcelle 88 (variante 1, stade 2a)



Fort Moyen Faible

Figure T6.2. Localisation des stations météorologiques dans les parcelles. Les valeurs correspondent à la surface terrière moyenne des neuf cellules figurées par un carré.

Tableau T6.1 : Surface terrière des cellules équipées d'une station météorologique.

Parcelle	Cellule	Couvert	Surface terrière de la cellule (m² ha-1)	Surface terrière des neuf cellules (m² ha ⁻¹)
102 - Stade 1	C4	Milieu de peuplement	57.5	39.6
	D2	Limite cloisonnement / peuplement	33.9	43.0
	B4	Milieu de cloisonnement	33.3	43.2
88 - Stade 2a	D2	Fort	39.3	32.5
	E5	Moyen	24.6	29.6
	D9	Faible	25.0	24.0
93 - Stade 2b	C5	Fort	64.6	55,4
	B2	Moyen	39.2	42.8
	F5	faible	39.6	38.9

Mesures:

Sur chacune des cellules, cinq types de mesures sont effectuées :

- Tair (° C) température de l'air sous abri à 2 mètres au dessus du sol
- IA (°C) température à l'air libre (appelée indice actinothermique) à 10 cm au dessus du sol
- HR (%) humidité relative de l'air sous abri à 2 mètres au dessus du sol
- Tsol (° C) température à 10 cm dans le sol
- Rg (J cm⁻²) rayonnement solaire global à 2 mètres au dessus sol.

Aux Tournières (plein découvert), la vitesse de vent (U, m s-1) et la pluviométrie (Pluie, mm) sont aussi enregistrées. Le pas de temps de mesure est de ¼ h sous les peuplements et de 1 h aux Tournières.

L'indice actinothermique est une mesure particulière. En effet, reproduisant la température du végétal, il est surtout utilisé en agrométéorologie pour évaluer le risque de gel. Dans le cas présent, outre cette caractéristique, il présente l'avantage de pouvoir fournir des indications sur l'ensoleillement, en plus des données de rayonnement global.

Les températures (Tair, Tsol, IA) sont mesurées à l'aide d'une sonde de type Pt 100 Ω dont la précision est de l'ordre de 0.3° C. L'humidité relative est mesurée par un capteur capacitif avec une précision de 5 à 7%. Le rayonnement global est mesuré par des pyranomètres à thermocouples (Kipp et Zonnent CM3 ou CM5) permettant de balayer le spectre solaire de 0.3 à 3 μm. L'ensemble des capteurs sont installés sur des mâts (Photos T6.1, T6.2, T6.3) et reliés à une centrale d'acquisition par des câbles placés en hauteur (protection contre les sangliers). L'alimentation électrique est assurée par une batterie au plomb, dont l'autonomie est environ d'un mois.

Le déficit de pression de vapeur de l'air (VPD, Vapour Pressure Deficit, Pa) a été calculé pour tous les sites à partir des mesures d'humidité relative et de température de l'air. L'ETP a été calculée aux Tournières (voir paragraphe suivant).



Photo T6.1. Centrale d'acquisition et mât de mesure (parcelle 88)

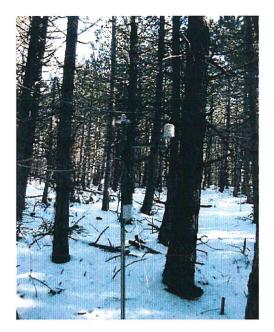


Photo T6.3. Mât de mesures (parcelle 102)



Photo T6.2. Centrale d'acquisition et mât de mesure (parcelle 88)

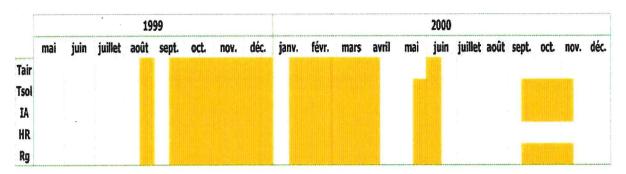


Photo T6.4. Station météo de référence aux Tournières

Photos INRA AgroClim F.Huard

Les stations ont été installées entre mai et juillet 1999, en commençant par le site de référence et la parcelle 88, la parcelle 102 ayant été équipée en dernier. Différentes pannes sont survenues au cours de la campagne et n'ont pas permis d'obtenir des séries complètes sur l'ensemble des cellules. Ces pannes sont essentiellement le fait de problèmes d'alimentation (parcelles 88 et 93) liés à l'utilisation d'une centrale d'acquisition assez mal conçue pour des expérimentations éloignées. En effet, conçues pour pouvoir être autonomes durant plus d'un mois, les faits ont montré que les batteries étaient vides dès la troisième semaine. En outre, avec le temps, les batteries se sont altérées et ont gardé encore moins longtemps la charge, ce qui a amplifié les problèmes. Dans ces conditions, certains capteurs n'ont pas été bien alimentés et n'ont fourni des réponses électriques cohérentes qu'irrégulièrement (cas des pyranomètres). Sur la parcelle 102, aucun problème majeur n'a été rencontré en dehors du thermo-hygromètre tombé en panne à la fin de l'été 2000. Le tableau T6.2 présente la période de mesure où tous les capteurs de toutes les centrales ont enregistré un signal correct. Les différentes périodes de mesures pour chaque cellule et variable sont indiquées en annexe T6.1. Par malchance, les périodes communes sont plutôt regroupées en hiver et il manque notamment, beaucoup de données en été (été 99, période d'installation de plusieurs stations, pannes de l'été 2000).

Tableau T6.2 : Période de mesure commune à tous les capteurs de toutes les stations météorologiques sous couvert.



Variables calculées :

Le VPD est une variable indicatrice du pouvoir évaporant de l'air vis-à-vis des plantes. Cette demande climatique dépend à la fois de la température et de l'humidité relative de l'air. Le calcul est réalisé au pas de temps du quart d'heure ou de l'heure à partir des variables mesurées, selon la formule suivante :

$$VPD = e_{sat.} \left(1 - \frac{HR}{100} \right)$$
 (1)

La pression de vapeur saturante a été calculée en utilisant la température de l'air selon la formule empirique suivante :

esat=Pa.
$$(13.3185.u - 1.976.u^2 - 0.6445.u^3 - 0.1229.u^4)$$

(2)

Où
 $u = 1 - \frac{T_{\text{Vap}}}{T_{\text{air}}}$
(3)

La température à saturation (Tvap) est une constante égale à 373.16 K, et la pression de l'air a été considérée constante et égale à 101325 Pa.

L'ETP de Penmann correspond à l'évapotranspiration potentielle d'une eau libre ou d'un gazon mouillé. Elle se base sur le bilan d'énergie du système et permet d'évaluer la demande climatique en eau. L'ETP a été calculée à un pas de temps horaire, selon la formule suivante :

$$E = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot R_N + \rho \cdot c_P \cdot \frac{\Delta esat}{Fa}}{s + \gamma}$$
 (4)

La définition des variables et les formules employées pour calculer leur dépendance à la température sont issues de Guyot (1997). Le calcul a été réalisé aux Tournières seulement, car il faut connaître la vitesse du vent.

Résultats

Traitement préliminaire sur les données météorologiques recueillies

Reconstitution des données journalières manquantes

ECOFOR - BGF - Ventoux - 1998-2001

Pour comparer les sites entre eux et relier les caractéristiques du micro-climat à la végétation en place sur les cellules, il faut si possible travailler sur des jeux de données équivalents et disposer de variables plus intégrées dans le temps que les variables horaires ou par quart d'heure. Pour faire des cumuls journaliers, décadaires ou mensuels, et calculer des moyennes, des extremums mensuels ou saisonniers, il a donc d'abord fallu compléter le jeu de données disponibles.

La reconstitution a été faite sur la période entre le 1^{er} juin 1999 et le 31 octobre 2000 à partir de l'ensemble des données disponibles au pas de temps journalier. La reconstitution a été menée par poste météo afin de conserver l'indépendance des jeux de données spatiales. Pour chacune des variables, nous avons d'abord estimé un jeu annuel complet, en faisant la moyenne des variables journalières mesurées pour un même jour de l'année (DOY). Sur cette cinétique annuelle, on a ajusté un polynôme de degré variable et de variable explicative DOY. La formule obtenue a permis de réestimer les journées manquantes,

pour la période d'étude indiquée précédemment. Des exemples de variables estimées sont présentées pour le poste de référence des Tournières (Figure T6.3) et sur quelques cellules des différents peuplements (Figure T6.4). Pour certaines variables, lorsque des mois entiers étaient manquants, les données n'ont pas pu être réestimées de façon correcte et ont été supprimées.

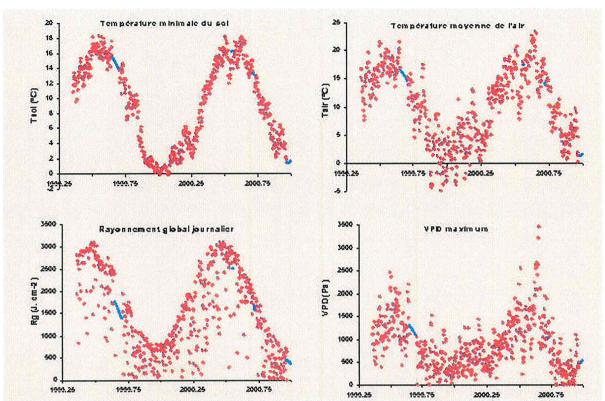


Figure T6.3 : Exemples de variables météorologiques mesurées (rouge) et reconstituées (bleu) sur le site des Tournières. Les valeurs présentées correspondent à des valeurs journalières des températures de sol minimum, température moyenne de l'air, rayonnement global cumulé et déficit hydrique de l'air maximum.

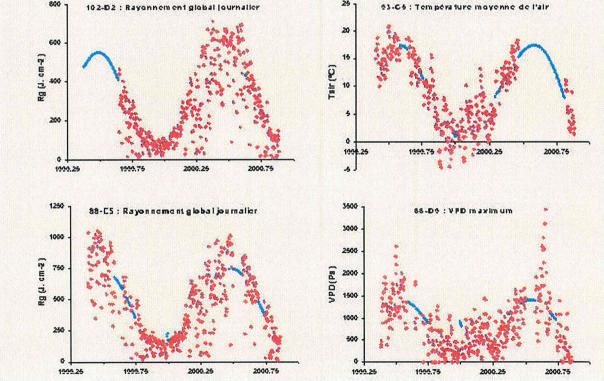


Figure T6.4 : Exemples de variables météorologiques mesurées (rouge) et reconstituées (bleu) pour quelques cellules des différents peuplements. Les valeurs présentées correspondent à des valeurs journalières de rayonnement global cumulé pour la cellule D2 de la parcelle 102, la cellule E5 de la parcelle 88, de température moyenne de l'air pour la cellule C5 de la parcelle 93 et de déficit hydrique de l'air maximum pour la cellule D9 de la parcelle 88.

Constitution de variables intégrées

En disposant d'un jeu de données complet (mesures + reconstitutions), il est possible de calculer des variables par mois qui représentent toutes le même nombre de jours. En se basant sur des connaissances générales du fonctionnement végétal

(période et rythme de croissance), nous avons sélectionné les variables météorologiques intégrées d'intérêt. Par exemple, l'indice actinothermique qui est un indicateur du risque de gel, ne présente un intérêt qu'au printemps, lorsqu'un gel tardif risque de compromettre le départ des bourgeons végétatifs ou floraux, ou d'endommager les jeunes semis.

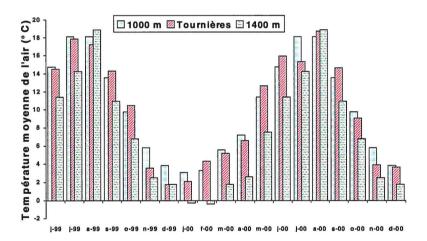
Outre les variables par cellule, nous avons retenu certaines variables comparées aux valeurs mesurées en plein découvert aux Tournières. Il s'agit soit d'écart entre les valeurs entre couvert et découvert (diff), soit de rapport entre les valeurs couvert et découvert (rel).

Caractérisation de la période de mesure

Pour caractériser la période de mesure, nous avons comparé les variables mesurées aux Tournières (altitude 1270 m, versant sud du Mont-Ventoux) à des mesures obtenues sur des stations météorologiques de référence et des stations du réseau INRA (Fougerouze et al. 1971, Antonioletti 1987, Antonioletti et Seguin 1987) situées en versant sud du Mont-Ventoux. La station INRA dont la situation est la plus proche de celle des Tournières est située à 1400 m d'altitude. Des mesures y ont été effectuées entre 1971 et 1979. Des relevés météorologiques à 1000 m d'altitude ont été effectués par l'INRA entre 1971 et 1979, et au poste de Bedoin – Mauvallat (1025 m) entre 1989 et 1996. Nous avons cumulés ces deux derniers jeux de données pour obtenir des valeurs moyennes à 1000 m sur l'ensemble de la période. Les variables comparables sont les moyennes mensuelles des températures minimales, moyennes et maximales de l'air, les précipitations mensuelles et les relations entre températures du sol (min, max) et de l'air (min, max). Le rayonnement global n'a pas été mesuré sur ces stations, mais il est disponible entre 1989 et 1994, sur la station dite « de la parcelle incendiée » située à 925 m d'altitude.

Température

Dans l'ensemble, la période de mesure se caractérise par une température moyenne mensuelle légèrement supérieure à la moyenne observée à 1400 m, ceci résultant à la fois de minima et maxima plus élevés aux Tournières (Figure T6.5). L'écart ne s'explique que très partiellement par la différence d'altitude (-0,58 °C/ 100 m sur les minima et -0,85 °C/ 100 m sur les maxima). On peut donc conclure que notre période de mesure a été plus douce que la normale, les températures mesurées à 1270 m avoisinant les observations effectuées à 1000 m d'altitude. L'écart entre la température moyenne mensuelle et la normale à 1400 m varie entre –117 et +188 %, avec une moyenne de –58 %.



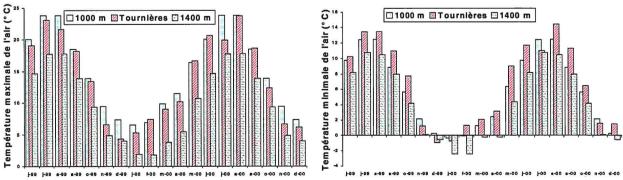


Figure T6.5 : Comparaison des températures de l'air moyennes, maximales et minimales au site des Tournières (1270 m) et sur les stations situées à 1000 et 1400 m d'altitude.

La douceur de l'hiver 1999-2000 est caractérisée aussi par un retard dans l'apparition du premier gel (16/11/99) et une date de dernière gelée plus précoce (01/04/00), alors que les normales indiquent plus de deux mois de décalage à 1400 m d'altitude (13/10 – 14/05) et plus d'un mois à 1000 m d'altitude (28/10 – 04/05).

La température du sol (min, max) est fortement reliée à la température de l'air (min, max). Les relations linéaires observées sur la figure T6.6 sont proches de celles obtenues à partir des stations en versant sud par Antonioletti et Séguin (1987). Les températures minimales sont plus élevées dans le sol que dans l'air, alors que les températures maximales du sol sont plus faibles. Ceci traduit bien l'effet tampon du sol.

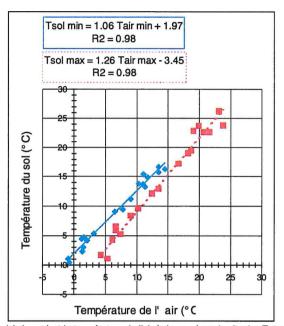


Figure T6.6 : Relation entre la température du sol (mi, max) et la température de l'air (min, max) sur le site des Tournières. Références sur le Mont Ventoux en 1971-79 : Tsol min = 1.1 Tair min +1 , Tsol max = 1.1 Tair max -2 (Antonioletti et Séguin 1987).

Précipitations

Les précipitations sur l'ensemble de la période (2000 mm) sont équivalentes aux moyennes observées à 1400 m d'altitude entre 1971 et 1979 (2039 mm) et légèrement supérieures aux observations à 1000 m d'altitude (1971-1979 : 1857 mm, 1989-1996 : 1458 mm). Cependant leur répartition saisonnière est fortement différente (figure T6.7).

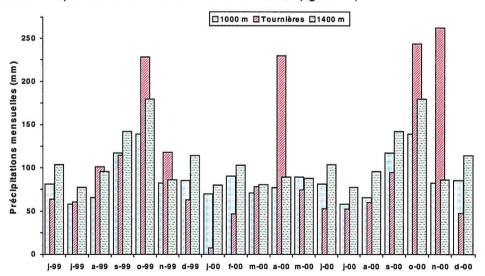


Figure T6.7 : Comparaison des précipitations mensuelles entre le site des Tournières et les stations situées à 1000 m et 1400 m d'altitude.

L'hiver 1999-2000 est beaucoup plus sec que la moyenne, notamment en janvier 2000, où il n'y a eu quasiment aucunes précipitations. De même, la période estivale 2000 (261 mm juin-sept) est plus sèche que la moyenne (322 mm à 1000 m, 420 mm à 1400 m), et même que l'été 1999 (340 mm). Par contre, l'automne (oct-déc) a été plus arrosé qu'à l'accoutumée (308 mm à 1000 m, 379 mm à 1400 m), à la fois en 1999 avec 409 mm et surtout en 2000 avec 553 mm.

Les précipitations sont irrégulières et ont un rythme très violent. Il n'a pas plu durant 69 % des journées de mesures. Un maximum de 93 mm a été observé à l'automne 1999. Sur les 31 % du temps restant, les pluies sont tombées très brutalement : ainsi 62.9 % des précipitations totales sont tombées en 35 jours soit 6.5 % des journées mesurées ou 20.9 % des journées

pluvieuses. Le tableau T6.3 illustre ce rythme. Il présente les répartitions des précipitations mensuelles, pour octobre 1999, avril, octobre et novembre 2000, en nombre de jours de pluie de plus de 20 et 30 mm et l'équivalent en pourcentage des précipitations mensuelles.

Tableau T6.3 : Analyse des précipitations pour les mois extrêmement pluvieux de la période de mesure. Les précipitations totales sont indiquées ainsi que le pourcentage que représentent les pluies journalières de plus de 20 et 30 mm. Les nombres de jours de pluie respectifs sont indiqués.

Mois	Nb jours	Nb jours	Nb jours	Précipitations	% > 20 mm	% > 30 mm
		> 20 mm	> 30 mm	(mm)		
oct-99	12	5	3	228	83.3	62.1
avr-00	13	5	3	229.5	75.6	53.1
oct-00	9	6	4	243.5	84.8	63.9
nov-00	20	3	3	262	52.5	52.5

Rayonnement

Le rayonnement global est légèrement plus fort sur le site des Tournières (+21.8 % en moyenne sur les valeurs mensuelles cumulées) que sur le site « parcelle incendiée », pris comme point de comparaison, à 925 m (figure T6.8). Cela peut s'expliquer partiellement par la situation de ce poste, situé dans une large trouée progressivement assombrie par les peuplements de bordure.

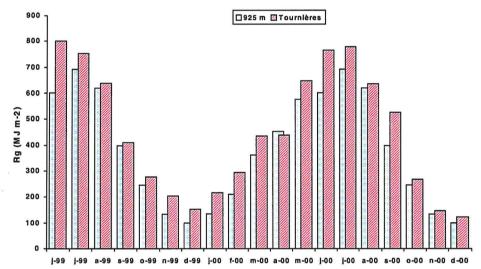


Figure T6.8 : Comparaison du rayonnement global journalier mesuré au site des Tournières et au site dit « de la parcelle incendiée » (925 m d'altitude).

La faible incidence des fortes pluies sur le rayonnement cumulé s'explique par le rythme des précipitations : la quasi-totalité des pluies tombent durant la même journée, voire en quelques heures. Par exemple en novembre 2000, 60 % des précipitations sont tombées durant les journées du 06/11, du 23/11 et la nuit du 13 au 14 novembre, réduisant peu le rayonnement journalier et mensuel.

Bilan climatique

La demande climatique a été caractérisée par l'ETP. Un bilan hydrique sommaire a consisté à retrancher les valeurs d'ETP aux précipitations (P). Les valeurs négatives indiquent une période de stress hydrique.

À l'échelle mensuelle, les précipitations cumulées sont telles qu'aucun bilan négatif n'apparaît (figure T6.9), excepté en janvier 2000.

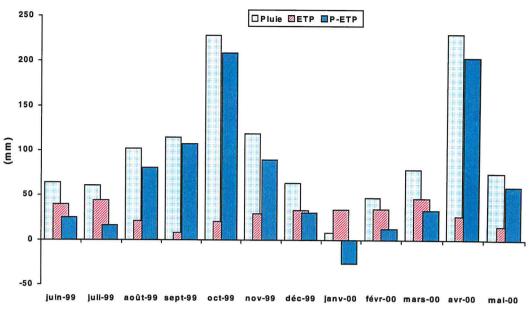


Figure T6.9 : Valeurs mensuelles des précipitations, de l'ETP et du bilan P - ETP.

L'analyse par décade indique l'existence de courtes périodes à faible déficit hydrique (figure T6.10), notamment fin juin-début juillet 1999 et fin août 1999. En 2000, l'ETP n'a pu être calculé que jusqu'en mai ; de courtes périodes de déficit apparaissent en janvier et mars.

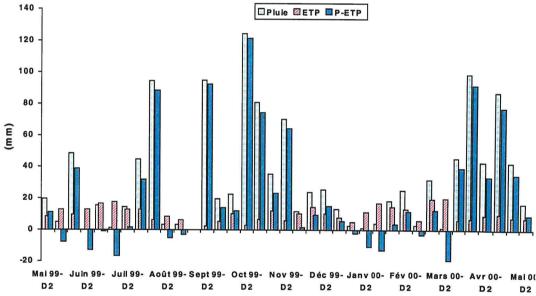


Figure T6.10 : Valeurs décadaires des précipitations, de l'ETP et du bilan P - ETP.

Globalement, la période est caractérisée par une absence de déficit hydrique. Sur la base des critères de classification de Péguy (1961), le climogramme des températures et précipitations mensuelles (figure T6.11) indique des périodes hivernales et automnales froides et humides, le reste de l'année présentant des caractéristiques climatiques tempérées.

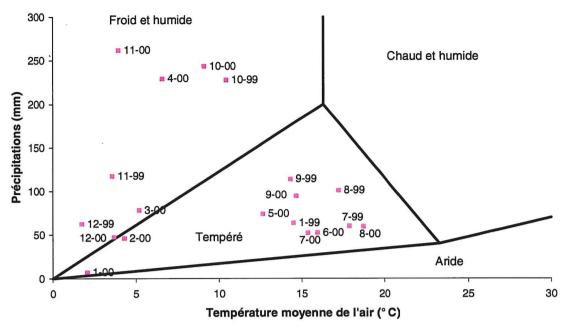


Figure T6.11 : Climogramme de Péguy présentant les précipitations mensuelles aux Tournières (plein découvert) en fonction de la température moyenne de l'air. Les différentes zones climatiques sont indiquées sur le graphique.

Conclusion

Les caractéristiques climatiques mesurées entre mai 1999 et novembre 2000 aux Tournières sont globalement conformes au climat généralement observé sur le Mont-Ventoux où l'altitude atténue la sécheresse du climat méditerranéen, jusqu'à correspondre à un climat méditerranéen humide.

La période de mesures dont nous disposons n'est malheureusement pas caractéristique du microclimat local. Notamment, les températures observées sont plus douces, et les pluies inégalement réparties. Cependant, les valeurs de rayonnement ne sont pas fortement différentes, ni en valeurs cumulées sur la période, ni en distribution saisonnière.

Analyse de la variabilité intra- et inter- peuplements

Mise en garde

L'analyse spatiale a porté sur 8 emplacements, dans trois peuplements. Seuls les résultats les plus significatifs sont donc présentés et il faut les considérer comme indicatifs de pistes à suivre. Les relations dépourvues d'interprétation biologique sont aussi ignorées. L'analyse spatiale a porté sur les valeurs mensuelles, saisonnières et annuelles.

Humidité de l'air

L'humidité relative moyenne et le VPD maximum journalier sont très peu variables et l'on peut considérer qu'ils sont identiques entre les peuplements (figure T6.12). L'ambiance forestière se traduit par une humidité jusqu'à 20 % plus importante qu'en découvert. Par contre en terme de demande évaporatrice de l'air (VPD), les différences entre couvert et découvert sont fortement amoindries.

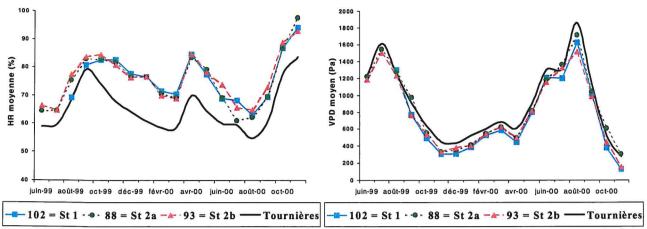


Figure T6.12: Variations de l'humidité relative moyenne et du VPD maximum moyen par mois et par peuplement (sous couvert + référence aux Tournières)

La variabilité maximale dl'humidité relative à l'intérieur de chaque parcelle est en moyenne de 2%, ce qui, compte tenu de la précision de la mesure (7 %), est extrêmement faible. Même considérés sous l'angle du pourcentage de données inférieures ou supérieures à un seuil, les résultats sont généralement très homogènes (Tableau т6.4).

Tableau T6.4 : Humidité relative par peuplement et nombre de jours (%) où l'humidité de l'air sont supérieures ou inférieures au seuil indiqué.

Humidité			
	93	88	102
Moyenne	78	77	78
Minimum	13	14	13
Maximum	100	100	100
%			
< 50%	11.5	12.6	12.2
< 40%	5.7	5.7	5.6
> 80%	52.2	50.3	52.6
> 90%	36.3	36.0	39.2

Risque de gel printanier

L'indice actinothermique correspond à la mesure du risque de gel. Il a donc été étudié pour les mois de mars, avril et mai 2000, uniquement. Il n'y a pas de différences significatives entre les sites mais une tendance apparaît (Tableau T6.5): les indices les plus faibles ont été mesurés dans la parcelle 102 dépourvue de sous-bois, et les plus forts dans la parcelle 93, au sous-bois fourni. Ceci correspond à de plus forts risques de gel sur les stades précoces de la dynamique (peu de semis, de petite taille) que sur les stades plus avancés (régénération abondante et déjà haute).

Tableau T6.5 : Indice actinothermique moyen par peuplement entre mars et mai 2000

	mars	avril	mai
93	-2.7	-2	-0.3
88	-3.3	-2.8	-0.7
102	-4.9	-4.3	-1.5

Températures de l'air et du sol

Les températures de l'air et du sol sont différentes entre les parcelles, mais ces différences sont significatives seulement certains mois (Annexes T6.2 et T6.3). Les températures mensuelles du sol et de l'air sont fortement liées, et la relation linéaire est quasiment identique entre les cellules des différents peuplements, pour les valeurs moyennes et minimales. Les relations sont légèrement moins bonnes pour les maximales.

Températures du sol

La variabilité intra-peuplement est quasiment nulle, si ce n'est sur la parcelle 88 (stade 2a) principalement durant l'hiver 1999-2000. La cellule présentant la plus faible surface terrière (G = 24 m²/ha) présente les plus basses températures du sol en hiver (figure T6.13) et les plus forts maxima en été.

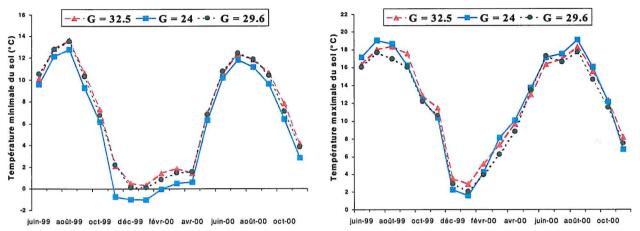


Figure T6.13 : Variations mensuelles des températures minimales et maximales du sol pour les trois cellules de mesures de la parcelle 88 (stade 2a). Les cellules sont identifiées par leur surface terrière (en m²/ha).

Au niveau inter-peuplement, la parcelle 93 (stade 2b) présente les températures les plus douces et la 102 (stade 1) les températures les plus froides. La parcelle 93 présente des minimums de température du sol plus élevés que sur la 88 (stade 2a) et la 102 et avoisine les valeurs observées en plein découvert (Figure T6.14). Elle n'a enregistré aucune température négative dans son sol. Les températures maximales sont plus élevées sur la 93 durant l'hiver mais restent plus faibles en été. Stade 1 et 2a présentent des minimums plus faibles que le stade 2b mais les maximums sont plus élevés en période estivale.

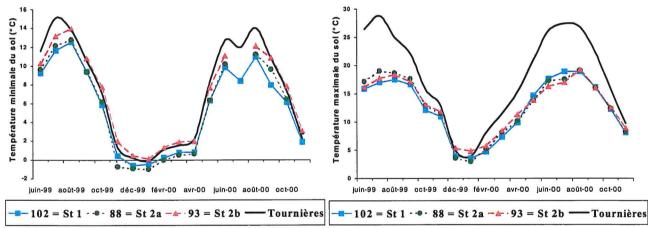


Figure T6.14 : Variations mensuelles des températures minimales et maximales du sol par peuplement.

Les fortes élévations de température du sol observées en plein découvert n'apparaissent sur aucun des peuplements forestiers. L'effet tampon du couvert apparaît très nettement lorsque l'on regarde les amplitudes thermiques journalières, notamment en été, (Figure T6.15), la parcelle 93 étant la plus tamponnée et la parcelle 102 présentant les plus fortes amplitudes thermiques.

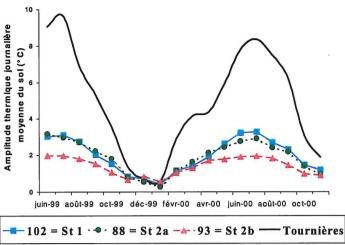


Figure T6.15: Variations mensuelles des amplitudes thermiques moyennes du sol par peuplement.

Températures de l'air sous abri

Concernant la température de l'air sous abri, le comportement observé est proche de celui des températures du sol.

Les températures de l'air sont très peu variables d'une cellule à l'autre dans un même peuplement. Les corrélations entre les trois cellules pour chacune des parcelles sont toujours très fortes (> 0.99).

Il ressort que la parcelle 93 est globalement plus chaude. La 88 et la 102 ont enregistré plus de 5% de températures négatives en plus par rapport à la 93. Cette situation peut en partie s'expliquer par une situation topographique plus en aval de la parcelle

Les températures de l'air moyennes sont plus élevées sur la parcelle 93, par rapport aux parcelles 88 et 102 (figure T6.16). L'écart est significatif durant la période hivernale 99-2000 et au printemps 2000 (Annexe T6.3). Les différences de températures minimales sont non significatives, bien qu'une tendance hivernale apparaisse indiquant que la parcelle 93 soit plus tempérée. Les maximums sont plus faibles sur la 102, par rapport à la 88 et la 93.

Les différences avec le plein découvert sont faibles, mais on peut dire que les minima et maxima sont toujours très légèrement inférieures sous les peuplements.

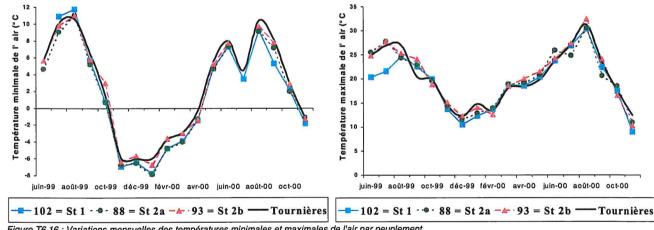


Figure T6.16 : Variations mensuelles des températures minimales et maximales de l'air par peuplement.

Plutôt que les valeurs absolues de température, les amplitudes thermiques distinguent d'avantage les peuplements (figure T6.17). Les amplitudes thermiques sont accentuées sous les peuplements, et plus particulièrement sur la parcelle 93, la parcelle 102 ayant les plus faibles amplitudes, proches de celles observées en plein découvert. Ce phénomène est inverse à celui observé dans le sol.

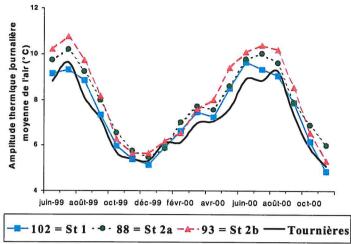
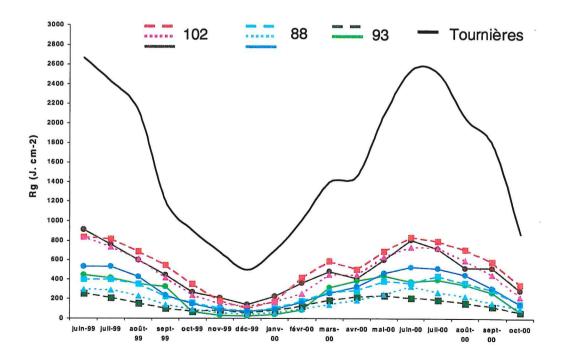


Figure T6.17: Variations mensuelles des amplitudes thermiques moyennes de l'air par peuplement.

La présence d'un sous-bois et d'une litière développés peut expliquer les amplitudes thermiques plus faibles observées dans le sol de la parcelle 93. Alors que pour la parcelle 102, le sol est davantage soumis aux fluctuations journalières. Pour la température de l'air, le refroidissement nocturne est probablement plus important.

Atténuation du rayonnement par le couvert végétal

Des corrélations (non présentées ici) ont été calculées entre les différentes cellules sans montrer aucune sorte de liaison entre elles, les nuages de points étant très dispersés. Le rayonnement global est le facteur le plus variable entre les peuplements et à l'intérieur des peuplements. La parcelle 88 (stade 2a) est la plus ensoleillée quelle que soit la saison. Les stades 1 et 2b reçoivent moins de lumière, et se distinguent peu. Les différences sont variables selon la saison (figure T6.18.) et de façon plus marquée pour le rayonnement absolu que pour la rayonnement relatif.



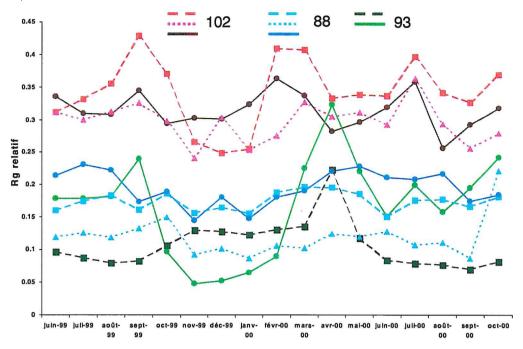


Figure T6.18: Variations du rayonnement global journalier moyen et du rayonnement relatif par mois, selon les peuplements et les cellules.

Concernant le rayonnement global, on note toujours d'importantes différences entre la station météo de référence et les parcelles. Cependant, on obtient en moyenne des différences comprises entre 500 et 800 joules/cm² ce qui correspond à l'ensoleillement moyen d'une journée de novembre. En extrême, les différences dépassent 2500 joules/cm² ce qui correspond quasiment à une belle journée d'été. La parcelle 88 reçoit ainsi entre 30 et 45 % du rayonnement incident, contre 10 à 25 % pour les parcelles 102 et 93 (figure T6.18). Le rayonnement relatif est fortement variable d'un mois à l'autre sur les cellules de la parcelle 93. Il faut noter que ce dernier peuplement présente une composition et une structure beaucoup plus hétérogène, avec la présence de nombreux feuillus (hêtre, alisier blanc, chêne pubescent) aux stades recrutés (hauteur > 130 cm) et entre 30 et 130 cm de hauteur.

Synthèse - Conclusions

Malgré quelques problèmes d'enregistrement de données, la campagne de mesures réalisée en 1999 et 2000 a permis de caractériser certaines situations climatologiques à l'intérieur et entre les parcelles étudiées.

Concernant l'humidité relative, la variabilité intra parcellaire n'est pas significative, et les différences entre les parcelles sont également très faibles. Par contre, l'humidité à l'intérieur des trois parcelles expérimentales est beaucoup plus forte comparée aux mesures effectuées sur le site dégagé des Tournières.

À l'intérieur des parcelles, les différences de température entre les cellules sont extrêmement faibles, ce qui ne permet d'établir aucune relation solide avec les caractéristiques des cellules. Ce phénomène est commun aux trois types de mesures thermiques réalisées (air sous abri, sol et indice actinothermique). Les parcelles 88 et 102 sont également proches du point de vue de la température. Il apparaît toutefois évident que la parcelle 93 se distingue très nettement des deux autres et se caractérise par des températures plus chaudes, ce qui peut en partie s'expliquer par sa situation topographique et par sa structure de peuplement où le sous-bois est déjà développé de manière importante.

Compte tenu de l'extrême variabilité du rayonnement solaire sous couvert forestier et des moyens utilisés pour le mesurer durant cette campagne, les résultats doivent être appréhendés avec la plus extrême prudence. Le rayonnement est toutefois la seule variable présentant des différences significatives à l'intérieur et entre les peuplements. Alors que la parcelle 93 était la plus chaude, ce n'est pas elle qui a le gisement solaire le plus important, mais la 88. Par contre la 102, apparaissant plus froide, est la moins bien alimentée en rayonnement solaire, avec des valeurs relativement proches de la 93. Les différences sont du simple au double, voir triple en considérant les valeurs minimales, entre la 88 et les deux autres parcelles. Les déficits, par rapport à la

station des Tournières sont assez élevés, les parcelles 93 et 102 recevant 20 % du rayonnement incident contre plus de 40% pour la 88.

En conclusion, il semble bien que le rayonnement soit le paramètre climatologique le plus variable alors qu'à l'inverse, l'humidité présente un caractère assez homogène. Du côté des températures, des gradients se dessinent, mais de façon très discrète.

Bibliographie

Antonioletti A. 1987. Contribution à l'étude du climat du Mont Ventoux. Rapport 86/10, Unité de Bioclimatologie, INRA Avignon. 39 pp + annexes.

Antonioletti A. et Séguin B. 1987. Quelques éléments sur le climat du Mont Ventoux. In: Etudes vauclusiennes. Espagnac A. (Ed.), Faculté des lettres et sciences humaines, Avignon. 11-19.

Fougerouze J., Baculat B. and Hotak A. 1972. Climatologie du Mont Ventoux pour l'année 1971. Rapport 272, Unité de Bioclimatologie, INRA Avignon. 8 pp + annexes.

Guyot G. 1997. Climatologie de l' environnement. Masson (Ed.), Paris, France. 505 pp.

Annexes

Annexe T6.1 : Périodes de mesure disponible par station météorologique et par variable

ableau A.1	. Nombr	e de jour	s par i	mois a	lisponib	les aux	Tourn	ières													
-		mai-99	iuin-99	juil-99	août-99	sept-99	oct-99	nov-99	déc-99	janv-00	févr-00	mars-00	avr-00	mai-00	juin-00	juil-00	août-00	sept-00	oct-00	nov-00	déc-00
T10	(°C)	21	30	27		15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
Tsol	(° C)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
Tair	(° C)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
HA	(%)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
Rg	J cm²	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
Pluie	(mm)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
U	(m s-1)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	18							
VPD	(Pa)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	31	30	27	31	26	31	30	18
ETP	(mm i-1)	21	30	31	26	15	31	30	31	31	29	31	30	18							

Parcelle		de jours Variable		mai-99	juin-99	juil-99	aoút-99	sept-99	oct-99	nov-99	déc-99	janv-00	févr-00	mars-00	avr-00	mai-00	juin-C
88	D2	T10	(°C)	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	27
		Tsol	(° C)	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	27
		Tair	(° C)	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	27
		HR	(%)	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	27
		Rg	J cm-2	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	27
		VPD	(Pa)	12	30	31	9	11	30	30	28	26	29	31	30	26	2:
	D9	T10	(° C)	12	30	31	8	5	30	30	28	26	29 29	31 31	29 29	26 26	27
		Tsol	(° C)	12	30	31	8	5 5	30 30	30 30	28 28	26 26	29	31	29	26 26	2
		Tair	(° C)	12	30	31	8				28	26	29	31	29	26	27
		HR	(%)	12	30	31	8	5 5	30	30		26	29	31	29	26	27
		Rg	J cm-2	12	30	31	8	5	30 30	30 30	28 28	26	29	31	30	26	27
		VPD	(Pa)	12	30	31	8 10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	28
	E5	T10	(° C)	12	30 30	31	10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	2
		Tsol	(° C)	12		31	10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	2
		Tair	(°C)	12	30 30	31 31	10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	2
		HR De	(%) J cm-2	12 12	30	31	10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	2
		Rg VPD	(Pa)	12	30	31	10	11	30	30	28	26	29	31	30	28	2
93	B2	T10	(° C)				6	27	25	30	28	26	29	31	23	26	2
		Tsol	(° C)				6	27	25	30	28	26	29	31	23	26	2
		Tair	(° C)				6	27	25	30	28	26	29	31	23	26	2
		HA	(%)				6	27	25	30	28	26	29	31	23	26	2
		Rg	J cm-2				6	27	25	30	28	26	29	31	4	17	2
		VPD	(Pa)				11	28	26	30	29	27	29	31	29	31	2
	C5	T10	(° C)	5	30	31	9	28	25	30	28	26	29	31	22	26	2
		Tsol	(° C)	5	30	31	9	28	25	30	28	26	29	31	22	26	2
		Tair	(° C)	5	30	31	9	28	25	30	28	26	29	31	22	26	1
		HR	(%)	5	30	31	9	28	21	30	28	26	29	31	22	26	1:
		Rg	J cm-2	5	30	31	9	28	25	30	28	26	29	31	22	26	2
		VPD	(Pa)	5	30	31	13	29	22	30	29	27	29	31	29	31	2
102	B4	T10	(° C)				6 6	30 30	31 31	29 30	29 31	31 31	29 29	31 31	30 30	31 31	3
		Tsol	(°C)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		Tair HR	(° C) (%)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
			J cm-2				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		Rg VPD	(Pa)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
	C4	T10	(°C)				6	29	29	29	31	31	29	31	30	31	3
	- 4	Tsol	(°C)				6	29	29	29	31	31	29	31	30	31	3
		Tair	(°C)				6	29	29	29	31	31	29	31	30	31	3
		HR	(%)				6	29	29	29	31	31	29	31	30	31	3
		Rg	J cm-2				6	29	29	29	31	31	29	31	30	31	3
		VPD	(Pa)				ě	29	30	30	30	31	29	31	30	31	3
	D2	T10	(° C)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		Tsol	(° C)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		Tair	(° C)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		HR	(%)				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	3
		Rg	J cm-2				6	30	31	30	31	31	29	31	30	31	34
		VPD	(Pa)				6	30	31	30	30	31	29	31	30	31	3

Annexe $\tau 6.2$: Températures du sol Tableau A.3. Températures moyennes, minimales et maximales du sol par peuplement et par mois. Les lettres indiquent les valeurs significativement différentes ($\alpha = 0.05$). L'absence de lettre indique les valeurs non significativement différentes.

			Tsol moy	,					Tsol mil	7					Tsol max			
***************************************	102 :		88 :		93 :		102 :		88 :		93 :		102 :		<i>88</i> :		93 :	
	Stade 1		Stade 2a		Stade 2b		Stade 1		Stade 2a	1	Stade 2b	,	Stade 1		Stade 2a		Stade 2t	<u> </u>
juin-99	12.2		13.0		13.4		9.6		10.1		10.9		15.2		16.5		16.0	
juil-99	14.2	а	15.1	b	15.6	b	12.2	а	12.6	ab	13.6	b	16.5	а	18.2	þ	17.4	ab
août-99	14.6	а	15.4	ab	16.0	b	13.1		13.3		14.5		17.4		18.0		18.3	
sept-99	12.9	а	13.2	а	14.2	b	9.7		10.1		11.3		16.5		16.6		17.1	
oct-99	9.2	а	9.6	а	10.8	b	6.1	а	6.8	а	8.2	b	11.9	а	12.5	ab	13.0	b
nov-99	4.3		4.5		5.6		1.3		1.2		2.5		10.8		10.8		11.8	
déc-99	1.2	а	1.1	а	2.6	b	-0.2		-0.1		0.8		3.5	а	2.9	а	5.1	b
janv-00	0.7	а	0.5	а	2.0	b	-0.2		-0.2		0.6		3.0	а	2.2	а	4.5	b
févr-00	2.4		2.3		3.6		0.6		0.8		1.5		4.6		4.4		5.4	
mars-00	3.6	а	4.0	а	4.9	b	1.1		1.3		2.2		7.1		7.2		7.9	
avr-00	4.3	а	4.7	а	6.1	b	1.0	а	1.2	а	2.3	b	9.6	а	9.5	а	11.0	b
mai-00	10.2	а	10.4	а	11.2	b	6.7	а	6.7	а	8.0	b	13.8		13.4		13.8	
juin-00	13.3		13.6		13.8		10.2	а	10.6	ab	11.4	b	16.9		16.9		16.3	
juil-00	13.1		١		\		8.8		١		١		17.7		17.0		17.0	
août-00	14.8	а	15.2	ab	15.8	b	11.3		11.7		12.6		18.8		18.4		19.0	
sept-00			12.8		13.5		8.4	а	10.2	b	11.1	b	15.9		15.4		15.8	
oct-00	8.9		9.0		9.7		6.8		7.1		8.2		11.8		12.0		12.4	

Tableau A.4. Nombre de jours (%) où les températures du sol sont supérieures ou inférieures au seuil indiqué

t° sol			
	93	88	102
%			
<0°C	0.0	1.4	8.0
<-2.5 ° C	0.0	0.0	0.0
<-5 ° C	0.0	0.0	0.0
>30 ° C	0.0	0.0	0.0
>25 ° C	0.0	0.0	0.0
>18 ° C	0.5	0.1	0.2

Annexe τ6.3 : Températures de l'air

Tableau A.5. Températures moyennes, minimales et maximales de l'air par peuplement et par mois. Les lettres indiquent les valeurs significativement différentes (α = 0.05). L'absence de lettre indique les valeurs non significativement différentes.

			Tair moy					Tair min				Tair max			
	102:		88 :		<i>9</i> 3 :		102 :	<i>88 :</i>	<i>9</i> 3 :	102 :		<i>88 :</i>		<i>9</i> 3 :	
	Stade 1		Stade 2a		Stade 2t)	Stade 1	Stade 2a	Stade 2b	Stade 1		Stade 2a		Stade 2	b
juin-99	13.9		13.7		13.8		\	4.9	5.7	20.4	а	25.2	b	23.7	b
juil-99	16.1		16.8		16.5		11.1	9.3	10.9	21.6	а	27.6	b	25.8	b
août-99	16.4		16.8		16.6		11.9	11.5	11.7	24.4		24.2		25.0	
sept-99	13.4		13.5		13.9		5.9	5.5	5.8	22.5		21.6		23.7	
oct-99	9.4	а	9.5	а	10.5	b	1.0	1.0	3.1	18.8		19.2		18.9	
nov-99	2.5	а	2.5	а	3.2	b	-6.7	-6 .5	-6.2	13.6	а	14.0	а	15.2	b
déc-99	1.0	а	1.4	b	2.0	С	-6.3	-6.3	-5.5	10.4	а	11.5	b	12.0	b
janv-00	1.2	а	8.0	ab	1.6	b	-7.6	-7.6	-6.6	12.3	а	12.8	b	14.2	C
févr-00		а	3.5	а	4.1	b	-4.5	-4.5	-3.4	13.1		13.5		12.7	
mars-00	4.4	а	4.5	а	5.2	b	-3.7	-3.7	-2.7	18.3		18.6		18.6	
avr-00		а	5.7	а	6.6	b	-1.2	-1.1	-1.3	18.4		18.4		19.6	
mai-00	11.7		11.8		11.8		4.9	5.6	5.3	20.3		20.3		21.3	
juin-00	15.1		15.0		15.4		7.5	7.4	7.9	23.5		24.2		24.1	
juil-00	14.5		\		١		3.8	\	\	26.6		24.5		25.2	
août-00			17.6		18.0		9.5	9.3	9.7	30.1	а	30.1	а	32.5	b
sept-00		ab	13.2	а	14.1	b	5.6	7.7	8.3	22.4		20.2		22.5	
oct-00			8.5		9.2		2.3	2.7	3.2	17.4		17.3		16.5	

Tableau A.6. Nombre de jours (%) où les températures de l'air sont supérieures ou inférieures au seuil indiqué.

t° air	93	88	102
%			
< 0 ° C	13.0	17.4	16.7
<-2.5 ° C	4.5	7.5	7.1
<-5 ° C	0.5	1.2	1.2
>30 ° C	0.0	0.0	0.0
>25 ° C	0.0	0.0	0.0
>18 ° C	3.8	3.2	3.0

Tableau A.7. Différences moyennes de température de l'air entre la station des Tournières et les station sous couvert.

t° air jour	moyennes							
	St - 93	St - 88	St - 102					
Moyenne	0.2	0.9	0.9					
Médiane	0.0	0.8	0.9					
Minimum	-1.4	-0.3	-0.2					
Maximum	2.1	2.6	2.5					

Tâche 7 : Étude de la Diversité Phytoécologique

IMEP

Service exécutant : Institut Méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie (Université Aix-Marseille – CNRS)

UMR CNRS 6116

Responsables: S.Gachet & T. Tatoni

Malgré une relative abondance de travaux concernant les aspects de dynamique forestière, il subsiste de fortes lacunes sur le fonctionnement écologique des formations forestières qui occupent une place de plus en plus grande dans les paysages méditerranéens français. Cette méconnaissance peut alors poser des problèmes dans le contexte actuel par rapport aux interrogations et aux prises de décision concernant la gestion de la biodiversité. Les milieux ouverts sont d'un intérêt évident pour la biodiversité, mais cela n'exclut pas forcément le rôle des formations forestières à ce niveau. Il faut garder à l'esprit que l'on n'a pour l'instant pas encore eu vraiment l'opportunité, en région méditerranéenne, de travailler sur de véritables systèmes forestiers, c'est-à-dire riches d'une évolution dépassant 150 ans de maturation. C'est pourquoi il parait désormais indispensable de développer des programmes de recherche visant à comprendre le fonctionnement écologique des forêts méditerranéennes et à évaluer leur place dans la structuration de la biodiversité, d'autant que la dynamique actuelle de reforestation naturelle peut se traduire par un risque d'uniformisation des paysages et des habitats forestiers (Quézel, 1999).

Pour des raisons historiques, socio-économiques, et dans un contexte écologique à fortes contraintes, certains grands types de formations forestières ou pré-forestières sont en évolution notable en région méditerranéenne française (**Tatoni** *et al.*, 1994; **Tatoni & Roche**, 1994). La connaissance de l'impact des interventions sylvicoles sur la biodiversité et du rôle central de cette dernière dans la pérennité et dans l'équilibre des formations est une préoccupation majeure pour les décideurs et les acteurs de la gestion forestière (**Burton** *et al.*, 1992; **Deconchat**, 1999).

Contexte scientifique - Contexte écologique

La biodiversité en forêt / écologie forestière

Dans la littérature, relativement peu de travaux portent directement sur les effets de l'exploitation forestière sur la biodiversité prise dans un sens plus large que la richesse en essences forestières. Il en ressort tout de même qu'en terme de biodiversité du sous-bois, deux facteurs sont susceptibles d'agir : i) l'impact du prélèvement, qui a des effets à court terme et modifie le milieu à une échelle fine (rémanents, ornières) (Halpern & Spies, 1995) et ii) les conséquences qui en résultent à cause de l'ouverture du milieu (Deconchat, 1998). Sur des pas de temps plus longs, l'exploitation peut induire une modification du milieu à large échelle, influant sur la structure du peuplement (Halpern & Spies, 1995).

Modifiant la structure de la végétation (**Gilliam** *et al.*, 1995), la disponibilité en lumière, en eau et en différents nutriments, l'exploitation forestière est généralement envisagée comme une perturbation « naturelle » du système écologique, au même titre qu'un incendie par exemple (**Evans & Barkham, 19**92; **Bergeron & Harvey**, 1997), c'est-à-dire une modification brutale des conditions du milieu, lequel tendra ensuite vers un état d'équilibre dynamique proche de son état initial (**Pickett** *et al.*, 1989).

Plusieurs auteurs ont montré que la biomasse et le recouvrement du sous-bois augmentent après ouverture du milieu (**Thomas** et al., 1999). A l'échelle du paysage, la richesse spécifique peut diminuer après une coupe à cause de la perte de taxons sensibles à l'exploitation (**Noss**, 1990), mais localement on peut atteindre un maximum de diversité grâce à l'invasion par des espèces opportunistes ou de milieu ouvert (**Barkham**, 1989; **Kaila** et al., 1997 pour les coléoptères...). Une éclaircie peut cependant contribuer à diminuer la diversité totale en favorisant la dominance d'une ou plusieurs espèces du sous-bois.

La notion de diversité sous-entend souvent que l'obtention d'une richesse spécifique élevée devrait être le but majeur de la gestion des ressources (Attiwill, 1994). Cependant, l'utilisation de la diversité spécifique comme mesure de l'impact des pratiques forestières peut masquer des modifications dans l'organisation du système : par exemple, bien que n'ayant trouvé aucun changement dans la diversité globale des mammifères d'une forêt du sud-ouest australien après un siècle d'intense perturbation anthropique, Bennett (1990) a montré qu'un ensemble de mammifères indigènes avait été remplacé par un ensemble d'exotiques envahissants.

Comparées à un agrosystème classique, les forêts sont souvent considérées comme plus « naturelles » en terme de paysage, à cause de leur grande complexité structurelle et fonctionnelle et d'interventions humaines moindres (**Whitehead**, 1982). Selon **Corona** (1993), la valeur de la biodiversité des forêts plantées est très dépendante de leur surface et de leur forme.

• Cas du Ventoux : forêt méditerranéenne d'altitude

Par le passé, plusieurs études ont été menées sur le Mont-Ventoux. Un synthèse écologique dressée en 1978 (du Merle et al., 1978) a été l'un des documents de base pour la demande de classement en Réserve de Biosphère auprès de l'UNESCO (1994). Depuis, il n'y a plus eu de réel suivi, et la connaissance du massif reste très morcelée. L'étude phytoécologique menée par l'IMEP a pour objectif de décrire et d'analyser à plusieurs échelles la diversité de la flore présente dans des peuplements de différentes structures, et d'identifier les indicateurs les plus pertinents dans l'évaluation de la diversité végétale en liaison avec les pratiques de gestion forestière.

Les placettes inventoriées sont situées sur les sites pris en compte dans le projet global (gradient d'évolution) et en correspondance avec les sites de description du peuplement d'arbres. Des analyses statistiques multivariées sur l'ensemble des relevés sont envisagées afin de mettre en évidence la structuration de la diversité végétale et d'établir une typologie des diverses situations phytoécologiques rencontrées.

Méthodes mises en œuvre / Protocole mis en place

La problématique générale est de comprendre quels sont les facteurs influant sur la composition du sous-bois (le versant, l'essence, l'âge du peuplement, l'historique de la placette...). Pour cela, nous avons mis au point une méthodologie générale, basée sur des inventaires floristiques.

• MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

• Inventaires 400m² avec coefficients d'abondance

L'étude floristique a été effectuée dans les sites principaux du projet mais également dans certaines placettes étudiées par la STIR (dans le cadre de la tâche 1). L'aire échantillonnée par relevé est de 400 m² (**Daget & Godron**, 1982 ; **Lepart & Escarré**, 1983 ; **Barkman**, 1989 ; **Rameau**, 1993) ; sur les sites, cela revient à agréger 4 cellules. Au bilan, ce travail porte donc sur 86 placettes réparties comme suit :

- 43 placettes sur les sites principaux (le nombre de placettes par site dépend de la surface de celui-ci : cf. tableau 1 pour une synthèse);
- 43 placettes parmi les 214 placettes installées dans le cadre de la Tâche 1.

Vingt placettes « hors sites » complémentaires, ont été échantillonnées sous d'autres essences que le pin noir, et ne seront pas analysées (sauf en terme de composition taxonomique).

Tableau 1. Récapitulatif des placettes inventoriées pour la flore

Variante	N° du	Surface	Nombre de placettes	Nombre total
et stade	site	du site (ha)	de 400 m²	d'espèces
V1 st1	102	0.49	4	54
V1 st2a	88	1.04	8	73
V1 st2b	93	0.49	4	56
V1 st3	15	1.00	9	74
V1bis st3	23		3	20
V2 st2a	34a		3	54
V2 st2b	34b		3	54
V2 st3	34c		3	53
V2 st4	5		6	29
	Total		43	

Dans cette étude on mettra l'accent sur les 43 placettes des sites principaux, qu'on replacera éventuellement dans un contexte plus général, en y associant les autres placettes.

À chaque relevé floristique sont associées des <u>variables stationnelles</u> (mesurées dans le cadre des autres tâches du projet) rendant compte des conditions topographiques <u>sensu lato</u> (altitude, pente...), de l'état de surface du sol (rochers, blocs, cailloux, terre nue, litière) et des taux de recouvrement des principales strates de végétation (figure 1):

- strate arborescente >8 m;
- strate arbustive haute entre 2 et 8 m;
- strate arbustive basse entre 0,5 m et 2 m;
- strate herbacée < 0,5 m.

Des <u>inventaires floristiques</u> exhaustifs ont été réalisés sur chacun des sites dans leur ensemble, puis chaque placette a fait l'objet d'un recensement des végétaux vasculaires supérieurs, notés en présence-absence sur les placettes de 400 m² mises en place sur ces mêmes sites. Une classe d'abondance est attribuée à chaque taxon (coefficients inspirés de **Braun-Blanquet**, 1932):

- + : espèce rare
- 1 : individus pouvant être nombreux mais de recouvrement faible
- 2 : recouvrement de 5 à 25%
- 3 : de 25 à 50%
- 4: de 50 à 75%
- 5 : supérieur à 75%.

À l'issue de ces inventaires, nous disposons donc des informations suivantes par relevé :

- données topographiques (coordonnées géographiques, altitude, pente, exposition)
- données mésologiques (état de surface du sol, structure verticale = recouvrement par strate de végétation)
- liste des espèces végétales vasculaires supérieures (= données en présence-absence)
- coefficient d'abondance pour chaque taxon (= données en abondance)

Figure 1. Fiche de relevé type Nom: Date: Site: N° Parcelle: Secteur: UTM Nord: UTM Est: Facteurs mésologiques Altitude Aspect général Pente Exposition Végétation Lumière *Rochers * Classes Ht: *Blocs (>20cm) 1:<10% *Rcvt total *Cailloux (<20cm) 2:10-25 *Arbres hauts (>10m) Α Ori: *Terre nue В 3 : 25-50 *Arbres (4-10m) *Cryptogames C *Litière aérée 4 : 50-75 *Arbustes hauts (2-4m) 5:>75% *Arbustes (0,5-2m) D *Litière dense Ε *Litière ligneuse *Herbacées (<0,5m) Α E invent. В C D invent. A C

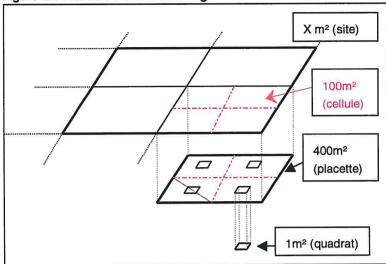
Quadrats

Nous avions prévu une approche multiscalaire impliquant un référencement spatial recoupant plusieurs échelles. Nous voulions travailler à l'échelle infra-parcellaire en appliquant la « méthode des quadrats » sur chaque site du versant sud lors de la première campagne de terrain, en espérant compléter l'information qualitative apportée par l'inventaire.

Cela consiste à approcher l'abondance des espèces de la strate herbacée (< 50 cm de haut) au moyen de relevés fins : un cadre (quadrat) de 1 m² subdivisé en 25 petits carrés de 20 cm de côté est posé au centre de chaque cellule de 100m² d'une placette donnée. Le coefficient de fréquence correspond au nombre de carreaux où chaque espèce est présente (figure 2).

Compte tenu du peu de changement attendu en sous-bois et de l'incertitude quant au repositionnement du quadrat au centre de la placette, il n'avait pas été jugé nécessaire ni pertinent de réitérer ces mesures chaque année (d'autant plus que les pas de temps de changement en milieu forestier sont nettement supérieurs à l'échelle annuelle).

Figure 2. Protocole d'échantillonnage



Les résultats obtenus montrent des recouvrements faibles, très nettement en mosaïque, en relation avec la structure de la canopée et l'état de surface du sol (présence de rémanents par exemple). Les 4 quadrats de 1m² par placette de 400 m² (soit 0.25% de la surface) ont permis de retrouver seulement 50 % des espèces inventoriées au niveau de la placette : ce protocole a donc été jugé inapproprié à la mesure de l'abondance des espèces végétales dans ces forêts, et abandonné.

• LOGICIELS EMPLOYÉS POUR L'ANALYSE DES DONNÉES

Les analyse des données multivariées ont été réalisées avec le logiciel ADE-4 (**Chessel**, 1997 ; **Thioulouse** *et al.*, 1997). Le logiciel 3PBASE (**Guiot** & **Goeury**, 1996) a servi pour tous les types de régressions. La classification écologique des relevés a été effectuée avec l'aide d'Henry **Brisse** (Ingénieur de Recherche IMEP) et de la banque de données phytosociologique SOPHY (**Ruffray** *et al.*, 1998).

Résultats & discussions

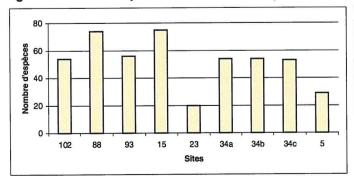
APPROCHE FLORISTIQUE (TAXONS)

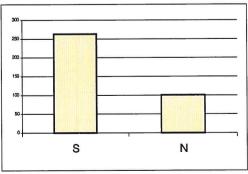
• Observations générales : beaucoup d'espèces peu fréquentes et/ou peu abondantes

Les inventaires floristiques menés sur l'ensemble des 86 + 20 placettes durant les étés 1999 et 2000 ont permis de recenser 275 espèces, dont 263 présentes uniquement en versant sud, 101 en versant nord, 89 étant communes aux deux. Les espèces les plus fréquemment trouvées (dans environ 90% des placettes, quel que soit le versant) sont *Fagus sylvatica*, *Quercus pubescens*, *Sorbus aria*, *Viburnum lantana* et *Arrhenaterum elatius*. Vingt-trois plantes n'ont pu être déterminées qu'au niveau du genre ; la nomenclature suivie est celle de **Kerguelen** (1994). Au plan patrimonial, aucune plante protégée n'a été rencontrée.

En considérant seulement les **43** placettes des sites principaux, on dénombre **156** espèces. Les plus fréquentes sont les mêmes que précédemment, auxquelles s'ajoutent *Cephalanthera rubra* et *Hieracium gr. murorum*. La répartition entre versants sud et nord est similaire (figure **3**).

Figure 3. Nombre d'espèces dans les sites et répartition entre sud et nord





Code des sites : cf. Tableau 1, page 86.

Deux constatations importantes :

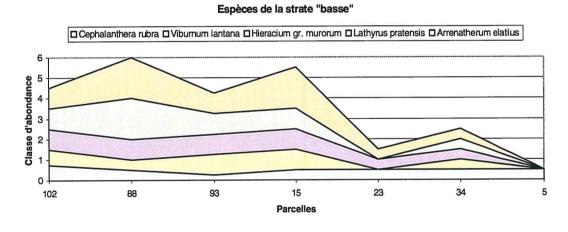
- beaucoup d'espèces sont **peu fréquentes** : 60% sont présentes dans 5 placettes ou moins (c'est à dire de 1 à 5 fois) : 86 (31%) de 2 à 5 fois, 81 (soit 29%) *une seule fois* et 199 (72%) moins de 10 fois.
- beaucoup d'espèces sont **peu abondantes** : 170 (62%) ont une abondance égale à « + » selon le code de Braun-Blanquet, et sont donc qualifiées de « rares dans la placette ».

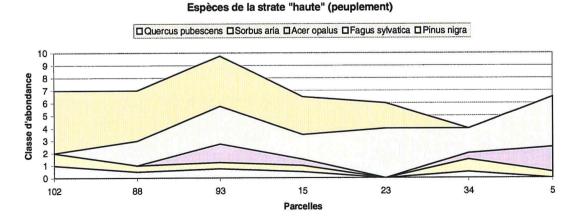
On retrouve sensiblement les mêmes résultats dans les sites : 55% sont présentes 5 fois ou moins. 49 espèces sont présentes dans 2 à 5 placettes, ce qui représente 31% d'espèces peu fréquentes ; 37 espèces ont été vues dans une seule placette et sont donc très peu fréquentes (soit 24%) ; 73 taxons sont peu abondants, soit 47%.

Quand elles sont présentes, les espèces peu fréquentes sont aussi peu abondantes. L'inverse est faux : des espèces peu abondantes dans une placette peuvent être tout à fait fréquentes (par exemple *Cephalanthera rubra*, qui n'est jamais couvrante).

La figure 4 trace l'évolution des abondances des dix espèces de strates basse et haute les plus fréquentes, en fonction des stades de maturation. Le hêtre y est de plus en plus abondant, y compris dans la « sapinière » du versant nord où on le retrouve aux côtés de l'érable. Le pin noir est bien sûr très abondant en versant sud (il y est présent dans toutes les placettes sauf la 23_01) et absent du versant nord. Les faibles valeurs du chêne pubescent s'expliquent par le fait qu'il a été souvent rencontré mais seulement à l'état de germination. Côté herbacées, les abondances les plus fortes se trouvent dans la 88 où *Arrhenaterum elatius* domine avec *Lathyrus pratensis*, et dans la 15 où s'ajoute *Viburnum lantana* (ce phanérophyte n'a jamais dépassé la strate la plus basse dans les 43 placettes échantillonnées : on l'a pour cela représenté avec les herbacées). Enfin, à l'exception de *Hieracium gr. murorum*, assez constant, les herbacées chutent fortement dans la hêtraie (parcelle 23), comme on le verra plus tard.

Figure 4. Evolution des classes d'abondance des 5 espèces « de strate basse » et 5 arbres les plus fréquents (courbes empilées)





Dans la suite de l'étude, on prendra en compte l'ensemble du cortège végétal ou bien seulement les espèces les plus fréquentes (freq>5) pour ne pas entraîner de « bruit » dans les analyses.

• Commentaires sur chaque site

- 1- 102= variante 1 stade 1. Dans cette jeune forêt de pin noir, pas d'espèce abondante (en dehors du pin) hormis Bromus erectus qui couvre entre 5 et 25% d'une des placettes. De même, à part le pin qui occupe jusqu'à la strate la plus haute, toutes les 53 autres espèces sont cantonnées dans la strate herbacée (< 0.5m). Parmi elles, quelques forestières comme les pyroles Moneses uniflora et Orthilia secunda, ou les orchidées Cephalanthera rubra et C. damasonium. Mais on trouve aussi beaucoup d'espèces de milieux ouverts comme Bromus erectus ou Euphorbia cyparissias.
- 2- 88 = variante 1 stade 2a. Située à peu de distance de la première, cette forêt en est assez différente. Outre le pin noir, les espèces les plus abondantes sur les 73 recensées sont *Fagus sylvatica*, *Festuca rubra* et *Bromus erectus* (plus de 25% dans certaines placettes), ainsi que *Rosa rubiginosa*, *Lathyrus pratensis et Arrhenaterum elatius*. Dans les placettes échantillonnées, aucune espèce autre que le pin ne dépasse la strate herbacée (c'est faux sur l'ensemble du site : de jeunes hêtres dépassant 50cm y sont décrits). Quelques espèces à caractère forestier apparaissent, telles que *Epilobium montanum*, *Poa nemoralis* ou *Fragaria vesca*.
- 3- 93= variante 1 stade 2b. Ce peuplement de 81 ans en 2001 est très fermé du fait de l'ancienneté (~20 ans) de la dernière éclaircie. Hormis le couvert supérieur des vieux pins (plantés), les hêtres dominent largement les pins en dimensions (mais pas en effectif) et leur régénération est plus dynamique car ils sont plus tolérants à l'ombrage. Excepté le pin et le hêtre, on trouve ici Acer opalus, Prunus spinosa et Lonicera xylosteum abondants. Bromus erectus est l'herbacée dominante. Une quinzaine d'espèces apparaissent qui n'étaient pas dans les stades précédents : Brachypodium sylvaticum, llex aquifolium ou Lonicera xylosteum (forestières), Acer opalus et Thalictrum minus (pré-forestières), mais également Lonicera etrusca et Scabiosa columbaria, espèces de milieux ouverts.
- 5- 15= variante 1 stade 3. Dans cette parcelle de 109 ans, la régénération mélangée est très avancée et le peuplement de pin noir a fortement diminué après plusieurs coupes de régénération plus ou moins récentes. Des ouvertures en « bandes » confèrent au site une grande hétérogénéité, avec par exemple une zone de 20m sur 100m complètement rasée, où dominent les graminées comme *Arrhenaterum elatius* ou *Bromus erectus*.
- 6-23= variante 1bis stade 3. Le peuplement est ici constitué de grands hêtres, après que la plupart des pins aient été ôtés progressivement. La flore s'appauvrit considérablement : seul *Rubus idaeus* est présent en abondance dans le sous-bois. En proportion, les espèces de caractère forestier sont majoritaires parmi les 20 espèces rencontrées.
- 7- 34 = variante 2 stades 2a, 2b, 3. Comme on le verra plus tard, les trois stades figurés par cette grande parcelle sont assez similaires sur le plan floristique. Ici, le pin sylvestre, le hêtre et le sapin dominent. Le sous-bois est assez riche et diversifié, avec en particulier *Bromus erectus*, *Thalictrum minus* ou *Ranunculus aduncus*. Les espèces préforestières dominent.
- **8-** 5= variante 2- stade 4. Cette hêtraie-sapinière (parcelle 5, stade ultime nord) est originale par rapport aux autres placettes du versant nord : on y trouve *Epipactis sp.*, *Hedera helix*, *Hepatica nobilis*, *Lonicera alpigena*, *Pinus uncinata*, *Corylus avellana*, *Potentilla reptans* (ces deux dernières ne sont même trouvées que là, alors qu'on rencontre les autres y compris en versant sud).

Indices de diversité

Afin de mieux appréhender la biodiversité au niveau des stades, nous avons calculé les indices suivants, à partir des données d'abondance (plus exactement, en utilisant la médiane des classes d'abondance attribuées à chaque observation) :

- abondance totale : somme des abondances des espèces présentes (figure 5a),
- richesse spécifique : nombre d'espèces présentes (figure 5a),
- équitabilité : abondance relative (figure 5b),
- indice de diversité de Shannon (figures 5b, 7).

Quel que soit le versant ou le stade, et quel que soit l'indice, il y a une très grande variabilité intra et inter-parcellaire, sauf peut-être au sein de la parcelle 34 qui se montre relativement homogène bien que figurant un gradient d'évolution. Les stades « matures » sont aussi les moins riches, au nord comme au sud et la placette 93 apparaît comme la plus riche. Le faible nombre d'espèces dans la placette 102_01 explique son équitabilité élevée (~ 1 : toutes les espèces en égale -et ici faible- abondance). Le fait de prendre la médiane des classes d'abondance est à l'origine du relatif « lissage » de la courbe d'équitabilité (indice variant entre 0 et 1). De la même façon, l'équitabilité des espèces de la parcelle 5 est forte car le sapin domine largement toutes les autres espèces, sauf les hêtres, pins à crochets et érables qui y sont assez abondants aussi. Si on fait abstraction de ces arbres, ainsi que des espèces « rares », pour se focaliser sur les espèces constituant réellement le sous-bois, l'équitabilité chute fortement car deux espèces dominent largement les quelques autres : Buxus sempervirens et Hieracium gr. murorum.

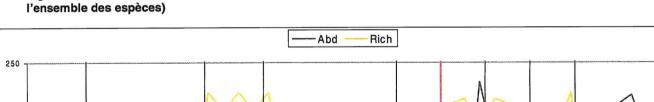
nous avons voulu juger de l'importance que revêtaient les espèces « rares » (abondance « + » dans les relevés), et leur contribution à la diversité des placettes où on les rencontrait. De la même façon, il était intéressant de s'affranchir du peuplement pour ne garder que les espèces du sous-bois. La figure 7 présente ainsi l'évolution de l'indice de Shannon en fonction de ces différents jeux de données :

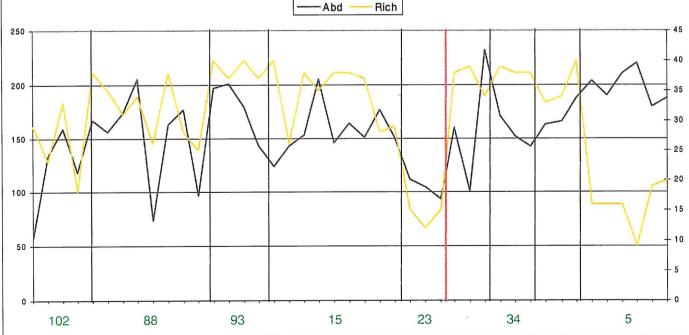
- en considérant l'ensemble des espèces ;
- en ne prenant pas en compte les espèces « rares » ;
- en ne tenant pas compte de la strate arborescente, c'est-à-dire en éliminant les phanérophytes ;
- en ne gardant que les espèces non « rares » ou non phanérophytes.

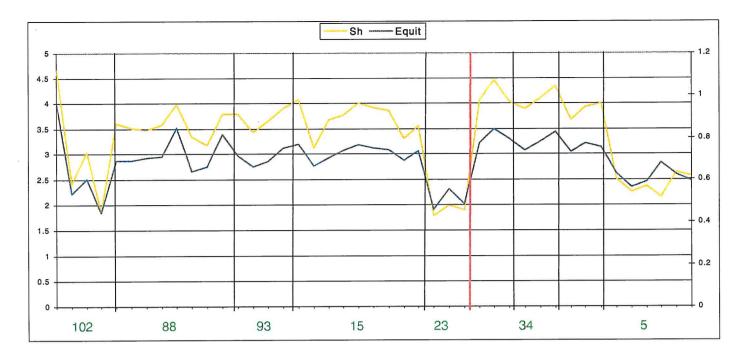
Le fait d'enlever les espèces « rares » diminue la valeur maximale de l'indice, sans influencer la forme générale de la courbe (figure 7b) : ce ne sont pas les espèces de faible abondance qui structurent la diversité. Pour cette même raison le graphe 7d a une « forme » similaire, sauf pour les stades « matures » (23 et 5) où l'indice chute beaucoup car la strate arborée y est prédominante (il n'y a pas, dans ces parcelles, de structuration verticale apportée par les autres strates, et on est dans des situations de sous-bois très clairsemés et très pauvres).

¤ Si l'on fait abstraction du peuplement (figure 7c) on remarque une augmentation de la disparité dans les parcelles 15 et 5, mais celle-ci diminue dans la 102. La diversité totale, en revanche, augmente sensiblement dans la figure 7d, alors même qu'on a enlevé les phanérophytes car leur forte abondance « masquait » l'effet des autres espèces.

Figure 5. Evolution des abondance totale, richesse et indice de Shannon et équitabilité (calculés sur







• Indice de similitude de composition de Jaccard

Après avoir vu les spécificités de chaque placette, l'indice de Jaccard permet de mesurer leur degré de ressemblance, deux à deux. En versant sud, les placettes d'un stade donné sont de plus en plus différentes des stades ultérieurs (figure 6) : par exemple, la placette 102 (stade 1 de la variante 1) est de plus en plus différente des stades 2a, 2b et 3. En versant nord, il y a une forte similarité entre le stade 4 et les premiers stades; les placettes des stades 2 et 3 sont très semblables, ce qu'on retrouvera dans les analyses suivantes.

Indice de Jaccard

 $\label{eq:local_energy} \begin{aligned} & \textbf{J=E}_{AB} \, / \, \left(\textbf{E}_{A} + \textbf{E}_{B} + \textbf{E}_{AB} \right) \\ & \textbf{E}_{AB} \, : \, \text{nombre d'espèces communes à A et B} \\ & \textbf{E}_{x} \, : \, \, \text{nombre d'espèces présentes seulement} \\ & \text{dans la placette considérée} \end{aligned}$

En nous basant sur la formule de Jaccard, nous avons construit un indice prenant en compte la somme des abondances des espèces. Si l'on fait évoluer cet indice en fonction de l'écart d'âge d'une placette donnée par rapport aux autres (calcul deux à deux) (figure 8), on peut y ajuster une courbe de tendance (R²=0.60) qui indique que plus l'écart d'âge est grand plus la similarité *en qualité comme en quantité* entre placettes est faible (c qui confirmerait le bon choix des sites comme représentatifs d'un gradient d'évolution). En revanche, la tendance obtenue à partir des variations de l'indice de Jaccard a un R² faible : en tenant compte seulement de la liste de leurs espèces communes par rapport à leur écart d'âge, les sites ne sont pas significativement différents.

Figure 6. Indice de similarité de Jaccard (similarité entre sites, sur la base du nb d'espèces communes)

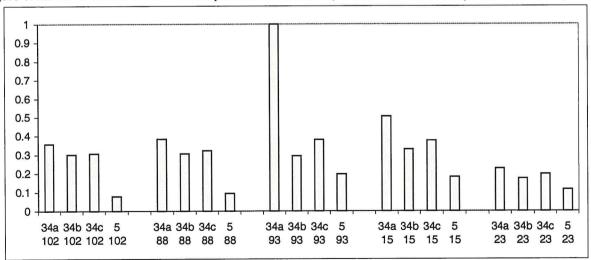
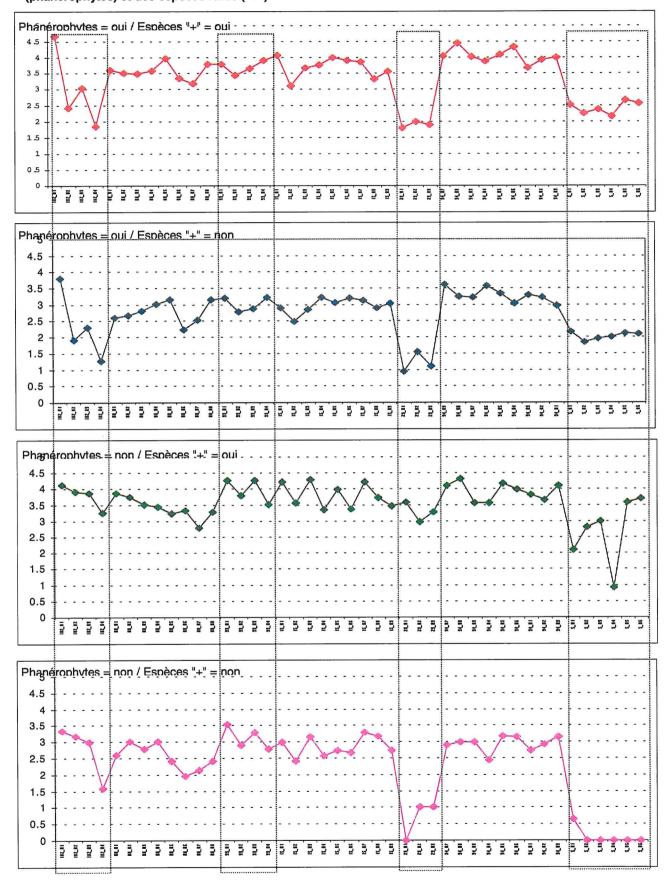


Figure 7. Evolution de l'indice de Shannon, avec puis sans prise en compte du peuplement arboré (phanérophytes) et des espèces rares ("+")



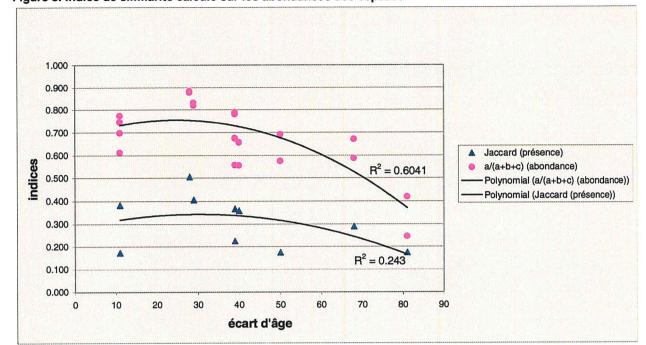


Figure 8. Indice de similarité calculé sur les abondances des espèces

• Organisation de la végétation

Afin de comprendre l'organisation de la végétation dans les différents stades de maturation, plusieurs types d'analyses ont été faites. Elles ont porté essentiellement sur les données traitées en présence-absence. La méthode statistique employée pour dégager les grands patrons d'organisation de la végétation est l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), largement utilisée en écologie (**Benzécri**, 1973), dont le principe est d'optimiser l'ordination des espèces et des relevés de manière conjointe.

¤ Résultats généraux en présence-absence

La figure 9 présente le résultat de l'AFC effectuée sur l'ensemble des espèces des sites, calculée à partir d'une matrice relevés x espèces. Les inerties des 4 premiers axes sont mentionnées sous le graphe.

Les patrons d'organisation sont nets : l'axe 1 discrimine les versants nord et sud, l'axe 2 traduit le « gradient de maturation » recherché lors du choix des sites (cette organisation n'est pas modifiée quand on replace les sites dans le pool général des 86 + 20 placettes).

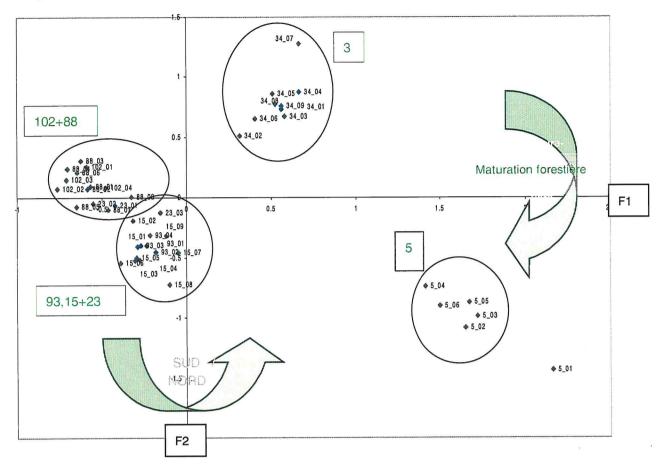
¤ Effet du versant

Comme l'effet nord-sud est très fort (il se manifestera d'ailleurs dans la plupart des analyses effectuées plus loin), on a cherché à isoler chacun des versants. Au nord (figure **10a**), la sapinière s'oppose fortement aux pins de la parcelle 34. La placette 34_07 sort du nuage à cause de la présence d'espèces qui lui sont particulières (qu'on a trouvé seulement ici : *Arctostaphyllos uva-ursi, Cacalia alpina...*). En versant sud (figure **10b**), l'axe F2 montre un pseudo gradient de maturation : les deux premiers stades d'un côté, les deux suivants de l'autre, la 23 (variante 1bis, stade 3) en position intermédiaire. L'axe F1 oppose les parcelles 102 et 93 aux autres ; la 102_01 étire le nuage à cause des espèces particulières que l'on y trouve (*Avenula bromoides* par exemple). Ces taxons « particuliers » ont des abondances faibles (« + »).

¤ Importance des espèces peu abondantes (« rares au niveau de la placette »)

La suppression de ces taxons « particuliers » ainsi que des autres espèces « rares » (abondance « + ») (figure 11) modifie peu la forme du nuage (en particulier l'opposition nord-sud est conservée). En distinguant les deux versants, on retrouve les mêmes schémas que précédemment avec l'ensemble des espèces. Au nord l'axe F1 distingue nettement la 34 et la 5 (très particulière par le houx, le pin à crochets et l'hépatique). Au sud, pas d'opposition nette sur F1, la 15_04 sort du lot (avec *Rubus bifrons*) ainsi que la 23 (*Rubus idaeus, Deschampsia flexuosa*) ; F2 traduit à nouveau un gradient de maturation, entre la 102+88 et les autres placettes.

Figure 9. Organisation de la végétation dans les sites ; données en présence-absence (Analyse Factorielle des Correspondances : F1=10.3%de l'inertie totale, F2=8.1% ; non représentés : F3=6.0%, F4=5.1%)



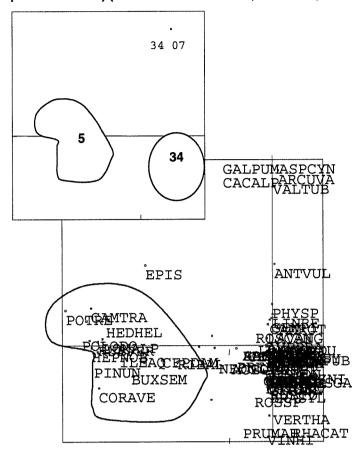
¤ Importance des espèces peu fréquentes (« rares au niveau du massif »)

La même analyse a été faite sur les espèces de fréquence >5 (figure 12) : les inerties sont plus élevées (il y a moins de taxons) et les nuages restent similaires à ceux obtenus sur l'ensemble des espèces. Quel que soit le versant, F1 distingue les premiers stades des stades matures, et F2 les versants nord et sud. On retrouve les résultats des indices de diversité : les espèces peu fréquentes, qui sont aussi en grande majorité des espèces peu abondantes, sont cohérentes avec les autres et n'ont pas un rôle actif dans les patrons d'organisation et dans le fonctionnement général de ces forêts.

¤ Résultats en abondance

Comme montré précédemment, beaucoup d'espèces sont très peu fréquentes ; les augmentations de l'abondance totale (figure 5) dans certaines placettes sont donc le fait de quelques espèces seulement. Bien qu'il soit démontré depuis longtemps en écologie que les données en présence-absence suffisent à décrire les situations correctement (Bonin & Tatoni, 1991), il s'est avéré indispensable dans le cas présent de prendre en considération l'impact du changement d'abondance. Chessel (sur le forum ADE-4) indique toutefois que du point de vie de l'AFC la perte d'information liée au fait de traiter des données en présence-absence par rapport à l'abondance est très faible.

Figure 10. Effet du versant : versant nord en haut, versant sud en bas (AFC, axes F1 et F2, points-lignes et points-colonnes) (Inerties NORD F1=28.2%, F2=11.0%; SUD F1= 10.5%, F2=8.0%)



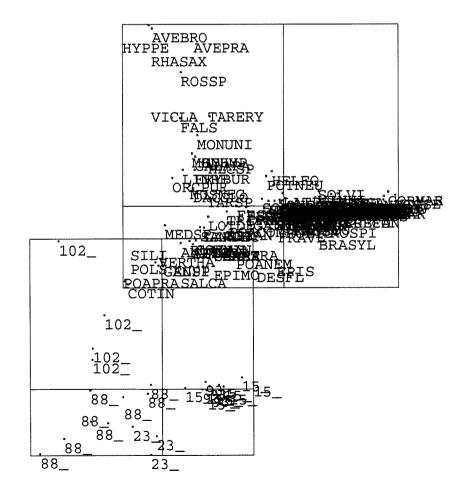


Figure 11. Impact des espèces peu abondantes (AFC, points-lignes et points-colonnes) (Inerties : F1=11.2%, F2=9.2%, non représentés : F3=6.4%, F4=5.8%)

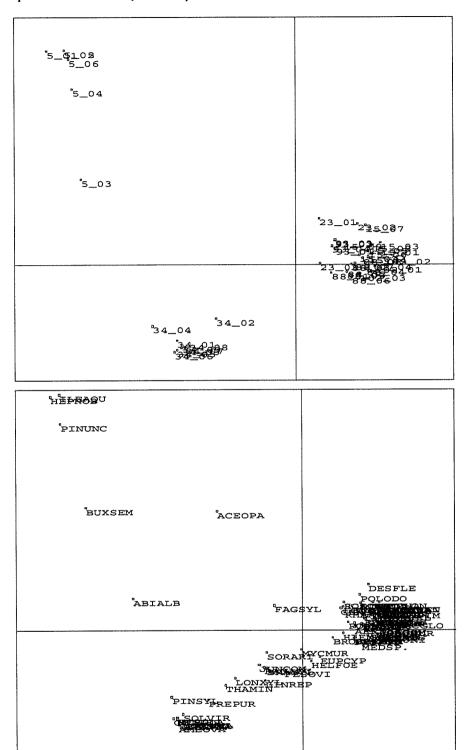


Figure 12. Impact des espèces peu fréquentes (AFC, points-lignes et points-colonnes) (Inerties : F1=11.2%, F2=9.2%, non représentés : F3=6.4%, F4=5.8%)

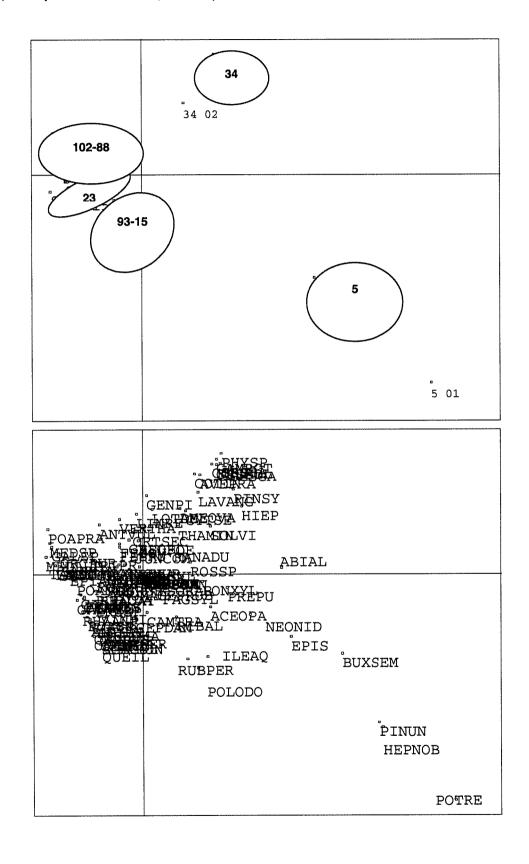


Figure 13. Influence des espèces peu abondantes (AFC, points-lignes et points-colonnes)

Comme pour le calcul des indices de diversité, il a été nécessaire de faire une approximation en transformant le « code d'abondance » (**Braun-Blanquet**, 1932) attribué à chaque observation floristique en la valeur médiane de la classe d'abondance correspondante :

·		
Code	Recouvrement (%)	Médiane
+	~ <1%	0.5
1	~ 1-5%	3
2	5-25%	15
3	25-50%	37.5
4	50-75%	62.5
5	>75%	87.5

La figure 13 présente le graphe de l'AFC sur les espèces en abondance : l'axe F1 discrimine les versants nord et sud. L'axe F2 témoigne globalement du gradient de maturation figuré par les divers stades. La parcelle 23, cependant, se trouve cette fois bien discriminée des autres et se place dans une position intermédiaire entre les deux versants, vraisemblablement du fait de son altitude plus élevée que les autres sites du versant sud.

L'étude des patrons et des processus au sein des communautés végétales est rendue possible en groupant les espèces qui partagent des traits écologiques similaires (ou dont on présume qu'elles jouent un rôle semblable dans les communautés) et renvoie au concept de « groupes fonctionnels » (Lavorel et al., 1997). Afin de s'affranchir des différences taxonomiques entre sites, l'approche par attributs vitaux (modes de pollinisation, types biologiques, tolérance à la lumière...) est donc employée. Les placettes sont caractérisées non plus par des listes d'espèces mais par les caractères botaniques et écologiques de celles-ci.

Afin de comprendre les mécanismes dynamiques intra et inter-stades, nous avons étudié :

- la forme biologique (Raunkiaer, 1934; Molinier & Muller, 1936; Pignatti, 1982, De Bolos et al., 1993), définie par la hauteur du bourgeon de rénovation: chaméphytes, géophytes, hémicryptophytes, phanérophytes, et thérophytes.
- les types de dispersion des diaspores (Molinier & Muller, 1936 ; Van der Pijl, 1982 ; Pignatti, 1982) regroupés en cinq modalités : anémochorie, autochorie, barochorie, hydrochorie et zoochorie.
- les stratégies adaptatives de **Grime** (1977, 1985): espèces stress-tolérantes (**S**, tolérantes aux contraintes physiques de l'environnement ou au stress), espèces compétitives (**C**, des milieux peu perturbés, peu contraints et potentiellement riches), espèces rudérales (**R**, s'adaptant à de fortes contraintes et de fortes perturbations).
- les modes de dissémination du pollen, regroupés en deux catégories : espèces anémogames ou entomogames (les hydrogames et les autogames sont en proportions négligeables).
- la tolérance à la lumière (Rameau et al., 1993) : espèces héliophiles, sciaphiles, de mi-ombre, tolérantes.

Pour l'ensemble des espèces, nous nous sommes basés sur les traits de vie des espèces méditerranéennes fournis par la base de données BASECO développée à l'IMEP (**Gachet**, 2000 ; **Gachet** *et al.*, in prep.).

Organisation générale

Une AFC sur la matrice relevés x attributs vitaux des plantes (figure 14) montre une opposition des versants sur l'axe F1, moins tranchée cependant que dans l'approche floristique. L'axe F2 met de nouveau en évidence un gradient de « caractère forestier ». On note en particulier que la parcelle 5 est très inféodée aux traits « ombre » et « sempervirent », et s'oppose à la parcelle 102, liée à la présence d'annuelles (thérophytes). Ce schéma est confirmé par l'axe F3 (figure 15).

Spectres biologiques

Les versants

Sur l'ensemble des traits éudiés, les traits "Pollen" et "Graines" ne permettent pas de distinguer significativement les versants nord et sud (test du Khi²). La proportion de phanérophytes est identique dans un versant comme dans l'autre. Au nord, les compétitrices augmentent sensiblement, ainsi que les espèces d'ombre ou tolérantes à la lumière ; les annuelles disparaissent totalement.

Les stades du versant sud

Les stades 1, 2a, 2b et 3 de la variante 1 sont caractérisés par des spectres biologiques relativement similaires (figure 15), ne reflétant pas explicitement le gradient d'évolution du couvert arboré. En particulier, les traits « Grime », Pollen », « Phénologie » ne sont pas significativement différents (test du Khi²). Pour chaque attribut, la modalité dominante s'explique souvent par le caractère fermé du milieu ; seules des tendances générales peuvent s'observer :

- une diminution des anémochores, s'expliquant par le degré de fermeture croissant du milieu (sauf dans le site 15 où de larges bandes de régénération ont été créées, et qui en font un cas à part) ;
- une importance de plus en plus grande des endozoochores ;
- une augmentation des espèces entomogames, qui dominent de toute façon largement les autres modes de nollinisation :
- une dominance des espèces sans moyen particulier de multiplication végétative (les espèces à rhizome/stolon sont celles du tapis de graminées : *Bromus erectus, Arrhenaterum elatius...*) ;
- une dominance des hémicryptophytes, qui diminuent cependant au stade 3.

Le stade 3 de la variante 1bis (parcelle 23) se distingue essentiellement par un niveau très faible des nanophanérophytes (*Prunus spinosa* est absent, par exemple). De même, on ne trouve plus d'espèces rudérales. Malgré la fermeture du milieu les anémogames augmentent : cela peut être dû au fait que le sous-bois de hêtre est assez clair et « aéré » ; les entomogames restent cependant majoritaires. On constate un appauvrissement des modes de dispersion des graines : seules les espèces zoochores et anémochores persistent, mais ce résultat peut être directement expliqué par la forte diminution du nombre d'espèces dans cette parcelle.

La figure 16, construite à partir du « caractère forestier » des espèces, confirme la tendance à l'évolution forestière.

Figure 14. Organisation de la végétation dans les sites, fondée sur les attributs vitaux des espèces (Analyse Factorielle des Correspondances: F1=34.0%de l'inertie totale, F2=14.7%; non représentés: F3=9.0%, F4=7.3%)

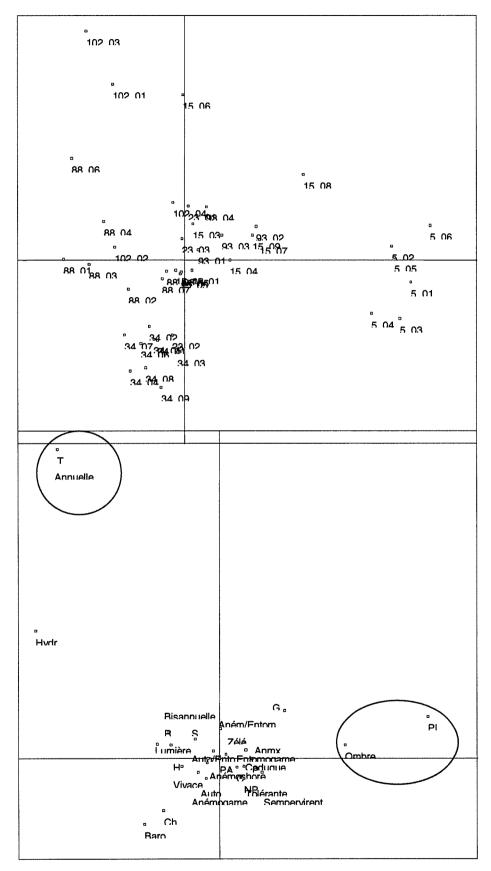


Figure 15. Spectres biologiques des stades 1, 2a, 2b, 3 de la variante 1 et du stade 3 de la variante 1 bis, en versant sud, construits à partir des attributs vitaux suivants : types biologiques (Raunkiaer), stratégies adaptatives (Grime), mode de dissémination du pollen, mode de dispersion des graines, tolérance à la lumière.

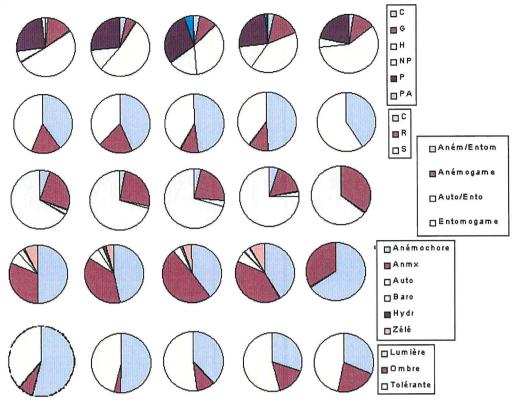
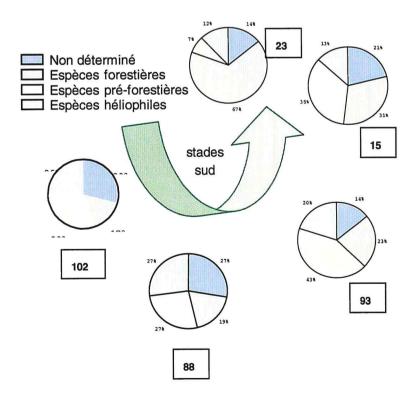


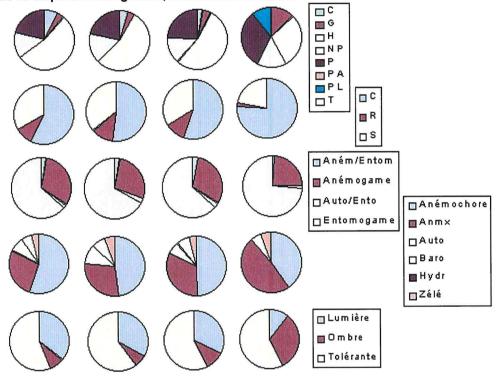
Figure 16. Spectres biologiques des stades en versant sud, construits à partir du caractère forestier des espèces (données : J.Ladier, ONF).



Les stades du versant nord

Une constatation immédiate : du point de vue des traits de vie des espèces végétales, les 3 stades de la parcelle 34 ne sont pas distincts : cette parcelle est très homogène fonctionnellement parlant (figure 17). Des tests de Khi² effectués sur l'ensemble des placettes et des traits montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les stades pour « Grime », « Pollen » et « Graines ». On y remarque une dominance des hémicryptophytes, comme en versant sud, ainsi que des espèces compétitrices en proportion plus importante qu'au sud (marqueurs d'une ambiance forestière) ; les entomogames et les anémochores sont majoritaires (forêt peu « fermée ») ; les espèces héliophiles ou tolérantes à la lumière sont prépondérantes. La parcelle 5 en revanche présente des caractères bien différents : les types biologiques se diversifient, les rudérales diminuent fortement, augmentation des entomogames et des zoochores (notons que les myrmécochores se maintiennent), ainsi que des espèces d'ombre (comme il a été vu dans l'AFC précédemment).

Figure 17. Spectres biologiques des stades 2a, 2b, 3 et 4 en versant nord, construits à partir des attributs vitaux suivants : types biologiques (Raunkiaer), stratégies adaptatives (Grime), mode de dissémination du pollen, mode de dispersion des graines, tolérance à la lumière.



Indices de diversité basés sur les attributs vitaux

La formule de Shannon est appliquée aux pourcentages d'attributs vitaux de chaque placette, ce qui permet d'appréhender leur diversité **fonctionnelle**. Les indices de chaque placette sont synthétisés dans le graphe figure **18**. En versant sud, au fur et à mesure de la maturation forestière, la diversité des types biologiques (*sensu* Raunkiaer) diminue; elle est à son maximum dans les peuplements en mélange (parcelle 93 et 15 = variante 1, stades 2b et 3); de même pour la diversité des modes dispersion des graines. La diversité des stratégies de Grime et des modes de dissémination du pollen en revanche est assez constante et ne chute significativement que dans le stade 3 de la variante 1bis (hêtraie).

En versant nord, on note la relative homogénéité de la parcelle 34. Dans la sapinière (parcelle 5), la variabilité est grande quel que soit l'attribut vital pris en compte, mais des tendances se dégagent tout de même : baisse de diversité des stratégies de Grime (on a vu précédemment que les compétitrices dominent), des modes de dispersion de graines et de pollen. Seule la diversité des types biologiques augmente dans certaines placettes de la 5 (apparition de phanérophytes lianescents comme *Hedera helix*).

Figure 18. Evolution des indices de Shannon (en haut : versant sud, en bas : versant nord) calculés sur la base des attributs vitaux suivants : types biologiques (Raunkiaer), stratégies adaptatives (Grime), mode de dissémination du pollen, mode de dispersion des graines, tolérance à la lumière





APPROCHE ÉCOLOGIQUE (SOPHY)

Le point de départ de cette méthode d'analyse (**Rufray** *et al.*, 1998) est constitué par le tableau de présence des plantes dans les stations. Ici, au lieu de se baser principalement sur la station affectée de ses variables abiotiques, on cherche à mesurer le **lien écologique** entre plantes et milieu, qui est la probabilité de trouver un milieu lorsque, dans une station, on est en présence d'une plante, *que la plante soit présente ou non dans la station*. La **probabilité** dont il est fait état ici correspond à la notion de **fidélité** de Braun-Blanquet (1932) : si la plante se trouve toujours dans le même milieu, et seulement dans celui-ci, c'est qu'elle lui est fidèle : sa probabilité avoisinera 100% ; si la plante se trouve une fois sur deux dans un milieu donné et une fois sur deux dans des milieux différents, elle aura une probabilité de 50% d'indiquer le 1er milieu, etc.

Depuis de nombreuses années, des relevés de type phytosociologiques viennent alimenter la banque de données SOPHY, qui compte aujourd'hui environ 7000 taxons et deux millions d'observations. On mesure la **fidélité** de chaque

taxon à l'égard des 7000 autres taxons de la banque, considérés ici comme des indices de variables. Le comportement écologique d'une plante est constitué par la série des 7000 fidélités de la plante à l'égard des 7000 indices de variables.

Le même tableau des fidélités des plantes aux plantes sert dans un second temps à la caractérisation numérique des milieux des relevés : puisque chaque plante d'un relevé est témoin de son milieu, il est logique de situer le milieu du relevé au centre de gravité des comportements des plantes qui s'y trouvent. Ainsi, plantes et relevés sont situés dans un même espace écologique à 7.000 dimensions. La particularité de cette caractérisation est que le milieu n'est plus défini par la flore du relevé. Les milieux pourront être comparés deux à deux, même si les relevés correspondants n'ont aucune espèce en commun, même si leur richesse floristique est très différente. C'est du tableau sus cité que provient la flore probable qui est la probabilité de trouver une plante ou plutôt, son milieu probable, dans un relevé.

En entrée, on fournit la matrice des relevés x taxons avec les valeurs d'abondance. En sortie, la méthode expose ses résultats à travers une classification hiérarchique (CAH) avec, pour chaque niveau de troncature, les 30 plantes (pas forcément présentes dans les relevés initiaux) les plus discriminantes des milieux correspondant à ce niveau.

Les résultats de cette CAH appliquée à nos données montrent que la quasi-totalité des placettes sont caractérisées par des espèces de milieux « ouverts » (figure 19) telles que Bromus erectus ou Teucrium chamaedrys au premier niveau de troncature. Hedera helix ou Solidago virga-aurea, par exemple, sont discriminantes de milieux forestiers, et sont associées aux sites 23 et 5, ainsi qu'aux placettes 15_07 et 15_08. Ceci témoigne de la jeunesse de la majorité des situations étudiées, qui peuvent être vues comme des « pelouses plantées d'arbres » plutôt que comme des forêts constituées. Une explication peut être l'importance probable de l'histoire des placettes : par exemple, des espèces comme Euphorbia cyparissias dans la placette 102 peuvent tout à fait être des « réminiscences » de l'antécédent cultural avant reboisement (vraisemblablement des cultures, d'après les archives de l'ONF).

Figure 19. Schéma et spectres biologiques du 1er niveau de troncature de la CAH effectuée par SOPHY **PLACETTES** 23 15_07 15_08 5 « forêts » « milieux ouverts » Hémicryptophytes Chaméphytes Raunkiaer Géophytes Nanophanéro. Phanéroph. Stress tolérantes Compétitrices Grime Rudérales **ToléranteS**

Lumière Ombre Lumière

Synthèse - Conclusions

Les résultats obtenus dans l'étude des patrons de réponse de la diversité floristique montrent d'abord que le cortège spécifique du sous-bois est sensible aux changements générés par la maturation forestière, que ce soit au niveau taxonomique ou à celui des attributs vitaux (figure 20).

Cependant, en terme d'organisation hiérarchique, le facteur "versant" demeure prépondérant à travers l'ensemble des composantes qu'il intègre (climat, sol, altitude, pente...).

Les patrons observés au niveau du sous-bois semblent en fait directement liés à la **structure des peuplements**, ellemême dépendant du stade de maturation forestière (conditionné en fait par le mode de gestion sylvicole).

À ce niveau, nous avons pu remarquer d'une part que, sur l'ensemble des placettes, il y a beaucoup d'espèces peu fréquentes et/ou peu abondantes, d'autre part que ce ne sont pas les espèces peu abondantes qui structurent la diversité. Sur un plan méthodologique, ce constat incite à réfléchir sur la qualité de l'information apportée par ces espèces rares, sur la pertinence des protocoles utilisées pour interpréter leur présence/absence et donc sur la difficulté de les intégrer dans des modèles de réponse généralistes. Toutefois, leur faible poids relatif dans la structuration de la diversité globale permet de donner une certaine crédibilité aux orientations définies en matière de gestion de la biodiversité.

Enfin, l'incorporation des relevés dans une importante banque de données floristiques a fait ressortir la relative **jeunesse** des formations forestières étudiées, mettant en évidence l'importance des **facteurs historiques** dans la structuration écologique.

Structure du peuplement

Structure du peuplement

Diversité floristique

Gestion sylvicole

Facteurs abiotiques

Historique de la parcelle

Figure 20. Schéma synthétique des facteurs influençant la diversité floristique

Bibliographie

Attiwill P.M. 1994. Ecological disturbance and the conservative management of eucalypt forests in Australia. <u>Forest</u> Ecology and management 63: 301-346.

Barkman JJ, 1989. A critical evaluation of minimum area concepts. Vegetatio 85:89-104.

Benzécri JP, 1973. L'analyse des données. Dunod, Paris.

Bergeron Y. & Harvey B., 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: an approach applied to the southern boreal mixed wood forest of Quebec. <u>For. Ecol. Man.</u> 92:235-242.

Bonin G. & Tatoni T., 1991. Reflexions sur l'apport de l'analyse factorielle des correspondances dans l'étude des communautés végétales et de leur environnement. Ecologia Mediterranea. Vol. 16.

Braun-Blanquet, 1932. Plant sociology. The study of plant communities. First Ed. McGraw-Hill Book Company, New-York & London.

Burton PJ, Balisky AC, Coward LP, Cumming SG & Kneeshaw DD, 1992. The value of managing for biodiversity. Forest Chronicle. 68:225-237..

Chessel D. 1997. Documentation de la programmathèque ADE-4 "Analyses multivariées et expression graphique des données environnementales". Université Lyon I.

Corona P., 1993. Applying biodiversity concepts to plantation forestry in northern Mediterranean landscapes. Landscape and Urban Planning. 24:23-31.

- Daget P. & Godron M., 1982. Analyse fréquentielle de l'écologie des espèces dans les communautés. Masson. Paris, 163p.
- De Bolos O, Vigo J, Masalles R, Ninot JM. 1993. Flora manual dels països catalans. Editorial Portic.
- Deconchat M. 1999. Exploitation forestière et biodiversité: exemple dans les forêts fragmentées des coteaux de Gascogne. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse. 191p. +annexes.
- Deconchat M., Balent G., Viéban S., Lauga-Reynel F. 1998. Relations entre biodiversité et exploitation forestière : bases pour une méthode d'analyse. Rev. For. Fr. 2: 159-168.
- du Merle P. & coll. 1978. Le massif du Ventoux, Vaucluse : éléments d'une synthèse écologique. <u>La Terre et la Vie</u> supplément 1.
- Evans MN & Barkham JP, 1992. Coppicing and natural disturbance in temperate woodlands –a review. In: Ecology and management of coppice woodlands, GP Buckley (ed.), London, Chapman & Hall.
- Gachet S., 2000. A tool to elaborate plant functional types: the floristic database BASECO. Poster présenté lors de l'atelier "Groupes Fonctionnels : concepts et applications". CEFE / ENSA-M Montpellier 25-26 septembre 2000.
- Gilliam FS, Turrill NL, Adams MB 1995. Herbaceous layer and overstory species in clear-cut and mature central Appalachian hardwood forests. Ecological Applications. 5(4):947-955.
- Grime JP 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plant and its relevance to ecological and evolutionary theory. <u>American Naturalist</u>. 11:1169-1193.
- Grime JP. 1985. The CSR model of primary plant strategies origins, implication and tests. In: LD Gottlieb et SK Jain (coord.), Plant Evolutionnary Biology. Chapman & Hall, London & New-York, pp. 371-393.
- Guiot J. & Goeury C. 1996. 3PBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. Dendrochronologia 14: 295-300.
- Halpern C. B. & Spies T. A. 1995. Plant species diversity in natural and managed forests of the Pacific Northwest. Ecological Applications 5: 913-934.
- Kaila L., Martikainen P., Puntilla P. 1997. Dead trees left in clear-cuts benefit saproxylic Coleoptera adapted to natural disturbances in boreal forest. Biodiv. Conserv. 6: 1-18.
- Kerguelen M. 1994. Index synonymique de la flore de France. MNHN. Paris. Collection Patrimoines Naturels.
- Lavorel S, McIntyre S, Landsberg J, Forbes TDA. 1997. Plant functional classification: from general groups to specific groups based on response on disturbance. <u>TREE</u>. 12(12):474-478.
- Lepart J. & Escarré J., 1983. La succession végétale, mécanismes et modèles : analyse bibliographique. <u>Bull. Ecol.</u> 14:133-178.
- Molinier R. & Muller P. 1938. La dissémination des espèces végétales. Lesot, Paris. Vol.64, 178p.
- Noss R. F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. Conserv. Biol. 44: 355-364.
- Pickett STA, Kolasa J, Armesto JJ, Collins SL 1989. The ecological concept of disturbance and its expression at various hierarchical levels. <u>Oïkos</u>. 54:129-136.
- Pignatti S. 1982. Flora d'Italia. Edagricole (ed.), Bologne, 3 volumes, 2302p.
- Quézel P. 1999. Biodiversité végétale des forêts méditerranéennes, son évolution éventuelle d'ici à trente ans. Forêt Méditerranéenne 20(1): 3-8.
- Rameau JC, Mansion D, Dumé G 1989. Flore forestière française. Institut du Développement Forestier, Dijon, 2 vol.
- Raunkiaer C. 1934. The life-forms of plants and statistical plant geography. Oxford University Press, Oxford, 632p.
- Ruffray P. (de), Brisse H., Grandjouan G. & Garbolino E. 1998. SOPHY, une banque de données botaniques et écologiques. Site web : http://Jupiter.U-3mrs.fr/~Msc41www
- Tatoni T, Magnin F, Bonin G, Vaudour J. 1994. Secondary successions on abandoned cultivation terraces in calcareous Provence. Acta Oecologica. 15(4):431-447.
- Tatoni T. & Roche P., 1994. Comparison old-field and forest revegetation dynamics in Provence. <u>J.Veg.Sc</u>. 5:295-302.
- Thioulouse J, Chessel D, Doledec S, Olivier JM. 1997. Stacks and program library for the analysis of environmental data. Elsevier, Amsterdam. Site web: http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4/
- Thomas SC, Halpern CB, Falk DA, Liguori DA & Austin KA, 1999. Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization. <u>Ecological Applications</u>. 9:864-879.
- Van der Pijl, 1982. Principles of dispersal in higher plants. Springer, Berlin, Heidelberg & NewYork. 161p.
- Whitehead, D. 1982. Ecological aspects of natural and plantation forests. For. Abstr. 43(10): 73-92

Tâche 8: Simulations INRA (URFM), ONF, IMEP

Services exécutants : INRA-URFM (+ IMEP, ONF)

Responsable: Ph. Dreyfus (INRA-URFM, Équipe « Croissance et conduite des Peuplements Forestiers »)

Objectif

L'objectif initial était de simuler l'évolution des structures des peuplements et de la biodiversité conjointe (floristique) sur 10-15 ans, d'une part sur les sites étudiés et d'autre part, à l'échelle plus globale de l'ensemble de la zone d'étude, en fonction de scénarios de gestion simulés.

Méthodes mises en œuvre

Sur la base des cartes (SIG ONF) des structures de peuplement et des stations forestières, ainsi que de la connaissance de l'état actuel des niveaux de régénération (cf. Tâche 1), simulation informatique par fonctionnement du modèle de dynamique des structures de peuplement (cf. Tâche 4), pour divers scénarios de gestion (y compris ceux prévus dans les documents d'aménagement.)

Simulation rétrospective à des fins d'analyse

Les premières simulations réalisées (à l'aide du logiciel d'analyse et de visualisation SAS ®) dans le cadre du projet, au cours de la deuxième année, avait pour but d'analyser la dynamique passée des sites étudiés et de contribuer à l'explication les niveaux de régénération observés (effectifs et dimensions) pour les différentes essences (en l'occurrence, Pin noir et Hêtre puisqu'il s'agissait de sites de la variante 1) sur la base de la connaissance des interventions sylvicoles passées.

Connaissant la date et, via les souches, les dimensions et le nombre d'arbres adultes enlevés, l'évolution de la surface terrière et du nombre de tiges du peuplement adulte ont été reconstituées à l'aide de relations entre diamètre de souche et diamètre à 1,30 m et en utilisant (en mode inverse) le modèle de croissance dont nous disposons pour les peuplements réguliers de Pin noir.

Dans l'exemple présenté ci-dessous, qui concerne le site représentant le stade 2b de la variante 1, la surface terrière a ainsi pu être estimée à 55 m²/ha juste avant la dernière coupe (1981), à 32 m²/ha juste après cette coupe, avant de réaugmenter progressivement jusqu'à la valeur actuelle (fin 1998) de 41 m²/ha.

Les résultats des simulations sont présentés ci-après, sous forme graphique.

La comparaison avec le peuplement réel à 78 ans montre une grande similitude entre états simulé et réel en ce qui concerne la surface terrière, mais des différences significatives en nombre de semenciers de Pin noir restants : ceci s'explique par le fait que l'intensité des éclaircies simulées est fixée en termes de surface terrière - mieux reliée au couvert, variable explicative utilisée par les relations du module de régénération - plutôt qu'en nombre de tiges. L'idéal serait de jouer simultanément sur ces deux paramètres.

En ce qui concerne la régénération, les structures (simulée et réelle) des populations de semis sont assez similaires, au moins en termes de dimensions respectives des espèces.

Une autre simulation, non présentée ici, a été réalisée de la même manière pour le site représentant le stade 2a de la variante 1, où les coupes se sont succédées plus rapidement au cours des 20 dernières années, et pour lequel, par contre, les hêtraies sources potentielles sont nettement plus éloignées.

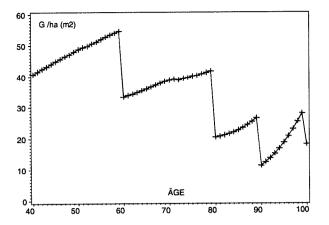
Dans les deux cas, les dynamiques simulées, même sur des périodes assez longues (de 40 à 100 ans), sont globalement cohérentes, au moins qualitativement, avec les observations de terrain. Le modèle provisoire mis au point permet de rendre compte de manière logique de l'évolution conjointe de la structure du peuplement adulte et de la régénération : par exemple, forte abondance des semis de Pin noir après une coupe forte, puis forte régression au profit du Hêtre quand le couvert se referme et n'est pas réouvert suffisamment tôt (cas de la simulation présentée ci-dessus, entre 60 et 78 ans).

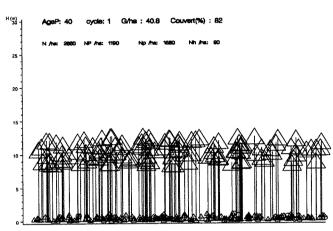
Cependant, il faut rester très prudent dans les comparaisons entre régénérations réelle et simulée par cette méthode :

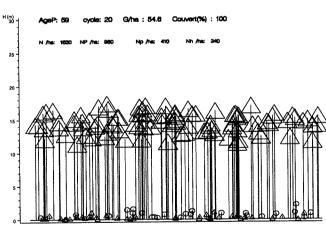
- la sylviculture passée des sites étudiées est connue assez précisément en termes de date, mais de manière approximative en termes d'intensité des interventions, en particulier sur la surface précise du site ;
- cette simulation a nécessité le choix d'un paramètre décrivant le flux de graines de Hêtre (supposé assez élevé dans le cas présenté du fait de la proximité de deux hêtraies) ; le réglage de ce paramètre restait très arbitraire à ce stade de l'étude.

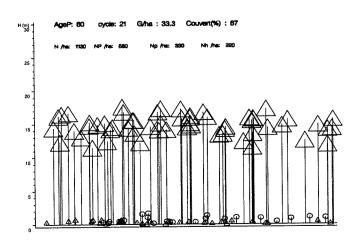
Pour ces raisons, ce type de simulation n'a pas été poursuivi.

Sylviculture simulée : évolution de la surface terrière ; à 78 ans, le peuplement est voisin de celui du stade 2b









Cette simulation fait passer le peuplement, entre 40 et 78 ans, par un itinéraire sylvicole proche de celui connu pour le site représentant le stade 2b de la variante 1 (Plle 93, FD du Ventouret).

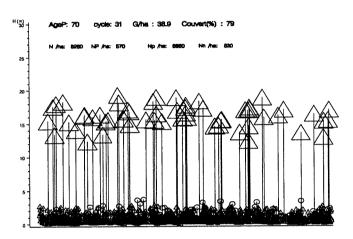
PIN NOIR : houppier triangulaire ; HÊTRE : houppier rond

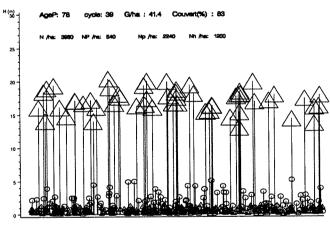
À 78 ans, le peuplement simulé est comparé au peuplement réel.

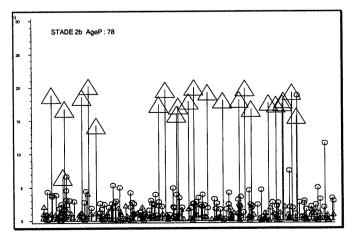
Une simulation est poursuivie jusqu'à 100 ans.

Sont présentés :

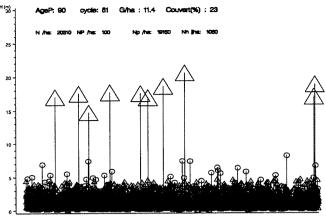
- l'évolution de la surface terrière (m²/ha) ;
- le peuplement simulé à 40, 59, 60, 70, 78, 90 et 100 ans (positions initiales aléatoires);
- le peuplement réel à 78 ans (G/ha = 41,4 m²/ha, N/ha = 510) ;
- l'évolution de la hauteur moyenne et de l'effectif des 3 compartiments que constituent les arbres adultes (« semenciers », S), les semis de Pin noir (P) et de Hêtre (H)

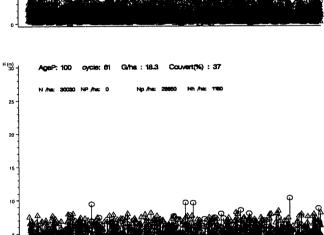






ECOFOR - BGF - Ventoux 1998-2001 109

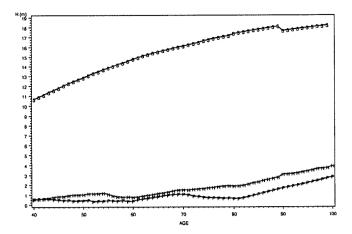




Évolution de la hauteur moyenne des 3 compartiments :

S: arbres adultes (« semenciers »)

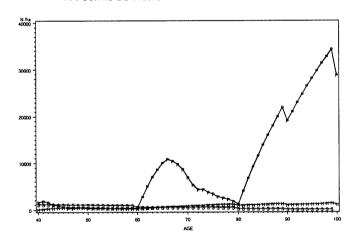
P : semis de Pin noir H : semis de Hêtre



Évolution de l'effectif des 3 compartiments :

S: arbres adultes (« semenciers »)

P : semis de Pin noir H : semis de Hêtre



Simulations prospectives:

Démarche adoptée

Ce type de simulation prend pour point de départ une situation actuelle réelle ou une situation virtuelle.

Objectifs des simulations

Les objectifs généraux de ces simulations peuvent être :

- d'évaluer quantitativement la capacité prédictive du modèle, lorsqu'on dispose d'un jeu de données indépendant ; ce n'est pas encore le cas ici ;
- de tester qualitativement le comportement du modèle, c'est-à-dire sa capacité à reproduire fidèlement la dynamique observée sur les sites et dans la zone d'étude, notamment les différences de comportement des espèces selon leur tempérament; cet aspect est important car, comme pour la plupart des études de modélisation dans le domaine de la croissance ou de la dynamique des peuplements forestiers, les relations du modèles sont établies séparément (même si les données proviennent du même réseau expérimental ou d'observation) et il est toujours nécessaire de vérifier leur fonctionnement d'ensemble; de plus, dans le cas présent, il s'agit de faire évoluer conjointement les peuplements constituant une forêt par le jeu des relations de dispersion qui représentent les interactions entre ces peuplements, plus difficiles à apprécier que des relations impliquant des phénomènes (compétition, par ex.) et des variables mesurés au sein d'un même peuplement.
- de réaliser des analyses de sensibilité pour identifier un paramètre (par ex., l'âge de reproduction, ou les paramètres d'intensité des relations de dispersion) ou une relation qui conditionnerait fortement la dynamique dans son ensemble, et qui

ECOFOR - BGF - Ventoux 1998-2001 110

pourrait éventuellement faire l'objet d'études plus approfondies si sa détermination est jugée insuffisamment sûre à ce stade de l'étude.

 à terme, les simulations doivent pouvoir servir d'arguments pour la prise de décisions dans les processus de définition des stratégies de gestion à l'échelle de la forêt et du massif, ainsi qu'à l'échelle du peuplement pour le choix des interventions sylvicoles.

Le schéma ci-dessous présente la place du modèle de dynamique, utilisé pour la simulation, au sein d'une **démarche globale** dans laquelle s'inscrit la présente étude :

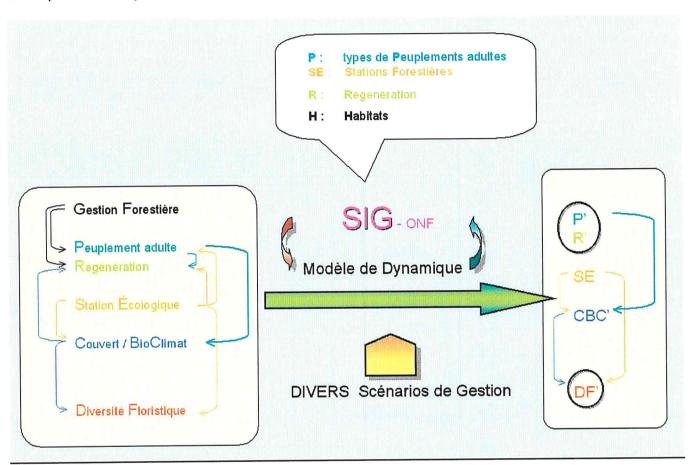


Plate-forme de simulation CAPSIS

Nous avons intégré le modèle provisoire de dynamique dans un nouveau module (dénommé « Ventoux ») de la plate-forme de simulation Capsis 4.0 développée par l'INRA à Montpellier (cf. www.multimania.com/coligny/).

Cette plate-forme, développée en Java depuis mi-1999, succède à la version CAPSIS 3.0 (en C++) développée en 1997 (INRA-URFM Avignon) et que nous avions prévu d'utiliser dès le début de ce projet pour tester le modèle et les hypothèses qui le sous-tendent au fur et à mesure de sa mise au point et pour orienter l'acquisition de données en cours de projet.

Cette version, non maintenue, a été abandonnée ; la version 4.0 correspond à la reprise du projet CAPSIS dans un nouveau cadre, stable et pérenne, avec des choix logiciels permettant une utilisation sur divers matériels informatiques et divers systèmes d'exploitation.

À partir d'une version initiale 4.0b, disponible fin juin 2000, la mise au point du module « Ventoux » a été faite parallèlement à l'évolution de la plate-forme : certaines fonctionnalités ou évolutions des structures génériques de données ont été développées pour les besoins du module « Ventoux ».

Des simulations « mono-peuplement » ont été possibles à partir de l'automne 2000. Par contre, la simulation sur un grand ensemble d'UAs n'est devenue opérationnelle que très récemment (début mai 2001).

Connexion avec le Système d'Informations Géographiques de l'ONF

Le schéma ci-dessus indique une connexion avec la base de données géo-référencées de l'ONF (SIG ArcInfo, à la Cellule Régionale d'Appui Technique de l'ONF de Manosque). Ce SIG contient les couches d'information suivantes (en plus du référentiel géographique, du Modèle Numérique de Terrain, des limites de forêts, de parcelles ...):

- la carte des types de peuplements, au sens de la typologie utilisée dans les documents d'aménagement de l'ONF; ces types de peuplements concernent l'étage dominant du peuplement (le sous-bois et la régénération ne sont pas pris en compte) et sont définis à partir de l'essence principale, d'une ou deux essences secondaires dont les proportions approximatives sont spécifiées, ainsi que par un âge ou une fourchette d'âge (qui peut être très vaste dans le cas des peuplements inéquiennes).
- la carte des <u>stations forestières</u>, établie à partir de catalogues (tels que : NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.) ou d'études plus ponctuelles et moins fines à l'occasion de la mise à jour des aménagements.
- la carte des habitats au sens de la Directive « Habitat » de l'Union Européenne ; elle n'a pas été utilisée dans le cadre de cette étude.

Remarque: au cours de ce projet, les informations recueillies dans le cadre de la Tâche 1 « Carte de la dynamique du Hêtre, du Sapin et de la régénération des Pins » ont été intégrées à ce SIG, ce qui a permis d'analyser les relations entre niveaux de régénération observés et proximité des peuplements-sources de graines (cf. Tâches 1 et 4, et Partie 2 « Résultats élaborés - Approches transdisciplinaires »).

Notion d'Unité d'Analyse - Informations d'entrée et Initialisation des Simulations

La conjonction de ces informations et leur superposition permet de définir des « Unités d'Analyse » homogènes pour le type de peuplement et la station. Une unité de gestion (parcelle forestière, ou éventuellement sous-parcelle) est ainsi constituée d'une ou plusieurs unités d'analyse (notées UAs dans la suite du rapport).

Du fait des interactions entre peuplements à travers les flux de graines (cf. Tâche 4 et Partie 2 de ce rapport final), nous nous sommes orientés vers la simulation à une échelle plus vaste qu'un peuplement pris isolément. Cette échelle plus vaste correspond à un ensemble d'UAs.

En entrée du simulateur, il faut alors pouvoir fournir la liste des UAs correspondantes, avec leur position, leurs limites, l'altitude de leur centre, le type de peuplement (nom et proportion de l'espèce principale et des espèces secondaires éventuelles, âge), le type de station forestière.

Nous avons établi par ailleurs des relations statistiques simples à partir des données recueillies par l'ONF dans le cadre de la Tâche 1 :

- nombre de tiges du peuplement adulte en fonction de l'âge (et du type de peuplement) ;
- surface terrière du peuplement adulte en fonction de l'âge (et du type de peuplement).

À partir de ces relations et des informations issues du SIG, l'initialisation de la simulation consiste, pour chaque UA, à :

- générer un petit nombre de cellules carrées de 10 m x 10 m, représentatives : au moins 9 pour une futaie de pin dont on va simuler l'évolution ; une seule pour une hêtraie ou une sapinière qui n'est utilisée en simulation qu'en tant que source potentielle de graines.
- générer des arbres adultes dans chaque cellule carrée (où ils sont positionnés aléatoirement), dont le nombre et le diamètre moyen sont déterminés par le nombre de tiges, la surface terrière de l'UA et les proportions des espèces, dont la hauteur dominante est fonction de la station forestière, de la hauteur dominante potentielle atteinte pour ce type de station et l'âge indiqué par le SIG (pour les quelques UAs classées en peuplement inéquienne, on a pris l'âge maximum); on passe des valeurs moyennes ou dominantes aux valeurs individuelles par des tirages aléatoires dans des fourchettes calées sur ces valeurs (en tenant compte d'un surcroît de tiges en dessous de la hauteur dominante et du diamètre moyen quadratique).

Deux remarques très importantes :

- les relations statistiques simples entre nombre de tiges et surface terrière du peuplement adulte d'une part, âge et type de peuplement d'autre part pourraient être affinées quelque peu, mais elles resteront probablement assez imprécises du fait qu'elles ne prennent pas en compte l'histoire sylvicole (en fait, elles reflètent seulement une sylviculture moyenne). Pour des simulations à partir de situations réelles, il pourrait être intéressant d'intégrer des informations sur ce point. Dans tous les cas, en situation réelle ou virtuelle, il est indispensable de prendre en compte la variabilité considérable autour des tendances moyennes: gommer cette hétérogénéité initiale conduit forcément à sous-estimer fortement l'hétérogénéité

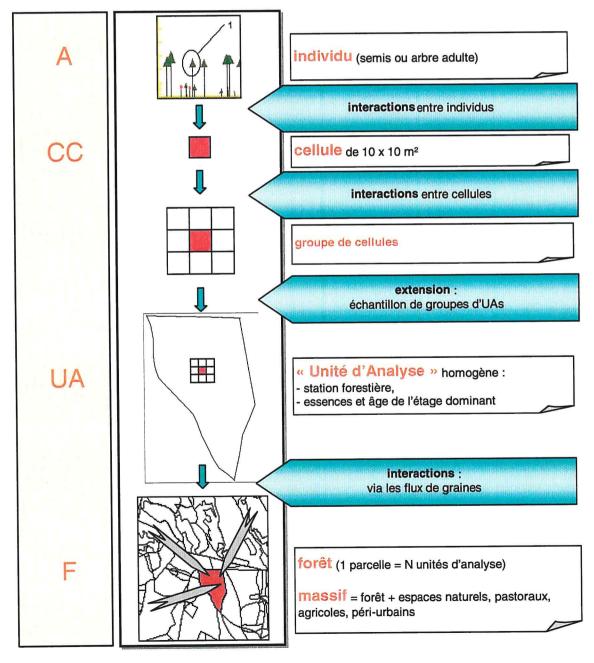
simulée. Compte tenu de la non-linéarité de la plupart des relations du modèle de dynamique, il n'est pas envisageable de reconstituer correctement l'hétérogénéité, après coup, à partir de l'évolution simulée de la seule tendance moyenne ; il est nécessaire d' « embarquer » dans le processus de simulation une représentation, simplifiée mais non sous-estimée dans son ampleur, de l'hétérogénéité initiale. Il y a là matière à une étude sans doute difficile mais indispensable.

- la régénération existante en début de simulation n'est pas prise en compte: les 214 placettes de description de la régénération (Tâche 1) ne couvrent malgré leur nombre qu'une faible proportion du nombre d'UAs; cette lacune pourrait être comblée à partir de relations statistiques établies dans le cadre de la Tâche 1 ou dans son prolongement au-delà du présent projet. Naturellement, le problème de la représentation de l'hétérogénéité autour de ces relations se pose là aussi, et sans doute de manière encore plus complexe car elle prend une dimension spatiale plus forte.

Simulations prospectives:

Structure de données et fonctionnement

• Structure de données du module « Ventoux » de CAPSIS 4 - Mode de spatialisation Les arbres ou semis ne sont spatialisés que par leur appartenance à une cellule carrée donnée. La forêt (ou une partie) est subdivisée en UAs, contenant chacune des cellules carrées d'1 are.



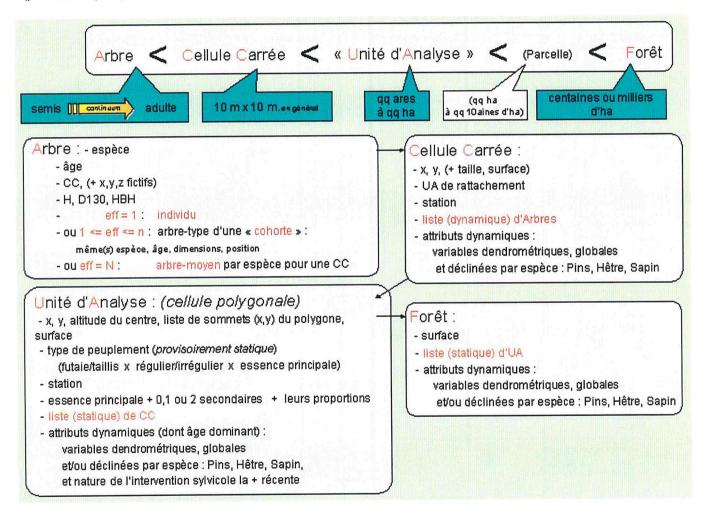
Les liens entre niveaux d'échelle spatiale sont de diverses natures :

- interactions de compétition entre individus d'une même cellule ;
- influence des cellules voisines sur la croissance (au moins en hauteur, cf. Tâche 4) de la régénération d'une cellule donnée ;
- les cellules carrées sont considérées comme une représentation de l'ensemble de l'UA, dont les caractéristiques se déduisent de celles de ces cellules ;
- les UAs évoluent de manière indépendantes, sauf pour le recrutement dont l'intensité dépend de la distance des UAs sources de graines (à noter que l'UA est source de graines pour elle-même et que le recrutement en Pins provient de cette cellule, tant qu'elle contient du Pin d'âge supérieur à l'âge de reproduction et des pinèdes voisines).

Le schéma ci-dessous représentent les attributs de chaque entité.

À noter que :

- la parcelle forestière n'est pas utilisée actuellement comme une entité fonctionnelle dans le simulateur ;
- un arbre peut en fait en représenter plusieurs (une « cohorte »), apparus ensemble, de dimensions identiques ; dans ce cas, l'arbre-type qui représente la cohorte possède un effectif. À l'extrême, pour une UA qui ne joue dans la simulation qu'un rôle de source de graines, chaque cellule carrée peut ne contenir qu'un seul arbre-type par espèce, qui correspond à l'arbre moyen (pour cette espèce) de la partie du peuplement définie par cette cellule.



Fonctionnement de la simulation sur une UA seule (c'est-à-dire sur un peuplement unique, pris isolément)

Il est possible de simuler l'évolution d'un peuplement (réel ou virtuel) seul. Ceci nécessite toutefois de faire une hypothèse sur le niveau des flux de régénération. Le fichier d'entrée doit contenir la description des cellules carrées et des arbres (et semis éventuels déjà en place).

Initialisation:

- lecture d'un fichier de Cellules Carrées et d'Arbres (espèce, D, HT, âge)
- indication (par l'utilisateur) du niveau des « flux de semis », supposés constants et uniformes
- calcul des attributs dynamiques des Cellules Carrées et de l'UA

Évolution (régénération, croissance, mortalité) : pas de la simulation : 1 à 5 ans (ou autre)

- régénération
- croissance / mortalité arbre par arbre :
 - relations dynamiques / probabiliste : croissance en hauteur, mortalité, croissance en diamètre
 - relations allométriques (dimensions du houppier ...)
- mise à jour des attributs dynamiques des CC et d'UA.

Éclaircie interactive ...:

- spécification des caractéristiques :
 - systématique : choix des espèces et d'une fourchette de H, D130 ou âge
 - et, éventuellement, des CCs concernées (par ex., pour la création de trouées),
 - sélective (intensité différenciée selon la taille, ou sélection sur carte),
- application du mécanisme d'éclaircie,
- suppression des arbres concernés (ou diminution de l'effectif pour un arbre-type représentant une cohorte),
- mise à jour des attributs dynamiques des CC et de l'UA.

... ou Gestion sylvicole « automatique » :

- test de la nécessité d'intervenir et du type d'intervention selon :
 - le type de peuplement,
 - les durées de rotation, de révolution (ou âge d'exploitabilité) choisies,
 - nature de l'intervention sylvicole la plus récente,
 - les caractéristiques dendrométriques comparées aux normes sylvicoles choisies ;
- application CC par CC : suppression (ou diminution de l'effectif) des arbres concernés, traduisant dépressage, éclaircie, coupe de régénération, coupe de taillis, et dégâts d'exploitation sur la régénération;
- mise à jour des attributs dynamiques des CC et de l'UA.

• Fonctionnement de la simulation sur un ensemble d'UAs

Initialisation:

- lecture d'un fichier d'UAs : station, type peuplement, âge dominant, espèces 1 (principale),2,3 (secondaires éventuelles) et leurs proportions, position, géométrie ;
- calcul des « flux de semis » entre UAs, pour Pins, Hêtre, Sapin ;
- génération de quelques CCs, par UA et génération des Arbres, par CC ;
- calcul des attributs dynamiques des UA, des CC et de la F;
- choix d'une stratégie de gestion sylvicole (permanente) ou de l'évolution naturelle.

Évolution (régénération, croissance, mortalité) : pas de la simulation : 5 ans (ou autre)

- régénération
- croissance / mortalité arbre par arbre :
 - relations dynamiques / probabiliste : croissance en hauteur, mortalité, croissance en diamètre ;
 - relations allométriques (dimensions du houppier ...) ;
- mise à jour des attributs dynamiques des CC, des UA et de la Forêt ;
- mise à jour des « flux de semis ».

Gestion sylvicole (automatique, non interactive) : appliquée UA par UA

- test de la nécessité d'intervenir et du type d'intervention selon :
 - le type de peuplement,
 - les durées de rotation, de révolution (ou âge d'exploitabilité) choisies,
 - nature de l'intervention sylvicole la plus récente,
 - les caractéristiques dendrométriques comparées aux normes sylvicoles choisies ;
- application CC par CC : suppression (ou diminution de l'effectif) des arbres concernés, traduisant dépressage, éclaircie, coupe de régénération, coupe de taillis, et dégâts d'exploitation sur la régénération;
- mise à jour des attributs dynamiques des CC, des UA et de la Forêt.

Simulations prospectives :

Premières simulations

• Simulation des interventions sylvicoles

Les 3 scénarios de gestion testés sont :

- G 0 : Évolution Naturelle,

- G 1: sylviculture classique à rotation de 10 ans,

- G 2 : sylviculture classique à rotation de 20 ans.

G1 et G2 ne diffèrent que par la rotation entre les coupes. En fait, une condition sur l'évolution de la hauteur dominante du peuplement est utilisée conjointement avec la durée de rotation : pour G1, une nouvelle éclaircie intervient si la précédente date de plus de 10 ans ou éventuellement plus précocement si l'accroissement de hauteur dominante dépasse 3 m; pour G1, une nouvelle éclaircie intervient si la précédente date de plus de 20 ans ou éventuellement plus précocement si l'accroissement de hauteur dominante dépasse 6 m.

Les interventions sont réalisées séparément pour chaque Unité d'Analyse ; il est prévu de modifier le simulateur pour regrouper le passage en coupe des UAs d'une même parcelle de gestion, pour se rapprocher du mode de fonctionnement réel.

Pour les autres critères, G1 et G2 sont définies et programmées de manière semblable :

- durée de révolution : 100 ans (âge dominant du peuplement) ;
- en fait cette durée de révolution définit l'âge où se déclenche la succession des coupes progressives de régénération, succession qui débute par la coupe d'ensemencement :
 - enlèvement d'1/3 des individus de plus de 50 ans ;
 - destruction d'1/3 de la régénération (âge < 50 ans), d'1/4 seulement pour le Hêtre (considérant que sa capacité à rejeter lui confère une sensibilité moindre, non pas dans l'immédiat, mais à court terme.
- au 1er cycle de simulation qui suit : coupe secondaire (unique) ;
 - enlèvement d'1/3 des individus de plus de 50 ans ;
 - destruction d'1/3 de la régénération (âge < 50 ans), d'1/4 seulement pour le Hêtre (considérant que sa capacité à rejeter lui confère une sensibilité moindre, non pas dans l'immédiat, mais à court terme.
- au 2nd cycle de simulation qui suit : coupe définitive ;
 - enlèvement de tous les individus restants de plus de 50 ans ;
 - destruction d'1/3 de la régénération (âge < 50 ans), d'1/4 seulement pour le Hêtre (considérant que sa capacité à rejeter lui confère une sensibilité moindre, non pas dans l'immédiat, mais à court terme.
- éclaircies (coupes d'amélioration) :
 - supprime 1/3 des individus de diamètre D si : D >= 0,75 x Ddom (diamètre dominant du peuplement)
 - supprime 1/4 des individus de diamètre D si : 0,50 x Ddom >= D > 0,75 x Ddom
 - supprime 1/2 des individus de diamètre D si : 0,50 x Ddom > D, y compris dans la régénération, ce qui est censé représenter des dégâts d'exploitation (abattage et débardage).

Ces critères sont actuellement assez simplistes et devront être améliorés, en dialogue avec nos partenaires gestionnaires de l'ONF.

Notamment, le dépressage, première coupe après l'obtention de la régénération (éventuellement réalisée en deux temps) devra être distingué des coupes ultérieures, d'une part parce que son intensité est habituellement nettement plus forte, et surtout parce que c'est un stade où le gestionnaire peut choisir un dosage des proportions des essences en concurrence dans une régénération mélangée.

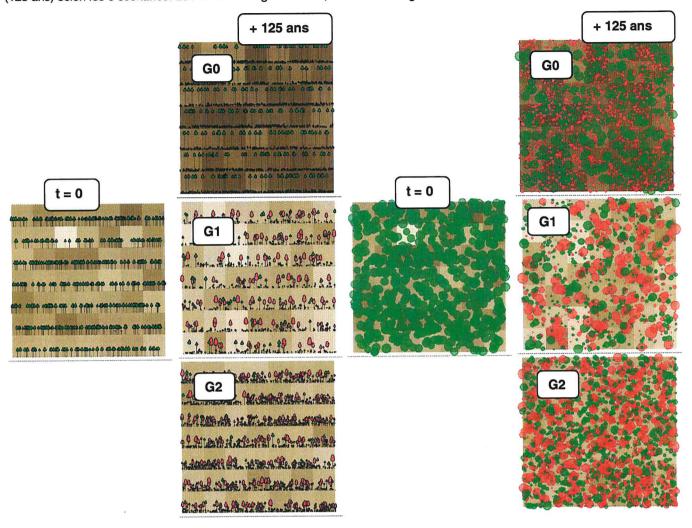
À noter que ce dosage peut aussi se poursuivre lors des éclaircies, et des coupes de régénération où des semenciers « indésirables » peuvent être éliminés d'entrée.

Simulation de l'évolution d'un peuplement, pris isolément

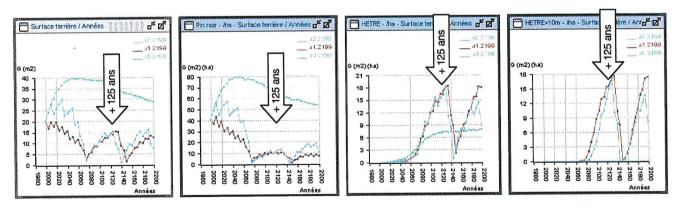
Un seul exemple est présenté ici. La simulation part d'une situation réelle correspondant au site représentatif du stade 1 de la variante 1, stade auquel la régénération est encore très peu développée.

La sylviculture est simulée de manière automatique (c'est-à-dire sans nécessiter de spécifier les critères d'intervention à chaque coupe).

La figure ci-dessous représente, en vue verticale et en vue horizontale, le résultat de l'évolution simulée sur le long terme (125 ans) selon les 3 scénarios. Le Pin noir est figuré en vert, le Hêtre en rouge.



Les graphiques ci-dessous présentent l'évolution de la surface terrière totale, de celle en Pin noir, en Hêtre et en Hêtre de plus de 10 m de hauteur (G0 est figuré en vert, G1 en en rouge, G2 en bleu). On note qu'en évolution naturelle (en vert), la régénération de Hêtre, sous couvert fermé, est abondante (à la différence de celle du Pin noir) mais reste basse (la surface terrière des hêtres > 10 m est nulle).



Conclusions

L'évaluation du comportement du modèle, à l'aide de simulations destinées à cette opération, est une étape nécessaire avant son utilisation à des fins prédictives.

Dans l'idéal, il faudrait réaliser une évaluation complète, quantitative (précision des évolutions prédites), ce qui est une opération difficile - même dans le cas de modèles plus simples et de peuplements homogènes - faute de jeux de données indépendants permettant de comparer évolution mesurée et évolution prédite. Certaines méthodes statistiques permettent d'y remédier en partie, mais ce n'était pas envisageable dans la durée de ce projet.

À partir de l'exemple présenté et de quelques autres, l'évaluation a donc consisté jusqu'à présent uniquement en une vérification de la cohérence du comportement qualitatif du modèle, par rapport aux structures de peuplements (y compris la régénération) mesurées et à la connaissance générale que nous avons de l'évolution des peuplements forestiers en fonction de la sylviculture.

Cette évaluation devra être poursuivie sur des situations-types extraites des sites étudiées, ainsi que sur des situations fictives, plus simples, plus nombreuses et agencées selon un plan bien structuré, afin de mieux faire la part du rôle de chacune des composantes du modèle.

Mais pour prendre en compte les interactions entre peuplements et pour tester la composante du modèle de dynamique qui rend compte de ces interactions (flux entre peuplement-récepteur et peuplements-sources), il est nécessaire d'opérer des simulations à une échelle plus vaste : une forêt ou un ensemble de forêts (par ex. versant Sud), éventuellement restreint à la tranche d'altitudinale correspondant à notre zone d'étude.

Ceci nécessite que l'on puisse disposer pour cette entité d'une information suffisante pour chaque unité d'analyse et ceci de manière homogène.

C'est une des raisons qui a conduit à identifier une tâche supplémentaire dans notre projet : cette tâche, présentée à la fin de cette Partie 1 du rapport final (page 120), a consisté en une synthèse cartographique à l'échelle de la zone d'étude, réalisée par la CRAT-ONF.

Une fois réalisée, nous avons entamé des simulations opérant à une échelle vaste (cf. Partie 2 de ce rapport), afin de présenter de premiers éléments (provisoires) de pronostic à moyen terme concernant la dynamique de maturation en fonction des scénarios de gestion.

Tâche 9: Analyse conjointe - Synthèses (tous les partenaires)

Services exécutants : tous les partenaires du projet

Responsable: Ph. Dreyfus (INRA-URFM, Équipe « Croissance et conduite des Peuplements Forestiers »)

Présentation de l'action de recherche

Objectif initial

Réunir l'ensemble des compétences des partenaires pour mieux mettre en évidence et comprendre les relations entre les différents types d'information disponible et en dégager les enseignements principaux du projet de recherche.

Méthodes envisagées pour l'Organisation des Informations :

- O analyse des données par chaque secteur de compétence de manière à fournir des données élaborées ;
- O intégration des données élaborées dans des Bases de Données Spatialisées (SIG de la CRAT ONF) :
- à l'échelle de chaque site (spatialisation des entités de la mosaïque correspondante); en fait, l'utilisation d'un SIG à cette échelle s'est avérée inutile;
- à l'échelle globale de la zone d'étude.

Méthodes d'Analyse envisagées :

- O recherche de corrélations statistiques simples (techniques classiques);
- O élaboration de cartes superposant les différents types d'information de manière à détecter des corrélations spatiales et à préciser et interpréter ces corrélations en intégrant leur disposition précise dans l'espace ;
- O description multidisciplinaire des phénomènes correspondant aux corrélations mises en évidence.

Résultats

Les résultats de cette étape importante dans l'avancement du projet sont présentés dans le 1^{er} volet de la Partie 2 (page 123) de ce rapport scientifique final, partie intitulée : « Résultats élaborés, approches transdisciplinaires - Perspectives pour la gestion forestière ».

Tâche supplémentaire :

Synthèse cartographique et délimitation de la zone d'étude

ONF - CRAT

Service exécutant : ONF Cellule Régionale d'Appui Technique (Manosque)

Responsables: J. Ladier, M. Delahaye

Synthèse cartographique des typologies de peuplement et de station forestière

L'objet de ce travail de recherche étant l'étage montagnard du massif du Ventoux, il était nécessaire d'en avoir une vision globale homogène, d'abord pour situer les sites de mesures et les placettes d'observation de la régénération et de la flore dans leur contexte écologique et forestier, ensuite pour pouvoir simuler spatialement les scénarios d'évolution issus des observations ponctuelles.

L'étage montagnard du Mont-Ventoux se répartit entre 6 forêts domaniales et communales (cf. carte des forêts, page 3).

· Sur le versant sud

- La forêt communale de Bedoin, qui inclut la série dite « des Cèdres » et la série dite « des Pins noirs de Perrache », gérées à part ;
- La forêt domaniale du Ventouret.

Sur le versant nord

- la forêt domaniale du Mont-Ventoux ;
- la forêt communale de Beaumont-du-Ventoux ;
- la forêt domaniale du Toulourenc ;
- la forêt domaniale de la Tune (département de la Drôme).

Il s'agissait donc de rassembler les cartes des stations et des peuplements figurant dans les 8 documents d'aménagement correspondants. Ce travail s'avéra plus compliqué que prévu car les typologies des stations et des peuplements sont différentes d'une forêt à l'autre et parfois difficilement compatibles. Il a nécessité 3 étapes : numérisation des cartes papier, interprétation et homogénéisation des typologies, forêt par forêt, fusion des cartes en une couche d'information unique pour le massif.

Les stations forestières sont déclinées par étage bioclimatique :

- étage méditerranéen
- étage supraméditerranéen
- étage montagnard inférieur (grosso modo de 1100 à 1400 m en adret et de 850 à 1200 m en ubac)
- étage montagnard moyen et supérieur (au-dessus de 1400 m en adret et de 1200 m en ubac)
- groupe sommital (surfaces non boisées du montagnard supérieur et du subalpin)

et définies par des formes topographiques et des types de substrats.

Les cartes ci-après (page 121 B, essences principales et étages) donnent une idée du résultat obtenu et une vision d'ensemble du massif.

Délimitation de la zone d'étude

Les limites de la zone d'étude sont assises sur l'extension de l'étage montagnard et découlent directement de la carte des stations (comme les limites d'étages sont par nature progressives et parfois floues sur le terrain, une zone tampon de 100 m de large a été ajoutée, par précaution et pour estomper la précision illusoire du tracé initial des unités d'analyse). La surface correspondante est de 8500 ha.

Historique des reboisements et antécédents culturaux

Par ailleurs, les premières analyses montrent que l'on a globalement affaire à une forêt floristiquement jeune. Il semble que, même après un siècle, la composition du tapis végétal soit encore marquée par l'antécédent cultural. On a donc tenté de reconstituer l'historique des boisements et surtout de retrouver l'occupation du sol avant ces boisements.

Les sources historiques sont très éclatées et très hétérogènes. Les actuelles forêts domaniales étaient autrefois chacune constituées de plusieurs séries de boisement. Nous avons pu rassembler une ou plusieurs cartes par série. Des cartes existent aussi pour la forêt communale de Bedoin, mais aucune n'a été trouvée pour celle de Beaumont-du-Ventoux. Le tableau ci-dessous récapitule les cartes rassemblées et leur correspondance avec les forêts actuelles.

		forêt	actuelle			
Cartes anciennes	date	FC de Beaumont	FC de Bedoin	FD du Toulourenc	FD du Ventouret	FD du Ventoux
croquis des bois et terrains de reboisement situés sur	1885		Х	X	X	Х
le Mont Ventoux						
FC Bedoin	1900		Х			
FC Bedoin	?		Х			
FC Bedoin / série de Perrache	1955		Х			
FC Bedoin / série de Perrache	1970		Х			
périmètre de la Sorgue / série d'Aurel	1892				X	
périmètre de la Sorgue / série d'Aurel	1903				X	
périmètre de la Sorgue / série d'Aurel	1911				×	
périmètre de la Sorgue / série d'Aurel	1914				X	
périmètre de la Sorgue / série de Sault	1904				X	
périmètre de la Sorgue / série de Sault	1904				X	
périmètre de la Sorgue / série de Sault	1892				X	
périmètre de la Sorgue / série de Sault	1903				X	
périmètre de la Sorgue / série de Sault	1912				X	
périmètre du Toulourenc / série de Savoillans	1897			X		
périmètre du Toulourenc / série de Savoillans	1933			Х		
périmètre du Toulourenc / série de Brantes	1933			Х		
périmètre du Toulourenc / série St Léger	1908			X		
périmètre du Toulourenc / série St Léger	1930			X		
périmètre du Toulourenc / série St Léger	1955			X		
périmètre du Toulourenc / commune de Malaucène	?					Х
périmètre du Toulourenc / série de Beaumont	?					Х
périmètre du Toulourenc / série de Malaucène	1916					X

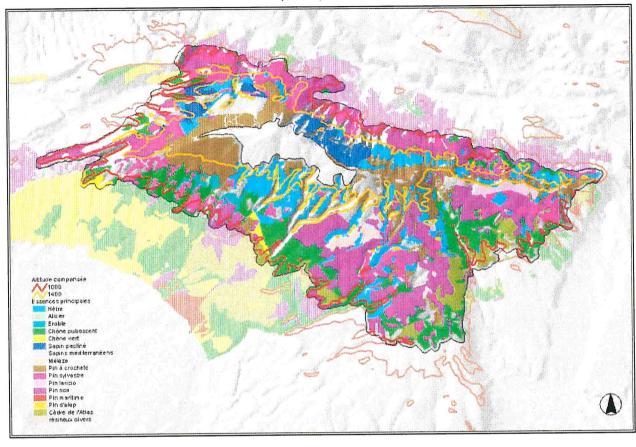
Ces multiples cartes, plus ou moins précises, toujours incomplètes, parfois contradictoires, ont été numérisées, croisées, harmonisées et fusionnées pour constituer une couche unique homogène. Le résultat n'est malheureusement pas à la hauteur des espoirs et du temps investi : les lacunes sont importantes et gênantes, notamment pour l'antécédent cultural.

La carte résultante (cf. page 121 C) pour l'antécédent cultural distingue les modalités suivantes :

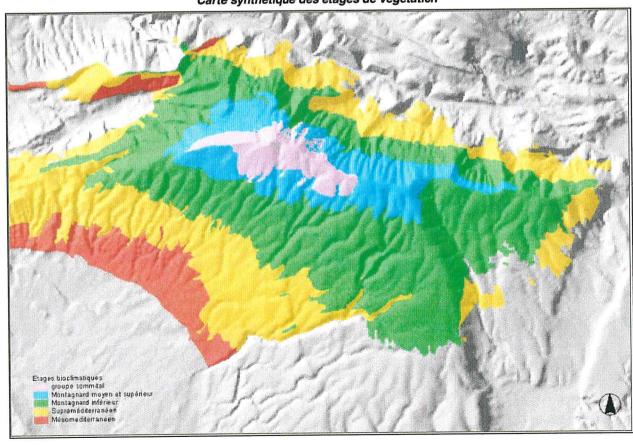
- taillis
- lande
- prairie
- lavande
- autre culture
- milieu ouvert
- (indéterminé).

La majeure partie de la surface se classe en « indéterminé », et de même pour la plupart des sites et points d'observation établis dans le cadre de ce projet. Bien que l'on puisse affirmer, notamment d'après les photographies anciennes, qu'il s'agissait le plus souvent de landes rases surpâturées, cette approche historique par les cartes anciennes est trop imprécise et incomplète.

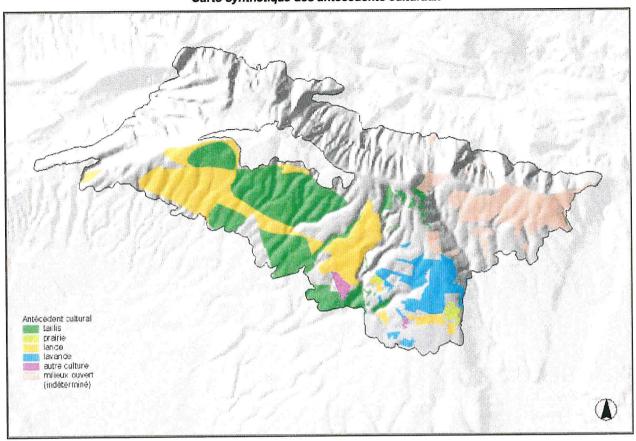
Carte synthétique des essences principales, avec les courbes d'altitude compensée 1000 m et 1400 m, et les limites (en noir) de la zone d'étude



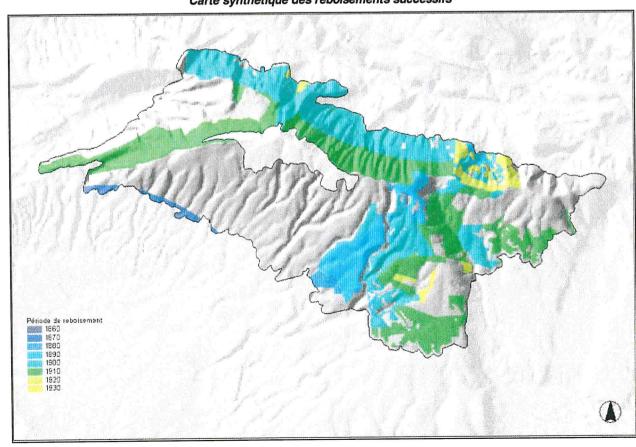
Carte synthétique des étages de végétation



Carte synthétique des antécédents culturaux



Carte synthétique des reboisements successifs



2^{ème} Partie

Résultats élaborés

Approches transdisciplinaires

Perspectives pour la gestion forestière

Cette seconde partie présente les principaux résultats obtenus dans un second temps grâce :

- à la connexion des informations recueillies, des résultats primaires obtenus pour chaque tâche, connexion facilitée en grande partie, dès la phase initiale du projet, par l'harmonisation des protocoles et le choix concerté des sites d'étude (cf. Tâche 2);
- à la conjonction des compétences des partenaires du projet ;
- mais aussi à la complémentarité des outils maîtrisés (SIG, simulateur, bases de données floristiques ...).

Les analyses pluridisciplinaires présentées ici, et les interprétations qui en sont faites, constituent les éléments d'un « diagnostic » sur l'état actuel de la dynamique de maturation sylvigénétique étudiée.

Via la modélisation et la simulation (cf. aussi Tâches 4 et 8), elles permettent aussi d'ébaucher des « pronostics » - conditionnés par diverses hypothèses de gestion - et de dégager des perspectives pour la gestion forestière.

Plan:

D.1. Diagnostic : Stade actuel de la dynamique de régénération :

influence des peuplements-sources et du bioclimat sous couvert

- D.1.1. Niveau de régénération et proximité des peuplements-sources
- D.1.2. Niveau et croissance de la régénération et bioclimat sous couvert : des tendances à préciser
- D.2. Diagnostic: Diversité floristique et diversité structurale des peuplements actuels
- D.3. Diagnostic: Diversité floristique actuelle:

influence du peuplement et de la gestion actuelle et passée, y compris les antécédents culturaux

- D.3.1. Diversité floristique et Humus/Sol
- D.3.2. Diversité floristique et Bioclimat sous couvert
- D.3.3. Diversité floristique, Structure, âge et Historique des peuplements
- P.1. Pronostic: Évolution des peuplements:

tendances prévisibles selon les scénarios de gestion

P.2. Pronostic: Perspectives pour la gestion forestière

D.1. Diagnostic : Stade actuel de la dynamique de régénération : influence des peuplements-sources et du bioclimat sous couvert

D.1.1. Niveau de régénération et proximité des peuplements sources

L'un de nos objectifs essentiels est de fournir des éléments sur l'évolution des peuplements selon divers scénarios de gestion, via une modélisation qui <u>quantifie</u> les évolutions. Même si la précision de cette quantification reste conditionnée par les limites du modèle de dynamique, cette démarche offre à notre avis l'avantage d'éviter de se perdre en conjectures hasardeuses principalement fondées sur des connaissances trop générales.

Le modèle de dynamique (cf. Tâche 4) a été construit et calibré essentiellement à partir de l'étude de la dynamique des peuplements. Or, l'interprétation des structures observées (cf. Tâche 3) sur les sites représentant les variantes et stades de la dynamique s'est heurtée au manque de connaissances sur les flux qui induisent la régénération. Les simulations réalisées indépendamment sur chaque site ont nécessité des hypothèses sur l'intensité de ces flux (cf. Tâche 8).

Il est ainsi apparu nécessaire de compléter le modèle par la mise au point de relations entre la puissance invasive du Hêtre et du Sapin dans un peuplement de Pin et la distance des peuplements-sources (taillis ou futaies de Hêtre, Hêtraies-Sapinières). Ceci a été rendu possible par l'intégration dans le SIG de la CRAT-ONF des 214 placettes établies (cf. Tâche 1) par la STIR Méditerranée et le SD Vaucluse 84. Une fois ces placettes situées par rapport à la couche d'information « Type de Peuplements », des relations entre le niveau de régénération observé et la distance au plus proche peuplement-source ont été établies : on a vu (cf. Tâche 4, pp. 56-57) que ces premières tentatives n'étaient pas satisfaisantes notamment du fait qu'elles ne prenaient pas véritablement en compte la spatialisation de l'ensemble des peuplements qui coexistent dans le domaine étudié.

Dans une deuxième phase, une nouvelle stratégie a été discutée (une partie des hypothèses s'appuient sur des éléments rassemblés par l'IMEP sur les modes de dissémination) puis mise en œuvre, grâce au SIG, sous ArcInfo, par la CRAT-ONF qui a proposé et testé diverses mesures de proximité/densité des peuplements-sources. Les résultats sont présentés ci-dessous.

En première approche, la densité de la régénération de hêtre ou de sapin semble logiquement diminuer en fonction de la distance des peuplements sources. À chaque placette d'observation de la régénération ont été attribuées la distance et la direction au peuplement source le plus proche, ainsi que la place dominante ou secondaire de l'essence concernée (Hêtre ou Sapin) dans ce peuplement. Si la relation entre distance et nombre de semis observés est significative, elle reste trop floue pour alimenter un modèle, sauf de manière provisoire.

Dans un second temps, une approche plus quantitative et plus fonctionnelle a été testée en partant des peuplements sources et du mode de dissémination des graines. Les mesures correspondantes reposent sur plusieurs hypothèses :

- La densité de semis de Hêtre ou Sapin en un point de la zone d'étude (en dehors des peuplements sources) est fonction du nombre de semenciers présents dans un rayon de dissémination à déterminer;
- 2. La densité de semis de Hêtre ou Sapin tend vers zéro lorsque l'on éloigne des peuplements sources ;
- 3. L'agent principal de dissémination des faînes de Hêtre est le Geai, même si celui-ci préfère les glands. Il transporte plusieurs graines à la fois et les cache dans le sol pour pouvoir les conserver toute l'année.

Le geai est un oiseau territorial, chaque couple occupant une aire circulaire de 10 hectares environ. On peut donc escompter un déplacement maximal de 360 m à partir de la lisière de la hêtraie.

Toutefois, dans les milieux de faible qualité, la densité d'oiseaux est plus faible, et leur rayon d'action sans doute plus grand : on parle de 30 ha soit 650 m de diamètre dans certains cas. Et si la fructification est faible, le geai peut faire plusieurs kilomètres pour trouver des graines (éléments communiqués par l'IMEP ¹).

Clayton NS, Mellor R, Jackson A. Seasonal patterns of food storing in the jay Garrulus glandarius. IBIS 138:250-255

Rolando A. 1998. Factors affecting movements and home ranges in the jay. J. Zool. Lond. 246:249-257

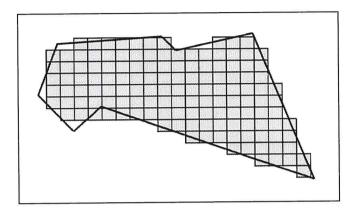
Ducousso A., Petit R. Le geai des chênes, premier reboiseur européen. Forêt-Entreprise n° 97.

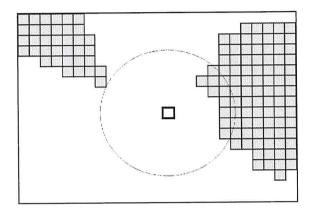
Mosandi R., Kleinert A, Rogers R. 1998. Development of oaks emerged from bird-dispersed seeds under old-growth pine stands. Forest Ecology & Management. 106(1):35-44

Patterson IJ, Cavallini P, Rolando A. 1991. Density, range size and diet of the European jay in the Maremma Natural Park, Tuscany, Italy, in summer and autumn. Omis Scandinavica. 22:79-87

4. Le facteur principal de dissémination des graines de Sapin est le vent. La topographie générale (versant sud en pente faible, versant nord abrupt) et le rôle probable du mistral permettent de penser que la direction de la source la plus proche a une incidence sur la densité d'ensemencement. Cette recherche de corrélation doit être faite séparément sur chacun des versants.

La zone d'étude, avec les peuplements qu'elle contient est au départ une couche de polygones. Elle est transformée en une grille de valeurs, carrée, avec un pas de 25 m et codée 2 pour « Hêtre dominant », 1 pour « Hêtre secondaire », 0 pour « Hêtre absent ». Une grille analogue est constituée pour le Sapin.



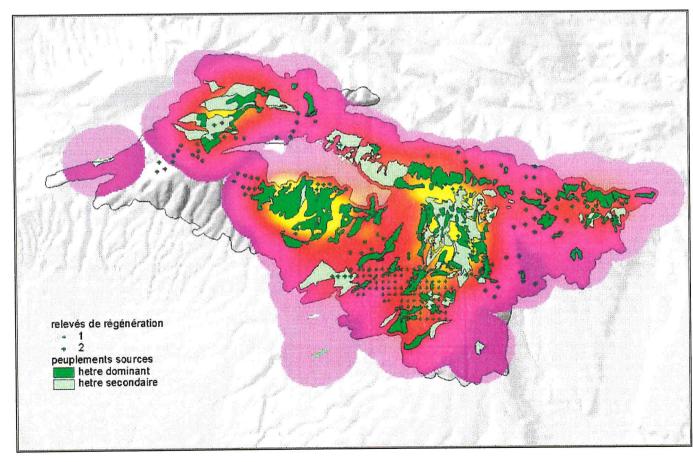


Pour toute case de la grille, on a calculé la moyenne des valeurs de Hêtre ou de Sapin dans un rayon donné. La valeur correspondant à chaque placette est ensuite récupérée par interpolation bilinéaire sur la grille résultante.

Ce processus est répété avec des rayons de recherche croissants de 50 m à 1000 m, et en distinguant amont (moitié nord) et aval (moitié sud) pour le Sapin.

Les variables ainsi calculées ont ensuite été confrontées au nombre de semis observés. De simples régressions linéaires font apparaître des corrélations intéressantes. Des modèles plus complexes du type $y = ax^b$ n'apportent pas de gain significatif.

Le <u>résultat obtenu pour le **Hêtre**</u> est le suivant :



Données traitées : 157 placettes

distance aux peuplements sources >= 25 mètres

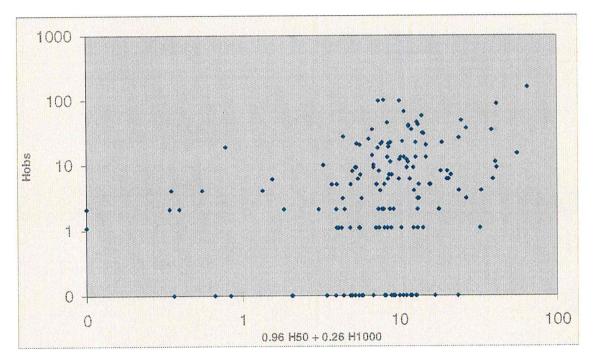
Variable expliquée : Hobs = het30/8 + het130/4 + het300/2 + het301

nombre pondéré de semis de Hêtre observés

Variables explicatives: H50 et H1000

densité relative de Hêtre dans un rayon de 50 et 1000 mètres

Régression linéa	ire			
Variable explicat	tive Coefficient de régression	Ecart-type	F(1,155)	Proba(%)
H50	0.96	0.20	23.86	0.00
H1000	0.26	0.05	32.95	0.00
	Ecart-type résiduel =	20.35		
	$r^2 =$	0.35		



Il semblerait que se combinent une dissémination à courte distance et une dissémination plus diffuse à longue distance. Mais le coefficient de détermination est trop faible pour permettre une modélisation, d'autres facteurs comme la structure du peuplement ayant une influence importante (cf. Tâche 1).

• Le <u>résultat obtenu pour le Sapin</u> est à la fois plus simple et plus significatif :

Données traitées : 56 placettes

distance au peuplements sources : 25 à 2000 mètres

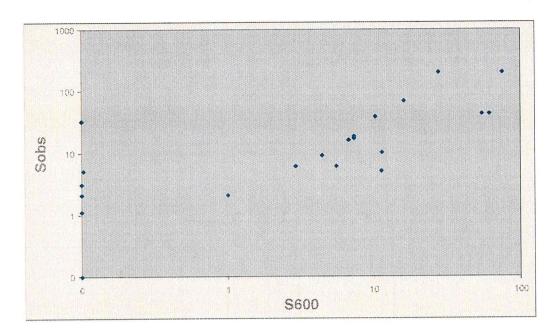
Variable expliquée : Sobs

nombre total de semis de Sapin observés

Variable explicative: S600

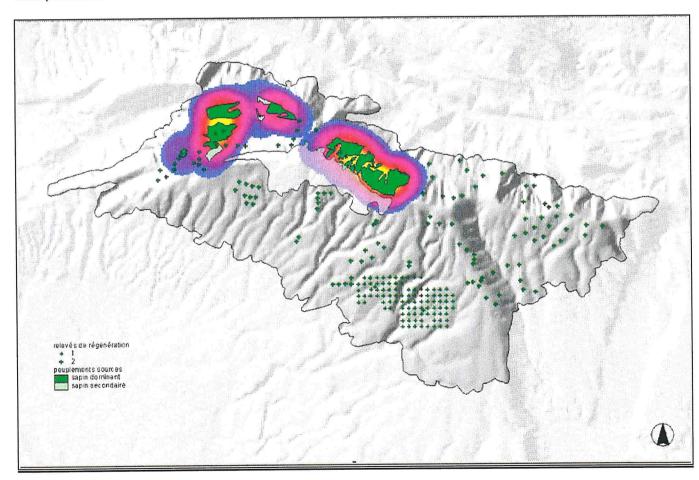
densité relative de Sapin dans un rayon de 600 mètres

Régression linéaire Variable explicativ		Ecart-type	F(1,55)	Proba(%)
S600	1,94	0,22	80.76	0,00
E	Ecart-type résiduel = r² =	25,66 0,59		



La différence pressentie entre amont et aval ne peut être mise en évidence du fait d'une répartition inégale des points d'observation autour des sapinières (l'échantillonnage n'avait pas été prévu pour cet objectif au départ).

Par ailleurs, un certain nombre de placettes portent des semis alors que la valeur calculée est nulle. Ces observations qui ne rentrent pas dans le modèle s'expliquent probablement par l'existence de semenciers non cartographiés. Ce problème résultant du croisement d'observations ponctuelles précises avec une cartographie à la précision du demi-hectare illustre bien le biais induit par l'utilisation de données à différentes échelles.



D.1.2. Niveau et croissance de la régénération et bioclimat sous couvert : des tendances à préciser

L'objectif est de relier les différences de micro-climat sous les peuplements à des caractéristiques du couvert et à la régénération sous couvert. Compte tenu de la faible variabilité observée au niveau des températures de l'air et du sol et de l'humidité de l'air (HR ou VPD), aucune relation significative n'a pu être mise en évidence entre ces variables et les caractéristiques dendrométriques du couvert (surface terrière, densité, hauteur, etc.), ou l'état de la régénération. Des tendances apparaissent cependant à certaines périodes de l'année :

- Selon le mois, les valeurs de température observées sont liées négativement ou positivement au couvert ou à la surface terrière de la cellule ou des cellules voisines. Ces relations sont peu significatives (α très proche de 0.05) et difficilement interprétables. Nous ne les avons donc pas présentées.
- Un lien existe entre structure du peuplement et températures sous couvert, même si aucune relation quantitative significative n'a été mise en évidence. L'effet tampon du couvert et du sous-bois constitué sur le stade 2b (de la variante 1, parcelle 93) se traduisent par de plus faibles amplitudes thermiques journalières du sol, de plus forts maxima et minima de l'air, et de moins grands risques de gels tardifs. Au contraire, le stade 1 (de la variante 1, parcelle 102) est plus exposé aux faibles températures. Ceci pourrait avoir des conséquences fortes sur la survie des jeunes semis et leur développement.

Le rayonnement est la seule variable présentant une relation significative avec les caractéristiques du couvert adulte. La surface terrière et le couvert végétal sont les seules variables significatives, expliquant les différences observées entre peuplement et entre cellules. L'analyse a été volontairement restreinte aux modèles à une seule variable explicative en raison du faible nombre de points (8 points). L'analyse par saison est présentée dans le tableau 1. Le rayonnement global moyen ou relatif décroît lorsque la surface terrière ou le couvert augmente. Ce sont les caractéristiques de la cellule et celles des cellules situées au Sud (S, SE, SW) qui présentent une relation significative, plus ou moins linéaire.

Tableau 1 : Variables explicatives du rayonnement global ou du rayonnement relatif moyen par saison. Le couvert total correspond au couvert des adultes et des arbres recrutés. Lorsqu'il n'y a pas d'indication, il s'agit des adultes plantés uniquement. Le coefficient de détermination correspond à la relation linéaire établie entre les deux variables.

	Variable explicative	R²
Eté 1999	Surface terrière de la cellule Sud ou couvert total de la cellule SE	0.88 - 0.91
Hiver 99-2000	Couvert total de la cellule ou de la cellule Sud	0.86 - 0.91
	Couvert de la cellule ou surface terrière de la cellule Sud	0.79 - 0.89
Eté 2000	Surface terrière de la cellule Sud ou couvert total de la cellule SE	0.87 - 0.90

Les mêmes relations entre rayonnement et couvert ou surface terrière apparaissent dans l'analyse par mois. Les variables significatives et récurrentes d'un mois à l'autre correspondent au couvert de la cellule ou de la celluleet des 8 qui l'entourent, au couvert total et à la surface terrière des cellules sud. Les figures 1 et 2 illustrent ces relations pour le rayonnement moyen au printemps 2000 et le rayonnement moyen en juin 1999.

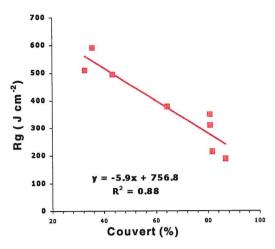


Figure 1. Relation entre le rayonnement observé au printemps 2000 et le couvert de la cellule

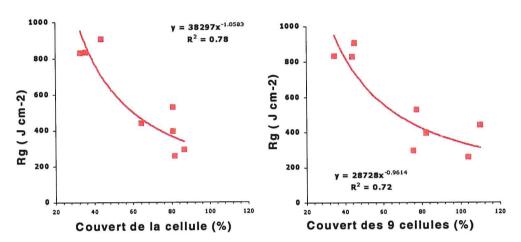


Figure 2 : Relation entre le rayonnement observé en juin 1999 et le couvert de la cellule ou des neuf cellules (cellule + les 8 cellules qui l'entourent).

Ces résultats présentent la tendance négative attendue entre couvert et lumière sous couvert. La récurrence de cette relation négative permet de considérer ces résultats comme fiables malgré le peu de points utilisés. Par contre, ce manque de données spatialisées ne permet pas de considérer la forme de la relation obtenue comme fiable. Une étude plus approfondie est nécessaire pour déterminer les variables les plus significatives (surface terrière, couvert, par cellule ou groupe de cellules, etc.).

En ce qui concerne la régénération, aucune relation n'a pu être mise en évidence entre son état (nombre, croissance en hauteur) et les conditions micro-climatiques. Cela résulte à la fois du peu de données spatiales disponibles (8), de la faible variabilité des variables climatiques (Tair, HR) et de la forte variabilité de la régénération d'un point à un autre du couvert. Sans oublier que l'état actuel de la régénération dépend aussi des conditions de couvert passées, modifiées par les éclaircies.

L'analyse exploratoire des liens entre structure du peuplement (adulte et régénération) et micro-climat révèle des tendances intéressantes notamment en terme de rayonnement disponible en sous-bois dont la confirmation nécessite des analyses spatiales plus extensives.

D.2. Diagnostic:

Nous avons cherché à vérifier une " impression " de terrain (l'abondance des espèces du sous-bois augmente quand la structure du couvert est plus complexe) et à expliquer l'importance des semis " recrutés " (hauteur supérieure à 1,30 m) sur la diversité du sous-bois en calculant un indice de diversité structurale (structure verticale) basé sur l'indice de Shannon (cf. Tâche 7).

La proportion de semis " petits ", " grands " et " recrutés " (cf. Tâche 3) a été synthétisée par un indice de diversité de Shannon, qui fournit donc une " diversité structurale " du peuplement. Même si la tendance semble globalement la même, la superposition de la courbe d'évolution de cet indice et celle de l'abondance totale ou de la richesse spécifique telle que calculée à la tâche 7 (figure A) ne permet pas d'observer de lien explicite entre les deux variables. Une comparaison avec les indices de diversité d'attributs n'éclaircit pas les résultats (figure B).

D'autres types d'analyses devront donc être mis en œuvre pour tenter de vérifier ce lien, fortement pressenti par ailleurs.

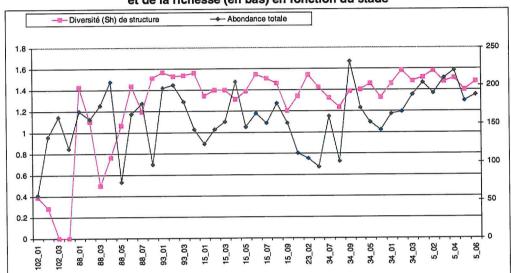


Figure A. Évolution de l'indice de diversité structurale, de l'abondance (en haut) et de la richesse (en bas) en fonction du stade

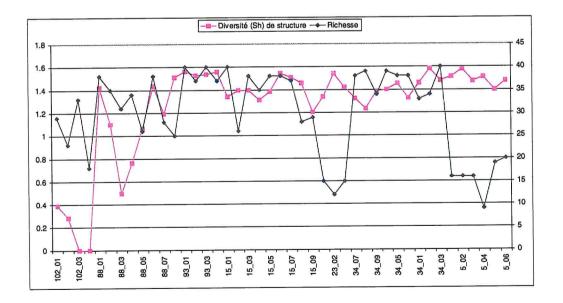
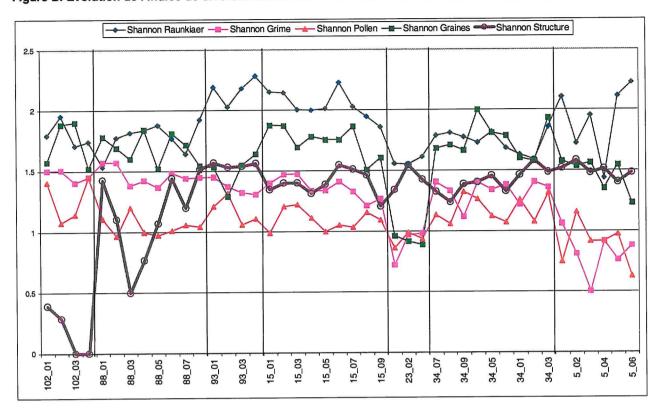


Figure B. Évolution de l'indice de diversité structurale et des indices de diversité d'attributs vitaux en fonction du stade



D.3. *Diagnostic* : Diversité floristique actuelle : influence des peuplements et de la gestion actuelle et passée

Les variables stationnelles peuvent expliquer une partie des patrons d'organisation de la végétation. Des liens avec la structure du peuplement, la régénération, les mesures de sol et la « micro-météo » (*i.e.* les variables mesurées dans le cadre de la Tâche 6) ont été recherchés. On a utilisé, pour représenter la flore, les variables synthétiques que sont les indices de diversité calculés à partir des attributs vitaux (cf. Tâche 7).

D.3.1 Diversité floristique et Humus/Sol

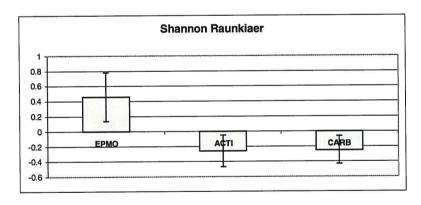
Une régression « bootstrap » (corrélations multiples sur 100 simulations) est effectuée sur les indices de diversité des attributs vitaux (types biologiques sensu Raunkiaer, stratégies adaptatives de Grime, modes de dissémination du pollen et des graines) et les paramètres du sol suivants, pris comme régresseurs (figure C) : épaisseur de la matière organique (EPMO), activité biologique (ACTI), taux de carbonatation (CARB). Signalons toutefois que EPMO et ACTI sont fortement anticorrélées.

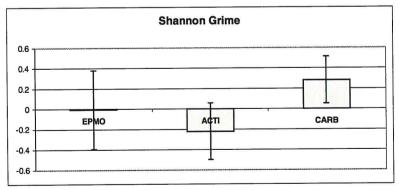
Vis à vis des types biologiques de Raunkiaer, les régressions avec les trois mesures de sol sont significatives : au plus l'épaisseur de la matière organique est élevée, au plus la diversité des types biologiques est élevée ; et inversement vis à vis du taux de carbonatation. La diversité des stratégies adaptatives de Grime augmente significativement avec le taux de carbonatation. Ce dernier paramètre ainsi que l'épaisseur de matière organique influent positivement sur la diversité des modes de dispersions de graines.

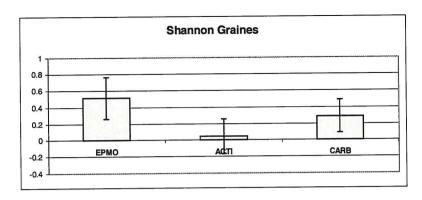
On remarque que les corrélations les plus significatives sont toutes positives. Sans entrer dans des interprétations poussées, ne serait-ce qu'à cause du faible jeu de données, on peut imaginer que la combinaison des deux variables du milieu que sont l'épaisseur de la matière organique et le taux de carbonatation induit des conditions favorables (ou pour le moins non limitantes) quelque soit le type de plante, et permet donc l'expression la plus large du spectre floristique.

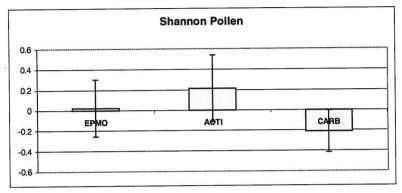
Figure C. Influence des paramètres du sol sur les indices de diversité d'attributs vitaux (régression Bootstrap)











D.3.2. Diversité floristique et Bioclimat sous couvert

La confrontation entre les caractères de la végétation (attributs vitaux et indices de diversité) et les données microclimatiques mesurées sur les placettes fait ressortir plusieurs corrélations significativement non nulles.

À travers cette étude, qui ne concerne que les trois premiers stades de la variante 1 (1, 2a et 2b) - où étaient installés les postes météo - nous pouvons par exemple observer des relations de proportionnalité entre le taux d'espèces semi-sclérophylles et la température du sol, ainsi que des relations inversement proportionnelles entre le nombre de plantes à feuilles graminéennes ou le taux de géophytes et les différentes températures mesurées, ou encore entre la diversité des modes de pollinisation et l'humidité relative de la station.

Ces corrélations ne doivent pas s'interpréter dans le sens d'une relation de cause à effet, mais plutôt comme des conséquences indirectes de la fermeture des milieux s'opérant au cours de la maturation forestière.

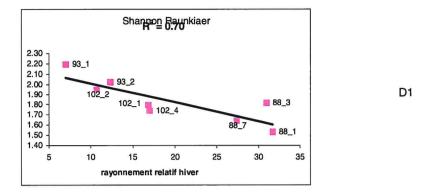
En fait, les variables microclimatiques rendent compte de l'effet "tampon" opéré par le peuplement forestier vis-à-vis des conditions "macroclimatiques". Ainsi, dans les formations les moins fermées, caractérisées par des valeurs de rayonnement hivernal relativement élevées, on trouve une faible diversité des types biologiques (figure D1) pouvant s'expliquer par l'effet conjugué d'une complexité plus importante dans les stades plus avancés de la maturation forestière et d'une plus forte sensibilité aux contraintes abiotiques (comme le gel) dans les milieux au couvert moins dense. La diminution du taux de géophytes en fonction du rayonnement relatif printanier (figure D2) relève d'une interprétation similaire, renforcée par la présence d'un certain nombre d'orchidées strictement forestières.

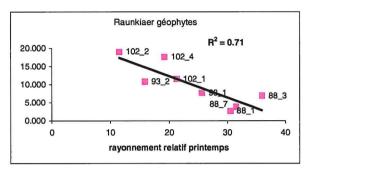
Le gradient d'humidité relative représenté en abscisse des figures D3 et D4 rend compte d'une disponibilité croissante des ressources en eau, donc de conditions écologiques plutôt favorables. C'est pourquoi on observe des relations proportionnelles d'une part avec la diversité des types de graines (diversification biologique) et d'autre part avec le taux d'espèces autobarochores, montrant que, parallèlement, les formations plus mâtures s'orientent vers un fonctionnement en "circuit fermé".

Les figures D5 et D6 proposent deux relations antagonistes de l'effet de l'augmentation de la température. La progression des bisannuelles avec la température de l'air apparaît comme une conséquence de leur sensibilité aux froids extrêmes (leur cycle biologique se déroulant sur deux années). La diminution du taux d'espèces disséminées par les fourmis relève d'une interprétation plus délicate, passant par une compréhension du comportement de ce groupe d'insectes, mais elle fournit une bonne trajectoire pour les investigations ultérieures vers une approche plus fonctionnelle de ces systèmes.

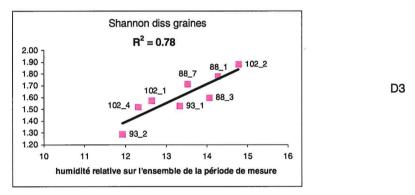
Malgré le nombre limité de points, invitant à une réserve relative quant à l'utilisation de ces résultats, les patrons observés sont tous hautement significatifs. Les interprétations avancées doivent donc être prises comme de solides **hypothèses de travail** qui demanderont des vérifications ultérieures pour être véritablement validées. Elles mettent tout de même en valeur la complexité fonctionnelle à travers l'importance des **effets induits**, où la structure du peuplement apparaît comme le facteur de contrôle principal, agissant à la fois sur les variables abiotiques et sur les patrons biologiques.

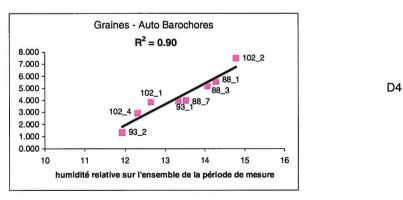
Figure D. Relations entre micro-météo et indice de diversité des attributs vitaux (régressions linéaires)

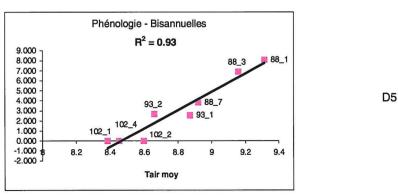


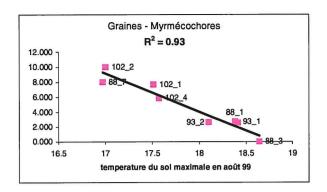


D2









D₆

D.3.3. Diversité floristique, Structure, Âge et Historique des peuplements

Une ACP faite sur la matrice [relevés x données] du peuplement ne permet pas de retrouver l'opposition nord-sud qui dominait dans les patrons d'organisation exposés dans la tâche 7. Chaque site est bien distinct des autres ; l'axe F1 sépare les sites 34 (variante 2, stades 2a, 2b, 3) et 5 (variante 2, stade 4) du versant nord, l'axe F2 représente le gradient de maturation forestière en versant sud (figure E).

Du point de vue du peuplement, les sites 34 (variante 2, stades 2a, 2b, 3) et 88 (variante 1, stade 2a) semblent liés à la présence de souches, les sites 102, 93 et 15 (variante 1, stades 1, 2b, 3) aux données sur le couvert adulte et aux recrutés.

Le lien entre ces données et la flore représentée par les indices de Shannon calculés à partir des attributs vitaux (types biologiques sensu Raunkiaer, stratégies adaptatives de Grime, modes de dissémination du pollen et des graines) a été évalué par régressions « bootstrap » (corrélations multiples sur 100 simulations) (figure E). Seul le mode de dissémination du pollen n'est pas lié de manière significative aux variables du peuplement. La figure F présente le détail de ces régressions (variables significatives seulement).

La constatation majeure est que, quelque soit l'attribut pris en compte, les variables concernant les « recrutés » (c'est-à-dire la régénération qui va se pérenniser et produire vraisemblablement le futur peuplement dominant) sont les plus significatives : par exemple, la diversité des types biologiques et des stratégies adaptatives augmente avec le nombre de recrutés ; à l'inverse, la diversité des modes de dispersion des graines diminue quand les recrutés sont plus grands et de plus gros diamètre.

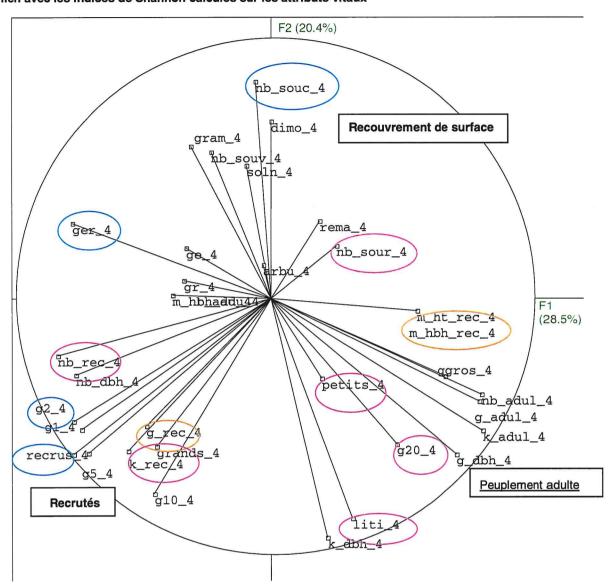
Il existe un lien positif significatif entre les types biologiques et la surface terrière des semis de très petit diamètre (<2cm), et un lien négatif avec celle des recrutés, qui pourraient mettre en avant l'importance de peuplements constitué d'arbres fins et en nombre élevé.

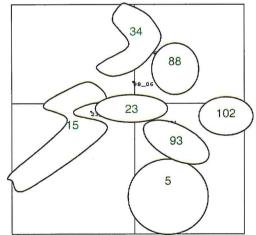
La présence de souches récentes influe positivement sur la diversité des stratégies adaptatives, alors que le nombre de vieilles souches a un impact négatif sur celle des types biologiques : ceci illustre le fait qu'il subsiste des liens difficilement interprétables (voire même contradictoires), vraisemblablement dus à des **effets induits ou indirects**, appelant des analyses ultérieures plus approfondies.

Notons que les mêmes analyses effectuées sur les 43 placettes échantillonnées en commun avec l'ONF (sous-échantillon des 214 placettes installées dans le cadre de la Tâche 1) ne montrent aucune corrélation significative sauf entre la diversité des types biologiques de Raunkiaer et le nombre de recrutés de Hêtre, qui varient dans le même sens.

En conclusion, on constate que les paramètres de surface du sol (souches par exemple) ou de peuplement adulte ne seraient pas les facteurs sylvicoles qui jouent le plus grand rôle en terme de préservation de la biodiversité. En revanche, l'impact de la strate intermédiaire que constituent les recrutés semble prépondérant. Ceci complète l'hypothèse énoncée au paragraphe D.2.1 à propos du rôle joué par la structuration verticale sur *l'abondance* des espèces en sous-bois : la structure du peuplement influerait donc également sur leur diversité.

Figure E. Structure du peuplement et régénération sur les sites (Analyse en Composantes Principales) ; en couleurs : lien avec les indices de Shannon calculés sur les attributs vitaux





Diversité des types biologiques de Raunkiaer (R=0.72)

Diversité des stratégies de Grime (R=0.95)

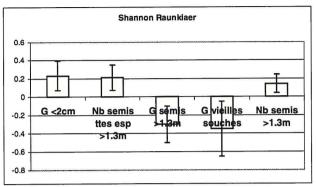
Diversité des modes de dispersion des diaspores (R=0.82)

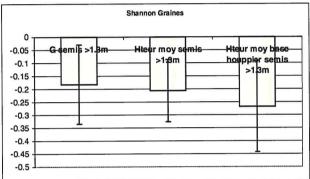
Diversité des modes de dissémination du pollen : *néant*

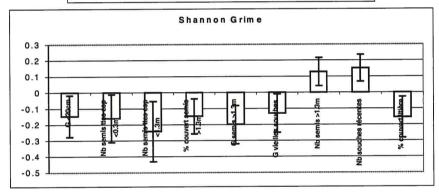
Variante et stade	N° du site	
Variante 1 stade 1	102	
stade 2a	88	
stade 2b	93	
stade 3	15	
Variante 1bis stade 3	23	
Variante 2 stade 2a	34a	
stade 2b	34b	
stade 3	34c	
stade 4	5	



Coefficient de régression Barre d'erreur bootstrap à 95%







P.1. Pronostic: Évolution des peuplements:

tendances prévisibles selon les scénarios de gestion

Le simulateur (module « Ventoux » de la plate-forme CAPSIS) est opérationnel depuis peu pour des simulations à l'échelle d'un grand ensemble d'UAs. De premières simulations de ce type ont ainsi pu être réalisées.

Un exemple est présenté ci-dessous ; la simulation porte sur l'ensemble de la Forêt Domaniale du Ventouret et concerne les futaies de Pin noir (figurées en vert) ; les peuplements de Hêtre (figurés en rouge) jouent le rôle de peuplements-sources. Les autres types de peuplements, laissés en blanc sur les cartes, n'évoluent pas dans la simulation (matrice inerte) :

Forêt Domaniale du Ventouret

vert : Pin noir ; rouge : Hêtre ; intermédiaire : peuplement mixte

Les 3 scénarios testés sont les mêmes que précédemment (cf. Tâche 8, page 116) :

- Gestion 0 : Évolution Naturelle

- Gestion 1 : sylviculture classique à rotation de 10 ans

- Gestion 2 : sylviculture classique à rotation de 20 ans.

Les cartes ci-après présentent la simulation réalisée selon chacun des 3 scénarios, en 2000 (état actuel), en 2030 et 2060.

La coloration des UAs est fonction de la proportion du Pin noir (vert) et du Hêtre (rouge).

Cette proportion a été définie de 2 manières :

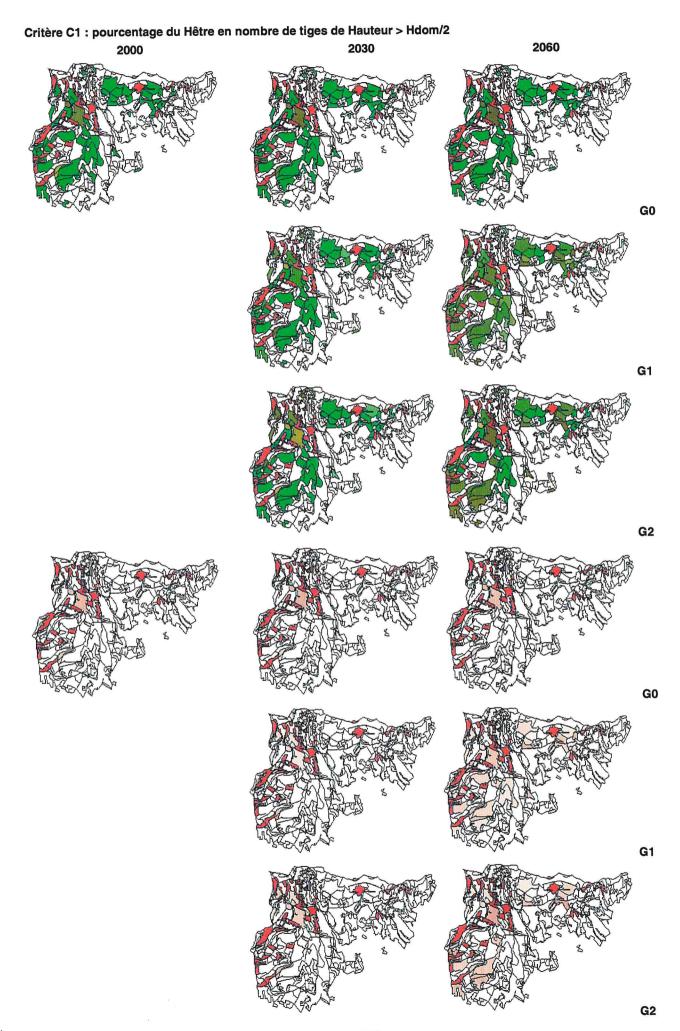
- critère C1 : proportions des espèces, calculées sur le nombre d'individus, dont la hauteur dépasse la moitié de la hauteur dominante du peuplement ;
- critère C2 : proportions des espèces, calculées sur le nombre d'individus, dont la hauteur dépasse 3 m.

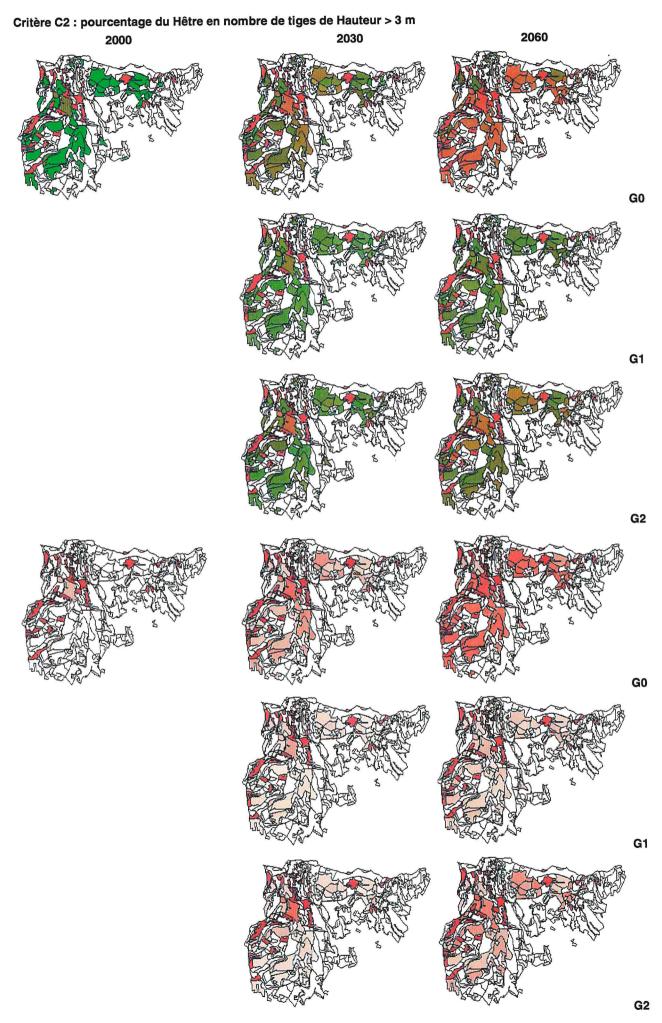
Quatre visualisations sont présentées qui correspondent aux 2 définitions de la proportion Pin/Hêtre; en figurant soit les 2 espèces conjointement (dégradé de couleurs du vert au rouge), soit le Hêtre seul (dégradé du rouge au blanc).

L'examen de ces représentations permet les interprétations suivantes :

- en évolution naturelle, le Hêtre serait dominant en effectif dans la régénération (d'où son abondance selon le critère C2) mais resterait confiné au sous-étage (d'où sa faible expansion selon le critère C1).
- la gestion G2, qui induit des périodes de refermeture du couvert plus longue et plus complète entre 2 coupes, favorise davantage le Hêtre, alors que la gestion G1, en réouvrant plus fréquemment le couvert permet la persistance du Pin noir en proportions notables.

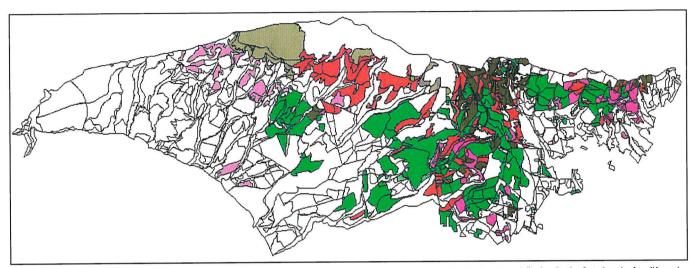
On remarquera sur les cartes qu'à distance à peu près équivalente des hêtraies, certains peuplements de Pin noir « résistent » mieux que d'autres à la progression du Hêtre : ceci s'explique par un couvert, une structure de peuplement et/ou par des conditions stationnelles moins favorables au Hêtre.





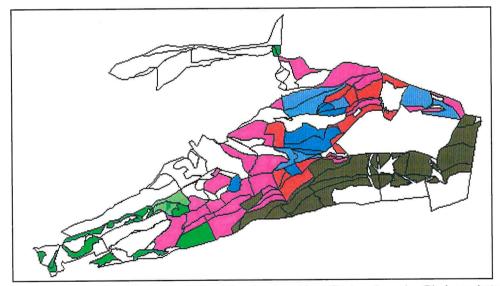
Grâce à la synthèse cartographique (cf. page 120), des simulations du même type ont été réalisées (ne sont présentées ci-dessous que l'état actuel, point de départ des simulations) :

- pour l'ensemble du versant Sud (F.D. du Ventouret + F.C. de Bedoin), ce qui permet d'intégrer certains peuplements de Hêtre de la partie Est de la F.C. de Bedoin, susceptibles de contribuer à l'évolution des peuplements de Pins de la F.D. du Ventouret ;



vert : Pin noir ; rouge : Hêtre ; magenta : Pin sylvestre ; chamois : Pin à crochets (plus clair quand il s'agit de futaies irrégulières).

- pour la partie Ouest du versant Nord (progression du Sapin et du Hêtre dans les peuplements de Pin sylvestre ou de Pin à crochets) dans la tranche altitudinale correspondant à notre zone d'étude ; cette entité recouvre une partie de la F.D. du Mont-Ventoux et de la F.C. de Beaumont-du-Ventoux :



vert : Pin noir ; rouge : Hêtre ; magenta : Pin sylvestre ; bleu : Sapin ; chamois : Pin à crochets.

Commentaires:

Le caractère très « concret » de ce type de simulation doit être relativisé : si la simulation présentée part à première vue d'une situation réelle, celle-ci est en fait largement virtuelle du fait de :

- l'imprécision des informations sur les caractéristiques des UAs ;
- la prise en compte insuffisante de leur variabilité ;
- la non prise en compte du niveau actuel de la régénération.

Par contre, cette base de simulation permet d'utiliser une répartition spatiale réelle des types de peuplements.

Ce type de simulation constitue une méthode et un outil qui devraient pouvoir fournir des éléments utiles pour les choix de gestion. À l'heure actuelle, leur utilisation reste cependant encore essentiellement prospective.

Diverses améliorations restent à faire :

- Perfectionner le modèle, notamment les relations décrivant l'apparition de la régénération en fonction des peuplements-sources ; les relations utilisées pour ces premières simulations se fondent sur une dispersion isotrope, alors que cette hypothèse est irréaliste, notamment quand le vecteur de dispersion des graines est le vent.
- Des analyses de sensibilité (qui restent à faire) devrait permettre d'identifier ce qu'il faut améliorer en priorité dans le modèle ; nul doute que les relations liant l'apparition de la régénération à la position des peuplements-sources constituent un des points à améliorer ; au vu des analyses réalisées en fin de projet par la CRAT-ONF (cf. pages 124-127), l'apport d'un SIG en tant qu'outil d'analyse (et pas seulement de gestion efficace des couches d'information) semble assez prometteur ; les connaissances sur les vecteurs méritent d'être complétées (l'étude bibliographique a ses limites ; l'appel à des spécialistes doit être envisagé). Mais bien d'autres lacunes du modèle de dynamique devront être comblées.
- Progresser dans la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale.
- Par exemple, il est peu plausible, dans le scénario « Évolution naturelle », que la régénération très abondante du Hêtre reste « bloquée » indéfiniment sous le couvert des pins âgés. Dans la réalité, il est probable qu'une proportion non négligeable de Hêtre parvienne à l'étage dominant, là où le Pin est localement un peu moins dense.
- En outre, le vieillissement des pins doit logiquement conduire à leur dépérissement progressif, au moins pour une partie (stations plus pauvres ?), et à la création de trouées permettant le passage du Hêtre.
- Si ce scénario sans sylviculture a un intérêt, il faudrait améliorer le modèle en intégrant une durée de survie (mortalité par sénescence), si tant est que l'on dispose d'éléments à ce sujet dans le contexte étudié.
- Spécifier plus précisément, et traduire fidèlement au plan informatique, les interventions sylvicoles et les critères de déclenchement des interventions.

P.2. Pronostic: Perspectives pour la gestion forestière

Plutôt que des indicateurs définis par la présence de telle ou telle espèce, les éléments, utiles pour l'orientation de la gestion, qui nous paraissent se dégager de ce projet sont :

- d'une part, des indications sur le fonctionnement (l'évolution des structures au travers des processus de régénération, de croissance et de compétition) des peuplements au fil de la maturation et de la dynamique étudiée, conduisant de pinèdes artificielles pures à des formations plus hétérogènes, le plus souvent mélangées.
- d'autre part, de nombreux indices caractérisant la diversité floristique dans des situations correspondant aux divers stades et variantes de la dynamique ; ces situations, caractérisées en détail, constituent des références illustrant les évolutions en cours, sur lesquelles les gestionnaires peuvent s'appuyer pour orienter leurs choix.

Nous rappelons ci-dessous les principaux points à retenir :

• Les niveaux les plus bas de diversité floristique ont été observés d'une part au stade initial (plantations de pin, encore denses, « en voie de disparition » sur le Mont-Ventoux) et d'autre part dans les stades les plus « mûrs » : hêtraie pure, dont le stade 3 de la variante 1 bis est très proche, ou sapinière-hêtraie, comme celle du stade 4 de la variante 2. Ces stades les plus avancés sont aussi des peuplements à couvert sombre.

- Le maximum de diversité floristique est observé dans les peuplements où la composante de régénération avancée est forte (abondance de semis « recrutés »). Ceci peut s'interpréter en considérant que ces conditions correspondent à un stade où le peuplement a été ouvert de manière prolongée tout au long de la phase des coupes de régénération. Ceci a permis aux composantes floristiques les plus exigeantes en lumière de s'exprimer davantage, sans que les autres composantes disparaissent pour autant : au total, une large gamme est présente et la diversité est forte.
- À noter que les peuplements ouverts et/ou à forte composante de Pin sont les plus favorables au maintien des composantes floristiques héritées d'occupations du sol anciennes et non forestières (pelouses, landes, parcours, cultures). Leur persistance longue (banque de graines, en renouvellement) est sans doute confortée par des couverts plus clairs. Remarque : il existe forcément une certaine coïncidence entre la présence des Pins et des antécédents non forestiers puisque les reboisements ont été réalisés sur les terres abandonnées.
- Ainsi, au plan de la gestion, il apparaît souhaitable de maintenir en permanence dans la forêt une part significative que nous ne sommes cependant pas encore en mesure de préciser, en surface ou en répartition spatiale de peuplements situés dans cette partie du cycle sylvicole. À noter que ceci est compatible avec la méthode traditionnelle qui consiste à planifier, lors des aménagements, un « groupe de régénération » rassemblant les parcelles qui devront parcourir (au moins en partie) cette phase pendant la durée de l'aménagement (15-20 ans).
- La conduite la plus pragmatique pourrait consister à éviter ou retarder aussi longtemps que possible l'évolution vers une situation uniforme de hêtraies pures (ou de hêtraies-sapinières en versant Nord), situation probablement irréversible (?) ... et inéluctable à long terme, et à conserver un large éventail de situations
- En ce qui concerne la structure spatiale à l'échelle de la forêt, il paraît envisageable de conserver une forte proportion de peuplements mélangés de Hêtre et de Pin, en limitant la hêtraie pure aux situations où le Hêtre est le mieux « en station » et aussi le plus dynamique -, c'est-à-dire dans la partie haute de la zone d'étude.
- En dehors de ces hêtraies pures en cours de constitution, le maintien de mélanges avec le Pin noir (ou le Pin sylvestre) devrait en effet pouvoir être obtenu à partir d'une sylviculture qui ouvre le couvert à intervalle de 10 ans environ, donnant ainsi de meilleures chances aux Pins. Le maintien d'un couvert fermé sur des périodes longues (20 ans ou plus) favoriserait au contraire le Hêtre, et le Sapin au Nord, deux essences beaucoup plus tolérantes à l'ombre que les pins.
- Les interventions directes sur la régénération sont naturellement un complément très important pour pérenniser ce mélange : à l'occasion des dépressages ou « dégagements », il est possible de doser le mélange en opérant de manière sélective au profit des pins.

Reste à connaître les proportions permettant, selon les conditions de peuplement et de station, et donc le différentiel de dynamique entre les essences protagonistes, de maintenir le mélange au long du cycle sylvicole : les proportions issues de l'intervention évolueront au gré des relations de compétition et il est difficile de savoir, par exemple, la proportion de pin à maintenir à moment donné pour conserver une proportion, plus faible mais encore suffisante, à plus long terme, dans l'étage dominant de la régénération ou du peuplement adulte qui en est issu.

Nous ne disposons pas actuellement d'éléments suffisants pour nous hasarder à des préconisations. Des compléments expérimentaux sont nécessaires.

 Les îlots de hêtraie déjà constituée (certains sont des peuplements qui semblent avoir toujours subsisté sur les flancs ou au fond des vallons ou combes) éparpillés dans la partie de la zone étudiée où le Pin devrait pouvoir garder une place importante peuvent constituer des « foyers » non négligeables : les traiter en taillis permettrait peut-être d'éviter leur arrivée au stade fructifère.

Outre les éléments qui viennent d'être listés, soulignons que ce projet aboutit aussi à l'élaboration d'un outil, encore provisoire, constitué par l'association d'un modèle de dynamique forestière, d'un simulateur et du SIG de l'ONF, à disposition des gestionnaires.

Après diverses améliorations importantes, cet outil doit permettre de générer d'autres indicateurs, quantifiés selon les situations précises auxquelles on affaire. D'ores et déjà, il peut servir à alimenter la réflexion sur des modes de gestion alternatifs et sur la définition de protocoles expérimentaux destinés à tester de nouveaux types d'intervention.

3^{ème} Partie

Perspectives

méthodologiques

et

scientifiques

Nous présentons ici, de manière linéaire, certaines des perspectives qui nous paraissent se dégager à l'issue de ce projet. Un certain recul, une période de « décantation », de nouvelles discussions, entre partenaires du projet et de manière plus large, seront nécessaires pour compléter et préciser ces perspectives, puis établir une stratégie et des priorités.

Perfectionnements nécessaires du modèle de dynamique forestière

Si nous l'avons considéré d'emblée comme un outil indispensable pour rendre compte et prévoir l'impact de la gestion forestière sur la biodiversité floristique, la mise au point de ce modèle n'était cependant pas une fin en soi dans le cadre de ce projet.

Nous avons privilégié l'élaboration de sa structure, capable de combiner des informations à différents niveaux d'échelle spatiale (concurrence entre arbres et/ou semis au sein d'une cellule d'1 are, ou d'un groupe de 9 cellules; interaction entre unités d'analyse via les flux de régénération), ce qui est apparu indispensable dans le contexte étudié.

Pour ces raisons, auxquelles il faut ajouter le caractère synchronique de l'étude, un nombre important de relations constitutives du modèle sont encore provisoires ou exogènes (études antérieures dans des contextes différents, littérature scientifique):

- soit que les données nécessaires à leur mise au point définitive ne seront disponibles qu'après remesure des dispositifs au-delà de la fin de ce projet de 3 ans (cas, par ex., des semis échantillons, individualisés, mesurés en diamètre à un niveau matérialisé, et qui seront remesurés d'ici 2 ans pour obtenir des accroissements radiaux) ;
- soit que leur calibration nécessite des études de terrain plus ciblées qui restent à conduire (par exemple, mortalité des semis, relations allométriques concernant les essences disséminées comme l'Alisier blanc, l'Érable à feuilles d'obier ...) ou l'accès à des jeux de données externes.

Or, il ne fait pas de doute que la précision des pronostics proposés et la pertinence des conclusions qui en sont tirées sont conditionnées par l'efficacité prédictive du modèle.

Nous envisageons donc de perfectionner ce modèle prochainement. En ce qui concerne la croissance de semis sous couvert, des approches fonctionnelles sont envisagées à court (mesures d'éclairement relatif par photographies hémisphériques) ou moyen terme (mesures écophysiologiques *in situ* et/ou en conditions contrôlées).

Une évaluation du modèle sera effectuée parallèlement aux améliorations apportées, de manière à orienter les modifications et à déterminer le stade auquel les performances seront jugées suffisantes.

L'amélioration de la prise en compte de multiples niveaux d'organisation spatiale et d'hétérogénéité est aussi une de nos priorités.

Apport possible d'une approche fonctionnelle stricto sensu: bioclimat et écophysiologie

Le suivi des paramètres météorologiques sera poursuivi au-delà du projet sur le poste de référence. Par contre, il n'est pas envisagé de remplacer le matériel (capteurs ou centrale) devenu défectueux sur les points de mesure sous couvert, dont le suivi est donc arrêté.

Il importe maintenant de tirer les conséquences des résultats obtenus dans ce volet exploratoire du projet.

Il apparaît en effet qu'une analyse plus systématique de certains paramètres climatiques sous couvert est nécessaire pour comprendre l'impact du bioclimat sur le fonctionnement et la croissance.

Au sortir de notre étude micro-climatique, la piste la plus prometteuse indiquée est l'analyse de l'hétérogénéité du rayonnement sous couvert et son lien avec la structure du peuplement adulte et juvénile.

Pour cela, l'utilisation de capteurs de rayonnement semble inadaptée car les informations seraient extrêmement ponctuelles dans le temps, sauf à équiper l'ensemble des cellules de capteurs fixes qui enregistreraient les valeurs en continu. Ce projet n'étant pas réaliste, nous nous sommes tournés vers des approches plus intégrées que sont les photographies hémisphériques. Le principe consiste à prendre une photographie du couvert depuis le sous-bois. L'analyse des images (logiciel GLA, développé à l'Université Simon Fraser, Canada) permet de calculer le pourcentage de trouées dans le feuillage et l'utilisation d'un modèle de pénétration de rayonnement permet d'estimer le rayonnement relatif disponible en sous-bois.

Les mesures pourront être effectuées à différents niveaux à l'aide d'un mât afin de déterminer les conditions lumineuses au-dessus des jeunes semis (< 1m) et au-dessus de la régénération en place (plusieurs mètres de haut).

Les premières photos ont été réalisées sur les cellules des parcelles 102 (Variante 1 - stade 1) et 88 (Variante 1 - stade 2a) et seront complétées par l'analyse des autres peuplements. On voit déjà (figure 1) une hétérogénéité du couvert en terme de trouées entre les deux peuplements et à l'intérieur de chaque peuplement.

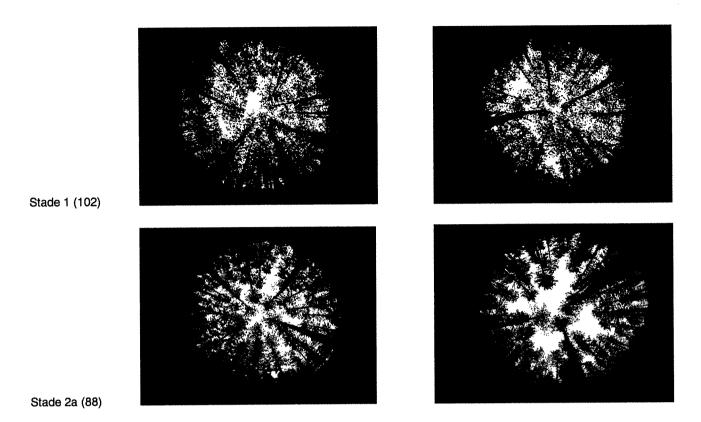


Figure 1 : Exemples de photographies hémisphériques réalisées sur deux cellules différentes dans chacun des stades 1 et 2a de la dynamique (variante 1) en versant Sud du Mont-Ventoux.

Permettant d'accéder à un échantillonnage plus large, cette technique d'estimation du rayonnement en sous-bois devrait permettre de mieux caractériser ses relations avec le peuplement en place et les caractéristiques de la régénération (nombre et croissance des semis).

Un facteur *a priori* important du milieu a été négligé jusqu'à présent : l'eau disponible dans le sol. L'analyse du bilan P-ETP au niveau décadaire a révélé l'existence de périodes sèches qui peuvent avoir un impact fort sur la survie ou le développement des jeunes semis, et à terme sur la composition et la structure des peuplements étudiés. D'autre part, le régime pluviométrique indique d'importantes irrégularités, avec de très fortes pluies sur de courtes périodes (qq. heures durant qq. jours). Pour comprendre l'impact de l'alimentation en eau, plusieurs pistes sont intéressantes à étudier :

- Pour déterminer l'impact du régime pluviométrique sur la disponibilité en eau dans le sol, il faudrait analysé le régime hydrologique de surface afin de déterminer l'existence ou non de forts ruissellements. En cas de ruissellement, les pluies incidentes auraient un faible impact local sur les conditions hydriques du sol, ce qui pourrait se traduire par des sécheresses plus marquées pour les jeunes arbres.
- Par la suite, il serait intéressant de caractériser le contenu en eau du sol en surface afin de déterminer si une hétérogénéité de ces conditions d'alimentation en eau permettrait d'expliquer les abondances ou absences de semis des différentes espèces.

La compréhension des réponses des espèces aux conditions environnementales de croissance en sous-bois est nécessaire pour expliquer la variabilité de la régénération observée en peuplement. Les facteurs lumineux et hydriques sont les premiers éléments limitants que nous proposons d'analyser, mais il semble évident que d'autres facteurs tels que la température peuvent interagir. En conditions forestières, il paraît urgent de déterminer les impacts du rayonnement et de l'alimentation en eau sur la dynamique d'installation et de croissance sous couvert. Il sera cependant aussi essentiel de développer des études en conditions contrôlées afin de caractériser le comportement des espèces face aux différents facteurs du milieu et avancer ainsi dans la compréhension du fonctionnement des espèces. Ces analyses pourront être développées en association avec des écophysiologistes (compétences présentes à l'INRA-URFM Avignon).

Dispersion des graines et invasion

Cette question cruciale reste à approfondir.

Plusieurs voies sont envisagées. Les plus innovantes et les plus prometteuses :

- poursuite des analyses présentées dans la Partie 2, faisant appel au SIG et permettant de tester des hypothèses sur la portée et la direction des flux ;
- recours à des marqueurs génétiques, en lien avec une collaboration en cours avec l'équipe Génétique de l'INRA-URFM à des approches de type « couplage de modèles sylvigénétiques et de modèles démo-génétiques ».

La diversité faunistique

Elle n'est pas prise en compte dans ce projet.

Les connaissances acquises sur la structure, la composition, la dynamique des peuplements et sur la diversité floristique constituent cependant des éléments très utiles à la prise en compte de composantes animales :

- du fait de leurs dimensions et de leur « longévité », les arbres participent fortement à la structuration de l'écosystème forestier :
- à un niveau plus petit, la flore herbacée et ligneuse basse constitue aussi un élément essentiel des habitats ;
- la végétation dans son ensemble se situe en amont des chaînes trophiques.

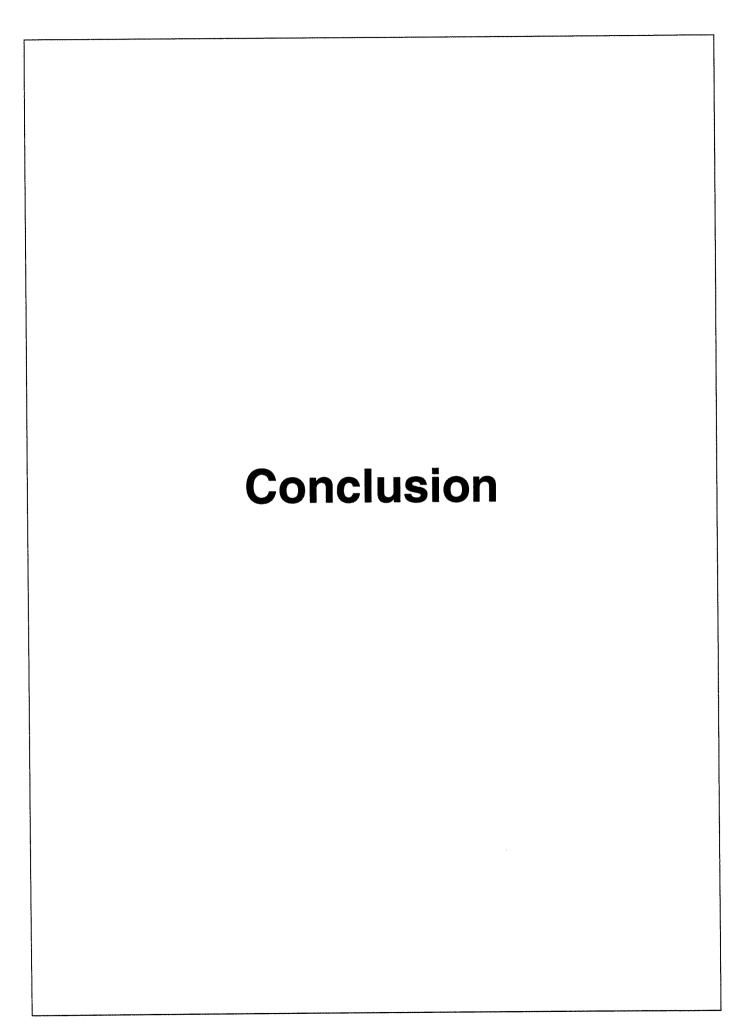
Deux groupes faunistiques nous paraissent pouvoir être mis en relation à moyen terme avec les connaissances acquises ici, compte tenu notamment des études passées et en cours sur le même site :

- les Coléoptères :

Une étude exploratoire, réalisée en 2000 par l'IMEP (J. Orgeas), a permis de mettre en évidence un réel effet de la dynamique de maturation sylvigénétique des pinèdes du Mont-Ventoux sur les communautés de Coléoptères, aussi bien sur la structuration de la biodiversité que sur la composition en espèces des assemblages. Par ailleurs, il s'avère que les changements intervenus sur la structure et l'abondance de la strate herbacée semblent expliquer certains des changements faunistiques de cette strate. En revanche, l'organisation de la biodiversité de la faune frondicole semble être moins sensible à la maturation. Un compterendu plus détaillé est fourni en annexe (pages 151-159).

- certaines composantes de l'avifaune :

Nous pensons notamment à des espèces de petite taille et dont le rayon d'action est compatible avec l'échelle à laquelle ont été opérées les descriptions de peuplements et de flore. Des contacts pourront être établis notamment avec le CEFE (Montpellier, équipe dirigée par J. Blondel) qui vient de relancer une étude sur l'avifaune de la cédraie du Mont-Ventoux (thèse de F. Archaux ENGREF – CEFE/CNRS – Univ. Lyon I « Biodiversité forestière et changements globaux : méthodes et application aux peuplements d'oiseaux forestiers »).



Le processus de maturation sylvigénétique en cours, à l'étage montagnard méditerranéen, dans les pinèdes artificielles du Mont-Ventoux, a été analysé et caractérisé qualitativement et quantitativement au niveau des principales espèces du peuplement d'arbres (adultes et régénération) et de la diversité floristique associée.

Différentes variantes ont été décrites qui aboutissent, au stade ultime, soit à des mélanges (Hêtre et Pin en versant Sud, Sapin pectiné, Hêtre et Pins en versant Nord), soit à une hêtraie pure en versant Sud quand le Pin ne se régénère pas (et, probablement, à une sapinière-hêtraie sans pin dans certaines situations du versant Nord, non étudiées).

Bien que cette dynamique soit forte et omniprésente dans la zone d'étude, elle n'en est sans doute qu'à ses débuts. À l'heure actuelle, les peuplements qui en résultent correspondent encore à des forêts que l'on peut qualifier de « jeunes » ; sauf dans les stades les plus avancés ou dans des situations particulières (certaines conditions stationnelles, antécédent forestier ancien), la caractérisation et l'analyse de la diversité floristique fait apparaître une grand rémanence de composantes liées à des antécédents culturaux non forestiers : pelouses, cultures, pâtures, landes.

Confrontés à - et intéressés par - cette forte dynamique de recolonisation du Hêtre et du Sapin, les gestionnaires sont probablement amenés à s'engager progressivement (c'est d'ailleurs déjà en partie le cas) vers un nouveau partage de l'espace :

- un domaine livré au Hêtre (et au Sapin), là où leur dynamique est la plus forte et où les pins ne pourront se maintenir (même quand ils régénèrent), avec en parallèle, un épanouissement d'une flore typiquement forestière ;
- un domaine moins favorable au Hêtre et au Sapin, en particulier dans la partie la plus basse de la zone d'étude, où les Pins ont de bonnes chances de se maintenir, en mélange avec le Hêtre, voire en peuplement presque pur (hormis les essences secondaires et un peu de Hêtre en sous-bois) ; cette situation est susceptible, si la sylviculture y contribue par des ouvertures régulières, de constituer des peuplements à couvert suffisamment clair, au moins pendant certaines périodes, pour permettre le maintien des pins mais aussi d'une flore apparentée aux milieux ouverts (de divers types), peut-être plus diverse en elle-même que la flore typiquement forestière des hêtraies ou hêtraies-sapinières matures, et en tous cas contribuant fortement à la biodiversité globale à l'échelle de la zone d'étude et du massif.

Où partager l'espace ? Comment maintenir l'équilibre des mélanges avec le Pin ?

Intégré dans un outil de simulation adapté, et en lien avec le SIG de l'ONF, le modèle de dynamique forestière ébauché au cours de ce projet, et qui intègre des informations sur les potentialités de croissance des différentes espèces protagonistes (à partir des catalogues de station) et sur la position relative des peuplements-sources, peut fournir des éléments : il permet de dépasser le constat instantané de la situation actuelle pour en simuler une évolution probable.

Il pourrait notamment servir à établir des cartes du potentiel invasif du Hêtre ou du Sapin, et à définir une limite entre les deux domaines définis ci-dessus (limite dont il serait d'ailleurs intéressant de tester le parallélisme avec la limite des hêtraies, définie dans le catalogue des stations du versant Sud du Ventoux).

Mais cette frontière dépend sans doute aussi de la structure des peuplements, plus ou moins favorable au Hêtre : on rejoint la question de savoir quelles sylvicultures appliquer pour maintenir le Pin.

Là encore, le modèle, en intégrant les relations entre croissance, compétition, couvert, est susceptible de fournir des éléments ; les premières simulations réalisées indiquent par exemple l'influence de la durée de rotation entre les coupes sur la progression du Hêtre.

Une approche expérimentale nous paraît cependant indispensable pour acquérir des éléments complémentaires (intégrables dans le modèle), notamment en ce qui concerne la modulation directe des proportions des espèces à l'occasion des dépressages, éclaircies, coupes de régénération; l'influence indirecte, via les dégâts d'exploitation, est aussi à préciser (un site dédié à leur évaluation a été installé dans le cadre de ce projet).

Compte tenu de l'augmentation de la fréquence des peuplements irréguliers et mélangés, il sera nécessaire d'imaginer et d'expérimenter de nouveaux modes de conduite sylvicole permettant de gérer l'équilibre entre des espèces dont la dynamique de régénération et les potentialités de croissance sont différentes; un couvert relativement clair ou perméable, favorable aux pins et à certaines composantes floristiques, ne pourra pas toujours être obtenus par le système des coupes progressives de régénération, adapté aux seuls peuplements réguliers; il faudra peut-être trouver des modes de conduite induisant des trouées ou, en tous cas, une hétérogénéité spatiale favorisant l'éclairement.

Les simulations peuvent servir à sélectionner, parmi la multitude des choix possibles, un panel de modalités à expérimenter en priorité.

À l'issu de ce projet, le modèle de dynamique élaboré comporte cependant encore de trop nombreux points faibles, et les simulations prospectives réalisées ne constituent pas des points d'appui suffisamment solides pour des prises de décision qui engagent la gestion sur le long terme.

Les points à améliorer pour qu'il devienne un outil d'aide à la décision vraiment opérationnel, ainsi que les approches susceptibles d'y contribuer, ont été évoqués à diverses reprises dans ce rapport scientifique: notamment, l'approche fonctionnelle de la croissance sous couvert pour les différentes espèces et l'étude plus poussée de la dispersion des graines à longue distance et du lien avec l'apparition de la régénération; sur ces deux points, nous disposons de quelques pistes prometteuses.

Le degré et le mode de prise en compte de l'hétérogénéité spatiale, de la variabilité à différentes échelles, reste aussi à préciser. Question difficile, mais réponse indispensable si l'on souhaite, comme on vient de l'évoquer, pouvoir prendre en compte des situations de peuplements dont l'hétérogénéité en termes de composition spécifique et de dimensions (étagement vertical) se double d'une hétérogénéité horizontale sous la forme d'une mosaïque de bouquets ou parquets dont certains font office de vastes « puits de lumière ». Des analyses de sensibilité sur la base du modèle actuel peuvent constituer un bon point de départ.

Par ailleurs, compte tenu d'une certaine inertie - relative - de la diversité floristique, liée à la rémanence de composantes reflétant les antécédents culturaux non forestiers (dont elle est d'ailleurs un révélateur), il serait sans doute intéressant de compléter la caractérisation de la diversité de ces formations forestières par une composante animale (ou plusieurs) qui puisse être un indicateur plus sensible, à court terme, des modifications liées au processus de maturation sylvigénétique et aux interactions avec la sylviculture, ou plus généralement aux facteurs anthropiques. Des pistes ont été suggérées (insectes terricoles, composantes de l'avifaune ...); le choix passe par l'établissement ou la poursuite du dialogue avec les spécialistes.

Soulignons enfin que les sites principaux décrits dans le cadre de ce projet, installés de manière pérenne, peuvent constituer un cadre favorable pour la mise en œuvre des études complémentaires évoquées, si l'échelle spatiale correspondante convient. Pour les partenaires de ce projet, ils constituent en tous cas un cadre pour un suivi permettant de compléter l'approche synchronique menée ici, par des segments diachroniques (de 5 à 10 ans au minimum) indispensables pour évaluer, améliorer, préciser les connaissances et hypothèses scientifiques, puis les modèles qui en découlent, et pour démêler les influences diverses, convergentes ou contradictoires, les interactions multiples qui conditionnent - ou constituent - le fonctionnement des systèmes complexes que nous souhaitons continuer l'étude, dans une double perspective, de progrès des connaissances et de perfectionnement des modes de gestion.

ANNEXE

Impact de la remontée biologique du hêtre sur l'organisation de la biodiversité des communautés de Coléoptères dans le massif du Mont Ventoux (Vaucluse)

Etude exploratoire [2000]

Jérome Orgeas - IMEP

Programme GIP - ECOFOR Mont Ventoux "Biodiversité et gestion forestière"

<u>Coordination</u>: Thierry Tatoni, professeur, Université Aix-Marseille l Philippe Dreyfus, chargé de recherches INRA, Avignon.

Introduction

La présente étude constitue le volet complémentaire et exploratoire de l'étude multidisciplinaire des effets de la maturation sylvigénétique des forêts de pin noir sur l'organisation de la biodiversité dans le massif du Mont Ventoux. Elle propose en effet de quantifier de manière préliminaire la réponse globale des insectes aux changements écologiques induits par la remontée biologique du hêtre dans les formations à pin noir. Cette étude permettra ainsi d'orienter et de faciliter d'éventuelles expérimentations ultérieures dans le cadre d'une étude plus fine sur les processus biologiques régissant les communautés d'insectes.

La richesse et l'abondance des insectes se traduisent également par une diversité fonctionnelle importante. Les insectes constituent donc des acteurs essentiels dans le fonctionnement des écosystèmes et notamment dans le recyclage de la matière organique, l'herbivorie et le maintien de chaînes trophiques (proies, consommateurs herbivores ou prédateurs). En termes de biologie de la conservation, les insectes représentent un groupe riche et abondant qui occupe à lui seul plus de 50% du nombre total d'espèces vivantes sur terre et près de 75% de la richesse animale mondiale (Wilson, 1992). L'abondance d'espèces (communes, rares et/ou endémiques), spécialement en région méditerranéenne comparativement au reste de l'Europe, fait de la classe des insectes un outil descriptif de première importance pour la gestion de ces milieux. Les potentialités de ce groupe en tant que bioindicateur des changements écologiques sont également intéressantes, notamment dans le cadre de la lente maturité sylvigénétique des formations forestières du Ventoux.

Méthodologie

Choix du groupe "cible"

Dans cette approche exploratoire, seul le groupe des insectes Coléoptères a été considéré dans les analyses et ce choix a été motivé par leur importance biologique.

Les Coléoptères constituent un groupe dont la valeur biologique est certainement la plus significative dans le cadre de la gestion conservatoire. Ils constituent le groupe non pas le plus abondant, mais le plus riche en terme de nombre d'espèces (près de 50% des espèces d'insectes sur terre) et dont la proportion d'espèces rares est la plus élevée. Cette diversité spécifique élevée se traduit dans le milieu par une diversité fonctionnelle importante. Le rôle de ce groupe est particulièrement sensible dans le recyclage de la matière organique et la pollinisation des espèces végétales (Coléoptères floricoles). Les Coléoptères doivent être donc considérés comme des éléments clés dans la gestion conservatoire des sites.

Protocole d'échantillonnage

Trois sites ont été utilisés pour les expérimentations entomologiques. Ces sites correspondent à trois situations forestières bien tranchées, du stade le moins mature au plus mature: (1) une pinède quasi

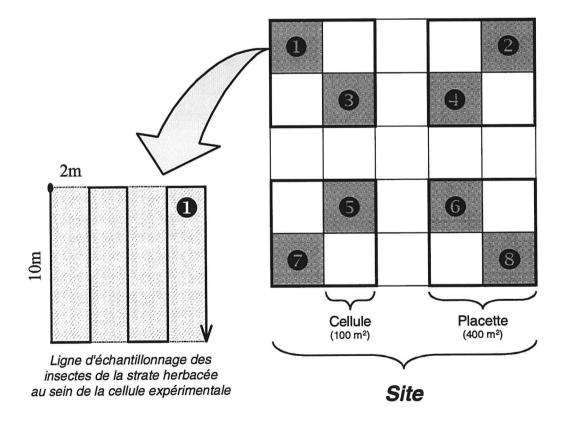
pure de pin noir [site 102], (2) une formation mixte de pin noir et de hêtre [site 88] et (3) et une hêtraie dense [site 15].

La pinède est constituée d'arbres d'âge moyen et possède un sous-bois clair et composé essentiellement d'une strate herbacée clairsemée mais continue. La hêtraie est particulièrement dense avec de nombreux individus jeunes. La strate herbacée y est peu importante et exclusivement confinée dans les zones de clairières. Les formations mixtes sont composées de hêtres et de pins adultes relativement espacés. Le sous-bois y est riche en arbuste et jeunes arbres, et la strate herbacée recouvre le sol d'une manière très importante.

Dans chaque site, le protocole de récolte des insectes se superpose spatialement expérimental sur la grille d'échantillonnage utilisée pour l'étude de la végétation.

Dans chaque site, quatre placettes de 400m² (20 x20m) ont été définies, chacune composée de quatre cellules de 100m² (10 x 10m) qui constituent le maillage élémentaire. Deux cellules parmi les quatre de chaque placette ont servi à l'échantillonnage des insectes (**figure 1**), soit un total de huit cellules échantillonnées par site.

Figure 1: Grille d'échantillonnage des insectes de la strate herbacée pour un site expérimental.



- La faune épigée de la strate herbacée à été collectée grâce au fauchage de l'herbe (Orgeas & Andersen, 2001) au moyen d'un filet fauchoir selon les modalités expliquées dans la figure 1. L'échantillon élémentaire correspond aux insectes récoltés au sein d'une seule cellule sur cinq lignes de 10m chacune (soit 15 mouvements de balayage).
- La faune frondicole a été récoltée grâce au battage du plus grand nombre de branches d'arbres pouvant être échantillonnées au hasard dans la cellule en 6 minutes.

La récolte s'est déroulé en une campagne de terrain à la fin du mois de juin 2000. Le nombre total d'échantillons récoltés est de 48 (3 sites x 8 cellules x 2 méthodes de récolte).

Ainsi, grâce à ces deux méthodes, une grande partie de la faune Coléoptère épigée a pu être échantillonnée en offrant un bon niveau de reproductibilité et une facilité de mise en œuvre.

En laboratoire, le contenu des pièges a été trié selon les grands ordres taxonomiques puis les Coléoptères ont été différenciés par familles puis par espèces.

Traitement des données

Les variations de la richesse spécifique et de l'abondance ont été analysées en fonction des différents stades de maturation forestière. Le test t de Student a permis de comparer la richesse moyenne par échantillon entre les différentes formations forestières pour les différentes faunes récoltées.

Les variations de composition en espèce des communautés ont été analysées au moyen de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur l'abondance de la faune totale (faunes frondicole et strate herbacée ajoutées).

Enfin, la corrélation entre la richesse spécifique et la richesse en famille des relevés a été testée afin de déterminer dans quelle mesure les réponses constatées au niveau taxinomique de la famille sont susceptibles de refléter celles observées au niveau de l'espèce. Il s'agit alors de déterminer les potentialités de la famille à constituer un substitut fiable et plus simple de l'analyse au niveau espèce, notamment dans le cadre de veilles environnementales effectuées par les gestionnaires de l'espace.

Résultats exploratoires et discussion

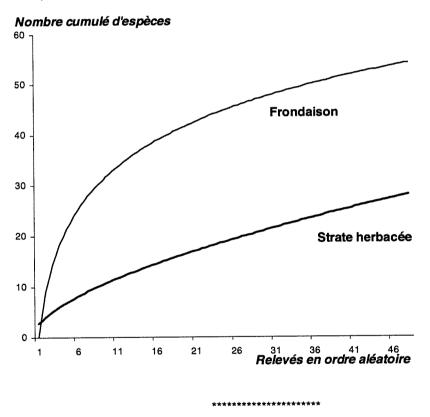
La faune

• Un total de 317 Coléoptères appartenant à 54 espèces et 22 familles a été récolté durant les expérimentations. La faune frondicole représente 59.3% de l'abondance totale (188 individus) et 83.3% (45) du nombre total d'espèces récoltées. La faune épigée de la strate herbacée représente 40.6% de l'abondance (129) et 40.7% (22) seulement des espèces récoltées. Le nombre d'espèces présentent à la fois dans les deux strates végétales est de 13, soit 24% du nombre total d'espèces. La

richesse spécifique moyenne des échantillons de la frondaison est significativement supérieure à celle des échantillons issus de la strate herbacée (respectivement 4.8 contre 2.3; p<0.0001; n=48).

• L'effort d'échantillonnage est caractérisé par le calcul du nombre cumulé d'espèces en fonction des relevés classés dans un ordre aléatoire (figure 2). Les modèles mathématiques de lissage de ces courbes (respectivement logarithmique pour la frondaison et puissance pour la strate herbacée) indiquent que si le nombre des relevés augmentaient, le nombre de captures d'espèces nouvelles augmenterait également. En d'autres termes, les espèces dites rares ou peu communes ont été insuffisamment échantillonnées car un grand nombre d'entre elles le seraient si les prospections se renouvelaient.

Figure 2: Nombre cumulé d'espèces selon les relevés (cellules) classés en ordre aléatoire. Le lissage mathématique pour les relevés de la frondaison est de type logarithmique et celui des relevés de la strate herbacée de type puissance.



• La distribution des abondances des espèces traduit également l'importance sur la richesse totale des espèces peu communes. En effet, si les 6 espèces les plus abondantes constituent près de 60% de l'abondance totale, les espèces rares représentées uniquement par un seul individu occupent 46.3% de la richesse spécifique pour seulement 7.9% de l'abondance totale. Ces mêmes observations ont été faites sur d'autres communautés de Coléoptères en général, quelles soient en milieu tropical ou méditerranéen, et renforcent le fait que ce groupe d'insectes constitue le groupe dont les valeurs biologique et conservatoire sont les plus fortes.

Réponse à la maturation sylvigénétique

D'une manière générale, le changement de formations forestières, par passage d'un stade de pinède vers une formation mixte puis une hêtraie, provoque une modification générale de l'organisation de la biodiversité des communautés de Coléoptères.

a) Richesse et abondance

La maturation sylvigénétique semble d'une manière générale modifier d'une part le nombre d'espèces récoltées mais aussi leur abondance (figure 3). Ainsi, les formations mixtes montrent la richesse spécifique et l'abondance totale les plus fortes (respectivement 29 espèces et 145 individus). En revanche, la hêtraie semble être la plus pauvre en espèces et en individus (respectivement 25 et 68) alors que la pinède semble occuper une position intermédiaire entre les deux formations forestières précitées (respectivement 28 et 104). En revanche, la richesse spécifique moyenne par échantillon (frondaison et strate herbacée confondues) de la hêtraie semble être significativement inférieure aux deux autres formations forestières (5.0 pour la hêtraie contre 7.1 pour la pinède et 7.6 pour la formation mixte).

Le test t de Student sur les moyennes de la richesse spécifique des échantillons (frondaison et strate herbacée confondues) corrobore en partie les observations de la figure 3. En effet, le nombre moyen d'espèces dans la hêtraie est significativement inférieur à celui de la formation mixte (n=24; p=0.022). Si on traite les faunes frondicole et herbacée séparément, la faune frondicole n'est pas significativement sensible à la maturation des formations forestières. En revanche, la faune herbacée réagit fortement puisque la hêtraie montre une richesse moyenne significativement inférieure à celle de la pinède et de la formation mixte (respectivement p=0.011 et p<0.0001; n=24).

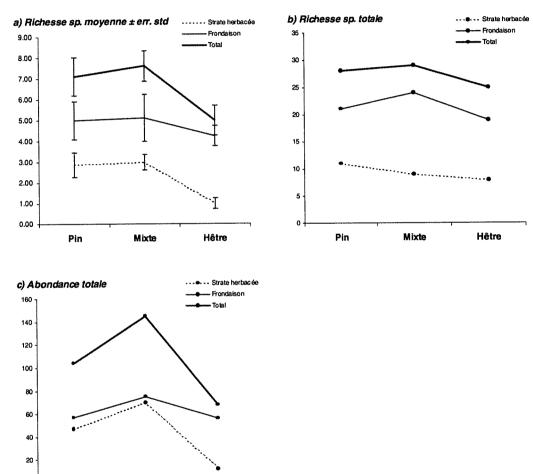
Les arguments précédents permettent donc d'avancer une hypothèse susceptible d'expliquer le démarquage net des formations denses de hêtres par rapport aux autres formations pour la faune herbacée et l'absence de démarquage pour la faune frondicole. Il pourrait donc sembler que l'abondance de la strate herbacée en sous-bois soit le facteur explicatif majeur de l'organisation de la biodiversité des Coléoptères de la strate herbacée. En effet, la pinède et la formation mixte jouissent d'un sous-bois clair riche dont la strate herbacée est bien développée, alors que la hêtraie fait montre d'un sous-bois extrêmement sombre et pauvre en plantes herbacées.

b) Composition des assemblages

La composition des communautés (figure 4) semble réagir de la même façon que les paramètres de biodiversité discutés ci-avant. En effet, pour l'ensemble de la faune (faunes frondicole et herbacée confondues), la séparation entre la hêtraie et les deux autres formations est très nette sur l'axe factoriel 1. La composition des communautés de la pinède et de la formation mixte s'individualise en revanche sur l'axe factoriel 2. La forme générale en V du nuage laisse penser à l'existence d'un gradient dans la composition faunistique entre les différents stades de maturation forestière. La

dynamique de maturation sylvigénétique semble donc induire un changement progressif de la composition des espèces de Coléoptères.

Figure 3: Richesse spécifique moyenne par cellule ± erreur standard (a), richesse spécifique totale (b) et abondance (c) des Coléoptères dans les trois stades de maturation sylvégénétique (pinède, formation mixte, hêtraie).



Nombre de familles substitut de la richesse spécifique

Mixte

Pin

Le niveau taxinomique de la famille offre de bonne potentialité de description de la richesse spécifique. En effet, la corrélation entre ces deux niveaux pour l'ensemble des relevés (**figure 5**) est très significativement positive (n=48; r=0.97; p<0.0005), ce qui veut dire que les relevés ayant une bonne richesse spécifique sont aussi ceux qui ont bonne richesse en famille. D'autres études ont montré la parfaite adéquation des patrons observés à ces deux niveaux taxinomique (Orgeas & Andersen, 2001; Orgeas & Ponel, 2001) à la fois pour les paramètres de biodiversité mais aussi pour

Hêtre

la composition des communautés. Le niveau de la famille, plus simple et accessible à des "non taxinomistes" offre donc une perspective séduisante aux gestionnaires de l'espace dans le cadre de suivis environnementaux (monitoring) en routine.

Figure 4: Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) réalisée sur la somme des abondances des espèces de la strate herbacée et celles de la frondaison.

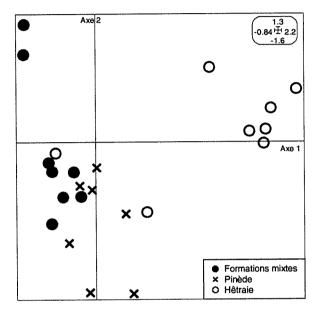
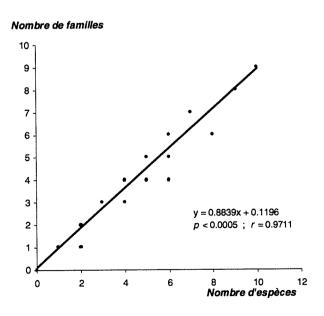


Figure 5: Corrélation entre la richesse spécifique et la richesse en famille de l'ensemble des relevés pris deux à deux. La ligne pleine correspond à une régression linéaire.



Conclusions et perspectives

Ainsi, cette étude exploratoire a permis de mettre en évidence un réel effet de la dynamique de maturation sylvigénétique des pinèdes du mont Ventoux sur les communautés de Coléoptères, aussi bien sur la structuration de la biodiversité que sur la composition en espèces des assemblages. Par ailleurs, il s'avère que les changements intervenus sur la structure et l'abondance de la strate herbacée semblent expliquer certains des changements faunistiques de cette strate. En revanche, l'organisation de la biodiversité de la faune frondicole semble être moins sensible à la maturation.

Par le biais de cette étude apparaît la nécessité d'un certain nombre d'expérimentations complémentaires qui permettraient d'affiner notamment les réponses de chacun des compartiments faunistiques considérés en fonction des stades de maturation forestière.

- Par exemple, le renouvellement de ce type d'échantillonnage plusieurs fois au cours d'une deuxième année de prospection permettrait de s'affranchir un peu mieux des variations saisonnières d'une part et inter-annuelles d'autre part auxquelles les insectes sont particulièrement sensibles, et faire diminuer considérablement la proportion d'espèces rares non échantillonnées (vue plus exhaustive sur le paysage entomologique).
- L'extension de cette étude à plusieurs sites (repliquats) d'un un même état de maturation forestière et à d'autres sites de maturation différente permettrait d'affiner le signal réponse des communautés de Coléoptères afin de dégager un certain nombre de mesures de gestion conservatoire de la biodiversité.
- Enfin, la pose d'un réseau de piège à interception (pitfall traps) sur le maillage des sites d'expérimentation permettrait la capture d'un troisième type de faune, la faune terricole qui occupe un rôle important en termes de fonctionnement des écosystèmes et de valeur patrimoniale. La faune terricole constituerait donc un complément indispensable à la compréhension globale des processus de diversité entomologique des sites.
- Des traitements de données supplémentaires permettraient d'une part d'intégrer des variables environnementales (structure et composition de la végétation, données stationnelles, gestion forestière, etc.) à comparer avec les données entomologiques, et d'autre part d'affiner l'adéquation famille-espèce notamment sur le plan de la composition des communautés.

Programme « Biodiversité et Gestion Forestière » du GIP ECOFOR

Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen :

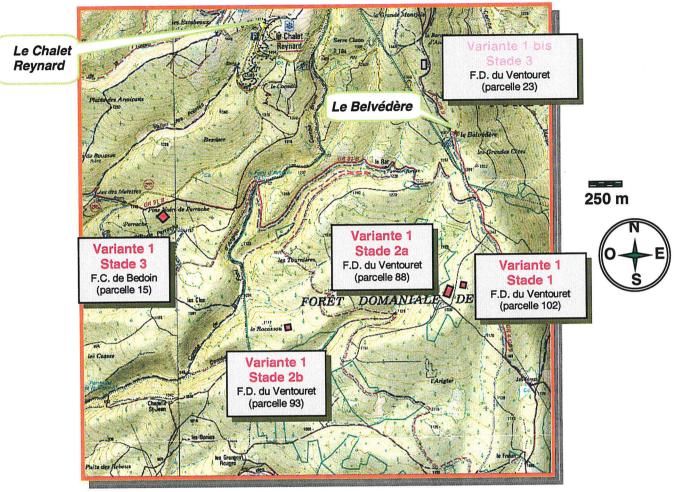
la Maturation Sylvigénétique des Pinèdes pionnières.

Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux

Rapport Final - Juillet 2001

Annexe:

FICHES SYNTHÉTIQUES par site Versant SUD



Fond: Carte IGN 1:25 000 3140ET Mont-Ventoux

Variante 1 - Stade 1:

Plantation de Pin noir d'Autriche encore jeune et dense Niveau de régénération très faible

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Sud du Mont-Ventoux - Commune de Sault (84)

Forêt Domaniale du Ventouret - Parcelle 102

Superficie : 0,49 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 0,64 ha. N.B. : une surface plus importante, de l'ordre aménagement précédent : parcelle SR34 de la F.D. de Sault ; aménagement de 1998 : parcelle 102 de la F.D. du /entouret).

Exposition: (onest) d'un hectare a été mise hors coupe lors d'une éclaircie intervenue dans le reste de la parcelle en 1999) Pente: négligeable. 4/titude: 1 210 m

Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 681 m - 293

Type de Station Forestière : calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place (MMZ, sous-type a, selon NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.)

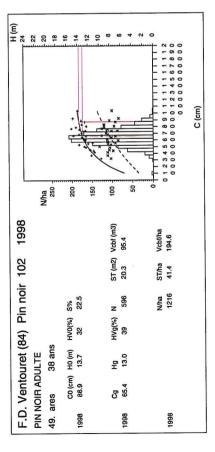
Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : culture de lavande.

Agée de 38 ans (âge total) fin 1998, cette plantation a fait l'objet d'une première éclaircie en 1991 : cloisonnement par enlèvement de 2 lignes sur 8-9 + éclaircie sélective dans les ignes restantes.

Al A2 A3 A4 A5 A6 A7		ت ت	П	-	EI	F	G
Α3		clairo					0.00
A3 A4 A5		actine tree to					2 13 2 13 2 13
AS		\	/	7			
A6 /		ļ					
A7	3			200	П		200

Caractéristiques du peuplement adulte



Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 17,0 m à l'âge de référence de 50 ans (d'après les courbes de fertilité stationnelle de TOTH et TURREL, 1983. La productivité du pin noir d' Autriche dans le sud est de la France, Revue Forestière Française, 35, 111-121).

La plantation a été établie après un sous-solage qui semble avoir nettement favorisé la croissance initiale. La valeur relativement élevée de l'indice de fertilité (à comparer à celui calculé pour le site adjacent représentant le stade 2a) est à considérer en tenant compte de cet élément.

Caractéristiques de la régénération :

La régénération est globalement très faible et très basse. Elle est significativement moins faible dans les cloisonnements, où l'éclairement au sol est fort.

Carte de répartition de la surface terrière et des semis de Pin noir et Hêtre (toutes tailles confondues) et carte des

Pour chaque cellule:

en fond (grisé), la surface terrière (m²/ha) de la cellule (indiquée en haut à gauche, noir = 75 m²/ha);
par un cercle, le nombre de semis de Hêtre (valeur indiquée en bas à droite);
par un losange, le nombre de semis de Pin noir (valeur

indiquée en bas au milieu).

				-	2 2		9 2	∧ ;
		ţ	8	\$ *	8	3	8	
9	. "			" <u></u> ≎	. ^ ¥	*3	 9	⊹≎*
	0 0	V	٥	•	7	. 2	0 0	و و
		H)	8		1		3	
1		aY.	28		8		3	
2 -		◊ *	8	° .	,	8	0 0	•
2 2		1		6		0 0	a	, ;
	8	8	7.7	3		2 0	9	
STADE 1	ş ° `	8	8	ş	8	. 29	8	8
F2	<	•	D	•	•	ш	•	0

Moyenne, mini, maxi et coefficient de variation de quelques caractéristiques du peuplement et de la régénération :

Variante 1 - Stade 1	Ото	Min	Max	%AO	Нто	Min	Max	%	Age	Min	Max	% C
(F.D. Ventouret - Pte 102)	(cm)				(E)				moy .			1
Souches: PIN NOIR	20	11	34	24								
Autres												
Arbres sur pied : PIN NOIR	20	10	33	18					38			
Autres												
Semis > 130 cm : PIN NOIR												
HETRE												
Semis échantillons : PIN NOIR					0.26	0.03	0.68	51	9	2	6	27
HETRE					0.47	0.14	1.00	53	7	٤	5	2





Photos INRA A. Porté

Régénération mélangée significative : Pin noir et Hêtre, principalement Plantation de Pin noir d'Autriche éclaircie à plusieurs reprises /ariante 1 - Stade 2a

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Sud du Mont-Ventoux - Commune de Sault (84)

Forêt Domaniale du Ventouret - Parcelle 88

aménagement précédent : parcelle SR17p de la F.D. de Sault ; aménagement de 1998 : parcelle 88 de la F.D. du (entouret)

Superticie : 1,04 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 1,50 ha). Attitude : 1 200 m Pente : néglioeable

Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 575 m - 305 ° Pente : négligeable Altitude: 1 200 m

<u>Type de Station Forestière :</u> calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place (MM2, sous-type a, selon NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. *Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et* des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.)

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : non forestier, indéterminé.

passées du peuplement. Elles figurent dans le tableau ci-dessous, dont la dernière ligne reprend les caractéristiques du site, à titre de comparaison (approximative, et à considérer avec prudence puisque les surfaces ne coïncident que Âgé de 67 ans fin 1998, ce peuplement a fait l'objet de plusieurs coupes d'éclaircie sélective : en 1979, 1985 et 1994 (exploitation en janvier-février 1995). Ce site (1,04 ha) recouvre une ancienne placette semi-permanente (surface (exploitation en janvier-février 1995). Ce site (1,04 ha) recouvre une ancienne placette semi-permanente (surface 0,505 ha), pour laquelle on dispose d'inventaires et de mesure de hauteur permettant de calculer les caractéristiques partiellement)

Le tableau ci-dessous montre que l'ouverture assez forte du peuplement est imputable aux éclaircies de 1985 et de 1994.

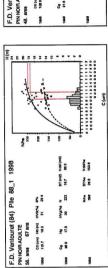
Peuplement	Année	äge	S	운	5	БL	Wha Gyna	GVINA	WIII	0/0
			CII	ε	cm	ш		m²	"E	
Placette 84-01	1968	37 ans	71.5	9.6	50.3	9.1	2636	53.1	249	21.8
Placette 84-01	1975	44 ans	79.2	13.1	55.8	11.9	2481	61.5	380	16.5
éclaircie de 1979										
éclaircie de 1985										
Placette 84-01	1989	58 ans	94.4	58 ans 94.4 17.0	78.7 15.8	15.8	616	30.4	244	25.5
éclaircie de 1994					0639					
Site « Stade 2 »	1998	67 ans		112.4 17.8		95.1 16.9	399	28.7	241	30.2

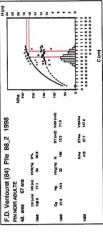
Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 14,7 m à l'âge de référence de 50 ans (d'après les courbes de fertilité stationnelle de TOTH et TURREL, 1983). La fertilité est un peu meilleure dans la moitié nord (notée 88_1).

H (m)	8 8	3 =	9 7	2 2		4 %		
	*		2			4	1234567891111111111112	C (cm)
	NA	250	8	<u>5</u>	ā	S		
1998					ST (m2) Vcbf (m3) 30.0 157.4		VcbVha 151.3	
					ST (m2)		ST/ha 28.8	
le 88			30.0		z 4		Mha 406	
84) P			HV0(%)		HVg(%) N 31 422			
uret (, JLTE	67 ans	H0 (m) 17.8		Hg 16.9			
F.D. Ventouret (84) Plle 88	PIN NOIR ADULTE	ares	C0 (cm) H0 (m) 112.4 17.8		S 2			
F.D.	PIN	104. ares	986		8	}	86	



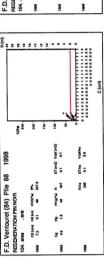
Photo INRA A. Porté

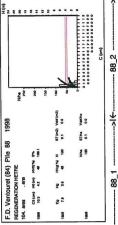




Caractéristiques de la régénération

La régénération est en cours d'installation avec la moitié sud (88_2) de la parcelle où la « jeune » régénération (h = 0.30 cm) de Pin noir est abondante et la moitié nord (88_1) où la régénération de Pin noir est faible mais où le Hêtre est un peu plus abondant. Les plus grands semis de Pin noir sont presque tous antérieurs à la dernière éclaircie ; mais peu d'entre eux sont antérieurs à l'éclaircie de 1985 : la plupart ont dû apparaître à la suite de celle-ci.



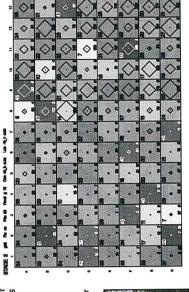


Carte de repartition de la surface terrière et des semis de Pin noir et Hêtre (toutes tailles confondues):	Carte de répartition de la surface terrière et
--	--

par un losange, le nombre de semis de Pin noir Pour cnaque cellule : - en fond (grisé), la surface terrière (m²/ha) de la 75 m²/ha) ; - par un cercle, le nombre de semis de Hêtre cellule (indiquée en haut à gauche, noir = (valeur indiquée en bas à droite)

(valeur indiquée en bas au milieu)





Moyenne, mini, maxi et coefficient de variation de quelques caractéristiques du peuplement et de la régénération :

Variante 1 - Stade 1	Dmov	Mis	Max	%\0	Hmov	Min	Max	%\S	Age	Min	Max	CV%
(F.D. Ventouret - P ¹⁶ 102)	(CIII)			:	(m)				тоу.			
Souches: PIN NOIR	24	5	51	31								
Autres												
Arbres sur pied: PIN NOIR	30	21	49	14					29			
Autres												
Semis > 130 cm : PIN NOIR	1.4	9.0	6.7	23								
HĒTRE	2.0	0.2	8.2	75								
Semis échantillons : PIN NOIR	1.6	0.7	6.4	53	1.30	0.10	3.85	49	6	3	15	23
HETRE	2.2	0.2	7.8	71	2.65	0.25	6.31	26	٠.	٥.	٥.	5

Régénération mélangée avancée : Hêtre prédominant (plusieurs mètres) et Pin noir, principalement Plantation de Pin noir éclaircie, à couvert refermé Variante 1 - Stade 2b

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Sud du Mont-Ventoux - Commune de Sault (84)

Forêt Domaniale du Ventouret - Parcelle 93

/entouret).

aménagement précédent : parcelle SR21 de la F.D. de Sault ; aménagement de 1998 : parcelle 93 de la F.D. du

<u>Superficie :</u> 1,04 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 1,50 ha). Attitude : 1 120 m Pente : négligeable

4/titude: 1 120 m

Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 171 m - 351 °

Type de Station Forestière : calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place (MMZ, sous-type a, selon NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.)

 en fond (grisé), la surface terrière (m²/ha) de la cellule (indiquée en haut à gauche, noir = 75 m²/ha); Carte de répartition de la surface terrière et des semis de Pin noir et Hêtre (toutes tailles confondues) :

Pour chaque cellule

- par un losange, le nombre de semis de Pin noir (valeur indiquée en bas au milieu). - par un cercle, le nombre de semis de Hêtre (valeur indiquée en bas à droite)

Fond: g 75 Cer: nb_h auto Los: nb_n auto

g83 Fic: sc Pile: 93

STADE 3

o

٥

0

83

8

27 60

1234567891111111111 00000000001234567890 0000000000000

/db/ma 25

1.4

1820

1998

32

5%

HV0(%)

Vcbf (m3) 1.2

ST (m2) 1

885 N

H 4.9

8 5

1998

Mha 250

1998

93

Pile

F.D. Ventouret (84) REGENERATION HETRE

49. ares

C (cm)

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : non forestier, indéterminé.

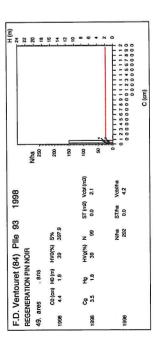
Sylviculture : Âgé de 78 ans fin 1998, ce peuplement a fait l'objet d'une éclaircie sélective en 1981 (vente de l'automne 1978). La surface terrière après cette éclaircie est estimée à 31 m²/ha, et est remontée actuellement à 41,4 m²/ha ; du fait de l'ancienneté de l'éclaircie la plus récente, ce peuplement est actuellement plus fermé que celui représentant le stade 2a.

Caractéristiques du peuplement adulte

74 (E)	22 52	18	16	1 2	0 '		o 4	0 0	
	:				× × × × × × × × × × × × × × × × × × ×	,,,,		012345878911111111111111111111111111111111111	C (cm)
	e4/N	580	500		\$	5	8	0	
8						Vcbf (m3)	116.1	Vcbl/ha 236.9	
1998						ST (m2) Vcbf (m3)	19.9	ST/ha 40.6	
le 93			%S	25.8		z	529	N/ha 467	
34) PI			CO (cm) HO (m) HVO(%) S%	39		HVg(%) N	88		
uret (8	ULTE	78 ans	(m) OH	19.3		H	18.0		
F.D. Ventouret (84) Pile 93	PIN NOIR ADULTE	res	CO (cm)	138.2		ථි	104.5		
F.D.	PIN	49. ares		1998			1998	1998	

Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 14,7 m à l'âge de référence de 50 ans (d'après les courbes de fertilité stationnelle de TOTH et TURREL, 1983).

Caractéristiques de la régénération : Les effectifs du Pin noir et du Hêtre dans la régénération sont comparables mais le Hêtre est très largement dominant au plan des dimensions et dans la physionomie de la régénération.



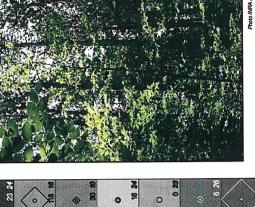




14.3	4	7	A Portó
	1 T	Area I	Oboto INDA A Bodd
	and the second	(1) (数) (4)	
			1
	M. A. C.	T. W	

: "	C
śnératic	Max
e la rége	Min
nt et de	Age
emeldr	%\S
es du peuplement ei	Max CV% Age
istiques	٦
aractér	Hmov
dnes c	%\:
enb ep	Max
riation	Γ
ient de va	Dmov Min
t coeffic	
ie, mini, maxi ei	
mini,	5
Moyenne,	nto 1 - Stad
_	Verland

Variante 1 - Stade 1	Dmoy	Min	Max	%\C	_	Min	Max	%AO	Age	Min	Max	%AO
(F.D. Ventouret - Ple 102)	(cm)				Œ				moy.			
Souches: PIN NOIR	56	11	83	41								
Autres	18	11	37	0E								
Arbres sur pied: PIN NOIR	33	12	63	23					82			
Autres	22	10	36	41								
Semis > 130 cm : PIN NOIR	1.0	0.5	4.0	45								
HËTRE	2.3	0.2	9.2	9								
Semis échantillons : PIN NOIR	1.2	9.0	2.4	42	1.29	0.40	3.11	47	14	11	17	6
HETRE	4.4	6.0	25.0	63	99'9	1.8	14.1	31	ż	خ	5	٠.



0

8

8.2

10.70

0

52

යු 80 64

ပ

88

8

8 2

99

8

9

13 27

o

0

٥

8

27 19

35 35

ø

0

u,

O

0

0

ш

ı	3	
١	ž	
ı	0	
ı	ĕ	
ı	Œ	
ı		
ı		

Régénération mélangée très avancée : Hêtre et Pin noir, principalement, dépassant 10 m de hauteur Plantation de Pin noir au stade des dernières coupes de régénération Variante 1 - Stade 3 :

Localisation - Situation topographique et stationnelle

/ersant Sud du Mont-Ventoux - Commune de Bedoin (84)

Forêt Communale de Bedoin - série des Pins noirs de Perrache - Parcelle 15

depuis 1990 ; parcelle 17p dans l'aménagement précédent

Superficie: 1,00 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques: 1,21 ha).

Pente : 16 % Altitude: 1 150 m

Exposition: sud-est

Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 220 m - 313 °

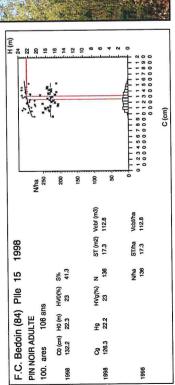
Type de Station Forestière : calcaricole de versant à pente faible, en climat montagnard inférieur, sur altérite en place (MMZ, sous-type a, selon NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.)

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : « lande ».

1965, 1974 (exploitation entre mars et juillet 1974), 1982-84 (en 2 lois exploités dans un intervalle de 2 ans), 1991 (avec ouverture de bandes larges de 20 m, enlèvement d'une tige sur 3 environ, dans les inter-bandes larges de 40 m, et broyage des rémanents dans les bandes) et fin 1997 (exploitation de mars à juin 1998 ; à noter qu'un passage de charrue à disques dans les bandes a été réalisé en août 1997 pour faciliter un complément de régénération). Agé de 106 ans fin 1998, ce peuplement a fait l'objet de plusieurs coupes, dont les plus récentes sont intervenues en : Les lignes de cellules E et F (cf. plan plus bas) correspondent à une bande rasée.

Caractéristiques du peuplement adulte



Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 15,0 m à l'âge de rélérence de 50 ans.

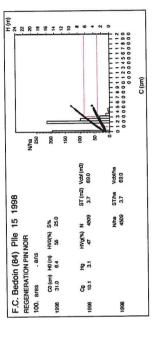
Caractéristiques de la régénération :

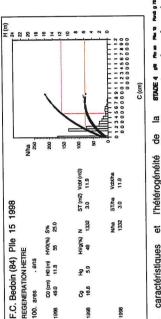
Régénération très avancée et très hétérogène, en composition, effectifs et dimensions.

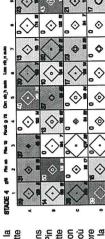
Même dans les deux inter-bandes de 40 m, le peuplement adulte de Pin noir est largement enlevé (moins de 115 tiges/ha, si l'on tient compte d'une seconde bande rasée de 20 m pour équilibrer la proportion entre bandes et inter-bandes). La répartition des semenciers est toutefois très hétérogène (même en faisant abstraction de la bande de 20 m), avec des

cellules sans semenciers et d'autres en contenant jusqu'à 5 (pour 100 m²). Cette hétérogénéité est liée en partie à des tentatives de régénération par trouées, lors de coupes antérieures à l'ouverture

des bandes







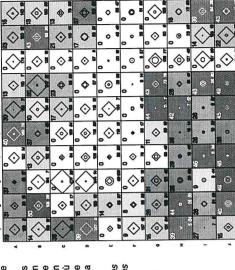
caractéristiques

, (o i

 \Diamond

• • •

Photo R. Pouz



800

0

•	8	ان		�		.	>8	4	ا د	0	٥	8		•	R	•	⋄	8		9	R	ζ,	<u>\</u>	20.00	() ()
•	< <	\odot	0	0		•	> 3	ő	ه ا	0	•	8		0	8 80	\	0	自	٥.	<u></u>	127	\$	9		1000
1	΄,	ا	2		Ž,	, ¢	,	ő	•	0	0	H	0		9 %	-	0	141 April 197 (8)		•		ş.	8	A PROPERTY	0 0
•				0	**	<u>.</u>	>	· ·	≎	2 0	0	\# #	0	0	40 4			1111111				8			(0)
•	2	<u>Э</u>	A STATE OF	0		<u> </u>	>	(1	0	2	۰	•	2			8 8					•		0
•	•	\odot	2	()	20 10	•	3	,		8	•	8		○		F .	<u></u>	8			Ų.	8			
,	0		43	·	× 1	7	1	·	$\overline{}$	2 2	0	8	,	<u></u>	20.00		(-	KI.	0	X	3	0	*	
2		0	9 4	, ©		<u>^</u>	<u> </u>	6	<u>✓</u>	8	•		0	•	2 8	5	_ _	10 60		•		6	0		
	B	<u>~</u>	9		2 0	o \		2	` 	77	•		8	<u>.</u>	# 45E	8	<u> </u>	2 10				8			
	8	Y	1	\geq		X				llo	, ~			V		40	V	3365	m			ण्या		ly	
							U		۵	191				-		ıe.	•			I	1800	2	-		
בפי במומכוניו של היים ביים ביים ביים ביים ביים ביים ביים	régénération sont en partie calquées sur cette	hétérogénéité du couvert.	Le contraste est maximal entre des cellules sans	semenciers occupées par des fourrés denses de Pin	noir (dépressés dans d'autres parties de cette	parcelle 15; nous avons choisi une zone non	dépressée) et des cellules à couvert encore dense où	des semis de Hêtre sont très grands mais en nombre	beaucoup plus réduit. Dans certaines zones, la »	régénération est encore peu abondante et basse.		Carte de répartition de la surface terrière et des	semis de Pin noir et Hêtre (toutes tailles	. (sanpadado	recommended.	Pour chaque cellule:	 en fond (grisé), la surface terrière (m²/ha) de 	la cellule (indiquée en haut à gauche, noir =	75 m3/bo) .	H	 par un cercle, le nombre de semis de Hetre 	(valeur indiquée en bas à droite) :	- nar un losande le nombre de semis de Pin	(light lie and no opinibal in light)	ווסוו (גמוסתו ווומולתסס כון סמס מק וווווסק).

daelques de ĕ Moyenne, mini, maxi et variation de peuplement пp caractéristiques régénération :

inte 1 - Stade 1	Ото	Min	Max	%AO	Hmoy	Min	Max	% C V	Age	Ē	Max	% %
(F.D. Ventouret - Pte 102)	(cm)				Œ				moy .			
thes: PIN NOIR	34	11	64	32								
Autres	20	11	77	85								
ss sur pied : PIN NOIR	40	31	51	11					106			
Autres												
is > 130 cm : PIN NOIR	2.6	0.4	> 15	75								
HETRE	3.0	0.2	> 15	90								
is échantillons : PIN NOIR	6.1	0.7	17.0	52	4.35	0.48	10.02	45	24	13	34	19
HETRE	8.1	0.5	28.2	72	7.19	0.69	18.8	49	٤	2	٠,	~

Régénération très avancée de Hêtre pur atteignant l'étage dominant Plantation de Pin noir au stade des dernières coupes de régénération Variante 1 bis - Stade 3 :

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Sud du Mont-Ventoux - Commune d'Aurel (84)

Forêt Domaniale du Ventouret - Parcelle 23 (aménagement de 1998 : parcelle 23 de la F.D. du Ventouret).

Exposition: sud-sud-est Superficie : 0,50 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 0,84 ha).

Altitude: 1415 m

Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 129 m - 39 ° Pente : négligeable

Type de Station Forestière : calcicole de versant en pente faible, en climat montagnard moyen sur altérite et colluvion mince (S2, selon NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes.)

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : indéterminé.

Sylviculture : Informations disponibles sur les coupes : - vente en octobre 1990 ;

vente à l'automne 1977

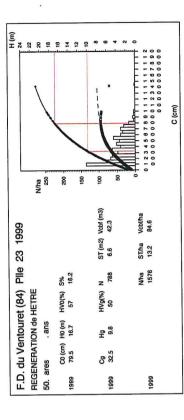
Caractéristiques du peuplement adulte :

Âgé de 101 ans fin 2000

0000000000001234567890 C (cm) 900 55 8 N/ha 250 Vcbf (m3) 56.5 Vcbf/ha 113.1 PIIe 23 2000 ST (m2) ST/ha 18.8 9.4 HVg(%) N 28 67 S% 47.9 Mha 134 F.D. du Ventouret (84) HV0(%) 28 C0 (cm) H0 (m) 140.1 19.4 101 ans PIN NOIR ADULTE Hg 19.2 ℃ 132.8 50. ares 2000 2000 2000

Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 13.1 m à l'âge de référence de 50 ans.

Caractéristiques de la régénération :







Photos INRA A. Porté

Programme « Biodiversité et Gestion Forestière » du GIP ECOFOR

Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen :

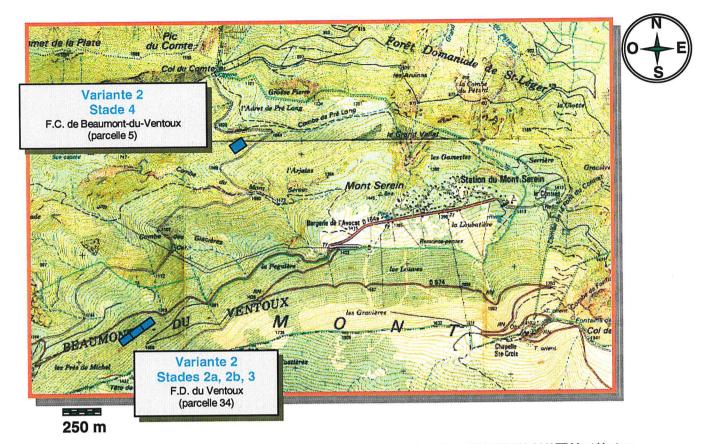
la Maturation Sylvigénétique des Pinèdes pionnières.

Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux

Rapport Final - Juillet 2001

Annexe:

FICHES SYNTHÉTIQUES par site **Versant NORD**



Fond: Carte IGN 1:25 000 3140ET Mont-Ventoux

Variante 2 - Stade 2a

Régénération mélangée significative : Sapin, Hêtre et Pin sylvestre Plantation de Pin sylvestre éclaircie à plusieurs reprises

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Nord du Mont-Ventoux - Commune de Beaumont-du-Ventoux (84)

Forêt Domaniale du Mont-Ventoux - Parcelle 34 - site 34-1

(aménagement de 1961 : parcelle 5 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1984 : parcelle 14 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1987 : parcelle 14 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1998 : parcelle 34 de la F.D. du Mont-Ventoux).

Superficie: 0,55 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 0,84 ha). Altitude: 1 300 m

Exposition: nord-ouest Pente : 36 %

Type de Station Forestière : colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard inférieur d'ubac (assimilable à MA1/2 de NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes). Distance et azimut de la Sapinière la plus proche : 301 m - 360 ° Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 559 m - 70 °

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : indéterminé.

Sylviculture: Informations disponibles sur les coupes:

- vente en octobre 1995 ; exploitation 1996 -> fin 1997

vente à l'automne 1981;

- éclaircie en 1955 ? chablis en 1972

Caractéristiques du peuplement adulte.

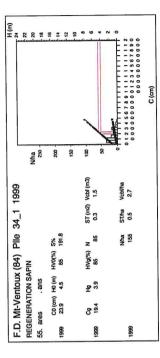
12345678911111111111 00000000001234567890 00000000000000 S S 8 F.D. du Mt-Ventoux (84) Plle 34_1 1999 Vcbf (m3) 46.5 Vobrha 84.6 ST (m2) 10.7 19.4 N 282 Mha 513 35.1 HV0(%) HVg(%) PIN SYLVESTRE ADULTE H0 (m) 13.5 93 ans Hg 12.2 C0 (cm) 1-C0 69:0 55. ares 1999 1999 1999

à une hauteur dominante de 12,3 m à l'âge de référence de 50 ans. Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond

(DUPLAT P., TRAN-HA M. 1986. Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre dans le Massif de l'Aigoual. Bulletin Technique, Office National des Forêts, Fontainebleau, France, 86-1, 33 pp. + annexes.



Caractéristiques de la régénération



ares CO (cm) 16.0 Cg Cg	1999 16.0 5.0 HV9(%) N ST (m2) Ved (m	TTRE HV0(%) S% . 233.1 HVg(%) N	% Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z	ST (m2)	ହ	Nha 280 - 200 - 100 -
			Mha 85	STħa 0.2	Vcbl/ha 0.4	01234567891111
						C (cm)

999	250	200	. 051	4.8 50 100 -	WENTA 0 1234557881111111111111111111111111111111111
F.D. Mt-Ventoux (84) Pile 34_1 1999 REGENERATION PIN SYLVESTRE				ST (m2) Vcbf (m3) 0.1 4.8	ST/ha 0.2
Plle		5% 162.3		z 88	MPa 487
F.D. Mt-Ventoux (84) Pile 3 REGENERATION PIN SYLVESTRE		CO (cm) H0 (m) HV0(%) S% 11.6 3.0 . 162.3		HVg(%) N	
ntoux ION PIN	. ans	HO (m)		2,3	
Mt-Ve	es	C0 (am)		6.5	
F.D.	55. ares	1999		86	98



Photo INRA A. Porté

Variante 2 - Stade 2b :

Régénération mélangée avancée : Sapin, Hêtre et Pln sylvestre Plantation de Pin sylvestre éclaircie à plusieurs reprises

Localisation - Situation topographique et stationnelle

Versant Nord du Mont-Ventoux - Commune de Beaumont-du-Ventoux (84) Forêt Domaniale du Mont-Ventoux - Parcelle 34 - site 34-2

(aménagement de 1961 : parcelle 5 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1984 : parcelle 14 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1998 : parcelle 34 de la F.D. du Mont-Ventoux).

Superficie: 0,60 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques: 0,84 ha).

Exposition: nord-ouest Altitude: 1 300 m Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche: 450 m - 74 ° Distance et azimut de la Sapinière la plus proche: 237 m - 344 °

Type de Station Forestière: colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard inférieur d'ubac (assimilable à MA1/2 de NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes).

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation: indéterminé

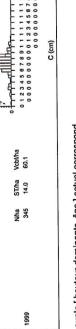
Sylviculture :

Informations disponibles sur les coupes:

- vente en octobre 1995 ; exploitation 1996 -> fin 1997
 - vente à l'automne 1981;
 - chablis en 1972
 - éclaircie en 1955 ?

Caractéristiques du peuplement adulte :

2 8 8 8 2 F.D. du Mt-Ventoux (84) P. sylvestre 34_2 1999 8 500 5 ST (m2) Vcbf (m3) 8.4 36.1 Vcbf/ha 60.1 ST/ha HVg(%) N 28 207 5% 42.9 Wha 345 HV0(%) 5 PIN SYLVESTRE ADULTE C0 (cm) H0 (m) 87.5 13.5 Hg 12.4 71.3 60. ares 1999 1999 1999



Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond à une hauteur dominante de 12,3 m à l'âge de référence de 50 ans.

(DUPLATP., TRAN-HA M. 1986. Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre dans le Massit de l'Aigoual. Bulletin Technique, Office National des Forêts, Fontainebleau, France, 86-1, 33 pp. + annexes.)

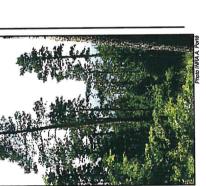


Caractéristiques de la régénération :

Ę.	Mt-Ve	ntoux	(84)	Pile	F.D. Mt-Ventoux (84) Plle 34_2 1999	1999	L	1 24
REGE	REGENERATION SAPIN	ION SA	NIA				Z.	
60. ares	res	. ans					250	=
8	CO (cm)	H (m)	CO (cm) HO (m) HVO(%)	S% 85.5			500	9 2
8	į	!	3	3			8	
8	8	£ 4	HVg(%) N 85 183	z 2		ST (m2) Vcbf (m3)	8	
3	i						8	
1999				Wha 305	ST/ha 1.7	Vcb/ha 9.1	0	000000000000000000000000000000000000000
								i

F.D.	F.D. Mt-Ventoux (84) PIIe 34_2 1999	ntoux	(84)	Plle	34_2	1999		H (m)
REGE	REGENERATION HETRE	ION HE	TE				e S	2 2
60. ares	res	. ans					250	=
98	CO (am)	H0 (m) 6.6	CO (cm) HO (m) HVO(%) S% 25.9 6.6 . 118.7	S% 118.7			500	5 7
								2 0
1999	S ₂ €	8.6	HVg(%) N	× =		ST (m2) Vcbf (m3) 0.3 0.7	- 001	eo eo -
986				Mha 188	ST/ha 0.6	Vcb/ha 1.2	012345678011111111	7 8 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
							C (cm)	

HEGENEATION PIN STLVESTRE (A) 60. ares and (a) 50. ares and (a) 50. ares and (a) 50. by HV0(%) N ST(m2) Veb (m3) 1999 6.8 24 7 00 1.4 so (a) 1999 129	u	Mt Vo	210	(84)	alla	0 75	000			Ê H
(cm) HVQf%) S% 200 150 150 150 150 150 150 150 150 150 1	<u>.</u>	NI-10	YNON	ŧ,		4	222	L		
(km) HQ(m) HVQ(%) S%, 200 (h) HQ(m) HVQ(%) N (h) HQ (h) HQ (h) HQ (h) HQ(m) HVQ(%) N (h) HQ (h)	REGE	NERATI	ON PIN	1 SYLVI	STRE			NA.		2 2
Co Ho HVo(m) HVo(m) S% 200 Co Ho HVo(m) N ST (m2) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m2) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m2) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m2) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m2) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho HVo(m) N ST (m3) Vab (m3) 100 Co Ho Ho HVo(m) N ST (m3) 100 Co Ho HVO(m) N ST (m3) 100 Co Ho HO HVO(m) N ST (m3) 100 Co Ho HO HVO(m) N ST (m3) 100 Co HVO(m) N ST (m3) 100 Co HVO(m) N ST (m3) 100 Co	90. B		. ans					250 -		=
Cg Hg HVg(%) N ST(m2) Veb(m3) 100 6.8 24 7 0.0 1.4 so Nha STha Veb/ha 0 1234 567 89 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	1989	CO (cm)	HO (m)	HV0(%)	S% 379.9			500	- Laraker	5 ¥
Cg Hg HVg(%) N ST (m2) Veb(m3) 100 (m3)								<u>8</u>	danda	5 5
Nha STha Vebha 0 14 000 00000000000000000000000000000				HV9(%)	z	ST (m2)	Vcbf (m3)	8		
Nha STha Vcbha 0 177711111111111111111111111111111111	986				4	0.0	7	8	**	o •
C (cm)	1986				Mha 128	ST/ha 0.0	Vcb/ha 2.4	- 0	891111111 0001234567 00000000	~ 0
									C (cm)	



Régénération mélangée très avancée : Sapin, Hêtre et Pin sylvestre Plantation de Pin sylvestre éclaircie à plusieurs reprises

Variante 2 - Stade 3

Localisation - Situation topographique et stationnelle

H(T)

200 33

54.3

HV0(%)

C0 (cm) 1-

Vcbf (m3) 9.2

ST (m2) V 1.7

377

HVg(%)

表 4.

2,8

86

Mha 250

F.D. Mt-Ventoux (84) Pile 34_3 1999

REGENERATION SAPIN

60. ares

Caractéristiques de la régénération :

Versant Nord du Mont-Ventoux - Commune de Beaumont-du-Ventoux (84)

Foret Domaniale du Mont-Ventoux - Parcelle 34 - site 34-3

(aménagement de 1961 : parcelle 5 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1984 : parcelle 14 de la F.D. de Beaumont-du-Ventoux ; aménagement de 1998 : parcelle 34 de la F.D. du Mont-Ventoux).

Superficie: 0,60 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques: 0,91 ha).

Altitude: 1 300 m

Distance et azimut de la Sapinière la plus proche: 210 m - 333 °

Exposition: nord-ouest Distance et azimut de la Hêtraie la plus proche : 357 m - 80 ° Pente : 36 %

Type de Station Forestière : colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard inférieur d'ubac (assimilable à MA1/2 de NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix en-Provence, 280 pp. + annexes).

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

001234567891111111111111 Promonent and the second secon

Vcb/ha 15.3

ST/ha 2.9

Kha 628

Vcb/ha 7.9

ST/ha

Mha 647

666

8

Vcbf (m3) 4.8

ST (m2) V 1.5

288

HVg(%)

F 5

23

86

200 3

5% 48.6

HV0(%)

H0 (m) 8.7

CO (cm)

√ha 250

34_3 1999

F.D. Mt-Ventoux (84) Plle

REGENERATION HETRE

. ans

60. ares

C (cm)

Nha 250 3

F.D. Mt-Ventoux (84) PIIe 34_3 1999

REGENERATION PIN SYLVESTRE

. ans

60. ares

150 8

Vcbf (m3) 0.5

ST (m2) \ 0.0

N 27

HVg(%)

장 0.2

8 4

1999

Vcb/ha 0.9

ST/ha

Wha 45

1999

500

5%

HV0(%)

H0 (m)

C0 (cm)

666

Antécédent avant plantation: indéterminé.

nformations disponibles sur les coupes:

- vente en octobre 1995; exploitation 1996 -> fin 1997

vente à l'automne 1981; chablis en 1972

- éclaircie en 1955 ?

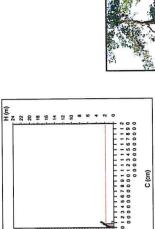
Caractéristiques du peuplement adulte :

	du Mt-	-Ventc	98) xnc) Pile	34	F.D. du Mt-Ventoux (84) Pile 34_3 1999		H (m)
Ś	PIN SYLVESTRE ADULTE	THE AD	ULTE				N/ha	8 8
ā	60. ares	93 ans					250	81
1999	C0 (cm) 86.1	H0 (m) 13.4	CO (cm) HO (m) HV0(%) S% 86.1 13.4 32 58.6	5% 58.6			500	10 2 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
							051	12 x x x x x x x x x x x x x x x x x x x
	ගී	£	HVg(%) N	z	ST (m2)	ST (m2) Vcbf (m3)	91	N. X.
1999	74.5	12.6	58	112	9.0	192	25	
6661				Mha 187	ST/ha 8.3	Vcbl/ha 43.5		01234567890
								C (cm)

à une hauteur dominante de 12,2 m à l'âge de référence de 50 ans. Le couple [hauteur dominante, âge] actuel correspond

(DUPLAT P., TRAN-HA M. 1986. Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre dans le Massif de l'Aigoual. Bulletin Technique, Office National des Forêts, Fontainebleau, France, 86-1, 33 pp. + annexes.)













Sapinière-Hêtrale irrégulière à Pin sylvestre résiduel Variante 2 - Stade 4

Localisation - Situation topographique et stationnelle

H (m)

150 901

S% 55.0

HV0(%)

H0 (m) 13.0 ans.

C0 (cm) 1-91.5

Vcbf (m3) 33.9

ST (m2) 7.7

z ⁸⁰

HVg(%)

₽ 1.6

Cg 68.7

1999

5 1999

F.C. de Beaumont-du-Ventoux (84) Plle

PIN SYLVESTRE

91. ares 1999

N/ha 250 8

Company of the second second

Vcbf/ha 37.2

ST/ha 8.5

Mha 226

1999

C (cm)

Versant Nord du Mont-Ventoux - Commune de Beaumont-du-Ventoux (84) Forêt Communale de Beaumont-du-Ventoux - Parcelle 5] - Combe de Pré Long

<u>Superficie</u>: 0,91 ha (en incluant la rangée de cellules périphériques : 1,12 ha).
<u>Pente</u>: 47 %
<u>Exposition</u>: nord-ouest

Distance de la Sapinière la plus proche : 0 m Distance de la Hêtraie la plus proche : 0 m

Type de Station Forestière: colluvion épaisse en topographie neutre et pente moyenne en étage montagnard inférieur d'ubac (assimilable à MA2 de NOUALS D. et JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Cemagref Aix-en-Provence, 280 pp. + annexes).

Historique et Caractéristiques dendrométriques moyennes actuelles du peuplement

Antécédent avant plantation : taillis feuillu ?

Aucune information disponible sur les coupes (pas de coupe récente).

Caractéristiques du peuplement adulte

