

LA VALIDATION D'UN MODÈLE DE CROISSANCE AU SERVICE D'UNE RÉFLEXION SUR LA SYLVICULTURE DU PIN D'ALEP

FANNY CHOMEL – OLIVIER CHANDIOUX – ALBERT LE COURBE

Colonisateur bénéficiant de la déprise agricole, espèce pionnière s'installant sur les terrains incendiés, le Pin d'Alep a largement étendu son aire de répartition dans la région méditerranéenne au cours du siècle dernier. Alors qu'elles occupent près de 223 000 ha en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (AFOCEL, 2005) et constituent ainsi une ressource conséquente, les pinèdes de Pin d'Alep sont rarement au cœur des intérêts de la filière forêt-bois méditerranéenne. La sylviculture proposée pour ces pinèdes est souvent basée sur l'adaptation de principes sylvicoles simples, visant généralement l'approvisionnement en bois d'industrie de la filière plutôt que l'amélioration qualitative des peuplements.

De tous temps, le Pin d'Alep a été utilisé pour répondre à diverses activités humaines : construction navale, gemmage, création d'un microclimat favorable à l'installation du Chêne... Au XX^e siècle, les usages du Pin d'Alep en Provence ont été marqués par la production de résine puis par la trituration, usages ne nécessitant pas la production de bois de qualité. Cela est probablement l'une des explications de la rareté des études sylvicoles menées sur le Pin d'Alep.

Quelques travaux fondateurs s'intéressent à la croissance des peuplements et proposent des itinéraires sylvicoles, souvent dérivés du schéma traditionnel pratiqué sur les résineux en zone tempérée. Depuis la première proposition d'itinéraire sylvicole pour le Pin d'Alep en 1957 par Pardé, six autres propositions ont été recensées : Ciancio (1986), Neveux *et al.* (1986), ONF - CRPF (1992), Couhert et Duplat (1993), Quesney et Amandier (2013), ChandioUX et Ricodeau (2014). Parmi les sept itinéraires cités, cinq préconisent un dépressage dans les jeunes peuplements avec une densité objective de 700 à 1 600 tiges/ha. S'ensuivent alors des éclaircies fortes et éloignées dans le temps pour permettre d'exploiter des volumes commercialisables. Selon les auteurs, différents facteurs ont été identifiés pour déclencher l'éclaircie : une hauteur dominante, un âge ou un diamètre moyen. Le diamètre d'exploitabilité moyen est de l'ordre de 35-40 cm. Concrètement, en Provence, la sylviculture menée « oubliée » souvent le dépressage au profit d'éclaircies tardives prélevant plus de la moitié du volume et de coupes de régénération visant souvent la conversion vers le taillis de Chêne.

Cette sylviculture frustrée et éloignée des itinéraires préconisés est plus fréquente en forêt privée qu'en forêt publique. Le faible développement de la filière, la faible productivité des milieux, la fragmentation de la propriété et la motivation des propriétaires sont autant de facteurs limitant le développement de la sylviculture du Pin d'Alep. Cela conduit à son repli vers les stations favorables (celles où il est en mélange avec des feuillus) et à une qualité globale des bois produits nettement inférieure à ce qu'elle pourrait être. Les investissements liés au dépressage préconisé sont rarement consentis du fait des risques liés aux incendies mais aussi du fait de la valeur

actuelle limitée des pinèdes à Pin d'Alep, en raison d'une histoire pastorale, d'une production de résine et d'une filière qui valorise rarement les bois de qualité.

La montée en puissance de la filière bois-énergie et la normalisation en cours du Pin d'Alep en bois de structure ouvrent de nouveaux horizons. En offrant de nouveaux débouchés pour les différents produits, certains des freins à la conduite d'itinéraires sylvicoles — dont le paramètre économique — sont susceptibles d'être levés. Ce contexte changeant conduit les propriétaires forestiers à se positionner comme des producteurs responsables plutôt que comme des détenteurs d'une ressource négligeable. Pour répondre à cette demande, le bureau d'étude Alcina, gestionnaire forestier, a souhaité revisiter les itinéraires traditionnels appliqués aux pinèdes de Pin d'Alep. Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'études d'ingénieur AgroParisTech. Il visait à évaluer techniquement et économiquement la sylviculture actuelle et à formuler des propositions innovantes plus adaptées pour répondre aux nouvelles demandes de la filière.

La connaissance de l'évolution des peuplements étant primordiale, la première étape de la démarche a été la validation d'un modèle de croissance du Pin d'Alep, intégré à la plateforme de simulation CAPSIS. Cela a permis, par la suite, de l'utiliser pour simuler des itinéraires sylvicoles contrastés et d'en proposer une évaluation comparée en priorité sur les plans économiques et techniques. L'étude présentée ici est centrée sur les pinèdes pures à Pin d'Alep et s'est appuyée sur des exemples situés dans les Bouches-du-Rhône.

MODÉLISER LA CROISSANCE DES PINÈDES DE PIN D'ALEP

Présentation du modèle de croissance NRG

Très peu de modèles de croissance, qu'il s'agisse de tables de production ou de fonctions de croissance, permettent d'estimer la croissance d'un peuplement de Pin d'Alep.

Le modèle NRG, objet puis support de cette étude, a été proposé par Philippe Dreyfus au sein de l'INRA, avec l'objectif de pouvoir l'utiliser en défense des forêts contre les incendies (DFCI) (Dreyfus *et al.*, 2001). Il a été créé à partir de l'inventaire de 558 placettes de l'Inventaire forestier national, puis intégré sous la plateforme de simulation CAPSIS. Ce modèle n'avait pas encore été validé pour vérifier sa corrélation avec la croissance réelle des pinèdes.

Ce modèle concerne des peuplements réguliers, purs et pleins. Il est de type « arbre indépendant des distances » : la position spatiale des arbres n'est pas définie. L'évolution du peuplement est calculée à partir de l'évolution de chaque tige individuelle. Les critères pris en compte concernent non seulement la tige seule (diamètre à 1,30 m, statut), mais également le peuplement dans son ensemble (surface terrière, indice de fertilité stationnelle, âge). Le modèle fonctionne sur un pas de temps annuel, faisant appel à une combinaison de cinq relations permettant de calculer :

- la hauteur dominante du peuplement,
- l'accroissement individuel en diamètre,
- la probabilité de mortalité,
- la hauteur individuelle,
- le volume individuel.

Dans la mesure où l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) recense les arbres seulement au-dessus du diamètre de précomptage de 7,5 cm, les inventaires n'ont pas permis de modéliser l'évolution des tout jeunes peuplements et d'intégrer les jeunes stades à la simulation avec CAPSIS. Or ce sont les stades juvéniles au sein desquels les interventions

sylvicoles sont les plus déterminantes dans l'évolution des peuplements. Une étude parallèle sur les jeunes peuplements a donc été menée afin de caractériser leur réaction à la mise en lumière suivant différentes modalités.

Cas des jeunes peuplements

Pour mener cette étude, les pinèdes ayant fait l'objet d'une intervention sylvicole au stade juvénile ont été recensées, auprès de l'ONF, du syndicat des propriétaires forestiers et du conseil départemental des Bouches-du-Rhône. Très peu de peuplements ont pu être identifiés. Les conclusions obtenues sont donc statistiquement peu significatives, il s'agit uniquement de tendances, à confirmer à l'avenir avec le suivi d'un plus grand nombre de peuplements et l'implantation de placettes expérimentales. Cette étude parallèle vient néanmoins combler l'absence de données de la modélisation concernant les jeunes peuplements.

Quatre modalités d'interventions ont été étudiées dans ce cadre :

- le layonnage (ouverture de layons de 2,50 m de large à intervalles de 6 et 12 m sans autre intervention dans le peuplement interstitiel) ;
- le dépressage en plein (mise à distance des tiges en privilégiant celles dont la rectitude et l'élagage les rendent de bonne qualité, densité objectif 1 000 à 1 500 tiges/ha) ;
- le dépressage tardif (idem, sur des peuplements de plus de 30 ans, densité objectif de l'ordre de 800 tiges/ha décroissante avec l'âge) ;
- le détournage (élimination de tiges concurrentes dans un rayon de 1,50 m à partir du tronc et autour de chacune des 200 tiges d'avenir, lorsque la hauteur dominante, Hdom, atteint 3 m).

Les mesures de diamètre et d'accroissement relevées sur le terrain ont permis de montrer que :

- toute intervention accélère la croissance des tiges par rapport à un témoin, l'effet étant le plus marqué sur les tiges dominantes ;
- plus l'intensité d'un dépressage tardif est forte, plus sa réponse en termes d'accroissement individuel des arbres est marquée ;
- l'effet du dépressage sur la croissance des tiges d'avenir est plus important que celui du détournage ;
- le layonnage n'augmente pas la proportion de tiges de qualité potentielle dans le peuplement.

Validation du modèle de croissance

La récolte de données d'accroissement sur des peuplements adultes de Pin d'Alep a permis la validation du modèle de croissance. L'échantillon sur lequel a été testé le modèle est constitué de deux jeux de données pour un total de 705 tiges, réparties sur 56 placettes :

- la base de données Sylvipaca du CRPF constituée d'un inventaire régulier d'une douzaine de placettes sur des peuplements témoins et des peuplements éclaircis (Amandier, 2001). Les inventaires offrent un recul de 7 à 20 ans selon les placettes ;
- un second jeu, créé lors de cette étude, basé sur une campagne d'analyse des accroissements par mesure des cernes sur souches d'arbres fraîchement abattus. Les diamètres des arbres à 1,30 m sont relevés avant coupe afin de connaître la décroissance métrique de chaque arbre et de pouvoir relier le diamètre de la souche au diamètre à 1,30 m. Cette campagne permet un suivi de l'accroissement des arbres depuis leur plus jeune âge, mais seules les 10 dernières années sont utilisées dans cette étude : au-delà, il devient difficile d'estimer les paramètres dendrométriques car ils sont soumis à une trop grande variabilité et leur prise en compte nécessiterait un grand nombre d'hypothèses.

Ces données permettent de connaître l'état du peuplement à un âge de référence, ce qui constitue l'état initial pour la simulation. À partir de cet état initial, la libre évolution du peuplement est simulée avec CAPSIS, puis les caractéristiques dendrométriques calculées par le modèle sont comparées aux données mesurées sur le terrain à l'instant présent ou à l'occasion des suivis du CRPF. Le fait que le modèle soit de type « arbre » et non « peuplement » autorise une évaluation à deux échelles : celle de la tige et celle du peuplement.

Les calculs de biais entre la simulation et la valeur mesurée donnent les résultats suivants :

TABLEAU I **Maxima des biais obtenus au fil des tests de simulation**

Échelle	Peuplement				Arbre	
	N/ha	G/ha	Hdom	Ddom	H	D130
Biais relatif	4 %	6 %	4 %	1 %	4 %	1 %
Biais absolu	7 %	11 %	9 %	4 %	27 %	8 %

Biais relatif : biais / moyenne des mesures ; biais absolu : biais.

La densité de tiges à l'hectare est surestimée de 4 % par le modèle. Ce biais est dû à une sous-estimation de la mortalité qui constitue l'une des principales limites de ce modèle. Elle se répercute ainsi sur la surface terrière, surestimée de 6 %. Il a également été relevé que la réaction aux éclaircies est mal calibrée par le modèle. Pardé (1957) puis Guay et Amandier (2002) ont confirmé les observations de réaction très forte du Pin d'Alep aux éclaircies. Ils rapportent des augmentations de l'accroissement en diamètre de 50 à 200 % quels que soient l'âge ou la fertilité du peuplement. Or le modèle NRG simule des réactions très faibles à l'éclaircie. Les données disponibles n'ont pas permis d'en quantifier l'écart à la réalité. Le biais se cumulant au cours du temps, il convient de rester prudent lors de la simulation de longues périodes de libre évolution du peuplement.

Lorsque la première intervention a lieu tardivement, il est préférable d'utiliser un inventaire du peuplement à un âge avancé en tant que situation initiale. Pour mener des simulations sur des stades juvéniles, la fonction de mortalité trop faible a été compensée par des coupes fictives par le bas reproduisant la concurrence très rude observée dans les jeunes peuplements de Pin entre 10 et 30 ans.

Est à prendre en compte également lors de son utilisation le fait que le modèle n'intègre pas de passage à la futaie et que la surface terrière calculée tient compte de tous les arbres quel que soit leur diamètre, y compris ceux situés en-dessous de 7,5 cm de diamètre. Enfin, les peuplements simulés sont des peuplements pleins alors que les pinèdes à Pin d'Alep sont souvent lâches ou ponctuées de trouées, du fait de variations de la fertilité et de la sensibilité de l'essence aux excès climatiques (vent, neige...). Nous n'avons pas pu intégrer des taux de trouées à nos simulations pour obtenir une image plus proche de la réalité. Cela demanderait une adaptation du modèle et des données sur la répartition spatiale des arbres dans les parcelles de Pin d'Alep.

Malgré un certain nombre de limites qui restreignent l'utilisation du modèle, la souplesse offerte par la plateforme CAPSIS pour modéliser les interventions en fait un outil très intéressant pour la simulation d'itinéraires sylvicoles. Il est en outre bien plus complet que les tables de productions disponibles pour le Pin d'Alep. L'utilisation des tables de production de Couhert et Duplat (1993) limite effectivement le type de sylviculture étudiée à l'itinéraire sur lequel elles sont bâties et ne permet pas de comparaison rigoureuse d'itinéraires (Chandioux, 2014).

UNE RÉFLEXION SUR LES ITINÉRAIRES SYLVICOLES DU PIN D'ALEP APPUYÉE PAR LA MODÉLISATION

Modélisation d'itinéraires sylvicoles

Après validation, le modèle NRG de croissance du Pin d'Alep a permis une phase de simulation d'itinéraires sylvicoles du plus minimaliste (« cigale ») au plus dynamique (« dynamique détou-rage »). Les six scénarios présentés (tableau II, p. 250) et les critères de déclenchement des inter-ventions ont été élaborés au sein d'un groupe de travail composé du CRPF, du syndicat des propriétaires forestiers, d'Irstea et d'Alcina. Chaque scénario a été modélisé à l'aide de CAPSIS, puis évalué d'un point de vue technicoéconomique ainsi que d'un point de vue multifonctionnel (non présenté dans cet article, voir Chomel, 2015).

Les simulations ont été réalisées à partir de l'outil de création de peuplements fictifs lorsque les premières interventions ont eu lieu dans les jeunes peuplements, et à partir d'inventaires fores-tiers pour les interventions plus tardives. Dans les deux derniers scénarios, les travaux réalisés au stade perchis agissent sur la répartition spatiale des tiges, un effet du layonnage étant enre-gistré sur 2 mètres en bordure du layon mais pas à l'intérieur de la bande boisée. Or, le para-mètre spatial n'est pas pris en compte dans le modèle, il a donc été approché en séparant la part du peuplement bénéficiant de l'apport en lumière de ceux n'en bénéficiant pas, avant de les fusionner lorsque l'effet s'estompe.

Modalités d'évaluation technicoéconomique

À partir des volumes exploités à chaque intervention, et d'une estimation complémentaire de la proportion de qualité au sein des lots, une évaluation économique est proposée, reposant sur le calcul de bénéfices actualisés en séquence infinie ou BASI (Morel et Terreaux, 1995). Un sondage auprès de quelques exploitants forestiers a permis l'estimation de la répartition de la qualité dans un peuplement lors de la première intervention. Lors des différentes interventions, la répartition du volume exploité dans les différentes classes de qualité des bois (figure 1, p. 251) est éva-luée en faisant les quatre hypothèses suivantes :

- lors de la première éclaircie, 50 % du prélèvement est exploité sans pouvoir en choisir la qualité (cloisonnements d'exploitation, mise à distance des tiges, sanitaire, besoins du bûche-ronnage...) : après ce premier prélèvement, la répartition en qualité est toujours de 5, 20 et 75 %. Les 50 % restants sont prélevés au sein des tiges de qualité trituration ;
- lors de la deuxième intervention et pour les mêmes raisons que ci-dessus, 40 % du pré-lèvement est imposé puis seulement 10 % pour toutes les interventions suivantes ;
- le layonnage dense ne permet en aucun cas l'amélioration de ces pourcentages ;
- l'hypothèse est posée que la répartition du bois d'œuvre est distribuée entre 20 % de bois de qualité menuiserie et 80 % de bois de charpente.

Les proportions de qualité sont calculées dès les jeunes peuplements, mais seules les tiges ayant atteint le diamètre minimal pour chaque type de produit seront concernées par la hausse de leur prix de vente (figure 2, p. 251).

Le tarif de cubage intégré au modèle NRG est celui proposé par Bernard Guay du CRPF PACA, calculé à partir des données du tome 2 de l'IFN (IFN, 1998). L'ONF dispose d'un tarif « Pin d'Alep » interne, non publié. Quant à eux, les gestionnaires d'Alcina font le choix d'utiliser les barèmes de cubage Chaudé numéro 10 à 12, voire numéro 8 pour les petits diamètres dès qu'ils sont appelés à estimer un volume de bois. Ce barème semble correct dans la mesure où il fait consen-sus entre les vendeurs et les acheteurs des bois depuis plusieurs années.

TABLEAU II Définition des itinéraires sylvicoles étudiés

Itinéraire sylvicole	Travail dans les jeunes peuplements	Éclaircies	Coupe d'ensemencement	Coupe définitive	Remarques
		1 ^{re} éclaircie quand Dmoy = 15 cm	Quand le diamètre dominant atteint 40 cm	15 ans après l'ensemencement	
		Éclaircies suivantes quand G atteint 35 m ² /ha	Individus à laisser en place : individus sains, au houppier bien développé, de diamètre juste inférieur à 40 cm		
« Cigale » minimum			1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	Travaux d'assistance à la régénération après coupe d'ensemencement et volume minimum d'intervention fixé à 30 m ³ /ha
« Cigale »		2 éclaircies par le haut, prélèvement de 60 % des tiges	1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	
Dynamique sans investissement	1 ^{re} éclaircie précoce quand diamètre moyen = 10 cm Éclaircie par le haut Densité objectif = 1 000 tiges/ha	2 ou plus : éclaircies régulières et par le haut. Prélèvements maxima de 50 % du nombre de tiges pour la 1 ^{re} éclaircie, 30 % ensuite. Densité objectif avant coupe d'ensemencement : 300-400 tiges/ha	1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	
Théorique – dépressage	Dépressage quand Hdom = 3 m. Densité objectif = 1 300-1 500 tiges/ha		1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	
Dynamique – layonnage	Layonnage dense (50 % surface : alvéoles intactes de 6 x 6 m, layon de 2,5 m de large)		1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	
Dynamique – détourage	Layonnage (2,5 m avec interbande 12 m) + Détourage de 200 tiges/ha		1 : Densité objectif 150 tiges/ha	1	

FIGURE 1

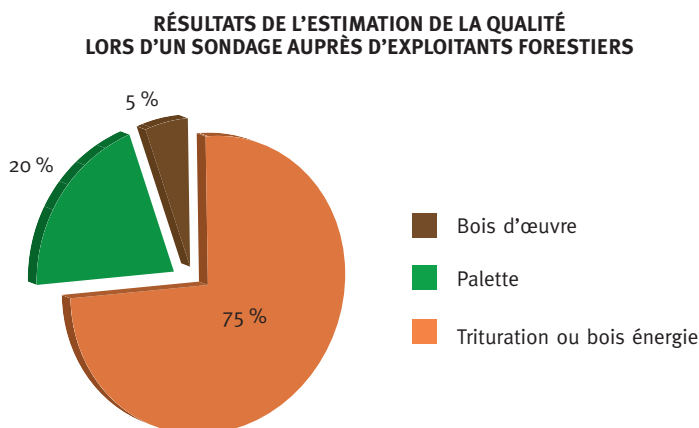
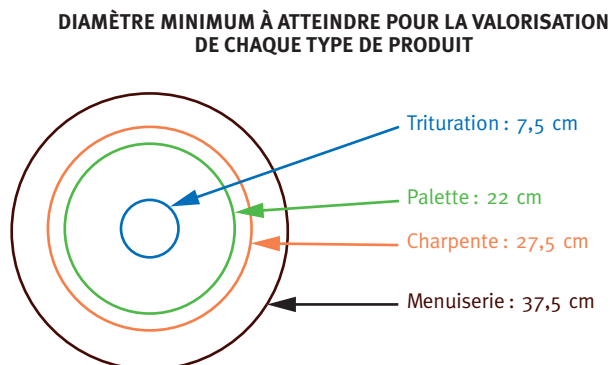


FIGURE 2



Les volumes calculés par les deux tarifs de cubage sont des volumes bois fort, s'arrêtant à la découpe 7,5 cm. Le cubage avec le barème de Chaudé est fait à l'aide d'un tarif 8 jusqu'à 20 cm de diamètre puis un tarif 11 au-delà.

La comparaison des volumes pour des circonférences allant de 20 à 220 cm (6 à 70 cm de diamètre) et des hauteurs de 6 à 27 m montre que le volume calculé par les barèmes Chaudé est inférieur à celui de l'IFN de 60 % pour les perches, 15 % pour les petits bois, puis devient supérieur de 14 % pour les bois moyens et 37 % pour les gros bois. Concernant la validation du modèle, ces différences ont peu d'impact. Cependant, dès qu'il s'agit de raisonner en termes de gestion et de volumes de bois mis en vente, cet écart peut avoir un impact très fort. Pour pouvoir établir les conclusions les plus proches possible de la réalité, il serait nécessaire de mettre au point un tarif de cubage adapté au Pin d'Alep dans son aire naturelle ou du moins de valider les tarifs existants.

Résultats de l'évaluation des itinéraires sylvicoles

Les résultats sont présentés dans les tableaux III, IV et V (p. 252) pour les trois itinéraires dont le BASI est le plus favorable, pour des niveaux de fertilité très communs dans les Bouches-du-Rhône [classe 2 des courbes de croissance Irstea (Rathgeber *et al.*, 2004) soit une hauteur

TABLEAU III Résultats de la simulation et de l'évaluation de l'itinéraire « Dynamique sans investissement »

Première intervention dans les jeunes peuplements suffisamment tard pour réaliser une opération blanche, mais suffisamment tôt pour travailler au profit de la qualité. Suite des interventions standard.

Bilan sylvicole						
Nature de l'intervention	Facteur déclencheur	Âge (an)	Avant coupe			
			N/ha	G (m ² /ha)	Hdom (m)	Dmoy (cm)
1 ^{re} éclaircie	Dmoy = 10 cm + Hdom > 6 m	36	2 838	15,2	11,5	10,4
2 ^e éclaircie	G = 35 m ² /ha	64	941	34,1	17,1	22,0
3 ^e éclaircie	G = 35 m ² /ha	77	673	35,5	19,0	25,9
Coupe d'ensemencement	Ddom = 40 cm	94	398	30,7	20,4	31,4
Coupe définitive	Après 15 ans	109	150	16,1	21,4	37,0

Bilan économique			
Type d'investissement	Montant	Âge	BASI
Assistance à la régénération	750,00 €/ha	94 ans	511 €/ha

TABLEAU IV Résultats de la simulation et de l'évaluation de l'itinéraire « Cigale »

Intervention « standard » en PACA : deux éclaircies, une coupe d'ensemencement, une coupe définitive.

Bilan sylvicole						
Nature de l'intervention	Facteur déclencheur	Âge (an)	Avant coupe			
			N/ha	G (m ² /ha)	Hdom (m)	Dmoy (cm)
1 ^{re} éclaircie	Dmoy = 15 cm	49	2 397	37,5	14,8	15,1
2 ^e éclaircie	G = 35 m ² /ha	72	908	35,1	18,5	22,3
Coupe d'ensemencement	Ddom = 40 cm	95	334	25,4	20,4	31,1
Coupe définitive	Après 15 ans	110	150	19,6	21,3	40,8

Bilan économique			
Type d'investissement	Montant	Âge	BASI
Assistance à la régénération	750,00 €/ha	95 ans	304 €/ha

	Prélèvement	Après coupe		Récolte et qualité		
		N/ha	G (m ² /ha)	Volume récolté en m ³ /ha	% Bois d'œuvre	% Palette
	Par le haut	1 024	8,5	48	0	3
	Par le haut	702	25,0	65	1	9
	Centré	416	22,5	98	1	4
	Qualitatif	150	12,3	145	1	51
		0	0,0	140	35	30
Volume total: 496 m ³ /ha						

	Prélèvement	Après coupe		Récolte et qualité		
		N/ha	G (m ² /ha)	Volume récolté en m ³ /ha	% Bois d'œuvre	% Palette
	Par le haut	996	14,6	41	0	0
	Par le haut	339	15,4	134	1	7
	Qualitatif	150	15,6	75	1	3
		0	0,0	171	12	46
Volume total: 421 m ³ /ha						

TABLEAU V Résultats de la simulation et de l'évaluation de l'itinéraire « Dynamique détournage »

Détournage de 200 jeunes tiges d'avenir et ouverture de layons, puis interventions standard.

Bilan sylvicole						
Nature de l'intervention	Facteur déclencheur	Âge (an)	Avant coupe			
			N/ha	G (m ² /ha)	Hdom (m)	Dmoy (cm)
Détournage + layonnage	Hdom = 3 m	15	3 600	0,0	4,0	5,4
1 ^{re} éclaircie	Dmoy = 15 cm	33	2 659	44,4	10,1	15,4
2 ^e éclaircie	G = 35 m ² /ha	41	1 307	36,4	12,1	18,8
3 ^e éclaircie	G = 35 m ² /ha	60	635	35,7	15,9	26,8
Coupe d'ensemencement	Ddom = 40 cm	85	313	31,0	19,3	35,5
Coupe définitive	Après 15 ans	100	150	18,8	20,5	40

Bilan économique			
Type d'investissement	Montant	Âge	BASI
Détournage + layonnage	1 350 €/ha	15 ans	
Assistance à la régénération	750,00 €/ha	85 ans	250 €/ha

dominante de 17 à 20 mètres à 70 ans]. L'écart entre le BASI le plus favorable et le moins favorable des 6 itinéraires est de 937€. Les trois itinéraires présentés sont assez contrastés mais correspondent à des options acceptables par les propriétaires forestiers dans lesquelles les investissements sont modérés. En effet, du fait de l'accroissement modéré du Pin d'Alep (3,5 m³/ha/an en classe 2), mais aussi de la faible valeur des bois de structure résineux, les investissements initiaux courent sur de longues périodes et leur actualisation rend délicate leur rentabilisation.

Le diamètre de précomptage est ici fixé à 12,5 cm pour le calcul de la surface terrière, ce qui peut expliquer certains écarts importants dans les variables dendrométriques.

L'itinéraire le plus favorable, « dynamique sans investissement » (tableau III, p. 252), est particulièrement délicat dans la mesure où il est basé sur la possibilité de réaliser une première éclaircie « financière blanche » assez tôt dans la vie du peuplement. Il est donc intrinsèquement lié à l'état du marché du bois et au seuil de rentabilité, pour les exploitants forestiers, d'une intervention dans des peuplements de diamètre situé autour du diamètre minimum d'exploitabilité. L'émergence du marché du bois-énergie a permis, depuis 2013, de réaliser des éclaircies dans des peuplements qui relevaient, dans les années précédentes, de travaux de dépressage. Ce scénario produit des quantités de bois d'œuvre assez limitées.

	Prélèvement	Après coupe		Récolte et qualité		
		N/ha	G (m ² /ha)	Volume récolté en m ³ /ha	% Bois d'œuvre	% Palette
	Systématique	2 800	0	0	0	0
	Par le haut	1 330	21,1	107	0	0
	Par le haut	650	18,3	94	0	2
	Centré	318	17,8	123	1	43
	Qualitatif	150	14,5	136	18	49
		0	0	158	53	0
Volume total: 618 m ³ /ha						

L'itinéraire « cigale » (tableau IV, p. 252), dont la dénomination fait référence à la fable de la Fontaine et au comportement « court-termiste » de nombre de propriétaires forestiers, s'avère assez favorable du point de vue du BASI en comparaison avec les autres itinéraires. C'est l'absence d'investissement pour des travaux dans les jeunes peuplements qui permet cet équilibre économique malgré des revenus toujours faibles. Il s'agit cependant d'un artefact lié au fait que les travaux d'assistance à la régénération sont intégrés à la fin et non au début du cycle [ce qui correspond au principe de l'utilisation du revenu de la coupe définitive dans ces travaux de crochitage du sol ou de brûlage dirigé nécessaires à une régénération efficace du Pin d'Alep (Prévosto *et al.*, 2009)].

Enfin, l'itinéraire « dynamique détournement » (tableau V, p. 254) ressort comme économiquement assez rentable. Basé sur une hypothèse de coût de détournement assez hasardeuse (la technique n'a pas été mise en œuvre en vraie grandeur sur Pin d'Alep), le principe est celui d'un investissement dans le jeune âge le moins coûteux possible mais permettant de qualifier un nombre suffisant de tiges de qualité pour concentrer la production sur celles-ci et produire un volume assez significatif de bois d'œuvre au cours de la vie du peuplement. C'est, parmi les scénarios étudiés, le plus compatible avec l'objectif de développement d'une filière bois d'œuvre du Pin d'Alep et une amélioration des revenus des propriétaires.

LIMITES ET PERSPECTIVES

La validation du modèle de croissance NRG a permis son utilisation sur la plateforme CAPSIS pour prévoir quelle serait la réaction des peuplements purs de Pin d'Alep, caractéristiques des forêts des Bouches-du-Rhône, à la conduite de différents itinéraires sylvicoles. Comme tout résultat issu de la modélisation, il serait nécessaire d'appliquer les traitements sur des peuplements réels, afin d'avoir la confirmation que la modélisation de la réaction des peuplements est conforme à ce qui se passe en réalité. La réaction aux éclaircies et la croissance des jeunes peuplements en particulier seraient à étudier de près pour consolider cette étude.

Afin de pouvoir rentrer dans le cadre de la modélisation, seuls des peuplements équiennes, pleins et purs ont été étudiés. Or, dans le contexte méditerranéen, on rencontre aussi fréquemment des futaies de Pin sur taillis de Chêne. L'effet de gainage du taillis sur les pins est susceptible d'améliorer leur qualité. Le bilan économique de ce type de sylviculture reste à mener. D'autre part, le traitement en futaie irrégulière pourrait répondre à un certain nombre d'enjeux multifonctionnels, mais sa modélisation est d'autant plus difficile que les références dans cette structure sont rares.

Cette étude permet de prendre du recul sur plusieurs scénarios sylvicoles de gestion du Pin d'Alep, allant du plus courant en PACA au plus innovant, du moins interventionniste au plus dynamique. Une interprétation technicoéconomique est présentée dans cet article, cependant, le choix d'itinéraires sylvicoles peut être très variable en élargissant l'évaluation des itinéraires à d'autres enjeux auxquels le propriétaire peut voir de la valeur non monétaire, ou qui puissent constituer des revenus annexes. Une comparaison orientée par les enjeux sociaux, cynégétiques, de qualité des produits, d'exposition aux risques, de résistance et résilience aux incendies et d'acceptation sociale met en valeur le scénario « dynamique détournement » qui paraît être celui qui répond favorablement à un maximum d'enjeux. En effet, au-delà de sa performance technicoéconomique, le détournement permet de produire du bois de qualité, de diminuer la masse combustible dans les jeunes peuplements et de rompre la continuité horizontale des houppiers (facteur incendie), la durée réduite du cycle limite l'exposition aux risques sanitaires et de chablis (facteur risque), et le layonnage associé favorise l'accès des jeunes peuplements aux chasseurs tout en constituant un refuge pour la faune (facteur cynégétique, social).

Cette réflexion guidée par la volonté de valoriser au mieux les pinèdes et d'en obtenir des produits de meilleure qualité devra nécessairement être accompagnée d'une organisation de la filière pour valoriser les bois de qualité issus d'une telle sylviculture. D'autre part, un véritable travail en amont devra être réalisé afin d'encourager la mise en place de cette sylviculture dynamique. Cela passera nécessairement par l'appropriation des scénarios par les gestionnaires forestiers et sylviculteurs, la communication à leur propos et leur mise en application, voire éventuellement une intégration des propositions au sein des documents cadres pour la gestion forestière si l'on souhaite avoir un véritable impact. Enfin, si l'investissement initial de certains itinéraires est relativement conséquent, leurs bénéfiques pour la multifonctionnalité de la forêt ne pourraient-ils pas rendre ces itinéraires éligibles à un système d'aides financières adaptées en conséquence ?

Fanny CHOMEL

Stagiaire à Alcina, antenne d'Aix-en-Provence

Actuellement

AgroParisTech

16 rue Claude Bernard

F-75231 PARIS CEDEX 05

(fanny.chomel@agroparitech.fr)

Olivier CHANDIOUX – Albert LE COURBE

Alcina, antenne d'Aix-en-Provence

Domaine du Petit Arbois

Bâtiment Poincaré

1 avenue Louis Philibert

F-13857 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 03

(olivier.chandioux@alcina.fr)

Remerciements

Cette étude n'aurait pu se faire sans l'aide de Philippe Dreyfus, véritable appui pour la phase de validation du modèle, ni du CRPF PACA ayant fourni des bases de données pour l'étude. Nous souhaitons leur adresser nos remerciements pour leur accompagnement.

Le rapport détaillé de l'étude de Fanny Chomel « *Regard sur les itinéraires sylvicoles du pin d'Alep : Modéliser pour optimiser* » (2015) est disponible à l'adresse suivante : http://infodoc.agroparistech.fr/doc_num_data.php?explnum_id=5133

BIBLIOGRAPHIE

- AFOCEL. — Évolution de la ressource en pin d'Alep en région Provence Alpes Côte d'Azur. Rapport final. — AFOCEL, 2005. — 29 p.
- AMANDIER (L.). — Mise en place de références en sylviculture : le programme Sylvipaca. — *Forêt méditerranéenne*, tome XXII, n° 1, 2001, pp. 59-64.
- CHANDIOUX (O.), RICODEAU (N.). — Le Prix de mon arbre : vers une sylviculture de production du pin d'Alep. — *Forêt méditerranéenne*, tome XXXV, n° 1, 2014, pp. 35-52.
- CHOMEL (F.). — Regard sur les itinéraires sylvicoles du pin d'Alep : Modéliser pour optimiser. — AgroParisTech, Alcina, 2015 (rapport de stage de 3^e année).
- CIANCIO (O.). — Sylviculture du pin d'Alep. Le pin d'Alep et le Pin brutia dans la sylviculture méditerranéenne. — Paris : CIHEAM, 1986. — pp. 47-54 (Options Méditerranéennes : Série Études ; n° 1986-I).
- COUHERT (B.), DUPLAT (P.). — Le Pin d'Alep dans la région PACA. Propositions pour une sylviculture et un modèle de production. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 25, 1993, pp. 3-22.
- DREYFUS (P.), HAMZA (N.), PIGNARD (G.). — Construction de modèles de croissance pour les peuplements réguliers à partir de données dendrométriques de l'IFN. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4 spécial "Les 40 ans de l'Inventaire forestier national : utilisation et valorisation des données collectées", 2001, pp. 365-371.
- GUAY (B.), AMANDIER (L.). — Bilan des coupes de pin d'Alep réalisées en forêt privée de 1985 à 1998. — Marseille : Centre régional de la propriété forestière PACA, 2002. — 48 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. — Atlas des régions forestières. Tome II : Sud-Est de la France. — IFN, 1998. — 280 p. + annexes.
- MOREL (M.), TERREAUX (J.-Ph.). — L'estimation de la valeur des forêts à travers un exemple : entre simplification abusive et complexité du réel. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 2, 1995, pp. 151-161.
- NEVEUX (M.), DUHEN (L.-M.), CORTI (J.-M.), DEVALLOIS (P.), FONTANEL (J.-L.), BOISEAU (P.). — Plaidoyer pour une sylviculture du Pin d'Alep. — *Forêt méditerranéenne*, tome VIII, n° 1, 1986, pp. 13-18.
- ONF, CRPF PACA. — La Sylviculture du Pin blanc ; Le Pin blanc : une espèce provençale en plein essor. — *Forêt méditerranéenne*, tome XIII, n° 3, 1992, pp. 204-215.
- PARDÉ (J.). — La Productivité des forêts de Pin d'Alep en France. — *Annales de l'École nationale des Eaux et Forêts*, tome XV, n° 2, 1957, pp. 365-415.
- PRÉVOSTO (B.), RIPERT (C.), FAVAND (G.), LOPEZ (J.-M.), ESTEVE (R.), MARTIN (W.), N'DIAYE (A.). — Régénération du Pin d'Alep en Basse Provence. Impact des traitements du sol, de la végétation et des rémanents. — *Forêt méditerranéenne*, tome XXX, n° 1, 2009, pp. 3-12.
- QUESNEY (T.), AMANDIER (L.). — Les sylvicultures. In : Le pin d'Alep en France. 17 fiches pour connaître et gérer / B. Prévosto (coord.). — Versailles : éditions Quæ, 2013. — 160 p.
- RATHGEBER (C.), BLANC (C.), RIPERT (C.), VENNETIER (M.). — Modélisation de la croissance en hauteur du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en région méditerranéenne française. — *Ecologia Mediterranea*, vol. 30, n° 2, 2004, pp. 205-218.

LA VALIDATION D'UN MODÈLE DE CROISSANCE AU SERVICE D'UNE RÉFLEXION SUR LA SYLVICULTURE DU PIN D'ALEP (Résumé)

Les possibilités de nouveaux débouchés pour les produits de la filière bois en zone méditerranéenne nécessitent de redéfinir les sylvicultures, souvent minimalistes, qui sont appliquées actuellement aux pinèdes de Pin d'Alep. La phase de validation d'un modèle de croissance intégré à la plateforme de simulation CAPSIS a permis ensuite de simuler différents itinéraires sylvicoles, des plus passifs aux plus dynamiques. En parallèle, la réaction des jeunes peuplements à des interventions dès le plus jeune âge — non pris en compte par le modèle — a été caractérisée. Une évaluation de ces itinéraires sur les plans technique et économique permet alors de révéler que certains itinéraires préconisés pourraient répondre aux enjeux actuels de la filière forestière méditerranéenne.

VALIDATION OF A PROPOSED GROWTH MODEL FOR ALEPPO PINE SILVICULTURE (Abstract)

The new outlets that are emerging for timber products in Mediterranean area require hereto often minimalist silvicultural practises applied to Aleppo pine forests to be redefined. The validation of a growth model integrated into the CAPSIS simulation platform enabled simulations of different silvicultural patterns to be performed — ranging from the less interventionist to the more dynamic. Concomitantly, additional data allowed us to characterise the response of young stands — not considered by the model — to early silvicultural treatments. A technical and economic assessment of those patterns shows that some of the proposed schemes could meet some of the current challenges facing the Mediterranean forestry and forest-based industry.
