Développement d'outils pour la valorisation du pin d'Alep:

De la ressource estimée par massif à la qualité évaluée par arbre

Mémoire de fin d'études

Dominante d'approfondissement
« Gestion Forestière »

Marion SIMEONI

Promotions ENSTIB 2017 - FIF 26

Septembre 2019

Photographie de couverture prise en forêt communale de Gardanne.

Fiche signalétique d'un mémoire

rédigé dans le cadre d'études à AgroParisTech

Titre : **Développement d'outils pour la valorisation du pin d'Alep : de la ressource estimée par massif à la qualité évaluée par arbre**

Auteur : Marion SIMEONI

Mots clés : Pin d'Alep, classement qualité, itinéraire sylvicole, modèle de croissance, données satellites Sentinel

Stage assistant ingénieur	☐
Dominante d'approfondissement	x
CEI	☐
Autre	☐

Date de fin de rédaction : 3 septembre 2019

Caractéristiques : 1 volume ; 125 pages ; 23 figures ; 28 annexes ; bibliographie.

Organisme d'accueil : **Office National des Forêts, Agence interdépartementale 13-84, Avignon**

En partenariat avec le bureau d'étude forestier Alcina, Venelles (13)

Nom des maîtres de stage : **Laurence Lelegard-Moreau (ONF) ; Olivier Chandioux (Alcina)**
Fonctions dans l'organisme : **Responsable du service Forêt-Bois ; Ingénieur forestier**

Nom du référent AgroParisTech : **Eric Lacombe**

Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.

- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée

- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.

- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.

- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.

- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanctions

- En cas de manquement à ces consignes, la DEVE ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussignée Marion SIMEONI

reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À Fessenheim le 3 septembre 2019

Signature :

Résumé

L'intégration du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) dans la norme NF B52-001-1 relative aux règles d'utilisation du bois dans la construction en 2018, associée à l'apport scientifique riche de cette décennie à son sujet, laissent entrevoir enfin la possibilité de valoriser à nouveau le pin d'Alep à sa juste valeur : c'est-à-dire en bois de construction. Le sud-est de la France disposerait alors d'une filière locale de bois d'œuvre.

Toutefois, cela ne se fera pas sans une évolution significative des pratiques sylvicoles et est conditionné par la capacité des unités de sciage de la région. L'installation de nouvelles scieries est un facteur qu'il est impossible de maitriser. En revanche, il est possible d'en créer un contexte favorable, en apportant des outils facilitateurs pour relier les maillons de la chaine de valorisation du pin d'Alep en bois d'œuvre. La présente étude se propose d'en développer trois, plutôt à destination des forestiers, intervenant à trois échelles : celle du massif, celle de la parcelle forestière et celle de l'arbre.

Abstract

The integration of the Aleppo pine (*Pinus halepensis)* within the French norm NF B52-001-1 about the usage rules of wood in construction in 2018, combined with the rich scientific benefit of this decade on the topic, comes at last to the possibility to highlight again the fair value of the Aleppo pine : that means in construction wood. Therefore, there would be a local lumber industry in the South-East of France.

However, this will not occur without a significant evolution of the silvicultural practices and it remains conditioned by the capacity of the sawing units in the region. The installation of new sawmills is an uncontrollable factor. In contrast, it is possible to create a favorable framework, by bringing facilitating tools to connect the chain's links of the valorization of the Aleppo pine into softwood lumber. This study sets out three of them, mainly aimed at foresters, and acting at several scales: the one of the massif, the one of forest plot and the one of the tree.

Remerciements

Un immense merci à Philippe Dreyfus, chercheur au pôle RDI de l'ONF d'Avignon, à la hauteur de son aide sans faille tout au long de ce stage pour tirer le meilleur des données Sentinel, jusqu'au bout. Ta maitrise des logiciels et les ressources que tu m'as fournies ont été essentielles. J'ai apprécié nos phases de questionnements, d'échanges d'idées, voire de doutes, au cours desquelles tu avais toujours le bon mot pour maintenir la bonne humeur.

Je remercie Mathieu Fortin, anciennement enseignant-chercheur au LERFoB, auteur des corrections du modèle de croissance des pins d'Alep tel que je l'ai utilisé. Sans oublier que ce modèle fut initialement élaboré par Philippe Dreyfus, alors merci encore à lui. J'espère avoir valorisé ce travail en en faisant la base de l'un des outils de ce stage.

Pour parler commercialisation et qualité des bois, Julien Bochet, adjoint au responsable commercial bois à l'ONF, m'a été d'une grande aide. Un grand merci pour tes suggestions et tes réponses à mes questions en toute franchise. Pour la partie terrain, je remercie Jean-Marc Ortolan, responsable technique d'exploitation, que j'ai pu accompagner sur des chantiers, qui furent l'occasion de discussions très enrichissantes.

Merci aux techniciens forestiers qui m'ont guidée sur leurs plus belles parcelles de pin d'Alep et à Julien Sottani, stagiaire BTS, pour son aide pour l'inventaire de Lamanon.

Je remercie les responsables d'unités territoriales de l'ONF, Jean-Marc Lagarrigue et Jérôme Guyot pour m'avoir reçue pendant le stage, et Pierre-Christophe Herzog pour accueillir la soutenance.

Je tiens à remercier vivement les professionnels de l'aval de la filière qui ont bien voulu répondre à mes questions. En particulier ceux avec qui les discussions ont dépassé le cadre du questionnaire, m'apportant des enseignements riches pour mon étude.

Merci à Yves Ehrhart, enseignant à la FIF, pour ses conseils techniques précis sur les subtilités du matériau bois.

Je n'oublie pas mes camarades de promo, en particulier les neuf membres du projet pin d'Alep de décembre 2018, qui restera un excellent souvenir pour moi. Le point de départ de ce stage, nous l'avons construit ensemble. Antoine Charlet et Laetitia Wolff merci à vous deux pour votre travail sur Sentinel, base précieuse de l'outil développé au cours du stage.

Enfin, je me dois de remercier vivement l'équipe encadrante de ce stage qui m'a fourni les conditions idéales pour remplir au mieux mes missions :

Eric Lacombe, chercheur au LERFoB mais surtout mon professeur référent à la FIF, qui a cru en moi en me confiant le sujet de ce stage et m'a donné toutes les clefs pour réussir. Merci pour ton soutien indéfectible et tes enseignements pendant et avant ce stage.

Olivier Chandioux, ingénieur forestier à Alcina. J'ai pu compter sur ton suivi étroit fait d'indispensables conseils techniques, idées et suggestions d'amélioration. Ton expertise sur le pin d'Alep m'a fourni des ressources essentielles. Pour tout cela, un immense merci !

Laurence Lelegard-Moreau, responsable du service Forêt-Bois de l'ONF 13-84, qui m'a fait une place dans son bureau et supervisé ce stage. Merci pour ta présence au quotidien, tes précieux enseignements, et tout le reste… pour faire de ce stage une belle expérience motivante pour la suite de ma vie de forestière.

Table des matières

Index 3
Introduction 7
I. Contexte et objectifs : proposer des solutions concrètes pour valoriser les connaissances et la dynamique actuelle autour de la filière pin d'Alep 8
1. Un contexte favorable à l'émergence de la filière 8
a. La normalisation ouvre de nouvelles perspectives de débouchés valorisants pour le pin d'Alep 8
b. Une conscience écologique collective qui favorise les filières durables et locales 8
2. Des freins persistants à lever 9
a. Un marché bois d'œuvre à créer : assurer la ressource, garantir les débouchés 9
b. Une culture forestière encore limitée : d'autres enjeux prépondérants face à la valorisation du bois 10
3. Un stage pour proposer des solutions concrètes 10
a. L'aboutissement du projet DOPALEP par la mise en œuvre d'actions ciblées 11
b. Une cotutelle pour proposer des solutions globales et partagées 11
c. Les actions ciblées : trois outils applicables à trois étapes distinctes 12
II. Identifier la ressource à l'échelle du massif 13
1. Les enjeux : où se situent les massifs riches en pin d'Alep ? 13
a. La connaissance actuelle de la ressource 13
b. Une ressource sous -ou mal- exploitée 14
2. La construction de l'outil : calibration d'un modèle à partir des données satellites Sentinel 15
a. Le principe général : les grandes étapes de l'élaboration 15
b. La source : descriptif des données Sentinel 15
c. Exploiter les avantages de ce type de données 16
d. Parer aux inconvénients de ce type de données 17
e. La constitution de la base de données 20
f. L'élaboration du modèle 23
3. Résultats de la calibration : sélection et validation d'un modèle 26
a. Identification du modèle le plus performant 26
b. Une amélioration grâce aux corrections ? 27
c. Un modèle plus performant mais qui atteint ses limites 29
d. Faut-il restreindre la calibration sur des images acquises à la même période ? 32
4. Mise en application cartographique et perspectives d'utilisations 33
a. Production d'une carte de la ressource en pin d'Alep 33
b. Utilisations potentielles des informations géographiques produites 37
III. Valoriser le potentiel du peuplement en y appliquant une sylviculture adaptée 41
1. Les enjeux : proposer une gestion adaptée pour valoriser le potentiel 41
a. Un fort potentiel d'amélioration de la qualité des peuplements 41

b. Un potentiel variable d'une forêt à l'autre 41
c. Peu de recul sur les itinéraires sylvicoles existants 42
2. La construction de l'outil : modélisation de l'évolution des peuplements 42
a. Les sources 43
b. La structure 50
3. Mise en pratique : proposition de l'itinéraire sylvicole le plus valorisant 56
a. Critères d'évaluation de la performance des scénarii 57
b. Composition de l'échantillon de peuplements testés 57
c. Analyse des résultats 59
4. Perspectives d'utilisation : aide à la décision pour le sylviculteur et le propriétaire 62
a. Fonctions de l'outil 62
b. Perspectives d'amélioration 63
IV. Caractériser la qualité à l'échelle de l'arbre 66
1. Les enjeux : comment reconnaître les pins d'Alep de qualités bois d'œuvre ? 66
a. Distinguer qualités intrinsèques et conformation 66
b. Prédire le potentiel d'un arbre de façon fiable et uniforme entre tous les acteurs 66
2. La construction de l'outil : élaboration d'un classement visuel des bois ronds 67
a. Transcription des critères de la norme en caractéristiques visibles sur bois rond 67
b. Hiérarchisation et ajustement des seuils selon les attentes des premiers transformateurs du bois 73
3. Mise en pratique et résultats : évaluation de la part de bois d'œuvre dans les coupes en cours en 2019 77
a. La déclinaison du tableau de référence en outils opérationnels 78
b. L'application du classement visuel : test du document dans le cadre d'un inventaire réel et diffusion auprès des potentiels utilisateurs 79
4. Perspectives d'utilisation : trier plus pour transformer chaque grume à sa juste valeur 83
Conclusion 85
Références bibliographiques 87
Annexes 90

Index

Index des tableaux :

Tableau II.1. : Description des bandes Sentinel 16
Tableau II.2. : Proportion de placettes corrigées du rayonnement pour chaque bande 19
Tableau II.3. : Répartition des indices selon le comportement observé en fonction de la surface terrière 23
Tableau II.4. : Indicateurs statistiques moyens des performances des modèles retenus 26
Tableau II.5. : Comparaison des performances de prédictions des modèles retenus 26
Tableau II.6. : Comparaison des indicateurs statistiques de performances entre l'ancien modèle et le nouveau 27
Tableau II.7. : Evolution du coefficient de détermination après retrait des placettes aberrantes 27
Tableau II.8. : Evolution du coefficient de détermination après correction de l'effet rayonnement 28
Tableau II.9. : Comparaison des valeurs des coefficients de détermination de jeux de dalles triés selon leurs dates d'acquisition 32
Tableau III.1. : Inventaire des itinéraires sylvicoles existants pour le pin d'Alep 44
Tableau III.2. : Détails des estimations de variations de qualité induites par la structure du peuplement et les opérations sylvicoles 48
Tableau III.3. : Données d'entrée de l'outil et niveaux de précision correspondants 51
Tableau III.4. : Itinéraires sylvicoles traités dans l'outil 52
Tableau III.5. : Détails de la codification des données d'entrée 52
Tableau III.6. : Comparaison des volumes maximaux CAPSIS-Terrain-Coupes réelles 54
Tableau III.7. : Caractéristiques initiales des peuplements échantillonnés en fertilité 1 58
Tableau III.8. : Caractéristiques initiales des peuplements échantillonnés en fertilité 2 58
Tableau III.9. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements testés en fertilité 1 59
Tableau III.10. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements testés en fertilité 2 60
Tableau III.11. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements, cas particulier de conditions d'exploitation difficiles 60
Tableau IV.1. : Correspondances des classes : mécaniques – visuelles sur sciage – visuelles sur bois rond, et débouchés associés 68
Tableau IV.2. : Evaluation de la visibilité sur bois ronds des critères de la norme sciage 69
Tableau IV.3. : Liste des critères à considérer dans le classement des bois ronds sur pied et en grume 70
Tableau IV.4. : Evaluation du lien entre les écoulements de résine visibles et le cœur résineux 72
Tableau IV.5. : Etude du lien entre inclinaison de l'arbre et cœur excentré 72
Tableau IV.6. : Etude du lien entre atteintes sanitaires externes (champignons, blessures) et pourriture interne du bois 73
Tableau IV.7. : Récapitulatif des professionnels interrogés selon leur secteur d'activité 74
Tableau IV.8. : Bilan des réponses recueillies par niveau d'intérêt pour le sujet 74
Tableau IV.9. : Récurrence des défauts dans les arbres inventoriés (n=514) 81
Tableau IV.10. : Résultats des inventaires de la qualité sur sept coupes de l'état d'assiette 2019 de l'ONF (13-84) 81

Index des figures :

Figure I.1. : Positionnement des outils dans la chaîne de valorisation du pin d'Alep 12

Figure II.1. : Les étapes de la construction de l'outil Sentinel 15

Figure II.2. : Valeurs de la bande 2 brutes et corrigées selon le rayonnement 19

Figure II.3. : Processus de sélection des dalles Sentinel 21

Figure II.4. : Graphiques permettant l'identification des valeurs aberrantes de surfaces terrières selon celles d'indices constants 23

Figure II.5. : Exemples de deux comportements différents des valeurs de surfaces terrières en fonction de deux indices Sentinel 24

Figure II.6. : Processus de sélection d'un modèle selon le critère d'Akaike, exemple de la méthode ascendante 25

Figure II.7. : Valeurs d'une bande Sentinel à chaque acquisition en fonction de la couverture nuageuse 28

Figure II.8. : Evolution du niveau du coefficient de détermination du modèle le plus performant au fur et à mesure des corrections 29

Figure II.9. : Comparaison des surfaces terrières prédites par le modèle avec les valeurs mesurées sur le terrain 30

Figure II.10. : Distribution des surfaces terrières relevées par l'Inventaire Forestier National dans les peuplements de pin d'Alep 31

Figure II.11. : Processus de traitement des cartes pour en augmenter la fiabilité 36

Figure II.12. : Analyse du potentiel d'un massif forestier selon différents facteurs : la densité en surface terrière, l'accessibilité, le bilan hydrique climatique et les situations topographiques locales (source : ONF RDI Avignon) 39

Figure III.1. :Aperçu du fonctionnement du logiciel CAPSIS 46

Figure III.2. : Principe général du fonctionnement de l'application 51

Figure III.3. : Processus de positionnement des données d'entrée dans la banque de données 53

Figure III.4. : Visualisation de l'effet des corrections sur les surfaces terrières très élevées simulées dans CAPSIS 55

Figure III.5. : Plan schématique de l'outil de simulation 56

Figure IV.1. : Schéma de l'implantation conique d'une branche 70

Figure IV.2. : Niveau de cœur excentré (proportion de tiges atteintes) pour chaque niveau d'inclinaison de l'arbre 72

Figure IV.3. : Fréquence de citations des défauts du pin par les professionnels interrogés 75

Figure IV.4. : Schéma de fonctionnement de la clef de détermination : principe du critère déclassant 78

Figure IV.5. : Intégration de l'outil de classement visuel dans les procédures de l'ONF 83

Index des annexes :

ANNEXE I.1 : Etat des lieux de la filière pin d'Alep constaté lors du projet AgroParisTech 2018 : freins et leviers 90

ANNEXE II.1 : La ressource de pin d'Alep en quelques chiffres 91

ANNEXE II.2 : Positionnement des dalles traitées dans l'aire de répartition du pin d'Alep 92

ANNEXE II.3 : Carte de la localisation des placettes de calibration du modèle Sentinel 93

ANNEXE II.4 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel, données brutes, exemple sur deux massifs 94

ANNEXE II.5 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés 95

ANNEXE II.6 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés, avec caractérisation du type de forêt (exemple 1) 96

ANNEXE II.7 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés, avec caractérisation du type de forêt (exemple 2) 97

ANNEXE II.8 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel avec mise en évidence des peuplements de pin d'Alep 98

ANNEXE II.9 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel à une résolution de 10 mètres, zoom sur une forêt 99

ANNEXE II.10 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel à une résolution de 50 mètres, zoom sur une forêt 100

ANNEXE II.11 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel, triées par classes, à une résolution de 50 mètres, zoom sur une forêt 101

ANNEXE II.12 : Aperçu des couches géographiques livrées avec l'outil Sentinel 102

ANNEXE III.1 : Détails des itinéraires traités dans l'outil de simulation 103

ANNEXE III.2 : Proportions des qualités à chaque étape des itinéraires retenus dans l'outil 104

ANNEXE III.3 : Prix par défaut fixés dans l'outil 106

ANNEXE III.4 : Liste des peuplements de référence traités dans l'outil 107

ANNEXE III.5 : Aperçu des éléments de sortie affichés dans la page des résultats 108

ANNEXE III.6 : Aperçu des éléments de sortie affichés dans la page du bilan 109

ANNEXE III.7.a : Détails des résultats des tests en fertilité 1 110

ANNEXE III.7.b : Détails des résultats des tests en fertilité 2 111

ANNEXE IV.1.a : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-II et les bois ronds 112

ANNEXE IV.1.b : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-III et les bois ronds 113

ANNEXE IV.1.c : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-IV et les bois ronds 114

ANNEXE IV.2 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : Tableau de référence 115

ANNEXE IV.3 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : Clef de détermination 118

ANNEXE IV.4 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : Guide de reconnaissance des critères 120

ANNEXE IV.5 : Protocole d'inventaire de la qualité dans les coupes de pin d'Alep 121

Index alphabétique des sigles et des abréviations :

AFNOR : Association Française de Normalisation

AIC : Critère d'information d'Akaike, en statistique

BAS : Bénéfice Actualisé Simple

BI/BE : Bois d'Industrie et Bois Energie

BO : Bois d'œuvre

BOP : Bois d'œuvre de Palette

BOS : Bois d'œuvre de Structure

CAPSIS : Nom du logiciel de simulation de conduites sylvicoles

CLC : CORINE Land Cover

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

Dalle : Abréviation de la combinaison d'un type de dalle et d'une date d'acquisition d'image

DFCI : Défense des Forêts Contre les Incendies

DOPALEP : Développement d'Outils Partagés pour la sylviculture de pin d'Alep de qualité

IFN : Inventaire Forestier National

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

LabEx Arbre : Projet lauréat de la catégorie LABoratoire d'EXcellence pour les investissements d'avenir 2012 de recherches avancées sur la biologie de l'arbre et les écosystèmes forestiers

LERFoB : Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois

NF : Norme Française

NRG2017 : Nom du modèle de croissance des pins d'Alep

R^2 : Coefficient de détermination statistique

RMSE : Erreur quadratique moyenne statistique

SIG : Système d'Information Géographique

UMR Silva : Institut de recherche en écologie forestière de Nancy

USGS : *United States Geological Survey*

Introduction

Le bois de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) peut être mis en œuvre en structure. De ses usages en construction navale dès l'antiquité puis en charpente au moyen-âge, jusqu'aux travaux pour le certifier dans la norme en 2018, les preuves de ses aptitudes mécaniques ne manquent pas. Dans le sud-est de la France, cette essence constitue plus de 230 000 hectares de forêts qui s'étendent toujours plus grâce aux capacités exceptionnelles de colonisation du pin d'Alep, espèce éminemment pionnière. Dans son aire de répartition sur le pourtour méditerranéen, il constitue donc une ressource vaste et renouvelable, et présente une potentialité de valorisation forte. La logique voudrait alors qu'il existe une filière durable de transformation du pin d'Alep en bois d'œuvre. Pourtant, à l'heure actuelle, un tel marché fait défaut dans le sud-est de la France.

Une culture forestière peu développée, associée à l'apparition d'autres débouchés rémunérateurs très consommateurs de pin d'Alep, le tout dans un contexte de globalisation favorisant l'import massif de bois, ont conduit à l'exclure des bancs de sciage.

La situation socio-économique explique en partie l'absence d'un marché de bois d'œuvre de pin d'Alep, mais les raisons sont aussi à chercher du côté de l'état même des peuplements. En effet, force est de constater l'abondance de pins d'Alep tordus et bas branchus, inaptes à être sciés. Les pratiques sylvicoles frustes, dépourvues d'actions fortes d'amélioration de la qualité, y sont pour beaucoup dans leur mauvaise conformation.

Cette image peu reluisante des forêts de pin d'Alep participe de la méfiance des consommateurs et des professionnels de la transformation du bois à choisir cette essence pour des mises en œuvre en structure. D'autant plus que le marché mondialisé permet aujourd'hui d'importer aisément des produits standardisés. Fiabiliser l'approvisionnement, rassurer les prescripteurs et les consommateurs, sont donc des éléments cruciaux pour permettre l'émergence d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep. Pour cela, des évolutions dans les pratiques, nécessitant une connaissance fine de la dynamique naturelle de cette espèce, sont requises.

La multiplication des études au sujet du pin d'Alep, sources d'informations précieuses pour adapter au plus juste la sylviculture, et une volonté affichée, et de plus en plus répandue dans la société, d'un retour au local, laissent entrevoir une réhabilitation du pin d'Alep comme bois de construction. Il s'agirait alors d'un rétablissement d'une situation logique de circuit-court dans le sud-est de la France : valoriser localement et durablement le bois qui nous entoure.

Les énergies, les connaissances théoriques et les compétences techniques existent pour poursuivre l'objectif commun de construction d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep. L'enjeu désormais est de les coordonner pour en tirer des avancées concrètes. C'est dans cette optique que cette étude propose le développement d'outils techniques censés cibler et faciliter les opérations à des étapes clefs d'une potentielle chaine de valorisation des pins d'Alep, durable et rémunératrice pour tous ses acteurs. Avec cela, nous espérons créer les conditions favorables à la réussite des projets de constructions en pin d'Alep et à l'éventuelle installation de nouvelles unités de transformation du bois dans la région.

I. Contexte et objectifs : proposer des solutions concrètes pour valoriser les connaissances et la dynamique actuelle autour de la filière pin d'Alep

Cette étude intervient dans un contexte favorable de mobilisation autour de la ressource de pin d'Alep. La perception de cette essence semble évoluer vers une réhabilitation de sa fonction de bois d'œuvre. Cela ne se fera pas sans un changement dans les pratiques de gestion forestière que ce stage se veut de favoriser par l'apport d'outils opérationnels.

1. Un contexte favorable à l'émergence de la filière

a. La normalisation ouvre de nouvelles perspectives de débouchés valorisants pour le pin d'Alep

En avril 2018, l'inclusion du pin d'Alep dans la norme NF EN B52-001-1 relative aux règles d'utilisation du bois dans la construction a été une avancée majeure pour la construction d'une filière bois d'œuvre pour cette essence. Cette certification ne fait que confirmer des capacités mécaniques de ce bois que nos ancêtres connaissaient. En témoignent les anciens usages du pin d'Alep : de l'antiquité au début du XXème siècle en construction navale, et dans les charpentes au moyen-âge. Néanmoins, cette norme était indispensable pour apporter les garanties de solidité et les seuils requis pour les dimensionnements des éléments de structure. Sans cela, une surévaluation des sections par principe de précaution était nécessaire, ce qui est peu engageant pour les transformateurs du bois dont l'optimisation du rendement matière est une priorité.

Les résultats particulièrement satisfaisants des essais mécaniques menés pour cette certification (révélant des performances mécaniques supérieures à celles des autres pins) viennent donc lever sans ambigüité les réticences des professionnels de l'aval à son usage : prescripteurs, bureaux d'étude, charpentiers et scieurs se disent désormais prêts à intégrer le pin d'Alep dans leurs réalisations.

Toutefois, pour rendre cela possible, il faut créer la demande : le client final est-il prêt à construire en pin d'Alep ?

b. Une conscience écologique collective qui favorise les filières durables et locales

La prise de conscience collective de l'urgence écologique, qui connaît une dynamique exceptionnelle depuis quelques mois, remet profondément en cause nos modes de consommation. Les besoins primaires sont en première ligne dans le changement des pratiques : l'alimentation, la production d'énergie, les transports mais aussi notre mode de logement. Pour ce dernier poste, les solutions constructives écologiques sont vouées à un bel avenir. Au titre de ressource renouvelable, la demande en bois de structure tend donc à augmenter.

Cela est, et pourrait l'être davantage, favorisé par des politiques environnementales porteuses telles que : des incitations à l'utilisation du bois en construction, un plan de rénovation énergétique, une rémunération de l'activité de stockage du carbone, …

De plus, la logique écologique favorise les circuits courts. Il s'agit d'un objectif de plus en plus répandu dans les choix des consommateurs. C'est pourquoi, valoriser le pin d'Alep local dans la région Sud pourra intéresser toujours plus de monde, jusqu'à aboutir à l'émergence d'un marché.

Cependant, fournir cette ressource de bois de construction implique forcément l'exploitation des forêts, encore mal perçue, en particulier dans la région Sud où la culture forestière est absente. Cette acceptation difficile des coupes doit être prise comme une opportunité pour favoriser les modes de gestion dynamiques aux rotations courtes, qui proscrivent les coupes très intenses. Or, ce sont également les plus adaptés au développement d'arbres de qualité bois d'œuvre dans les peuplements de pin d'Alep. Ainsi, ce qui peut paraître contradictoire à première vue, la mauvaise perception de l'exploitation forestière peut bénéficier à la construction d'une filière bois d'œuvre grâce à la sylviculture constituée d'éclaircies douces préconisée pour l'amélioration de la qualité.

Les solutions techniques pour la construction en pin d'Alep sont donc garanties par la norme et le contexte sociétal est favorable aux filières locales et durables telles que le serait celle du bois d'œuvre de pin d'Alep. Les conditions sont donc réunies pour permettre enfin l'utilisation de cette ressource à sa juste valeur. Pourtant, des blocages persistent.

2. Des freins persistants à lever

a. Un marché bois d'œuvre à créer : assurer la ressource, garantir les débouchés

Le marché de bois d'œuvre en pin d'Alep est quasi-inexistant. A cela, plusieurs causes :

- La rareté des unités de production dans l'aire de répartition du pin d'Alep : les bassins d'approvisionnement des scieries du sud-est de la France s'étendent à des zones peuplées d'autres essences sciables, qui sont alors préférées au pin d'Alep.
- Les autres débouchés, bois d'énergie et bois d'industrie, dont les prix sont maintenus assez élevés par une forte concurrence engendrée par des unités de production d'énergie et de papier de grande capacité, fournissent des recettes satisfaisantes. En effet, les propriétaires forestiers de la région se contentent de ces revenus, pourtant limités, car, par l'absence de culture forestière, les bénéfices de la forêt sont rarement considérés comme essentiels dans le budget d'une commune ou même d'un particulier.
- Un manque de confiance généralisé dans les capacités du pin d'Alep en structure : justifié par l'absence de certification jusqu'à peu, mais aussi en raison de l'état des peuplements de pin d'Alep. En effet, ils sont majoritairement composés d'arbres mal conformés, ce qui est peu engageant pour la fabrication de structure en bois.

Le discours souvent entendu auprès des divers acteurs de la filière est contradictoire, aboutissant à une impasse contre-productive : les professionnels de l'aval (premiers et seconds transformateurs) déplorent l'absence d'un approvisionnement fiable et qualitatif en pins d'Alep sciables. Tandis que les professionnels de l'amont (forestiers et exploitants) justifient la non mise en place d'opérations de valorisation des arbres à potentiel de bois d'œuvre par l'absence de débouchés.

Cela met en évidence la nécessité d'une plus grande concertation entre les différents maillons de la chaîne de valorisation du pin d'Alep pour se rendre compte que la création d'une filière rémunératrice pour tous est possible. La confiance mutuelle peut être favorisée par l'apport d'outils techniques qui

proposeraient des informations chiffrées objectives sur la ressource aux échelles globale et locale et sur les capacités mécaniques à l'échelle de la grume.

b. Une culture forestière encore limitée : d'autres enjeux prépondérants face à la valorisation du bois

« L'arbre qui brûle » est une image tenace qui colle au pin d'Alep. Lorsqu'il n'est pas purement et simplement éliminé au profit du feuillu, ce sont souvent des opérations de Défense des Forêts contre les Incendies (DFCI) qui s'imposent dans des zones où la sylviculture devrait être privilégiée. En effet, les mesures DFCI sont légitimes, et même indispensables, dans les secteurs dont c'est l'enjeu identifié (bande débroussaillée de sécurité, obligations légales de débroussaillements, zones de fréquentation exposées au risque incendie, par exemple) mais ne devraient pas avoir lieu dans des secteurs non appropriés, au détriment de la sylviculture. Cela est d'autant plus important que les opérations de DFCI ne favorisent pas le développement de la qualité au sein des peuplements.

Il est donc primordial de rétablir la dissociation entre les zones dédiées à la DFCI et celles dans lesquelles une gestion par éclaircies de faible intensité est possible sans faire courir un risque accru d'incendie.

Même en s'affranchissant de l'enjeu de DFCI là où nous le pouvons, la fonction de production des forêts du sud-est de la France reste très peu considérée par les propriétaires. Ils y voient avant tout un lieu de loisirs et de naturalité qui serait détérioré par une exploitation forestière. Cela est légitime si l'on entend par « exploitation » les coupes très intensives, à fort impact paysager, encore souvent pratiquées dans la région. Pour déconstruire l'idée reçue selon laquelle la gestion forestière « abime » la forêt, les exemples de sylviculture dynamique durable, qui existent mais restent confidentiels car moins percutants visuellement que les pratiques intensives, doivent être mis en valeur.

Ainsi, des opérations de communication autour des exploitations sylvicoles peu impactantes sur le paysage et respectueuses de la biodiversité participeraient du rétablissement de la fonction productive des forêts, indispensable pour mettre en place une filière de bois d'œuvre.

Cette brève description de l'état de la filière pin d'Alep s'est faite à la lumière des conclusions du projet étudiant AgroParisTech mené en amont de ce stage en décembre 2018 ***[ANNEXE I.1]***. Au cours de celui-ci, une identification précise des leviers et des blocages avait été réalisée par l'intermédiaire d'entretiens et d'ateliers d'échanges avec des acteurs de toute la filière, enrichis par une étude bibliographique.

A l'issue de ce projet, un plan d'action a été établi, proposant des solutions concrètes pour lever les freins identifiés et valoriser les leviers mis en évidence. La poursuite de ce travail trouve sa concrétisation dans ce stage de six mois au cours duquel certaines propositions ont commencé à être mises en œuvre.

3. Un stage pour proposer des solutions concrètes

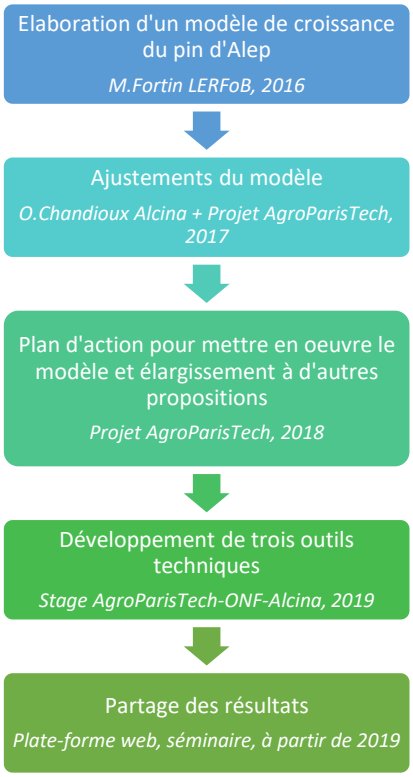
Ce stage s'inscrit dans un projet plus global, intitulé Développement d'Outils Partagés pour la sylviculture de pin d'Alep de qualité (DOPALEP), financé par le LabEx Arbre et porté par l'institut de recherche en écologie forestière UMR Silva en partenariat avec le bureau d'étude forestier Alcina

depuis 2016. Il est piloté par Eric Lacombe, enseignant à AgroParisTech et chercheur au Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB).

En 2019, l'Office National des Forêts a été associé au projet, en accueillant ce stage de six mois au sein du service forêt-bois de l'agence Bouches-du-Rhône – Vaucluse, basé à Avignon.

a. L'aboutissement du projet DOPALEP par la mise en œuvre d'actions ciblées

Cette étude est l'ultime étape des travaux de recherche débutés en 2016 par l'élaboration d'un modèle de croissance des pins d'Alep par Mathieu Fortin, sur la base d'une première version réalisée au sein de l'INRA en 2001 *(Dreyfus, 2001)*. Des phases de validation de ce modèle par confrontation avec des données de terrain recueillies auprès d'Alcina ont fait suite à ce travail, notamment dans le cadre d'un premier projet étudiant *(AgroParisTech, 2017)*.



Dans la continuité, les possibilités de valorisation de ces données théoriques ont été identifiées au cours d'un projet étudiant *(AgroParisTech, 2018).* En réalité, il en est ressorti un plan d'action beaucoup plus large que la seule application concrète du modèle de croissance, permettant la construction d'un sujet de stage de fin d'études de six mois. Pour celui-ci, trois actions proposées dans le rapport du projet ont été ciblées, elles ont fait l'objet des trois principales missions du stage.

De plus, le projet DOPALEP porte au cœur de ses objectifs celui du partage des conclusions et des productions qui en résultent. C'est dans cette optique qu'a été organisé le co-encadrement de ce stage.

b. Une cotutelle pour proposer des solutions globales et partagées

Le développement d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep est un projet global dont les parties prenantes appartiennent aussi bien aux secteurs public que privé. La ressource elle-même est partagée entre propriétés privées, forêts des collectivités et surfaces domaniales (dans une moindre mesure). Pour constituer un marché en partant d'un état initial quasiment nul, toutes les opérations de valorisation sont importantes et concourent au même objectif commun.

La mutualisation des ressources, des compétences techniques et des bonnes volontés ne peut que favoriser la réalisation de projets conséquents qui pourraient tenir le rôle de précurseurs à la mise en place d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep durable. Cette démarche requiert une transparence et une confiance mutuelle pour assurer un résultat valorisant pour tous les acteurs.

De plus, une uniformisation des pratiques et des référentiels de mesure du côté des forestiers participe à fiabiliser l'approvisionnement des transformateurs du bois.

C'est sur ces principes que les outils développés dans ce stage sont voués à être partagés. Leur développement aura été mené au sein de l'ONF, l'organisme d'accueil qui a fourni les moyens techniques, permis leur calibration avec les équipes de terrain et l'intégration d'une partie des

solutions proposées dans ses actions dès 2019. Le partenariat étroit avec Alcina, soutien technique de taille et fournisseur de données précieuses, permet de faire le lien avec le secteur privé.

c. Les actions ciblées : trois outils applicables à trois étapes distinctes

Les trois outils sélectionnés, pour lesquels ce stage doit permettre de passer de la théorie au concret, interviennent à trois échelles bien distinctes. Ils ont été choisis pour leur potentiel de facilitateurs à des étapes primordiales d'une chaîne vertueuse de valorisation des pins d'Alep.

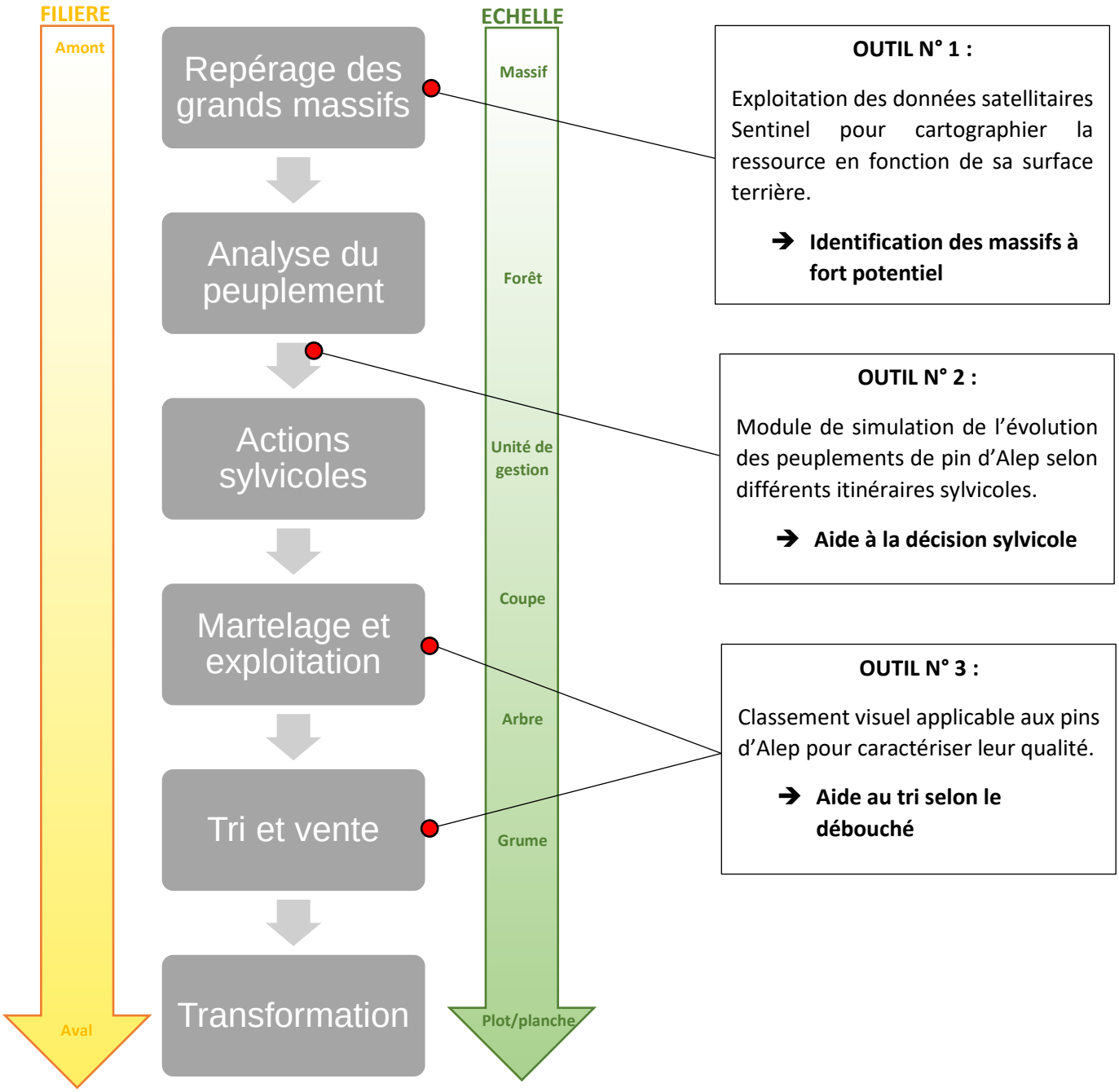


Figure I.1. : Positionnement des outils dans la chaîne de valorisation du pin d'Alep

II. Identifier la ressource à l'échelle du massif

1. Les enjeux : où se situent les massifs riches en pin d'Alep ?

La surface totale des peuplements et leur répartition géographique, ainsi qu'une estimation du volume total, sont des éléments connus sur le pin d'Alep. Nous savons que cette essence est en expansion et que les Bouches-du-Rhône, le Var et le Vaucluse en concentrent les trois quarts de la surface totale.

Toutefois, ces données sont estimées à l'échelle de l'aire de répartition du pin d'Alep mais ne rendent pas compte de la variabilité entre les massifs ni de la disponibilité de la ressource. Or, les peuplements sont hétérogènes en termes de densité et de surface terrière, et la topographie et le réseau de desserte limitent bien souvent la disponibilité du bois. Tout cela implique des niveaux d'enjeux variables.

Afin de caractériser le potentiel d'un massif et d'en déduire un niveau d'investissement pour la gestion forestière de production (comprenant la sylviculture et le développement de la desserte), il peut être utile de disposer d'un outil d'estimation de la ressource de pin d'Alep affiné à l'échelle de la forêt.

a. La connaissance actuelle de la ressource

(1) Des données précises sur la ressource totale

La ressource en pin d'Alep est en croissance constante depuis la fin du XIXème siècle. Les plantations pour la production de résine et la déprise agricole couplée au caractère pionnier de cette essence sont les principales raisons de sa spectaculaire expansion : de 40 000 hectares en 1878, la surface de pin d'Alep est passée à 235 000 hectares actuellement, ce qui représente plus de 14 millions de mètres cube sur pied. *(Chandioux, 2015)* ***[ANNEXE II.1]***

La production annuelle de pin d'Alep s'évalue à environ 550 000 m^3/an parmi lesquels 280 000 m^3/an sont disponibles à la récolte. Les projections jusqu'en 2040 laissent présager une poursuite de l'expansion du pin d'Alep portant le volume récoltable à 442 000 m^3/an sur la période 2036-2040, à moins que cette augmentation soit minorée par des contraintes climatiques de plus en plus sévères.

(2) Des données partielles sur la ressource par massif

Les proportions en surface par département et les grands massifs sont identifiés : les Alpilles, le versant sud du Luberon, la montagne Sainte-Victoire, le parc national des Calanques, le haut-Var, les contreforts Est du pic Saint-Loup, pour n'en citer que quelques-uns.

En forêt publique et dans les rares propriétés privées disposant d'un plan de gestion, il existe des données précises de densité, de volume et de surface terrière grâce au travail des acteurs de la gestion forestière. Mais, cette part de peuplements de pin d'Alep caractérisés finement est faible par rapport à la surface totale de la ressource. Plusieurs raisons expliquent ces lacunes :

- Près de 90 % de la surface de pin d'Alep disponible se trouve en forêt privée où les documents de gestion sont rares
- Les forêts de pin d'Alep sont pour la plupart jeunes, dépourvues d'un historique de gestion
- En dehors des données de l'Inventaire Forestier National, peu précises à l'échelle locale, il n'existe pas de dispositif de suivi des peuplements de pin d'Alep
- Beaucoup de forêts de pin d'Alep sont inaccessibles du fait de la topographie ou de l'absence de desserte, rendant la collecte de données impossible

La plupart de ces causes expliquent également la sous-exploitation ou la « mal-exploitation » des peuplements de pin d'Alep.

b. Une ressource sous -ou mal- exploitée

(1) Une récolte très inférieure à la production

Il est souvent dit à propos du pin d'Alep que la ressource est largement sous-exploitée. Les estimations varient du simple au double selon les sources, mais toutes s'accordent à dire que la récolte est inférieure à 200 000 mètres cube chaque année soit un tiers de moins que la production annuelle disponible.

Une question se pose alors : qu'entend-on par ressource « disponible » ?

Il semblerait qu'un peuplement de pin d'Alep soit considéré disponible dès lors que les conditions physiques (topographie et desserte) le rendent accessible et qu'il ne soit pas sous le coup d'une interdiction d'exploitation due à un classement spécifique (patrimoine naturel ou historique protégé). Il reste alors effectivement une surface très importante de peuplements de pin d'Alep n'ayant aucun de ces obstacles à l'exploitation.

Pour quelles raisons ne sont-elles pas exploitées ?

Une part importante de ces forêts « disponibles » sont de très petites propriétés privées non gérées. Cette absence de document de gestion peut s'expliquer par différents facteurs liés au propriétaire : son ignorance du fait qu'il possède une parcelle forestière, sa méconnaissance des solutions de gestion possibles, sa volonté de maintenir une évolution naturelle ou simplement son désintérêt pour sa forêt.

La notion de disponibilité est donc très liée à l'action sylvicole en forêt privée, par les propriétaires eux-mêmes et par les conseillers qui peuvent favoriser leur regroupement pour augmenter le champ d'actions possibles. Pour cibler les zones d'animation sylvicole prioritaires, l'outil de cartographie précise de la ressource peut être un élément utile. Il tiendra le rôle d'argumentaire chiffré pour convaincre les propriétaires de forêts à fort potentiel d'agir dans le sens d'une gestion durable et d'amélioration de la qualité.

(2) Une exploitation localement intensive

A l'inverse, il existe des exemples de forêts de pin d'Alep exploitées de façon très intensive entretenant une image négative de l'exploitation forestière, particulièrement ancrée dans la région. Ces pratiques sont répandues pour le pin d'Alep car la qualité des peuplements est rarement considérée dans les choix d'opérations sylvicoles. Or, c'est l'objectif d'amélioration de la qualité qui dicte des itinéraires aux éclaircies douces. A l'heure actuelle, la quasi-absence de valorisation des pins d'Alep en bois d'œuvre et les recettes limitées que procurent les autres débouchés (bois d'industrie, bois énergie) expliquent la poursuite de pratiques sylvicoles basiques et intensives dans certaines forêts, mettant parfois à mal des potentiels de valorisation supérieurs, voire la survie du peuplement.

Il est donc bien possible d'exploiter plus mais cela ne doit se faire sans une répartition judicieuse des prélèvements, réfléchie en fonction du niveau de ressource et du potentiel à évaluer localement.

Mieux ajuster l'exploitation du pin d'Alep à sa disponibilité réelle dans chaque massif et au potentiel de chaque peuplement passe alors nécessairement par une amélioration de la connaissance de la ressource à l'échelle de la forêt. C'est à ce besoin que peut répondre l'outil informatique d'estimation des surfaces terrières dans les peuplements de pin d'Alep.

2. La construction de l'outil : calibration d'un modèle à partir des données satellites Sentinel

Pour répondre à l'enjeu de caractérisation précise de la ressource à l'échelle du massif, l'utilisation des technologies les plus récentes devrait être le moyen le plus efficace. C'est la raison pour laquelle, l'idée d'exploiter les données satellitaires Sentinel a émergé. L'analyse du potentiel de ce type d'images menée en décembre 2018 au sein du projet étudiant « pin d'Alep » a confirmé la pertinence du développement d'un outil permettant de les traiter. *(AgroParisTech, 2018)*

a. Le principe général : les grandes étapes de l'élaboration

La stratégie globale pour l'exploitation des données Sentinel consiste à mettre en lien des informations mesurées sur le terrain avec des grandeurs acquises sur les images satellites. L'analyse quantitative de ce lien, devrait permettre d'obtenir des prédictions de données dendrométriques réelles, en l'occurrence la surface terrière, par seule combinaison d'informations satellitaires. Pour parvenir à ce résultat, les grandes étapes de la construction de l'outil sont :

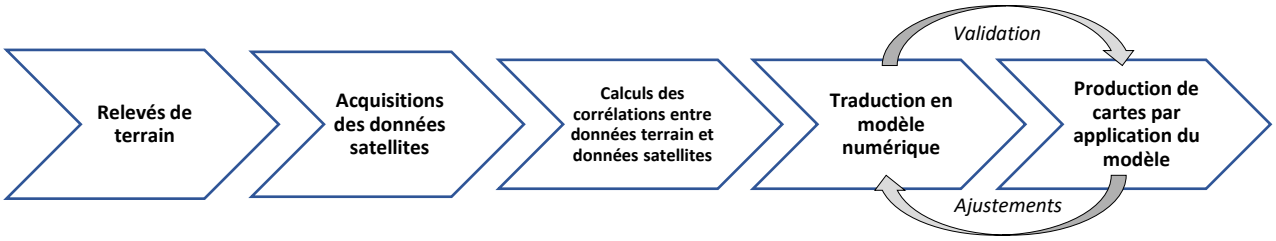


Figure II.1. : Les étapes de la construction de l'outil Sentinel

b. La source : descriptif des données Sentinel

Les données Sentinel sont des images multi-spectrales à haute résolution acquises par une série de satellites d'observation de la Terre lancés en 2015 par l'Agence spatiale européenne. Elles ont pour objectifs de caractériser la couverture des sols et leurs utilisations, et d'en acquérir une vision dynamique en rendant compte de l'évolution de variables géophysiques dans le temps. La fréquence des acquisitions permet d'envisager des utilisations dans le cadre de la gestion des risques : cartes évolutives et prises d'informations rapides pour les secours sur les lieux de catastrophes.

La technique de télédétection produisant ces images se base sur l'interaction entre l'énergie électromagnétique émise par le soleil et les éléments présents à la surface de la Terre. En fonction de la nature de l'objet physique rencontré, les phénomènes de réflexion, d'absorption et de transmission de cette énergie diffèrent. Il en résulte une « signature spectrale » spécifique à chaque élément calculée dans différents domaines de longueur d'onde du spectre électromagnétique.

Les données se présentent sous la forme de treize couches de valeurs, correspondant à treize bandes spectrales caractérisées par leur longueur d'onde centrale, leur largeur et leur résolution spatiale :

Identifiant de la bande	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	Résolution spatiale (m)
1	442,3	45	60
2	492,1	98	10
3	559	46	10
4	665	39	10
5	703,8	20	20
6	739,1	18	20
7	779,7	28	20
8	833	133	10
8A	864	32	20
9	943,2	27	60
10	1376,9	76	60
11	1610,4	141	20
12	2185,7	238	20

Tableau II.1. : Description des bandes Sentinel

Elles sont acquises sur des emprises carrées de 100 kilomètres de côté, que l'on nomme « Dalle ». Pour couvrir l'ensemble de l'aire de répartition du pin d'Alep, il est nécessaire de traiter huit types de dalles Sentinel. ***[ANNEXE II.2]***

Dans la suite de ce rapport, nous appellerons « Dalle » la combinaison d'une date d'acquisition et d'un type de dalle.

Les données Sentinel permettent donc la distinction entre différents objets terrestres par l'analyse de la signature spectrale acquise en un point donné, qui varie selon la nature de l'élément pointé. Au-delà de la valeur même de cette information intéressante, ce sont d'autres caractéristiques des images satellitaires Sentinel qui rendent le potentiel de cette banque de données particulièrement fort.

c. Exploiter les avantages de ce type de données

(1) Une mise à jour continue des données

De nouvelles images Sentinel sont acquises tous les cinq jours. L'évolution de l'occupation des sols et de l'état de la végétation peut donc être suivie quasiment en temps réel.

A l'échelle du temps forestier, sauf action sylvicole majeure ou bouleversement naturel de grande ampleur (incendie, tempête, maladie, ravageur, etc.), on peut considérer que les données dendrométriques recueillies sur une période inférieure à trois ans dans un même peuplement sont presque constantes. Cela est d'autant plus proche de la réalité que l'essence étudiée est peu productive. Dans le contexte stationnel qui est le sien, le pin d'Alep, avec une vitesse de croissance assez limitée, de l'ordre de 2 à 3 m^3 par hectare et par an en moyenne, fait partie de ces espèces pour lesquelles la variation de surface terrière en trois ans est faible.

Nous avons donc considéré que la surface terrière détectée sur les dalles Sentinel les plus anciennes (fin 2016) est la même que celle calculée au début de 2019. Ce postulat a permis de constituer une base de données conséquente comprenant autant de dalles qu'il y a eu d'acquisitions depuis novembre 2016. Les incertitudes liées à la variation effective de surface terrière en trois ans (4 m^2/ha maximum) sont estimées moins influentes que les bénéfices obtenus pour calibrer le modèle grâce à l'augmentation du jeu de données qu'a permis cette hypothèse.

Ce postulat est pertinent pour la calibration du modèle, mais une fois celui-ci établi, il conviendra de l'appliquer aux acquisitions les plus récentes et de proposer une mise à jour régulière (tous les deux

ans par exemple) de la carte des peuplements, qui rendra compte notamment des variations majeures liées à des opérations sylvicoles ou des bouleversements naturels.

La fréquence des acquisitions Sentinel est donc valorisée de deux manières au sein de cet outil :

- Pour constituer un jeu de données important qui a permis la calibration du modèle
- Pour permettre la mise à jour régulière de la carte des peuplements, une fois le modèle calibré

(2) Une couverture géographique complète

Un avantage majeur des données Sentinel tient à la surface couverte par les images satellitaires : toutes les terres et les zones côtières entre les latitudes 56° Sud et 86° Nord sont traitées.

Cela a permis une calibration du modèle à large échelle, sans limite géographique autre que les temps de déplacement, permettant d'éviter les effets qui pourraient être liés à des particularités locales. En effet, pour l'élaboration de l'outil, des données de terrain ont été collectées sur une vaste zone s'étendant de Saint-Rémy-de-Provence (13) à Gréoux-les-Bains (04) d'ouest en est, et d'Orgon (13) à Gardanne (13) du nord au sud.

Par ailleurs, ce modèle pourra être appliqué à l'avenir dans tous les peuplements de pin d'Alep quelle que soit l'évolution de son aire de répartition : si, comme le prédisent les climatologues, le changement climatique amenait à étendre la distribution de cette essence vers le nord, la couverture géographique des images satellitaires Sentinel ne limiterait pas l'utilisation de l'outil.

(3) Une mise à disposition gratuite et pratique

Le coût d'acquisition des données, en argent et en effort, ne peut être un frein à l'exploitation des images Sentinel. En effet, elles sont téléchargeables gratuitement sur la plateforme Glovis de l'USGS (*United States Geological Survey*). Cette plateforme ergonomique propose une visualisation des images et offre la possibilité de sélectionner les dalles selon des critères précis, rendant l'acquisition des données pratique et assez rapide. D'autres plateformes (Theia du CNES, notamment) donnent accès aux images Sentinel dans des conditions similaires.

La constitution d'un jeu de données important, mis à jour et couvrant n'importe quelle zone géographique est donc facilement réalisable avec les images satellitaires Sentinel offrant des avantages largement exploités pour l'élaboration et l'utilisation de l'outil de cartographie de la ressource de pin d'Alep. Ces mêmes atouts peuvent entrainer certains inconvénients auxquels il a fallu être attentif pour éviter leur impact négatif dans la calibration du modèle.

d. Parer aux inconvénients de ce type de données

(1) Les interférences avec la couverture nuageuse

Les images satellitaires Sentinel sont acquises tous les cinq jours, quelle que soit la météo. La présence de nuages altère fortement la perception des longueurs d'onde renvoyées par les objets terrestres. Les données recueillies par temps nuageux doivent donc être exclues de l'étude pour éviter d'utiliser des valeurs faussées dans la recherche du modèle.

Parmi les critères de sélection proposés sur la plateforme Glovis, il est possible d'indiquer un niveau de couverture nuageuse toléré. La grande quantité d'acquisitions disponibles depuis 2016 et le faible nombre de jours de mauvais temps qu'offre le climat méditerranéen ont permis d'être exigeant sur le taux de nuages accepté tout en maintenant un jeu d'images important. Ainsi, le niveau maximum toléré a été fixé à 5 %.

Suite à ce premier tri réalisé par le moteur de recherche de la plateforme, la visualisation des dalles a permis d'exclure encore certaines images. En effet, les jours où la couverture nuageuse approchait des 5 % donnaient lieu à deux types de configurations :

- Les nuages sont diffus sur toute l'étendue de la dalle, provoquant un très léger voile qui altère sans doute peu les niveaux de longueur d'onde recueillis par les satellites : les images ont été conservées.
- Les nuages sont concentrés sur certaines zones, altérant certainement les données recueillies localement : ces images ont été exclues.

(2) Les effets du rayonnement solaire selon le relief

En décembre 2018, lors des premiers travaux de calibration du modèle *(AgroParisTech, 2018)*, nous avons mis en évidence une influence du rayonnement – hors couverture nuageuse - non négligeable sur les niveaux de longueur d'onde recueillis en un point donné. Cela était particulièrement visible en comparant les résultats obtenus sur les versants nord et sud d'un même massif forestier dans lequel les surfaces terrières sont assez homogènes. Cet effet de versant est une conséquence directe de taux d'éclairement solaire différents.

Pour gommer cet effet, deux dispositions ont été prises :

- Limiter l'influence des saisons sur le taux de rayonnement direct : les images retenues ont été acquises exclusivement en période hivernale, de novembre à mars.
- Limiter l'influence de la position géographique de la placette sur le niveau d'ensoleillement (lié à la topographie, la latitude, le confinement) : le taux de rayonnement solaire total (direct, diffus et réfléchi), hors nuages, a été calculé sur l'ensemble de la zone d'étude, à chacune des dates et des heures d'acquisitions des dalles, à la résolution de 10 mètres. *(Fonction r.sun du SIG Grass)*

La première mesure a permis d'éviter des écarts d'éclairement trop élevés liés à la différence importante du rayon d'incidence du soleil entre l'été et l'hiver.

La seconde a permis d'obtenir une valeur géolocalisée du taux de rayonnement pour chaque placette de calibration. La question était de savoir comment ce nouveau facteur devait intervenir dans l'élaboration du modèle : une nouvelle variable à ajouter à celles calculées directement sur les données Sentinel ? Une variable à part, intervenant comme un facteur correctif appliqué préalablement au traitement des données Sentinel ?

Tester l'influence du rayonnement au même titre que les 37 indices calculés sur les dalles Sentinel ne semblait pas pertinent pour deux raisons :

- Face à l'abondance des autres indices, potentiellement plus significatifs, il y avait un risque que l'effet du rayonnement ne soit pas retenu dans le modèle et la variable exclue d'office.
- L'influence du rayonnement est probablement variable en fonction de la position géographique des placettes : par exemple, un point situé dans un lieu confiné, alternant périodes ombragées et ensoleillées est bien plus sujet à des variations liées au rayonnement, qu'un point sur un versant plat, toujours éclairé. Il fallait donc traiter l'influence du rayonnement placette par placette.

Pour chacune des données recueillies sur toutes les dalles (les 8 bandes retenues) et pour chaque placette, les valeurs ont été analysées en fonction du taux de rayonnement calculé. Sans influence de

la radiation, elles devraient être constantes en un point donné quelle que soit la date d'acquisition des images. C'est ce qui a été observé sur les bandes 3, 4 et 5 : les valeurs forment une droite horizontale.

Sur les autres bandes, le rayonnement a tendance à augmenter ou diminuer leur valeur, de façon linéaire, à des niveaux plus ou moins forts selon les placettes. Lorsque l'influence du rayonnement a été jugée significative ($R^2 > 0,6$), une correction a été appliquée sur la placette concernée, déterminée par régression linéaire entre la valeur de la bande et le rayonnement :

Régression linéaire : $B = a \times RAD + b$

Formule de la correction : $B_{i\,corr} = B_{i\,brut} - 0,5 \times a_i \times RAD_i$

Avec :
$B_{i\,corr}$: valeur corrigée de la bande B sur la placette i
$B_{i\,brut}$: valeur initiale de la bande B sur la placette i
a_i : pente de la régression linéaire pour la placette i
RAD_i : valeur du rayonnement sur la placette i

Le facteur 0,5 permet de ramener la valeur à un niveau proche de celui relevé à un taux de rayonnement intermédiaire (et non au plus faible)

Sur l'ensemble des 7 bandes pour lesquelles des corrélations ont été mises en évidence, environ un quart des points ont été corrigés.

N° de la bande	2	6	7	8	11	12	8A
Part de placettes corrigées	47 %	14 %	16 %	16 %	32 %	37 %	17 %

Tableau II.2. : Proportion de placettes corrigées du rayonnement pour chaque bande

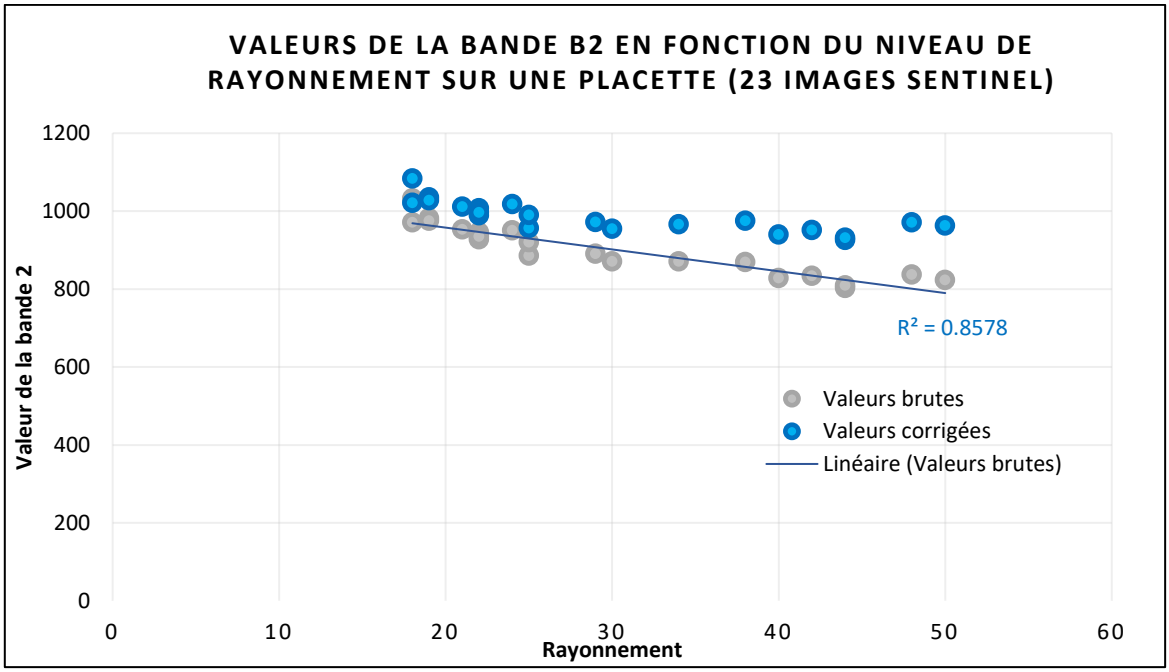


Figure II.2. : Valeurs de la bande 2 brutes et corrigées selon le rayonnement

Le rayonnement n'a donc pas été introduit comme une variable supplémentaire dans le modèle ou comme un facteur correctif systématique appliqué à l'ensemble des placettes. Il est intervenu en amont de la calibration du modèle, sur des points particuliers où son influence a été démontrée et quantifiée.

(3) Une possible hétérogénéité entre les dalles

Malgré les précautions prises permettant de supposer des données uniformes entre chaque dalle (restriction à la période hivernale et à une couverture nuageuse de moins de 5 % et correction de l'effet de rayonnement), il est possible que des différences non négligeables entre chaque image persistent. Ce serait dommageable car cela annulerait deux des intérêts fort de Sentinel : un grand nombre d'acquisitions permettant de constituer une base de données conséquente et la reproductibilité du modèle sur n'importe quelle image acquise entre novembre et mars. Toutefois, ce risque est à prendre en compte. C'est pourquoi, nous avons testé la calibration du modèle sur l'ensemble des dalles dans un premier temps, puis, celui-ci n'ayant pas donné entière satisfaction, nous avons cherché un meilleur résultat en restreignant l'analyse à des images acquises à des dates proches.

e. La constitution de la base de données

Le principe général de l'élaboration du modèle consiste à confronter des données de surface terrière évaluées sur le terrain (variable à expliquer) et des indices calculés à partir des données recueillies par les satellites Sentinel (variables explicatives).

Sur le terrain, des placettes de calibration ont été réalisées : elles comportent une information ponctuelle et géolocalisée de surface terrière. Elles sont réparties sur l'emprise géographique des deux dalles Sentinel qui couvrent une grande partie des forêts de l'agence ONF 13-84 et de celles gérées par Alcina : Aix-en-Provence se situe sur la limite, la dalle T31TGJ s'étend à l'est jusqu'à Grasse et la dalle T31TFJ à l'ouest jusqu'à Nîmes. ***[ANNEXE II.3]*** De ces images satellitaires, ont été extraites les données sur les points géolocalisés des placettes de calibration. Ces valeurs brutes, au nombre de treize par point correspondant aux treize bandes spectrales mesurées par le satellite, ont été combinées pour calculer des indices qui caractérisent l'état de la végétation à partir de l'image qu'elle renvoie.

Le programme développé sur le logiciel R a permis de mettre en lien ces indices et les valeurs de surface terrière mesurées sur le terrain, dans le but d'établir un modèle statistique indiquant le capital sur pied d'un peuplement de pin d'Alep de façon fiable par la seule extraction des données Sentinel.

(1) La constitution du jeu de données de terrain

Les critères de sélection des zones de collecte de données étaient les suivants :

- Des forêts ayant pour essence principale le pin d'Alep. Au risque de rendre la calibration du modèle plus complexe, mais pour coller à la réalité de la majorité des peuplements de pin d'Alep, il a été choisi de ne pas restreindre l'étude aux forêts pures : un sous-étage de chênes était toléré. Ce choix a été réfléchi notamment en considérant la nette différence de couleur de feuillage entre les pins d'Alep et les feuillus qui diminue de fait le risque de confusion lors du traitement des données Sentinel.
- Des forêts au stade de petits bois minimum (diamètre dominant d'au moins 17,5 cm).
- Des forêts n'ayant pas subi de changement majeur de leur capital depuis 2016, année des premières acquisitions Sentinel étudiées : pas d'opération sylvicole, pas de bouleversement naturel (incendie, maladie, tempête, …).
- Des forêts de structures, de densités et de topographies diversifiées.
- Des forêts facilement accessibles et de taille suffisante garantissant un bon rapport entre la quantité de données collectées et le temps d'approche et de cheminement.

Plusieurs peuplements ont ainsi été sélectionnés couvrant une vaste partie des deux dalles de manière à obtenir un jeu de données représentatif de l'ensemble de leur emprise. Un maillage systématique

de placettes a été réalisé. Nous nous sommes rendus sur chaque point à l'aide d'un GPS qui indiquait une position théorique de chaque placette. Cette position n'a pas servi de référence dans le traitement des données Sentinel, elle a simplement permis une bonne répartition des relevés de terrain et d'éviter les « effets opérateur » dans le choix des emplacements des placettes. Elle a été remplacée par l'acquisition de coordonnées GPS par un instrument fiable (GPS BadElf GNSS Serveyor ou Garmin GPSmap 64s) après chaque relevé de terrain.

La nature des relevés était extrêmement simple : une information ponctuelle de surface terrière, précisément géolocalisée.

Deux campagnes de terrain ont été réalisées :

- En décembre 2018, dans les forêts communales de Saint-Rémy-de-Provence, des Baux-de-Provence et de Cabriès : 133 placettes, sur la dalle T31TFJ
- En juillet 2019, dans les forêts communales de Cabrières d'Aigues, de la Bastide-des-Jourdans et de Peyrolles-en-Provence : 115 placettes, sur la dalle T31TGJ

Le jeu de données a été enrichi par des relevés fournis par Alcina : 105 points géolocalisés dans des forêts de pin d'Alep comportant une information de surface terrière relevée après 2015. Ils se situent majoritairement sur la dalle T31TGJ.

Garantir une diversité de type de peuplements pour calibrer le modèle sur un échantillon représentatif de la réalité des forêts de la région *: en décembre 2018, nous avions privilégié les densités assez élevées (surface terrière toujours supérieure à 10 m^2/ha). Au cours de la campagne 2019, la part de forêts très claires a donc été plus importante pour rééquilibrer le jeu de données.*

Au total, ce sont 353 placettes qui ont été analysées pour la calibration du modèle, réparties sur une surface de peuplements d'environ 300 hectares.

(2) L'acquisition des données Sentinel

Pour les raisons expliquées précédemment *(partie II.2.d.)* et rappelées succinctement ici, les images satellites sélectionnées sur la plateforme Glovis devaient correspondre aux critères suivants :

- Acquisitions entre le 1er novembre et le 31 mars : pour limiter les effets de rayonnement et accentuer la différence de feuillage entre les pins d'Alep et les feuillus à feuilles caduques ou marcescentes
- Taux de couverture nuageuse inférieur à 5 % : pour éviter les interférences avec la couche atmosphérique

A ces critères sélectifs se sont ajoutées des contraintes techniques : certains dossiers de données étaient incomplets et certains téléchargements ont échoué. Mais ce sont tout de même 39 dalles (23 de type T31TGJ et 16 de type T31TFJ) qui ont été obtenues et traitées pour calibrer le modèle.

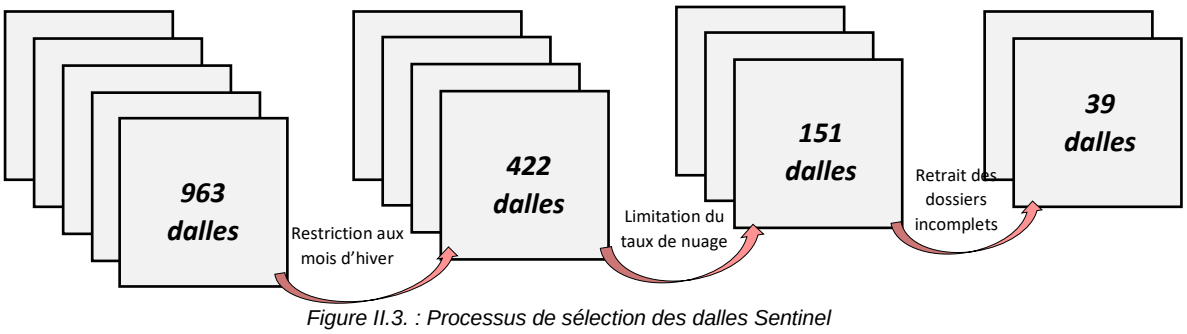


Figure II.3. : Processus de sélection des dalles Sentinel

(3) La constitution du tableau de référence pour la calibration du modèle

L'élaboration d'un tableau de variables facilement exploitable pour la calibration d'un modèle statistique a fait l'objet d'un programme de traitement des données Sentinel et d'association avec les relevés de terrain développé sur le logiciel R.

(1) Extraction ponctuelle des valeurs des bandes spectrales sur chacune des 353 placettes. Opération réalisée pour toutes les dalles, soit 39 fois.
(2) Harmonisation de la résolution des bandes spectrales : ramenée à 10 mètres pour toutes.
(3) Calcul du rayonnement sur la zone d'étude et pour chaque date et heure d'acquisition des 39 dalles.
(4) Extraction ponctuelle des données de rayonnement sur chaque placette et analyse de son influence sur les valeurs des bandes spectrales.
(5) Correction de l'effet du rayonnement sur les placettes et les bandes où il s'est révélé significatif.
(6) Calcul des 37 indices de végétation sur chaque placette : 16 ou 23 valeurs pour chaque indice correspondant au nombre de dalles* analysées par placettes, rassemblées en une unique valeur par la moyenne.
(7) Elaboration d'un tableau par indice comprenant : l'identifiant de la placette, la surface terrière et la valeur de l'indice.
(8) Visualisation de l'influence de chaque indice : affichage d'un graphique montrant la valeur de l'indice en fonction de la surface terrière.
(9) Retrait des placettes aberrantes** : élimination de 22 points ramenant à 331 le jeu de données.
(10) Retrait des indices clairement non significatifs** : élimination de 14 indices ramenant leur nombre à 23.
(11) Compilation dans un tableau unique : les 331 surfaces terrières retenues et les valeurs des 23 indices choisis correspondantes.

Le tableau de données obtenu qui servira de base à l'élaboration du modèle comporte donc l'ensemble des surfaces terrières associées aux indices Sentinel calculés précisément sur l'emplacement de la placette. Les valeurs retenues ont été corrigées de l'effet du rayonnement et les placettes erronées ont été retirées. Les indices contenus dans ce tableau sont supposés significatifs car ceux qui ne l'étaient clairement pas ont été éliminés.

> ***Nombre de dalles traitées :***
> *La première option, supposée la plus prometteuse, a été de traiter l'ensemble des dalles acquises, en moyennant les valeurs obtenues sur chacune. En augmentant la quantité de données, on s'octroyait plus de chances d'obtenir un modèle fiable. C'était sans compter sur la possible hétérogénéité entre les dalles… Des calibrations du modèle ont donc aussi été testées sur un nombre restreint de dalles, acquises à des dates proches.*

****Méthodologie pour procéder au retrait des valeurs aberrantes et des indices non significatifs :***

Certains graphiques montraient à l'évidence que la surface terrière n'avait pas d'influence sur la valeur de l'indice : nuage de points complètement dispersés ou droite parfaitement horizontale. Il a été choisi de les retirer directement du tableau de référence pour éviter des traitements inutiles par les algorithmes de recherche du modèle qui auraient abouti de toute façon à leur élimination.

Toutefois, les indices constants (droites horizontales sur les graphiques) ont été utiles à l'identification de placettes aberrantes. En effet, alors que toutes les valeurs étaient quasiment identiques sur 94 % des placettes, elles différaient fortement pour 22 points. Les identifiants des placettes concernées ont été relevés et la visualisation d'autres graphiques ont confirmé les anomalies. Pour en comprendre la cause, les emplacements de ces placettes ont été positionnés sur un SIG et croisés avec une orthophotographie : il s'est révélé que ce sont principalement des points de relevés pris en bordure de peuplement et dont la géolocalisation a été prise sur des routes ou des bâtiments à proximité. Ces erreurs sont dues à l'imprécision du GPS utilisé lors de la campagne de terrain de juillet (Garmin GPSmap 64s). La raison des anomalies clairement identifiée, les placettes concernées ont pu légitimement être retirées de l'analyse.

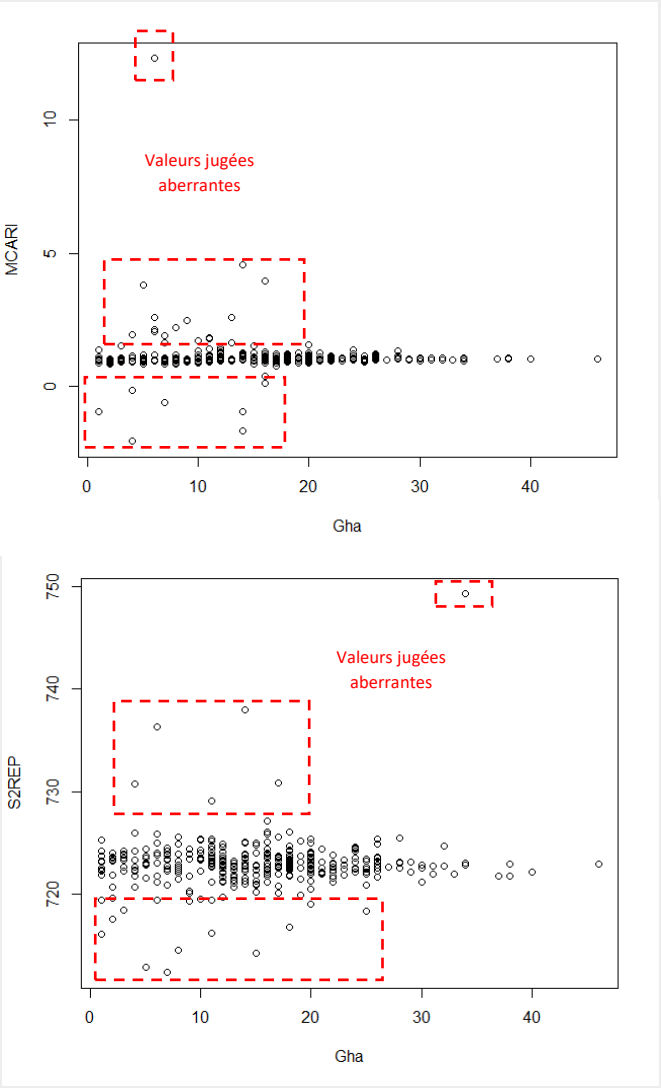


Figure II.4. : Graphiques permettant l'identification des valeurs aberrantes de surfaces terrières selon celles d'indices constants

f. L'élaboration du modèle

La visualisation des valeurs des indices de végétation en fonction de la surface terrière laisse supposer que certaines variables ont une influence linéaire tandis que d'autres ont un effet non linéaire (on observe des courbes de type logarithmique). Il convient donc d'envisager deux sortes de modèles dont les variables explicatives ne seront pas les mêmes. L'allure des représentations graphiques permet d'attribuer chaque indice au type de modèle pour lequel il est susceptible d'être significatif (certains le sont potentiellement pour les deux) :

Modèle linéaire	Modèle non linéaire	Supposé non significatif
ARI1, AVI, CHLREDEDGE, EVI2, GI, GNDVI, IRECI, MNDWI, MSI, NBRraw, NDBI, NDI45, NDII, NDVI, NDVI705, NDVIgreen, PNDVI, PSRI, PSRINRI, RENDWI, SAVI, SR, MSAVI2	ARI1, EVI2, GI, GNDVI, MSAVI2, NDI45, NDVI, NDVIgreen, SAVI, SR	ARI2, ARVI, BAI, BI, CCCI, CRI2, CRI1, EVI, GRVI1, MCARI, MTCI, NDWI, RedEdgeNDVI, S2REP
Effectif : 23	*Effectif : 10*	*Effectif : 14*

Tableau II.3. : Répartition des indices selon le comportement observé en fonction de la surface terrière

(1) Le choix du type de modèle

Avant d'envisager la calibration d'un modèle, il convient de vérifier que les hypothèses de base pour l'analyse par régression sont vérifiées sur le jeu de données d'entrée. Quatre des six hypothèses sont validées avec certitude. Des réserves sont émises concernant la variance constante et la distribution normale des valeurs autour de la courbe d'équation de régression. En effet, en projetant un hypothétique modèle linéaire sur certains indices Sentinel retenus, la distribution ne semble pas normale pour des valeurs de surfaces terrières élevées. A l'inverse, dans le cas d'une régression non linéaire, elle est normale uniquement pour les surfaces terrières élevées et cela s'observe sur tous les indices conservés pour ce type de modèle. La constance des variances semble avoir le même comportement.

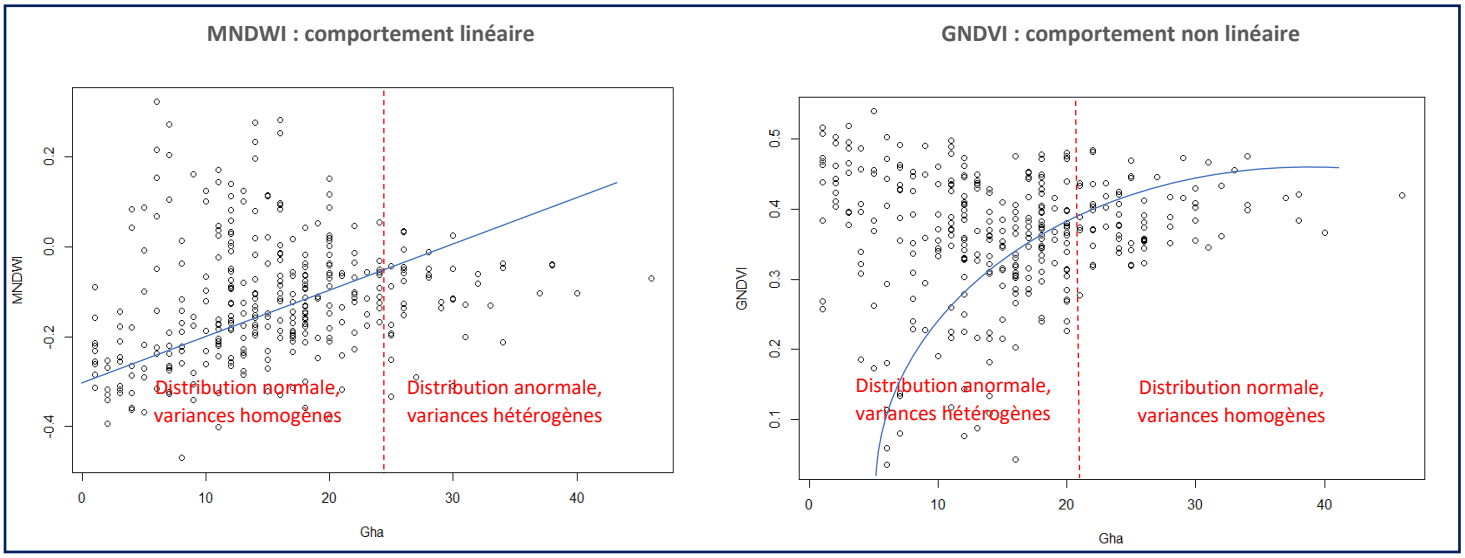


Figure II.5. : Exemples de deux comportements différents des valeurs de surfaces terrières en fonction de deux indices Sentinel

Dans la mesure où ces doutes sur les hypothèses de départ ne concernent qu'une petite partie des valeurs de la variable à expliquer, sur quelques indices retenus seulement, dans le cas d'une régression linéaire, la calibration d'un tel modèle peut être envisagée. Mais il faudra considérer ces réserves à l'étape de l'analyse des résultats.

En revanche, les présomptions de non vérification des hypothèses de départ concernent trop de points et d'indices dans le cas du modèle non linéaire pour pouvoir envisager d'élaborer un modèle de ce type.

Parmi les différents types de modèles linéaires, la sélection s'est effectuée en cohérence avec la nature des paramètres de notre base de données : la variable prédictive est numérique et continue, tous les indices de végétation sont non binaires et non de type comptage. Nos variables sont donc incompatibles avec les modèles linéaires généralisés (GLM) mais peuvent convenir aux modèles linéaires classiques.

(2) Le choix de la méthode d'évaluation du meilleur modèle

Avec 23 variables potentiellement significatives, appliquer la méthode exhaustive pour rechercher le meilleur modèle n'était pas envisageable. En effet, cette technique consiste à régresser tous les modèles qu'il est possible d'élaborer par combinaison des variables et exige donc qu'il y ait peu de paramètres pour conserver un volume de calcul acceptable.

Il a alors été choisi de procéder pas-à-pas, en progressant grâce au critère d'information d'Akaike (AIC). Cet indicateur évalue la qualité d'un modèle en fonction de sa précision mais aussi de sa complexité en étudiant les paramètres suivants : la somme des carrés des résidus (SCR) et le nombre de variables explicatives. Il permet ainsi d'optimiser le rapport entre un bon ajustement et le nombre de paramètres qui composent le modèle. Il doit être le plus faible possible.

En pratique, la technique a consisté à tester un grand nombre de modèles d'affilée dont les variables étaient choisies en fonction du résultat qu'avait donné le précédent : si le niveau de l'AIC est meilleur que celui du précédent (c'est-à-dire inférieur) alors les variables sont retenues pour le suivant. A l'inverse, si l'AIC est moins bon, la dernière modification de variables (ajout ou retrait) est annulée et on conserve le modèle précédent. Ce processus s'effectue :

- Soit en partant du modèle le plus simple possible (une variable) : **méthode ascendante** par ajout de variables unes à unes jusqu'à ce que le modèle obtenu soit moins bon que le précédent ;
- soit en partant du modèle le plus complexe possible (toutes les variables) : **méthode descendante** par élimination de variables unes à unes jusqu'à ce que le modèle obtenu soit moins bon que le précédent ;
- soit en permettant l'ajout et le retrait de variables depuis un modèle intermédiaire **: méthode *stepwise*** qui mélange ajout et suppression de variables.

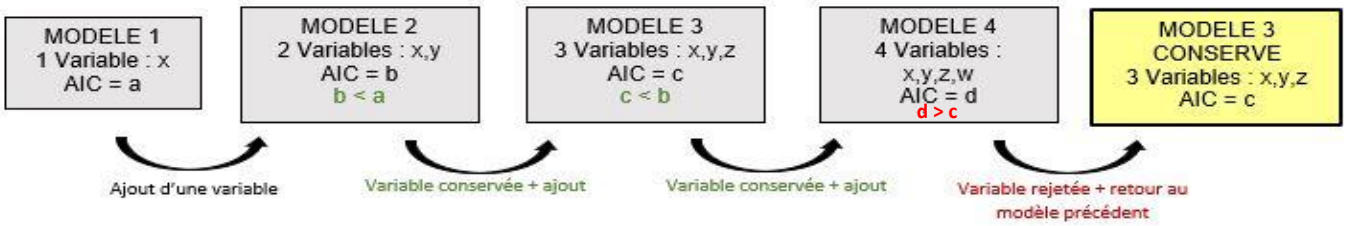


Figure II.6. : Processus de sélection d'un modèle selon le critère d'Akaike, exemple de la méthode ascendante

Cette opération a été réitérée 1000 fois, selon les trois méthodes, pour chaque jeu de variables sélectionné en entrée. Parmi les 3000 résultats obtenus, les cinq meilleurs ont été analysés et éventuellement conservés s'ils étaient satisfaisants. Plus d'une cinquantaine d'entrées de combinaisons de variables ont été testées.

Pour ce faire, le logiciel R propose des fonctions efficaces. Toutefois, une analyse manuelle continue des résultats a été nécessaire pour saisir les combinaisons de variables à évaluer. En effet, bien que les fonctions gèrent une entrée de 23 variables, il est préférable d'en présélectionner certaines car le pas-à-pas est stoppé dès qu'un paramètre diminue la performance du modèle, parfois avant que d'autres très significatifs n'aient pu être testés. Pour diminuer la fréquence de ce cas de figure, il y a eu un travail de tri des variables et d'ordonnancement, selon les principes suivants :

- Les critères de sélection des meilleurs modèles : compromis entre un coefficient de détermination élevé (R^2) et une erreur quadratique moyenne faible (RMSE)
- Tester dans un premier temps un jeu complet (toutes les variables) : dans les cinq meilleurs résultats, retrait des variables non significatives (critère : p-value < 5 %)
- Tester un maximum d'ordres possibles : à chaque fois, retrait des variables non significatives dans les meilleurs modèles
- Lorsque toutes les variables demeurent significatives dans les meilleurs modèles de chaque test, conserver ce jeu de paramètres et n'en modifier plus que l'ordre : tester un maximum d'ordonnancements possibles

De ces explorations, il résulte une sélection d'une dizaine de modèles parmi les plus efficaces. C'est parmi ceux-ci, qu'une analyse plus fine des résultats qu'ils procurent a été réalisée pour aboutir à la validation de l'un d'entre eux.

3. Résultats de la calibration : sélection et validation d'un modèle

a. Identification du modèle le plus performant

Le retrait progressif des variables non significatives au fur et à mesure de l'analyse des résultats des nombreux tests a mis en évidence douze indices de végétation particulièrement significatifs, portant les codes suivants : GNDVI, IRECI, MSAVI2, NDI45, PNDVI, NDBI, NDVI705, ARI1, PSRI, RENDWI, SAVI et SR. En les ordonnant de différentes façons, dix modèles potentiellement valides ont été retenus dont les indicateurs principaux de performance sont équivalents, de l'ordre de :

Coefficient de détermination (R^2)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)
47 %	6,0 m^2/ha

Tableau II.4. : Indicateurs statistiques moyens des performances des modèles retenus

Afin de choisir le meilleur parmi eux, ils ont été étudiés de plus près. La part de prédictions de surfaces terrières exactes sur un même jeu de placettes a été évaluée pour chacun :

Modèles candidats	Prédictions exactes à 3 m^2/ha près	Prédictions exactes à 5 m^2/ha près
Modèle 1	37 %	58 %
Modèle 2	37 %	59 %
Modèle 3	37 %	60 %
Modèle 4	36 %	58 %
Modèle 5	37 %	61 %
Modèle 6	35 %	59 %
Modèle 7	36 %	60 %
Modèle 8	37 %	62 %
Modèle 9	38 %	59 %
Modèle 10	37 %	60 %

Tableau II.5. : Comparaison des performances de prédictions des modèles retenus

Le modèle retenu est donc celui portant le numéro 8 et dont l'écriture précise est celle-ci :

```
Call:
lm(formula = Gha ~ GNDVI + NDI45 + RENDWI + IRECI + SR + SAVI +
    NDBI + PSRI + NDVI705 + MSAVI2 + PNDVI + ARI1, data = Plc_calib)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-16.0755  -4.1308   0.2166   3.6388  19.9548

Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.547e+02  7.325e+01   2.112 0.035552 *
GNDVI        2.028e+03  3.877e+02   5.230 3.29e-07 ***
NDI45        2.599e+03  4.485e+02   5.795 1.80e-08 ***
RENDWI       2.539e+03  4.234e+02   5.997 6.08e-09 ***
IRECI        1.146e-02  3.295e-03   3.479 0.000582 ***
SR          -1.093e+02  1.923e+01  -5.686 3.22e-08 ***
SAVI        -2.428e+03  4.920e+02  -4.934 1.37e-06 ***
NDBI        -6.832e+01  1.062e+01  -6.435 5.22e-10 ***
PSRI        -1.069e+02  4.341e+01  -2.463 0.014371 *
NDVI705     -1.028e+02  4.494e+01  -2.287 0.022915 *
MSAVI2       8.086e+02  1.986e+02   4.072 6.04e-05 ***
PNDVI        1.014e+03  2.590e+02   3.916 0.000113 ***
ARI1         6.836e+04  3.111e+04   2.198 0.028769 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.986 on 285 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4822,    Adjusted R-squared:  0.4604
F-statistic: 22.12 on 12 and 285 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Ce modèle a été sélectionné à la suite d'une série de traitements visant à optimiser son ajustement. Avant de l'appliquer, il convient de vérifier une à une les influences des corrections apportées au jeu de données initial afin de garantir la pertinence des choix réalisés.

b. Une amélioration grâce aux corrections ?

Modèle de décembre 2018			Modèle d'août 2019		
RMSE	**R^2**	**p-value**	**RMSE**	**R^2**	**p-value**
5,245	32,96 %	9,771e-06	5,986	48,2 %	<2,2e-16

Tableau II.6. : Comparaison des indicateurs statistiques de performances entre l'ancien modèle et le nouveau

La chaîne de traitement des données Sentinel réalisée en 2019 a permis d'améliorer le facteur de détermination du modèle d'environ 15 %. Un lien plus fort entre les indices de végétation calculés sur les images satellitaires et la surface terrière a donc pu être établi. La valeur-p extrêmement faible indique que les variables retenues sont statistiquement très significatives.

En revanche, l'erreur quadratique a légèrement augmenté : en cause, la plus grande variabilité des résultats concernant les prédictions de surfaces terrières faibles. Or, il convient de rappeler que les placettes ajoutées en 2019 sont majoritairement localisées en forêts claires, là où l'incertitude du modèle est la plus forte. Cela a limité sa performance, mais a augmenté son champ d'application. Le modèle de 2018 était très peu ajusté aux forêts claires, alors que celui de 2019 peut s'appliquer à l'ensemble des structures.

L'amélioration globale peut être imputée aux différentes corrections du jeu de données réalisées au cours de cette étude. A savoir : l'augmentation des effectifs de placettes et de dalles, le plafonnement du taux de couverture nuageuse, la prise en compte de l'effet du rayonnement solaire et le retrait des placettes erronées. Pour le garantir, différentes vérifications ont été effectuées. En particulier pour les deux dernières corrections dont le succès était le plus incertain, le test suivant a été réalisé : l'algorithme de recherche du meilleur modèle a été appliqué sur des jeux de données corrigés et non corrigés avec exactement les mêmes combinaisons de variables d'entrée. Afin de s'assurer que l'effet des corrections n'était pas spécifique à la configuration de variables optimale retenue, deux autres combinaisons aléatoires ont été traitées.

(1) Validation du choix de retirer certaines placettes aberrantes

	Coefficient de détermination moyenné sur 1000 tests		
	Combinaison de variables 1	**Combinaison de variables 2**	**Combinaison de variables 3***
Jeu de placettes corrigé (n = 331)	34,7 %	33,5 %	41,1 %
Jeu de placettes initial non corrigé (n = 353)	34,2 %	33,1 %	40,5 %

**Combinaison optimale qui a mené au modèle retenu*

Tableau II.7. : Evolution du coefficient de détermination après retrait des placettes aberrantes

Le retrait des valeurs aberrantes a donc bien permis d'affiner légèrement le modèle, d'environ 0,5 %. Cette opération a été rendue possible par l'identification précise des raisons des anomalies constatées qui justifiait leur suppression.

(2) Validation de la correction de l'effet du rayonnement

	Coefficient de détermination moyenné sur 1000 tests		
	Combinaison de variables 1	**Combinaison de variables 2**	**Combinaison de variables 3***
Données complètes (placettes 2018 + 2019) Rayonnement corrigé	36,8 %	35,1 %	43,4 %
Données complètes (placettes 2018 + 2019) Rayonnement non corrigé	34,7 %	33,5 %	41,1 %

**Combinaison optimale qui a mené au modèle retenu*

Tableau II.8. : Evolution du coefficient de détermination après correction de l'effet rayonnement

Avec une augmentation du facteur de détermination d'environ 2 %, la correction du rayonnement solaire a permis d'améliorer sensiblement l'ajustement du modèle. Toutefois, l'absence de prise en compte de ce facteur dans le modèle de 2018 était apparue comme une limite majeure potentiellement très impactante. Or, ce test révèle que s'il y a bien un impact du rayonnement, ce dernier est loin d'expliquer intégralement les difficultés de calibration d'un modèle performant.

(3) Validation du seuil de couverture nuageuse retenu

Afin de vérifier que l'influence du faible taux de nuages toléré est effectivement négligeable, les données recueillies sur chaque placette, à des dates différentes, ont été analysées en fonction de la couverture nuageuse. Il n'a été observé aucune corrélation entre les valeurs des différentes bandes de longueur d'onde Sentinel et le taux de nuage cantonné à 5 % maximum. Ce seuil était donc pertinent pour constituer le jeu de dalles.

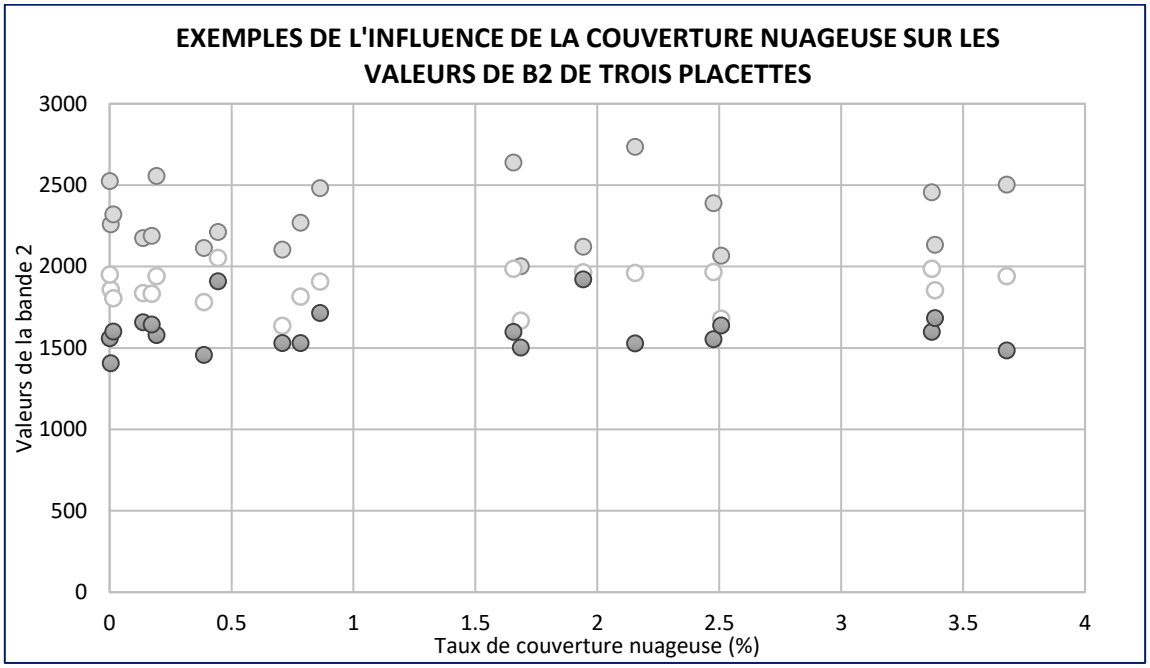


Figure II.7. : Valeurs d'une bande Sentinel à chaque acquisition en fonction de la couverture nuageuse

(4) Impact de l'augmentation du jeu de données

La différence restante entre le modèle calibré en 2018 et le nouveau, soit 12 %, peut être imputée l'augmentation du nombre de placettes et de dalles. Au-delà de l'ajustement que cela a

permis, il s'agit aussi de la validité du modèle qui est renforcée par la constitution d'un échantillon plus représentatif.

(5) Récapitulatif des apports des corrections

L'apport des corrections n'est pas spécifique au jeu de données optimal, comme en témoignent les tests sur les deux autres configurations. Voici le détail des apports de chacune sur la calibration du modèle le plus performant :

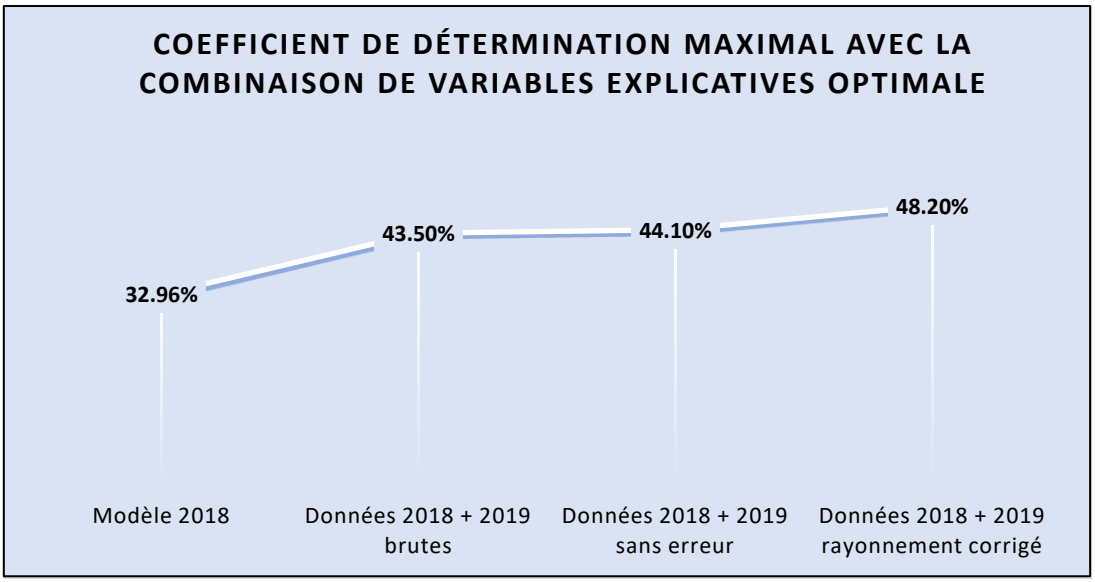


Figure II.8. : Evolution du niveau du coefficient de détermination du modèle le plus performant au fur et à mesure des corrections

c. Un modèle plus performant mais qui atteint ses limites

Malgré les corrections apportées, les prédictions obtenues par le meilleur modèle restent assez imprécises : 62 % de réussites sur une fourchette large à 5 m^2/ha près. Cependant, rappelons qu'il s'agit d'estimations ponctuelles : ces données, lissées sur un raster, permettront tout de même d'obtenir des informations intéressantes et fiables quant à la catégorie de densité du peuplement (très clair, clair, moyennement dense, dense, très dense) à l'échelle d'un massif. C'est ce que démontreront les cartes de la ressource produites ensuite. *(partie II.4.)*

Peut-on prétendre à de meilleurs résultats ? Il semblerait que les coefficients de détermination des modèles évalués ne dépassent jamais 50 %, de même que l'erreur quadratique moyenne ne descend jamais au-dessous de 5 m^2/ha. Le grand nombre de combinaisons de variables d'entrée sélectionnées et testées de façon rigoureuse permet d'affirmer qu'il s'agit respectivement d'un plafond et d'un seuil plancher. Les légers effets de rayonnement solaire (en fonction du relief) ayant été corrigés et les vérifications quant aux autres facteurs potentiellement influents ayant été effectuées, les raisons sont à chercher du côté de l'aspect même des forêts de pin d'Alep et de la méthode de détermination du modèle. Alors que les prédictions semblent assez fiables dans des peuplements de surfaces terrières comprises entre 10 et 25 m^2/ha, elles sont plus variables de part et d'autre de cette fourchette :

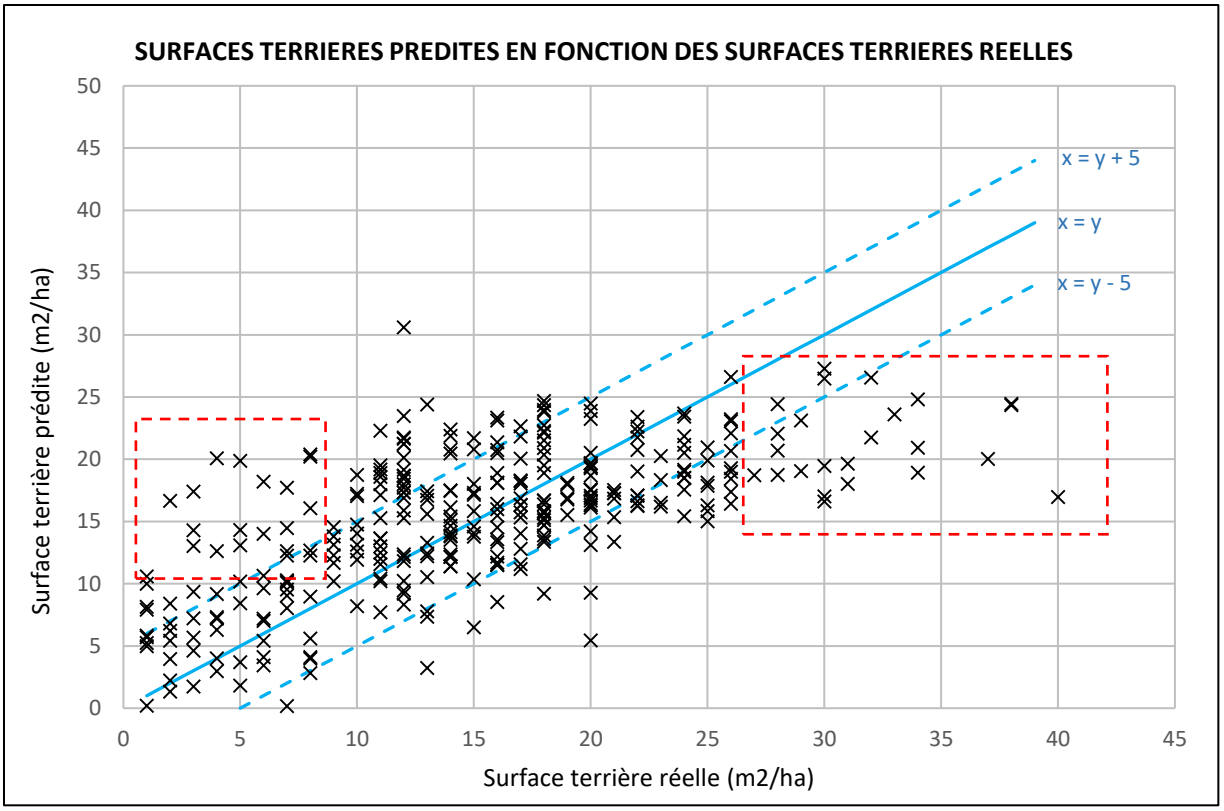


Figure II.9. : Comparaison des surfaces terrières prédites par le modèle avec les valeurs mesurées sur le terrain

(1) La variabilité des prédictions dans les peuplements clairs (< 10 m^2/ha)

Rappelons que les données Sentinel sont basées sur les longueurs d'onde, autrement dit, sur la « couleur » de la forêt vue de haut. Dans ces types de peuplements, le sol ou le sous-étage sont très visibles, mais également de nature, et donc de teintes, très variables : sol nu, strate herbacée ou arbustive dense, chênes vert, pubescent ou kermès, affleurement rocheux, … Ce facteur ne peut faire l'objet d'une variable explicative ou d'une correction. L'ajustement du modèle sera donc toujours bridé par l'influence de la nature de la couverture du sol dans les peuplements clairs.

(2) La variabilité des prédictions dans les peuplements très denses (> 25 m^2/ha)

Parmi l'échantillon de placettes de calibration, peu de relevés étaient supérieurs à 25 m^2/ha. La première mesure à prendre serait donc d'augmenter le jeu de placettes en forêt dense pour espérer obtenir de meilleurs résultats.

Toutefois, ce constat de variabilité renvoie à l'une des hypothèses de départ qui supposait un comportement non linéaire de certaines variables, en particulier pour les surfaces terrières élevées. Or, parmi les indices retenus dans le modèle, certains en font partie (GNDVI, MSAVI2, ARI1, NDI45, SAVI et SR). Cependant, il s'est révélé impossible de calibrer un modèle non linéaire sur l'ensemble des placettes du fait de l'absence d'homogénéité dans le comportement des variables en fonction de la surface terrière. Il semblerait donc effectivement qu'une calibration optimale devrait s'effectuer selon deux types de modèles : un modèle linéaire pour les forêts claires à denses et un modèle non linéaire pour les forêts très denses.

Une telle entreprise est difficile à mettre en œuvre et nécessiterait, dans l'application des modèles, de savoir au préalable si le peuplement étudié est très dense ou ne l'est pas. Cela enlève évidemment tout l'intérêt de l'outil qui doit justement donner ce type d'information.

Au regard des usages envisagés de l'outil et des structures réelles des forêts de pin d'Alep de la région (de densité majoritairement inférieure à 25m^2/ha), il a été choisi de se restreindre au modèle linéaire en rassemblant les prédictions élevées dans une grande catégorie : « peuplement très dense (> 25m^2/ha) ». En effet, il est intéressant d'analyser la distribution réelle des densités dans les forêts de pin d'Alep pour évaluer la performance du modèle et choisir les seuils des classes qui seront représentées cartographiquement.

(3) Analyse de la variabilité des résultats au regard de la distribution réelle des surfaces terrières dans les peuplements de pin d'Alep

Le maillage systématique réalisé pour l'Inventaire Forestier National couvre uniformément l'ensemble des peuplements, les proportions de surfaces terrières qui y sont relevées sont donc représentatives de la structure réelle des forêts de pin d'Alep.

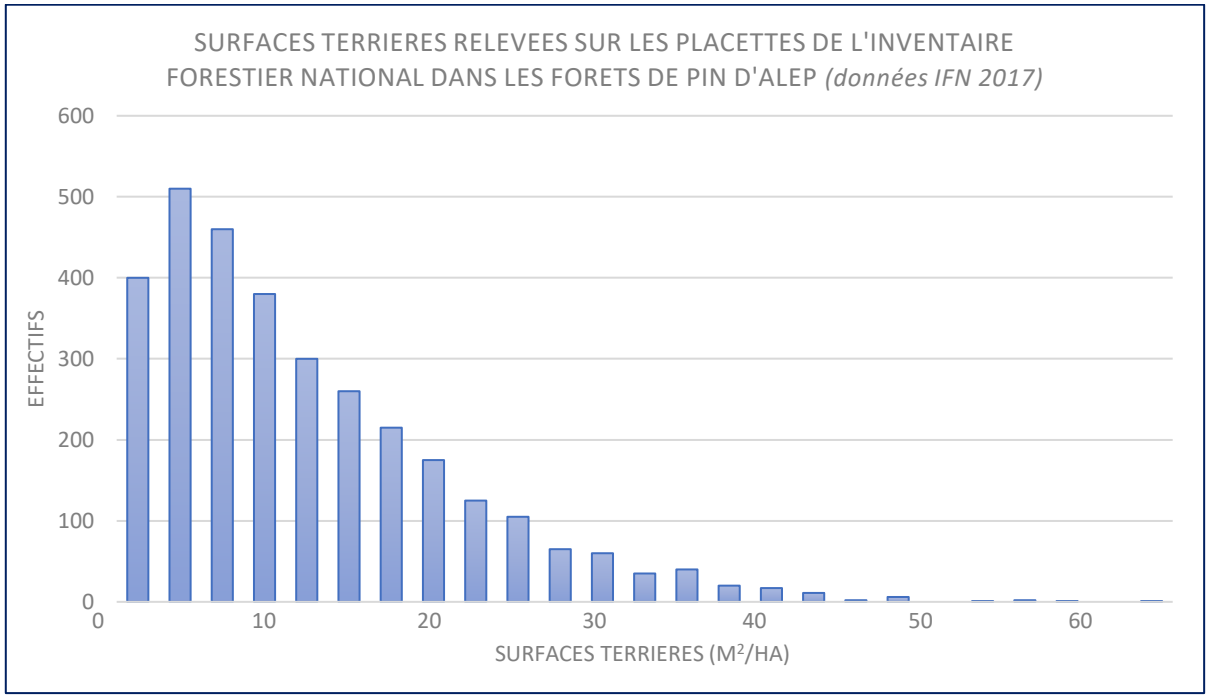


Figure II.10. : Distribution des surfaces terrières relevées par l'Inventaire Forestier National dans les peuplements de pin d'Alep

Comme en atteste ce graphique, les peuplements de densité supérieure à 25 m^2/ha représentent moins de 10 % des structures existantes. L'imprécision impliquée par la largeur de la classe « peuplement très dense » envisagée dans l'outil n'impactera donc qu'une petite part des forêts de pin d'Alep caractérisées.

En revanche, près de la moitié des relevés affichent une densité inférieure à 10 m^2/ha, zone dans laquelle l'incertitude des prédictions du modèle est également forte, imposant un regroupement en une classe unique. Cela serait problématique si les conclusions en termes de décisions sylvicoles étaient très variables entre une forêt de pin d'Alep à 2 m^2/ha et l'une à 8 m^2/ha par exemple. Or, ça n'est pas le cas dans la réalité, ce qui limite l'impact négatif de ces prédictions incertaines.

(4) Conclusions

Ces résultats moyennement satisfaisants au premier abord, ont confirmé les réserves émises au départ quant à l'homogénéité de la distribution des valeurs Sentinel en fonction de la surface terrière. Cela aboutit donc à un modèle performant pour les peuplements de surfaces terrières inférieures à 25 m^2/ha, soit la grande majorité des forêts de pin d'Alep, mais qui l'est moins pour les densités élevées, qui doivent donc être rassemblées dans une unique classe. Une piste d'amélioration possible serait de calibrer deux modèles : un premier linéaire (celui de cette étude peut être conservé) et un second non linéaire qui serait appliqué aux peuplements classés dans la catégorie « très dense » par le premier.

Les limites relatives à la nature même des données Sentinel mises en évidence dans les peuplements clairs sont difficilement contournables.

Les faiblesses de ce modèle sont atténuées par la mise en lien de la distribution des valeurs incertaines avec la distribution réelle des surfaces terrières dans les peuplements de pin d'Alep : le modèle est le moins performant concernant les densités de peuplement les plus rares, à l'inverse, il est efficace pour les densités rencontrées dans la grande majorité des forêts actuelles.

Enfin, l'ajustement limité du modèle a fait ressortir la question de l'hétérogénéité des dalles : le plafonnement de la performance des modèles est-il dû à de trop grosses variations entre les images acquises à des dates éloignées ?

d. Faut-il restreindre la calibration sur des images acquises à la même période ?

Pour évaluer si le choix qui a été fait de multiplier le nombre de dalles pour augmenter la quantité de données, quitte à les sélectionner à des dates éloignées, était pertinent, des tests de calibration sur des échantillons restreints à des acquisitions réalisées le même mois (soit sept images) ont été effectués. Par comparaison avec des configurations de variables d'entrée identiques provenant du jeu de dalles complet, il apparaît clairement que la performance n'est pas améliorée en limitant la période :

	Coefficient de détermination moyenné sur 1000 tests		
	Combinaison de variables 1	**Combinaison de variables 2**	**Combinaison de variables 3***
Jeu de dalles complet (n = 39)	36,8 %	35,1 %	43,4 %
Jeu de dalles mars 2019 (n = 7)	32,1 %	30 %	31,7 %
Jeu de dalles janvier 2019 (n = 7)	32,7 %	31,4 %	33,3 %
Jeu de dalles incomplet témoin (n = 7)**	33,4 %	32,6 %	34,5 %

** Combinaison optimale qui a mené au modèle retenu*

***Dalles acquises à des dates éloignées, réparties entre novembre et mars*

Tableau II.9. : Comparaison des valeurs des coefficients de détermination de jeux de dalles triés selon leurs dates d'acquisition

Ce test a permis de montrer l'absence d'homogénéité plus grande entre des images de dates proches, et de fait, l'absence d'hétérogénéité supérieure entre des images acquises à des dates éloignées. Cela confirme la pertinence et même la nécessité de calibrer le modèle sur un grand nombre de dalles, quelle que soient leurs dates d'acquisition pour obtenir une moyenne représentative. Par ailleurs, cela remet en cause la pérennité du modèle mis au point en décembre 2018 sur une dalle unique. Celui-ci ne peut être appliqué qu'à cette image puisque, dès lors qu'on moyenne sur sept acquisitions, la performance est nettement diminuée.

Deux cas sont donc envisageables :

- Le modèle est calibré sur une dalle unique apportant une information de ressource à un instant t, sans possibilité de réutiliser le modèle. (Modèle de décembre 2018)
- Le modèle est calibré sur un grand nombre de dalles pour que la moyenne soit représentative et permette une reproductibilité à n'importe quelle date de la période hivernale. (Modèle d'août 2019)

Ainsi, la vérification complète des corrections et du choix de la structure du jeu de dalles permet de valider le modèle avec la certitude que la calibration ait été optimisée au regard des moyens et des données à disposition. L'étape suivante consiste à l'appliquer cartographiquement et à découvrir quelles sont les possibilités et les limites de ce que peut produire cet outil.

4. Mise en application cartographique et perspectives d'utilisations

La raison d'être de ce modèle est de permettre la production de cartes de la ressource qui fournissent une représentation efficace des informations fournies par l'exploitation des données satellitaires Sentinel.

Sur la base d'une carte de ressource simple localisant les surfaces terrières par catégorie, il sera intéressant de superposer des informations de fertilité stationnelle et d'exploitabilité pour aboutir à une analyse fine et réaliste des potentialités de chaque peuplement de pin d'Alep pour laquelle on peut envisager diverses utilisations.

a. Production d'une carte de la ressource en pin d'Alep

Le modèle a été appliqué sur les acquisitions d'images satellitaires Sentinel les plus récentes de mars 2019 (pour rester dans la période de calibration) pour l'ensemble de l'aire de répartition du pin d'Alep : de Perpignan à Nice et jusqu'au mont Ventoux au nord.

Cette visualisation cartographique est une étape préalable à une campagne de terrain qui devrait être réalisée pour une validation rigoureuse. Toutefois, cette étude, dans le cadre de l'élaboration du modèle Sentinel mais également des autres outils techniques, a donné l'occasion de parcourir et de caractériser une surface importante de forêts de pin d'Alep et donc de constituer une base de référence de peuplements bien connus à partir de laquelle l'exactitude des cartes pourra être évaluée.

(1) Visualisation des données brutes ***[ANNEXE II.4]***

La première approche a été d'afficher la totalité des données, sur l'ensemble de l'aire géographique étudiée, dans le but de visualiser l'aspect que prennent les différentes occupations du sol, avec une attention particulière aux massifs forestiers. Il apparaît une répartition logique des ordres de grandeur des surfaces terrières dans les forêts connues qui les font se distinguer. Toutefois, on remarque par ailleurs la prédiction de surfaces terrières dans des zones non boisées : il s'agit là d'autres occupations du sol de signature similaire à celle des houppiers de pin d'Alep, pour lesquelles le signal renvoyé au satellite Sentinel est proche.

La signature des couverts de pin d'Alep n'est donc pas assez spécifique pour se distinguer de tous les autres usages du sol, et cela nous incite à restreindre la visualisation des résultats aux formations boisées ou en cours de boisement.

(2) Filtre de la zone d'étude grâce aux données d'occupations du sol

La base de données géographique CORINE Land Cover (CLC), produite dans le cadre du programme européen d'observation de la terre « Copernicus », propose des couches vectorielles fines (résolution de 20 à 25 mètres) codées selon l'occupation du sol déterminée par photo-interprétation d'images satellites. Mises à jour tous les six ans (la dernière version date de 2018), ces données ont permis d'isoler de manière fiable les zones susceptibles de comporter du pin d'Alep. Il a été choisi de conserver quatre catégories de données CLC qui couvrent un large spectre de types de formations boisées afin d'évaluer les performances des prédictions Sentinel pour distinguer l'essence qui nous intéresse. Il s'agit de : « forêts de résineux » ; « forêts de feuillus » ; « forêts mixtes » ; « zones de transition bois-broussailles ». ***[ANNEXES II.5 et II.6]***

Conformément à ce qui avait été visualisé grossièrement avec les données brutes, les massifs forestiers que l'on sait composés de pin d'Alep (les Alpilles par exemple) font apparaître des surfaces terrières de cette essence. À l'inverse, en crête du petit Luberon dépourvues de pin d'Alep, la carte affiche des zones rouges, signifiant une densité nulle.

Pour affiner l'analyse, il convient de représenter les différents types de boisement. Il en ressort alors des démarcations nettes entre les différentes compositions de forêts avec distinction de zones bien plus foncées où se trouvent les forêts de conifères. Ce constat est bien visible sur la carte aux confins des quatre départements (13, 84, 04, 83), à l'extrême Est du petit Luberon, où les types de forêts sont particulièrement variés. ***[ANNEXE II.7]*** Cette représentation soulève tout de même deux questions :

- Les surfaces terrières de pin d'Alep prédites en forêts de feuillus sont clairement plus faibles, mais pas toujours nulles, comment s'affranchir de ces prédictions inexactes ?
- Les forêts de résineux se distinguent, mais la distinction est-elle également faite entre les différentes essences résineuses ?

Pour y répondre, les données précises de composition en essences fournies par l'Inventaire Forestier National ont été superposées aux cartes de prédiction.

(3) Isolement des forêts de pin d'Alep grâce aux données de l'Inventaire Forestier National

Alors que dans les Bouches-du-Rhône, dans une grande partie du Var et du sud du Vaucluse, les peuplements résineux sont essentiellement des forêts de pin d'Alep, les mettre en évidence spécifiquement est nécessaire en limite de son aire de répartition, où la composition résineuse est plus variable. Sur l'exemple de la carte réalisée dans les Alpes-Maritimes ***[ANNEXE II.8]***, les forêts de résineux non identifiées comme composées de pin d'Alep apparaissent bien plus claires, ce qui confirme la cohérence des résultats acquis par l'exploitation des données Sentinel.

Toutefois, si la représentation cartographique donne à voir des tendances tout à fait cohérentes dans la répartition des surfaces terrières, rappelons que les proportions de prédictions de classes de surfaces terrières exactes calculées à la suite de l'élaboration du modèle s'étaient avérées moyennement satisfaisantes à une résolution de 10 mètres (62 % de réussites). C'est pourquoi, si l'information recherchée est une valeur précise en un point donné, il est indispensable de proposer des données agrégées à une échelle plus grande.

(4) Un gain en fiabilité par l'agrégation des prédictions et le découpage des classes

Les cartes à la résolution de 10 mètres donnent l'illusion d'une très grande précision mais doivent être prises individuellement avec précaution au regard des résultats obtenus lors du processus de validation du modèle. Toutefois, il est possible de parvenir à des prédictions plus fiables grâce à l'agrégation de valeurs voisines selon le principe suivant : étant donné que la surface terrière est exacte dans 62 % des cas sur un petit carré de 10 m de côté, si l'on étudie les 25 valeurs d'un grand carré de 50 m de côté, il y a de grandes chances que la prédiction la plus fréquente parmi celles-ci corresponde à la réalité. C'est l'opération que nous avons réalisée sur les données à fine résolution (10 m). Le choix d'une résolution d'un quart d'hectare permet à la fois de rassembler un nombre suffisant de valeurs pour que la plus fréquente soit représentative, et de conserver une surface assez petite pour supposer l'absence de variation majeure de surface terrière d'une extrémité à l'autre de la zone.

Enfin, afin de garantir un peu plus de fiabilité, il est prudent de proposer des classes vastes dans les petites et les grandes valeurs de surfaces terrières, en cohérence avec les conclusions tirées de la validation du modèle.

Ce traitement permet notamment d'aboutir à une séparation plus nette entre le pin d'Alep et les autres essences, comme en atteste la visualisation des résultats au-dessus de Cabrières-d'Aigues où les peuplements de pin d'Alep (au sud) sont voisins de forêts de feuillus (au nord). ***[ANNEXES II.9, II.10 et II.11].*** Il permet surtout de découper le peuplement en classes de densité facilement visualisables et interprétables en termes de décisions sylvicoles adaptées à l'échelle d'unités de gestion.

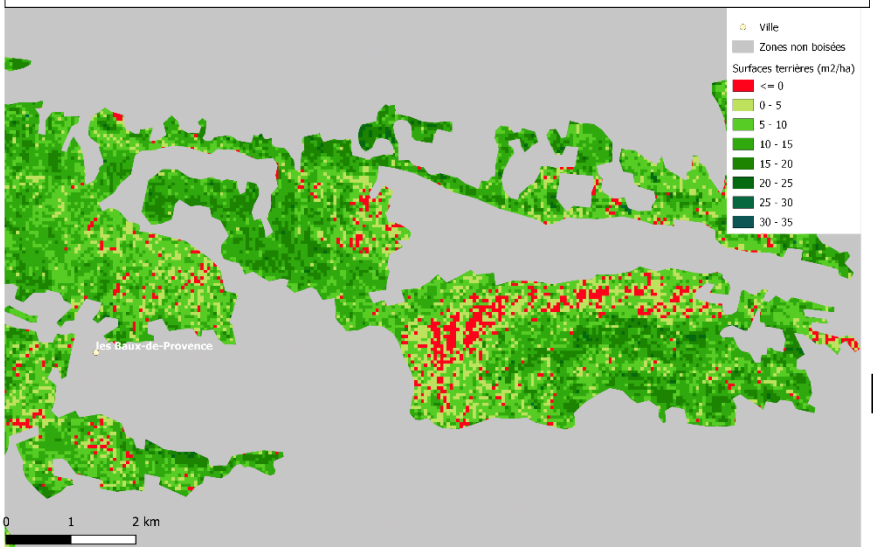
CARTE 6.A : Surfaces terrières prédites à une résolution de 10 mètres
Zoom sur les forêts autour des Baux-de-Provence (13)

Agrégation par quart d'hectare

+ Fiabilité

- Précision

CARTE 6.B : Surfaces terrières prédites à une résolution de 50 mètres (un quart d'hectare)
Zoom sur les forêts autour des Baux-de-Provence (13)



Elargissement des classes extrêmes

+ Fiabilité

- Précision

CARTE 6.C : Classes de surfaces terrières prédites à une résolution de 50 mètres
Zoom sur les forêts autour des Baux-de-Provence (13)

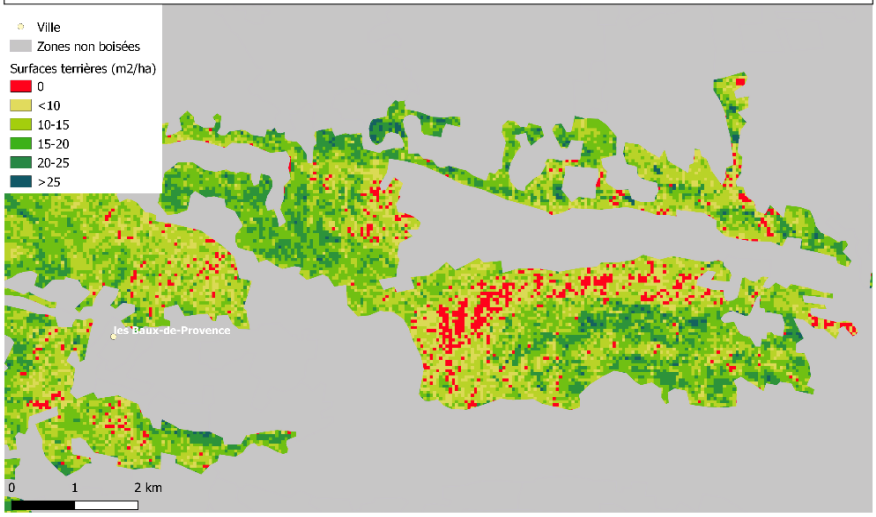


Figure II.11. : Processus de traitement des cartes pour en augmenter la fiabilité

(5) Bilan

Ainsi, l'aperçu de la performance du modèle estimée en confrontant les représentations cartographiques à d'autres sources d'informations géographiques et à la connaissance de terrain de certaines forêts, présuppose de résultats satisfaisants quant à la fiabilité des prédictions. Il est donc envisageable et recommandé de réaliser une campagne de terrain pour une validation rigoureuse du modèle.

A l'issue de ce travail, sont déjà proposées des couches d'informations géographiques prêtes à l'emploi : ***[ANNEXE II.12]***

- **Une couche raster des valeurs de surfaces terrières à la résolution de dix mètres**, sur l'ensemble de l'aire de répartition du pin d'Alep (couvrant tout ou une partie des départements 66, 11, 34, 30, 48, 84, 13, 04, 83 et 06) : *grande finesse mais fiabilité à l'échelle locale limitée*
- **Une couche raster des valeurs de surfaces terrières à la résolution de cinquante mètres**, sur l'ensemble de l'aire de répartition du pin d'Alep (couvrant tout ou une partie des départements 66, 11, 34, 30, 48, 84, 13, 04, 83 et 06) : *meilleure fiabilité, précision suffisante pour des applications en gestion forestière*
- **Une couche vectorielle des zones non boisées** grisées ayant la fonction de masque à superposer aux couches de données de surfaces terrières pour empêcher les confusions avec d'autres occupations du sol correspondant à un signal Sentinel similaire.
- **Une couche vectorielle comportant des repères géographiques** (les départements et leurs chefs-lieux) afin d'améliorer la compréhension de la carte.

De plus, ces éléments sont accompagnés d'**un fichier Script R** qui permet, par une chaîne de traitement de données simple, la mise à jour des couches à partir d'acquisitions satellitaires Sentinel plus récentes.

Des applications de l'exploitation des données Sentinel sont donc d'ores et déjà envisageables dans le cadre du développement de la filière pin d'Alep.

b. Utilisations potentielles des informations géographiques produites

L'usage premier de cet outil est d'identifier les peuplements de pin d'Alep à fort potentiel pour la valorisation de bois d'œuvre, prioritaires pour le développement d'un mode de gestion dynamique d'amélioration de la qualité.

Or, la seule information de densité en surface terrière ne permet pas de caractériser pleinement le potentiel d'un peuplement de pin d'Alep. Il s'agit d'une entrée qui permet de cibler les forêts pour lesquelles une analyse plus fine peut être intéressante, à la lumière d'autres sources d'informations géographiques complémentaires.

(1) A court terme : localiser la disponibilité et les zones prioritaires pour une sylviculture dynamique

- **Croiser avec les données caractérisant la disponibilité :**

Une condition indispensable à la disponibilité d'un peuplement de pin d'Alep est son accessibilité caractérisée par la densité et la qualité de la desserte. Cette information est facilement observable par la superposition de la couche du réseau de routes, de pistes et de chemins rendue disponible par l'IGN.

Pour aller plus loin dans l'évaluation de la disponibilité, il serait nécessaire de connaître les conditions d'exploitation. Il n'existe pas à ce jour de couches d'informations géographiques caractérisant précisément ce facteur. Les seules données de courbes de niveau ne sont pas suffisantes car elles n'indiquent pas tous les obstacles locaux qui peuvent compliquer voire rendre impossible l'exploitation. L'analyse s'effectue donc peuplement par peuplement, à l'occasion de l'élaboration d'un document de gestion et en lien avec les connaissances de terrain. L'information sera alors forcément obtenue à une étape où les données satellitaires Sentinel ne sont plus utiles. En effet, rappelons que l'outil Sentinel est voué à intervenir en amont, pour repérer les zones où une analyse plus fine de la forêt semble intéressante d'un point de vue sylvicole.

- **Croiser avec les données caractérisant la fertilité :**

Il n'existe pas de carte des stations ou de modèle numérique de hauteurs, tous deux utiles pour caractériser la fertilité d'un peuplement, disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude.

En revanche, des données relatives au bilan hydrique ont été élaborées au sein de l'ONF par Philippe Dreyfus (sur la base de données climatiques « Digitalis » fournies par Chistian Piedallu de l'UMR Silva). Elles tiennent compte de variables climatiques, de l'exposition au rayonnement dépendante de la topographie, de la latitude et de l'orientation. Cette couche d'informations géographiques permet d'estimer la fertilité relative des zones peuplées de pin d'Alep. Bien que cette essence soit résistante à la sécheresse, les meilleures productivités sont observées sur les stations les moins sèches.

La visualisation de ces données permet de présager de la fertilité d'une forêt de pin d'Alep par rapport à une autre : à surfaces terrières équivalentes, il est alors possible de cibler prioritairement un peuplement.

- **Exemple de l'analyse de la potentialité d'un massif forestier :**

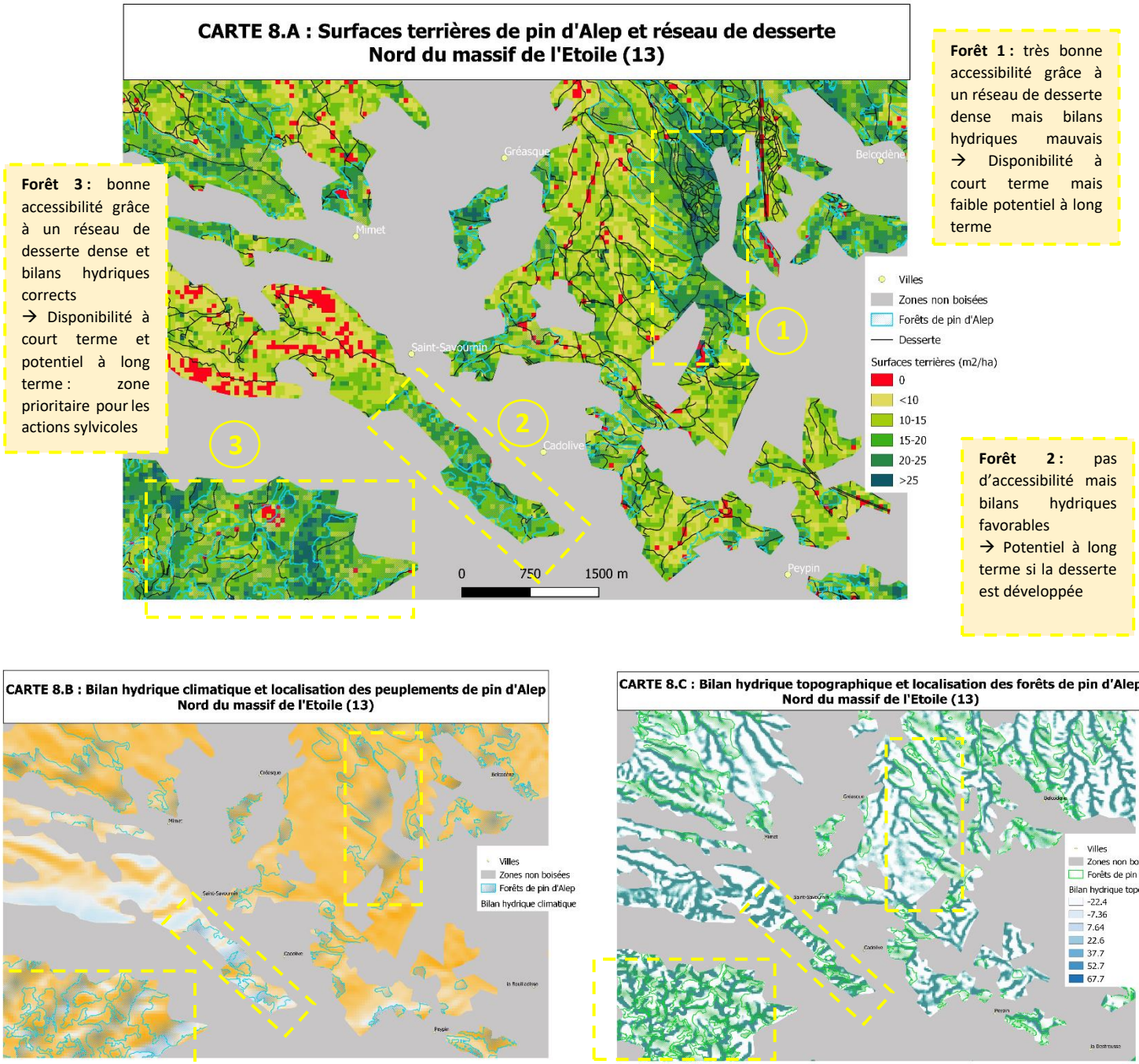


Figure II.12. : Analyse du potentiel d'un massif forestier selon différents facteurs : la densité en surface terrière, l'accessibilité, le bilan hydrique climatique et les situations topographiques locales (source : ONF RDI Avignon)

- **Intégrer les cartes Sentinel dans une vision multifonctionnelle des forêts :**

D'autres informations géographiques qui conditionnent les choix de gestion sylvicoles peuvent être superposées aux données de surfaces terrières fournies par les images Sentinel afin d'estimer une potentialité réelle connectée aux autres enjeux de la forêt. Il s'agit entre autres : de la sensibilité paysagère, de celle des sols, des divers classements naturels et patrimoniaux ou des infrastructures

d'accueil du public. Certaines imposent des restrictions importantes (sites classés, parc national, réserves biologiques, …) incompatibles avec la démarche de développement d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep, qui implique forcément la réalisation de coupes. D'autres vont au contraire dans le sens d'une sylviculture dynamique, d'éclaircies régulières et peu intenses, correspondant à ce qui est préconisé dans les itinéraires à objectif de production de bois d'œuvre.

Partant de la base de données de surfaces terrières produite par l'exploitation des images Sentinel, enrichie par d'autres sources d'informations géographiques, il est donc possible d'estimer un niveau d'investissement sylvicole cohérent avec les potentialités d'une zone.

(2) A long terme : localiser les zones à potentiel pour des investissements en gestion forestière

Les mêmes informations que celles utilisées pour caractériser le potentiel à court terme peuvent être analysées en se projetant à un horizon plus lointain avec des investissements plus importants :

- Lorsqu'il y a la conjonction d'une densité forte, d'un potentiel stationnel bon et d'un réseau de desserte performant, mais en l'absence d'un programme de gestion forestière valorisante pour les peuplements de pin d'Alep, la zone concernée peut être identifiée pour développer une animation sylvicole plus forte : envisager des regroupements de propriétaires par exemple.
- Lorsque les mêmes conditions sont réunies mais que le réseau de desserte forestière est défaillant, cela peut en faire une zone d'investissements prioritaires pour le développement d'infrastructures.
- La combinaison des données de surfaces terrières acquises via l'outil Sentinel et les données climatiques peut servir dans le cadre d'une réflexion globale sur l'évolution possible de l'aire de répartition du pin d'Alep.

Les atouts des données satellitaires Sentinel se trouvent notamment dans leur mise à jour presque en « temps réel » et leur répartition uniforme sur le territoire qui permettra, dans une vision à très long terme, d'acquérir des données de surfaces terrières quelle que soit l'aire d'expansion du pin d'Alep.

Ainsi, le traitement des données satellitaires a mené à la production de cartes de la ressource en pin d'Alep permettant une visualisation rapide et globale de la répartition géographique des massifs majeurs. La réalisation de ce travail s'est effectué dans le cadre d'un vaste projet de développement d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep durable pour les peuplements forestiers et valorisante pour tous les acteurs qui y interviennent. L'utilisation de cet outil pour repérer les zones à potentiel doit donc favoriser la mise en place d'une sylviculture d'amélioration de la qualité des pins d'Alep durable et intégrée, dans un contexte de grande multifonctionnalité des forêts. La suite logique consiste à proposer des solutions sylvicoles adaptées dans les zones ciblées par les prédictions de l'outil Sentinel. C'est dans cette optique, que l'étude s'est poursuivie par l'élaboration d'une application d'aide à la décision sylvicole spécifiquement pour les peuplements de pin d'Alep, essence pour laquelle on présage l'émergence d'une filière bois d'œuvre de structure.

III. Valoriser le potentiel du peuplement en y appliquant une sylviculture adaptée

L'identification des zones concentrant une forte densité de pin d'Alep, réalisée à la lumière des connaissances des acteurs du terrain et des nouveaux outils techniques tels que l'exploitation des données Sentinel, est l'étape préliminaire aux choix d'actions sylvicoles. Ces derniers sont réalisés à l'échelle d'une unité de peuplement homogène et sont déterminants quant aux débouchés possibles des bois de pin d'Alep. L'enjeu de cette étape est donc important et peut nécessiter l'usage d'un outil permettant de se projeter dans l'avenir probable d'une forêt conduite selon les différents itinéraires sylvicoles existants, pour lesquels peu d'exemples d'applications existent n'offrant pas le recul qui pourrait faciliter les décisions de gestion.

1. Les enjeux : proposer une gestion adaptée pour valoriser le potentiel

a. Un fort potentiel d'amélioration de la qualité des peuplements

Les peuplements de pin d'Alep actuels résultent pour moitié de plantations réalisées à la fin du XIXème siècle et pour l'autre d'une colonisation naturelle d'espaces non boisés intervenue principalement au début et au milieu du XXème siècle. Avec une longévité de 100 à 150 ans, les pins d'Alep en présence aujourd'hui appartiennent donc pour la plupart à la première ou à la deuxième génération. De plus, dans ces peuplements, il n'a été pratiquée jusqu'alors aucune sylviculture sélective à objectif d'amélioration de la qualité des arbres en vue de les valoriser en bois d'œuvre.

Pour ces raisons, à ce jour, les pins d'Alep qui composent les forêts du sud-est de la France n'ont pas bénéficié d'améliorations génétiques ou de conformation induites par la sylviculture. Cela contribue à véhiculer une image négative de cette essence en comparaison à des peuplements anciens d'autres résineux améliorés par les phases successives de sélection par les forestiers. Mais cela signifie aussi qu'il y a un potentiel à développer. Il appartient aux sylviculteurs de mettre en place des techniques adaptées pour augmenter la proportion de bois d'œuvre dans les forêts de pin d'Alep. C'est un but recherché par la majorité des forestiers mais qui se heurte à l'absence de moyens voire à la désapprobation des propriétaires pour investir dans la gestion de leur forêt.

Un élément facilitateur de la mise en place d'une sylviculture dynamique serait de garantir les retombées positives de telles pratiques, notamment d'un point de vue économique. C'est en cela que nous avons vu l'utilité d'un outil de modélisation de l'évolution des peuplements de pin d'Alep permettant de comparer plusieurs scénarii sylvicoles appliqués à une forêt spécifique. Il pourrait faire l'objet d'un support de communication efficace pour proposer des actions de gestion aux propriétaires.

b. Un potentiel variable d'une forêt à l'autre

Une sylviculture dynamique présuppose d'effectuer des investissements dans la forêt concernée. Ceux-ci doivent se justifier par une rentabilité augmentée des opérations futures. Or, un tel scénario ne peut se réaliser dans tous les peuplements de pin d'Alep. Certains ne disposent pas des conditions stationnelles, structurelles et logistiques permettant de développer la qualité requise pour réaliser des coupes de grande valeur aptes à rentabiliser les investissements.

Il est donc indispensable d'estimer le potentiel de chaque peuplement. L'outil ici présenté doit le permettre en proposant une modélisation d'évolution réalisée à partir de caractéristiques précises et spécifiques à la forêt étudiée. Cela permettra de proposer des solutions de gestion tout à fait adaptées au contexte local et aux moyens du propriétaire.

c. Peu de recul sur les itinéraires sylvicoles existants

Durant les trente dernières années, près d'une vingtaine d'itinéraires sylvicoles pour le pin d'Alep ont été proposés, une partie d'entre eux à objectif de production de bois d'œuvre, venant se substituer à la première proposition de Pardé de 1957. Certains servent de référence pour les aménagistes de l'Office National des Forêts et d'autres, souvent similaires, sont appliqués en forêt privée. Toutefois, ces pratiques récentes ne permettent pas d'offrir le recul nécessaire pour évaluer la pertinence des choix sylvicoles avec certitude.

En parallèle, a été développé durant les vingt dernières années au sein de l'INRA *(Dreyfus, 2001)* un modèle de croissance du pin d'Alep, décliné selon la fertilité des stations. Ce modèle, baptisé NRG, vise à caractériser l'évolution des pins d'Alep de manière plus précise et fiable que les tables de production approximatives *(Couhert et Duplat, 1993)*, uniques références jusqu'alors.

En attendant de disposer des renseignements de retours d'expériences, il peut être envisagé de combiner les travaux de modélisation de la croissance des pins d'Alep aux propositions d'itinéraires pour en évaluer les effets sur les peuplements. Cela permettrait d'apporter une vision plus claire aux gestionnaires forestiers et aux propriétaires quant à l'évolution à laquelle ils peuvent s'attendre au sein d'une forêt précise.

C'est pour répondre à ces enjeux, qu'il a été imaginé un outil de simulation d'évolution des peuplements de pin d'Alep, donnant des informations sur :

- Les évolutions structurelles et dendrométriques d'un peuplement de pin d'Alep précis,
- Les débouchés qui y sont envisageables pour les bois et leurs échéances,
- Le bilan économique à court et à long terme.

Cela doit permettre alors :

- D'améliorer globalement la qualité des peuplements en incitant à choisir une sylviculture dynamique de sélection par la conformation puis sélection génétique,
- D'évaluer la performance des différents itinéraires existants, pour lesquels on manque de recul,
- De proposer aux propriétaires les modalités de gestion sylvicole qui maximisent la valorisation des pins d'Alep tout en garantissant un bilan économique positif.

2. La construction de l'outil : modélisation de l'évolution des peuplements

L'élaboration de cet outil s'est effectuée dans l'optique d'allier praticité et précision au sein d'une application qui transforme concrètement les apports des travaux de recherche et de développement pour la sylviculture du pin d'Alep.

a. Les sources

La mise au point d'itinéraires sylvicoles et la croissance du pin d'Alep sont des sujets étudiés depuis une trentaine d'années, ce qui offre une bibliographie assez importante qui a servi de point de départ à la construction de l'outil. Les informations tirées de l'étude bibliographique ont été complétées par un protocole de terrain spécifiquement développé pour préciser certains points peu étudiés auparavant.

(1) Les scénarii sylvicoles

Les itinéraires de référence les plus répandus ont été recensés. Au nombre de douze, ils sont issus de trois sources : les travaux effectués au sein d'Alcina *(Chomel, 2015 ; Chomel, Chandioux, Le Courbe, 2016)*, les documents de référence réalisés et utilisés par l'Office National des Forêts *(Prevosto et al., 2013 ; Tresmontant et Quesney, 2014)* et le sondage des gestionnaires forestiers pour connaître les pratiques courantes.

- **Un domaine d'application commun :**

Le mode de traitement proposé dans ces itinéraires est toujours la futaie régulière. Cela est cohérent avec le caractère pionnier, colonisateur et héliophile du pin d'Alep qui ne permet pas la formation de forêts composées de plus de trois classes d'âge. En effet, la régénération de cette essence sous elle-même n'est pas envisageable avant un état du peuplement mature très clair, la phase d'ensemencement, au cours de laquelle l'apport de lumière peut être suffisant pour faire germer de nouveaux pins d'Alep dans le meilleur des cas. La dynamique naturelle de cette essence consiste donc en des cycles bien marqués, d'une centaine d'années, qui voient évoluer les arbres à des rythmes relativement uniformes et plus ou moins rapides en fonction de la fertilité stationnelle. Choisir un traitement régulier c'est donc respecter l'évolution naturelle des forêts de pin d'Alep.

Par ailleurs, ce traitement est également le plus intéressant économiquement dans un contexte où les prix de vente des produits issus des forêts de pins d'Alep restent bas. En effet, la futaie régulière assure des volumes de coupes suffisamment importants pour rendre les lots attractifs sur le marché.

Toutefois, certains contextes particuliers peuvent justifier un mode de gestion irrégulier : la préservation d'un sol très sensible ou un objectif paysager spécifique par exemple. Il est dans ces cas préconisé d'intervenir par bouquets pour donner une chance à la régénération naturelle de s'effectuer, ce qui est impossible sous un couvert continu.

Ainsi, le domaine d'application des douze itinéraires recensés, et par conséquent celui de l'outil ici présenté, est toujours le même : un peuplement régulier pur ou majoritairement composé de pins d'Alep. Cependant, dans la mesure où la gestion irrégulière préconisée s'effectue par bouquets, il est possible d'appliquer l'outil à leur échelle, puisqu'ils constituent de petites unités de gestion régulière.

- **Des regroupements possibles grâce aux similitudes des préconisations :**

A objectifs égaux, les préconisations sont souvent similaires, ce qui a permis de faire ressortir trois grands types d'itinéraires qui couvrent l'ensemble des pratiques en vigueur et celles plus innovantes communément préconisées pour obtenir du bois d'œuvre. Ce travail d'uniformisation des itinéraires a conduit également à écarter certaines propositions dont l'infaisabilité avait été démontrée ultérieurement *(Chomel, 2015 ; AgroParisTech, 2017)*. Ceux qui sont ressortis de ce tri constituent la liste des scénarii sylvicoles que l'outil permettra de modéliser.

GRADIENT DE NIVEAU D'INTERVENTION	Intitulés	Objectifs	Exploitabilité	Effectif éclaircies	Effectif coupes	Travaux	Commentaires
	ONF récent Fertilité 3[4] Pratiques courantes[1]	BI et BE	30-45 cm à 90-110 ans	1	1	-	Retenu comme témoin
	Cigale minimum[2]	BI et BE	40 cm à 65 ans	0	2	Assistance à la régénération	Age et diamètre d'exploitabilité incompatibles
	ONF ancien Fertilité 3[3]	BI et BE	35-45 cm à 120 ans	1	2	Dépressage, assistance à la régénération (sous-solage ou labour)	Mis à jour en 2013, cycle trop long
	Cigale[2]	BI et BE + faible proportion de BO	40 cm à 95 ans	2	2	Assistance à la régénération	Très proche de l' « ONF récent Fertilité 2 »
	ONF récent Fertilité 2[4]	BI et BE + maximiser la part de BO	30-50 cm à 100-110 ans	2	2	Dépressage, assistance à la régénération (brûlage fort ou crochetage)	Très proche de « Cigale », amélioration augmentée avec le dépressage
	ONF récent Fertilité 1[4]	BI et BE + maximiser la part de BO	30-50 cm à 80-100 ans	2	2	Dépressage, assistance à la régénération (brûlage fort ou crochetage)	Compromis intéressant entre amélioration induite et investissements limités
	ONF ancien Fertilité 2[3]	BI et BE + faible proportion de BO	35-40 cm à 90 ans	3	1	Dépressage, assistance à la régénération (sous-solage ou labour)	Mis à jour en 2013, phase d'ensemencement en une étape inadaptée
	Dynamique sans investissement[2]	BO + faible proportion de BI et BE	40 cm à 95 ans	3	2	Assistance à la régénération	Intermédiaire proche de « ONF récent 1 & 2 » et « Dynamique-détourage »
	Dynamique -layonnage[2]	BO + faible proportion de BI et BE	40 cm à 75 ans	2	2	Détourage, layonnage, assistance à la régénération	Investissements importants mal valorisés par des éclaircies trop intenses
	ONF ancien Fertilité 1[3]	BI et BE + faible proportion de BO	35-45 cm à 80 ans	3	1	Dépressage, élagage, assistance à la régénération (sous-solage ou labour)	Mis à jour en 2013, phase d'ensemencement en une étape inadaptée, élagage très couteux
	Dynamique-détourage[2]	BO + faible proportion de BI et BE	40 cm à 85 ans	3	2	Détourage, layonnage, assistance à la régénération	Investissements importants pour une amélioration forte de la qualité. Le layonnage n'est pas nécessaire
	Théorique-dépressage[2]	BO + faible proportion de BI et BE	40 cm à 85 ans	4	2	Dépressage, assistance à la régénération	Trop d'investissements en éclaircie : jamais rentable

Sources : *[1] Retours d'expérience, 2019 ; [2] F.Chomel, Mémoire AgroParisTech-Alcina, 2015 ; [3]B.Couhert, ONF, 1992; [4]Quesney et Amandier, ONF, 2013*

Tableau III.1. : Inventaire des itinéraires sylvicoles existants pour le pin d'Alep

Afin d'être en cohérence avec les préconisations des guides et d'en permettre l'application sans ambiguïté, les classes de fertilité de référence utilisées dans l'outil sont les mêmes que celles sur lesquelles a été basée l'élaboration des itinéraires qui s'appliquent spécifiquement à une classe de fertilité (« ONF Fertilités 1, 2 et 3 »). Cette classification est issue de la simplification d'une déclinaison plus fine en cinq classes définies par un modèle de Chapman-Richards (Brochiéro et al., 1999) *qui indique plusieurs niveaux de croissance en hauteur des arbres selon l'âge, correspondant aux différentes potentialités stationnelles.*

Les itinéraires retenus pour les modélisations sont donc : ***[ANNEXE III.1]***

- ONF Fertilité 3, correspondant également aux pratiques courantes : cet itinéraire sera appliqué pour les trois fertilités et fera office de témoin. Nécessitant très peu d'investissements, ce mode de gestion n'a pas pour objectif de produire du bois d'œuvre. Il portera l'appellation **« Courant »** dans l'outil.
- ONF récents Fertilités 1 et 2 : ces itinéraires s'appliqueront respectivement et seulement en fertilités 1 et 2. Ils ont pour objectif d'améliorer la qualité du peuplement tout en limitant les investissements. Ils seront regroupés sous l'appellation **« Standard »** dans l'outil.
- Dynamique – détourage : cet itinéraire s'appliquera en fertilités 1 et 2 uniquement. Il vise à améliorer fortement la conformation des pins d'Alep pour en valoriser un maximum en bois d'œuvre. Pour cela, des investissements importants sont requis. Toutefois, étant donné qu'il y a de fortes présomptions que le layonnage ne permette pas d'améliorer la qualité, cette opération sylvicole a été retirée de l'itinéraire. Il portera l'appellation **« Dynamique »**.

De l'itinéraire le moins interventionniste, qui fait office de témoin des pratiques les plus courantes, au plus dynamique qui propose une gestion innovante à forte valeur ajoutée sur les débouchés finaux, l'outil doit permettre de comparer la rentabilité économique des investissements. Cela doit être fait en cohérence avec les possibilités de la station et la configuration de départ du peuplement. Pour cela, il est nécessaire de faire appel aux travaux de recherche qui ont abouti à l'élaboration d'un modèle de croissance fiable pour le pin d'Alep.

(2) Le modèle de croissance

- **Un modèle de référence au domaine d'application précis :**

La modélisation de la croissance du pin d'Alep a été le sujet de plusieurs études qui ont permis de fiabiliser considérablement les prédictions d'évolution de peuplements. Outre les tables de production initiales *(Couhert et Duplat, 1993)*, la référence est le modèle « NRG » élaboré au sein de l'INRA *(Dreyfus, 2001)*.

Le modèle NRG s'applique aux peuplements de pin d'Alep purs, réguliers et pleins. D'où la nécessité de restreindre le domaine d'application de l'outil à des unités de gestion présentant ces caractéristiques*. Il permet d'estimer l'évolution d'une forêt sur la base de la croissance individuelle annuelle de chaque tige, prenant en compte également l'ensemble du peuplement puisque le statut social de chaque arbre est un facteur déterminant.

L'élaboration de ce modèle s'est effectuée sur la base des données d'accroissement mises à disposition par l'Inventaire Forestier National dont les mesures débutent sur des arbres de diamètres supérieurs à 7,5 cm. C'est la raison pour laquelle le modèle n'intègre pas les stades juvéniles des forêts de pin d'Alep. Or, la majorité des travaux préconisés par les itinéraires techniques doivent se réaliser dans les très jeunes peuplements. Afin d'en estimer les effets et de pouvoir les intégrer dans les résultats fournis par l'outil, la bibliographie et l'expertise des gestionnaires forestiers rencontrés au cours de cette étude ont apporté des renseignements précieux sur la réaction des jeunes peuplements aux différents travaux envisageables dans les itinéraires.

- **Une fiabilité testée et renforcée :**

Ce modèle a fait l'objet d'une validation statistique rigoureuse réalisée sur un échantillon de 706 tiges réparties sur 56 placettes qui a révélé certains biais. Il s'agissait d'une surestimation globale du capital due à la fois à une sous-estimation de la mortalité naturelle et à des augmentations de diamètre en réaction aux éclaircies largement surestimées.

**En pratique, un coefficient de trouée a été ajouté à l'outil pour permettre son application dans des forêts non pleines et équiennes.*

Ces écarts avec la réalité ont été corrigés en deux phases par Mathieu Fortin, chercheur au LERFoB (dans le cadre du projet DOPALEP). Suite à la première étude de validation, une nouvelle version ajustée du modèle a été mise au point. Puis, c'est à la suite d'un projet étudiant réalisé par des élèves-ingénieurs de la Formation des Ingénieurs Forestiers *(AgroParisTech, 2017)*, qui a mis en évidence la persistance d'une surestimation du capital, qu'une seconde phase de corrections a abouti à la version du modèle utilisée pour l'élaboration du présent outil, intitulé « NRG2017 ».

- **Un support de mise en œuvre pratique et souple :**

Le modèle NRG a été intégré à la plate-forme de simulation CAPSIS. Cette application permet de modéliser l'évolution naturelle d'un peuplement de pin d'Alep dont les caractéristiques initiales sont renseignées par l'utilisateur : a minima, la fertilité et la densité de départ en nombre de tiges par hectare. En adéquation avec les possibilités du modèle, la simulation débute à partir de 15 ans.

Ensuite, l'évolution naturelle du peuplement est modélisée, sur un pas d'un an, renvoyant des informations dendrométriques très complètes : densité, surface terrière, volume, hauteur, diamètres, accroissement, largeur des cernes, espacement des tiges, autant de variables qui peuvent être visualisées en fonction du temps ou relativement entre elles (surface terrière en fonction de la hauteur par exemple).

L'utilisateur peut interrompre à tout moment l'évolution naturelle du peuplement en imposant une intervention dont il choisit les caractéristiques : l'intensité et le type (par le haut, par le bas ou centré).

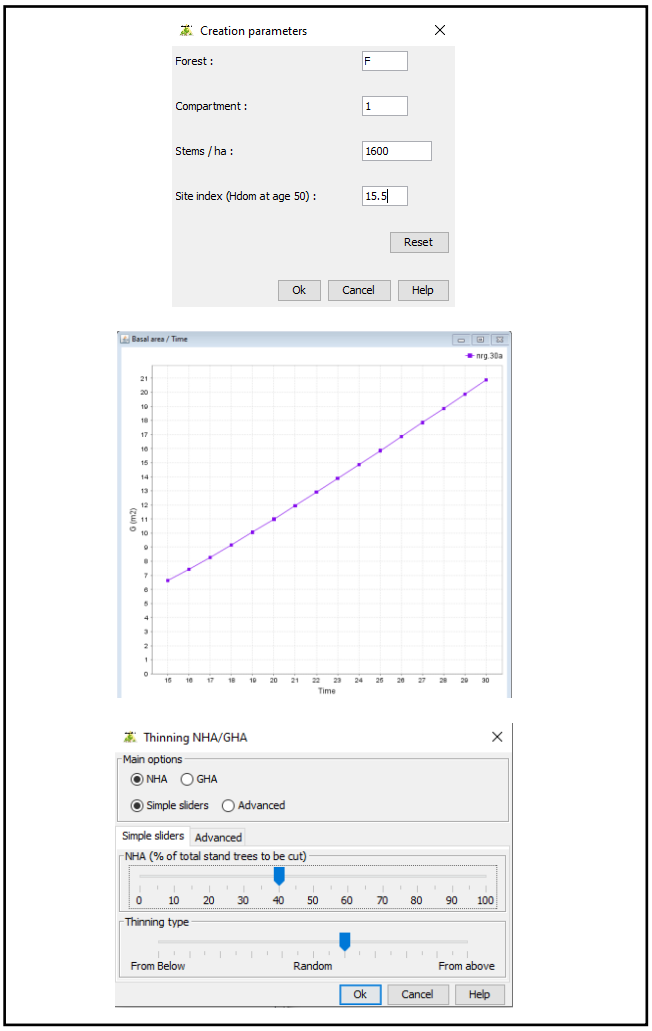


Figure III.1. :Aperçu du fonctionnement du logiciel CAPSIS

Cette application très performante a donc permis de simuler aisément l'application d'itinéraires précis à des peuplements spécifiques. De plus, la souplesse de CAPSIS, permet d'ajuster les renseignements initiaux et les intensités des interventions pour correspondre au mieux à la réalité et corriger les éventuels biais persistants malgré les corrections successives du modèle.

(3) Les estimations de proportions de qualité

Le modèle NRG2017 est très complet sur les données dendrométriques mais ne propose pas d'information qualitative. Or, l'enjeu de cet outil est d'évaluer les apports de chacun des itinéraires, notamment en termes d'amélioration de la qualité. Il a été choisi de retenir trois catégories de valorisation possibles, qui correspondent à celles identifiées pour l'élaboration du classement qualité *(partie IV)* : le bois d'industrie et d'énergie (BI/BE), le bois d'œuvre pour la fabrication de palettes, d'emballages et de coffrages (BOP) et le bois d'œuvre utilisable en structure (BOS).

Afin de quantifier la part de chacune de ces catégories à l'issue de chaque opération sylvicole, un certain nombre de principes vérifiés ont été considérés :

❶ Les proportions de qualité bois d'œuvre (palette et structure) sont plus importantes dans les bonnes fertilités.
❷ Dans les peuplements clairs (hors phase d'ensemencement), les arbres courbés, inclinés, très branchus et comportant des branches basses sont plus nombreux, ce qui diminue la part de bois d'œuvre.
❸ Les peuplements très denses sont plus sujets au développement de problèmes sanitaires tels qu'une prolifération de champignons (tramètes ou fomes principalement) déclassant les arbres concernés en bois d'industrie et d'énergie.
❹ Les perturbations fortes telles qu'une éclaircie tardive très intense ou le passage d'un incendie, très déstabilisantes pour le peuplement, favorisent le développement de cœurs résineux et de problèmes sanitaires, réduisant la part de tiges valorisables en bois d'œuvre.
❺ L'élagage naturel engendré par une phase de compression dans les jeunes peuplements permet d'améliorer la conformation et donc d'augmenter la part de qualité bois d'œuvre.
❻ L'élagage artificiel permet d'augmenter la part de qualité bois d'œuvre, d'autant plus fortement que le peuplement a manqué de la phase de compression initiale.
❼ Le dépressage est une étape particulièrement importante qui favorise la croissance des tiges les mieux conformées et permet un développement harmonieux du houppier (évitant ainsi la formation d'un bois décentré qui déprécie fortement sa qualité).
❽ Le dépressage en plein assure le développement d'une part de bois d'œuvre, le détourage ciblé des plus belles tiges permet d'augmenter cette part.
❾ Le marquage des tiges d'avenir permet de concentrer les efforts de favorisation et d'en assurer la constance au cours des éclaircies successives, pouvant être réalisées par des équipes de forestiers différentes, ce qui augmente la part finale de bois d'œuvre.
❿ Globalement, des éclaircies plus fréquentes et plus régulières favorisent un développement vigoureux et harmonieux des tiges de bonnes conformations et assurent la stabilité du peuplement. La proportion de qualité bois d'œuvre est ainsi augmentée.

Afin de traduire ces affirmations en données chiffrées intégrables dans le programme de calcul de l'outil, elles ont dû être pondérées sur la base d'inventaires de terrain et de résultats d'études antérieures.

Sur huit parcelles réparties dans les Bouches-du-Rhône, les proportions de trois catégories de qualité ont été estimées : bois d'industrie et d'énergie, bois d'œuvre palette, bois d'œuvre structure. Au total, 64 hectares ont été échantillonnés selon un protocole détaillé en *partie IV*. Les résultats de cette étude de terrain ont fourni des estimations réalistes de la qualité des peuplements de pin d'Alep issus d'un premier ou d'un deuxième cycle. Pour chaque parcelle, l'historique de la gestion passée a été consulté et la fertilité a été relevée afin d'étudier l'effet des investissements sylvicoles et la corrélation entre qualité de la station et qualité des arbres. Cela a permis de chiffrer les affirmations **1**, **4** et **5**.

Au cours de cet inventaire, les critères déclassants ont été systématiquement relevés sur chaque arbre inventorié. Cette information a été mise en relation avec la structure du peuplement et son historique de gestion afin de préciser les affirmations **2**, **3**, **4** et **10**.

Pour chiffrer les effets des travaux correspondant aux affirmations **6**, **7** et **8** les retours d'expérience des techniciens de l'ONF et les études réalisées à ce sujet par le bureau d'étude Alcina ont servi de référence. Il en résulte les estimations suivantes :

Principes	Sources	Chiffres*
1	Inventaire de terrain	**A l'issue du premier cycle :** Fertilité 1 : BI/BE 55 % ; BOP 30 % ; BOS 15 % Fertilité 2 : BI/BE 60 % ; BOP 30 % ; BOS 10 % Fertilité 3 : BI/BE 100 % Ces proportions seront appliquées pour des peuplements en entrée de l'outil à des stades avancés, présupposés issus d'une sylviculture peu dynamique. **A l'issue des cycles suivants :** Ces proportions seront augmentées des facteurs définis par la suite en fonction de l'itinéraire testé. Ces chiffres seront également appliqués à l'issue d'un premier cycle pour les peuplements en entrée à un stade jeune car l'itinéraire choisi aura pu être appliqué dès ce premier cycle.
2	Inventaire de terrain	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements issus de structures très claires :** BOS : - 40 % BOP : + 10 % *la densité de branches n'est pas déclassante pour la palette, seules les grosses branches le sont, or, même dans un peuplement clair, elles sont rares* BI/BE : + la différence *(5 à 20 %, selon les proportions de départ)*
3	Inventaire de terrain	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements issus de structures très denses :** BOS : - 30 % BOP : - 30 % BI/BE : + la différence *(5 à 20 %, selon les proportions de départ)*
4	Inventaire de terrain	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements ayant subi une perturbation forte :** *dépend de l'événement, ne peut être chiffré* BOS : - x % BOP : - y % *le cœur résineux et une surface carbonisée ne sont pas déclassants pour la palette, en revanche les altérations sanitaires le sont* BI/BE : + la différence
5	Inventaire de terrain	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements n'ayant pas bénéficié d'une phase de compression :** BOS : - 30 % BOP : + 15 % *la densité de branches n'est pas déclassante pour la palette, seules les grosses branches le sont, or, même en l'absence de phase de compression, elles sont rares* BI/BE : + la différence *(5 à 20 %, selon les proportions de départ)*
6	Etudes antérieures	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements ayant bénéficié d'un élagage d'environ 200 t/ha :** BOS : + 10 % BOP : - 5 % BI/BE : = *Il y a un transfert de tiges valorisables en palette au débouché structure mais pas d'augmentation global de la quantité de bois d'œuvre.*
7	Etudes antérieures	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements ayant bénéficié d'un dépressage en plein :** BOS : + 40 % BOP : + 40 % BI/BE : - la différence *(5 à 20 %, selon les proportions de départ)*
8	Etudes antérieures	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements ayant bénéficié d'un détourage :** BOS : + 50 % BOP : + 30 % BI/BE : - la différence *(10 à 20 %, selon les proportions de départ)*
9	Estimation logique	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements ayant bénéficié d'un marquage des tiges objectifs :** BOS : + 20 % BOP : - la différence *(15 à 25 %, selon les proportions de départ)* BI/BE : - la différence *(15 à 25 %, selon les proportions de départ)* *Cette opération n'a pas d'effets physiques directs sur le développement des arbres mais permet d'éviter les pertes en assurant une continuité dans les tiges favorisées à chaque étape*
10	Inventaire de terrain	**Variations des proportions de qualité dans les peuplements en fonction du nombre d'éclaircies :** 2 éclaircies : BOS + 20 % ; BOP + 20 % ; BI/BE - la différence *(15 à 25 %, selon les proportions de départ)* 3 éclaircies : BOS + 40 % ; BOP + 40 % ; BI/BE - la différence *(20 à 40 %, selon les proportions de départ*

Tableau III.2. : Détails des estimations de variations de qualité induites par la structure du peuplement et les opérations sylvicoles

**Les variations indiquées sont les variations relatives obtenues à l'issue de la coupe finale par rapport aux proportions de référence du premier cycle (qui correspondent aux parts de qualité moyennes observées dans des peuplements standards n'ayant pas bénéficié d'itinéraires sylvicoles spécifiques).*

Un coefficient réducteur de la qualité en conséquence à une perturbation forte (passage d'un incendie, tempête, éclaircie violente, …) subie dans la vie du peuplement a été intégré à l'outil. Ce type d'événement est extrêmement variable en intensité, c'est pourquoi le niveau de dégâts induits en proportion de tiges dépréciées a été laissé au choix de l'utilisateur.

Sur la base de ces estimations, les proportions de chaque qualité ont été intégrées dans l'outil dans le but de proposer un bilan économique à l'issue de chacune des opérations sylvicoles et de l'ensemble de la gestion réalisée à moyen ou long terme. ***[ANNEXE III.2]***

(4) Les estimations des variables économiques

- **Les renseignements nécessaires :**

Afin de proposer un bilan économique de chacune des actions sylvicoles, les données économiques suivantes sont nécessaires :

- Postes de dépenses : coûts d'exploitation modulés en fonction de la difficulté, coûts du dépressage, du détourage, du marquage des tiges d'avenir, de l'élagage et des travaux de préparation à la régénération et montant des frais de gestion.
- Recettes : prix de vente sur pied du pin d'Alep (pur et en mélange avec du chêne vert ou pubescent) et prix de vente des bois bord de route selon leur qualité (BI/BE, BO Palette, BO Structure).

Afin de garantir l'obtention de résultats économiques réalistes, capables de s'adapter à toutes les évolutions du marché et de permettre les comparaisons de configurations plus ou moins optimistes, l'ensemble des variables économiques sont paramétrables dans l'outil. L'utilisateur peut donc choisir de fixer lui-même les prix. Cependant, pour simplifier l'usage en méconnaissant les prix du marché et disposer de niveaux de référence, des prix par défaut ont été inclus dans l'outil que l'utilisateur est libre de conserver ou de modifier.

- **La fixation des valeurs par défaut :** ***[ANNEXE III.3]***

Pour les postes de dépenses et les prix de vente de bois sur pied, le recul est suffisant pour proposer un prix moyen réaliste. En revanche, la valorisation du pin d'Alep en bois d'œuvre lorsque le potentiel existe, que cet outil se veut de favoriser, nécessite une étape de tri pour constituer des lots différenciés. Le mode de vente le plus adapté est donc le bois façonné. Or, il n'existe pas à ce jour de référence en termes de prix de vente bord de route de bois d'œuvre de structure en pin d'Alep. Une estimation a donc dû être construite, basée sur les réflexions suivantes :

- Les qualités intrinsèques du pin d'Alep sont équivalentes à celles du pin sylvestre et meilleures que celles du pin maritime, ce qui permet de positionner un niveau de prix relatif.
- Mais, la demande en pin d'Alep est pour le moment quasi-inexistante, ce qui doit en limiter fortement le prix de vente.
- Toutefois, il est raisonnable de tabler sur une augmentation de cette demande dans un contexte où la normalisation est en place, où l'intérêt pour la valorisation locale est grandissant et sachant que l'aire de répartition du pin d'Alep s'étend.
- Cependant, avant d'atteindre un niveau de prix à la juste valeur mécanique du pin d'Alep (équivalent aux résineux de qualité égale), la prise de risque assumée par les premiers scieurs doit être rémunérée.
- Le prix de bois d'œuvre Structure estimé est celui de pins au volume unitaire élevé (environ 0,9 m^3) car la valorisation de cette qualité ne sera effectuée que dans des peuplements matures, de calibre bois moyen minimum.

Il en résulte un prix de vente estimé du bois structure de pin d'Alep correspondant à la fourchette basse des prix moyens des résineux de qualité égale ou légèrement inférieure, mais pour lesquels un marché est déjà en place : par défaut, il sera fixé à 65€/m^3 vendu bord de route.

A volumes unitaires équivalents (0,9 m^3), le prix des essences qui ont servi à la fixation relative de celui du pin d'Alep sont en 2019 :

- Pin maritime : 67€/m^3
- Pin sylvestre : 69€/m^3
- Epicéa : 76€/m^3
- Sapin pectiné : 70€/m^3

Source : France Bois forêt

Pour calculer la rentabilité globale des scénarii à moyen et long termes, un taux d'actualisation doit s'appliquer : il est communément estimé à 3 % en économie forestière mais peut être modulé entre 1 % et 5 % en fonction de la sensibilité de l'utilisateur.

Ainsi, la mise en lien des trois sources relatives à la sylviculture du pin d'Alep (itinéraires, modèle de croissance, inventaire de la qualité) est indispensable car elles sont interdépendantes et doit permettre d'aboutir à un outil fiable et opérationnel de mise en application concrète de notions théoriques. La performance économique de ces itinéraires théoriques s'évalue ensuite sur la base de données de prix correspondant à l'état du marché actuel mais pouvant être mises à jour pour en suivre l'évolution.

b. La structure

(1) Objectifs

Le but de cet outil est de modéliser l'évolution d'une forêt de pin d'Alep spécifique selon différents scénarii sylvicoles afin d'évaluer l'intérêt de chacun et d'en permettre la comparaison.

Il doit renseigner sur les caractéristiques dendrométriques et structurelles du peuplement sur un pas d'un an. De plus, chaque opération sylvicole fait l'objet d'un bilan économique spécifique qui est inclus dans un calcul de la rentabilité globale du scénario.

La souplesse et l'adaptabilité de cet outil en font son intérêt et sa fiabilité :

- L'évolution dendrométrique est adaptée à la fertilité de la forêt analysée et à sa configuration de départ (stade de développement, structure, capital).
- Différents niveaux de précision sont proposés en fonction des informations dont dispose l'utilisateur : de la tendance générale à l'analyse fine.
- L'utilisateur est libre de choisir l'horizon temporel de la modélisation (de 10 à 150 ans).
- Les prix sont complètement modulables.
- Certains travaux sylvicoles et aménagements logistiques sont optionnels.
- La banque de données sur laquelle sont basés tous les résultats pourra être mise à jour au fil des avancées de la recherche et du développement relatifs à la croissance du pin d'Alep et à sa sylviculture.

L'ergonomie et la facilité d'utilisation sont des conditions indispensables à sa mise en pratique :

- L'interface de saisie se veut claire et simple.
- Les résultats sont présentés sous la forme de tableaux et de graphiques visuellement efficaces.
- L'utilisation de boutons, de cases à cocher et de listes simplifie et accélère la navigation entre les différentes pages tout en limitant les éventuelles erreurs de saisie et de manipulation.

(2) Supports de développement

Cet outil associe deux logiciels : les performances de calculs du simulateur CAPSIS et les possibilités de création d'une interface interactive proposées par Microsoft Excel et son langage de programmation Visual Basic. En effet, les données seront fournies par le premier et le produit présenté à l'utilisateur aura comme support le second.

(3) Principe de fonctionnement et composition

L'application met en lien des données de simulations calculées à partir d'un grand nombre de structures de peuplement initiales et les renseignements entrés par l'utilisateur. Ces derniers concernent la zone spécifique qu'il souhaite analyser et le scénario qu'il veut tester sur un horizon de temps également au choix.

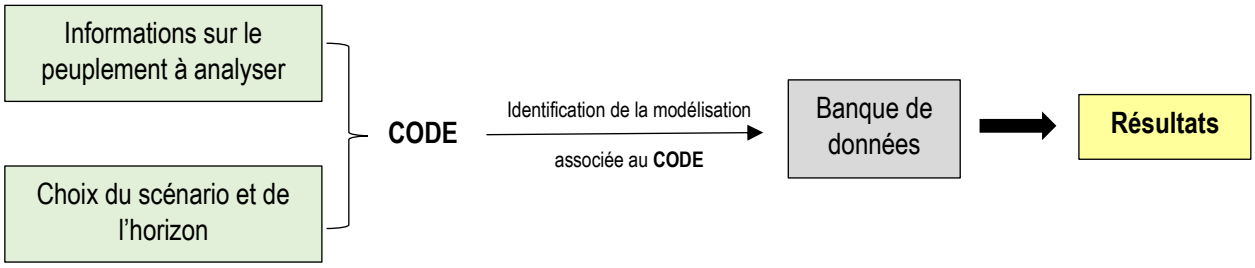


Figure III.2. : Principe général du fonctionnement de l'application

- **Les variables d'entrées :**

Les types de forêts référencés doivent permettre de couvrir l'ensemble des configurations possibles pour proposer des résultats tout à fait adaptés aux spécificités du peuplement saisi par l'utilisateur. Toutefois, il faut tenir compte des différents niveaux de connaissances et de moyens de mesure des variables dendrométriques au sein d'une forêt : l'outil doit pouvoir être appliqué aussi bien à un peuplement dont on a peu d'informations, qu'à une forêt décrite de façon détaillée. Dans le premier cas, l'outil renvoie une tendance générale crédible, bien que peu précise, et dans le second, il propose des résultats fiables et précis.

C'est pourquoi, différents niveaux de précision ont été mis en place en adéquation avec la quantité d'informations complémentaires ajoutées aux variables initiales obligatoires :

Informations de base obligatoires	**Informations complémentaires facultatives**			
Structure, composition, calibre, capital, fertilité (saisie directe ou couple âge-hauteur)	Densité	Diamètre dominant	Surface terrière	Taux de trouées*
GRADIENT DE PRECISION				
Moyen	Assez bon	Bon	Très bon	Très bon

Tableau III.3. : Données d'entrée de l'outil et niveaux de précision correspondants

**La notion de « taux de trouée » a été incluse pour pallier au manque d'homogénéité de certaines unités de gestion analysées par l'outil. Bien qu'il soit préconisé la stricte application à des zones homogènes, l'expérience montre qu'il est difficile d'y parvenir dans de nombreux cas. C'est pour ne pas exclure d'emblée les unités imparfaitement homogènes, tout en conservant la fiabilité des résultats, que le taux de trouée intervient, si l'utilisateur le spécifie, comme un facteur diminuant les variables dendrométriques. De 5 % minimum, il est plafonné à 50 %.*

L'expérience des tests de l'outil révèle que ce niveau de trouée n'est quasiment jamais nul car les forêts de pin d'Alep du sud-est de la France sont très rarement pleines et équiennes comme le peuplement type à partir duquel le modèle de croissance et les itinéraires sylvicoles ont été élaborés. C'est pourquoi, il est conseillé dans sa mise en pratique, d'utiliser cette fonction de l'outil pour obtenir des résultats réalistes.

Quant aux scénarii des simulations, il en existe autant qu'il y a d'itinéraires sélectionnés pour être inclus dans l'outil, déclinés par fertilité (restreints à celles où ils sont applicables) :

Type	Courants			Standards		Dynamiques	
Déclinaisons par fertilité	Courant 1	Courant 2	Courant 3	Standard 1	Standard 2	Dynamique 1	Dynamique 2

Tableau III.4. : Itinéraires sylvicoles traités dans l'outil

A cela s'ajoutent les informations relatives aux conditions d'exploitation et les prix qui permettent de calculer le résultat économique de chaque opération et de comparer la rentabilité des différents itinéraires.

- **Lien avec la banque de données :**

La banque de données est composée de simulations réalisées sur la base de configurations de peuplements initiales variées auxquelles l'ensemble des itinéraires ont été appliqués. Ces forêts types, toutes composées de pin d'Alep évidemment, et traitées en régulier, se distinguent par :

- Leur capital sur pied : densité, surface terrière, volume
- Le calibre des tiges : diamètres dominant et quadratique
- Le niveau de fertilité de la station : 1, 2 ou 3
- Le stade de développement : âge, positionnement dans l'itinéraire
- L'itinéraire qui y est appliqué : le stade de développement dépendant spécifiquement des étapes de chaque itinéraire, il a fallu créer des peuplements de référence propre à chacun

Au total, ce sont donc 78 combinaisons de variables initiales et de scénarii qui ont fait l'objet de simulations constituant 78 peuplements de référence ***[ANNEXE III.4].*** Il en résulte un grand nombre de conditions dendrométriques et stationnelles de départ qui permet de repositionner n'importe quelle configuration de peuplement initiale dans une modélisation répertoriée dans la banque de données. Ce positionnement s'effectue selon un code spécifique construit à partir des informations saisies par l'utilisateur sur sa propre forêt : à chaque renseignement sur le peuplement y est associé un morceau. Ce code est plus ou moins long selon la quantité d'informations saisies et il en découle un positionnement plus ou moins précis dans les simulations.

Structure		**Composition en essences**		**Calibre**		**Capital sur pied**		**Densité (t/ha)**		**Diamètre dominant (cm)**		**Surface terrière (m^2/ha)**	
Futaie régulière	F	Pin d'Alep pur	PA	renouvellement (très jeune peuplement)	R	très claire (< 10m2/ha)	0	> 2000	2500	17,5-22,5	20	< 10	8
		Pin d'Alep en mélange	PA	petits bois prépondérants	P	pauvre ou claire (10-15 m2/ha)	1	1750 - 2000	1800	22,5-27.5	25	10 - 15	12
				bois moyens prépondérants	M	équilibrée (15-25 m2/ha)	2	1500 - 1750	1600	27,5-32,5	30	15 - 20	17
				gros bois prépondérants	G	riche ou dense (>25 m2/ha)	3	1250 - 1500	1300	32,5-37,5	35	20 - 25	22
						semis/gaulis/perchis	R	1000 - 1250	1100	>37,5	40	25 - 30	27
								800 - 1000	900			30 - 35	32
								600 - 800	700			> 35	35
								400 - 600	500			NA	
								200 - 400	300				
								< 200	150				

Exemple :

Un peuplement pur de pin d'Alep traité en futaie régulière, composé majoritairement de petits bois (21 cm de diamètre dominant), clair (13 m^2/ha de surface terrière), d'une densité de 460 t/ha, a pour code : F-PA-1-500-20-12
Son positionnement dans les itinéraires sera très précis.

Ce même peuplement dont on ne connaît pas précisément la densité, le diamètre dominant et la surface terrière, a pour code : F-PA-1
Son positionnement dans les simulations sera moins précis.

Tableau III.5. : Détails de la codification des données d'entrée

Ainsi, une fois le code établi, le programme est en mesure d'identifier le point de départ de lecture des données dans le scénario choisi par l'utilisateur :

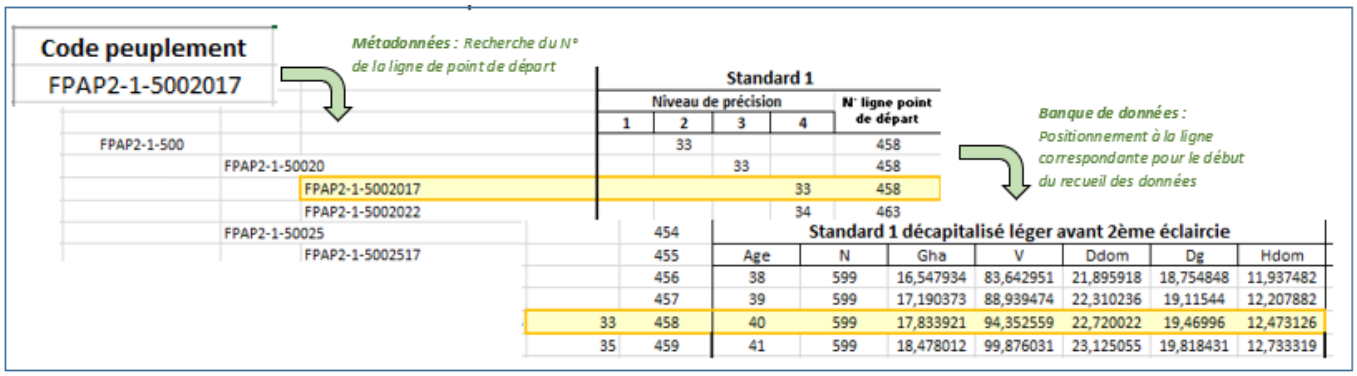


Figure III.3. : Processus de positionnement des données d'entrée dans la banque de données

- **Calcul du bilan économique :**

La lecture des données permet d'obtenir directement les variables dendrométriques par an. De plus, les opérations effectuées chaque année selon l'itinéraire choisi sont indiquées. Ces informations permettent alors de calculer un résultat économique annuel selon la formule suivante :

$$B_i = Ri - Di$$

Ri = recettes de l'année i (€)
Di = dépenses de l'année i (€)

L'ensemble des bilans économiques annuels sont utilisés pour calculer la rentabilité globale de l'itinéraire selon la formule du Bénéfice Actualisé Simple (BAS) (appelé aussi Valeur Actualisée Nette VAN). Cette formule permet de comparer la rentabilité de scénarii de même durée. Le principe est d'additionner les bénéfices actualisés perçus au cours de la vie du peuplement sur l'horizon de temps choisi :

$$BAS = \sum_{j=0}^{h} \frac{Bi}{(1+r)^j}$$

h = durée du projet (années)
j = nombre d'années écoulées depuis la décision
Bi = bénéfices de l'année i (€)
r = taux d'actualisation

Grâce à cette formule, l'outil mesure donc la rentabilité globale de chaque scénario testé.

- **Eléments de sorties :**

Deux types de sorties sont proposées :

- A l'échelle d'un scénario individuel, l'évolution annuelle des variables principales dendrométriques (densité, surface terrière, volume sur pied, diamètres dominant et quadratique et hauteur dominante) sur l'horizon de temps choisi est représentée sous forme de graphiques. Le programme des opérations sylvicoles appliquées est détaillé dans un tableau et le bilan économique associé fait l'objet d'un second tableau. ***[ANNEXE III.5]***
- A l'échelle d'une série de scénarii testés, les bilans économiques individuels de chaque scénario sont affichés et ordonnés selon leur rentabilité dans un tableau récapitulatif auquel est associée une représentation graphique permettant de visualiser les écarts. ***[ANNEXE III.6]***

(4) Constitution de la banque de données

La banque de données a été élaborée grâce au logiciel de modélisation CAPSIS dans lequel la dernière version du modèle de croissance du pin d'Alep NRG2017 est intégrée. Une méthodologie rigoureuse a été appliquée pour la constituer car il s'agit de l'élément central à la base de tous les résultats de l'outil. Elle détermine donc sa fiabilité.

- **La méthodologie :**

Afin d'obtenir tous les types de peuplements de référence souhaités, les variables initiales ont été modulées : la densité à 15 ans et la hauteur dominante à 50 ans qui implique le niveau de fertilité.

La grande souplesse du logiciel permet de sélectionner précisément les années d'interventions, les types d'éclaircies (par le haut ou par le bas) et leurs intensités. Les différents itinéraires ont donc pu être suivis précisément. Dans les cas de configurations de peuplements hors norme, des opérations délibérément retardées ou des éclaircies de rattrapage ont pu être modélisées sans problème conformément aux recommandations des itinéraires pour ces cas de figure.

A la suite de chacune des modélisations, les données suivantes ont été recueillies et inscrites dans la banque de données (évolutions en fonction du temps au pas d'un an) : la densité, la surface terrière, le volume sur pied, les diamètres quadratique et dominant et la hauteur.

- **Les difficultés rencontrées :**

CAPSIS est construit de telle sorte qu'il est impossible de démarrer une simulation après 15 ans. Il a donc été nécessaire, pour les peuplements de référence à des stades plus avancés, d'imaginer l'historique de gestion sylvicole pour les amener artificiellement au point de départ souhaité. Les hypothèses ont été établies de manière empirique sur la base des retours d'expérience et en donnant une attention particulière au réalisme des évolutions conduites.

Par ailleurs, il a été remarqué, malgré les phases successives d'ajustements subies par le modèle NRG, la persistance d'une surcapitalisation dans les peuplements laissés en libre évolution pendant plusieurs décennies. Ce problème, concernant les forêts de surfaces terrières élevées était particulièrement fréquent dans les scénarii « Courant », car la sylviculture très peu interventionniste laisse beaucoup de place à l'évolution naturelle. Cela aboutissait à des bilans économiques très favorables à ces types d'itinéraires car les volumes récoltés étaient si élevés que, même à prix de vente sur pied bas, les recettes étaient considérables. Afin de confirmer qu'il s'agissait bien d'anomalies, ces résultats ont été confrontés aux ordres de grandeurs des volumes de coupes effectivement réalisées, aussi bien par les gestionnaires forestiers d'Alcina, qu'à l'Office National des Forêts. De plus, les campagnes de terrain réalisées pour l'exploitation des données Sentinel et l'élaboration du classement qualité ont donné l'occasion de parcourir une surface suffisamment importante de forêts de pins d'Alep pour identifier un plafond de volume sur pied s'approchant de la réalité. En confrontant ces informations, la conclusion est claire, une surcapitalisation anormale persiste :

Volume <u>maximal</u> des coupes finales simulées par CAPSIS dans les itinéraires « Courant »	**Volume sur pied <u>maximal</u> observé sur le terrain**	**Ordres de grandeurs des volumes <u>maximaux</u> dans les coupes réelles**
383 m^3/ha	315 m^3/ha	200 m^3/ha

Tableau III.6. : Comparaison des volumes maximaux CAPSIS-Terrain-Coupes réelles

La raison ne peut être une sous-estimation de la mortalité naturelle des tiges (problème identifié dans la première version du modèle NRG) car celle-ci a été incluse ultérieurement sur la base de mesures réelles de l'auto-éclaircie dans les forêts de pin d'Alep. En revanche, on peut supposer une sous-

estimation de la diminution de l'accroissement individuel des tiges dans les peuplements de fortes densités. Partant de cette hypothèse, il faudrait alors ajuster le modèle en augmentant l'effet de la concurrence sur la vitesse de croissance. Il s'agit d'une proposition d'amélioration mais cela ne fait pas partie des objectifs de cette étude.

En attendant une éventuelle nouvelle version du modèle NRG2017 corrigée, l'enjeu du développement de cet outil est de permettre l'adaptation ultérieure du programme de calcul pour parer à cette éventualité : c'est le cas, puisque la banque de données peut être mise à jour sans problème sans altérer l'applicabilité de l'algorithme. De plus, dans l'objectif de proposer un outil opérationnel dès à présent, il a été décidé d'inclure directement dans la banque de données un facteur correctif permettant d'aboutir à des niveaux de volumes réalistes. La valeur de ce coefficient a été définie au regard du capital réellement mesuré dans les forêts les plus denses. Il s'applique au-delà du seuil de surface terrière de 30 m^2/ha en imposant un accroissement annuel ralenti, sans le stopper.

Valeurs calculées par le modèle				Valeurs ajustées par le facteur correctif			
Age	N	Gha	V	Age	N	Gha	V
78	568	30,2339202	250,909709	78	568	30,0304039	247,5248
79	568	30,7769349	257,121076	79	568	30,3307079	250,00005
80	568	31,3136434	263,309132	80	568	30,634015	252,50005
81	567	31,8103512	269,200205	81	567	30,9403552	255,02505
82	567	32,3336852	275,327909	82	567	31,2497587	257,5753
83	566	32,788544	280,890628	83	566	31,5622563	260,15106
84	564	33,2247422	286,339146	84	564	31,8778789	
85	562	33,6493794	291,701177	85	562	32,1966576	
86	562	34,1460852	297,68162	86	562	32,5186242	
87	562	34,6359621	303,622203	87	562	32,8438105	
88	560	35,0076565	308,545492	88	560	33,1722486	
89	559	35,4284457	313,909451	89	559	33,5039711	
90	557	35,800087	318,858535	90	557	33,8390108	
91	556	36,200769	324,059387	91	556	34,1774009	
92	556	36,6576148	329,77461	92	556	34,5191749	
93	556	37,1074664	335,440412	93	556	34,8643666	
94	555	37,4899642	340,510228	94	555	35,2130103	
95	552	37,7888651	344,857361	95	552	35,5651404	
96	551	38,1733331	349,964261	96	551	35,9207918	
97	548	38,4086949	353,699849	97	548	36,2799997	
98	547	38,7628118	358,522421	98	547	36,6427997	
99	546	39,1218483	363,40153	99	546	37,0092277	305,04757
100	544	39,3726534	367,259754	100	544	37,37932	308,09805

Après correction, le volume final maximal retenu dans la banque de données est 312 m^3/ha, il apparait dans le cas d'un peuplement très peu travaillé sur une très bonne station (itinéraire « Courant », fertilité 1)

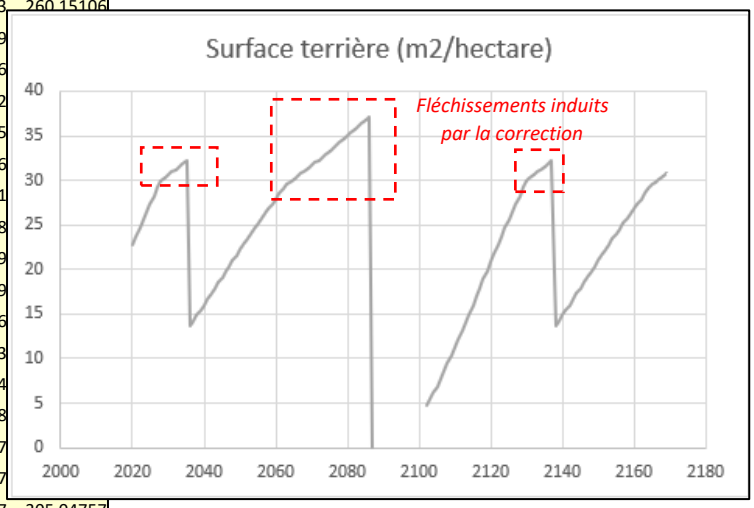


Figure III.4. : Visualisation de l'effet des corrections sur les surfaces terrières très élevées simulées dans CAPSIS

Ainsi, ces deux difficultés ayant été solutionnées, la banque de données a été mise au point, ce qui a abouti à une base de calcul précise et réaliste à partir de laquelle l'interface a pu être construite.

(5) Plan de l'interface

Après utilisation du logiciel de modélisation CAPSIS, c'est sur Excel que l'application interactive de simulation a été développée. L'organisation en pages par type d'information, la possibilité de créer des liens pratiques (boutons, cases à cocher) entre elles, celle de contraindre la saisie (liste déroulante, types de données imposés) et le fait qu'Excel soit un logiciel familier pour beaucoup, sont autant de facteurs qui favorisent l'élaboration d'un environnement convivial pour l'utilisateur de l'outil.

Dans le domaine du visible pour l'utilisateur, il y a quatre pages :

- Deux pages d' « entrées » contenant les informations initiales sur le peuplement, le choix du scénario et les valeurs de prix : modifiables par l'utilisateur.
- Deux pages de « sorties » affichant les résultats par scénario et globaux, en comparant les scénarii : consultables mais non modifiables par l'utilisateur.

En parallèle, il existe douze pages masquées pour l'utilisateur constituant la banque de données issues des modélisations CAPSIS et un support de calcul. Les métadonnées permettant de contraindre la saisie et de proposer des valeurs par défaut figurent également dans ces pages.

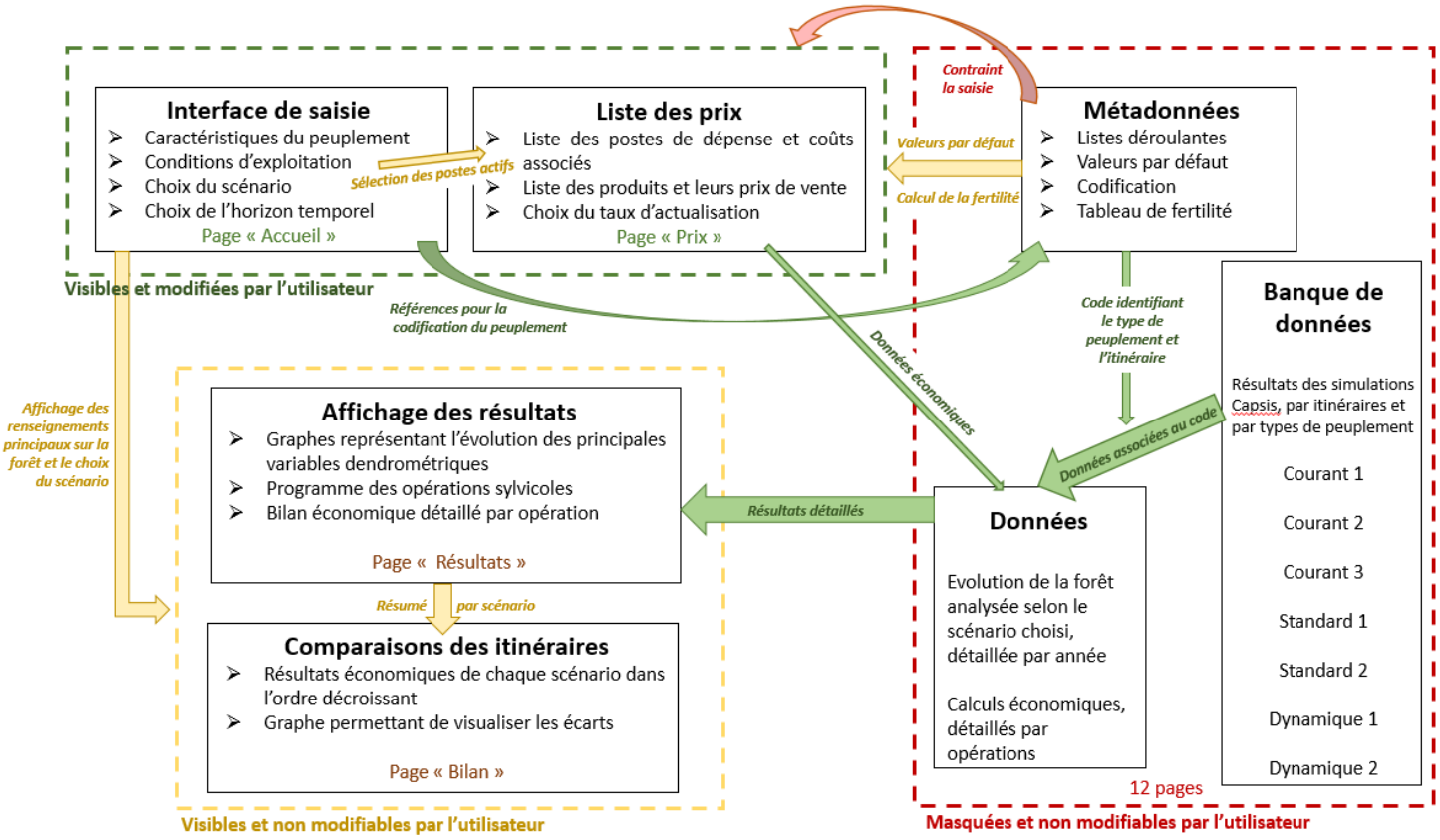


Figure III.5. : Plan schématique de l'outil de simulation

3. Mise en pratique : proposition de l'itinéraire sylvicole le plus valorisant

L'objectif de cet outil n'est pas d'identifier l'itinéraire le plus performant et d'en tirer des préconisations globales. Au contraire, ce qui fait l'intérêt de cette application est sa grande adaptabilité à n'importe quel type de peuplement permettant d'aboutir à des conseils de gestion spécifiques à chaque cas.

Toutefois, dans un contexte où le manque de recul sur les performances des différents itinéraires sylvicoles préconisés complique et rend plus incertaines les décisions de gestion, il est intéressant de

mener une étude comparative des résultats de l'outil sur un échantillon de peuplements de structures et de stades variés. Outre les tendances quant aux scénarii les plus favorables par type de peuplement que cela a fourni, cette série de tests a été l'occasion d'éprouver l'outil pour y détecter puis corriger les erreurs et pour en améliorer l'ergonomie.

a. Critères d'évaluation de la performance des scénarii

Les programmes d'opérations sylvicoles proposés en sortie par l'outil ont pour principe de maximiser la valorisation de la qualité. C'est-à-dire que, dès lors qu'il y a une part des tiges valorisables en bois d'œuvre, le mode de vente choisi est le bois façonné, de sorte à permettre le tri et par là la vente de chacune des grumes à sa juste valeur. Un seuil minimal de volume par classe de qualité a tout de même été intégré, afin d'éviter de préconiser des coupes invendables pour cause de quantités trop faibles pour être attractives : en-dessous de 30 m^3 (soit la capacité approximative d'un camion-porteur), le lot est considéré comme trop petit pour être vendu individuellement. Deux cas de figure sont alors possibles :

- Le volume total de BO est inférieur à 30 m^3 : l'outil propose alors une vente sur pied, sans distinction de qualités
- Le volume de BOS est inférieur à 30 m^3 mais le volume total de BO dépasse les 30 m^3 : l'outil propose alors une vente en bois façonné comportant un lot de BO unique qui regroupe le BOP et les quelques grumes de BOS, vendu au prix de la palette

En appliquant ce principe, l'outil ne propose pas nécessairement le scénario le plus rentable économiquement. Cela est cohérent avec le but premier de sa mise en place : promouvoir une sylviculture d'amélioration de la qualité des peuplements de pin d'Alep en y optimisant la part de bois d'œuvre. Cet objectif assumé ne remet pas en question la fiabilité des résultats : en effet, les bilans économiques, calculés sur la base de données de simulation validées scientifiquement, correspondent à la réalité et sont intégralement modulables par modification des prix par l'utilisateur. Les plus favorables peuvent être issus de tous les itinéraires, en adéquation avec le contexte local.

Au contraire, maximiser la valorisation de la qualité peut conduire à la proposition d'opérations à résultat négatif. Ce cas de figure est rare : il correspond par exemple à des coûts d'exploitation particulièrement élevés dans un peuplement où la proportion de qualité BO est suffisamment importante pour que le mode de vente proposé soit le bois façonné. Alors que l'outil aurait pu annuler ces situations en imposant la vente sur pied quand le résultat en bois façonné est négatif, il a été choisi de les conserver pour anticiper d'éventuelles améliorations des conditions d'exploitation. Cela peut d'ailleurs mettre en évidence les parcelles où des projets de desserte pourrait s'avérer intéressants.

Toutefois, dans la majorité des cas, l'optimisation de la part de qualité est compatible avec l'optimisation de la rentabilité : selon les deux principes, le scénario optimal est le même.

L'étude comparative suivante présente donc, par peuplement, les écarts entre les bilans économiques à l'issue de plusieurs scénarii sylvicoles pour lesquels la part de BO est optimisée, et non la rentabilité.

b. Composition de l'échantillon de peuplements testés

Les peuplements d'entrée ont été sélectionnés de façon à disposer de structures variées et à divers stades de développement. Pour chacun, les simulations ont été effectuées pour les fertilités 1 et 2, auxquelles peuvent s'appliquer les itinéraires principaux*. Il en résulte la liste suivante :

- **Fertilité 1 :**

N°	Densité (t/ha)	Diamètre dominant (cm)	Surface terrière (m^2/ha)	Stade de développement positionné dans les itinéraires par l'outil		
				Courant 1	**Standard 1**	**Dynamique 1**
1	1200	20	22	*Jamais éclairci (issu d'une forêt claire)*	*Très surcapitalisé avant éclaircie 2*	*Surcapitalisé avant éclaircie 2*
2	700	20	14	*Tout juste éclairci pour la 1ère fois (issu d'une forêt dense)*	*Tout juste éclairci pour la 1ère fois*	*Très décapitalisé avant éclaircie 2*
3	700	30	28	*Eclairci une fois il y a 18 ans (issu d'une forêt dense)*	*Très surcapitalisé avant coupe 1*	*Très surcapitalisé avant coupe 1*
4	250	35	24	*10 ans avant la coupe finale (issu d'une forêt claire)*	*Juste avant coupe 1*	*Peu avant coupe 1*
5	120	35	9	*Peuplement mature décapitalisé 10 ans avant coupe finale*	*Juste après coupe 1 (issu d'un peuplement décapitalisé)*	*10 ans avant coupe finale*

Tableau III.7. : Caractéristiques initiales des peuplements échantillonnés en fertilité 1

- **Fertilité 2 :**

N°	Densité (t/ha)	Diamètre dominant (cm)	Surface terrière (m^2/ha)	Stade de développement positionné dans les itinéraires par l'outil		
				Courant 2	**Standard 2**	**Dynamique 2**
1	1200	20	22	*Jamais éclairci (issu d'une forêt claire)*	*Décapitalisé légèrement avant éclaircie 1*	*Très surcapitalisé avant éclaircie 1*
2	700	20	14	*Tout juste éclairci pour la 1ère fois (issu d'une forêt dense)*	*Très décapitalisé avant éclaircie 1*	*Décapitalisé légèrement avant éclaircie 2*
3	700	30	28	*Eclairci une fois il y a 20 ans (issu d'une forêt dense)*	*Juste avant éclaircie 2*	*Juste avant éclaircie 2*
4	250	35	24	*Entre l'éclaircie il y a 25 ans et la coupe finale dans 25 ans (issu d'une forêt claire)*	*Peu avant coupe 1*	*Peu avant coupe 1*
5	120	35	9	*Peuplement mature décapitalisé 15 ans avant la coupe finale*	*Juste après coupe 1 (issu d'un peuplement décapitalisé)*	*10 ans avant coupe finale*

Tableau III.8. : Caractéristiques initiales des peuplements échantillonnés en fertilité 2

**En réalité, chaque forêt identifiée pour ces tests dispose d'une fertilité unique, mais, dans la mesure où les structures choisies peuvent se rencontrer sur les deux potentialités stationnelles et pour affiner l'analyse, les simulations ont été étendues sur les deux fertilités avec les mêmes variables d'entrée.*

Les prix par défaut ont été maintenus, le taux d'actualisation a été fixé à 3 %. La simulation s'est déroulée sur 100 ans. Dans tous les peuplements, les travaux de préparation à la régénération ont été appliqués pour être réaliste, compte tenu des difficultés de renouvellement effectivement observées dans la majorité des forêts de pin d'Alep. Sauf pour les témoins (itinéraires « Courants »), les scénarii ont été modulés selon trois niveaux d'interventions en travaux optionnels et selon deux degrés de difficulté d'exploitation. Cela mène à un total de 10 tests par type de peuplement et par fertilité.

c. Analyse des résultat *[ANNEXE III.7]*

Le premier élément notable dans les bilans économiques de l'ensemble des scénarii est qu'ils sont tous positifs à l'exception de quelques cas de figure lorsque les conditions d'exploitation sont difficiles. Ces résultats ont été obtenus sur la base de prix de vente du pin d'Alep raisonnables et de coûts des opérations sylvicoles correspondant aux pratiques réelles. Dans l'hypothèse de l'émergence d'un marché pour le bois d'œuvre de pin d'Alep, cela conforte la perspective d'une sylviculture non seulement rentable mais véritablement rémunératrice pour les propriétaires forestiers.

L'analyse plus fine montre que ces bénéfices pourront être optimisés par la mise en place d'un mode de gestion dynamique et interventionniste dans la plupart des cas. Cela est particulièrement vrai au sein des peuplements de bonne fertilité où la forte potentialité de production de bois d'œuvre justifie d'autant plus les efforts sylvicoles. C'est ce qu'atteste le récapitulatif des bilans économiques (en euros actualisés sur 100 ans), ordonnés par ordre décroissant de rentabilité :

- **Fertilité 1 :** ***[ANNEXE III.7.a.]***

Plus la case est foncée, plus le niveau d'intervention est élevé

N°	Exploitation facile						
1	Standard 1 + Sélection + Elagage **21 751**	Standard 1 + Sélection **21 033**	Dynamique 1 + Sélection + Elagage **20 453**	Dynamique 1 + Sélection **20 357**	Standard 1 **19 593**	Dynamique 1 **19 161**	Courant 1 **10 409**
2	Standard 1 + Sélection + Elagage **19 669**	Standard 1 + Sélection **19 256**	Standard 1 **17 339**	Dynamique 1 + Sélection + Elagage **16 568**	Dynamique 1 + Sélection **16 352**	Dynamique 1 **14 884**	Courant 1 **12 101**
3	Dynamique 1 + Sélection + Elagage **33 806**	Dynamique 1 + Sélection **33 146**	Dynamique 1 **29 941**	Standard 1 + Sélection + Elagage **25 132**	Standard 1 + Sélection **24 206**	Standard 1 **20 710**	Courant 1 **19 569**
4	Standard 1 + Sélection + Elagage **26 554**	Standard 1 + Sélection **25 537**	Dynamique 1 + Sélection **24 708**	Dynamique 1 + Sélection + Elagage **24 649**	Dynamique 1 **21 478**	Standard 1 **21 242**	Courant 1 **20 544**
5	Dynamique 1 + Sélection + Elagage **11 080**	Dynamique 1 + Sélection **10 183**	Standard 1 + Sélection + Elagage **8 155**	Standard 1 + Sélection **7 226**	Courant 1 **6 888**	Dynamique 1 **4 265**	Standard 1 **2 450**
GRADIENT DE RENTABILITE							

Tableau III.9. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements testés en fertilité 1

Sur les stations de bonne fertilité, l'amélioration de la qualité des bois induite par les travaux permet largement de compenser les investissements qu'ils impliquent grâce aux recettes que procure leur vente : le bénéfice retiré est supérieur à celui obtenu avec les mêmes itinéraires, sans travaux optionnels. Et surtout, le choix d'une sylviculture dynamique, telle que proposée dans les itinéraires « Standard » et « Dynamique », permettant la valorisation différenciée des qualités par la vente en bois façonné, est plus rémunératrice que la gestion basique, à débouché unique, représentée par l'itinéraire « Courant ».

Quand la fertilité est bonne, la tendance est donc clairement en faveur des modes de gestion dynamiques sans toutefois pointer spécifiquement un type d'itinéraire plus performant.

- **Fertilité 2 : *[ANNEXE III.7.b.]***

N°	Exploitation facile						
1	Courant 2 **16 357**	Dynamique 2 + Sélection + Elagage **15 520**	Standard 2 + Sélection **15 505**	Dynamique 2 + Sélection **15 420**	Standard 2 **15 109**	Dynamique 2 **14 490**	Standard 2 + Sélection + Elagage **11 228**
2	Dynamique 2 + Sélection + Elagage **12 817**	Dynamique 2 + Sélection **12 325**	Standard 2 + Sélection **11 345**	Dynamique 2 **11 342**	Standard 2 **10 632**	Standard 2 + Sélection + Elagage **8 157**	Courant 2 **7 578**
3	Standard 2 + Sélection + Elagage **23 685**	Standard 2 + Sélection **23 088**	Dynamique 2 + Sélection + Elagage **21 413**	Dynamique 2 + Sélection **21 087**	Standard 2 **21 012**	Dynamique 2 **18 756**	Courant 2 **13 006**
4	Standard 2 + Sélection + Elagage **17 863**	Standard 2 + Sélection **16 897**	Dynamique 2 + Sélection + Elagage **16 060**	Dynamique 2 + Sélection **15 880**	Standard 2 **13 768**	Dynamique 2 **13 185**	Courant 2 **12 033**
5	Courant 2 **9 698**	Standard 2 + Sélection + Elagage **5 024**	Standard 2 + Sélection **3 782**	Dynamique 2 + Sélection + Elagage **1 837**	Dynamique 2 + Sélection **1 723**	Standard 2 **- 731**	Dynamique 2 **- 2 993**
	GRADIENT DE RENTABILITE						

Plus la case est foncée, plus le niveau d'intervention est élevé

Tableau III.10. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements testés en fertilité 2

Tout d'abord, il est important de noter, qu'en fertilité 2 également, les itinéraires dynamiques restent rentables. De plus, les travaux optionnels se soldent le plus souvent par un bénéfice augmenté grâce à l'amélioration de la qualité qu'ils induisent (peuplements n° 2, 3 et 4), mais cette tendance est moins nette qu'en fertilité 1. En effet, dans deux cas sur cinq il s'agit même de l'itinéraire le moins interventionniste qui s'avère le plus rentable. Ces résultats plus variables confirment la nécessité de réfléchir aux choix sylvicoles au cas par cas et donc l'utilité d'un outil applicable à un peuplement spécifique.

- **Cas particulier de conditions d'exploitation difficiles :**

Exploitation difficile						
N°	Fertilité 1			Fertilité 2		
1	Courant 1 **10 409**	Dynamique 1 **4 557**	Standard 1 **3 802**	Courant 2 **16 357**	Standard 2 **3 802**	Dynamique 2 **3 065**
2	Courant 1 **12 101**	Standard 1 **4 967**	Dynamique 1 **3 065**	Courant 2 **7 578**	Standard 2 **1 493**	Dynamique 2 **1 330**
3	Courant 1 **19 569**	Dynamique 1 **7 012**	Standard 1 **4 565**	Courant 2 **13 006**	Standard 2 **3 795**	Dynamique 2 **2 433**
4	Courant 1 **20 544**	Dynamique 1 **7 226**	Standard 1 **6 323**	Courant 2 **12 033**	Dynamique 2 **1 848**	Standard 2 **1 578**
5	Courant 1 **6 888**	Standard 1 **- 7 271**	Dynamique 1 **- 9 067**	Courant 2 **29 698**	Standard 2 **- 9 607**	Dynamique 2 **- 13 245**
	GRADIENT DE RENTABILITE			**GRADIENT DE RENTABILITE**		

Plus la case est foncée, plus le niveau d'intervention est élevé

Tableau III.11. : Bénéfices actualisés (€) selon chaque scénario pour tous les peuplements, cas particulier de conditions d'exploitation difficiles

En toute logique, ces quelques tests montrent que de bonnes conditions d'exploitation sont indispensables pour envisager des modes de gestion très dynamiques comprenant des valorisations en bois façonné, sans quoi, les coûts d'exploitation font chuter fortement le résultat économique de chaque opération.

- **Bilan :**

La comparaison des rentabilités des deux itinéraires interventionnistes ne met pas en évidence de grands écarts, quelle que soit la fertilité. En effet, les bénéfices varient en moyenne de 11 %, en faveur de l'un ou de l'autre (sauf dans le cas particulier du peuplement n° 5, en fin de révolution). Les décisions sylvicoles pourront donc être prises selon d'autres critères que les seuls arguments économiques :

- Maximiser le développement de la qualité BO et en permettre la valorisation pour : participer à l'amélioration globale des peuplements de pin d'Alep (sélection génétique) et éviter toute sous-valorisation (une grume de qualité structure vendue en papeterie par exemple)
- Pratiquer une sylviculture moins impactante au niveau paysager
- Améliorer le bilan carbone en favorisant son stockage par une sylviculture dynamique et sa séquestration dans du bois d'œuvre de structure
- Considérer le « prix de la tranquillité » : à bénéfices équivalents, solliciter le moins possible le propriétaire pour la mise en place d'opérations sylvicoles

Les trois premiers critères plaident clairement en faveur des itinéraires les plus interventionnistes (« Dynamique »). Le dernier paramètre en revanche, inciterait plutôt à choisir le scénario « Standard » dans les cas fréquents où les rentabilités des itinéraires « Dynamique » et « Standard » sont équivalents. Conserver le mode de gestion basique représenté par le scénario « Courant » pourra même être choisi si l'écart de rentabilité avec les itinéraires dynamiques est faible et le « prix de la tranquillité » élevé. Cela s'évalue en fonction du propriétaire et le rôle des forestiers est de faciliter au maximum les démarches de mise en place des opérations sylvicoles afin de diminuer ce « prix de la tranquillité ».

Tous ces arguments sont considérables dans le cadre d'une réflexion globale de gestion durable et optimisant la qualité des peuplements à long terme. Ils pourront être mis en avant par le sylviculteur ou le conseiller sylvicole dont la fonction est d'orienter les choix sylvicoles vers une gestion intégrée et durable au maximum. Mais l'échelle de temps forestier va parfois à l'encontre des attentes du propriétaire ou de l'investisseur à court et moyen termes. L'exemple de la forêt en fin de cycle (peuplement n° 5) révèle des bénéfices bien moindres que pour les autres peuplements actualisés sur les cent prochaines années. Cela s'explique par l'impact des investissements particulièrement forts en début d'itinéraire. En effet, peu après le début de la simulation, les dépenses pour régénérer, dépresser, sélectionner et élaguer les tiges d'avenir, interviennent. De plus, les effets positifs de ces travaux ne sont pas recueillis car l'horizon de 100 ans est trop court pour atteindre la coupe définitive de la deuxième révolution, où l'amélioration de la qualité devrait être forte. Ainsi, en fonction du stade de développement du peuplement et de l'horizon de projection de son propriétaire, les préconisations pourront être variables. D'où l'intérêt de proposer des simulations adaptées à l'état initial réel du peuplement, correspondant à un positionnement précis dans les scénarii.

Ainsi, la mise en application de l'outil confirme la logique qui consiste à privilégier les stations de bonnes fertilités et facilement exploitables pour mettre en place une sylviculture dynamique. En revanche, il est impossible de dégager des préconisations globales précises quant à l'itinéraire à sélectionner dans des situations types. L'intérêt de l'outil de simulation réside donc bien dans sa grande adaptabilité aux conditions initiales du peuplement analysé afin de fournir des conclusions au cas par cas. Les décisions sylvicoles qui en découleront dépendront également de la sensibilité et des attentes du propriétaire.

4. Perspectives d'utilisation : aide à la décision pour le sylviculteur et le propriétaire

L'outil élaboré au cours de ce stage permet de remplir les fonctions de base correspondantes à l'objectif initial. Mais d'autres utilités potentielles à une telle application ont été identifiées ouvrant des perspectives d'amélioration.

a. Fonctions de l'outil

(1) Une aide à la décision sylvicole

La possibilité de projeter l'évolution d'un peuplement sur un horizon donné, en choisissant le niveau d'intervention, permet d'évaluer la performance de différents choix de gestion sur la base de données scientifiques fiables. Cela constitue un apport important dans un contexte de manque de recul sur la sylviculture de pin d'Alep.

De plus, la grande variabilité des structures et des conditions stationnelles des peuplements rend les préconisations globales (telles que présentées dans les guides sylvicoles par exemple) très incertaines et une analyse spécifiquement adaptée à un peuplement précis (tel que le permet l'outil) d'autant plus nécessaire.

(2) Un support de communication efficace

Dans un contexte où la culture forestière est déficiente, la crainte d'investir dans la gestion forestière est grande, rendant l'application d'itinéraires dynamiques rare. L'apport de projections précises peut constituer un élément rassurant pour la personne ayant le pouvoir de décision (propriétaire forestier, investisseur, …).

La possibilité de moduler les prix, l'horizon temporel et la capacité d'attente du financeur (représentée par le taux d'actualisation) permet de garantir la rentabilité ou au contraire, de déconseiller certains choix sylvicoles, selon de nombreux scénarii, plus ou moins optimistes quant à l'évolution potentielle du marché du bois d'œuvre de pin d'Alep. Ce sont autant d'éléments présentables au décideur pour argumenter en faveur du mode de gestion le plus durable et adapté à la forêt concernée.

A l'échelle de la filière, être en mesure de garantir une production régulière et quantifier de bois d'œuvre de pin d'Alep, dans des peuplements identifiés par l'outil, peut contribuer à favoriser l'installation de nouveaux transformateurs et le développement du sciage du pin d'Alep dans les unités de production existantes dans lesquelles d'autres essences sont pour le moment préférées, lorsqu'il s'agit de débouchés à haute valeur ajoutée (structure et menuiserie notamment). En amont des scieurs, les exploitants forestiers ont également besoin d'avoir une vision claire sur les possibilités de débouchés de chaque forêt, comme le propose cet outil.

(3) Anticiper les retours d'expérience pour un apport de connaissances au sujet de la sylviculture du pin d'Alep

Les récents itinéraires proposés dans les derniers guides sylvicoles et ceux issus des travaux réalisés au sein du bureau d'étude Alcina sont en rupture avec le mode de gestion jusqu'alors pratiqué dans la majorité des forêts privées et commencent seulement à être appliqués dans certains cas spécifiques.

Dans les forêts publiques, le guide de référence précédent préconisait déjà une sylviculture dynamique, mais le contexte socio-économique (la prépondérance de l'enjeu DFCI, l'absence de normalisation des pins d'Alep, entre autres facteurs) n'a pas favorisé un investissement au niveau de ce qui est conseillé dans les nouveaux guides.

De tout cela, résulte l'absence de retours d'expérience en nombre suffisant pour évaluer la performance de différents scénarii sylvicoles. L'anticipation est donc indispensable pour disposer d'éléments de réponse fiables quant au mode de gestion à favoriser selon la situation.

Dans l'attente de confirmations par l'expérience, cet outil peut apporter aux propriétaires, mais aussi aux acteurs de la mise au point d'itinéraires et de préconisations pour la sylviculture du pin d'Alep, une connaissance plus fine du probable comportement des peuplements en réponse à diverses opérations, dans des conditions de croissance variées.

Ainsi, le gestionnaire forestier, le propriétaire, le financeur ou encore le chercheur en sylviculture, voire les professionnels de la première transformation du bois, pourraient voir une utilité dans un outil de ce type. Cela concourrait au développement d'une filière bois d'œuvre de pin d'Alep rémunératrice pour tous.

b. Perspectives d'amélioration

Une réponse simple aux objectifs de l'outil est présentée dans cette version. Celle-ci pourrait être plus élaborée à l'avenir avec l'intégration de nouvelles fonctions incluses dans le cadre de la gestion intégrée et durable des forêts de pin d'Alep. Elle est fiable autant que faire se peut compte tenu de l'état des connaissances relatives à la sylviculture de cette essence, de l'instabilité du marché de bois d'œuvre de pin d'Alep et des limites dans l'exactitude du modèle de croissance.

(1) Une amélioration continue de la fiabilité

- **En renforçant le modèle de croissance :**

La mise au point de l'outil a été l'occasion d'un grand nombre de tests de simulation réalisés avec le modèle NRG2017. Les résultats semblent conformes à la réalité de l'évolution réelle des peuplements de pin d'Alep à l'exception d'une surcapitalisation détectée dans les forêts très denses (au-delà de 30 m^2/ha). Pour y pallier sans modifier directement le modèle (cela n'était pas l'objectif de cette étude), une correction a été appliquée directement dans la banque de données propre à l'outil.

Cette solution provisoire pourrait être remplacée par une évolution du modèle NRG2017 qui se baserait sur l'hypothèse suivante : la diminution de l'accroissement individuel des tiges induite par une situation de très forte concurrence a été sous-estimée, ce qui conduit à la persistance d'une capitalisation forte des peuplements très denses.

- **En étoffant la banque de données :**

De nombreux peuplements de référence ont été modélisés, couvrant un large spectre de situations possibles. Toutefois, l'immense variabilité des forêts de pin d'Alep et de leur contexte rend toujours possible l'étoffement de la base de données par la réalisation de nouvelles simulations avec des variables initiales légèrement modifiées. Le positionnement du peuplement spécifique renseigné par l'utilisateur dans les modélisations n'en sera que plus précis.

Techniquement, une telle évolution est facilement réalisable par simple ajout de données dans la base auxquelles de nouveaux codes de peuplement seront associés.

- **En intégrant les historiques de gestion :**

L'outil ne permet pas encore de positionner les peuplements dans les itinéraires selon un historique de gestion particulier spécifié (seule la perturbation forte est prise en compte). En effet, le rattachement de l'état initial de la forêt analysée se fait sur la base des données dendrométriques qui présupposent un passif probable, sans confirmation de l'utilisateur. Cela aboutit à des prédictions cohérentes correspondant le plus souvent à la réalité, car les schémas de gestion qui mènent à des situations de peuplements sont souvent répétés et ont dicté les modalités choisies pour la constitution de la banque de données.

Toutefois, pour tenir compte de certains historiques de gestion particuliers et potentiellement influents sur l'évolution future du peuplement, il pourrait être intéressant d'inclure ces paramètres dans les variables d'entrée.

(2) Une prise en compte plus large de la multifonctionnalité des forêts

Cet outil se veut de favoriser la mise en place d'une gestion sylvicole intégrée et durable en montrant la rentabilité des itinéraires les plus dynamiques qui sont également ceux qui répondent le mieux à ces enjeux de multifonctionnalité et de durabilité.

Cependant, la réalité des résultats fournis par cet outil révèle bien que la gestion sylvicole dynamique est rentable mais montre aussi que, dans certains cas, une sylviculture extrêmement basique l'est plus. Ainsi, sur la base de l'unique critère économique, ces conclusions incitent à choisir un mode de sylviculture moins bénéfique aux autres fonctions de la forêt.

Dans ces cas de figure, et à condition que l'écart de rentabilité soit raisonnable, la suite logique en conseil sylvicole serait de mettre en avant les autres avantages d'une gestion dynamique par rapport aux pratiques basiques courantes. L'idéal serait alors de disposer, en plus du résultat économique, par exemple :

- D'un bilan carbone : une quantification du carbone absorbé et séquestré, forcément favorable aux itinéraires dynamiques valorisant une grande part des bois en structure
- D'informations sur l'impact paysager, incitant également à choisir des interventions moins intenses et plus régulières
- Voire d'un indice de biodiversité, mais l'incertitude quant à sa supériorité dans les scénarii interventionnistes est plus forte

Cette dernière amélioration pourra intervenir dans le cadre des nombreux travaux de recherche menés actuellement pour quantifier les services écosystémiques et en prévision d'une éventuelle rémunération à venir de ces fonctions dont le montant pourra également être inclus à terme.

Ainsi, l'outil ici présenté répond aux principaux objectifs pour lesquels il avait été imaginé dans le plan d'action de décembre 2018. Il ouvre la voie à l'élaboration d'une application dans laquelle toutes les fonctions de la forêt pourraient être incluses, aboutissant à un diagnostic complet de n'importe quel peuplement de pin d'Alep. Cela permettrait d'optimiser la décision sylvicole dans le cadre d'une gestion intégrée et durable. Une attention particulière a été portée à l'ergonomie de cet outil pour en assurer une compréhension et une prise en main facile. La précision et l'exactitude des résultats ont également été des priorités : l'outil présente donc des volumes précis de bois valorisables selon les différentes qualités. Or, ces volumes n'auront de sens que si nous sommes en mesure de distinguer les différents lots à constituer dans le cadre des ventes en bois façonné préconisées. Cela met en évidence la nécessité de disposer de critères de sélection fiables et uniformes entre les différents acteurs de la commercialisation des bois. Pour cela, un document de référence méthodique pourrait être un complément utile et logique à l'outil de simulation d'évolution des peuplements de pin d'Alep.

IV. Caractériser la qualité à l'échelle de l'arbre

L'outil de cartographie Sentinel et le simulateur d'évolution des peuplements permettent d'identifier les forêts de pin d'Alep à fort potentiel et d'y développer une sylviculture à objectif de production de bois d'œuvre. Tout au long de la vie du peuplement, et plus particulièrement aux étapes de coupes, les arbres devront donc être qualifiés pour être favorisés ou martelés puis triés. Or, la considération de la qualité, arbre par arbre, est une activité assez nouvelle dans les peuplements de pin d'Alep où les pratiques courantes donnent pour débouchés quasi-exclusif le bois d'industrie (papeterie) et le bois énergie. Il existe donc à ce jour peu de références en termes de qualification de cette essence, rendant les opérations de tri souvent hasardeuses et hétérogènes entre les différents opérateurs. C'est la raison pour laquelle, l'élaboration d'un outil de classement des bois ronds peut être une pierre très utile à l'édifice de la filière de bois d'œuvre de pin d'Alep.

1. Les enjeux : comment reconnaître les pins d'Alep de qualités bois d'œuvre ?

a. Distinguer qualités intrinsèques et conformation

Les aptitudes du bois de pin d'Alep à faire un excellent matériau de construction ne sont plus contestables aujourd'hui. La récente normalisation de cette essence en bois d'œuvre de structure est venue apporter la certification scientifique d'un fait bien connu de nos ancêtres, comme en témoignent les constructions navales et les très anciennes charpentes fabriquées jusqu'au début du XXème siècle : le bois de pin d'Alep dispose des propriétés requises pour être mis en œuvre en structure. *(Hatchiguian et Fabregue, 2016)*

Toutefois, si les qualités intrinsèques de tous les pins d'Alep sont bien celles d'un bon bois d'œuvre, il n'en est pas de même pour leurs qualités de conformation. En effet, bien souvent, des défauts de forme ou liés à l'état sanitaire de l'arbre empêchent l'expression des qualités internes du bois, voire les détériorent.

Une grume en bon état interne (sain, cernes fins et réguliers, sans fente), mais très tordue, n'aura pas sa place sur un banc de scie alors même que son bois est d'excellente qualité. A l'inverse, un arbre parfaitement droit, de gros diamètre et dépourvu de nœuds mais sévèrement attaqué par un champignon ne pourra être scié car les qualités internes de son bois seront altérées par la pourriture. L'enjeu aujourd'hui est de parvenir à reconnaître ces caractéristiques déclassantes sur les grumes mais également sur les arbres sur pied pour orienter les choix sylvicoles.

b. Prédire le potentiel d'un arbre de façon fiable et uniforme entre tous les acteurs

La classification mise au point au cours de cette étude doit permettre de prédire le débouché potentiel de chaque arbre selon des critères précis et fiables permettant de faire consensus entre tous les acteurs de la filière : du forestier au scieur, en passant par l'exploitant, s'accorder sur la part valorisable en bois d'œuvre dans une parcelle donnée. Cela participerait à garantir un approvisionnement sûr, et à la juste valeur de chaque grume, de la filière pin d'Alep.

2. La construction de l'outil : élaboration d'un classement visuel des bois ronds

La mise au point de l'outil de classification a fait appel à trois sources : les normes NF, des entretiens avec les professionnels de l'aval (scieurs, exploitants) et des observations de terrain (visites de chantiers d'exploitation). Au cours des formations et des tests en forêt qui ont suivi son élaboration, il a fait l'objet d'ajustements pour aboutir à une version stable, présentée dans ce rapport.

a. Transcription des critères de la norme en caractéristiques visibles sur bois rond

Les techniques de sylviculture pour améliorer la qualité sont connues. A l'autre bout de la chaine, la norme permet de classer les bois sciés (équarris ou en plot) selon leur valorisation possible. Le chainon manquant est la reconnaissance de la qualité sur les bois ronds, en grume et sur pied. La première étape de la construction de l'outil de classification visuel du pin d'Alep a donc consisté en une transcription des critères de la norme des bois équarris aux bois ronds.

(1) Elaboration de la liste des critères visibles et de leurs seuils par l'analyse des documents de certification

- **Description des documents source :**

Les documents de base de ce classement visuel sont les normes permettant de caractériser la résistance mécanique du matériau bois. Cela comprend le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance au cisaillement et la masse volumique. Les valeurs caractéristiques de ces paramètres peuvent être estimées par un classement par machine ou visuel décrit dans les normes Afnor NF EN 14081-1 et NF EN B52-001-1 dans laquelle le pin d'Alep a récemment été inclus (en avril 2018). Celui-ci s'applique aux bois massif de résineux à section rectangulaire profilés par sciage, rabotage ou d'autres méthodes. Ces deux normes serviront de base à l'élaboration du classement visuel des pins d'Alep.

Il existe une norme qui traduit les critères de classement sur bois de pins équarris en critères visibles sur tronc. Il s'agit de la norme NF EN 1927-2 qui définit les règles de classement des bois ronds. Mais dans cette dernière, le pin d'Alep n'est pas inclus, elle ne s'applique qu'aux espèces suivantes : *Pinus sylvestris, Pinus nigra, Pinus pinaster* et *Pinus radiata*. Ce document sera également étudié dans le cadre de l'élaboration du classement visuel des pins d'Alep.

- **Domaine d'application :**

Les critères de classement à sec décrits dans la norme NF EN B52-001-1 (section « bois sec ») requièrent un bois dont la teneur en humidité est inférieure à 20 %, ce qui ne correspond pas au taux observé dans le bois vert, sur pied ou tout juste abattu. Le classement visuel des bois ronds devant s'appliquer au martelage ou sur le chantier d'exploitation, les critères décrits dans cette catégorie ne sont donc pas pris en compte. Seule la section « bois humide » a été retenue pour la construction de cet outil.

Le pin d'Alep peut appartenir aux classes de résistance mécanique C14, en C18 et en C24, ce qui correspond aux catégories de classement visuel des sciages suivantes : respectivement ST-IV, ST-III et ST-II. Ces dernières classes s'appliquent aux bois débités (plots, planches, poutres) en scierie. Pour la majorité des essences valorisables en bois d'œuvre, leur pendant sur bois rond sont les quatre

catégories de qualités décroissantes suivantes : A, B, C et D (auxquelles s'ajoutent souvent les nuances A+, AB, B+, B-, etc). Néanmoins, au regard des usages du pin d'Alep en bois d'œuvre encore peu diversifiés, le classement bois rond de cette essence pourra être limité dans un premier temps à trois classes : **bois « structure » (BOS), bois « palette » (BOP) et bois « énergie ou industrie » (BI/BE).**

Classement mécanique	Classement visuel sciage	Classement visuel bois rond tout pin	Classement visuel bois rond de pin d'Alep	Usages possibles
C14	ST-IV	C-D	BOP (Palette)	Palettes, caisserie, emballage
C18	ST-III	B-C	BOS (Structure)	Charpente traditionnelle, ossature bois
C24	ST-II	B	BOS (Structure)	Charpente traditionnelle, ossature bois, charpente industrielle, charpente lamellé-collé

Tableau IV.1. : Correspondances des classes : mécaniques – visuelles sur sciage – visuelles sur bois rond, et débouchés associés

Une quatrième catégorie, qui ne fera pas l'objet d'une colonne du tableau de classement du fait de sa rareté, découlera de caractéristiques de qualité exceptionnelle observées sur les bois classés en « Structure » et sera décrite par une note en bas de tableau relative à certains critères : il s'agit de la qualité « Menuiserie ».

L'outil de classement visuel présenté dans ce rapport s'applique donc aux bois ronds de pin d'Alep à l'état vert et a pour objectif de les qualifier selon trois types de débouchés possibles :

- Bois d'œuvre Structure : bois d'ossature, charpentes traditionnelles et industrielles
- Bois d'œuvre Palette : palette, emballage, caisserie, coffrage
- Bois énergie/ Bois industrie : chaufferies, centrales biomasses, papeteries

Le débouché en menuiserie n'est pas exclu mais ne fait pas l'objet d'une catégorie à part entière du fait de sa rareté.

Il a été choisi de limiter le nombre de catégories pour proposer un document simple et donc plus facilement mis en œuvre dans un contexte où la considération de la qualité sur les pins d'Alep est une activité nouvelle, qui nécessite forcément un changement des pratiques, que l'on souhaite le moins brutal possible.

- **Sélection des critères dans les normes :**

Les critères de classement visuel retenus dans les normes NF EN 14081-1 et NF EN B52-001-1 ne sont pas toujours visibles sur les tiges sur pied et les grumes mises en bord de route. Certains devront donc être exclus du classement.

	Critères visuels retenus dans la norme	Visibilité sur pied	Visibilité sur bois façonné
Liés à la structure du bois	Cernes d'accroissement	*Non mais estimation possible*	*Oui*
	Nœuds	*Oui*	*Oui*
	Grosses poches de résine	*En partie*	*En partie*
	Entre-écorce	*Non*	*Oui*
	Fentes	*Non, intervient en séchant*	*Oui, mais évolutif : à évaluer juste avant l'enlèvement*
	Pente du fil	*Oui*	*Oui*
	Bois de réaction	*Non, mais soupçons possibles*	*Oui*
Liés au débit	Flache	*Non, intervient après débit*	*Non, intervient après débit*
Liés aux altérations biologiques	Echauffure et pourriture molle	*Parfois, si attaque de champignons très sévère*	*Oui*
	Piqûre noire ou blanche	*Non, sauf sur arbre dépérissant*	*Oui, mais évolutif : à évaluer juste avant l'enlèvement*
	Trace de gui	*Oui*	*Oui*
	Bleuissement	*Non, intervient après coupe*	*Oui, mais évolutif : à évaluer juste avant l'enlèvement*
	Dégâts d'insectes	*Oui*	*Oui*
Liés aux déformations géométriques	Flèche de face	*Non, intervient après séchage*	*Non, intervient après séchage*
	Flèche de rive	*Non, intervient après séchage*	*Non, intervient après séchage*
	Gauchissement	*Non, intervient après séchage*	*Non, intervient après séchage*
	Tuilage	*Non, intervient après séchage*	*Non, intervient après séchage*

Tableau IV.2. : Evaluation de la visibilité sur bois ronds des critères de la norme sciage

Il en résulte une liste de critères très réduite qui semble incomplète. En effet, les normes analysées pour l'obtenir n'ont pas vocation à être utilisées sur bois ronds, elles présentent donc forcément des lacunes pour cet état des bois. C'est pourquoi, dans un souci d'exhaustivité, la norme NF ENV 1927-2 a également été étudiée bien qu'elle s'applique aux autres pins que le pin d'Alep. Toutefois, on peut raisonnablement penser que les critères qui y sont décrits s'observent aussi sur cette essence et donc peuvent être considérés. Les valeurs seuils seront alors adaptées aux spécificités du pin d'Alep grâce à l'observation d'échantillons de grumes et les retours d'expérience de sciage.

Il en découle alors une liste exhaustive de critères enrichie par les apports des classements visuels des autres pins :

		Domaine d'application : Sur pied	Grume
Liés à la structure du bois	Cernes d'accroissement		o
	Nœuds (densité, dimension, type)	o	o
	Grosses poches de résine		o
	Pente du fil	o	o
	Bois de réaction		o
	Bosses	o	o
	Décroissance	o	o
	Cœur excentré		o
	Méplat	o	o
	Fentes		o
	Roulures		o
	Entre-écorce		o
Liés aux altérations biologiques	Echauffure et pourriture molle		o
	Tâche et veine de cœur		o
	Discoloration		o
	Bleuissement		o
	Dégâts d'insectes	o	o
	Piqûre noire ou blanche	o	o
	Trace de gui	o	o
	Chancre – Chaudron	o	o
Autres défauts	Blessure	o	o
	Fente et trou d'abattage		o
	Gélivure	o	o
	Coup de foudre	o	o
	Corps étrangers	o	o
	Surface carbonisée	o	o
	Arbre sec	o	o

Tableau IV.3. : Liste des critères à considérer dans le classement des bois ronds sur pied et en grume

- **Evaluation des seuils de tolérance**

Les seuils de tolérance indiqués dans les normes sur sciage (NF EN 14081-1 et NF EN B52-001-1) sont pour la plupart transposables directement au bois rond car ils s'observent dans le sens longitudinal et reste donc inchangés. D'autres s'appliquent à la section et peuvent donc être retranscrits tels quels pour une mesure sur grume. ***[ANNEXE IV.1]***

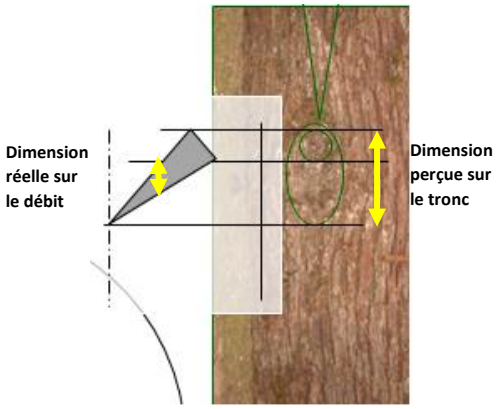


Figure IV.1. : Schéma de l'implantation conique d'une branche

Les valeurs qui ont fait l'objet d'un traitement particulier concernent les diamètres des nœuds : en effet, il a fallu tenir compte de l'implantation conique des branches par laquelle le diamètre d'un nœud est largement inférieur à la section de la branche qui l'a produit.

Cette notion a donné lieu à des seuils de tolérance concernant le diamètre des nœuds visibles sur tronc assez larges, moins restrictifs que ce qu'il était communément admis jusqu'alors.

A ce stade, le classement visuel obtenu est précis. Toutefois, la liste des critères directement visibles sur pied étant courte, on peut s'interroger sur la fiabilité de la classification pour ces types de bois ronds. En utilisant le classement en l'état, beaucoup d'incertitudes persisteraient quant à la présence ou non de certains défauts internes, uniquement visibles une fois l'arbre abattu. Pour les limiter, nous avons donc recherché des indicateurs sur pied de défauts internes pour enrichir le tableau de classement visuel et en augmenter la fiabilité.

(2) Identification d'indicateurs sur pied de critères visibles uniquement dans la grume par un protocole de terrain

- **Mode opératoire :**

Pour compléter et fiabiliser le classement visuel des bois sur pied, des indicateurs visibles de défauts internes au bois ont été recherchés. Parmi les critères présents dans le classement grume et absents du classement sur pied, certains ont été sélectionnés comme susceptibles de présenter des indices reconnaissables dans le peuplement.

Plusieurs hypothèses ont été émises au départ puis soumises à un test de terrain :

- L'inclinaison de l'arbre entraine un cœur excentré
- La présence de champignons sur le tronc signifie une pourriture interne du bois *(Boutte et Durand-Gillmann, 2012)*
- Les écoulements de résine sur le tronc indiquent que le cœur de l'arbre est très résineux
- Les blessures sur les arbres sont des portes d'entrée de pathogènes qui provoquent la pourriture du bois

Un protocole de terrain a été imaginé pour vérifier ces suppositions et mesurer précisément les corrélations entre chaque facteur : il s'agissait de suivre un chantier d'exploitation depuis le martelage jusqu'à l'étape avant le débusquage, pendant laquelle les arbres sont abattus sur parterre de coupe. Au cours d'un premier passage, les caractéristiques de tous les arbres martelés ont été relevées, en particulier : le degré d'inclinaison, le niveau d'attaque de champignons, l'étendue des écoulements de résine et les dimensions des éventuelles blessures. Chaque arbre recensé a été identifié par un numéro à la peinture et géolocalisé sur le plan de la coupe. Cela a permis, au cours du second passage après le travail des bucherons, de relever sur ces mêmes pins : la position du cœur, l'état sanitaire du bois et son taux de résine.

Ce protocole a été appliqué à 270 arbres répartis sur deux chantiers d'exploitation à Trets (13) et à Gardanne (13). Cet échantillon conséquent a permis d'étudier statistiquement les corrélations entre de supposés indicateurs sur pied et des défauts internes.

Trois des quatre hypothèses ont été confirmées :

- L'inclinaison de l'arbre entraine un cœur excentré
- La présence de champignons sur le tronc indique une pourriture interne du bois
- Les blessures sur les arbres sont des portes d'entrée de pathogènes qui provoquent la pourriture du bois

- **Indicateurs du cœur résineux ?**

Proportions d'arbres avec cœur résineux	
Ecoulements visibles	**Pas d'écoulement visible**
37 %	27 %

Tableau IV.4. : Evaluation du lien entre les écoulements de résine visibles et le cœur résineux

Pas de lien précis n'a été établi entre les écoulements de résine visibles sur pied et le cœur résineux. Il semblerait simplement qu'il y ait une probabilité un peu plus forte (10 %) d'en rencontrer chez les arbres qui présentent de la résine sur le tronc. Cependant, avec moins de 40 % des bois atteints, il serait trop restrictif de retenir les écoulements comme critère déclassant. Rappelons d'ailleurs que la résine n'altère pas les propriétés mécaniques du bois, donc, à condition que cela ne représente qu'une faible part d'un lot pour limiter la perte en rendement pour le scieur, elle peut être tolérée. Pour soupçonner un taux de résine élevé dans un pin d'Alep, il est plus pertinent de s'intéresser à l'historique du peuplement : a-t-il subi une perturbation importante comme une éclaircie intensive ou le passage d'un incendie ? Est-il fortement exposé au vent ? Dans ces cas, il y a une présomption forte de présence de cœurs résineux dans les arbres.

Les autres hypothèses en revanche, ont mis en évidence des indicateurs pertinents de défauts internes à inclure dans l'outil de classement visuel. Les seuils de tolérance retenus ont été tirés de l'étude statistique qui décrit précisément l'influence de chaque paramètre.

- **Indicateurs du cœur excentré :**

Effectifs des intensités de cœur excentré pour chaque niveau d'inclinaison				
Intensité du cœur excentré	**Inclinaison presque nulle (< 10 %)**	**Inclinaison faible (10-25 %)**	**Inclinaison forte (25-50 %)**	**Inclinaison très forte (> 50 %)**
< 10 %	37	31	5	0
10 à 20 %	40	39	5	0
20 à 30 %	7	20	22	0
30 à 40 %	4	6	12	1
> 40 %	5	15	13	6
Effectifs totaux	93	111	57	7

Tableau IV.5. : Etude du lien entre inclinaison de l'arbre et cœur excentré

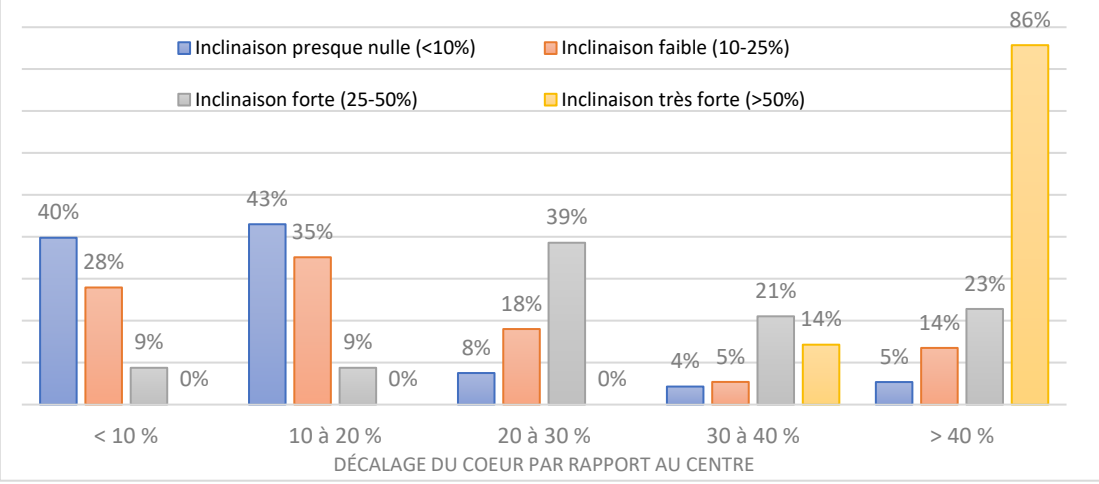


Figure IV.2. : Niveau de cœur excentré (proportion de tiges atteintes) pour chaque niveau d'inclinaison de l'arbre

L'inclinaison de l'arbre est manifestement un indice du cœur excentré, elle peut donc être retenue comme critère à inclure dans la clef. La norme impose de limiter le décalage de la moelle par rapport au centre à 20 % pour les sciages destinés à la structure. A partir de 25 % d'inclinaison, plus du tiers des arbres dépassent ce seuil. En ajoutant une marge de précaution, il a donc été décidé de prendre 20 % d'inclinaison dans le classement visuel sur pied, ce qui doit permettre de garantir un cœur suffisamment centré dans environ trois quarts des cas.

- **Indicateurs de la pourriture interne du bois :**

Proportions d'arbres avec pourriture interne				
Une fructification de champignon	**Plusieurs fructifications de champignons**	**Petite blessure (L< 10 cm)**	**Grosse blessure (L > 10 cm)**	***Sain (ni champignon, ni blessure)***
15 %	54 %	9 %	33 %	*14 %*

Tableau IV.6. : Etude du lien entre atteintes sanitaires externes (champignons, blessures) et pourriture interne du bois

Par rapport aux témoins sains, les arbres présentant une fructification de champignon ou une petite blessure n'ont pas, en proportions, plus de bois pourris. En revanche, si l'attaque fongique est sévère ou la blessure de grande ampleur, la probabilité de pourriture interne est multipliée. Dans l'outil de classement, distinguer l'impact des champignons par l'intensité des fructifications visibles est donc pertinent, de même qu'éviter le déclassement systématique de tous les arbres présentant une petite blessure. Toutefois, il est bon de garder à l'esprit que ces défauts sont évolutifs : les fructifications vont se multiplier et le risque d'entrée de pathogènes par la blessure, même petite, persiste jusqu'à la cicatrisation (qui peut prendre plusieurs années). C'est pourquoi, dans les arbres concernés, il sera judicieux de valoriser la qualité BO le plus rapidement possible. *(Merle, 2015)*

La démarche scientifique d'analyse des documents de certification et d'étude statistique sur le terrain a abouti à l'élaboration d'un classement visuel des bois ronds de pins d'Alep exhaustif et précis au regard de la norme. Mais correspond-il aux attentes réelles des premiers utilisateurs du bois ? Afin de s'en assurer et de produire un document fonctionnel et réaliste, des professionnels de l'aval de la filière ont été interrogés. L'outil tout juste élaboré a ainsi été confronté à leurs avis et a subi les modifications suggérées.

b. Hiérarchisation et ajustement des seuils selon les attentes des premiers transformateurs du bois

Dans le but de connaître les attentes et les priorités des scieurs, premiers utilisateurs potentiels du pin d'Alep, ils ont été contactés directement et invités à répondre à une série de questions permettant de recueillir des informations intéressantes pour enrichir le classement réalisé par la démarche scientifique, jusqu'alors déconnectée des pratiques réelles.

(1) Méthodologie pour le recueil des informations auprès des professionnels

- **Les professionnels interrogés :**

La variabilité des produits réalisés et des techniques associées par les différentes unités de sciage est grande, celle des attentes en termes de qualité de la matière première l'est en conséquence tout autant. C'est pourquoi, pour tirer des conclusions globales des entretiens menés avec ces acteurs de la filière, il a été nécessaire d'en interroger un grand nombre.

L'effectif restreint des scieries implantées dans la région Sud est vite apparu comme un frein à la constitution d'un échantillon d'acteurs interrogés représentatif pour une analyse fiable des réponses. C'est la raison pour laquelle, il a été choisi de contacter également des scieurs opérant dans d'autres région, à la condition qu'ils utilisaient du pin (autres que le pin d'Alep, forcément). Pour ces derniers, un questionnaire légèrement adapté a permis de recueillir des informations précises sur les critères clefs à considérer et leurs seuils. L'étude préalable des normes, a montré que les valeurs appliquées au pin sylvestre étaient équivalentes à celles du pin d'Alep, en revanche, celles qui concernaient le pin maritime divergeaient quelque peu. Les chiffres avancés par les scieurs de pin sylvestre (90 % des interrogés) ont donc été transposés au pin d'Alep, alors que les renseignements recueillis auprès des scieurs de pin maritime n'ont servi qu'à prioriser les critères et non à ajuster les seuils.

Par ailleurs, d'autres professionnels directement impliqués dans le tri des pins d'Alep, ont été contactés : les exploitants forestiers et les commerçants de bois locaux.

L'effectif des acteurs ayant répondu s'élève donc à 36 (sur une soixantaine de contacts), répartis ainsi selon leur secteur d'intervention :

Scieurs	Exploitants	Bureau d'étude
32	3	1

Tableau IV.7. : Récapitulatif des professionnels interrogés selon leur secteur d'activité

Des cahiers des charges de scieurs s'approvisionnant en bois d'œuvre (essentiellement palette) de pin d'Alep à l'ONF ont également été consultés pour connaître les exigences réelles.

Pour les professionnels les plus proches, susceptibles d'être transformateurs de pin d'Alep, le contact téléphonique a été privilégié dès le départ. Pour ceux plus éloignés, en dehors du périmètre de valorisation du pin d'Alep supposé (bien que l'expédition vers d'autres région puisse être envisagée, une valorisation locale reste la plus souhaitable pour des raisons écologiques évidentes), la prise de contact s'est effectuée par mail, suivie d'un éventuel entretien téléphonique. L'apport des réponses a été plus ou moins constructif pour l'outil :

Pas d'intérêt pour le sujet	Pas d'intérêt pour le pin d'Alep mais des apports techniques intéressants sur les critères de classement	Intérêt fort pour le pin d'Alep
13	14	**9**

Tableau IV.8. : Bilan des réponses recueillies par niveau d'intérêt pour le sujet

- **Le contenu des entretiens :**

Chaque entretien a été mené sur la base d'un questionnaire unique afin de permettre la comparaison des réponses et la constance des informations retirées. Celui-ci a été ajusté à la marge en fonction du secteur d'activité précis du professionnel interrogé et de son positionnement géographique impliquant un intérêt plus ou moins fort pour le pin d'Alep.

Tout d'abord, la personne interrogée était invitée à décrire les produits que son unité de sciage réalise et la matière première utilisée. La question de l'usage du pin d'Alep était évidemment posée. Si cette essence ne faisait pas partie de celles qu'elle transformait, on en demandait les raisons (en particulier pour les scieurs du secteur qui ne peuvent invoquer l'éloignement géographique comme explication logique).

De là, si la personne interrogée avait déjà eu à travailler le pin d'Alep, découlait le recueil de son avis général sur l'usinage de ce bois : ses points forts, les défauts rédhibitoires, ses aptitudes au sciage…

Ensuite, des questions précises sur les techniques de tri et les critères considérés (nature et seuils) étaient posées.

Enfin, l'entretien se terminait par une discussion plus générale sur la vision du professionnel interrogé concernant la filière bois d'œuvre de pin d'Alep, et les blocages et les leviers qu'il y voyait.

Ainsi, au-delà des précieuses informations recueillies pour préciser le document de classement visuel, ces entretiens ont été l'occasion de faire part aux professionnels de l'aval des avancées en cours pour développer la filière pin d'Alep et de recueillir des avis pour nourrir la réflexion globale menée dans cette étude. Cela a fait ressortir des idées pour orienter le développement des autres outils et permis de constituer un carnet d'adresses rassemblant les éventuels acteurs moteurs à recontacter dans le cadre d'opérations pilotes pour la valorisation du bois d'œuvre de pin d'Alep.

(2) Analyse des réponses

Les réponses à propos des critères de qualité pour le tri des pins d'Alep ont été analysées sous deux angles :

- La fréquence de citations pour identifier ceux qui font consensus et qui sont indispensables
- L'ordre d'apparition dans les discussions et l'importance qu'il y était donnée dans les propos de la personne interrogée afin de les hiérarchiser dans le document de classement

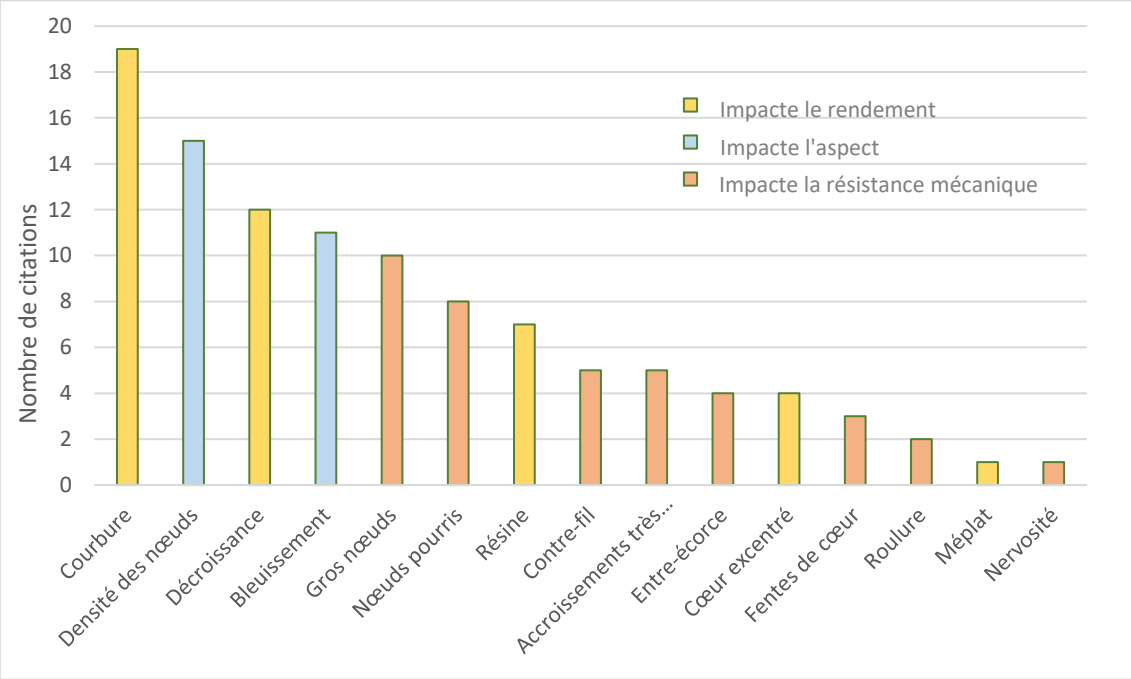


Figure IV.3. : Fréquence de citations des défauts du pin par les professionnels interrogés

- **Récurrence des défauts cités :**

Un défaut évoqué un grand nombre de fois renseigne à la fois sur l'importance de son impact négatif au sciage et sur sa récurrence dans les peuplements de pin d'Alep. Ainsi, les deux plus cités, la courbure et la densité des nœuds, sont en cohérence avec les observations de terrain qui avaient révélé leur fréquence forte en forêt. Ils feront donc partie des premiers éléments inclus dans le classement.

D'autres critères, pourtant très influents mécaniquement (fentes, roulures, entre-écorce, nervosité entre autres) sont peu apparus. Cela confirme leur rareté dans les peuplements de pin d'Alep et s'avère rassurant quant aux aptitudes de cette essence à être valorisée en structure.

A l'inverse, le cœur résineux a été souvent évoqué, bien qu'il n'altère pas les propriétés mécaniques du bois. Cela montre que cet état du bois est souvent rencontré dans le pin d'Alep, pour qu'il ait un poids si important dans le sondage alors même que son effet sur la résistance est nul.

En ce qui concerne les seuils de tolérance associés à chacun de ces défauts, la tendance est légèrement moins rigoriste que ceux préconisés dans les normes, dans lesquelles un principe de précaution strict et nécessaire est appliqué. Dans la mesure où les différences sont faibles et pour conserver la garantie assurée par la certification, il a été décidé de les conserver inchangés pour la quasi-totalité des critères. Seul celui de la courbure a été assoupli (passant de 2 cm/m à 4 cm/m) car l'expérience de terrain aboutissait au déclassement d'un grand nombre de tiges que les scieurs se disaient prêts à valoriser en bois d'œuvre.

- **Hiérarchisation des critères :**

Maximiser le rendement :

Il ressort clairement que les critères impactant le rendement matière de l'usinage des grumes de pins d'Alep sont prioritaires aux yeux des scieurs : la courbure et la forte décroissance métrique compliquent la réalisation de plots réguliers et de longueur standardisée. L'encrassement des machines provoqué par la teneur en résine forte diminue également le rendement en augmentant le temps d'usinage. Toutefois, les avis divergent quant à l'importance de ce dernier défaut dans le pin d'Alep : certains scieurs voient dans cette essence une fréquence particulière de cœur résineux alors que d'autres mettent à mal cette idée reçue en indiquant qu'il se trouve tout aussi souvent dans les autres pins.

Le cœur excentré est également un défaut qui diminue le rendement matière en compliquant le plan de débit des grumes. Il a été cité moins fréquemment, probablement car il est moins récurrent que les autres défauts ayant les mêmes conséquences. Il a tout de même été considéré au même titre que ces derniers dans le document de classement, tant le rendement matière est apparu comme primordial dans l'évaluation de la qualité par les scieurs.

A propos du rendement matière, les entretiens ont été l'occasion de faire part d'un retour d'expérience positif : des essais de sciage du pin d'Alep ont révélé un rendement proche de 60 %, ce qui est particulièrement élevé en comparaison aux 50-55 % atteints par les autres pins et surtout par rapport aux 40 % estimés dans le cadre des essais mécaniques pour la normalisation.

Soigner l'aspect esthétique des produits :

La deuxième catégorie de critères évoquée concerne l'aspect esthétique du bois. En effet, la densité de nœuds, même sains, et le bleuissement sont des défauts cités par beaucoup de scieurs. Bien qu'ils admettent que cela ne détériore pas les qualités mécaniques du bois, ils invoquent la réticence des seconds transformateurs à utiliser des planches et des poutres comportant des nœuds visibles ou ayant perdu leur teinte initiale. La raison à cela, est l'inquiétude que peuvent provoquer les imperfections esthétiques quant à la solidité du produit chez le client final.

Cela met en évidence l'effort de communication nécessaire pour réhabiliter la confiance dans la mise en œuvre en structure de bois à l'aspect imparfait. Pour cela, on pourra par exemple faire appel aux photographies de charpentes anciennes constituées de poutres très noueuses.

Le bleuissement intervient après l'abattage des arbres, il ne peut être intégré au classement visuel qui s'applique dès le martelage et juste après la coupe.

Considérer cette altération esthétique probable du pin d'Alep est important pour organiser la logistique de stockage : il faudra limiter au maximum le temps passé à l'air libre et privilégier des conditions peu humides et fraiches (exploiter en hiver) pour limiter le développement du champignon responsable du bleuissement.

Assurer la résistance du matériau :

Les critères affectant la résistance du bois de pin d'Alep n'arrivent qu'en troisième position au cours des entretiens. Leur importance est évidemment primordiale, puisqu'ils sont rédhibitoires à toute valorisation en structure, là n'est pas la raison de leur positionnement tardif dans la discussion. Cela révèle plutôt la rareté d'apparition de ce type de défauts. En effet, les nœuds de grande taille ou pourris, l'entre-écorce, la pourriture interne, les grosses fentes, les accroissements très larges ou encore des structures de bois particulières (fil tors, bois de réaction, …) se rencontrent peu sur les pins d'Alep.

Indispensables dans le document de classement car ils conditionnent la résistance mécanique du bois, ils apparaîtront néanmoins en fin de diagnostic puisqu'il y a de grandes chances de rencontrer les défauts cités plus haut avant ces derniers. Rappelons que l'outil se veut pratique et qu'il est pour cela construit de manière à aller à l'essentiel en évitant autant que possible les observations superflues.

Cette mise en lien de la démarche théorique avec les avis des premiers acteurs de la transformation du pin d'Alep était indispensable mais n'a pas révélé de discordances majeures dans leurs conclusions. Cela a surtout permis d'ordonner les critères dans le document de sorte à correspondre aux priorités. Par ailleurs, le grand intérêt de cette phase d'entretiens a été la prise de contacts avec des potentiels acteurs moteurs du développement de la filière bois d'œuvre : les discussions ont été riches en enseignements et on fait émerger des idées directement intégrées dans cette étude, ou conservées comme des perspectives de suite à ce travail. Dans l'autre sens, cela a permis de faire connaître l'existence de ce travail dans le but de favoriser sa mise en pratique par les acteurs concernés.

3. Mise en pratique et résultats : évaluation de la part de bois d'œuvre dans les coupes en cours en 2019

Le document obtenu à l'issue de la totalité de la démarche, alliant étude bibliographique, observations de terrain et consultation des professionnels de l'aval de la filière, est un tableau contenant l'ensemble des critères à considérer associés à leurs seuils respectifs pour les trois classes de qualité retenues. ***[ANNEXE IV.2]*** L'exhaustivité et la précision de ce document en font une référence indispensable mais difficilement applicable en l'état sur le terrain. C'est pourquoi, sa déclinaison en outils opérationnels s'est révélée nécessaire. A la suite de laquelle, une application sur le terrain a été menée permettant à la fois de tester les documents et de répondre à une demande d'inventaire de la qualité sur des coupes prévues en 2019 à l'état d'assiette de l'Office National des Forêts.

a. La déclinaison du tableau de référence en outils opérationnels

- **Une clef de détermination : *[ANNEXE IV.3]***

Tout d'abord, il a été imaginé l'élaboration d'une clef de détermination simplifiée reprenant l'ensemble des critères du tableau de référence spécifiquement ordonnés pour minimiser le temps de tri. Elle fonctionne selon le principe des critères déclassants, des plus grossiers aux plus fins. Composée de deux parties correspondant aux deux classes de qualité pour lesquelles des critères sont imposés (Palette et Structure), le processus de réflexion proposé dans la clef est le suivant :

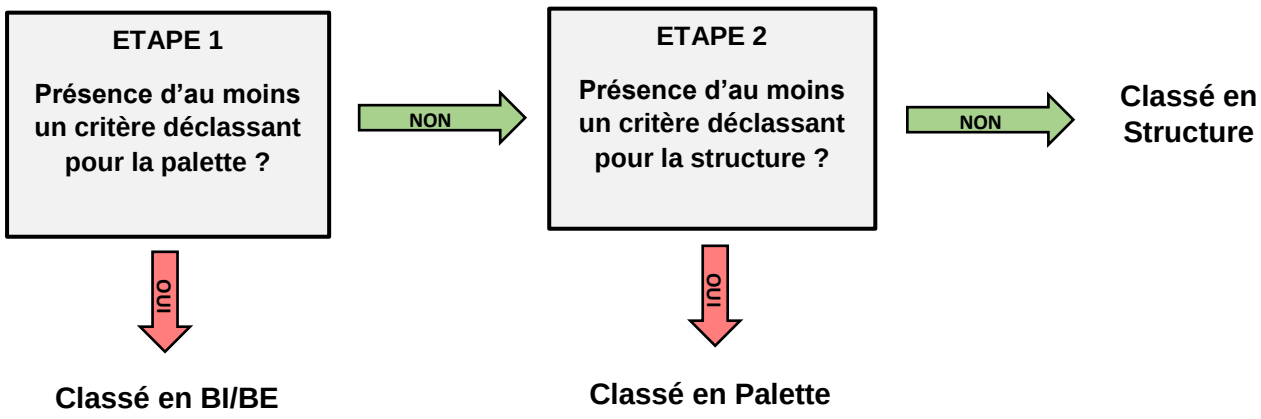


Figure IV.4. : Schéma de fonctionnement de la clef de détermination : principe du critère déclassant

Ainsi, face à une grume ou à une tige de pin d'Alep, on se pose d'abord la question d'une possible valorisation en bois d'œuvre palette. Si et seulement si c'est le cas, on s'interroge sur ses aptitudes à être mise en œuvre en structure. Il suffit que l'un des critères soit recensé pour stopper l'analyse. Cette méthode exclut toute observation superflue, minimisant ainsi le temps de tri.

Toujours dans un souci d'optimisation de la rapidité de classement, à chaque étape, les critères ont été ordonnés selon un compromis entre probabilité d'apparition et visibilité : c'est-à-dire que les défauts immédiatement décelables à distance de l'arbre ou de la grume apparaissent au début du processus, de même que ceux très fréquents. A l'inverse, ceux qui nécessitent une observation plus attentive auprès du tronc ou qui sont très rares sont en bas du tableau.

L'optimisation du temps de tri et sa simplification ne doivent pas se faire au détriment de la fiabilité du classement, c'est la raison pour laquelle, la clef comporte la liste exhaustive des critères et de leurs seuils, y compris ceux extrêmement rares (présence d'un corps étranger par exemple). Cependant, la rareté de certains défauts et les appellations succinctes dépourvues de commentaires (choisies pour ne pas surcharger le document) peuvent conduire à des incompréhensions de certains éléments. Cette clef a donc été accompagnée d'un guide de reconnaissance des critères auquel on pourra se référer en cas de doutes.

- **Un guide de reconnaissance des critères : *[ANNEXE IV.4]***

En complément de la clef, un guide d'aide à la reconnaissance des critères présents dans le classement a été élaboré. Illustré de photographies annotées, ce document propose des définitions de chaque défaut, explicite leurs seuils et des méthodes de mesures. Il présente également une série d'exemples d'arbres classés selon les trois catégories de qualité.

La fonction de cet outil est d'éviter de surcharger la clef simplifiée en y transférant toutes les précisions la concernant. Il doit permettre de lever les possibles ambigüités et les divergences d'interprétation pour minimiser l'« effet opérateur » lors du tri, et donc en garantir l'uniformité entre les acteurs. Ce dernier point est essentiel pour la construction d'une chaîne de valorisation des pins d'Alep en bois d'œuvre réellement bénéfique pour tous les professionnels impliqués en évitant les tensions provoquées par des estimations divergentes, qui entrainent forcément des manques à gagner à certains maillons.

De plus, l'activité de tri étant assez nouvelle pour le pin d'Alep, un tel document a d'autant plus de raisons d'exister. Toutefois, l'idéal reste une formation à son utilisation menée directement avec les potentiels utilisateurs sur le terrain. C'est ce qu'a permis l'application du classement mis au point dans le cadre de formations spécifiquement dédiées et de l'inventaire réalisé avec l'appui des techniciens de terrain de l'ONF. A travers cela, les déclinaisons du tableau de référence en outils opérationnels ont pu être testées et améliorées.

b. L'application du classement visuel : test du document dans le cadre d'un inventaire réel et diffusion auprès des potentiels utilisateurs

(1) Un début de diffusion et de déploiement

La version initiale du classement mise en forme en outils opérationnels tout juste élaborée, une demande spécifique de l'agence ONF 13-84 de réaliser un bilan des possibilités de valorisation en bois d'œuvre sur les coupes prévues en 2019 a été l'occasion de sa mise en application en conditions réelles et à des fins utiles. Les inventaires ont été réalisés avec l'appui des techniciens forestiers en charge de la coupe, permettant ainsi de leur présenter l'outil.

Par ailleurs, des formations dédiées à l'utilisation de ce classement visuel ont été organisées dans deux unités territoriales de l'agence. Ces réunions techniques ont provoqué des discussions particulièrement intéressantes quant à l'applicabilité de l'outil, ses points forts, ses limites, les éléments à éclaircir, … qui ont directement été prises en compte pour faire évoluer les documents.

> *Passées certaines réticences, l'accueil de l'outil par les techniciens forestiers a paru très favorable. Un indicateur de l'évolution dans la considération de la qualité des peuplements de pin d'Alep immédiatement constaté au cours des formations a été le nombre de parcelles citées par les techniciens comme comportant des arbres valorisables en bois d'œuvre : alors qu'il était proche de zéro avant la réunion, plusieurs peuplements étaient évoqués en fin de formation après visualisation des photo-exemples et visite de terrain.*

Au sein du bureau d'étude Alcina, l'outil a également été présenté et testé. Une application mobile facilitant sa mise en œuvre est même en cours d'élaboration. Elle permettrait d'intégrer complètement l'outil dans les opérations sylvicoles menées par les gestionnaires forestiers.

Enfin, des réunions rassemblant un panel plus large d'acteurs de la filière forêt-bois de la région ont permis de porter à connaissance l'existence de l'outil : il a été présenté lors de la journée « Bâtir demain avec le pin d'Alep » du 12 juillet 2019, en présence de 140 professionnels, et à l'occasion de réunions techniques organisées par l'ONF avec des représentants régionaux notamment.

(2) Des premiers résultats

La démarche d'inventaire de la qualité dans les coupes à l'état d'assiette 2019, initiée à l'ONF et soutenue par la région dans le cadre du financement d'une fiche action, s'est effectuée selon un

protocole rigoureux. Ainsi, dans un domaine où peu de références existent, cela doit permettre de transformer ce qui se limite à des estimations (part de la qualité bois d'œuvre sur l'ensemble de la ressource, dans les forêts publiques comme privées) en des données d'inventaire fiables.

- **Protocole :**

L'opération consiste à noter la qualité d'un échantillon d'arbres d'après la classification en trois catégories proposée dans l'outil : bois d'œuvre « Structure », bois d'œuvre « Palette », et bois d'industrie et d'énergie. Il s'agit d'un échantillonnage systématique aléatoire, réalisé à l'échelle d'une unité d'analyse homogène (en l'occurrence la surface d'une coupe), et dont l'effort est calculé à partir du coefficient de variation et de l'erreur tolérée ciblée.

La description précise du protocole a fait l'objet d'un document spécifique ***[ANNEXE IV.5]***, permettant sa reproductibilité dans le cadre d'autres inventaires de la qualité des pins d'Alep.

- **La sélection des coupes analysées :**

Dans un souci d'optimisation du rapport « effort déployé sur bénéfices retirés », et sans perdre de vue l'objectif final qui est moins d'apporter une connaissance générale de la part moyenne de qualité dans les peuplements de pin d'Alep que de repérer précisément les coupes d'intérêt où une valorisation de bois d'œuvre est envisageable, un tri a été effectué. En effet, il s'agit ici d'une démarche concrète pour laquelle des solutions logistiques seront proposées (commercialisation en bois façonné, organisation du tri et gestion du stockage).

La sélection parmi l'ensemble des coupes à l'état d'assiette a été réalisée en calculant un niveau d'intérêt pour chacune, selon les principes suivants :

- Volume total : les coupes de volume important ont été privilégiées
- Calibre : les diamètres les plus importants ont été privilégiés
- Type de coupe : les coupes de régénération ou d'amélioration à des stades avancés ont été préférées aux premières éclaircies
- Composition : les coupes dont les produits sont à 100 % composés de pin d'Alep ont été privilégiées

De ce tri, est ressortie une liste de dix coupes d'intérêt majeur à inventorier. Dans le temps imparti du stage, sept inventaires ont été réalisés.

- **Le relevé des critères déclassants, en complément :**

Cet inventaire doit aussi permettre de tester le document de classement et de l'ajuster au besoin. Pour cela, à chaque arbre non valorisable en structure, le ou les critère(s) déclassant(s) au regard de la clef de détermination ont été systématiquement relevés. La somme de tous les arbres évalués sur chaque coupe constitue un échantillon de 514 relevés. Outre l'apport de connaissance pertinent sur les défauts récurrents portés pas les pins d'Alep, cela a permis d'ordonner les critères de la clef au plus juste par rapport à leur fréquence réelle (tout en respectant la logique de constater d'abord les défauts les plus rapidement visibles).

Défauts qui déclassent en BI/BE		Défauts qui déclassent en BOP	
Défauts	**Proportions**	**Défauts**	**Proportions**
Courbure forte	45 %	Densité des nœuds	68 %
Diamètre insuffisant (< 25)	33 %	Diamètre insuffisant (< 35)	44 %
Nœud(s) pourri(s)	24 %	Inclinaison	10 %
Très grosse branche	10 %	Courbure complexe	6 %
Blessure	10 %	Grosse branche	4 %
Champignons	10 %	Bosse	2 %
Autres	4 %	Autres	2 %

La somme des proportions dépasse 100 car certains arbres cumulent plusieurs critères déclassants

Tableau IV.9. : Récurrence des défauts dans les arbres inventoriés (n=514)

Notons que les défauts les plus fréquents sont contrôlables par la sylviculture (notamment en conduisant une phase de compression dans les peuplements jeunes et en permettant un développement harmonieux des plus belles tiges par le dépressage, voire le détourage). Cela confirme la nécessité d'appliquer les itinéraires adaptés pour les minimiser et rappelle le potentiel d'augmentation de la part de bois d'œuvre à l'avenir.

Les arbres déclassés à cause du diamètre sont simplement le fait d'un stade de développement trop précoce. On peut déplorer qu'ils aient été martelés alors qu'ils auraient pu être amenés à leur diamètre d'exploitabilité si leur qualité potentielle avait été reconnue.

A l'issue de l'inventaire de terrain, les proportions de qualité ont été calculées avec une marge de tolérance de 8%, ce qui donne un aperçu précis du potentiel par coupe :

N°	Type de coupe	Surface	Volume martelé (hors perches)	Proportions de qualité			Volumes par qualité		
				BOS	BOP	BI/BE	BOS	BOP	BI/BE
1	Coupe d'amélioration 1ère éclaircie	7,3 ha	265 m^3	0 %	22 %	78 %	0 m^3	58 m^3	207 m^3
2	Coupe d'amélioration 1ère éclaircie	5,5 ha	220 m^3	13 %	58 %	28 %	29 m^3	128 m^3	62 m^3
3	Coupe d'amélioration 2ème éclaircie	9,3 ha	179 m^3	4 %	19 %	77 %	8 m^3	34 m^3	138 m^3
4	Coupe d'amélioration 2ème éclaircie	3,6 ha	227 m^3	3 %	17 %	80 %	7 m^3	39 m^3	182 m^3
5	Coupe d'amélioration 2ème éclaircie	4.2 ha	234 m^3	9 %	41 %	50 %	21 m^3	96 m^3	117 m^3
6	Coupe d'amélioration 2ème éclaircie	16,1 ha	655 m^3	5 %	38 %	57 %	33 m^3	249 m^3	373 m^3
7	1ère coupe d'ensemencement	9,8 ha	908 m^3	16 %	24 %	60 %	145 m^3	218 m^3	545 m^3

Tableau IV.10. : Résultats des inventaires de la qualité sur sept coupes de l'état d'assiette 2019 de l'ONF (13-84)

- Deux coupes à qualité potentielle forte :

Les coupes n° 2 et n° 5 comportent en l'état peu de qualité bois d'œuvre. En structure notamment, les volumes sont négligeables. Cependant, les diamètres moyens de ces peuplements sont de l'ordre de 25 cm, ce qui est inférieur au seuil minimal de la qualité BOS. Or, sur ces coupes, parmi les tiges inaptes à la structure, un grand nombre le sont à cause de ce diamètre insuffisant. Peu d'autres défauts ont été constatés, ce qui augure une amélioration forte de la part de qualité BOS aux prochaines rotations.

- Une coupe à qualité potentielle moyenne :

Dans le peuplement n° 6, il y a peu de BOS, en grande partie du fait d'une branchaison ou d'une courbure excessive. La phase de compression censée limiter ces défauts a peut-être été défaillante. A ce stade, il n'est plus possible d'améliorer significativement la situation : le potentiel d'avenir est donc limité. Toutefois, à l'horizon de cette coupe, le volume particulièrement élevé permet d'envisager une valorisation en bois d'œuvre : un camion de BOS et près de 250 m^3 de BOP.

- Une coupe à qualité disponible immédiatement importante :

La coupe d'ensemencement (n° 7) présente le double avantage d'un volume important (induit surtout par des diamètres élevés) et d'une proportion de bois d'œuvre assez importante permettant dès à présent de proposer une valorisation par lots de qualité.

- Trois coupes à potentiel faible :

En fixant le seuil minimum pour la constitution d'un lot à 30 mètres cubes (capacité minimale d'un grumier), les trois autres coupes présentent des volumes de BOS insuffisants pour être valorisables, seul le débouché palette pourrait être envisagé. Les critères déclassants sont essentiellement en lien avec la conformation ou l'état sanitaire des arbres, ce qui laisse entrevoir peu de perspectives d'amélioration, en particulier dans le peuplement au stade de deuxième éclaircie. En effet, l'essentiel de la conformation de l'arbre se façonne dans les jeunes peuplements (les travaux de dépressage sont à ce titre extrêmement importants), si elle est mauvaise dans une forêt adulte, il sera donc difficile d'améliorer la situation. De la même façon, il n'existe pas de technique pour enrayer une infestation par les champignons, si ce n'est d'éliminer en priorité les arbres atteints, ce qui est peu efficace s'ils sont trop nombreux, en restant dans le cadre d'une gestion durable.

(3) Bilan de l'expérimentation de l'outil sur le terrain

Ainsi, cette mise en application et cette diffusion réalisées auprès de nombreux acteurs de la filière, aux secteurs d'activités et aux niveaux d'expertise sur le pin d'Alep variés, a permis une mise à jour continue du document pour en améliorer l'ergonomie et la fiabilité.

Les discussions avec les opérateurs de terrain ont fait apparaître le décalage existant entre leur perception de la qualité des pins d'Alep et les conclusions de l'élaboration du classement visuel : ils sont globalement beaucoup plus pessimistes que les possibilités de valorisation que laissent entrevoir la norme et certains professionnels de l'aval. Cela pourra conduire à une requalification de beaucoup de peuplements, injustement cantonnés à des débouchés peu valorisants.

Sur le fond et dans son principe général, la version initiale a peu évolué, il s'agit de l'ordonnancement des critères, de la mise en forme et des explications du guide qui ont subi des modifications au fil des concertations. A la fin de ce stage, il en résulte alors une version stabilisée pour laquelle il peut être envisagées des perspectives d'utilisation.

4. Perspectives d'utilisation : trier plus pour transformer chaque grume à sa juste valeur

- **Intégrer l'outil dans les procédures courantes :**

Cet outil de classement peut être une référence unique utile à chaque étape de la chaine de valorisation des pins d'Alep. Il permettrait une homogénéité dans les estimations des volumes favorisant la confiance entre les différentes parties au moment des ventes. De plus, la fiabilité de l'outil minimise le risque de mauvaise qualification dont les conséquences sont problématiques : insatisfaction de l'acheteur dans le cas d'une surestimation et manque à gagner dans le cas inverse.

Pour une valorisation différenciée des arbres en fonction de leur qualité, le mode de vente le plus adapté est le bois façonné puisqu'il permet la constitution de lots spécifiques à chaque débouché. Le tri est alors effectué en amont selon les critères du classement. Toutefois, il n'est pas toujours possible de mettre en place ce type de vente. Pourtant, l'information qualitative est importante et peut être transmise dans le cadre d'une vente sur pied. Pour cela, l'outil s'applique à l'étape du martelage pour disposer d'une estimation précise à indiquer au moment de la visite de la coupe par l'exploitant ou à inclure dans le catalogue constitué pour les ventes par appels d'offre.

Outre l'utilité évidente du classement à la préparation des ventes, qualifier les peuplements de pin d'Alep peut également être utile en amont pour repérer la qualité potentielle. Des choix sylvicoles adaptés en découleront, permettant de favoriser et d'amener jusqu'à leur diamètre d'exploitabilité les plus belles tiges.

Plus il y a d'intermédiaires dans la chaine de valorisation des pins d'Alep, plus le référentiel commun est nécessaire. C'est le cas par exemple à l'Office National des Forêts où le classement pourrait trouver sa place dans les procédures de la façon suivante :

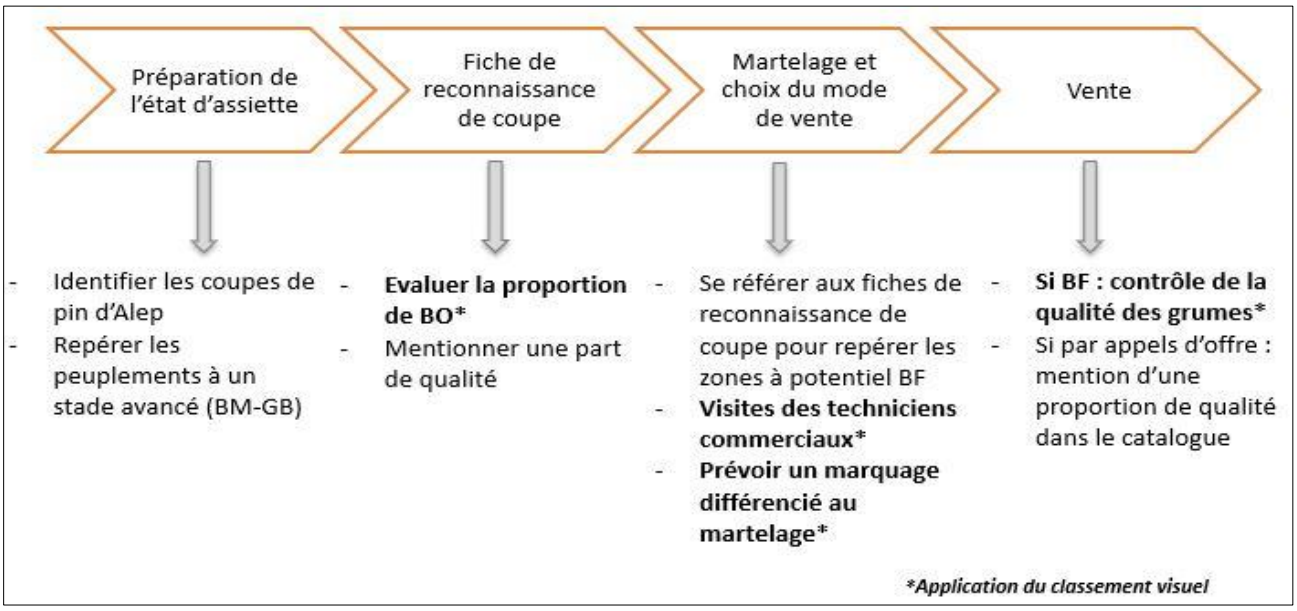


Figure IV.5. : Intégration de l'outil de classement visuel dans les procédures de l'ONF

Dès la préparation de l'état d'assiette 2020, l'outil a été diffusé auprès des techniciens dans l'objectif de recueillir des estimations de la qualité sur les fiches de reconnaissance de coupe. Cette information pourra faciliter les choix du mode de vente en pré-ciblant les coupes candidates à une valorisation en bois façonné et celles pour lesquelles un marquage différencié au martelage aurait un intérêt.

L'utilisation de l'outil de classement visuel tel que proposé ci-dessus constitue sa valorisation optimale. Il s'agit d'un objectif à poursuivre. Toutefois, le poids des usages étant fort, il est réaliste de penser que son déploiement sera progressif. En attendant, ce document, qui a fait l'objet d'une diffusion auprès des techniciens de l'ONF, au sein du bureau d'étude Alcina (qui a contribué à son élaboration) et d'une présentation à de nombreux acteurs de la filière à l'occasion de l'événement du 12 juillet 2019 (« Bâtir demain avec le pin d'Alep »), a déjà le mérite d'instaurer la considération de la qualité dans les peuplements de pin d'Alep. En effet, par l'exemple au cours de sa phase de test, l'outil a montré l'existence de bois valorisables en structure, ce qui est la plus efficace des incitations à la mise en place d'actions pour la valorisation du bois d'œuvre de pin d'Alep.

Conclusion

Les objectifs initiaux pour lesquels avaient été imaginés les outils techniques au cours du projet étudiant de 2018, en amont de ce stage, ont pu se concrétiser au cours de ces six mois d'étude.

La simulation de l'évolution des peuplements de pin d'Alep et le classement visuel des bois ronds sont des applications concrètes de connaissances acquises, enrichies par des investigations de terrain et l'apport technique considérable d'échanges avec les professionnels de la filière forêt-bois locale. L'outil de cartographie de la ressource par exploitation des données satellitaires Sentinel est quant à lui complètement innovant, et sa réussite était très incertaine au départ de ce stage.

Les résultats fournis par le traitement des images Sentinel sont finalement satisfaisants avec la proposition d'une caractérisation des densités des peuplements de pin d'Alep visuellement efficace par des représentations cartographiques. Celle-ci semble fiable à l'échelle de précision requise pour la constitution d'unités de gestion, dans lesquelles une analyse plus fine pourra faire suite. Toutefois, l'aboutissement de ce travail consisterait en une campagne de terrain pour constituer un jeu de placettes de validation sur lequel la fiabilité de l'outil serait rigoureusement testée.

Dans les forêts repérées grâce aux images satellites Sentinel, mais aussi dans le cadre d'opérations de gestion courante, le diagnostic sylvicole projeté dans l'avenir que propose le deuxième outil peut trouver son application. Plus qu'une aide à la décision pour le sylviculteur, dont les compétences techniques peuvent le dispenser d'en avoir besoin, cette application fournit un support de communication précis à présenter au propriétaire, auquel les décisions sylvicoles reviennent. Dans sa première version, l'outil propose un diagnostic dont les indicateurs sont essentiellement économiques. L'intégration d'autres variables caractérisant l'efficacité de chaque scénario sylvicole pour répondre aux autres enjeux de la forêt serait une évolution intéressante pour aboutir à terme à un outil de diagnostic complet. Dès cette année, des travaux sont amorcés au CRPF d'Occitanie pour évaluer précisément les bilans carbone de chaque itinéraire : à cette occasion, nous nous sommes coordonnés afin que les scénarii et les peuplements de référence testés soient les mêmes. Les résultats de cette étude seront ainsi facilement intégrables pour enrichir la première version du simulateur.

Pour récolter le fruit des itinéraires sylvicoles dynamiques et, à plus court terme, valoriser la qualité déjà présente dans certains peuplements de pin d'Alep, tel que l'a révélé l'inventaire réalisé au cours de cette étude, il est indispensable d'être en mesure de la reconnaître. C'est ce à quoi peut répondre le classement visuel établi. Réalisé selon une démarche rigoureuse et à la lumière de sources variées, il est applicable en l'état. Toutefois, une validation formelle de sa fiabilité pourrait être effectuée au sein d'un laboratoire d'essais mécaniques sur un échantillon de grumes dont les capacités estimées par le classement visuel seraient comparées à celles réellement mesurées.

Ainsi, les outils proposés à l'issue de ce stage sont améliorables, mais déjà opérationnels en l'état. Il revient désormais aux acteurs de la filière de s'en emparer s'ils en voient une utilité. Pour le permettre, des modalités de diffusion doivent être mises en place. Au sein de l'Office National des Forêts et du bureau d'étude Alcina, pleinement engagés dans leur élaboration, une utilisation interne est envisagée. Dans une vision plus large, et pour répondre à l'objectif initial de DOPALEP, par lequel ce travail a vu le jour, une plateforme de partage dédiée au pin d'Alep est en projet. Développée sur internet, elle doit donner accès à l'ensemble des ressources sur cette essence, dont les outils de ce stage font partie.

Enfin, la plus belle des suites que pourrait avoir ce stage verrait l'application concrète d'une partie de ses réalisations dans le cadre d'une opération pilote de mise en œuvre du pin d'Alep en structure. Cela consisterait en la construction d'un bâtiment à partir de la ressource locale, et dans des unités de transformation de la région : un circuit-court, à faible bilan carbone, et bénéfique à toutes les parties prenantes. A l'agence ONF Bouches-du-Rhône-Vaucluse en particulier, une attention est portée aux projets de construction en pin d'Alep qui pourraient voir le jour, pour lesquels une opération pilote de ce type serait envisagée. Par ailleurs, des événements tels que la journée du 12 juillet 2019, qui a réuni plus de 140 acteurs de la filière, sont des occasions de se rendre compte de la dynamique positive qui s'opère autour de la valorisation du pin d'Alep et surtout, de mettre en lien les bonnes volontés : car en effet, du propriétaire forestier jusqu'au prescripteur, elles existent.

Espérons que les résultats de ce stage, et plus globalement du projet DOPALEP, participent à la mise en place du cadre favorable qui permettra à tout projet ambitieux de valorisation du pin d'Alep de pouvoir voir le jour. En cas de succès, d'autres exemples prendront le pas, et une filière bois d'œuvre de pin d'Alep se construira progressivement.

Références bibliographiques

Ouvrages et publications :

ABBAS Hikmat, BARBERO Marcel, LOISEL Roger, QUEZEL Pierre. *Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyse écodendrométique.* Deuxième partie. 1985.

ABBOUD Marie, DAGAND Maxime, MARTIN Marie-Laure, MATHIEU Valentin, RICHERT Lucie, WOLFF Laetitia. *Sylviculture appliquée et principes d'aménagement.* AgroParisTech. 2017.

BOUTTE B., DURAND-GILLMANN M. *Pin d'Alep, les principaux défauts sanitaires*. Bulletin d'information du Département de la Santé des Forêts. 2012.

CHANDIOUX Olivier. *La valorisation bois d'œuvre du Pin d'Alep, source d'économie et d'emploi pour la forêt méditerranéenne*. 2015.

CHANDIOUX Olivier. *Valoriser le pin d'Alep : synthèse documentaire*. France forêt Provence-Alpes-Côte-d'Azur. 2015.

CHANDIOUX Olivier, RICODEAU Nicolas. *Le prix de mon arbre : vers une sylviculture de production du pin d'Alep.* Forêt méditerranéenne t. XXXV, n° 1. 2014.

CHARLET A., DEL REY P., GRATEAUD A., IGOA G., MARTIN M-L., MERCIER C., PILLET S., REVERDY R., SIMEONI M., WOLFF L. *Identification et développement d'outils pour la valorisation des peuplements de pin d'Alep.* AgroParisTech. 2018.

CHOMEL Fanny. *Regard sur les itinéraires sylvicoles du pin d'Alep : Modéliser pour optimiser.* AgroParisTech, mémoire de stage de fin d'études. 2015.

CHOMEL Fanny, CHANDIOUX Olivier, LE COURBE Albert. *La validation d'un modèle de croissance au service d'une réflexion sur la sylviculture du Pin d'Alep*. Revue Forestière Française LXVIII - 3, AgroParisTech. 2016.

COUHERT Bernard. *Sylviculture du pin blanc.* ONF. 1993.

COUHERT Bernard, DUPLAT Philippe. *Le Pin d'Alep dans la région PACA. Proposition pour une sylviculture et un modèle de production.* Bulletin technique de l'ONF n° 25. 1993.

DREYFUS Philippe. *Construction de modèles de croissance pour les peuplements réguliers à partir de données dendrométriques de l'IFN*. Revue Forestière Française t. LIII. 2001.

France FORET PACA. *Le pin d'Alep, un pionnier, plein d'avenir dans la construction*. Dossier de presse. 2018.

FRANSYLVA PACA. *Le pin d'Alep enfin réhabilité*. Document électronique. 2018.

GERARD Jean. *Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du Pin d'Alep (Pinus halepensis) de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Programme Bois - CIRAD-Forêt. 2004.

HATCHIGUIAN Nicolas, FABREGUE Laurent. *Rapport d'homologation du pin d'Alep en structure*. CERIBOIS. 2016.

LANGBOUR Patrick, GÉRARD Jean, GUIBAL Daniel et MAHLANI Kaoutar. *Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.* Forêt méditerranéenne t. XXXII n° 3. 2011.

MERLE Christine. *INFO MYCO : le Phellin du pin Porodaedalea pini*. Réseau Arbre Conseil, Office National des Forêts, bureau d'Etudes 13/84. 2015.

PREVOSTO Bernard, coordinateur. *Le pin d'Alep en France 17 fiches pour connaître et gérer.* Guide pratique. Edition QUAE. 2013.

TRESMONTANT David, QUESNEY Thierry. *Mémento sylvicole : pinèdes de pin d'Alep.* Office National des Forêts. 2014.

VENNETIER Michel, RIPERT Christian, BROCHIERO Fabien, B.K. RATHEBERG Cyrille, CHANDIOUX Olivier, ESTEVE Roland et al. *Evolution de la productivité du pin d'Alep en région méditerranéenne française.* Revue Forestière Française. Ecole nationale du génie rural. 2010.

VENNETIER M., VILA B., LIANG E.Y., GUIBAL F., RIPERT C. *Impact du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française.* Ingénieries - E A T, IRSTEA édition, p. 49 - p. 61. 2005.

Sites internet :

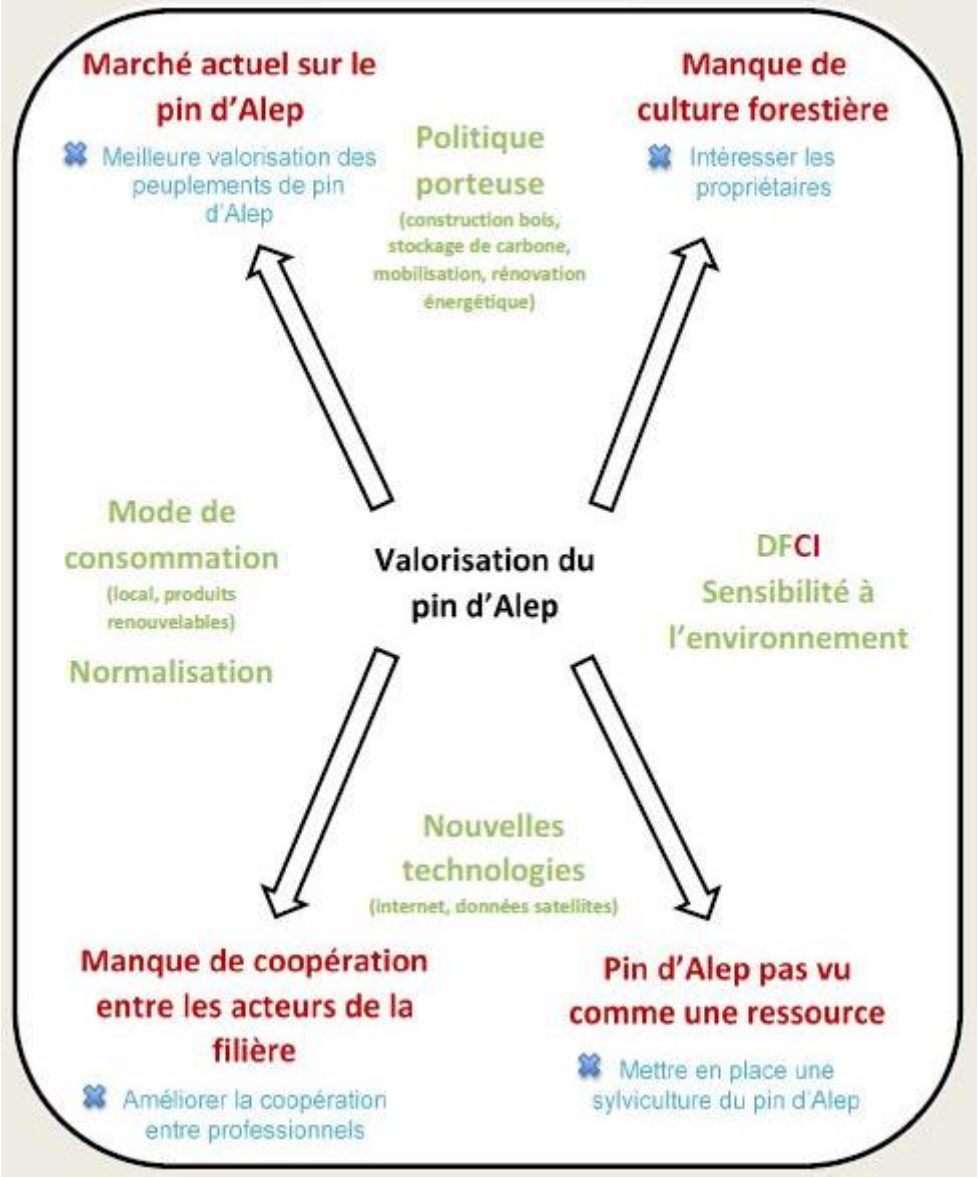
- Portail en ligne de l'Association Française de la Normalisation : sagaweb-afnor.org, en particulier :
- NF EN B52-001-1 (14-04-2018) : Règles d'utilisation du bois dans la construction – Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif
- NF EN 14081-1 (16-04-2016) : Structures en bois – Bois à structure de section rectangulaire classé pour sa résistance - Partie 1 : exigences générales
- NF EN 1927-2 (01-05-2008) : Classement qualitatif des bois ronds résineux – Partie 2 : pins

Dernière consultation juin 2019

- Site du SIG Grass : grass.osgeo.org – *Dernière consultation juillet 2019*
- Site de l'institut technologique FCBA : fcba.fr – *Dernière consultation août 2019*
- Site de l'association des pins de France : pinsdefrance.com – *Dernière consultation juin 2019*
- Site de la Fédération Nationale du Bois : fnbois.com – *Dernière consultation août 2019*
- Site de l'association France Forêt Bois : franceforetbois.fr – *Dernière consultation août 2019*

Annexes

ANNEXE I.1 : Etat des lieux de la filière pin d'Alep constaté lors du projet AgroParisTech 2018 : freins et leviers

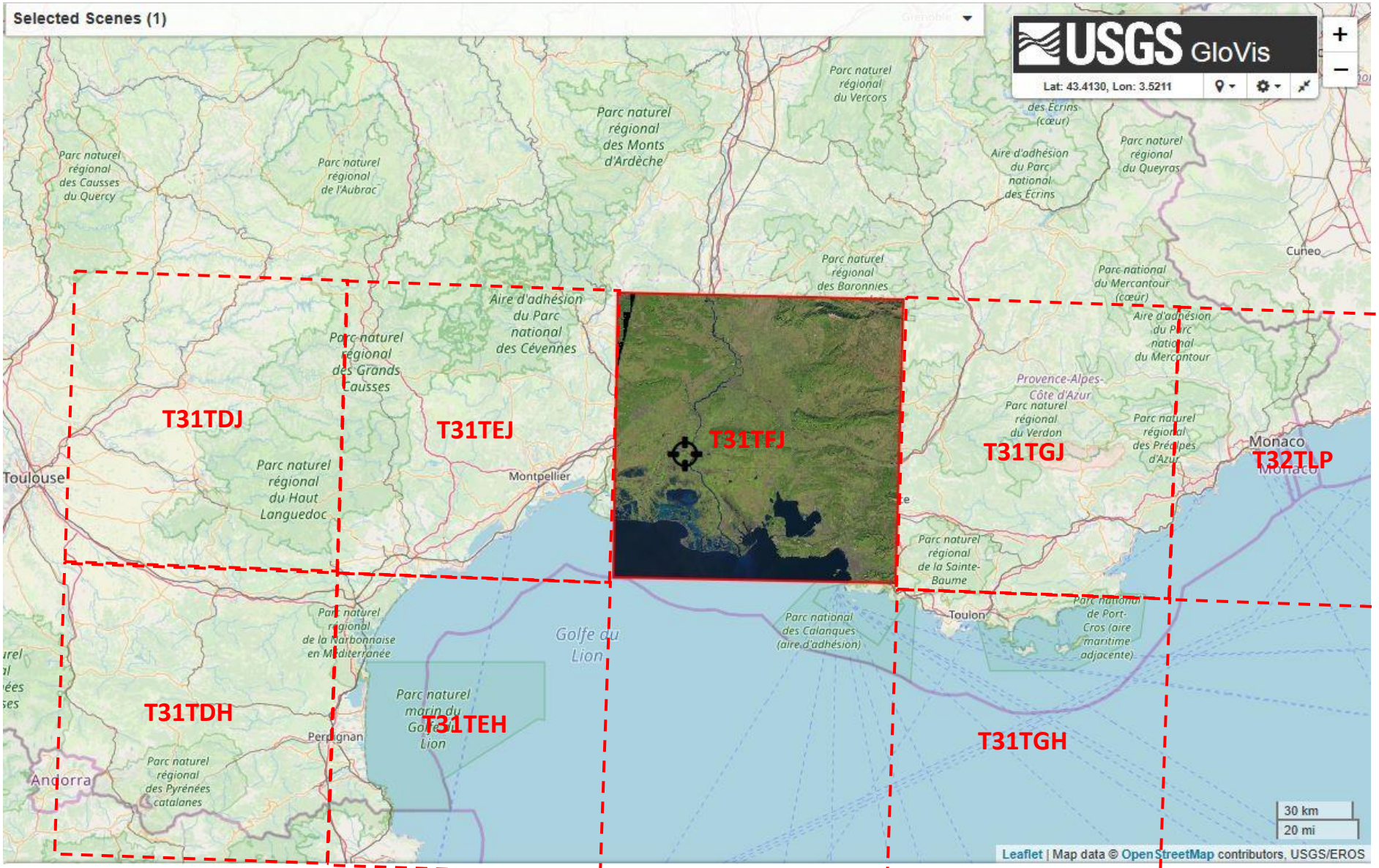


ANNEXE II.1 : La ressource de pin d'Alep en quelques chiffres

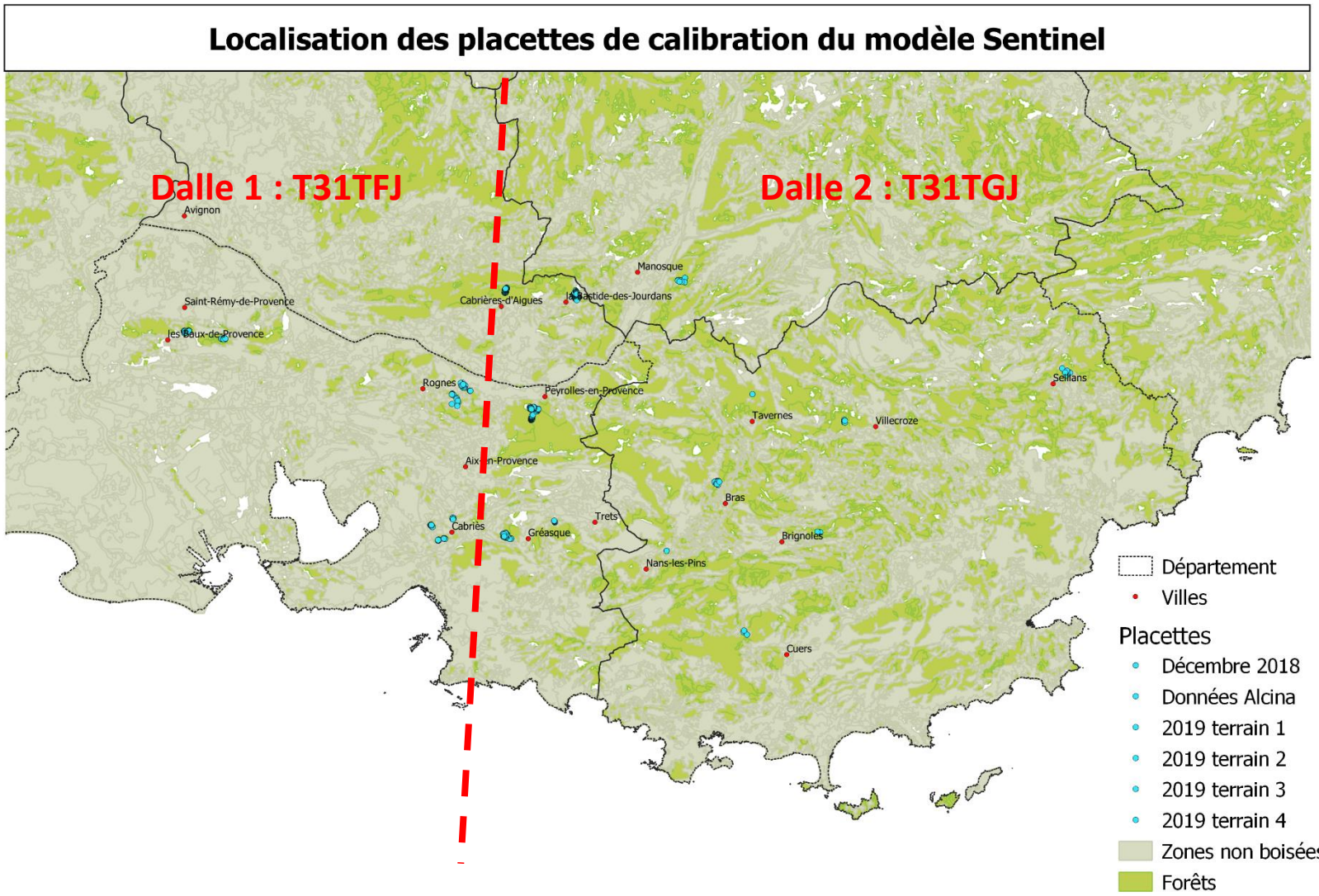
Ressource totale		**Surface totale**	> 235 000 ha
		Volume total	> 14 Mm^3
Evolution annuelle de la ressource		**Production annuelle**	550 000 m^3/an
		Accroissement courant	2-3 m^3/ha/an
		Disponibilité	281 000 m^3/an
		Récolte	< 200 000 m^3/an
		Pertes par incendie	25 000 m^3/an
Répartition de la ressource		**Part de forêts privées (surface)**	81 %
	Par département	**Var**	99 500 ha – 39 %
		Bouches-du-Rhône	67 000 ha – 27 %
		Vaucluse	27 400 ha – 11 %
		Alpes-Maritimes	13 300 ha – 5 %
		Hérault	11 700 ha – 5 %
		Alpes de Haute-Provence	11 100 ha – 4 %
		Gard	9 200 ha – 4 %
		Aude	8 500 ha – 3 %
		Autres (66, 26, 07, 2A, 2B, 48, 05)	< 2 %

Sources : O.Chandioux, *Synthèse documentaire*, 2015 ; B.Prevosto et al., *Le Pin d'Alep en France*, 2013 ; L.Fabregue, *Rapport d'homologation*, 2016.

ANNEXE II.2 : Positionnement des dalles traitées dans l'aire de répartition du pin d'Alep

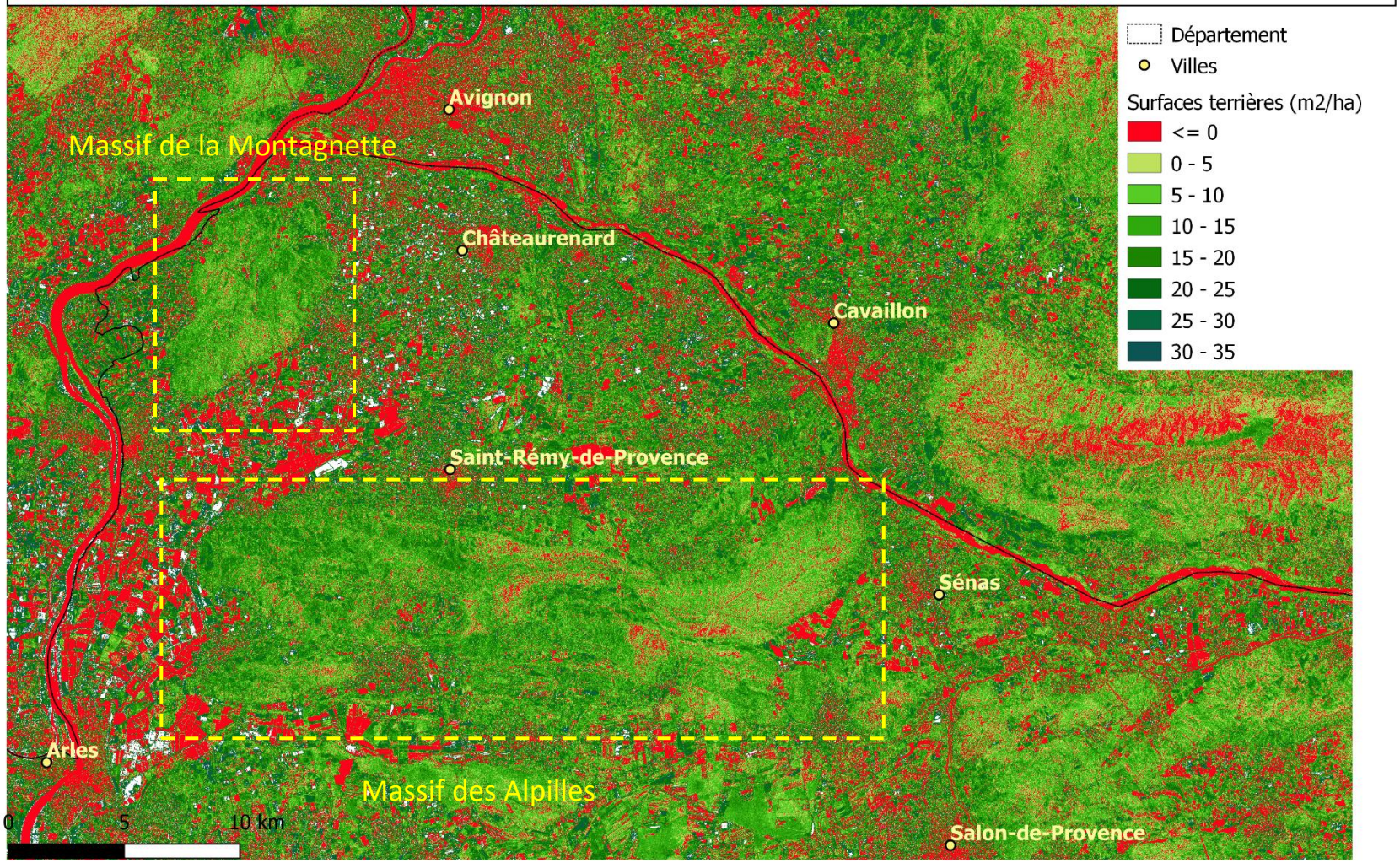


ANNEXE II.3 : Carte de la localisation des placettes de calibration du modèle Sentinel



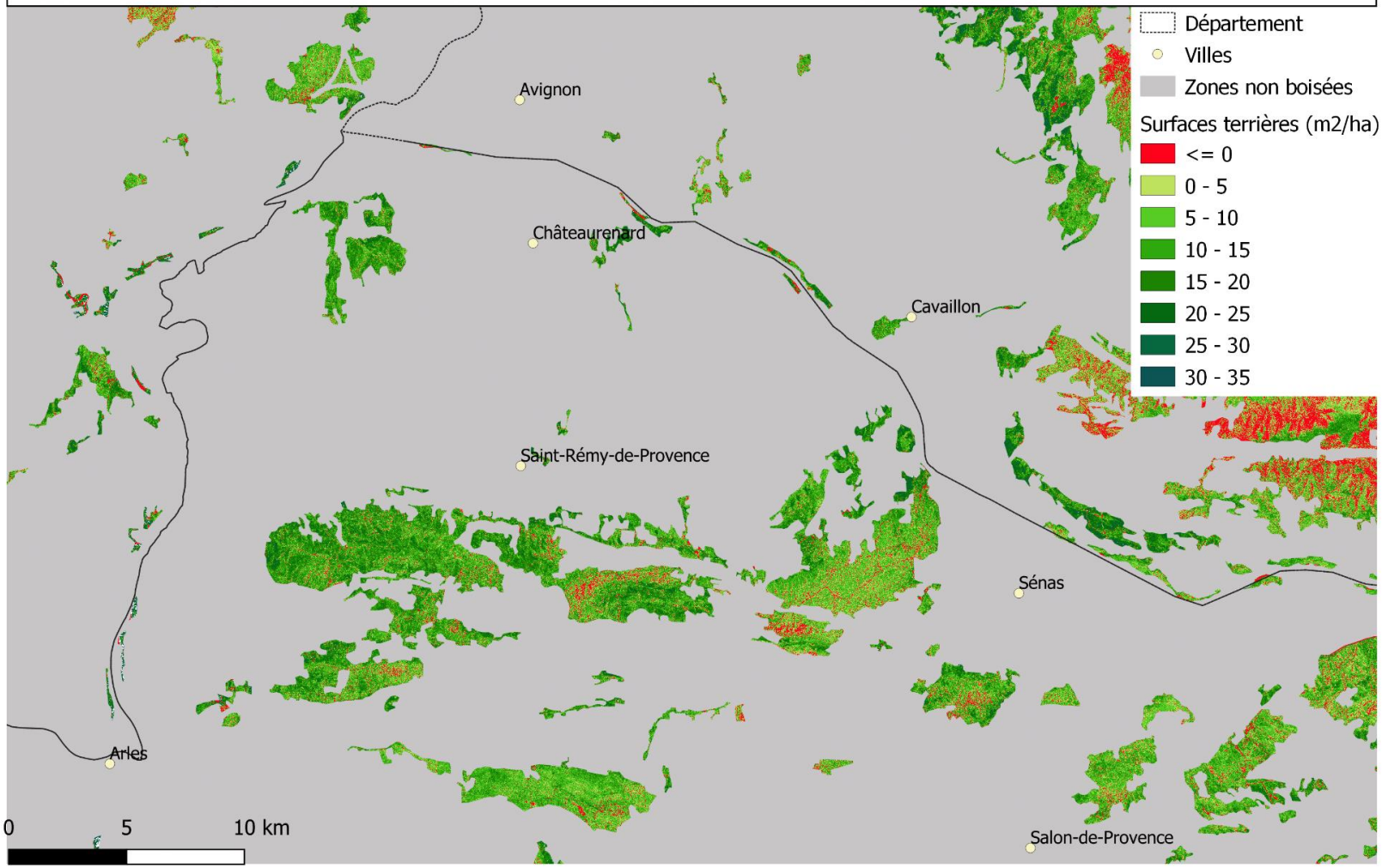
ANNEXE II.4 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel, données brutes, exemple sur deux massifs

CARTE 1 : Surfaces terrières prédites à une résolution de 10 mètres (données brutes)
Secteurs des Alpilles et de la Montagnette (13)



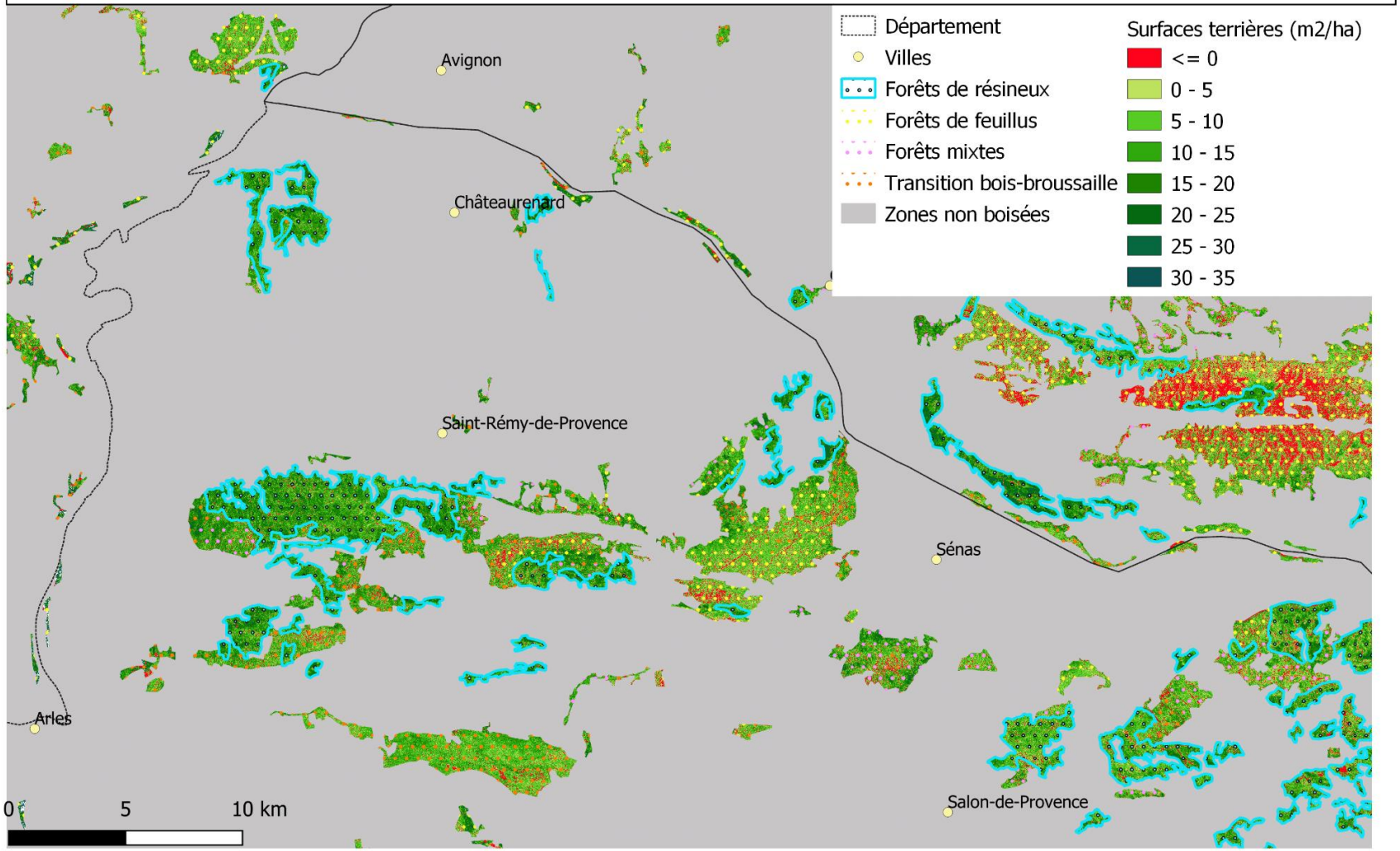
ANNEXE II.5 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés

CARTE 2 : Surfaces terrières prédites sur zones boisées à une résolution de 10 mètres
Secteurs des Alpilles et de la Montagnette (13)

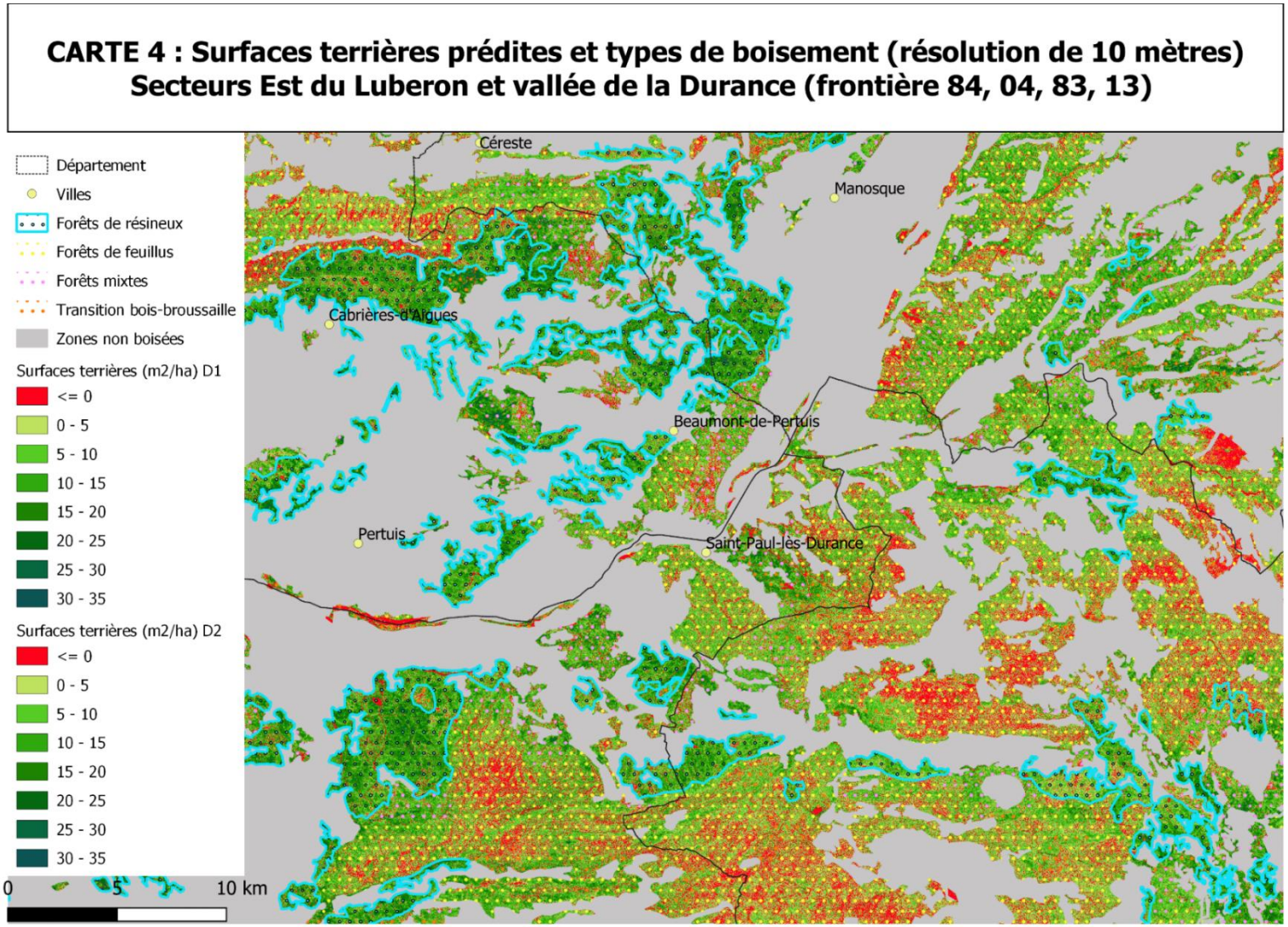


ANNEXE II.6 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés, avec caractérisation du type de forêt (exemple 1)

CARTE 3 : Surfaces terrières prédites et types de boisement (résolution de 10 mètres)
Secteurs des Alpilles, de la Montagnette et de l'ouest du petit Luberon

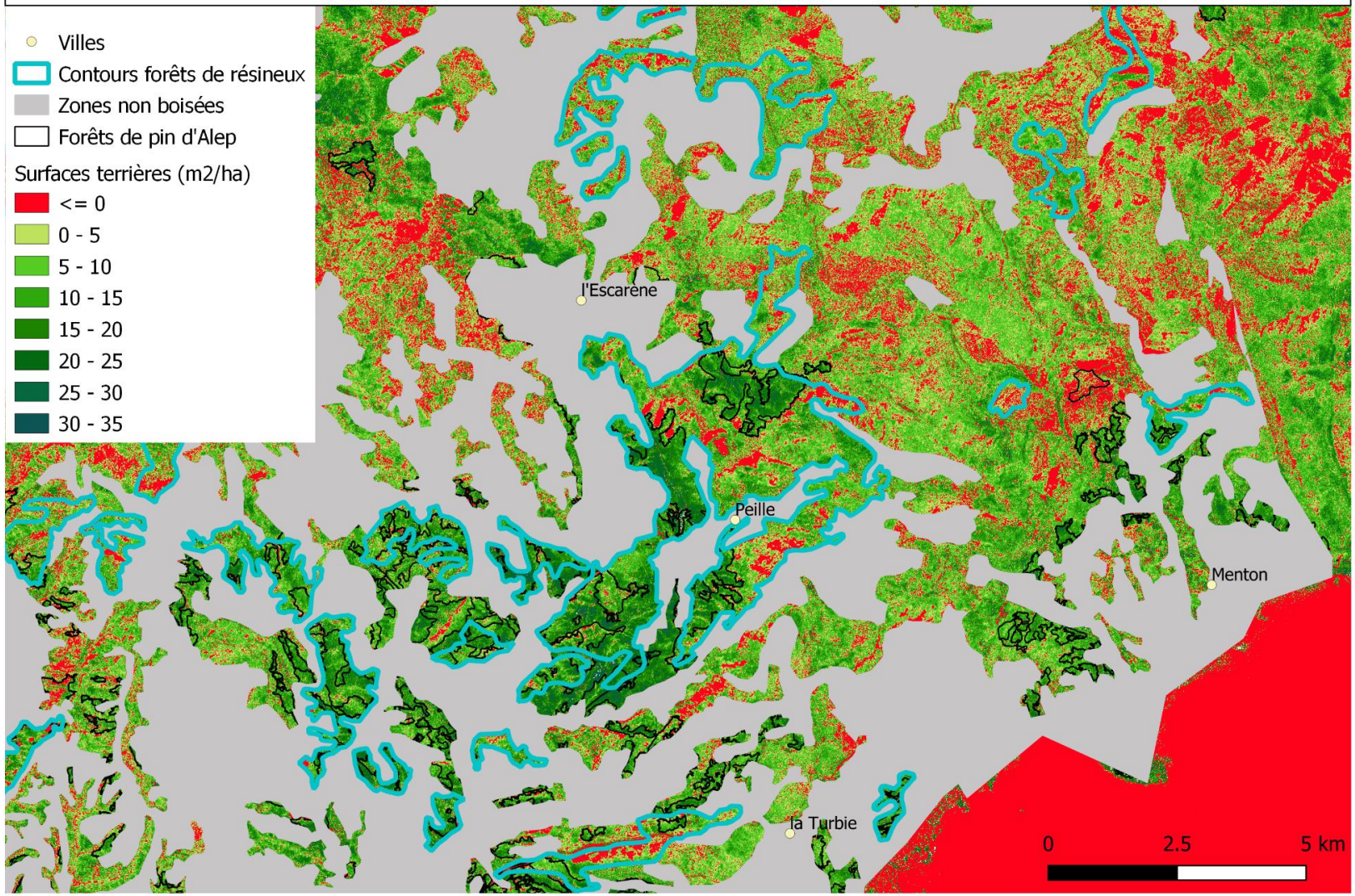


ANNEXE II.7 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel sur des massifs forestiers isolés, avec caractérisation du type de forêt (exemple 2)



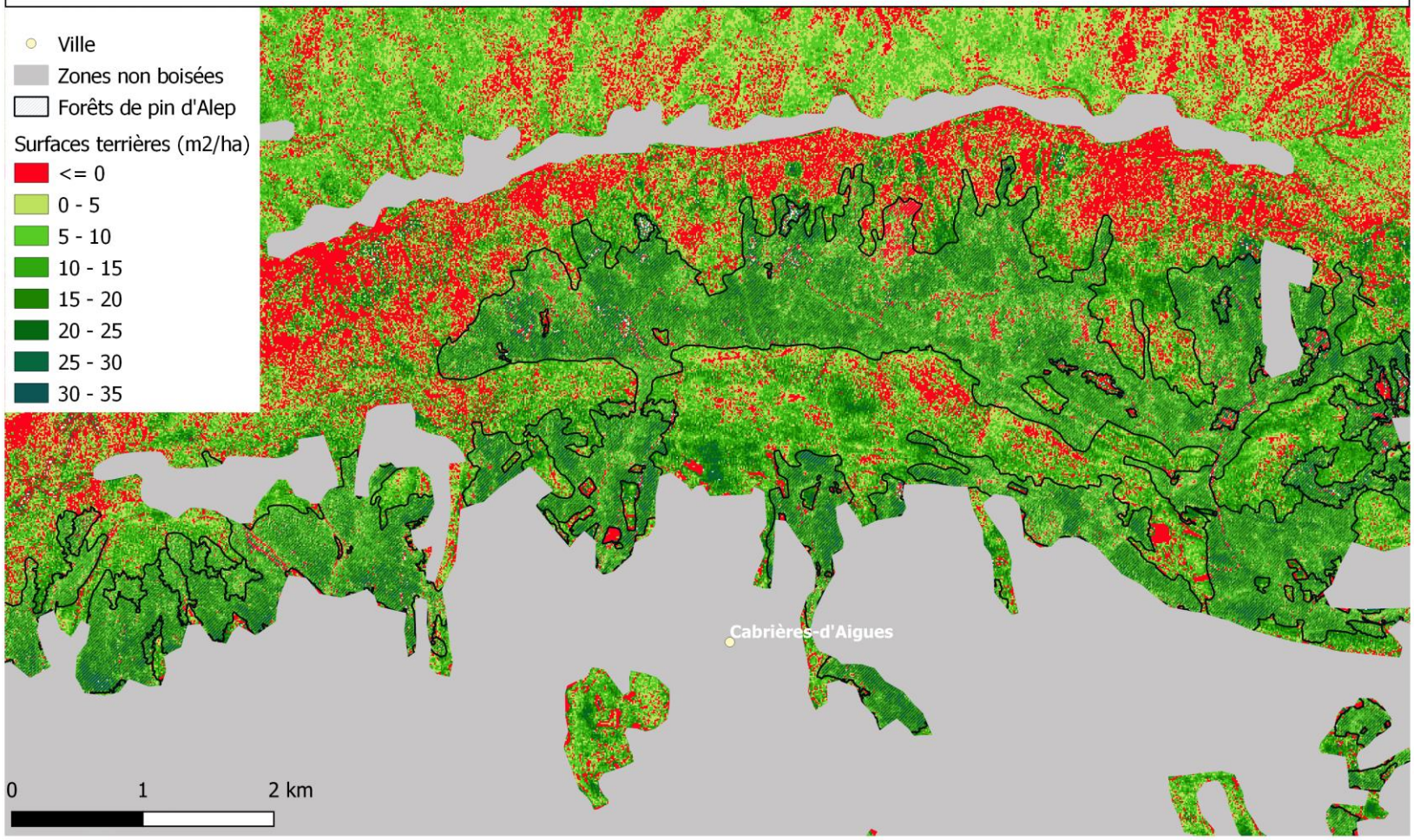
ANNEXE II.8 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel avec mise en évidence des peuplements de pin d'Alep

CARTE 5 : Surfaces terrières prédites et localisation des peuplements de pin d'Alep Sud des Alpes-Maritimes



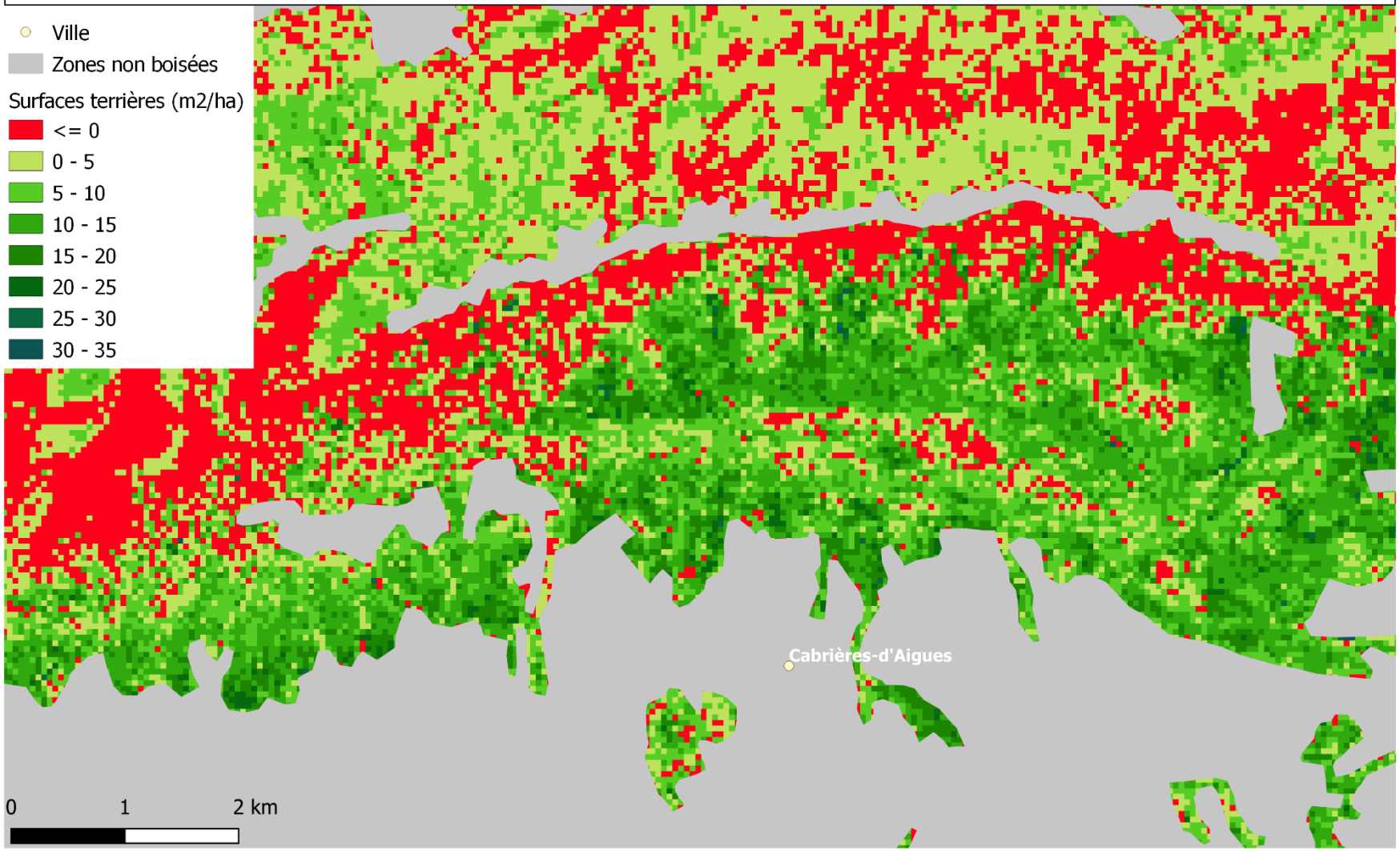
ANNEXE II.9 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel à une résolution de 10 mètres, zoom sur une forêt

CARTE 7.A : Surfaces terrières prédites à une résolution de 10 mètres
Zoom sur la forêt de Cabrières-d'Aigues (84)



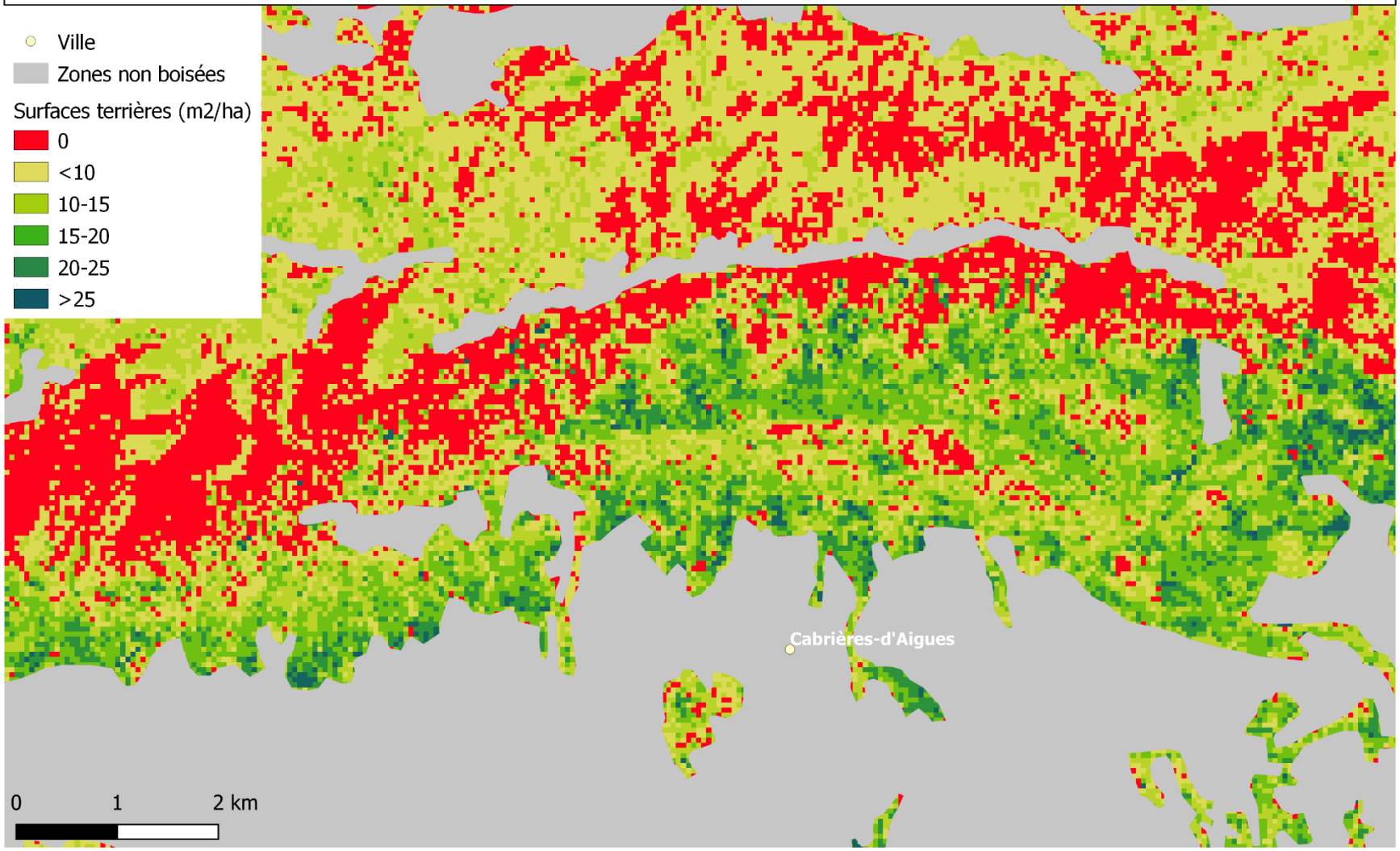
ANNEXE II.10 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel à une résolution de 50 mètres, zoom sur une forêt

CARTE 7.B : Surfaces terrières prédites à une résolution de 50 mètres (un quart d'hectare)
Zoom sur la forêt de Cabrières-d'Aigues (84)



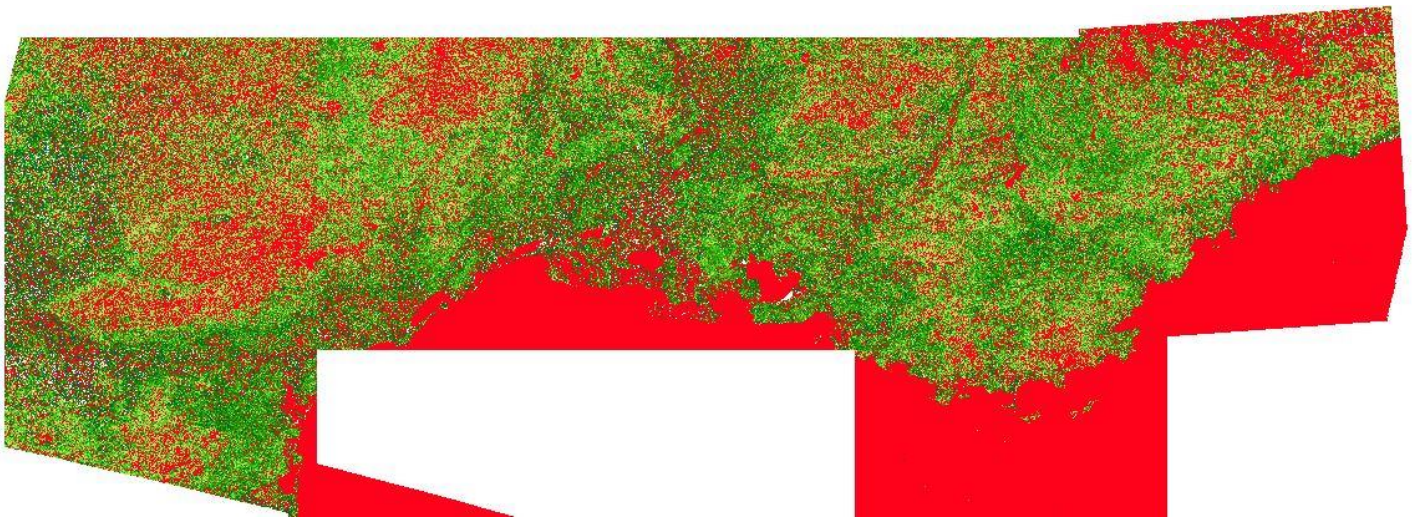
ANNEXE II.11 : Carte des prédictions de l'outil Sentinel, triées par classes, à une résolution de 50 mètres, zoom sur une forêt

CARTE 7.C : Classes de surfaces terrières prédites à une résolution de 50 mètres
Zoom sur la forêt de Cabrières-d'Aigues (84)

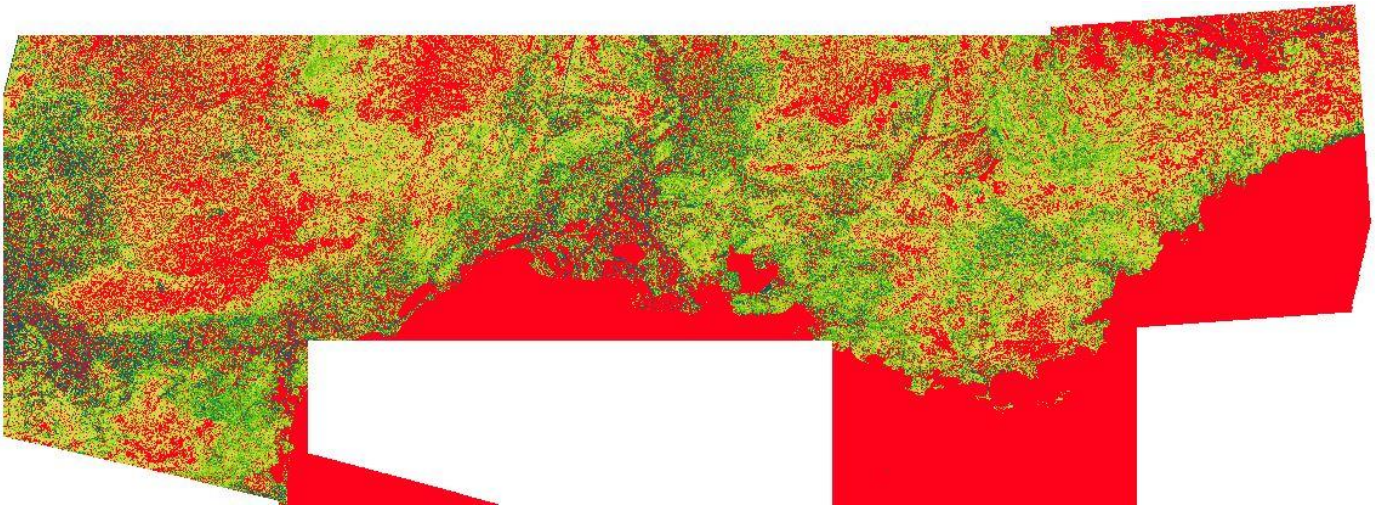


ANNEXE II.12 : Aperçu des couches géographiques livrées avec l'outil Sentinel

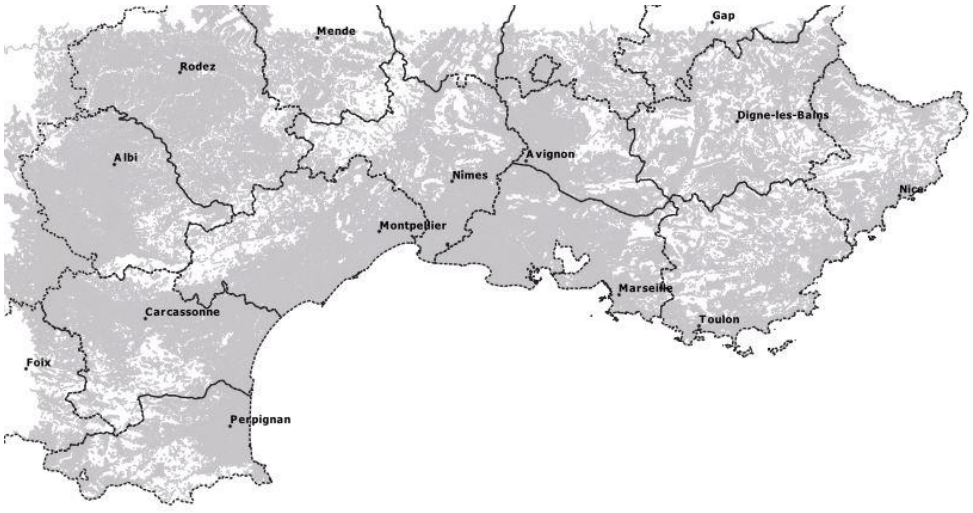
Couche Raster à la résolution de 10 mètres :



Couche Raster à la résolution de 50 mètres :



Couche Shapefile pour isoler les zones boisées + repères géographiques :



ANNEXE III.1 : Détails des itinéraires traités dans l'outil de simulation

	DYNAMIQUE	STANDARD 1	STANDARD 2	COURANT
Domaine d'application	Futaie régulière de pin d'Alep en fertilité 1 et 2	Futaie régulière de pin d'Alep en fertilité 1	Futaie régulière de pin d'Alep en fertilité 2	Futaie régulière de pin d'Alep, toutes fertilités
Code dans l'outil	Dynamique 1 - Dynamique 2	Standard 1	Standard 2	Courant 1 - Courant 2 - Courant 3
Objectifs de production	Maximiser la part de bois d'œuvre	Valoriser une part en bois d'œuvre	Valoriser une part en bois d'œuvre	Bois énergie et bois d'industrie
Age et diamètre d'exploitabilité	85 ans ; 40 cm	80 -100 ans ; 30-50 cm	90 -110 ans ; 30-50 cm	90-110 ans ; 35 cm
Travaux	Détourage sélectif : maintien de 1800 t/ha Déclenchement : Hdom = 3 m (15 ans)	Dépressage en plein : maintien de 1500 t/ha Déclenchement : Hdom = 3 m (15 ans)	Dépressage en plein : maintien de 1300 t/ha Déclenchement : Hdom = 3-5 m	*Dépressage en plein si nécessité DFCI*
	Assistance à la régénération Juste après la coupe d'ensemencement	Préparation à la régénération : crochetage et broyage éventuel A la coupe d'ensemencement	Préparation à la régénération : crochetage et broyage éventuel A la coupe d'ensemencement	
Eclaircie 1	Intensité : 50 % Déclenchement : Ddom = 15 cm (30 ans)	Intensité : 50-55 % Déclenchement : Hdom = 12 m (35 ans)	Intensité : 50 % Déclenchement : 12 m (50 ans)	Intensité : 60 % Milieu de la vie du peuplement (40-60 ans)
Eclaircie 2	Intensité : 40 % Déclenchement : G = 25 m2/ha (50 ans)	Intensité : 50 % Déclenchement : Hdom = 16 m (50 ans)	Intensité : 50 % Déclenchement : Hdom = 14 m (65 ans)	
Eclaircie 3	Intensité : 40 % Déclenchement : G = 25 m2/ha (65-70 ans)			
Coupe d'ensemencement	Densité objectif : 150 t/ha Déclenchement : Ddom = 35 cm (85-90 ans)	Densité objectif : 100-150 t/ha Déclenchement : Hdom = 20 m (80-90 ans)	Densité objectif : 100-150 t/ha Déclenchement : Hdom = 16 m (85-95 ans)	
Coupe définitive	15 ans après la coupe d'ensemencement (100-105 ans)	Régénération acquise et diamètre d'exploitabilité atteint (90-100 ans)	Régénération acquise et diamètre d'exploitabilité atteint (95-110 ans)	Diamètre d'exploitabilité atteint (85-110 ans)

ANNEXE III.2 : Proportions des qualités à chaque étape des itinéraires retenus dans l'outil

ITINERAIRE « STANDARD »							
Etat initial du peuplement	**Opérations**	**Fertilité 1**			**Fertilité 2**		
		BI/BE	**BOP**	**BOS**	**BI/BE**	**BOP**	**BOS**
Optimal	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	48	40	12	55	35	10
	Coupe finale :	28	48	24	36	48	16
Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	49	41	10	55	36	9
	Coupe finale :	27,85	50,4	21,8	35,1	50,4	15
Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	50	42	8	61	32	7
	Coupe finale :	28	52,5	19,5	34,5	52,5	13
Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	48	40	12	60	30	10
	Coupe finale :	28	48	24	36	48	16
Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	57	35	8	68	25	7
	Coupe finale :	34,75	43,5	21,8	42	43,5	15
Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	48	42	10	59	32	9
	Coupe finale :	38,5	43,5	18	44,5	43,5	12
Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	50	42	8	62	32	6
	Coupe finale :	40	45	15	45	45	10
Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	50	40	10	61	30	9
	Coupe finale :	43,75	37,5	18,8	50	37,5	13
Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	80	20	0	80	20	0
	Coupe 1 :	52	40	8	64	30	6
	Coupe finale :	50,5	33	16,5	56	33	11
Tous les stades plus avancés	Coupe 1 :	50	50	0	60	40	0
	Coupe finale :	55	30	15	60	30	10

ITINERAIRE « DYNAMIQUE »							
Etat initial du peuplement	**Opérations**	**Fertilité 1**			**Fertilité 2**		
		BI/BE	**BOP**	**BOS**	**BI/BE**	**BOP**	**BOS**
Optimal	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	40	40	20	50	35	15
	Coupe finale :	19	51	30	29	51	20
Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	43	42	15	49	38	13
	Coupe finale :	18,85	53,4	27,8	28,1	53,4	19
Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	43	45	12	50	40	10
	Coupe finale :	19	55,5	25,5	27,5	55,5	17
Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	70	30	0	75	25	0
	Coupe 1 :	40	40	20	50	35	15
	Coupe finale :	19	51	30	29	51	20
Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Eclaircie 1 :	100	0	0	100	0	0
	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	75	25	0	77	23	0
	Coupe 1 :	53	35	12	57	33	10
	Coupe finale :	25,75	46,5	27,8	35	46,5	19
Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	80	20	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	72	28	0	77	23	0
	Coupe 1 :	47	38	15	55	33	12
	Coupe finale :	29,5	48	22,5	37	48	15
Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	82	18	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	77	23	0	77	23	0
	Coupe 1 :	46	42	12	53	37	10
	Coupe finale :	31	49,5	19,5	37,5	49,5	13
Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	82	18	0	85	15	0
	Eclaircie 3 :	75	25	0	80	20	0
	Coupe 1 :	50	35	15	58	30	12
	Coupe finale :	34,75	42	23,3	42,5	42	16
Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Eclaircie 2 :	82	18	0	100	0	0
	Eclaircie 3 :	75	25	0	80	20	0
	Coupe 1 :	53	35	12	60	30	10
	Coupe finale :	41,5	37,5	21	48,5	37,5	14
Tous les stades plus avancés	Coupe 1 :	50	50	0	60	40	0
	Coupe finale :	55	30	15	60	30	10

ANNEXE III.3 : Prix par défaut fixés dans l'outil

DEPENSES		
Poste		**Prix**
Travaux	Dépressage en plein (€/ha)	2700
	Détourage sélectif (€/ha)	3000
	Sélection + marquage des tiges d'avenir (€/ha)	150
	Elagage (€/ha)	1000
	Préparation à la régénération : broyage + crochetage (€/ha)	900
Exploitation	Exploitation et débardage faciles (€/m^3)	18
	Exploitation et débardage moyennement faciles (€/m^3)	25
	Exploitation et débardage difficiles (€/m^3)	30
	Exploitation et débardage très difficiles (€/m3)	40
	Frais de gestion (€/ha/an)	2
RECETTES		
Produit		**Prix**
Bord de route	Pin d'Alep qualité Structure (€/m^3)	65
	Pin d'Alep qualité Palette (€/m^3)	45
	Pin d'Alep Industrie/Energie (€/m^3)	30
Sur pied	Pin d'Alep pur (€/m^3)	14
	Pin d'Alep + Chêne vert (€/m^3)	20

ANNEXE III.4 : Liste des peuplements de référence traités dans l'outil

	Fertilité 1	Fertilité 2	Fertilité 3
Adaptés aux itinéraires "Courant"	Normal	Normal	Normal
	Jeune peuplement dense	Jeune peuplement dense	Jeune peuplement dense
	Jeune peuplement clair	Jeune peuplement clair	Jeune peuplement clair
	Peuplement adulte dense	Peuplement adulte dense	Peuplement adulte dense
	Peuplement adulte clair	Peuplement adulte clair	Peuplement adulte clair
	Peuplement mature clair	Peuplement mature clair	Peuplement mature clair
Adaptés aux itinéraires "Standard"	Optimal	Optimal	
	Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Légèrement décapitalisé avant 1ère coupe	Légèrement décapitalisé avant 1ère coupe	
	Très décapitalisé avant 1ère coupe	Très décapitalisé avant 1ère coupe	
	Légèrement surcapitalisé avant 1ère coupe	Légèrement surcapitalisé avant 1ère coupe	
	Très surcapitalisé avant 1ère coupe	Très surcapitalisé avant 1ère coupe	
Adaptés aux itinéraires "Dynamique"	Optimal	Optimal	
	Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	Légèrement décapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	Très décapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Légèrement surcapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	Très surcapitalisé avant 1ère éclaircie	
	Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	Légèrement décapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	Très décapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Légèrement surcapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	Très surcapitalisé avant 2ème éclaircie	
	Légèrement décapitalisé avant 3ème éclaircie	Légèrement décapitalisé avant 3ème éclaircie	
	Très décapitalisé avant 3ème éclaircie	Très décapitalisé avant 3ème éclaircie	
	Légèrement surcapitalisé avant 3ème éclaircie	Légèrement surcapitalisé avant 3ème éclaircie	
	Très surcapitalisé avant 3ème éclaircie	Très surcapitalisé avant 3ème éclaircie	
	Légèrement décapitalisé avant 1ère coupe	Légèrement décapitalisé avant 1ère coupe	
	Très décapitalisé avant 1ère coupe	Très décapitalisé avant 1ère coupe	
	Légèrement surcapitalisé avant 1ère coupe	Légèrement surcapitalisé avant 1ère coupe	
	Très surcapitalisé avant 1ère coupe	Très surcapitalisé avant 1ère coupe	

ANNEXE III.5 : Aperçu des éléments de sortie affichés dans la page des résultats

TOUT EFFACER

Programme des opérations

1 — **Etat initial du peuplement :**

Futaie régulière de Pin d'Alep pur à petits bois prépondérants, équilibrée (15-25 m2/ha)

Itinéraire Dynamique 1 Lamanon parcelle 5

Densité	Diamètre dominant	Surface terrière
400 - 600 t/ha	20	15 - 20 m2/ha

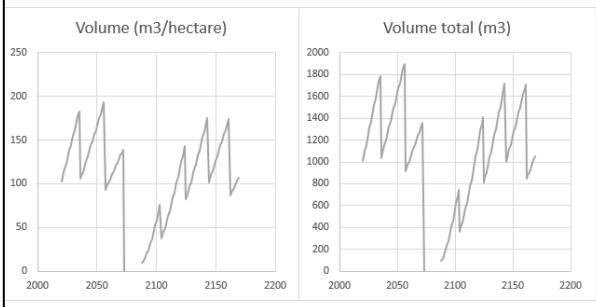
Nouvelle modélisation — Réinitialiser

Bilan des opérations

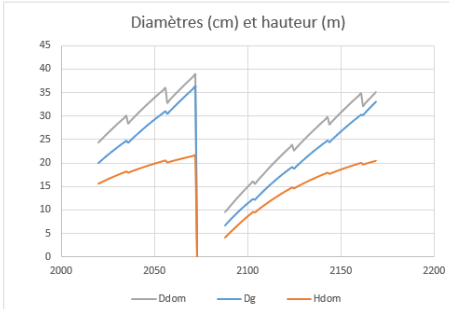
Année	Type	Intensité	
2035	3ème éclaircie	40%	
2056	1ère coupe	50%	
2072	Coupe définitive	100%	
2087	Dépressage	1800 t/ha laissées	+Sélection et détourage d'environ 250t/ha d'avenir
2103	1ère éclaircie	50%	+Désignation de 250 t/ha objectif
2124	2ème éclaircie	40%	
2143	3ème éclaircie	40%	
2161	1ère coupe	50%	

Evolution sur 150 ans — Comparer les résultats

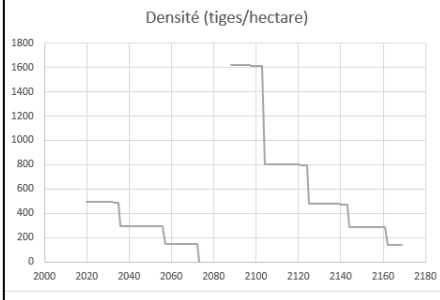
Evolution du volume



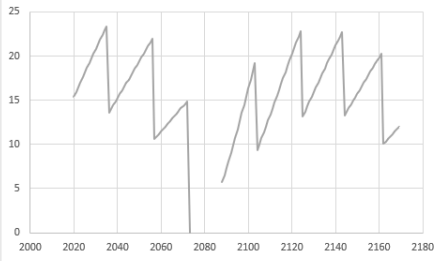
Evolution des diamètres et de la hauteur



Evolution de la densité



Evolution de la surface terrière



BILAN ECONOMIQUE

Comparer les résultats

Le bilan global actualisé sur 150 ans est positif de : 16580 €

Bilan brut (non actualisé): **72326 €**

1 — **Itinéraire Dynamique 1 Lamanon parcelle 5** — Evolution s 150 ans

Réinitialiser

Bilan par année

Année	Opération	Détails	Recettes	Dépenses	Bilan
2035	*3ème éclaircie*	Bois façonnés : 752 m3 dont 188 m3 BOP et 564 m3 BI/BE	25379	13535	11843
2056	*1ère coupe*	Bois façonnés : 982 m3 dont 59 m3 BOS, 344 m3 BOP et 579 m3 BI/BE	36685	17680	19005
2072	*Coupe définitive* + *Travaux de préparation à la régénération*	Bois façonnés : 1361 m3 dont 393 m3 BOS, 575 m3 BOP et 393 m3 BI/BE	63205	24496 9800	28909
2087	*Dépressage + Détourage*			29400	-29400
2103	*1ère éclaircie* + *Marquage des tiges d'avenir + Elagage*	Vendus sur pied : 382 m3	5350	10290	-4940
2124	*2ème éclaircie*	Bois façonnés : 596 m3 dont 36 m3 BOS, 119 m3 BOP et 441 m3 BI/BE	20903	10720	10184
2143	*3ème éclaircie*	Bois façonnés : 720 m3 dont 43 m3 BOS, 216 m3 BOP et 461 m3 BI/BE	26338	12953	13385
2161	*1ère coupe*	Bois façonnés : 861 m3 dont 224 m3 BOS, 345 m3 BOP et 293 m3 BI/BE	38843	15503	23340

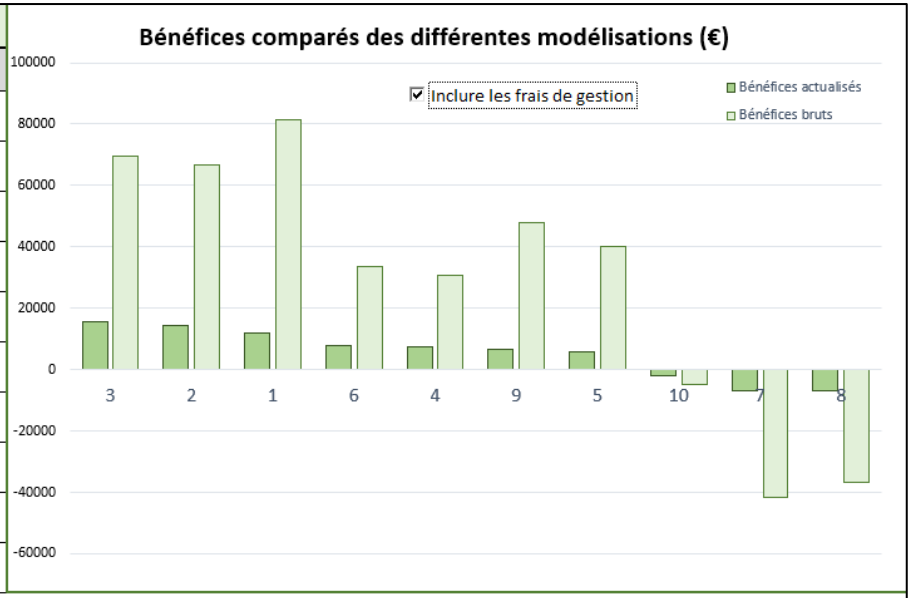
Inclure frais de gestion

Nouvelle modélisation

ANNEXE III.6 : Aperçu des éléments de sortie affichés dans la page du bilan

COMPARAISONS DES MODELISATIONS

Identifiant de la modélisation	Peuplements et itinéraires modélisés	Horizon	Investissements	Recettes	Bénéfices bruts	Bénéfices actualisés
3	Itinéraire Dynamique 1 Lamanon parcelle 5	150 ans	136487	205856	69369	15478
2	Itinéraire Standard 1 Lamanon parcelle 5	150 ans	123021	189574	66553	14459
1	Itinéraire Courant 1 Lamanon parcelle 5	150 ans	22000	103259	81259	11882
6	Itinéraire Dynamique 1 Gardanne parcelle 13	150 ans	76062	109758	33696	7903
4	Itinéraire Standard 1 Gardanne parcelle 13	150 ans	70171	101028	30857	7287
9	Itinéraire Courant 2 Cabrières d'Aigues parcelle 8a	150 ans	18400	66474	48074	6735
5	Itinéraire Courant 1 Gardanne parcelle 13	150 ans	12400	52683	40283	5803
10	Itinéraire Standard 2 Cabrières d'Aigues parcelle 8a	30 ans	17340	12493	-4846	-1883
7	Itinéraire Dynamique 2 Cabrières d'Aigues parcelle 8a	150 ans	182965	141331	-41634	-6815
8	Itinéraire Standard 2 Cabrières d'Aigues parcelle 8a	150 ans	164852	128193	-36659	-6992

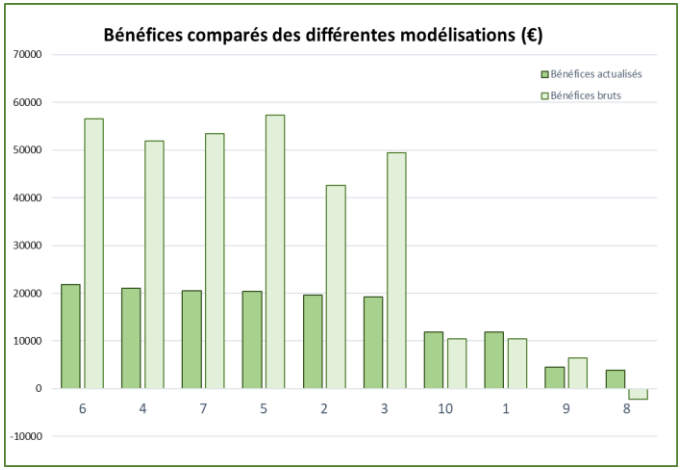


Résultats détaillés | Modifier les prix | Retour accueil

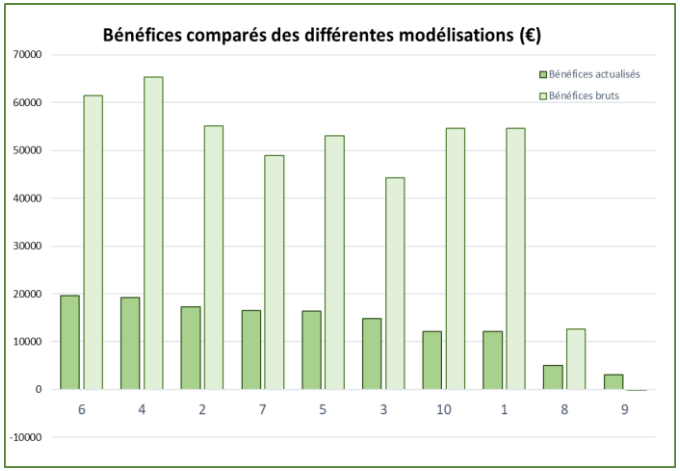
ANNEXE III.7.a : Détails des résultats des tests en fertilité 1

Identifiants	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Itinéraires	Courant 1	Standard 1	Dynamique 1	Standard 1 + Sélection	Dynamique 1 + Sélection	Dynamique 1 + Sélection + Elagage	Standard 1 + Sélection + Elagage	Courant 1 *Exploitation difficile*	Standard 1 *Exploitation difficile*	Dynamique 1 *Exploitation difficile*

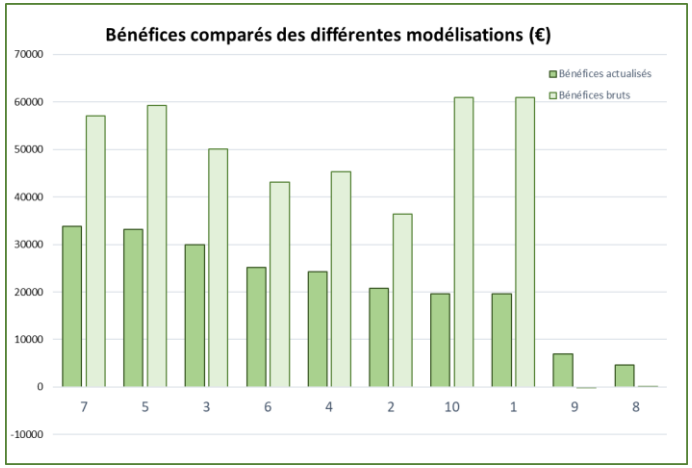
Peuplement 1 :



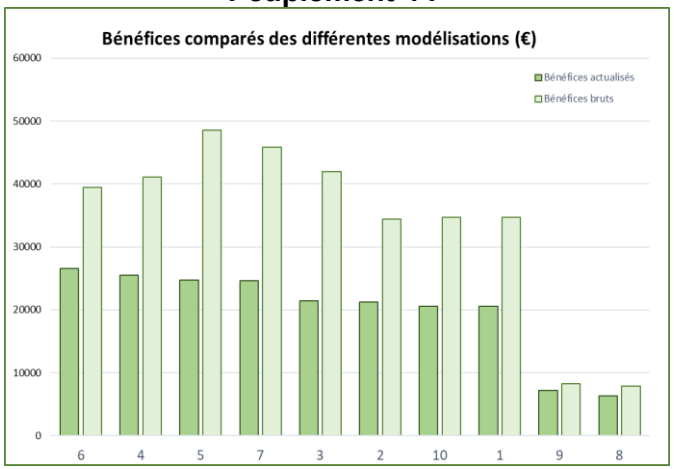
Peuplement 2 :



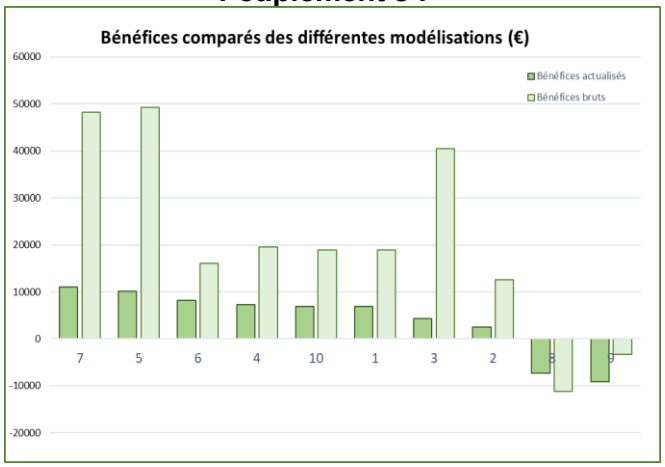
Peuplement 3 :



Peuplement 4 :



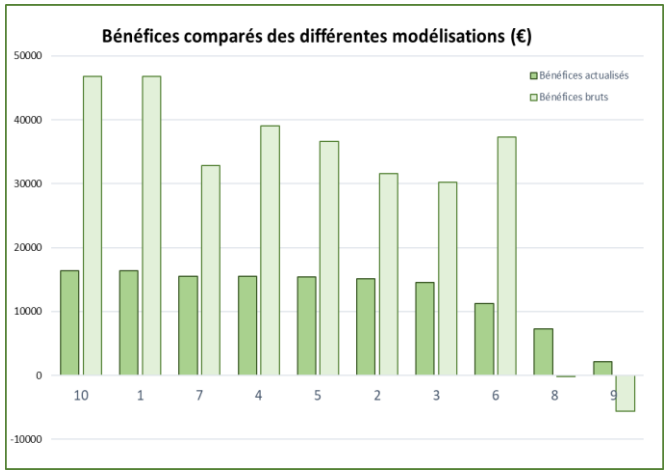
Peuplement 5 :



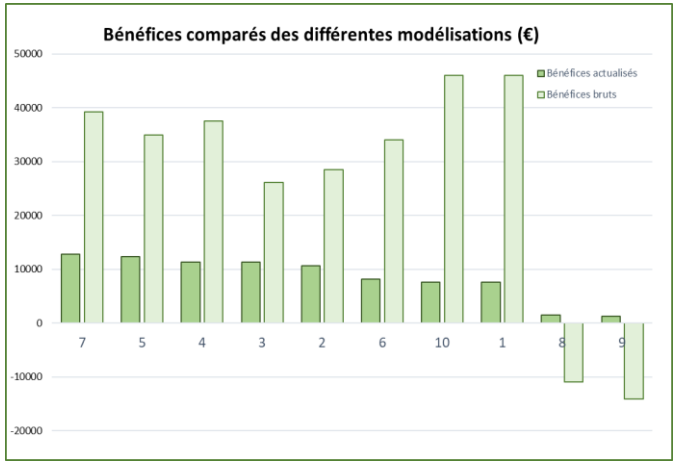
ANNEXE III.7.b : Détails des résultats des tests en fertilité 2

Identifiants	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Itinéraires	Courant 2	Standard 2	Dynamique 2	Standard 2 + Sélection	Dynamique 2 + Sélection	Dynamique 2 + Sélection + Elagage	Standard 2 + Sélection + Elagage	Courant 2 *Exploitation difficile*	Standard 2 *Exploitation difficile*	Dynamique 2 *Exploitation difficile*

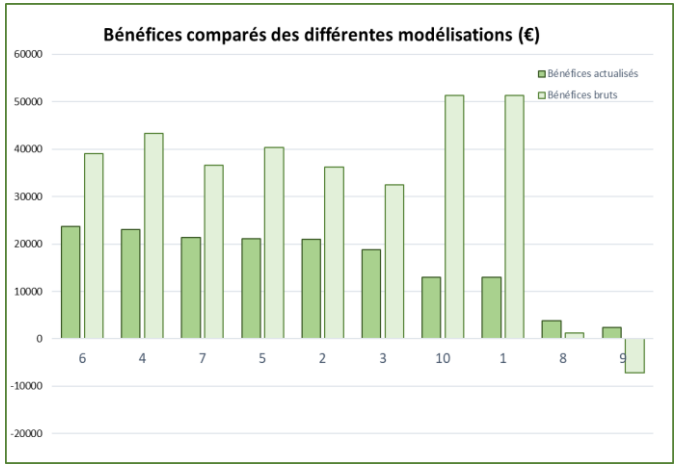
Peuplement 1 :



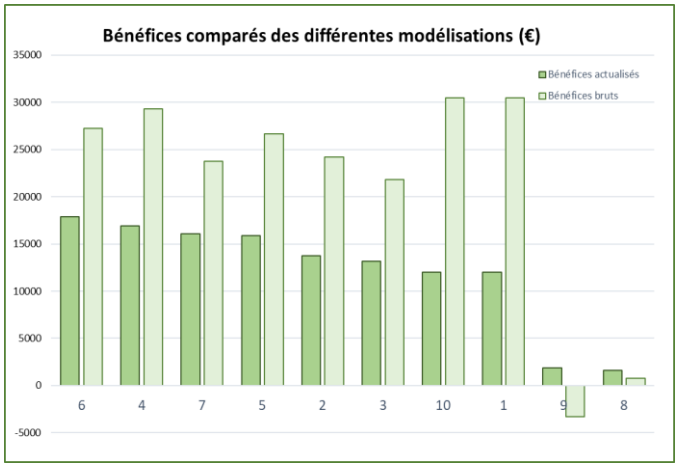
Peuplement 2 :



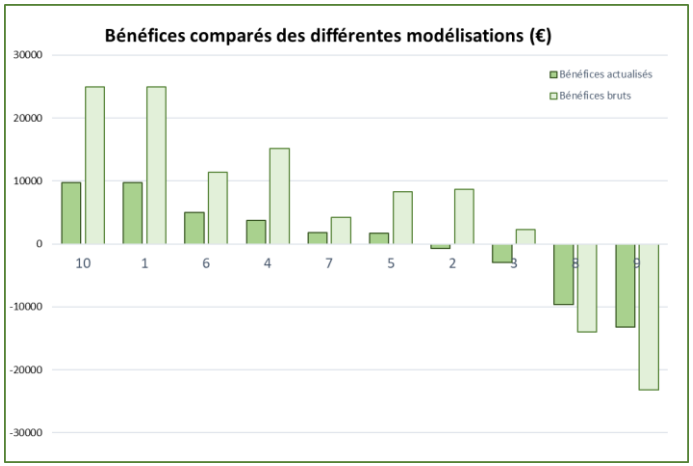
Peuplement 3 :



Peuplement 4 :



Peuplement 5 :



ANNEXE IV.1.a : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-II et les bois ronds

ST-II			
Critères retenus	**Valeurs seuils sur bois scié**	**Valeurs seuils transposées sur bois rond**	
		sur pied	**bord de route**
Cernes d'accroissement	≤ 8 mm	Invisible : exclure les secteurs où la croissance est très rapide	≤ 8 mm
Nœuds	Ø ≤ 60 mm	Nœuds de Ø ≤ 80 mm Branches de Ø ≤ 80 mm	Ø ≤ 80 mm
Grosses poches de résine	< 80 mm	Ecoulements de résine visibles	Ecoulements de résine visibles
Entre-écorce	Non admise	Invisible	Non admise
Fentes	Sur bois sec : Traversante : Longueur < deux fois la largeur de la pièce Non traversante : Longueur < moitié de la longueur de la pièce	Invisible	Sur bois humide : Par précaution, toute apparition de fente de cœur est déclassante car prédiction de l'évolution impossible
Pente du fil	10 %	Fil tors < 10 %	Fil tors < 10 %
Bois de réaction	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu	Invisible	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu
Echauffure et pourriture molle	Non admises	Non admises	Non admises
Piqûres noires ou blanches	Admises si elles apparaissent sur une seule face	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence
Dégâts d'insectes	Infestation active non admise	Infestation active non admise	Infestation active non admise
Traces de gui	Exclues	Exclues	Exclues
Bleuissement	Admis	Invisible	Admis
Autres défauts	Lorsque la réduction de résistance provoquée par un autre défaut est de toute évidence inférieure à celle causée par les défauts autorisés dans ce tableau, la pièce est acceptée à condition que le défaut soit d'un type qui n'augmentera pas après le façonnage et le séchage	Les défauts visibles sur pied altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : gélivures, blessures	Les défauts visibles sur grume altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : fentes de cadranures, gélivures, roulures, blessures

ANNEXE IV.1.b : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-III et les bois ronds

ST-III			
Critères retenus	**Valeurs seuils sur bois scié**	**Valeurs seuils transposées au bois rond**	
		sur pied	**bord de route**
Cernes d'accroissement	≤ 10 mm	Invisible : exclure les secteurs où la croissance est exceptionnellement rapide	≤ 10 mm
Nœuds	Ø ≤ 80 mm	Nœuds de Ø ≤ 100 mm Branches de Ø ≤ 100 mm	Ø ≤ 100 mm
Grosses poches de résine	< 80 mm	Ecoulements de résine visibles	Ecoulements de résine visibles
Entre-écorce	Non admise	Invisible	Non admise
Fentes	Sur bois sec : Traversante : Longueur ≤ 600 mm Non traversante : non limitée	Invisible	Sur bois humide : Par précaution, toute apparition de fente de cœur est déclassante car prédiction de l'évolution impossible
Pente du fil	Locale : < 25 % Générale : < 17 %	Fil tors Local : < 25 % Fil tors général : < 17 %	Fil tors Local : < 25 % Fil tors général : < 17 %
Bois de réaction	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu	Invisible	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu
Echauffure et pourriture molle	Non admises	Non admises	Non admises
Piqûres noires ou blanches	Admises si elles apparaissent sur une seule face	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence
Dégâts d'insectes	Infestation active non admise	Infestation active non admise	Infestation active non admise
Traces de gui	Admises	Admises	Admises
Bleuissement	Admis	Invisible	Admis
Autres défauts	Lorsque la réduction de résistance provoquée par un autre défaut est de toute évidence inférieure à celle causée par les défauts autorisés dans ce tableau, la pièce est acceptée à condition que le défaut soit d'un type qui n'augmentera pas après le façonnage et le séchage	Les défauts visibles sur pied altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : gélivures, blessures	Les défauts visibles sur grume altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : fentes de cadranures, gélivures, roulures, blessures

ANNEXE IV.1.c : Tableau des correspondances entre les seuils de critères de sciage de catégorie ST-IV et les bois ronds

ST-IV			
Critères retenus	**Valeurs seuils sur bois scié**	**Valeurs seuils transposées au bois rond**	
		sur pied	**bord de route**
Cernes d'accroissement	≤ 10 mm	Invisible : exclure les secteurs où la croissance est exceptionnellement rapide	≤ 10 mm
Nœuds	Ø ≤ 100 mm	Nœuds de Ø ≤ 120 mm Branches de Ø ≤ 120 mm	Ø ≤ 120 mm
Grosses poches de résine	< 80 mm	Ecoulements de résine visibles	Ecoulements de résine visibles
Entre-écorce	Non admise	Invisible	Non admise
Fentes	Sur bois sec : Traversante : Longueur ≤ 600 mm Non traversante : non limitée	Invisible	Sur bois humide : Fente de cœur ≤ 600 mm
Pente du fil	< 17 %	Fil tors < 17 %	Fil tors < 17 %
Bois de réaction	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu	Invisible	Accepté sur les 3/4 de la largeur ou de l'épaisseur ; 1 m de longueur au maximum ; Bois de réaction traversant exclu
Echauffure et pourriture molle	Non admises	Non admises	Non admises
Piqûres noires ou blanches	Admises si elles apparaissent sur une seule face	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence	Admises si concentrées sur moins de 25 % de la circonférence
Dégâts d'insectes	Infestation active non admise	Infestation active non admise	Infestation active non admise
Traces de gui	Admises	Admises	Admises
Bleuissement	Admis	Invisible	Admis
Autres défauts	Lorsque la réduction de résistance provoquée par un autre défaut est de toute évidence inférieure à celle causée par les défauts autorisés dans ce tableau, la pièce est acceptée à condition que le défaut soit d'un type qui n'augmentera pas après le façonnage et le séchage	Les défauts visibles sur pied altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : gélivures, blessures	Les défauts visibles sur grume altérant les propriétés mécaniques sont à exclure : fentes de cadranures, gélivures, roulures, blessures

ANNEXE IV.2 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : Tableau de référence

Classement visuel du pin d'Alep

Structure	Palette	
		Dimensions minimales sous écorce(1)
4	2	Longueur (m)
35	22	Diamètre médian (cm)
		Courbure
		Courbure simple
O	O	Pratiquement nulle < 1 cm/m
O	O	Faible 1-4 cm/m
X	O	Forte > 4 cm/m
		Courbure complexe
O	O	Pratiquement nulle < 1 cm/m
X	O	Faible 1-4 cm/m
X	X	Forte > 4 cm/m
		Décroissance
O	O	Normale à forte ≤ 10 % du Ø
X	O	Très forte > 10 % du Ø
		Inclinaison
O	O	Inclinaison 10-20 %
X	O	Inclinaison > 20 %
		Singularité de structure
0,5	-	Distance minimale entre les couronnes de nœuds (m)(2)
		Nœud découvert sain et adhérent(2)
O	O	Petit nœud < 50 mm
O	O	Nœud moyen 50 – 100 mm
X	O	Gros nœud 100 - 150 mm
X	X	Très gros nœud > 150 mm
		Autres nœuds sauf pourris
O	O	Petit nœud < 50 mm
O	O	Nœud moyen 50 – 100 mm
X	O	Gros nœud 100 - 120 mm

X	X	Très gros nœud > 120 mm
X	X	*Nœud pourri*
		Fil tors visible sur écorce
		Général
O	O	Léger < 20 %
X	X	Fort > 20 %
		Local
O	O	Léger < 20 %
O	O	Fort 20-30 %
X	O	Très fort > 30 %
		Singularité de la forme du tronc
X	O	*Bosse ou excroissance*
X	O	*Méplat > 20 %*
X	X	*Fente latérale : gélivure, coup de foudre,...*
		Altérations dues à l'action des champignons
X	O	Fructification visible (Tramète/Phellin, Fomes…)
X	X	Chancre - chaudron
		Dégradations dues aux insectes
		Trous de vers
O	O	Petits trous (sur - de 25 % de la circonférence)
X	O	Gros trous (sur - de 25 % de la circonférence)
X	X	*Infestation active*
		Autres dégradations
O	O	Ecoulement de résine[(2)]
X	O	Surface carbonisée
X	O	Blessure cicatrisée
X	X	Corps étrangers
X	X	Arbre sec
		Largeur d'accroissement
O	O	Normale 3-5 mm
O	O	Large 5-10 mm
X	O	Très large > 10 mm

X	O	*Cœur excentré (> 20 %)*
X	X	*Entre écorce*
		Bois de réaction
O	O	Non traversant, longueur < 1 m
X	X	Non traversant, longueur > 1 m
X	X	Traversant
		Fentes
X	X	Fente d'abattage
X	O	Fente de cœur ≤ 6 cm
O	O	Roulure ≤ 1/3 de la circonférence
X	O	Roulure > 1/3 de la circonférence
		Altérations dues à l'action des champignons
X	O	Tâches et veine de cœur
X	X	Echauffure dure
X	X	Pourriture molle
X	O	Discoloration
O	O	Bleuissement

(1) Les limites de dimensions sont à moduler en fonction du cahier des charges du client

(2) De qualité « menuiserie » si les trois conditions suivantes sont remplies, en plus des conditions « structure » :

- Espacement des couronnes de nœuds > 1 m
- Diamètre des nœuds sur écorce < 30 mm
- Pas d'écoulement résineux, cœur non gras

ANNEXE IV.3 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : Clef de détermination

SUR PIED

ETAPE 1

Critères déclassants	Cocher si présence
Arbre sec	
Diamètre à 1m30 < 25 cm*	
Longueur du fût < 2,5 m*	
Courbure forte (> 4 cm/m)	
Très grosse branche (Ø > 12 cm)	
Nœud pourri	
Attaque sévère de champignons** et/ou d'insectes***	
Grosse altération : Blessure / Gélivure / Cavité	
Corps étranger	

** Dimensions sur écorce à moduler en fonction du cahier des charges du client*
*** Plusieurs fructifications de plus de 5 cm de large*
**** Plusieurs trous, insectes visibles*

Aucune croix →

1 croix ou + ↓

BI/BE

STRUCTURE

ETAPE 2

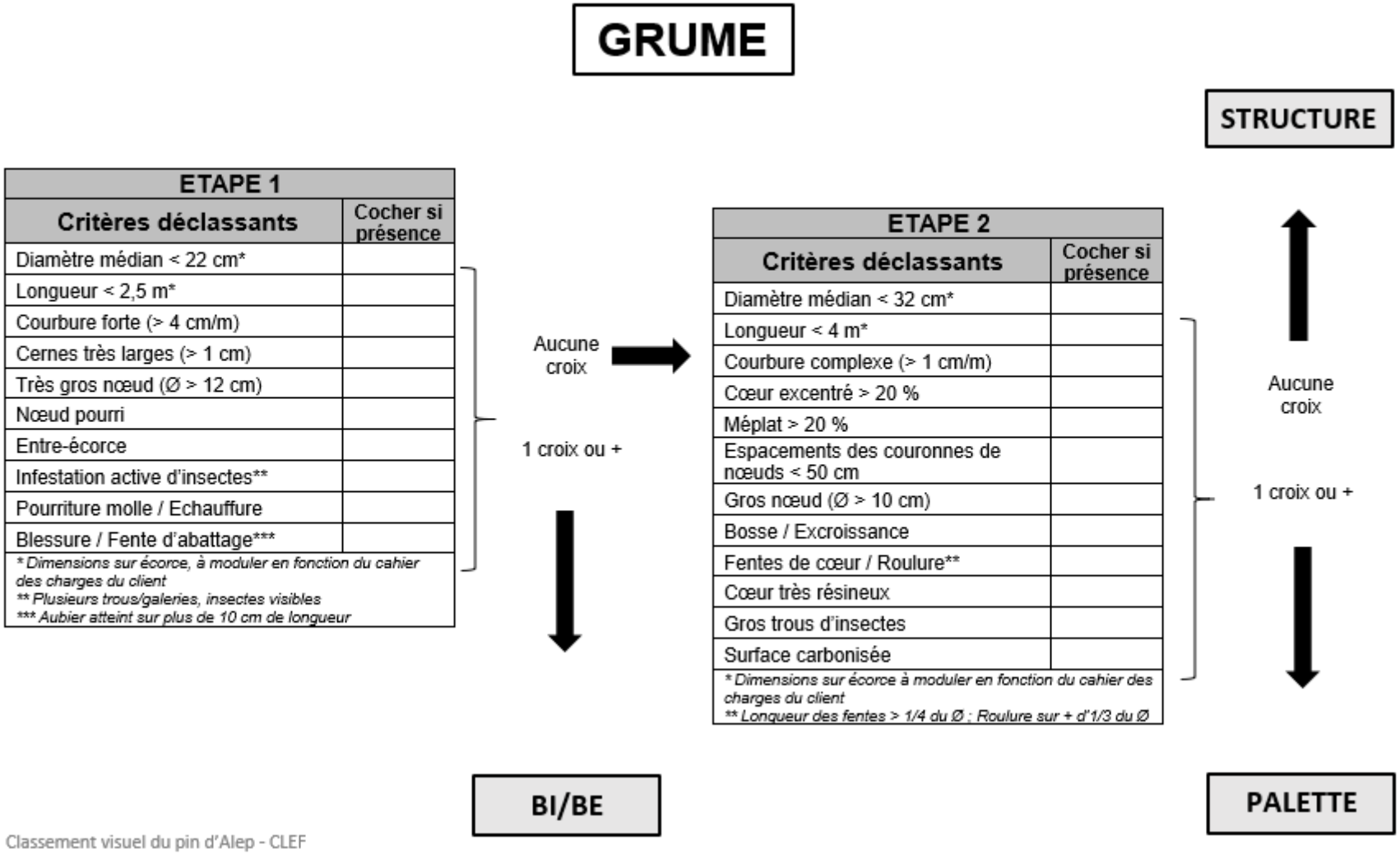
Critères déclassants	Cocher si présence
Diamètre à 1m30 < 35 cm*	
Longueur de fût < 4 m*	
Courbure complexe (> 1 cm/m)	
Inclinaison > 20 %	
Grosse branche (Ø > 10 cm)	
Espacement des couronnes de nœuds < 50 cm	
Méplat > 20 % / Non cylindrique	
Autres défauts de forme : Fil tors / Bosse / Excroissance	
Gros trous d'insectes	
Surface carbonisée	

** Dimensions sur écorce à moduler en fonction du cahier des charges du client*

↑ Aucune croix

1 croix ou + ↓

PALETTE


GRUME
STRUCTURE
ETAPE 1
Critères déclassants
Cocher si présence
Diamètre médian < 22 cm*
Longueur < 2,5 m*
Courbure forte (> 4 cm/m)
Cernes très larges (> 1 cm)
Très gros nœud (Ø > 12 cm)
Nœud pourri
Entre-écorce
Infestation active d'insectes**
Pourriture molle / Echauffure
Blessure / Fente d'abattage***
* Dimensions sur écorce, à moduler en fonction du cahier des charges du client
** Plusieurs trous/galeries, insectes visibles
*** Aubier atteint sur plus de 10 cm de longueur
Aucune croix
1 croix ou +
ETAPE 2
Critères déclassants
Cocher si présence
Diamètre médian < 32 cm*
Longueur < 4 m*
Courbure complexe (> 1 cm/m)
Cœur excentré > 20 %
Méplat > 20 %
Espacements des couronnes de nœuds < 50 cm
Gros nœud (Ø > 10 cm)
Bosse / Excroissance
Fentes de cœur / Roulure**
Cœur très résineux
Gros trous d'insectes
Surface carbonisée
* Dimensions sur écorce à moduler en fonction du cahier des charges du client
** Longueur des fentes > 1/4 du Ø ; Roulure sur + d'1/3 du Ø
Aucune croix
1 croix ou +
BI/BE
PALETTE
Classement visuel du pin d'Alep - CLEF

ANNEXE IV.4 : Classement visuel des bois ronds de pin d'Alep : extraits du guide de reconnaissance des critères

Dépréciation du bois par les champignons et les insectes : P4, P10, S11

Dégâts dus aux champignons :

Sur pied, il est impossible d'affirmer avec certitude la présence de pourriture molle ou d'échauffure dans le bois. On sait seulement que la probabilité d'une atteinte du bois par des champignons « pourridiés » (comme le tramètes ou le fome) augmente avec le nombre de fructification(s) visible(s) sur le tronc. Une unique fructification se traduit rarement par une pourriture du bois, de même que plusieurs petits champignons visibles sont rarement des indicateurs d'un bois pourri. On considère que plusieurs fructifications de grande taille (au moins 5 cm de large) indiquent la présence probable de pourriture du bois : **attaque sévère.**

Sur grume, la pourriture molle et l'échauffure sont directement visibles sur la section du tronc :

- La **pourriture** se traduit par une zone de bois mou, elle est le plus souvent présente dans le duramen (pourriture de cœur) mais peut également se retrouver dans l'aubier.
- L'**échauffure** est une discoloration nette dans l'aubier pouvant former des « dessins » variés. Elle est rare dans le pin d'Alep.
- Le **cœur flammé** est l'expression d'une attaque pathogène du bois par divers champignons. Il se reconnaît par la forme caractéristique en étoile du duramen anormalement foncé.

Le **cœur très résineux** n'est pas décelable avec fiabilité sur pied : des écoulements de résine visibles n'impliquent pas forcément un cœur résineux, à l'inverse, des tiges parfaitement saine d'extérieur peuvent contenir beaucoup de résine.

Classement visuel du pin d'Alep - GUIDE

Exemples : **Indicateurs visibles sur pied**

Phellinus pini (Tramète d

Fomitopsis pinicola (Po

Indicateurs visibles dans la grume

- Non admis :

Pourriture de cœur induite par des pourridiés (tramètes ou fomes)

Cœur flammé

Echauffure

- Admis :

Bleuissement

Bois sain

Classement visuel du pin d'Alep - GUIDE

Dégâts dus aux insectes :

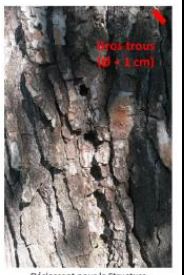
Sur pied, on appelle « **infestation active** » la présence visible d'insectes et de trous sur le tronc, par opposition à la seule présence de trous d'insectes non occupés qui peuvent être tolérés pour la palette voire pour la structure s'ils sont de petites tailles (moins de 1 cm de diamètre).

Sur grume, les dégâts de scolytes sont directement visibles par la présence de galeries dans le bois : dans ces cas, la grume ne peut pas faire de bois d'œuvre.

Les petits trous d'insectes sont des altérations légères du bois qui n'empêchent pas la valorisation en bois d'œuvre palette ou structure. Les **gros trous** (plus de 1 cm de diamètre) peuvent être des points de moindre résistance déclassants pour la structure.

Exemples :

Infestation active



Déclassant pour la Structure

Galeries de scolytes :

ANNEXE IV.5 : Protocole d'inventaire de la qualité dans les coupes de pin d'Alep

Protocole d'évaluation de la qualité dans les coupes de pin d'Alep

Objectif :

Estimer la proportion de tiges par qualité à un instant t, dans une coupe prévue et déjà martelée.

Principe :

Notation de la qualité d'un échantillon des arbres martelés, selon une classification en trois catégories : BI/BE ; BO palette ; BO structure. Les tiges inventoriées sont sélectionnées selon un maillage de placettes circulaires systématiques, réalisé sur une unité d'analyse homogène.

Détermination du nombre de placettes :

L'unité d'analyse est une zone délimitée choisie pour son homogénéité. En l'occurrence, il s'agit des limites de la coupe martelée. En toute logique, la surface de peuplement passé en coupe constitue une unité de gestion homogène. Si toutefois ça n'était pas le cas (rassemblement de plusieurs unités d'analyse différentes pour une même exploitation), il faudra découper la zone de la coupe en unités homogènes, qui seront alors inventoriées séparément.

Le nombre de placettes est déterminé en fonction de la précision attendue et du niveau d'homogénéité de l'unité d'analyse. La précision correspond à un pourcentage d'erreur toléré et l'homogénéité est caractérisée par un coefficient de variation dont la valeur peut être estimée en confrontant les connaissances du technicien de terrain, la photo-interprétation et les valeurs empiriques existantes.

Les ordres de grandeur sont les suivants :

Erreur tolérée (Er%)		**Coefficient de variation (CV)**	
Niveau d'enjeu	**Valeur cible**	**Type de peuplement**	**Valeur**
Très fort (qualité très élevée)	5 à 8 %	Futaie adulte très homogène ; Perchis homogène	20 %
Fort	8 à 12 %	Futaie adulte homogène ; Futaie irrégulière	25 %
Moyen	12 à 15 %	Futaie adulte homogène	30 %

Dans la plupart des cas de ce protocole, l'erreur tolérée peut être de 8 % et le coefficient de variation est de 20 %.

Ces paramètres et la surface de l'unité d'analyse permettent d'obtenir un nombre de placettes nécessaires, selon la formule suivante :

$$N = \frac{t_{student5\%} * CV^2}{(Er\%)^2}$$

De ce nombre de placettes objectif, sont déduits les paramètres suivants : densité d'échantillonnage (nombre de placettes par hectare), longueur de la maille, taux d'échantillonnage (surface inventoriée par rapport à la surface réelle) et le nombre de tiges inventoriées (en tout et par placette).

Exemple :

Commune	Parcelle	Surface	Nbre de tiges (D>15)	Nbre de tiges inventoriées			Nbre de tiges par placette		
				Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m	Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m
Saint-Rémy-de-Provence	14_r	9.3	441	37	84	149	1.5	3.4	6.0

Coefficient de variation	Erreur tolérée	Nombre de placettes	Densité d'échantillonnage	Longueur de la maille (m)	Taux d'échantillonnage		
					Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m
20 %	8 %	25	2.69	60.99	8 %	19 %	34 %

Détermination de la surface de la placette :

De façon à éviter une durée de relevés par placette trop longue tout en maintenant un nombre d'arbres suffisant pour rentabiliser le temps de cheminement, trois rayons sont proposés : 10, 15 et 20 mètres. A chacune de ces dimensions correspondent un nombre moyen de tiges inventoriées par placettes et un taux d'échantillonnage.

Pour sélectionner la dimension des placettes, on préconise les seuils suivants :

Nombre de tiges par placette	Taux d'échantillonnage
Entre 3 et 6	Entre 10 et 60 %

La durée de l'inventaire peut être estimée en utilisant les ordres de grandeur suivants :

Durée de l'évaluation d'un arbre (min)	Temps de cheminement (min/m)		
	Progression facile	Progression difficile	Progression très difficile
1	0.025	0.05	0.08

La durée du cheminement entre deux placettes dépend fortement de l'état de la végétation arbustive et de la topographie. Pour coller au mieux à la réalité du temps passé sur le terrain, il faut donc renseigner un niveau de difficulté de progression dans le peuplement. Il est conseillé de ne pas dépasser 2h30 d'inventaire pour éviter un risque d'erreurs dues à la fatigue trop important.

Exemple :

Taux d'échantillonnage			Nbre de tiges par placette			Durée estimée (min)		
Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m	Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m	Rayon 10 m	Rayon 15 m	Rayon 20 m
8 %	19 %	34 %	1.5	3.4	6.0	75	122	187

Dans ce cas, il est conseillé de choisir des placettes de 15 mètres de rayon, de façon à échantillonner 19 % de l'unité d'analyse, soit 3,4 tiges par placette en moyenne, dans une durée d'inventaire raisonnable : environ 2 heures.

Localisation des placettes et cheminement :

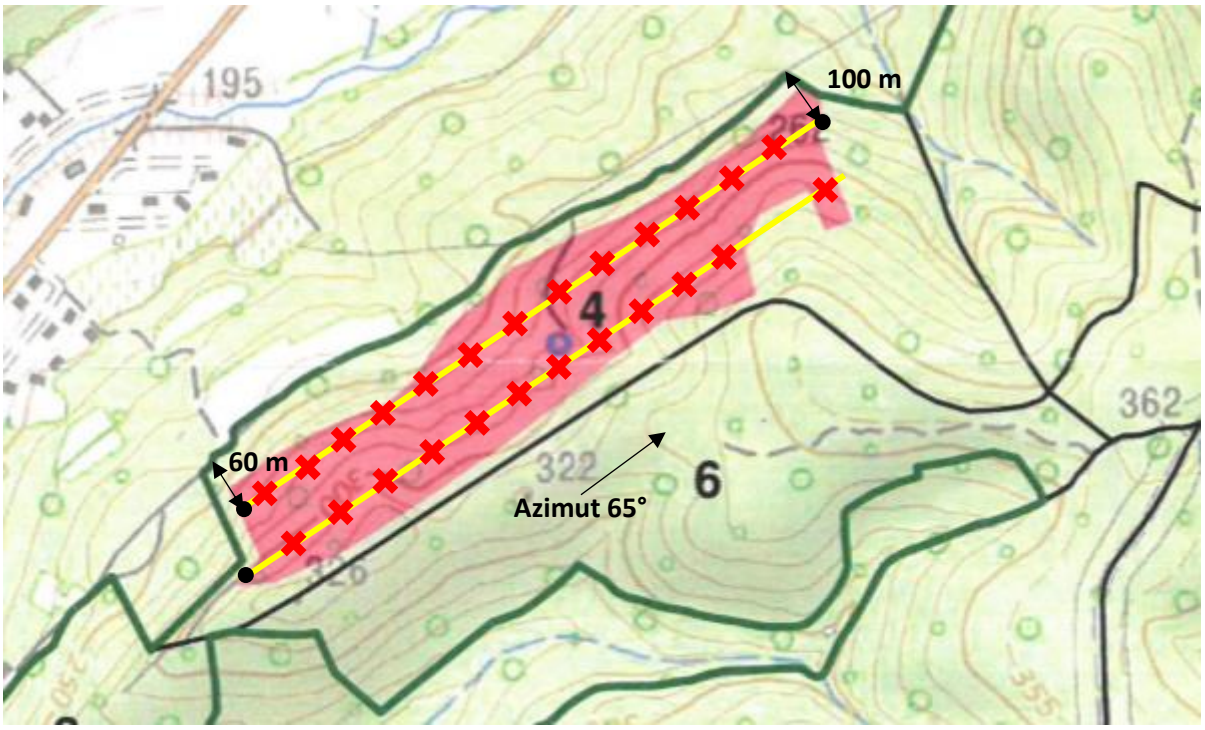
Il n'est pas nécessaire de connaître précisément la localisation des placettes car elles n'ont pas vocation à être permanentes. En revanche, il est indispensable que leur position soit aléatoire pour éviter les erreurs dues au choix de l'opérateur.

Pour cela, il faudra déterminer au préalable des lignes de transects qui quadrillent entièrement la zone et de façon uniforme. Le long de ces transects suivis selon un azimut fixe, l'opérateur s'arrêtera à chaque fois qu'il aura parcouru la distance estimée entre deux placettes. Il aura donc besoin d'une boussole et d'un moyen de connaître la distance entre deux placettes, tel que au choix :

- Connaître la longueur de ses double-pas.
- Utiliser un GPS : sans y charger le maillage systématique (inutile et source d'« effet opérateur » par le choix de l'emplacement le plus favorable dans le rayon d'imprécision du GPS) mais en y acquérant la position à chaque placette, de sorte à pouvoir connaître la distance qui l'en sépare au cours du cheminement vers la suivante.

L'avantage de ce type d'inventaire est que l'extrême précision dans les distances n'est pas requise, tant que le nombre de placettes total réalisées correspond à l'objectif et que leur positionnement est aléatoire et réparti uniformément.

Exemple :



Nombre de placettes objectif : 25 – Surface de la parcelle : 9 ha – Distance entre les placettes : 60 m

Notation de la qualité :

Ne sont recensés que les arbres de futaie. Le diamètre de précomptage des arbres est de 17.5 cm soit la classe 20.

Les caractéristiques de l'arbre sont observées sur la partie de la tige de meilleure qualité, qui n'est pas nécessairement la bille mais peut se situer dans la sur-bille ou au-dessus d'une portion à purger, à condition que les dimensions correspondent aux attentes du classement**.**

La notation s'effectue selon une clef de détermination simplifiée basée sur le principe de déclassement du bois dès lors qu'il présente certains défauts spécifiques.

Sur chaque tige inventoriée, les caractéristiques sont observées dans l'ordre logique de la clef et sur toute la circonférence de l'arbre. Il en résulte une note : BI/BE, P ou S qui correspond à la valorisation possible du fût observé, respectivement : trituration ou énergie, palette ou structure.

Pour les tiges de qualité bois d'œuvre, il est proposé de relever également la longueur de fût et sa classe de diamètre afin d'obtenir une estimation en volume pour chaque qualité.

L'ensemble des données sont consignées dans un tableau de cette forme :

N° de la placette	N° de l'arbre	Qualité	Longueur de fût	Diamètre à 1m30
1	1	BI/BE	/	/
	2	S	5	35
	3	P	4	25
	…			

Matériel :

- Compas
- Boussole
- Vertex + transpondeur
- Documents : plan de la coupe, clef de détermination, grille de relevé vierge
- *Facultatif : TDS/GPS*