

9,50 €

n° 247

Juillet - Août
2019

FORÊT

entreprise

La revue technique des forestiers

Dossier :

La télédétection au service de la gestion forestière

Châtaignier
Maladie de l'encre

GPS en forêt
Expérimentation

Formation -
action


CNPF
Institut pour le
Développement forestier

STAGES IDF en 2019

L'IDF est référencé sur Datadock, la plateforme des organismes financeurs de la formation continue. Au-delà de ce référencement, la réponse aux critères définis est un véritable engagement vers une amélioration continue de la qualité de nos stages.



Nous espérons vous accueillir dans nos prochaines formations.

Gestion - Sylviculture

Module 1 : Bien préparer une plantation*	A. Depaix, ONF et J. Fiquepron IDF	Nancy (54)	15-17 oct. - 3 jrs
Module 2 : Bien choisir et planter des plants de qualité*	S. Girard, IDF	Peyrat-le-Château (87)	19-21 nov. - 3 jrs
Nouveau - Sylviculture de quelques essences qualifiées de précieuses	A. Depaix, ONF	Alsace	11-13 sept. - 2,5 jrs
Usage du guide pratique de l'équilibre forêt-gibier	P. Brossier, CRPF ; D. Pierrard, École de Belval et C. Launay, Domaine du Bois Landry	Champrond-en-Gâtine (28)	15-17 oct. - 2,5 jrs

* Parcours de formation « Réussir ses plantations forestières » co-organisation IDF-Inra-ONF

Diagnostic

Diagnostic des sols et applications forestières	T. Brusten, IDF et S. Gaudin, CRPF	Meuse ou Marne	17-20 sept. - 3 jrs
Autécologie : diagnostiquer une station dans un contexte de changement climatique	J. Lemaire, IDF	St Fortunat-sur-Eyrieux (07)	24-26 sept. - 2,5 jrs
Nouveau - Les enjeux de la santé des forêts	P. Riou-Nivert, IDF et F.-X. Saintonge, DSF	Orléans (45)	9-10 oct. - 2 jrs

Droit et fiscalité

Les projets carbone forestiers en pratique	S. Martel et O. Gleizes, IDF	Bergerac (24)	25-26 sept. - 2 jrs
Nouveau - Zonages environnementaux et gestion forestière : mode d'emploi	L. Depeige et P. Beaudesson, CNPF	Dijon (21)	5-6 nov. - 2 jrs
Chemins et voisinage : mode d'emploi	N. Rondeau, Forestiers privés de France	Paris (75)	13 nov. - 1 jr
Associations syndicales, ASGF et GIEEF : mode d'emploi	L. Depeige, CNPF et M. Gizard, avocat	Auzeville-Tolosane (31)	27-28 nov. - 2 jrs

Faune - Flore

Les chiroptères et la gestion forestière	L. Tillon, ONF	Rambouillet (78)	1-4 oct. - 3,5 jrs
--	----------------	------------------	--------------------

N'hésitez pas à nous contacter

Renseignements et inscriptions : 02.38.71.91.14 - idf-formation@cnpf.fr

Retrouvez toutes les informations à jour sur notre site www.foretpriveefrancaise.com, rubrique *Services et formation*.

AGENDA



WWW.BOIS-ET-VOUS.FR



Saint-Gobain (02)
**Rendez-vous
FORÊT-BOIS**

SALON RÉGIONAL DES FORESTIERS
& TRANSFORMATEURS DU BOIS

Institut pour le développement forestier/
Centre national de la propriété forestière
47 rue de Chaillot, 75116 Paris
Tél. : 01 47 20 68 15
idf-librairie@cnpf.fr

Directeur de la publication
Antoine d'Amécourt

Directrice de la rédaction
Claire Hubert

Rédactrice
Nathalie Maréchal

Mise en page
Sophie Prévayraud

Responsable Édition-Diffusion
Samuel Six

Diffusion - abonnements
François Kuczynski

Publicité
Bois International
14, rue Jacques Prévert
Cité de l'avenir - 69700 Givors
Tél. : 04 78 87 29 41

Impression
Imprimatur
43 rue Ettore Bugatti
87280 Limoges
Tél. : 05 55 04 14 04

Tous droits de reproduction ou de traduction
réservés pour tous pays,
sauf autorisation de l'éditeur.

Périodicité : 6 numéros par an
Abonnement 2019
France : 50 € - étranger : 63 €
édité par le CNPF-IDF

Commission paritaire des publications et
agences de presse : n° 1019 B 08072
ISSN : 0752-5974
Siret : 18009235500452

Les études présentées dans Forêt-entreprise ne
donnent que des indications générales. Nous
attirons l'attention du lecteur sur la nécessité
d'un avis ou d'une étude émanant d'une per-
sonne ou d'un organisme compétent avant toute
application à son cas particulier. En aucun cas le
CNPF-IDF ne pourrait être tenu responsable des
conséquences – quelles qu'elles soient – résultant
de l'utilisation des méthodes ou matériels
préconisés.

Cette publication peut être utilisée dans le cadre
de la formation permanente.

Dépôt légal : juillet - août 2019



© Nicolas Karasiak



De la hauteur

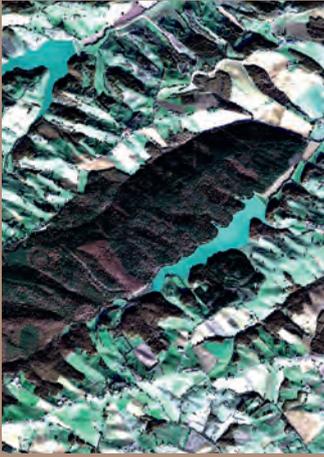
Le forestier est longtemps resté les pieds sur terre pour appréhender et décrire les forêts qu'il gère ou ausculte avec passion. Aujourd'hui, la télédétection — des images prises du ciel (par drone, avion, satellite) — nous invite à prendre de la hauteur pour mieux les connaître.

Ces technologies sont nouvelles, profitons-en pour en maîtriser l'usage à bon escient. Comme le CNPF, de nombreux organismes s'impliquent pour développer des utilisations fructueuses pour les forestiers. La concertation entre les forestiers et les chercheurs sera profitable pour répondre ensemble aux questions que nous nous posons. Quelles essences sont présentes dans ce massif ? Quelles en sont les principales caractéristiques dendrométriques ? Le dossier précédent de Forêt-entreprise abordait la santé des forêts. Là aussi, la détection des nouveaux foyers de scolytes dans le Nord-est de la France à partir des satellites Sentinel-2 à l'automne et en mars sera une aide précieuse.

Oui, c'est aussi un outil de contrôle à disposition des directions départementales du territoire. Le repérage des coupes rases illicités en est un autre exemple... ; cependant, les personnes qui respectent leur document de gestion durable n'ont rien à cacher.

Vous allez découvrir la grande technicité des personnes qui abordent ce sujet, la puissance nécessaire des moyens informatiques pour l'interprétation des informations. Le traitement de ces images est complexe, l'objectif est bien de développer des outils simples et utilisables en routine. Ces techniques seront tout à fait complémentaires de l'expertise de l'homme de l'art sur le terrain.

Éric Sevrin, directeur de l'Institut pour le développement forestier



PLEIADES © CNES 2013, Distribution Airbus DS

Extrait d'une image Pléiades acquise au dessus de la forêt de Fabas (Haute-Garonne), Composition colorée en vraies couleurs (Rouge Vert Bleu).

Numéro suivant N° 248
Les densités de plantation

ACTUS > 4

PARUTIONS > 65

ABONNEZ-VOUS À FORÊT entreprise
OU ABONNEZ L'UN DE VOS PROCHES
La revue technique des forestiers

Renseignements sur : www.foretriveefrancaise.com
↳ rubrique librairie ↳ les publications de l'IDF
ou par courriel : idf-librairie@cnpf.fr

30 % de remise
pour les adhérents de groupes de développement

ABONNEMENT NUMÉRIQUE
• 1 AN + 2 ANS D'ARCHIVES
39 €

ABONNEMENT PAPIER + NUMÉRIQUE • 1 AN
60 € • ÉTRANGER : 73 €

ABONNEMENT PAPIER
1 AN • 6 NUMÉROS
50 € • ÉTRANGER 63 €

Centre national de la propriété forestière - Institut pour le développement forestier
47 rue de Chaillot - 75116 PARIS
Tél. : 01 47 20 68 39



© OCS CESBIO 2017

Superposition de la carte d'occupation des sols du CESBIO (OCS CESBIO 2017) sur des images SPOT6 de 2015 (résolution de 1,5 m)

CNPF > 6

Les coulisses de la nouvelle Flore forestière française tome 1

Samuel Six

EXPÉRIMENTATION > 10

Pour atteindre rapidement ses points d'inventaire en forêt, le GPS est un outil précieux

Sylvain Gaudin et Etienne Beraud

GROUPE DE PROGRÈS > 54

Les bons ingrédients d'un groupe Formation-action

Marc de Dreuille, Claude Mannevy et Michel Godron

SANTÉ DES FORÊTS > 59

La maladie de l'encre complexifie la sylviculture du châtaignier

Cécile Robin et Jérôme Gaudry

Dossier :

La télédétection au service de la gestion forestière

> 14

La télédétection
au service de la forêt

Michel Chartier et Éric Paillassa

> 16

La télédétection, c'est quoi ?

Juliette Boiffin et Michel Chartier

> 20

La phénologie des arbres :
une donnée incontournable
pour cartographier nos forêts ?

Nicolas Karasiak

> 25

Suivis annuels d'occupation
du sol et de ressources
forestières en France

Jean-François Dejoux et David Morin

> 31

Identification et suivi
des peupleraies par
télédétection hypertemporelle

Yousra Hamrouni

> 37

Quaspare : qualification
spécialisée de la ressource
en pin maritime dans le massif
des Landes de Gascogne

Loïc Commagnac et Fabienne Benest

> 41

Détection automatique
de coupes rases

Kenji Ose et Rémi Cresson

> 46

Faisabilité du diagnostic de l'état
sanitaire de peuplements
par télédétection, le châtaignier
en Dordogne

Véronique Chéret, Michel Goulard,
Yousra Hamrouni et Michel Chartier

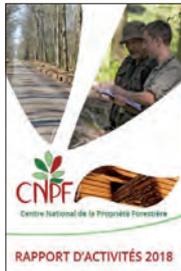
> 51

Rendre accessible
aux gestionnaires forestiers
les produits issus
de la télédétection

Clotilde Giry, Benjamin Chapelet
et Michel Chartier

SOMMAIRE

Les activités du CNPF en 2018



Les activités du CNPF sont présentées dans son rapport annuel, téléchargeable sur le site du CNPF.

Les travaux préparatoires à la rédaction des nouveaux schémas régionaux de gestion forestière (SRGS) sont engagés par l'IDF et les CRPF pour les documents de gestion durable. Le nouveau portail numérique « La Forêt bouge » apporte des services pour faciliter la gestion forestière. L'agrément et le suivi des PSG, socle de la mission du CNPF, sont menés avec des résultats très satisfaisants en matière de

surface de PSG agréés et de visites de suivi à mi-période.

Le CNPF met en œuvre de nombreuses actions pour l'appui à la mobilisation des bois dans le cadre de démarches territoriales. Pour une meilleure visibilité du CNPF, le personnel dispose de vêtements marqués du logo CNPF, ainsi que la diffusion de badges CNPF pour les élus et le personnel.

Document téléchargeable sur www.cnpf.fr/data/rapportcnpf2018_siteder.pdf

Compte d'épargne forestière

Le compte d'investissement forestier et d'assurance (CIFA) est un compte d'épargne destiné aux propriétaires forestiers privés (particuliers, groupements forestiers sociétés d'épargne forestière). Ce dispositif d'auto-assurance aide le financement de restauration d'une forêt, après un sinistre ou la gestion forestière durable, par les revenus des coupes de bois (dépôt plafonné à 2 500€ par ha). L'ouverture et la gestion de ce compte d'épargne forestière sont facilitées :

- le titulaire du compte peut fournir un extrait de la matrice cadastrale des parcelles forestières concernées par le compte, à la place d'une attestation notariée du titre de propriété ou d'une copie du titre de propriété ;

- le titulaire du compte a la responsabilité de signaler tout changement touchant les conditions relatives à l'ouverture du compte ;

- la fermeture automatique du compte est prévue après la constatation par les services des impôts du non-respect d'une des conditions d'ouverture ou d'utilisation du compte.

Un dernier décret portant sur les pièces que le titulaire du compte tient à disposition de l'administration fiscale en cas de contrôle, reste à paraître.

Décret n°2019-289 du 8 avril 2019 relatif au compte d'investissement forestier et d'assurance paru au JORF n°0085 du 10 avril 2019-

Les chênes pour Notre-Dame

La Fondation Fransylva* mobilise ceux qui souhaitent offrir un chêne pour la reconstruction de la charpente de Notre-Dame de Paris, incendiée le 15 avril dernier.

L'enjeu actuel de la filière consiste à convaincre l'État de notre capacité collective à fournir les chênes nécessaires à cette restauration, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif.

Les forestiers souhaitent que cette "forêt-charpente" soit reconstruite avec des chênes de France, dans la tradition et la qualité des premiers constructeurs. Ils s'engagent aussi à planter les chênes pour assurer la continuité de la forêt française.

Les fonds collectés en faveur du projet « Notre-Dame » seront reversés au gouvernement, car La Fondation du Patrimoine ne peut pas « flécher » les dons sur une partie spécifique des travaux. Les dons numéraires au projet sont à adresser à la Fondation Fransylva.

Fondation Fransylva – Fondation du Patrimoine
153 bis avenue Charles de Gaulle
92200 Neuilly sur Seine

<https://www.fransylva.fr/n/actualites/n:3637>

Refaire la charpente médiévale de Notre-Dame en chênes du XXI^e siècle est possible

Les 34 membres de l'Académie d'agriculture – section « forêts et filière bois » expriment leur avis sur la réfection de la charpente de la cathédrale Notre Dame. Les techniques employées au XIII^e siècle sont bien documentées. Il est donc tout à fait possible de reconstruire une charpente en chêne massif à l'identique. Les académiciens exposent également les arguments démontrant que le chêne massif est supérieur à d'autres solutions envisageables.

www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/points-de-vue/pourquoi-il-est-possible-de-refaire-rapidement-la



* La Fondation Fransylva, Forêts privées de France, est hébergée par la Fondation du Patrimoine. Son objet est la conservation du patrimoine sylvicole français et sa promotion pour une forêt vivante, assurant ses fonctions économiques et environnementales durables. Elle vise la pérennité forestière et la préparation de la forêt de demain, responsable et durable.



Main basse sur nos forêts

Les critiques sur la gestion forestière, avec un nouveau livre *Main basse sur nos forêts*, et en particulier certains itinéraires sur le douglas doivent nous interroger. Le groupe de travail interne CNPF y réfléchit pour proposer différentes façons de gérer les peuplements. Il est regrettable que les forestiers ne soient pas invités aux émissions qui présentent ces ouvrages, pour faire connaître leur métier et leurs méthodes. Il serait nécessaire que la filière s'accorde sur un discours commun.

Cartographie des dégâts de scolytes de l'épicéa dans le Nord-est de la France

Pour évaluer la progression des dégâts de scolytes dans les forêts d'épicéas, une cartographie est réalisée à partir d'images du satellite européen Sentinel-2 : la répartition des foyers est comparée entre octobre 2018 et mars 2019 dans deux régions françaises : Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté. Néanmoins, certains peuplements scolytés ne sont pas détectables au début de l'infestation :

- avant le changement de couleur des houppiers,
- lorsque la taille est insuffisante pour le satellite,
- quand les peuplements d'épicéas couvrent moins de 2 hectares d'un seul tenant, soit le seuil de la carte IGN,
- quand des coupes sanitaires ont eu lieu avant la fin septembre 2018.

En parallèle, un outil collaboratif permet un signalement géolocalisé utilisable par les professionnels de la filière, en précisant le type et la structure du peuplement forestier, ou le stade d'évolution des scolytes.



L'ensemble des deux cartes est disponible en ligne. <https://agriculture.gouv.fr/cartographie-des-degats-de-scolytes-de-lepicea-dans-le-nord-est-de-la-france>

de catastrophe naturelle doit être reconnu par les autorités du pays membre. Le constat que cette catastrophe a provoqué « la destruction d'au moins 20 % du potentiel forestier considéré » doit également être fait en s'appuyant sur des preuves scientifiques. Des aides d'État peuvent intervenir de façon compatible avec le droit de la concurrence.

La région Grand Est prévoit d'instaurer un soutien aux entreprises pour l'achat de bois scolyté, sous forme d'avance remboursable, et d'adapter les aides aux peuplements forestiers en réduisant la surface éligible de 4 à 2 hectares.

Site web : <https://www.forestopic.com/fr/>

Quelles aides pour les forêts

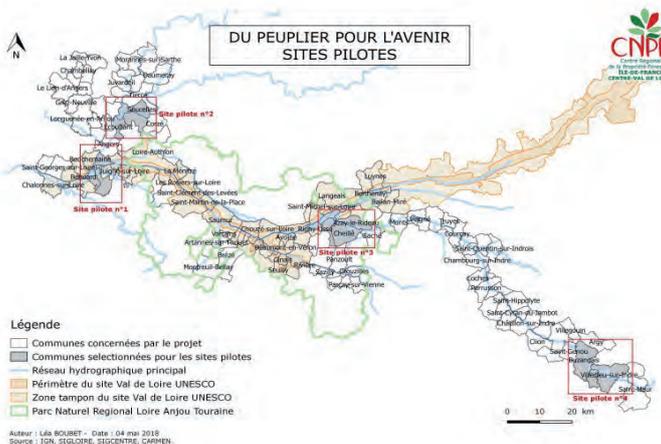
et le bois touchés par une crise sanitaire ?

Le Fonds européen agricole pour le développement rural (Feader) dispose d'aides pour « la reconstitution du potentiel forestier endommagé par les incendies et autres catastrophes naturelles, y compris les événements liés aux parasites, aux maladies et aux changements climatiques, ainsi que les événements catastrophiques » (article 24 du règlement 1305/2013). L'état

Du peuplier pour l'avenir

Porté par le CRPF d'Île-de-France et du Centre - Val de Loire, le projet *Du peuplier pour l'avenir* vise à soutenir le renouvellement des peupleraies après exploitation au sein de la vallée de la Loire et ses affluents. Une subvention à la replantation est mise en place afin d'assurer le maintien des filières industrielles locales tout en intégrant les enjeux particuliers du Val de Loire, patrimoine mondial de l'Unesco. La collaboration des acteurs du territoire permet la conciliation des enjeux économiques, environnementaux et paysagers par le biais de critères d'acceptabilité des peupleraies.

Site web : <https://ifc.cnpf.fr/n/du-peuplier-pour-l-avenir-en-val-de-loire-ouest/n:3021>



Évolution des peuplements

La part des peuplements purement feuillus n'a que très légèrement augmenté entre 1985 (63 %) et aujourd'hui (67 %). Par contre son évolution en surface est importante : elle est passée de 7,7 millions d'hectares en 1985 à 9,9 millions aujourd'hui. En l'espace de 30 ans, 4 départements ont plus que doublé leur surface de peuplements feuillus : le Morbihan, la Haute-Corse, la Corse-du-Sud et le Finistère.

La surface des peuplements purement conifères a légèrement diminué, passant de 3,4 millions d'hectares en 1985 (soit 28 % de la superficie forestière de 1985) à 3,1 millions d'hectares aujourd'hui (soit 21 % de la superficie forestière actuelle). Les variations au niveau départemental sont modérées, à l'exception des départements des Landes (- 200 000 ha) et de la Gironde (- 60 000 ha) affectés par les tempêtes qui ont touché cette zone géographique.

Les peuplements mixtes ont évolué de 1,1 million d'hectares (soit 9 %) en 1985 à 1,8 million d'hectares (soit 12 %) aujourd'hui. Une animation sur l'évolution des peuplements sur le site de l'IGN : <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique78>





Les coulisses de la nouvelle *Flore forestière française* tome 1

Par Samuel Six, CNPF-IDF



Le tome 1 (Plaines et collines) de la Flore forestière française fraîchement réédité, il nous a semblé bon de vous faire découvrir les coulisses de la fabrication de cet ouvrage atypique et d'expliquer les raisons de cette réédition.

Trente ans après sa première parution, cette réédition, revue et considérablement augmentée (551 nouvelles espèces), présente les nouveaux genres et espèces, leur autécologie, et leurs cartes de répartition à partir des données les plus récentes (soit un peu plus de 6 500 000 données réparties dans environ 390 000 relevés). Explications.

Les auteurs

À tous seigneurs tous honneurs, il convient de présenter les auteurs principaux d'abord et par ordre alphabétique.

Gérard Dumé, l'Œil vif. C'est l'encyclopédiste du trio et réviseur de l'ouvrage. S'il est pessimiste, « c'est pour n'avoir que de bonnes nouvelles ». En ce sens, on pourra lui donner raison d'avoir été pessimiste sur la réédition de cette nouvelle *Flore* !

Christian Gauberville, le Gaulois. Il est le coordinateur de l'ouvrage, courroie de transmission indispensable entre l'éditeur et les auteurs. Son énergie débordante laisse penser qu'il bénéficie des bienfaits de quelque potion tirée des propriétés des plantes citées dans la *Flore* ! C'est l'un des seuls botanistes capables de retrouver d'un coup de pouce une espèce dans la *Flore* (du moins parmi les 1 792 pages de la 1^{re} édition. Il lui faudra peut-être plus d'entraînement pour les 2 464 pages de la nouvelle...).

Dominique Mansion, l'Artiste auteur, est l'infatigable illustrateur de la *Flore*. Inutile de chercher à le joindre, il est « sur le terrain », mais toujours en sandales. Soit au sol, position couchée au plus près des plantes pour les dessiner dans

leur moindre détail et croquer sur le vif leur « expression naturelle ». Soit dans les airs, la tête dans les trognes, qui le passionnent depuis toujours et pour lesquelles il a fondé la Maison botanique de Boursay.

Jean-Claude Rameau, Botaniste et phytosociologue décédé le 6 octobre 2005 (à 62 ans). Il est l'auteur principal du texte de la première édition de la *Flore forestière française*. Il a enseigné la botanique et la phytosociologie forestière à l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts¹. Encore aujourd'hui, son travail rend service à des générations d'étudiants.

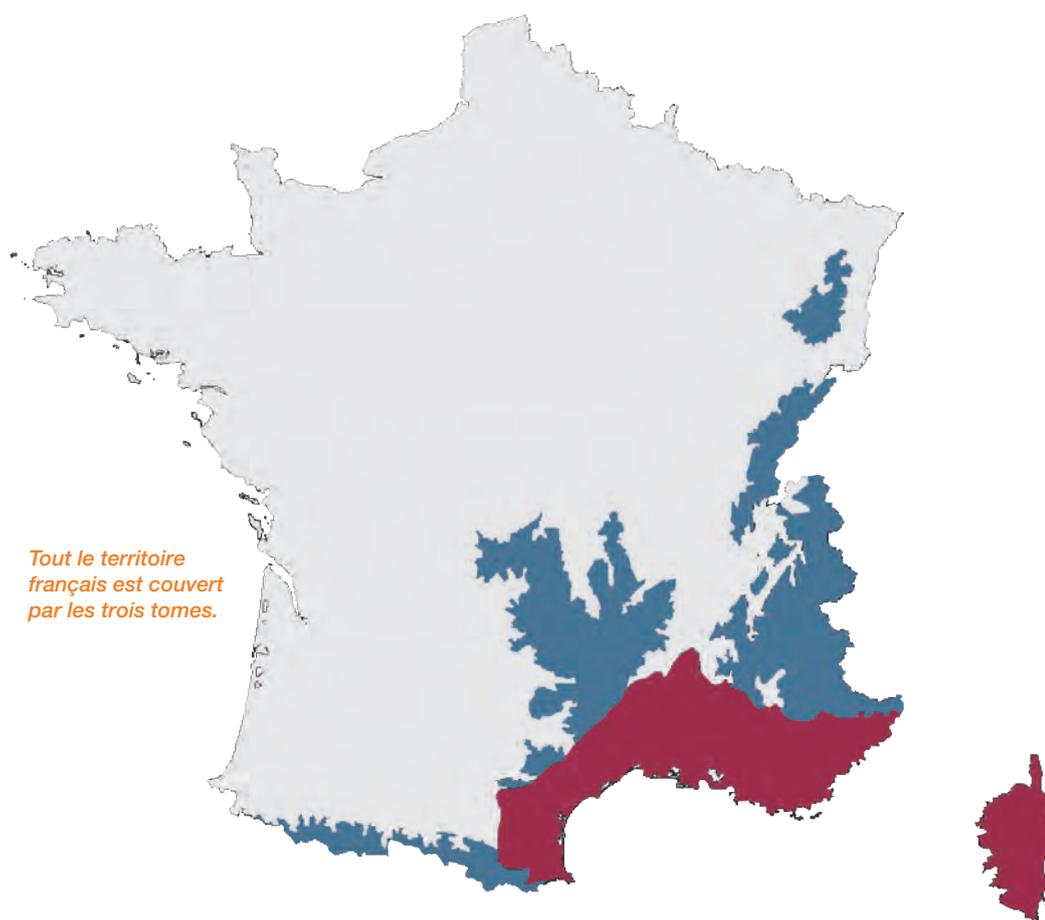
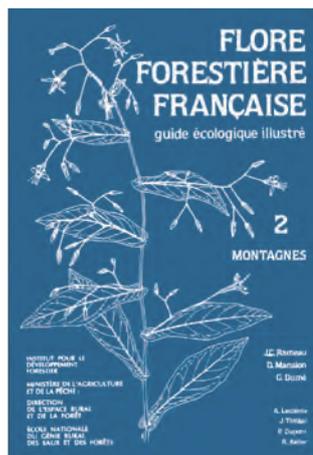
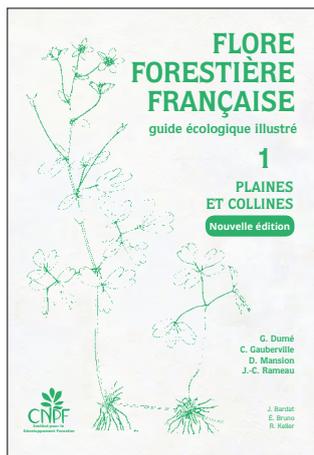
La *Flore* et sa genèse

La forêt est un grand réservoir de diversité biologique et la flore y prend une part très importante. 75 % de la France ayant une altitude inférieure à 500 m, on réalise facilement que la plus grande partie de la flore métropolitaine est décrite dans la *Flore forestière française, Plaines et collines*.

La *Flore* se présente en deux pages disposées en vis-à-vis pour décrire chaque mousse, fougère, fleur, arbre et arbuste. En page de gauche, l'espèce est représentée par une illustration pleine page réalisée au trait, avec les détails utiles pour faciliter la détermination. En page de droite, on trouve :

- les noms latin et vernaculaire de l'espèce – avec leur étymologie – sa famille et son genre ;
- les noms en anglais, allemand et néerlandais ;
- la description de l'espèce (avec des notes pour éviter toute confusion avec d'autres espèces) ;
- la carte de répartition ;

¹ Maintenant AgroParisTech, centre de Nancy.



- l'autécologie (besoins et exigences de l'espèce vis-à-vis de son milieu) ;
 - le biotope ;
 - les habitats actualisés du deuxième Prodrome des végétations de France (PVF2) ;
 - et les usages, propriétés médicinales et pharmacologiques, ainsi que les statuts de protection.
- Ce guide pratique offre aussi un vocabulaire,

une aide à la reconnaissance, des clés de détermination (notamment sur la reconnaissance des ligneux en hiver), des fiches synthétiques illustrées pour les genres représentés par plus de trois espèces, une bibliographie et deux index (latin et français). *La Flore forestière* présente ainsi l'ensemble des informations permettant un diagnostic de terrain efficace, économe et rapide.

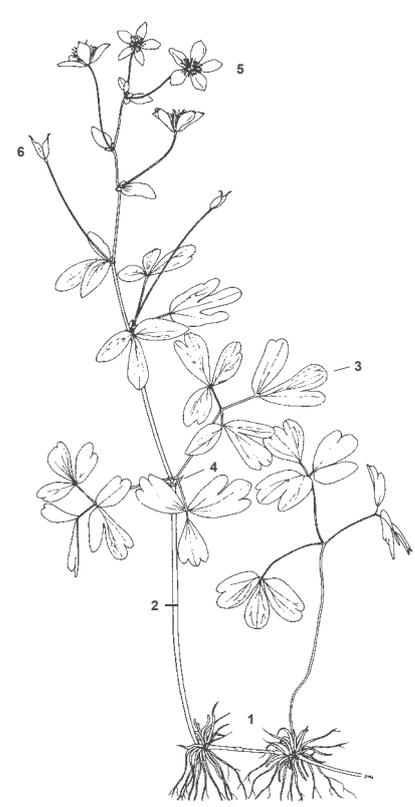
² Direction de l'espace rural et de la forêt.

Dans les années 1980, l'idée de constituer un « Guide écologique illustré » est née de discussions entre Jean-Claude Rameau, qui venait de bâtir un document synthétique pour ses étudiants, et Gérard Dumé, soucieux de répondre au besoin des techniciens et propriétaires forestiers de disposer d'un document illustré permettant de reconnaître les plantes sur le terrain (avec des astuces valables en toute saison), puis de sa rencontre avec Dominique Mansion, qui avait illustré brillamment le *Catalogue des stations du Perche et plateau calaisien sarthois* paru en 1984.

Gérard Dumé a alors préparé un modèle de fiche inspiré des questions que se posaient les techniciens forestiers, qui avaient suivi les stages de formation à la botanique qu'il animait depuis 1978. Cette fiche regroupait les éléments de diagnostic, la répartition géographique, les traits écologiques et les groupements végétaux auxquels participe la plante de façon à placer ces informations en regard du dessin de l'espèce.

Jean-Claude Rameau, dans le but d'améliorer ses supports de cours, y a ajouté des informations sur la dynamique de la végétation, la biologie, et les précautions à prendre pour préserver certaines espèces patrimoniales. L'idée d'un véritable ouvrage était née. Les financements de la Derf² au ministère de l'Agriculture ont donné l'impulsion pour lancer le projet. Les dessins ont été réalisés sur le terrain entre 1985 et 1987. Dès le départ, le projet d'une articulation de la *Flore* en 3 tomes était retenu ! C'était le début d'une aventure qui a impliqué près de 200 botanistes passionnés pour aboutir en 1989 à la parution du premier tome : *Plaines et collines*. Ainsi la *Flore forestière française*, en complément des catalogues des stations forestières déjà parus, allait-elle devenir l'instrument idéal de la gestion forestière optimale, associant à la juste préoccupation d'obtenir une production ligneuse abondante et de qualité, le souci de sauvegarder la richesse floristique de la forêt française, dans toute sa diversité biologique, génétique, écologique et paysagère.

Double page extraite de la nouvelle Flore forestière française Tome 1.



RENONCULACÉES **ISOPYRUM**

Isopyrum thalictroides L.

Isopyre faux pigamon

Angl. : Isopyrum Allem. : Wiesenrauten-Muschelblümchen

du grec *isos* : semblable, *uros* : feu (plante irritante), et *thalictron* : pigamon (feuilles ressemblant à celles des pigamons).

CARACTÈRES BIOLOGIQUES

- plante vivace de 15-25 cm; géophyte à rhizome;
- floraison : mars à mai; pollinisée par le vent; dispersée par les animaux.

CARACTÈRES DIAGNOSTIQUES

- 1 - rhizome rampant à racines fasciculées en couronne;
- 2 - tige grêle, glabre, sans feuilles à la base;
- 3 - feuilles glabres deux fois ternées, à folioles trilobées;
- 4 - stipules membranées;
- 5 - fleurs blanches peu nombreuses, pédoncelées, à l'aisselle de petites bractées;
- 6 - 1 à 3 follicules ovales, aplatis, à bec droit et assez court.

Nota. Les feuilles ressemblent à celles de *Thalictrum minus*, qui sont ternées, de forme triangulaire et dont les folioles sont glauques en dessous. Ne pas confondre avec *Adoxa moschatellina*, au rhizome blanc formé de cônes emboîtés, à feuilles mucronées.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE

- assez rare ou absente selon les régions;
- jusqu'à 1 000 m : étages collinéen et montagnard;
- sud-est européenne.



DONNÉES AUTÉCOLOGIQUES

- espèce d'ombre;
- humus : mull carbonaté à eumull; sols riches en bases et en éléments nutritifs; pH basique à neutre;
- matériaux : argiles de décarbonatation, limons argileux;
- sols frais à très frais : espèce mésophile à hygrocline;
- caractère indicateur : neutronitrocline.

BIOTOPES, FORMATIONS VÉGÉTALES, PHYTOSOCIOLOGIE

- divers types forestiers collinéens ou montagnards (*Fagetalia sylvaticae*) : chénaies, hêtraies-chénaies (*Carpino-Fagenalia*), hêtraies pyrénéennes (*Scillo-Fagenion*); fruticées (*Prunetalia spinosae*).

USAGES, PROPRIÉTÉS

- plante toxique;
- cultivée comme plante ornementale;
- espèce protégée dans les régions Limousin, Champagne-Ardenne, Basse- et Haute-Normandie, Centre, Ile-de-France, Pays de la Loire, Picardie et Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi que dans les départements de Dordogne et de Gironde.

Pourquoi une réédition de la *Flore* ?

Les raisons en sont à la fois simples et complexes mais peuvent être résumées en trois verbes : actualiser, compléter, simplifier. Ces raisons sont détaillées dans l'avant-propos de la nouvelle *Flore forestière française*, nous n'en donnons ici qu'un aperçu illustré d'exemples.

Actualiser

Si l'arbre ne change pas, le langage qui le décrit, lui, évolue. Les auteurs ont donc mis à jour les noms de familles, de genres, d'espèces, etc. De la même façon, l'environnement de notre flore métropolitaine change, même en trente ans. Il a donc fallu actualiser les cartes de répartition des espèces, car le changement climatique, par exemple, est à l'œuvre pour modifier les aires de répartition des plantes.

Des informations nouvelles ont enfin permis d'actualiser l'autécologie des espèces, notamment à partir des connaissances acquises lors de la réalisation des catalogues et guides des stations forestières réalisés dans la France entière.

Compléter

Comme pour toute réédition, certaines coquilles, voire erreurs ou imprécisions signalées par des lecteurs ont été corrigées : qu'ils en soient ici remerciés.

Mais au-delà de cela, on comprend qu'en trente ans, certaines plantes, qui n'étaient pas en forêt s'y trouvent aujourd'hui. Par exemple, le raisin d'Amérique, toxique et considéré désormais comme une plante envahissante à supprimer, s'est-il répandu le long des routes puis a gagné la forêt. Il en va de même pour certaines espèces, notamment d'origine méditerranéenne, dont la fréquence se trouve augmentée à la faveur des changements climatiques, de l'ensemble des espèces envahissantes, ou encore des espèces des forêts littorales et ripicoles, ou de celles des milieux associés à la forêt, qui avaient été moins détaillées dans la première édition.

Les auteurs ont donc complété les espèces, sous-espèces, fiches synthétiques de genre, clés de détermination et dessins de détails (bourgeons, fleurs ou fruits en particulier) pour rendre plus agréable l'utilisation de la nouvelle *Flore* et faciliter la diagnose des espèces. Ils ont aussi complété le nombre de clés de

détermination en hiver des espèces ligneuses feuillues pour faciliter leur reconnaissance à l'état défeuillé.

Enfin, les caractères biologiques, notamment les modes de pollinisation, de dispersion des diaspores et les informations concernant la flore mellifère ont été complétés – dans un contexte de diminution constante du nombre des abeilles – en précisant la nature (nectar ou pollen) de l'intérêt des espèces concernées.

Simplifier

La simplification a été effectuée en prenant bien soin de ne pas perdre d'information tout en conservant l'essentiel. Ainsi la liste des noms vernaculaires des espèces décrites a été allégée, pour ne conserver que ceux réellement utilisés aujourd'hui par la plupart des forestiers et naturalistes sur le terrain ; ce principe évite un certain nombre de confusions inutiles et facilite l'usage de l'index des noms français. Dans le même esprit, il n'a le plus souvent été conservé qu'un seul nom anglais, allemand ou néerlandais pour chaque espèce décrite.

Les auteurs et collaborateurs de la *Flore* ont ainsi à nouveau amélioré ce qui pourrait être qualifié (sans mauvais jeu de mot), de « fleuron » de la botanique à la française, car il n'existe pas d'équivalent dans les autres pays européens. Augurons que la nouvelle *Flore forestière française* profite encore à de nombreuses générations de forestiers et passionne toujours les amoureux et curieux de nature, pour autant de prétextes à de belles excursions en forêts.

Merci aux auteurs et collaborateurs de la *Flore* pour ces trésors d'érudition botanique qui allient précision, praticité, exhaustivité et beauté. Et si, comme le disait Victor Hugo (qui pourtant se prévalait davantage du réalisme que du naturalisme), « le beau est aussi utile que l'utile », la *Flore* est deux fois utile... ■

Pour commander nos publications en ligne : www.foretpriveefrancaise.com





10 min

Pour atteindre rapidement ses points d'inventaire en forêt, le GPS est un outil précieux

par Sylvain Gaudin, CNPF-CRPF Grand Est et Etienne Beraud, CNPF-CRPF Auvergne – Rhône-Alpes

La gestion forestière nécessite souvent de réaliser des relevés de terrain à des endroits définis à l'avance. Un GPS¹ permet non seulement de s'y rendre, mais également de le faire de manière rapide.

Intégré dans les téléphones portables, dans les véhicules ou dans des boîtiers professionnels spécifiques, le GPS est un appareil désormais courant. Si pendant des années, seuls des moyens d'arpentage classiques ont été utilisés en forêt comme le mesureur à fil perdu (topofil) et la boussole, le GPS est désormais au quotidien un outil de la gestion forestière.

Il permet de localiser en forêt et de cartographier avec une bonne précision² les routes, les infrastructures, les limites de peuplements ou les arbres remarquables... Il permet également de naviguer vers des lieux définis à l'avance de manière efficace³, à l'instar des GPS utilisés dans les véhicules. Cela est utile pour bon nombre d'opérations de gestion forestière comme la cartographie des stations et des peuplements⁴, la réalisation de relevés d'indices de consommation de la flore ligneuse par les cervidés, ou pour retrouver des taches de semis à dégager en futaie irrégulière, par exemple.

La précision de la navigation a été testée⁵ et montre que les différents GPS utilisés sont plus performants (point d'arrivée plus proche en moyenne du point théorique) que l'arpentage traditionnel (au topofil et à la boussole).

En revanche, les temps de cheminement entre les points n'ont pas été comparés. Cet article présente donc les résultats obtenus à ce sujet sur deux forêts.

Forêts utilisées et protocole

Deux chênaies de plaine, situées en position de plateau, ont été parcourues selon différentes modalités décrites dans le *tableau 1*. Elles présentent des peuplements feuillus diversifiés issus du taillis sous futaie et des difficultés de cheminement très variables (présence parfois de jeunes taillis, d'arbustes épineux, de ronciers...).

La plupart des trajets entre points a été chronométré et les données disponibles sont nombreuses (plusieurs dizaines de trajets pour chaque modalité). Il existe des différences conséquentes sur les matériels testés et les cheminements. Un seul type de GPS a été testé sur le Bois du Roi alors que plusieurs modèles ont été comparés sur la forêt de Sainte-Croix. Par ailleurs, la grille de points à atteindre sur le terrain n'a pas le même pas sur les deux forêts (4 points par hectare dans un cas, 2 points par hectare dans l'autre). Malgré ces différences et le fait que toutes les modalités n'aient pas été croisées, il est possible de dégager des tendances et de les traduire en informations utiles pour les forestiers.

Les résultats obtenus

Le *tableau 1* indique les temps moyens de parcours selon les modalités. Pour le Bois du Roi, il est en moyenne de 77 secondes. Cependant, comme le montre la *figure 2*, cette moyenne recouvre une grande hétérogénéité.

Dans le cas de cette forêt, la variabilité des temps de déplacement semble liée à l'encombrement plus ou moins marqué des sous-bois



¹ Global Positioning System, un système de géolocalisation par satellite.

² Piedallu et Gégout, 2002.

³ Gaudin *et al.*, 2006.

⁴ Gaudin *et al.*, 2011.

⁵ Gaudin *et al.*, 2006.

Figure 1 - Exemple de grille localisant les relevés à effectuer sur une forêt (croix rouges)

Le GPS guide l'opérateur sur le terrain pour aller d'un point à un autre (flèches bleues).

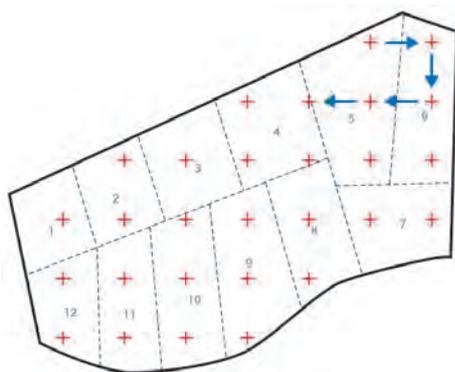


Tableau 1 - Caractéristiques des forêts et des matériels testés et principaux résultats

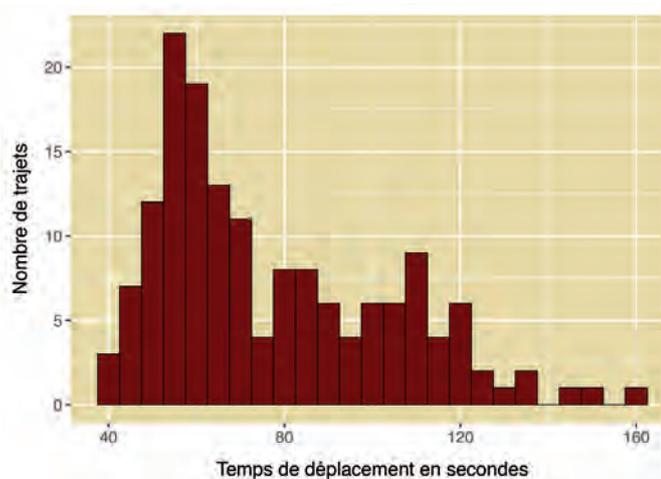
Forêt	Bois du Roi		Sainte-Croix		
	Matériel testé	Garmin GPSmap 62s	Trimble Geo XT	Trimble Geo XM	Trimble Pro XR
Saison des mesures	Hiver	Hiver	Hiver	Hiver et été	Eté
Distance entre les points (en mètres)	50	70,7			
Nombre de trajets chronométrés	156	84	82	161	84
Temps moyen de trajet (secondes)	77	138	172	220 (Hiver : 218 ; Été : 222)	339

à parcourir et aux opérateurs ayant réalisé les relevés. Ils n'avaient pas tous la même habitude de la navigation et de la recherche de points avec un GPS.

La *figure 3* (p. 12) résume l'ensemble des résultats obtenus sur les deux forêts. Toutes les moyennes sont significativement différentes les unes des autres. Plusieurs conclusions découlent de cette figure :

- les temps de parcours sont plus hétérogènes sur Sainte-Croix que sur le Bois du Roi ;
- les temps de parcours sont plus courts sur le Bois du Roi que sur Sainte-Croix. Cela résulte peut-être de la différence entre les forêts, entre les matériels utilisés ou entre les opérateurs, mais surtout des distances à parcourir (50 m au lieu de 70,7 m) ;
- sur la forêt de Sainte-Croix, les différents modèles de GPS obtiennent des temps de parcours sensiblement différents (alors que les opérateurs, la forêt et la grille de points sont identiques). C'est paradoxalement le GPS le plus précis (Pro XR) qui donne le temps de parcours moyen le plus long. Ce modèle de GPS permet un paramétrage fin des réglages et propose des filtres sur le nombre minimal de satellites et sur leur agen-

Figure 2 - Histogramme des temps de parcours pour le Bois du Roi (distance 50 m et GPS Garmin GPSmap 62 s)



Un GPS permet d'atteindre un point précis distant de 50 m en 77 secondes en moyenne.



Utilisation du GPS en forêt pour atteindre un lieu sur lequel réaliser des relevés.

cement dans le ciel : la précision du positionnement se fait au détriment de la réactivité de l'appareil ;

- le modèle Pro XR a été utilisé en hiver (hors feuilles) et en été (avec les feuilles présentes). Le *tableau 1* indique qu'il n'y a pas de différence significative dans les résultats obtenus. Ainsi la vitesse de déplacement entre les points d'inventaire ne semble pas liée à la présence des feuilles lors de l'utilisation d'un GPS. En revanche, la visée à la boussole étant rendue difficile en présence d'un sous-étage dense en période feuillée, l'expérience acquise sur d'autres forêts montre que le cheminement à la boussole et au topofil est plus long en période estivale ;
- la méthode traditionnelle utilisant boussole et topofil est toujours globalement plus lente que celle utilisant un GPS, quel que soit le modèle. Cependant, ce résultat est amplifié ici par le fait que boussole et topofil ont été utilisés en été, à la période qui leur est la plus défavorable.



Que retenir ?

Au-delà des résultats expérimentaux obtenus sur deux forêts sur lesquelles des chronométrages précis ont été effectués, l'usage fréquent des GPS pour le positionnement en forêt permet de dégager des tendances générales. Elles sont présentées ci-dessous.

Quel que soit l'outil utilisé (GPS, topofil...), le cheminement en forêt est d'autant plus difficile et long :

- ▀ que les points sont distants les uns des autres ;
- ▀ que le relief est marqué ;
- ▀ que le sous-bois est encombré (présence de semis, d'un jeune taillis, d'arbustes, de résidus d'exploitation, de chablis...).

À ces deux derniers critères liés au milieu naturel s'ajoutent la condition physique de l'opérateur et sa bonne maîtrise des outils utilisés, notamment lorsqu'ils nécessitent un apprentissage comme certains GPS. Les conditions météorologiques peuvent également intervenir (difficulté de viser à la boussole par temps couvert dans un sous-bois dense, interface tactile de certains GPS fonctionnant mal sous la pluie...).

Le nombre de satellites et leur agencement dans le ciel varient en permanence. Certaines périodes sont donc plus favorables que d'autres pour cheminer en forêt. Dans certains cas, en particulier avec les récepteurs GPS



La navigation traditionnelle à la boussole et au topofil oblige à traverser des zones encombrées.

les plus anciens, le nombre de satellites est insuffisant et l'opérateur se retrouve bloqué à attendre que la situation s'améliore. Ainsi, les points noirs de la figure 3 correspondent soit à des conditions de déplacement très défavorables (jeune taillis, ronciers...) soit à des périodes pendant lesquelles il y a trop peu de satellites ou qu'ils sont mal positionnés. Pour le topofil, ces points ne correspondent qu'aux trajets les plus complexes, en raison de l'encombrement des sous-bois.

Le cheminement avec une boussole et un topofil oblige à aller en ligne droite entre les deux points d'inventaire, quel que soit l'encombre-

Figure 3 - Distribution des durées de déplacement entre les points avec différents GPS

La croix correspond à la moyenne, le trait horizontal à la médiane, la boîte jaune contient la moitié des valeurs (entre le premier et le troisième quartile) et les branches transcendent l'étalement des valeurs (les points noirs figurent les valeurs extrêmes). La méthode traditionnelle utilisant boussole et topofil est toujours plus lente que celle utilisant un GPS, quel que soit le modèle.

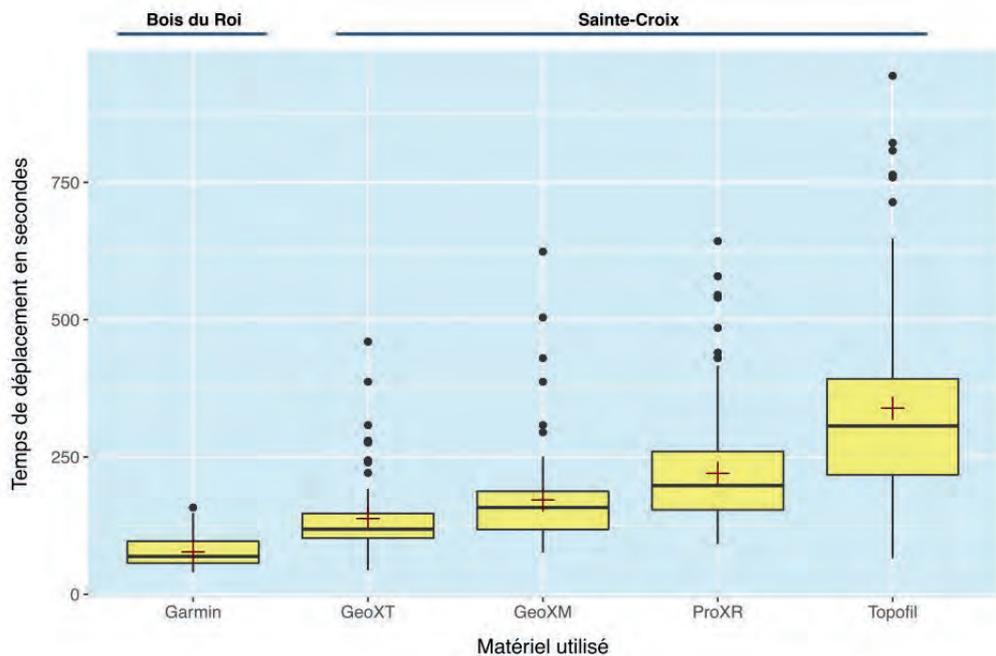


Tableau 2 - Avantages et inconvénients de chaque matériel

	Avantages	Inconvénients
GPS	Précis Rapide (car il permet facilement d'éviter les obstacles) Plus facile à mettre en œuvre	Certains modèles sont coûteux Risque de tomber en panne de batterie Nombre réduit de satellites à certaines périodes Apprentissage de la navigation nécessaire sur certains modèles
Topofil et boussole	Système mécanique robuste (pannes rares)	Manque de précision (s'il y a des obstacles ou de fortes pentes) Nécessite d'être rigoureux dans l'utilisation (correction des pentes, distinction du nord magnétique et du nord géographique...) Fil laissé en forêt

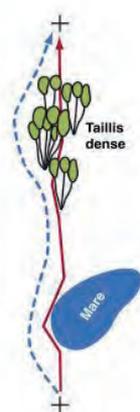
ment du sous-bois ou la pente. En revanche, le guidage par GPS n'oblige pas à cela (figure 4). Si le chemin le plus court d'un point à un autre est la ligne droite, en forêt, ce n'est pas nécessairement le plus rapide. Ainsi, plus les conditions de progression sont difficiles, plus le GPS est efficace, en terme de qualité de positionnement et de rapidité, et plus il est performant par rapport à la boussole et au topofil. Cette règle a

été vérifiée dans de très nombreuses conditions et avec tous les modèles de GPS.

La qualité d'une nouveauté se juge sur des tests et des paramètres techniques, mais également à l'aune de la satisfaction des utilisateurs. Actuellement, une très grande majorité des utilisateurs devant réaliser des relevés géoréférencés sur le terrain, qui ont testé et utilisé un GPS, ne souhaitent pas revenir à des outils anciens (boussole et topofil). Cette validation par la pratique montre donc bien que l'outil est performant, pratique et rapide pour naviguer en forêt. ■

Figure 4 - Comparaison de trajets entre deux points avec un GPS ou une boussole

Le cheminement au topofil et à la boussole (trait plein rouge) oblige à aller droit et à traverser certains obstacles comme une zone de jeune taillis. Le GPS (trait pointillé bleu) permet de se déplacer sans nécessairement aller droit et de contourner facilement les obstacles.



Bibliographie :

Gaudin S., Pont S. et Gantillon M., 2006. *Le GPS : un outil efficace pour se diriger en forêt*. Rev. For. Fr., LVIII, n° 2, 141-154. *

Gaudin S., Pichery C. et Bertin S., 2011. *Les cartes des stations : des outils à mieux valoriser*. Forêt-entreprise n° 198, 51-54.

Piedallu C. et Gégout J.-C., 2002. *Étude de la précision du système GPS en milieu forestier*. Rev. For. Fr., LIV, n° 5, 429-442. *

*<http://hdl.handle.net/2042/5812>

*<http://hdl.handle.net/2042/4932>

En savoir +

Où en sont les GPS ? Un comparatif de différents modèles de GPS par le groupe de travail du CNPF-IDF est présenté dans Forêt-entreprise n° 220 p.22-27.

À retenir

Le GPS est un appareil de plus en plus utilisé pour atteindre des points d'inventaire en forêt. La géolocalisation permet de rejoindre les points à échantillonner avec une précision suffisante pour la plupart des usages forestiers. Les temps de déplacement sont plus rapides entre deux points avec un GPS qu'avec la méthode ancienne utilisant boussole et topofil.

Mots-clés : GPS, cheminement, rendement, navigation, expérimentation.

La télédétection au service de la forêt

Par Michel Chartier et Éric Paillassa, CNPF - IDF

*Extrait d'une image Pléiades acquise au-dessous de la forêt de Fabas (Haute-Garonne),
Composition en infrarouge fausses couleurs (Proche infrarouge, Rouge, Vert)*

PLÉIADES © CNES 2013, Distribution Airbus DS

Sommaire

- 16 La télédétection, c'est quoi ?
- 20 La phénologie des arbres : une donnée incontournable pour cartographier nos forêts ?
- 25 Suivi annuel d'occupation des sols et de ressources forestières en France
- 31 Identification et suivi des peupleraies par télédétection hypertemporelle
- 37 Quaspare : qualification spatialisée de la ressource en pin maritime dans le massif des Landes de Gascogne
- 41 Détection automatique de coupes rases
- 46 Faisabilité du diagnostic de l'état sanitaire des peuplements par télédétection, le châtaignier en Dordogne
- 51 Rendre accessibles aux gestionnaires forestiers les produits issus de la télédétection

La multiplication des observations aériennes sur notre environnement par des drones, avions ou satellites, appelées télédétection, peut inquiéter le particulier ; il s'agit avant tout d'acquérir des informations globales, précises et géolocalisées au service des forêts et des forestiers. De quelles informations s'agit-il ? Pour qui ? Pourquoi ? Ce dossier nous aide à prendre un peu de hauteur et ainsi à mieux appréhender les utilisations actuelles et futures.

Ce dossier débute par une définition de la télédétection et son vocabulaire associé, pour en connaître les bases. L'objectif général de cette « technologie » est de caractériser, grâce à des capteurs, une cible (objet ou surface) à distance. En pratique, les données obtenues dépendent du capteur utilisé (optique, radar, lidar) lui-même porté par un satellite, un avion ou un drone. La qualité des données obtenues dépend de ces différents éléments pour leurs résolutions temporelles, spatiales et spectrales.



Michel Chartier, technicien CNPF-IDF, en charge de la cartographie et gestion de données, des modèles de croissance, de l'évaluation du matériel d'expérimentation et référent télédétection.



Éric Paillassa, ingénieur CNPF-IDF, en charge de l'expérimentation au CNPF et correspondant télédétection, spécialiste national du peuplier, acteur dans l'adaptation des forêts au changement climatique.

Photo de couverture :
Extrait d'une image
Pléiades acquise
au-dessus
de la forêt de Fabas
(Haute-Garonne),
composition colorée en
vraies couleurs
(Rouge Vert Bleu)



Une cartographie des essences d'une forêt est envisageable grâce à la richesse spectrale des capteurs optiques couplés à des traitements d'image calés sur leur phénologie. Tout en dressant un historique de la cartographie des forêts, Nicolas Karasiak (Inra, UMR Dynafor) présente les avancées dans ce domaine. En parallèle de cette caractérisation des essences, différents usages sont envisagés pour qualifier annuellement l'occupation du sol et quantifier la ressource forestière. Jean-François Dejoux (Centre d'études spatiales de la biosphère) explique les travaux en cours et les résultats qui peuvent en être espérés. Cet article évoque également le rôle du pôle Theia visant la mutualisation des connaissances et produits issus de la télédétection satellite.

Certaines filières ont bien compris l'intérêt de la télédétection pour une évaluation et un suivi de la ressource, notamment pour le peuplier et le pin maritime. Yousra Hamrouni (CNP, Conseil national du peuplier) détaille les enjeux pour cette essence et les potentialités du traitement des images satellites Sentinel-1 & -2 pour cartographier à grande échelle les peupleraies, avec également les classes d'âges et les coupes rases. Sur le massif landais, l'IGN, par le biais d'images aériennes, modélise la hauteur de la canopée sur l'ensemble du territoire et en déduit une

cartographie à grande échelle des volumes de ressource pin maritime disponible.

Un autre intérêt de la télédétection est le suivi des caractéristiques d'un peuplement dans le temps. Le premier exemple est la détection des coupes rases développée par l'Irstea, suite à une demande du ministère de l'Agriculture. La méthode compare les images à deux dates pour détecter les différences qui sont liées à une coupe rase. Cet outil est déjà mis à disposition des agents de l'État. Deuxième exemple, la détection de dépérissements est aussi un enjeu de l'utilisation d'images satellites. L'équipe du programme Casteldiag, financé par le RMT Aforce, évalue l'état sanitaire du châtaignier en Dordogne grâce aux données Sentinel-2. Les premiers travaux ont sélectionné différents indicateurs aboutissant à une cartographie de probabilité de dépérissement pour le châtaignier.

Enfin, la mise à disposition de toutes ces informations auprès de gestionnaires est au cœur du programme européen intitulé *Mysustainable Forest*. Dix partenaires européens créent et évaluent, sur des zones tests, différents produits issus de la télédétection permettant de favoriser la gestion durable des forêts.

Nous vous souhaitons une bonne lecture de là-haut ! ■

La télédétection, c'est quoi ?

 10 min

Par Juliette Boiffin, CNPF-CRPF Grand-Est et Michel Chartier, CNPF-IDF

Quelques explications et définitions de la télédétection avant de détailler les différentes applications forestières possibles

¹ Appareil qui émet un faisceau laser et en reçoit l'écho (comme le radar), permettant de déterminer la distance d'un objet.

Sans le savoir, nous utilisons la télédétection tous les jours via trois de nos sens (vue, ouïe et odorat). Ces informations définissent ou caractérisent un objet sans le toucher. De même que les chauve-souris qui utilisent leurs sonars pour se déplacer. Déjà plus de 150 ans que ces procédés sont intégrés dans diverses applications. Pour autant, les usages ont été largement accélérés grâce à l'exploration de l'espace. Ceci nous ramène à une première question : comment ça marche ?

Définitions « de l'officiel au concret »

D'après le dictionnaire des termes normalisés des sciences et techniques publié au Journal officiel, la télédétection est l'« ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ».

Plus simplement, la télédétection regroupe l'ensemble des moyens tant vecteurs (satellites, avions, hélicoptères, planeur ultra-léger motorisé (ULM) et drones) que capteurs

(images, radar et lidar¹) qui, à distance et sans contact direct, détectent ou caractérisent une cible pouvant être un objet (arbre par exemple) ou une surface (peuplements par exemple). Toute cible frappée par une énergie incidente va en absorber une proportion plus ou moins importante, va transmettre une partie du rayonnement électromagnétique qui peut la traverser et enfin en réfléchir une autre partie. C'est justement la proportion de l'énergie incidente qui est réfléchi, ou réflectance, que l'on étudie en télédétection.

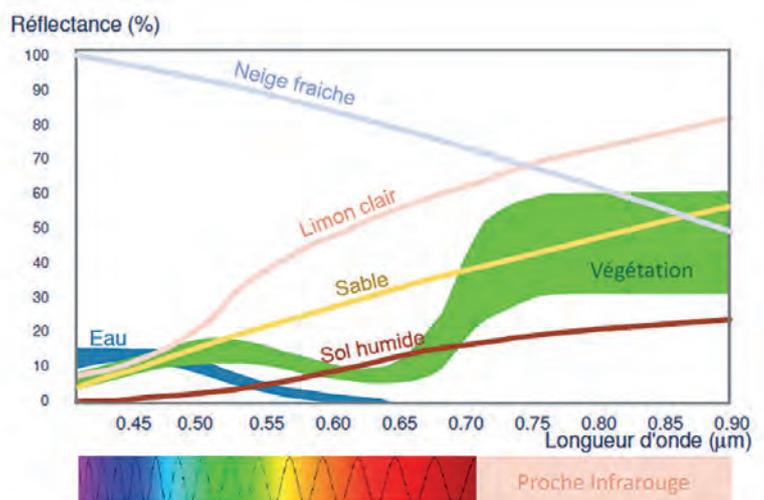
Les capteurs utilisés en télédétection sont des radiomètres² imageurs. En effet, ils mesurent des rayonnements et organisent ces mesures sous forme d'images. Ces images sont utilisées pour obtenir des informations sur les objets qu'elles représentent.

Chaque cible possède une signature spectrale qui lui est propre, c'est-à-dire qu'elle peut-être caractérisée par sa réflectance dans les différentes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. En effet, il est possible d'observer que l'eau a une plus grande réflectance dans la partie du spectre correspondant à la lumière bleue (d'où sa couleur) et qu'elle absorbe l'énergie dans les longueurs d'onde tendant vers le rouge. La courbe de la végétation montre un

² Un radiomètre est un instrument de mesure de l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique, dans différents domaines de longueurs d'onde, tels que l'ultraviolet, la lumière visible et l'infrarouge.

Figure 1 - Différentes réflectances de paysages au soleil

La réflectance montre le pourcentage de lumière réfléchi par diverses cibles dans différentes longueurs d'onde.



Source : Encyclopédie Universalis

comportement caractéristique dans le spectre du visible (longueurs d'ondes comprises entre 0,38 et 0,78 μm ³) avec une réflectance marquée dans le vert, et dans celui de l'infrarouge (réflectance élevée dans le proche infrarouge). Cela permet de la distinguer du sol nu, qui présente une signature spectrale très différente.

Différents capteurs

Différents capteurs existent. Certains sont dévolus uniquement à recevoir les rayonnements électromagnétiques réfléchis par des cibles (arbres, feuilles). Ce sont des capteurs dits passifs qui se différencient en deux groupes :

- ➡ **optique** (prise de vue via des appareils photos), qui capte l'énergie réfléchie issue du rayonnement solaire : les longueurs d'onde étudiées vont du visible au proche ou moyen infra rouge ;
- ➡ **thermique**, qui capte la radiation émise par les objets en fonction de leur température : étudiant la réflectance de cibles dans l'infrarouge.

D'autres capteurs, dits actifs, émettent de l'énergie, réceptionnent et calculent les parts absorbées, transmises et réfléchies par la cible. Ils ont l'avantage de ne pas être dépendants d'une source d'énergie externe (le soleil) et de pouvoir être utilisés 24 h/24 h et même sur couverture nuageuse.

Deux technologies peuvent être évoquées :

- ➡ **le radar** (*Radio Detection and Ranging*) : émet de la radiation micro-onde à partir d'une antenne. Le temps requis par l'énergie pour se rendre à la cible et revenir au détecteur détermine la distance à la cible ;

- ➡ **le lidar** (*Light Detection and Ranging*) : émet une impulsion laser et enregistre le temps de retour. Par exemple en forêt, les premiers échos correspondraient aux cimes tandis que les derniers échos au sol. Ceci permet de reconstituer en un seul survol la surface du sol (modèle numérique de terrain) et la canopée (modèle numérique de surface) pour en déduire la hauteur des arbres.

Un ou plusieurs capteurs peuvent être embarqués sur un même vecteur (avions, satellites etc...) et peuvent être utilisés simultanément. Ce couple capteur/vecteur amène des caractéristiques différentes aux images que l'on peut décomposer en trois critères.

La résolution spectrale

La résolution spectrale définit la capacité à capter une part plus ou moins importante du spectre électromagnétique.

Plus un capteur dispose de bandes spectrales (canaux), plus cette richesse est importante. Lorsque ces bandes correspondent à des plages de longueurs d'onde contrastées, elles permettent de distinguer des cibles aux signatures spectrales différentes et donc de discriminer des catégories d'occupation du sol. Classiquement on trouve des bandes spectrales dans le domaine du visible (rouge, vert et bleu) et du proche infrarouge. Certains capteurs permettent d'élargir ces zones d'observation grâce à des bandes dans le moyen infrarouge ou le radar.

La largeur des bandes est également à prendre en compte. Certaines bandes sont concentrées sur de larges plages de longueurs d'onde, tandis que d'autres sont plus restreintes. Certains capteurs enregistrent la réflectance dans de nombreuses bandes spectrales étroites et peuvent ainsi aboutir à une reconstitution quasiment complète de la signature spectrale des cibles, ce que ne permet pas l'étude de quelques bandes larges. Comme nous avons pu le voir dans le début de cet article, la richesse spectrale pour l'étude de la végétation est importante sachant que des divergences entre espèces ou états végétatifs s'observent dans le proche et le moyen infrarouge.

Toutes les informations enregistrées par les capteurs sont retranscrites sous forme de compte numérique dans chacun des pixels d'une image (plus petite surface d'une image numérique). C'est-à-dire que lorsque l'on clique dans un SIG⁴ sur un pixel, on retrouve les diverses bandes avec leurs valeurs.

La résolution spatiale

La résolution spatiale est définie par la taille d'un pixel qui détermine la longueur du côté du terrain qu'il représente. Cette résolution est liée aux capteurs utilisés, et également aux vecteurs qui les embarquent. En effet, il est aisé d'imaginer qu'un même appareil photo pointant un même site porté par un drone ou un satellite ne livrera pas le même niveau de détail.

Ainsi plus la taille du pixel est petite, plus la résolution est haute. De ce fait, plus on augmente la résolution, plus le niveau de détail de l'image est important.

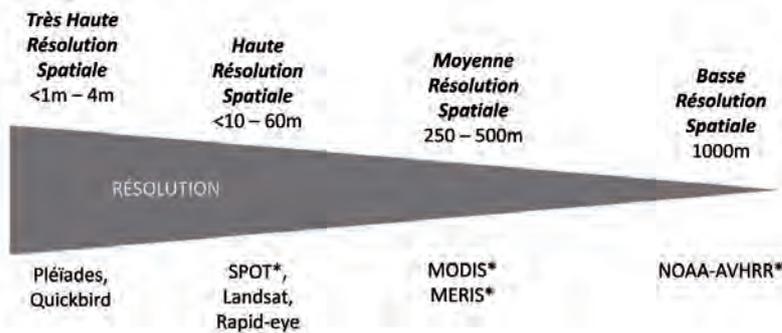
On utilise le système métrique pour caractériser cette résolution. C'est ainsi que la finesse géométrique peut varier de quelques centaines de mètres à quelques centimètres de résolution.

³ Unité micro mètre

⁴ Un système d'information géographique (SIG) est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

Figure 2 - Précision de résolution des images obtenues par différents capteurs

Un même appareil photo pointant sur un même site porté par un drone ou un satellite ne donnera pas la même résolution d'images.



SPOT : Satellite pour l'observation de la Terre ; amoyenne ;
 MERIS : *M*EDium *R*esolution *I*maging *S*pectrometer ; en français : spectromètre imageur à résolution moyenne
 NOAA-AVHRR : *A*dvanced *V*ery *H*igh *R*esolution *R*adiometer of the *N*ational *O*ceanic and *A*tmospheric *A*dministration ; en français : Radiomètre avancé à très haute résolution de l'Administration océanique et atmosphérique nationale.

Source : J. Boiffin – CNPF-CRPF

Les capteurs sont classés en fonction de ces valeurs. Il est ainsi courant de voir des articles évoquant des images à basse, moyenne, haute, voire très haute résolution.

Les images les plus résolues sont fournies par des capteurs portés sur drone, même si de plus en plus d'images satellitaires très fines (par exemple, images de Pléiades⁵) sont disponibles.

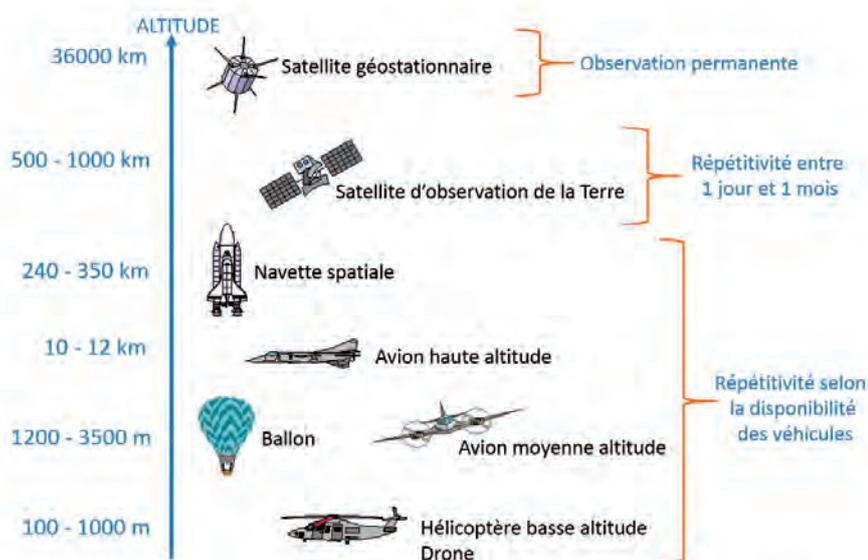
Cependant, il existe en général un compromis entre la résolution des images et leur emprise géographique : plus la résolution augmente, plus la superficie couverte par l'image (dite fauchée) est petite. Donc, ce qui est gagné en précision est perdu en vue d'ensemble.

La résolution temporelle

La résolution temporelle est la répétitivité d'acquisition d'images sur une région donnée. Elle dépend en premier lieu du vecteur utilisé. Dans le cas d'avions, ULM ou drones, l'opérateur décidera du rapprochement des missions en fonction de ses objectifs, de son budget et des conditions météorologiques. Dans le cas des satellites, cette répétitivité temporelle sera fonction de son altitude de positionnement. Par exemple, les satellites géostationnaires observent en permanence la même zone contrairement aux satellites d'observation qui peuvent mettre 1 jour à 1 mois pour survoler de nouveau la cible.

⁵ Pléiades est un couple de deux satellites optiques d'observation de la Terre.

Figure 3 - Graduation de hauteur des capteurs du drone au satellite



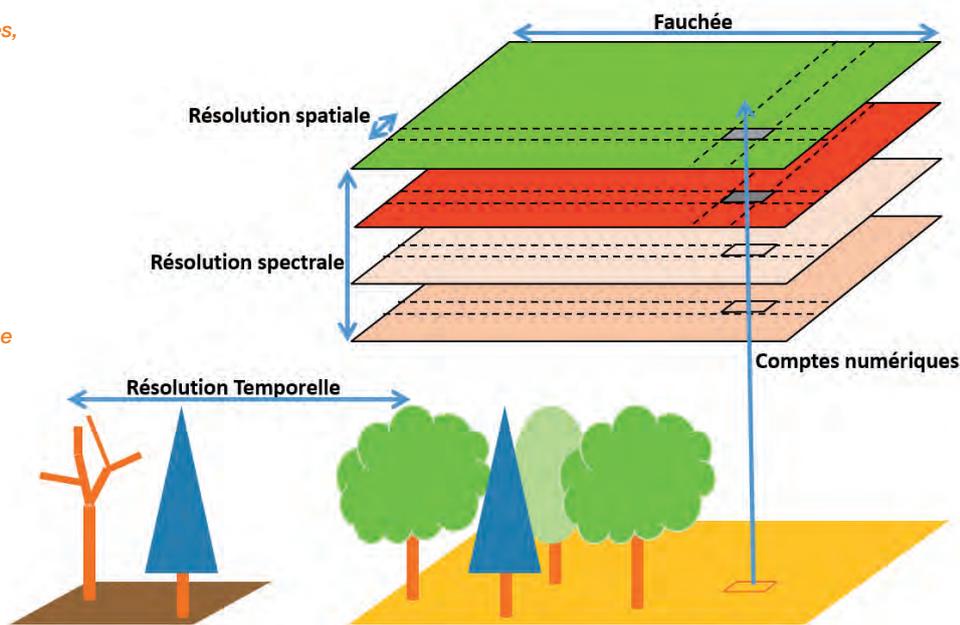
(publié par l'UMR TETIS, 2016, sous licence ouverte)

Source : UMR TETIS

Figure 4 - Les trois résolutions : spectrale, spatiale, ou temporelle

La télédétection couple différents capteurs (images, radar, lidar) sur différents vecteurs (satellite, avion, drone) et obtient trois résolutions : spectrale, spatiale, ou temporelle :

- spatiale : plus la taille du pixel (unité d'image) est petite, meilleure est la résolution ;
- spectrale : plusieurs bandes captent une longueur d'onde spécifique (bleu, vert, jaune, rouge, infrarouge) ;
- temporelle : plusieurs images sur une région choisie à différentes périodes.



(publié par l'UMR TETIS, 2016, sous licence ouverte)

Source : UMR TETIS

Néanmoins, un des facteurs limitants est la couverture nuageuse. Un fort taux de nuage peut réduire le nombre d'images exploitables pour une période donnée.

Certains satellites permettent de « dépointer » leurs capteurs et de les orienter vers une zone d'intérêt particulière pour ainsi rapprocher les périodes d'observation. Toutefois cela génère un angle de prise de vue qui pourra nécessiter des corrections pour que l'image soit exploitable. Un autre facteur d'amélioration est le nombre de satellites présents dans une même constellation (par exemple Sentinel-2).

Toutes ces images demandent des traitements préalables avant de chercher à les utiliser :

- traitements géométriques : ces traitements sont nécessaires pour projeter et géoréférencer les images. Des corrections sont également apportées pour réduire les déformations géométriques intervenues lors de l'enregistrement de l'image ;
- traitements radiométriques : une correction des effets liés au capteur (dérèglements, bruits etc.) et à l'atmosphère. En effet, le rayonnement reçu par un capteur, installé à bord d'un satellite, ne lui parvient qu'après la traversée intégrale de l'atmosphère, ce qui nécessite de prendre en compte les interactions rayonnement-atmosphère (composée par des gaz en proportions variables et de particules en sus-

pension). Ces effets ne sont pas les mêmes dans les différentes longueurs d'onde.

Pour conclure, l'accès aux données est largement facilité, grâce à des consortiums comme Geosud et Theia. Les nouveaux satellites et capteurs offrent des performances techniques de plus en plus avancées (hautes résolutions tant spatiale, spectrales que temporelles). La limite est aujourd'hui dans les connaissances et les capacités de traitement et d'interprétation des données. ■

Les figures sont intégrées à la formation de Géosud, Initiation à la télédétection avec ce lien : <https://lms.agreenium.fr/course/view.php?id=36>

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir pour le projet Géosud portant la référence ANR-10-EQPX-20.

À retenir

Différents capteurs – radiomètre imageur, radar, lidar - peuvent détecter et caractériser un objet (un arbre) ou une surface (un peuplement) à partir de différents vecteurs – satellite, avion, drone -. La télédétection couple ces différents capteurs sur différents vecteurs pour obtenir trois résolutions, spectrale, spatiale, ou temporelle :

- spatiale : plus la taille du pixel (unité d'image) est petite, meilleure est la résolution ;
- spectrale : plusieurs bandes captent une part de longueur d'onde spécifique (bleu, vert, jaune, rouge, infrarouge) ;
- temporelle : plusieurs images sur une région choisie à différentes périodes.

Les informations obtenues nécessitent interprétations et analyses.

Mots-clés : télédétection, définitions, vecteurs, capteurs.



Forêt de bouleaux au printemps. Les fougères visibles ici en sous-étage peuvent influencer le signal reçu par le satellite.

La phénologie des arbres : une donnée incontournable pour cartographier nos forêts ?

¹ www.karasiak.net, twitter @nkarasiak — UMR INP-ENSAT/INRA/EI Purpan

² Unité mixte de recherche Inra DYNamiques et écologie des paysages AgriFORestiers (DYNAFOR)

 13 min

Par Nicolas Karasiak¹, Inra laboratoire Dynafor² à Toulouse

Produire automatiquement une carte des différentes essences qui peuplent nos forêts en France est un défi ambitieux. L'arrivée de nouveaux algorithmes toujours plus performants et d'images satellites gratuites permet d'envisager dans un futur proche une première carte très précise des essences des forêts françaises.

*www.nouvelobs.com/rue89/rue89-nos-vies-connectees/20151021.RUE1024/voyage-dans-la-france-du-xviiiie-siecle-la-tete-dans-les-cartes-de-cassini.html

*<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-de-letat-majior-1820-1866>

Cartographier les forêts : une idée ancienne

Connaître son territoire, c'est aussi connaître ses forêts. C'est ainsi que Louis XIV commanda à la famille Cassini la première carte à l'échelle nationale des forêts, mais aussi des villes, des champs, des cours d'eau, ce qui fut fait avec un niveau de détail impressionnant pour l'époque (1/86 400, 1 cm représentant 864 m sur la carte). Cette carte était faite à la main, en parcourant le territoire et en s'appuyant sur la triangulation géodésique (technique consistant à déterminer la position d'un point en mesurant les angles entre sa position et deux autres points). Ce fut un travail titanesque qui occupa quatre générations de la famille Cassini durant plus de 60 ans et qui fut achevé à la fin du XVIII^e siècle.

Un passionnant article sur la transformation moderne des cartes de Cassini en information vectorielle (c'est-à-dire permettant de connaître en un clic la situation géographique

des forêts de l'époque) est consultable sur le site d'informations rue89*.

Quelques dizaines d'années plus tard, l'ordonnance royale de 1827 confia à l'armée la conception d'une carte à l'échelle 1/80 000 avec comme condition la représentation la plus juste possible du relief, stratégie de guerre oblige. Les levés plus précis (1/40 000) sont librement consultables sur le site de l'IGN*. La beauté de ces cartes, s'appuyant notamment sur le cadastre napoléonien, rend nostalgique beaucoup de cartographes, et aujourd'hui encore les scientifiques français les utilisent pour connaître par exemple les forêts présentes sur notre territoire au milieu du XIX^e siècle [1]. Cette époque est appelée le « minimum forestier », car elle correspond au plus bas niveau de surface forestière.

L'IGN révolutionne le savoir-faire

Jusqu'alors, il n'avait jamais été envisagé de cartographier les essences forestières, mais seulement de connaître les limites de nos

Figure 1 - Extrait de la carte de l'État-major représentant une partie de l'actuel département des Alpes de Haute-Provence

Plus les traits du relief sont serrés et courts, plus la pente est importante. Les forêts sont représentées par un fond vert.



forêts, les lisières. En 1987, l'Institut géographique national (IGN) lance une grande campagne de cartographie en renouvelant la méthode. Plus question cette fois-ci de passer 60 ans à parcourir la France ou de faire appel à l'armée, il sera question d'identifier les forêts et les espèces les plus présentes en France directement derrière un écran. Le travail est tout de même long et fastidieux, et il faudra pas moins de 17 ans (de 1987 à 2004)

pour produire une cartographie de la France métropolitaine des forêts d'au moins 2,25 ha. La carte nommée BDForêt V1 est consultable en ligne sur le site de l'IGN*.

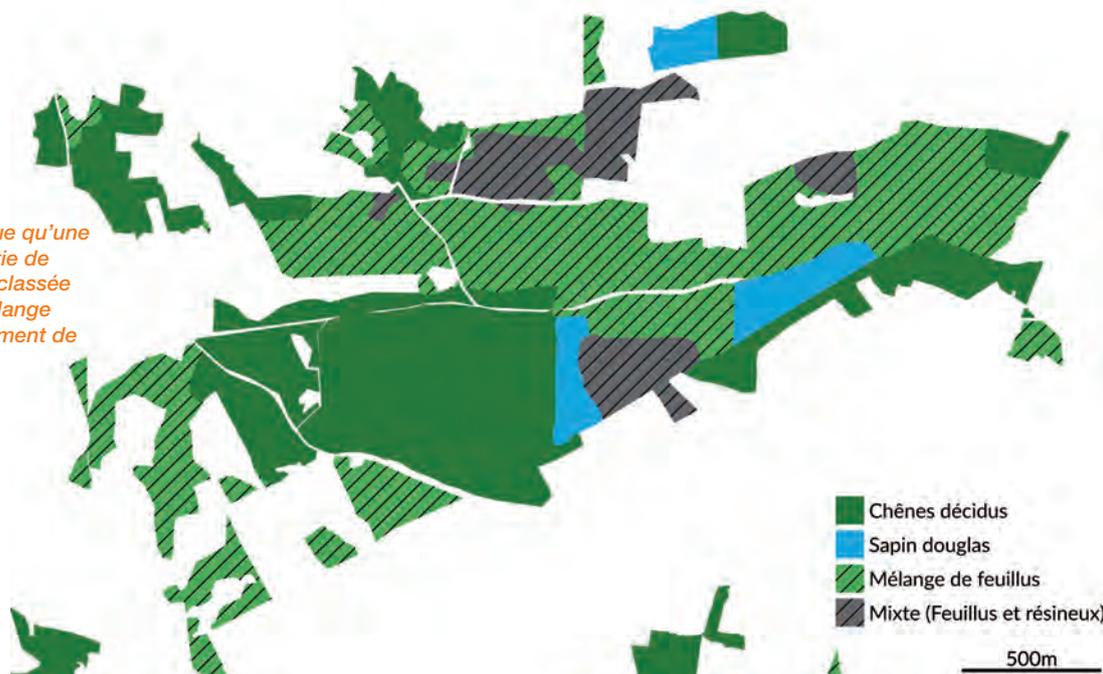
Les années 2000 : le début de l'automatisation

Après le succès de cette première expérience, l'IGN répète une nouvelle fois l'opération en 2007. La nouvelle cartographie est de meilleure

*<https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article647>

Figure 2 - Extrait de la BDForêt V2 de l'IGN sur la forêt de Rieumes (sud de Toulouse)

On remarque qu'une grande partie de la forêt est classée comme mélange (essentiellement de feuillus ici).



Source IGN

qualité : elle détaille au total une quinzaine d'essences, avec une surface minimale de collecte de 0,5 ha, soit un niveau de détail de près de 5 fois supérieur à la précédente version. Afin de faciliter le travail des opérateurs, la détection des lisières est obtenue par un procédé automatique, la segmentation : un algorithme qui, à partir de la texture des pixels (et donc de la différence de couleurs entre eux), détecte la distance la plus éloignée selon un niveau maximal d'hétérogénéité défini par l'utilisateur. Ainsi, la nouvelle cartographie nommée BDForêt V2 a demandé 12 ans au lieu de 17, tout en améliorant le niveau de détails. Qu'en sera-t-il pour la nouvelle cartographie des forêts ? Sera-t-elle produite par l'IGN ? Sera-t-elle faite de manière totalement automatique ?

Comment cartographier automatiquement les différentes espèces ?

Avec le développement du *machine learning* (apprentissage automatique), l'intelligence artificielle se dote d'un outil basé sur la statistique pour résoudre des problèmes aussi variés que retranscrire un livre scanné en texte, reconnaître des tumeurs à partir d'échographies ou, plus proche de notre domaine, cartographier les forêts à partir des données d'images satellites. Si l'apprentissage automatique nous offre, pour la première fois dans l'histoire de l'informatique, l'opportunité de réaliser une carte automatique des forêts, il convient néanmoins d'être prudent sur la qualité des cartes produites. Estimer le pourcentage d'erreur, si tant est que l'on arrive à situer réellement ces erreurs, est chose ardue, et lire une carte est un langage [2] qui reste parfois incompris. Avec la première cartographie automatique de l'occupation du sol en France, une équipe du laboratoire Cesbio [3] a réalisé la prouesse de reproduire en un rien de temps, ce que Cassini et l'État-major avaient mis des dizaines d'années à produire. Cependant, si la précision géométrique était la partie la plus chronophage pour les anciens cartographes, l'enjeu se porte aujourd'hui sur la précision thématique : il est en effet bien **plus difficile d'identifier la nature d'un objet** (forêt de feuillus, de conifères, verger, vignes...) **que de caractériser son emplacement précis**. Mais dès lors, s'il est déjà complexe de distinguer les feuillus des conifères (on pense ici aux eucalyptus ou aux chênes sempervirents qui apportent de la confusion, car ils gardent leurs feuilles

toute l'année, à l'instar des conifères), n'est-il pas utopique de rêver de cartographier de façon automatique les différentes espèces ?

La phénologie : bien comprendre le comportement des arbres pour mieux les cartographier

L'arrivée de Sentinel-2, une révolution venue de l'Europe

Depuis 2016, une révolution s'est produite dans le domaine des satellites : l'Europe a mis en orbite basse deux capteurs nommés Sentinel-2 capables de prendre des images tous les 5 jours, avec 10 m de résolution spatiale, de n'importe quel endroit de la terre, mais aussi, capables de déceler ce que nous ne pouvons pas voir : l'infrarouge. Quel rapport avec la forêt ? Si le vert nous saute aux yeux quand nous regardons la canopée, nous serions éblouis par l'infrarouge, si notre vue était capable de voir au-delà du spectre visible. Les deux satellites envoyés par l'Agence spatiale européenne (ESA) nous offrent pas moins de 3 bandes dans le *red-edge* (bandes très proches du rouge, mais pas encore dans l'infrarouge) et 3 dans l'infrarouge, une vraie prouesse. Ces bandes permettent de caractériser l'activité de la végétation (la structure cellulaire des feuilles) et ainsi d'améliorer la reconnaissance des essences. Si l'on veut aller plus loin et évaluer l'activité de certains pigments (chlorophylle, anthocyanine ou caroténoïde par exemple), des relations peuvent être calculées entre des bandes *red-edge* et certaines bandes du spectre visible typiques aux pigments, tandis qu'avec les bandes situées dans l'infrarouge dit moyen il est possible d'évaluer la teneur en eau des feuilles.

Sur le papier, cela semble parfait pour notre projet de cartographier les forêts, mais combien cela coûterait-il d'acquérir l'ensemble des images prises tous les 5 jours de la France entière ? Absolument rien. En effet, l'Europe fournit gratuitement toutes les images, mais encore faut-il les traiter (c'est-à-dire les ortho-rectifier [4] : faire comme si elles étaient prises à la verticale, et ensuite corriger l'effet de l'atmosphère, car à 786 km de distance les aérosols influent sur l'intensité des couleurs).

Et là encore, grâce à une communauté de chercheurs, tous ces traitements sont gratuits et accessibles au plus grand nombre : on le

doit au pôle Théia^{3*} créé fin 2012 par neuf institutions publiques françaises impliquées dans l'observation de la terre et les sciences de l'environnement.

L'intelligence artificielle et la phénologie : le duo qui manquait ?

Si la phénologie⁴ est exploitée depuis plusieurs décennies en télédétection, c'est cependant avec des capteurs ayant une résolution spatiale très faible (250 m, chaque pixel faisant donc 6,25 ha), empêchant toute cartographie précise des essences. Maintenant que des images d'une grande qualité spatiale et temporelle sont accessibles, c'est au tour de l'intelligence artificielle de prendre le relais. Pas question pour autant de lui laisser *carte blanche*. En effet, une expertise dans ce domaine est impérative pour sélectionner les algorithmes, les paramétrer, les valider, mais aussi choisir ce qui sera le plus informatif pour la machine. On a beau parler d'intelligence, l'algorithme ne pourra pas, si un nuage n'a pas été identifié comme tel dans une image, bien prédire son modèle, et cela entraînera des erreurs qui peuvent fausser de manière significative la cartographie. Il y a donc tout un savoir-faire permettant de fournir à l'algorithme des données parfaitement adaptées.

Mais pour fonctionner, de quoi a besoin un algorithme ? De deux types d'information : la première est ce qu'on a vu précédemment, plusieurs images d'une même année (ce qu'on

appelle une série temporelle d'images satellite), chacune consistant en un ensemble de valeurs numériques (par exemple la réflectance dans l'infrarouge). La seconde information, qui est la plus coûteuse aujourd'hui à obtenir, est la vérité terrain, c'est-à-dire ce à quoi chaque valeur numérique (un pixel) correspond en réalité : un chêne rouge ? un peuplier ? C'est grâce à ces informations qu'un modèle pourra être créé et qu'il pourra prédire des pixels (donc des forêts) pour lesquels aucune information sur l'espèce n'est disponible au départ. Plus les comportements phénologiques des essences sont différents, plus il sera aisé de les distinguer, mais la tâche reste ardue. En effet, de nombreux facteurs affectent la valeur d'un pixel : la densité de la canopée, la structure de la forêt, sa santé, son âge, le sous-bois présent etc. Il se peut même que deux pixels de deux essences différentes aient davantage en commun que deux pixels d'une même espèce [5].

Une collaboration nécessaire de l'ensemble des acteurs

Afin de compenser cette proximité dite spectrale⁵, il est crucial d'avoir un nombre de références terrain important et, si possible, le plus homogènement réparti en France. C'est certainement ce qui sera le plus coûteux dans la réalisation d'une cartographie des essences, et comme ces dernières appartiennent pour 75 % à des propriétaires privés, cette réussite ne se fera pas sans leur collaboration. Une

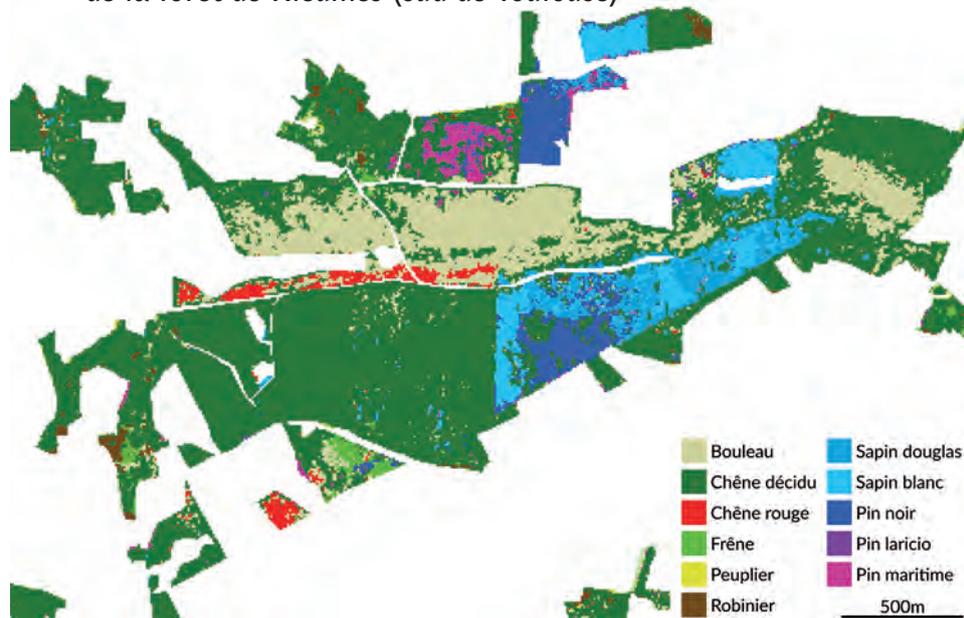
* <http://www.theia-land.fr>

³ Dejoux J.-F., 2019. *Données sur l'occupation des sols par télédétection*. Forêt-entreprise n° 247 p. 25-30.

⁴ Le cycle annuel de la végétation, de la pousse des feuilles à leur coloration et à leur chute.

⁵ Spectrale : plusieurs bandes captent une longueur d'onde spécifique (bleu, vert, jaune, rouge, infrarouge) ;

Figure 3 - Cartographie automatique des différents peuplements de la forêt de Rieumes (sud de Toulouse)



Exemple du niveau de précision qu'il est possible d'atteindre en apprentissage automatique. Cette carte a été produite en exploitant le potentiel des séries temporelles d'images satellite en association avec un algorithme de classification non linéaire.



© Nicolas Karasiak - Inra

Sur cette photo prise par un drone, les fleurs des robiniers sont pour l'essentiel cachées sous les feuilles, rendant plus difficile la détection de la floraison depuis l'espace.

synergie est d'ailleurs en train de se créer à Toulouse avec la collaboration de multiples acteurs comme les laboratoires de recherche publics que sont Dynafor et le CesBio qui unissent leurs forces afin de créer une chaîne de traitement capable d'automatiser un processus qui va du traitement des images à la production finale des cartes. D'autres organismes publics participent aussi, comme l'ONF qui apporte son expertise et quelques-unes de ses références terrain, mais des efforts restent à faire afin de **créer un véritable projet commun mêlant l'ensemble des services publics concernés**. Enfin, côté privé, le Centre régional de la propriété forestière établit un lien entre le public et le privé, notamment en fournissant, avec l'accord des propriétaires, de précieux plans simples de gestion forestière

qui apportent, selon la précision des données, des informations pour améliorer ou valider les modèles informatiques.

2020 : vers une cartographie entièrement automatisée des essences forestières ?

Les années 2020 devraient donc marquer l'histoire de la cartographie des forêts françaises. Lorsque la première carte des essences forestières sera réalisée de manière automatique, il faudra être attentif et si possible fournir un retour d'expert essentiel pour améliorer cette cartographie au fil du temps. Il sera certainement plus difficile d'être confiant dans la prédiction des résineux (les pins ou les sapins), car leur phénologie peu visible depuis l'espace ne facilitera pas leur reconnaissance. Les forestiers et autres experts de terrain auront toujours une place importante dans le processus de cartographie des forêts, car qui est mieux placé pour parler de la forêt que ceux qui la vivent au quotidien ? ■

À retenir

Les récentes images acquises par les satellites Sentinel-2 ont une résolution spatiale, temporelle et spectrale, qui semble prometteuse pour distinguer les différentes essences d'arbres, notamment grâce à l'apport de l'infrarouge. Le paramétrage d'algorithmes pourrait, avec l'aide de la phénologie, aboutir à la réalisation à large échelle d'une cartographie entièrement automatisée des essences forestières françaises, à la condition toutefois d'avoir des références terrain suffisamment représentatives des forêts.

Mots-clés : cartographie des essences forestières françaises, télédétection, phénologie.

Bibliographie :

[1] Bergès L., Dupouey J.-L., 2017. *Écologie historique et ancienneté de l'état boisé : concepts, avancées et perspectives de la recherche*. Rev. For. Fr. n° 4 p. 297-318.

[2] Raffestin C., 1988. *Le rôle de la carte dans une société moderne*. n° 4, p. 135-139.

[3] Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., et Rodes I., 2017. Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series. Remote Sens, vol. 9, n° 1, p. 95.

[4] Hagolle O., *L'ortho-rectification, comment ça marche ?*, Séries Temporelles.

[5] Boureau J.-G., 2008. *Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges : Application aux milieux forestiers et naturels*. Nogent-sur-Vernisson : La Documentation française.

Suivis annuels d'occupation du sol et de ressources forestières en France

Par Jean-François Dejoux et David Morin, Centre d'études spatiales de la BIOSphère (CESBio)



Des équipes de recherche françaises ont réalisé des premières estimations de biomasse, voire de hauteur, dans un contexte de forêts tropicales et de savanes en utilisant des capteurs satellites déjà existants, (Guyane, Madagascar, Afrique). En métropole, des travaux similaires sont en cours pour cartographier l'occupation des sols et la ressource de biomasse forestière de manière continue.

Les travaux de caractérisation de la végétation par télédétection sont de plus en plus variés, de par la diversité des capteurs disponibles (multispectral, hyperspectral, lidar, radar SAR¹ ou optique, etc...). Cet article présente les travaux qui valorisent les images de télédétection à accès gratuit en métropole, disponibles systématiquement pour l'ensemble du pays et compatibles avec les échelles parcellaires. L'ambition, à terme, est de disposer de méthodes pour caractériser et suivre les couverts forestiers, de manière reproductible chaque année sur tout le territoire, et de manière la plus automatique possible, donc à faible coût.

La télédétection permet une bonne homogénéité de l'information générée. Cependant, la précision des résultats obtenus est variable sur le territoire car elle dépend du taux d'ennuage, qui impacte le nombre d'images satellites optiques exploitables, et des données de référence terrain, qui servent à calibrer et valider les produits. Cependant, un des atouts de ces approches est de quantifier les incertitudes de manière spatialement explicite (pour chaque pixel ou parcelle).

Ces travaux visent une mise à jour annuelle ou continue d'informations spatialisées de manière exhaustive sur tout le territoire, ce qui intéresse vraiment les acteurs et décideurs. Cependant, ces informations annuelles sont pour l'instant, difficilement utilisables pour des comparaisons entre deux années successives et à l'estimation d'un taux de changement. En effet, les taux de précision varient fréquemment de 80 à 95 %, il est donc possible, localement, de cumuler les erreurs de 2 millésimes.

Un point commun majeur des travaux et produits présentés est l'échelle spatiale de production et la restitution des informations. Cela correspond principalement à des pixels de 10 à 20 mètres et à des UMC (Unité minimum de collecte) de 0,01 à 0,1 ha. Ces échelles sont compatibles avec celles des professionnels et gestionnaires de massifs forestiers, qui travaillent à l'échelle des parcelles et des peuplements. Attention, ces produits ont rarement vocation à être utilisés seuls ; il faut plutôt les combiner à des modèles ou à des outils d'aide à la décision ; car comme l'énonce un nouveau dicton : « Le satellite aide, mais ne fait pas tout pour la décision et l'action ! ».

La dynamique Theia

La dynamique de recherche et développement est structurée dans « le pôle de données et de services surfaces continentales » Theia depuis 2012. Theia vise à faciliter l'utilisation des données ou produits issus du spatial par les scientifiques et l'ensemble des acteurs.

Theia a 3 missions et actions principales :

- 1- créer des centres d'expertise scientifique (CES) pour structurer un réseau national de scientifiques et d'utilisateurs autour de diverses thématiques (dont la forêt, l'occupation du sol...);
- 2- mutualiser les efforts sur l'acquisition des données et la production de certains produits ;
- 3- interagir avec les utilisateurs à l'échelle régionale (notion d'ART : Animation régionale Theia).

Le CES forêt identifie 6 sujets de recherche majeurs actuels en lien avec la télédétection. Les 3 premiers concernent les échelles parcellaires » :

¹ Synthetic Aperture Radar ou Radar à synthèse d'ouverture (RSO) en français. Un radar à synthèse d'ouverture est un radar imageur qui effectue un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution en azimut.

1- la caractérisation des changements d'occupation des couverts forestiers (déforestation, dégradation, fragmentation)

illustrée indirectement avec le produit OSO (Occupation des Sols) ;

2- l'estimation des ressources forestières, en particulier en terme de biomasse, illustrée par la thèse de David Morin ;

3- le suivi de la biodiversité, illustré par la thèse de Nicolas Karasiak sur la reconnaissance automatique des essences forestières².

Les 3 points suivants sont basés sur des données satellitaires à basse résolution spatiale (250 mètres, 1 km) ou appliqués de manière très locale ; les approches génériques, qui visent à un suivi systématique dans le temps et sur de larges territoires forestiers, ne sont pas encore disponibles :

4- le suivi de la phénologie foliaire des forêts : un indicateur des changements globaux ;

5- l'évaluation et la gestion des risques environnementaux (stress hydrique, sécheresse, risque incendies...). À noter qu'un CES description des dégâts d'incendies démarre ;

6- le cycle de l'eau et du carbone : estimation des variables biophysiques (indice foliaire...), de l'humidité des sols sous forêts...

En données d'entrée des algorithmes, les données satellitaires sont différentes en fonction des produits et applications. Le *tableau 1* indique les combinaisons de données utilisées pour les quelques exemples de travaux présentés dans cet article. D'autres données spatiales peuvent aussi être utilisées (comme Landsat...), mais elles ont une importance

moindre. Quatre éléments majeurs sont à signaler :

1- les séries temporelles ('Sentinel') sont récentes et ont un rôle clé pour bien caractériser la dynamique de végétation ;

2- les données radar ('SAR') sont particulièrement importantes pour la forêt ;

3- de plus en plus de travaux essaient de valoriser la complémentarité des différents capteurs spatiaux ;

4- la très haute résolution spatiale (métrique) est encore peu utilisée dans le contexte opérationnel, elle apporte cependant parfois une plus-value, en particulier sur les aspects de texture de la végétation.

Estimation et suivi des ressources forestières, en particulier de biomasse

À l'échelle locale (vols aéroportés sur une petite région), de nombreux travaux utilisent des méthodes pour exploiter les données radar et lidar et développer des méthodes de quantification de paramètres forestiers (hauteur, biomasse) et de description de la structure 3D de la végétation, au niveau de l'arbre et du peuplement.

Le *tableau 1* indique 3 types de données radar ('SAR') particulièrement utiles pour le suivi des forêts. Ces 3 capteurs diffèrent de par leur longueur d'onde. La bande C (voir Sentinel-1) a une faible longueur d'onde, d'environ 5,5 cm, tandis que la bande P (voir le futur capteur Biomass) aura une grande longueur d'onde, d'environ 70 cm. Les grandes longueurs d'onde ont pour avantage de mieux pénétrer à l'intérieur de la végétation (feuilles, petites branches) et

Tableau 1 - Caractéristiques des principaux capteurs satellites et combinaison de leur utilisation dans 4 exemples d'applications

	Bandes spectrales ou signal utilisé	Résolution spatiale en mètres	Fréquence temporelle	Couverture	Ex 1 : OSO	Ex 1 bis : coupes	Ex 2 : biomasse, volume,	Ex 3 : distinction essences (cf Karasiak)
Sentinel-2 (ESA - Europe), depuis 2015	Optique (Visible-PIR-MIR)	10 - 20 m	Hebdomadaire	Mondiale	***	**	**	***
Spot-6/7 (CNES - France), depuis 2014	Optique (Visible-PIR)	1,5 - 6 m	Annuelle	France	À venir	Non	**	Non
Sentinel-1 (ESA - Europe), depuis 2014	SAR (bande C) (λ ≅ 5,5 cm)	10 - 20 m	Hebdomadaire	Mondiale	À venir	***	**	Non
ALOS-2 (JAXA - Japon), depuis 2007	SAR (bande L) (λ ≅ 24 cm)	25 m	Annuelle	Mondiale	Non	*	***	Non
Mission BIOMASS (ESA - Europe), > 2022	SAR (bande P) (λ ≅ 70 cm)	200 puis 50 m	Annuelle	Presque mondiale	Marginal	*	***	Marginal

SAR - Synthetic Aperture Radar (Radar à synthèse d'ouverture (RSO) en français) / PIR : Proche Infra-Rouge / MIR : Moyen Infra-rouge.

² Karasiak N., 2019. *La phénologie des arbres : une donnée incontournable pour cartographier nos forêts ?* Forêt-entreprise n° 247, p. 20-24.

donc de mieux réagir avec les grosses structures comme les troncs, ce qui est un atout pour estimer les fortes biomasses des forêts tropicales. Ainsi, à l'échelle mondiale, où l'enjeu est le suivi des stocks de carbone, une nouvelle mission spatiale, conçue par le CESBio, «Biomass» exploitera pour la première fois dans l'espace, à partir de 2020, un capteur radar SAR en bande P, qui fournira des estimations de biomasse forestières, avec des pixels de 200 mètres puis de 50 mètres. Des techniques originales comme le TomoSAR pourraient reconstruire la structure des forêts en 3 dimensions. La bande P permettra d'estimer les biomasses élevées des forêts denses sans effet de saturation. Malheureusement, la majeure partie des pays européens ne profitera pas de ces mesures pour des problèmes de sécurité des radars à usage militaire.

En attendant la mission «BIOMASS», des équipes de Montpellier et Toulouse principalement ont réalisé des estimations de biomasse, voire de hauteur, dans un contexte de forêts tropicales et de savanes en utilisant des capteurs satellites déjà existants (lidar et radar bande L et C en particulier). Différents produits sont téléchargeables sur le site de Theia, par exemple sur la Guyane française avec une résolution de pixels de 1 km. L'estimation de la biomasse sur toute l'Afrique est obtenue pour des pixels de 50 mètres. Aujourd'hui, le signal des bandes L et C sature pour des biomasses supérieures à 100-150 t/ha. Ainsi, la carte sur l'Afrique n'est produite que pour les zones où les valeurs de biomasse sont inférieures à 85 t/ha, les zones de forêts denses sont ainsi masquées.

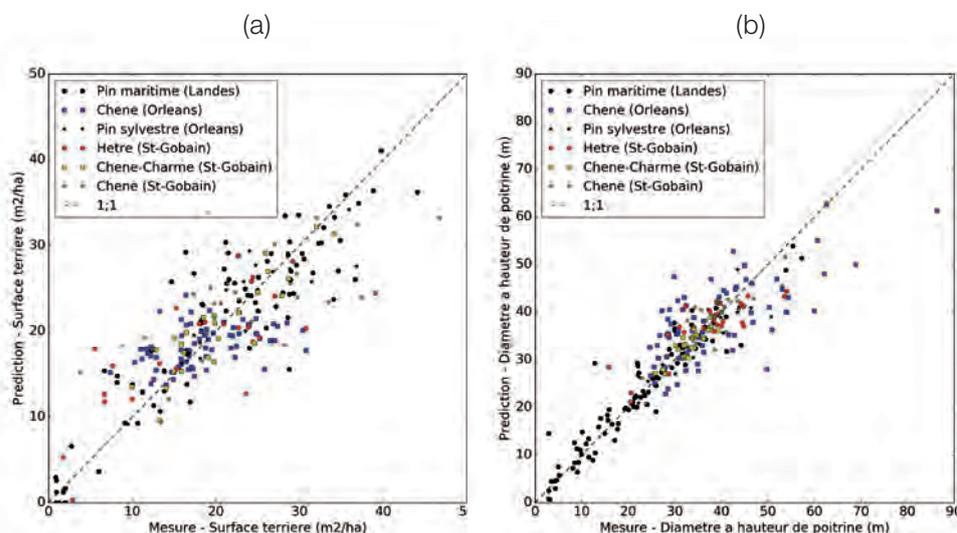
Les forêts tempérées sont beaucoup plus anthropisées et artificialisées que les forêts tropicales, ce qui nécessite d'adapter les équations. Le CNPF-IDF a fortement incité le CESBio à développer des travaux équivalents sur la France métropolitaine, ce qui est réalisé avec la thèse de David Morin (oct. 2016 – oct. 2019) financée par le CNES et l'Ademe³. En métropole, ces travaux s'insèrent dans une dynamique régionale visant à une utilisation accrue de la biomasse renouvelable forestière pour l'industrie ou l'énergie : il s'agit de localiser, quantifier la ressource et suivre sa dynamique.

David Morin développe et évalue une méthode pour l'estimation et la cartographie de variables de structure des forêts : biomasse, surface terrière, diamètre moyen, hauteur, densité d'arbres, âge. Les premiers résultats, obtenus à partir d'une centaine de placettes de référence terrain (source Inra Bordeaux) sur des plantations de pin maritime dans les Landes sont très prometteurs, avec des erreurs de 10 à 25 % selon les variables. Ces résultats sont en cours de confirmation sur des forêts plus complexes avec des mélanges de feuillus et conifères, sur plusieurs centaines d'autres placettes (source ONF). La chaîne de traitement utilise des logiciels *open-source*⁴ et des traitements semi-automatiques ; elle est basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique entre les données de référence (mesurées sur le terrain) et les données satellitaires. La *figure 1* montre la validation de ces estimations pour la surface terrière (*basal area*, *figure 1a*) et le diamètre moyen à 1,30 m (DBH, *figure 1b*) pour différentes essences dominantes dans

³ Centre national d'études spatiales ; Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

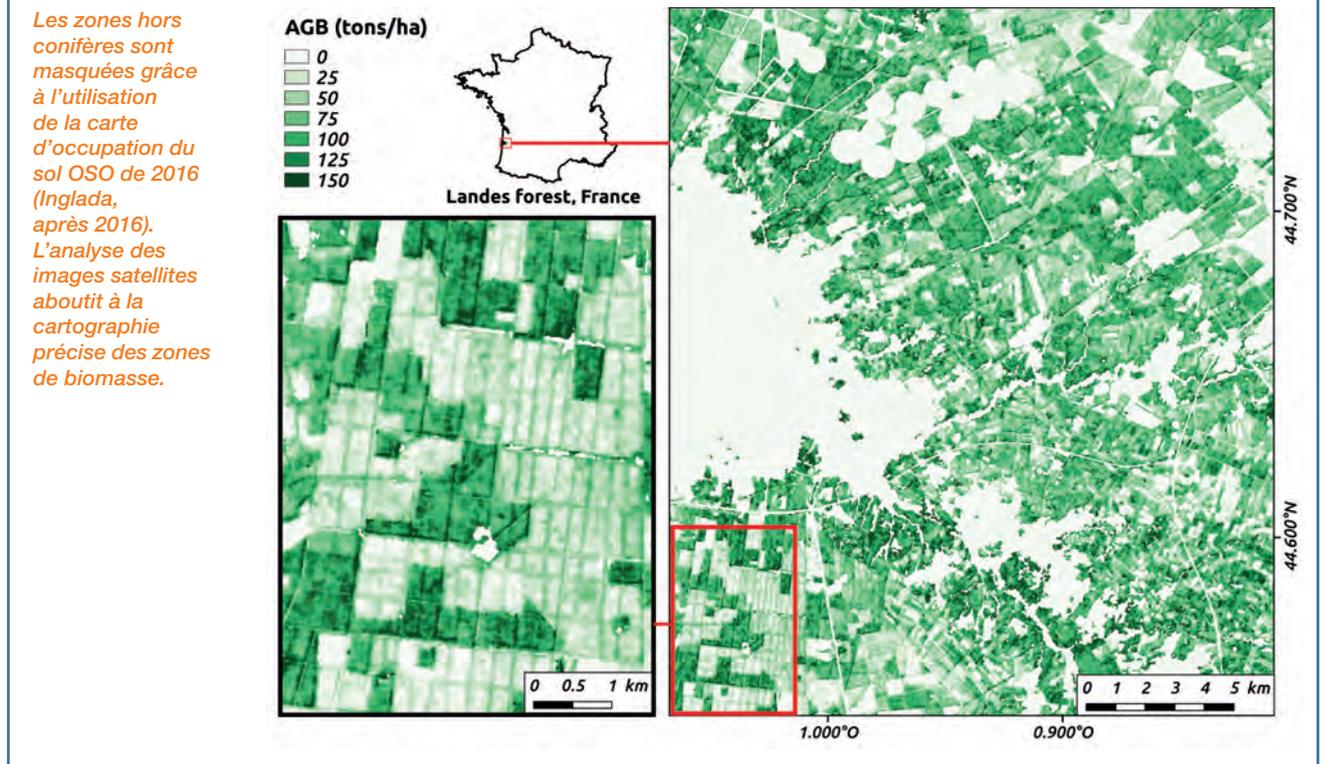
⁴ Logiciel au code en accès libre.

Figure 1 - Validation de la surface terrière (BA : **Basal Area**) (1a) et du diamètre moyen à 1,30 m (DBH) (1b)



Validation de la surface terrière pour différentes essences dominantes des forêts des Landes, d'Orléans et de Saint Gobain (près de Laon). La figure montre que la validation des estimations de la surface terrière ou du diamètre moyen à partir de l'analyse d'images satellites est fiable pour trois forêts étudiées : Landes, Orléans, Saint-Gobain.

Figure 2 - Carte de biomasse aérienne (AGB) dans les Landes



des forêts des Landes, d'Orléans et de Saint-Gobain (près de Laon).

Une fois ces modèles construits et validés, l'objectif est de tester ces outils sur de grands territoires, en dehors des zones de calibration et de validation des modèles. La figure 2 montre un exemple de carte de la biomasse aérienne sur le site d'étude des Landes. Le modèle est appliqué sur les données satellitaires avec un masque « conifères » à partir de la carte Occupation du sol Theia 'OSO' 2016. Sur les autres sites et essences, les résultats montrent que la précision est meilleure lorsqu'on différencie les essences dominantes pour construire les modèles. Toutes sources d'information et cartographique extérieures des différentes essences seront une plus-value, que ce soit des bases de données existantes (BD forêts...) ou obtenues par classification d'images satellites.

Cartographie de l'occupation du sol (OSO)

Le Centre d'Expertise Scientifique «CES Occupation des SOIs – OSO» a pour objectif la définition et le développement d'algorithmes automatiques pour la production de cartes d'occupation des sols à partir d'imagerie satellitaire. Plusieurs millésimes sont déjà produits

sur la France entière, à partir d'images Landsat (2009, 2010, 2011, 2013, 2014) puis d'images Sentinel-2 (2016, 2017 et 2018). Toutes les informations (méthodes de production, accès au téléchargement des données et aux interfaces de visualisations en ligne, statistiques et performances de classification...) sont disponibles dans le blog OSO.

Les cartes produites couvrent pour l'instant la France métropolitaine (Corse incluse), avec une nomenclature de 17 à 23 classes, une résolution spatiale entre 10 m et 20 mètres en mode raster⁵ et une unité minimum de collecte de 0,01 à 0,1 ha en mode vecteur⁶, une fréquence de mise à jour annuelle et enfin, un délai très court de production / mise à disposition ('fraîcheur') : la carte 2018 a ainsi été diffusée fin mars 2019.

Les méthodes utilisées sont, pour l'instant, dites supervisées, ce qui nécessite des données auxiliaires de référence (terrain, apprentissage...) pour l'étalonnage des méthodes (méthodes supervisées) et pour la validation des produits.

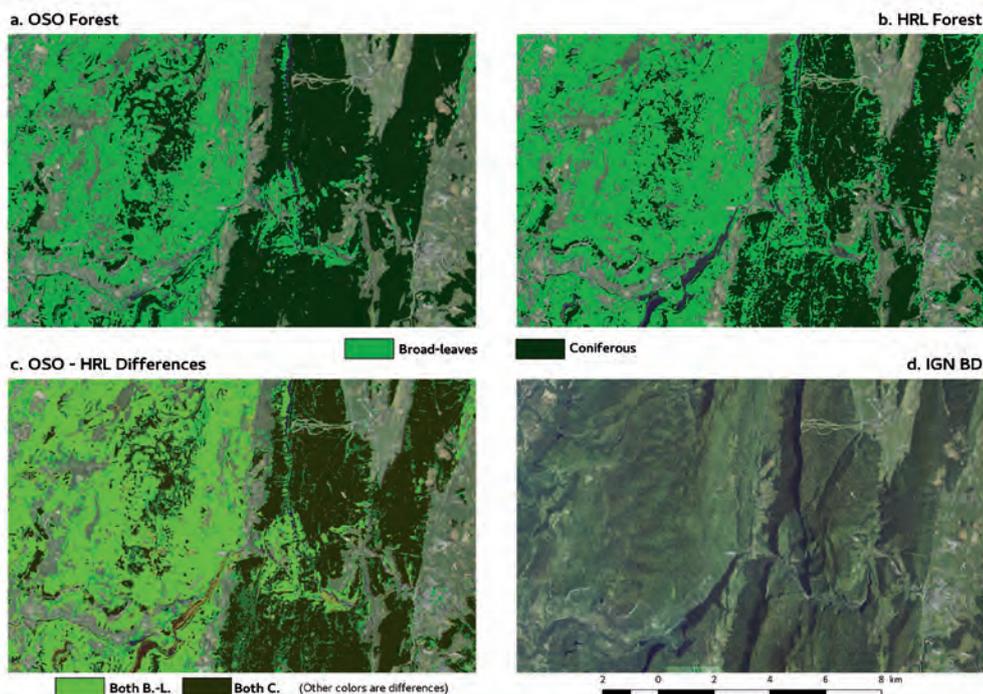
OSO correspond à une couverture biophysique de la surface, ce qui correspond à la notion d'occupation du sol. L'usage des sols peut être déduit dans certains cas, en géné-

⁵ Le mode raster ou maillé représente l'espace selon un maillage régulier appliqué sur la surface terrestre.

⁶ Le mode vecteur ou objet représente des points, lignes (courbes), ou secteurs précis.

Figure 3 - Comparaison du produit OSO 2017 (figure a) et du HRL Forest (figure b), département de l'Ain

Les 2 cartes (a et b) sont très similaires. Cependant, des petits patches de feuillus à l'intérieur de peuplements de conifères sont mieux détectés dans la carte HRL. A contrario, les forêts dans les zones ombragées sont mieux identifiées dans le produit OSO, et la distinction entre vergers et forêts y est meilleure.



Source : Thiériot, Vincent, Inglada « Sentinel-2 time series images analysis : a Rapid and an accurate solution to map large-scale forest cover », ForestSAT, Washington, 2018.

ral par croisement avec d'autres données. De plus, de nombreux indicateurs et analyses peuvent être réalisés par différents métiers (géomatique...) comme des indicateurs de biodiversité...

Les classes concernant les forêts et plus globalement la végétation naturelle et semi-naturelle sont issues d'échantillons de 3 bases de données différentes :

- Registre parcellaire graphique (RPG) pour la classe :
 - prairies permanentes
- Corine Land Cover 2012 pour la classe :
 - pelouses
- BD Topo IGN (couche végétation) pour les classes :
 - forêt fermée de feuillus (qui comprend les chênes verts...),
 - forêt fermée de conifères (qui comprend les mélèzes...),
 - lande ligneuse.

La classe « Forêt fermée mixte » de la BD Topo n'est pas pour l'instant étudiée. La stratégie est plutôt de générer une classe composite (forêt mixte feuillus-résineux...) par combinaison des pixels de classes élémentaires issues des cartes raster d'OSO, sur des objets de taille variée.

Au vu des résultats, sur les 3 millésimes réalisés avec Sentinel-2 de 2016 à 2018, les performances de classification sont bonnes à très bonnes pour les deux classes de forêts fermées (précision et $Fscore^7$ compris entre 0,89 et 0,92 en 2018), comme pour les prairies. En revanche, les pelouses et landes ligneuses ont les performances parmi les plus faibles des 23 classes OSO (0,57 à 0,65) avec des confusions entre ces 2 classes, et avec les 2 classes de forêts fermées. Lorsque l'on essaye de valider ces classes d'OSO avec des données indépendantes ou avec d'autres bases de données (figure 3), on constate que la cause majeure de désaccords est due aux effets de coupes/disparitions de forêts, aux seuils différents sur les forêts ouvertes ou fermées, ou les gradients de fermeture des couverts arborés, qui ne sont pas identifiables avec la même précision selon les méthodes et données utilisées.

Le CES OSO est demandeur de retour d'utilisateurs, tout d'abord pour évaluer le produit OSO. Ensuite, dans la mesure du possible, le produit OSO pourra évoluer et s'enrichir - meilleure définition, reconnaissance sur les images satellites, données de référence pour calibrer les algorithmes, pour répondre aux besoins des utilisateurs forestiers. Parmi les principales pistes en forêt, on peut imaginer :

⁷ Analyse statistique de précision du test.

- la création d'une classe coupes et accidents de forêts – voire jeune forêt (accrus, recrues, plantations...),
- une meilleure définition des seuils entre landes, friches, forêt ouverte et forêt fermée. Pour ces deux points, l'utilisation de données radar et les résultats d'autres CES (CES Cartographie physiognomique de la végétation naturelle, CES Biomasse forestière et changement de couverture forestière) seront très utiles.
- La distinction de certaines essences ou groupe d'essences, comme le peuplier (thèse de Yousra Hamrouni) ou d'autres essences (Thèse de Nicolas Karasiak).

Conclusion et perspectives

La possibilité de caractériser et de suivre de manière annuelle sur de grands territoires différents types de végétations (agriculture, forêts, milieux ouverts semis-naturels...) devient petit à petit une réalité. Beaucoup de recherches et développements restent cependant à faire dans les prochaines années. Les aspects informatiques (stockage des images, développement d'algorithmes, optimisation des calculs...) sont cruciaux. La disponibilité de données de référence de terrain de qualité et très bien géoréférencées constitue aussi

un enjeu majeur pour accélérer ces travaux et permettre de mieux caractériser les niveaux de précision obtenus. Enfin, l'expertise métier des forestiers restera indispensable pour savoir utiliser ces produits issus du spatial. Ainsi, toute action de collaboration et mutualisation des données et des efforts, entre forestiers, télédéTECTEURS et informaticiens, sera des plus bénéfiques pour progresser dans le développement de produits issus du spatial, utiles, à coût raisonnable et avec des précisions qui s'améliorent.

Un des enjeux des prochaines années est la sensibilisation, la vulgarisation et la formation de futurs utilisateurs de données spatiales, et surtout des produits dérivés métiers à valeur ajoutée. À ce titre, on peut souligner l'existence de formation sur la mise en œuvre d'algorithmes de détection des coupes des forêts depuis plusieurs années à la Maison de la télédétection à Montpellier ; le public étant varié (DDT, Draaf...). Par ailleurs, les groupes d'Animation régionale Theia (ART) ont cette mission d'interagir avec les utilisateurs à l'échelle régionale. Ainsi, l'ART Occitanie (antennes de Toulouse et Montpellier) devrait organiser une journée télédétection / forêt orientée vers les utilisateurs pour fin 2019 ou début 2020. ■

À retenir

Le CES Theia OSO produit des cartes d'occupation des sols chaque année depuis 2014 sur l'ensemble de la métropole. Des travaux sont en cours au CESBio pour mettre au point des méthodes d'estimation et de cartographie de variables de structure des forêts (biomasse, surface terrière, diamètre moyen, hauteur, densité, âge) aux échelles parcellaires à partir d'images satellites gratuites. Les premiers tests sur résineux (pins des Landes) et feuillus (près d'Orléans et de Laon) sont encourageants.

Mots-clés : biomasse, occupation du sol, Theia, France, incertitude, cartographie.

Remerciements pour leur contribution ou lecture à Alexandre Bouvet, Gérard Dedieu, Milena Planells, Jordi Inglada, Thuy le Toan, Stéphane Mermoz, Vincent Thiérier du CESBio, Nicolas Karasiak, David Sheeren de Dynafor, Dominique Guyon, Jean-Pierre Wigneron de l'Inra Bordeaux – ISPA et Nicolas Baghdadi, Maison de la télédétection.

En savoir +

Centre d'expertise scientifique (CES) Forêt : www.theia-land.fr/fr/themes/forêt
 Description des dégâts d'incendies : www.theia-land.fr/fr/ces-incendie
 Biomasse en Guyane française : <https://www.theia-land.fr/fr/produits/biomasse-sur-guyane-française>
 Estimation de la biomasse en Afrique : <https://www.theia-land.fr/fr/produits/biomasse-l-afrique>
 Centre d'expertise scientifique «CES Occupation des S0ls – OSO» : www.theia-land.fr/fr/ces-occupation-sols
 Blog OSO : <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>
 Classes d'OSO avec des données indépendantes : www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=11835

Identification et suivi des peupleraies par télédétection hypertemporelle

Par Yousra Hamrouni*, doctorante du Conseil national du peuplier

 15 min

Les estimations actuelles de la ressource française en peuplier comportent une incertitude très peu satisfaisante pour la filière. Les images fournies par les satellites demandent une interprétation souvent complexe. Néanmoins, une 1^{ère} étude centrée sur le Tarn et Garonne s'avère encourageante.

* yousra.hamrouni@inra.fr

Les récentes évolutions de la télédétection par satellite devraient permettre de résoudre une difficulté récurrente en France : l'évaluation précise des surfaces en peuplier. Cette précision est un élément essentiel pour le développement de la filière d'une essence à croissance rapide comme le peuplier.

Quelle surface de peupleraies en France ?

Le peuplier est la deuxième essence de feuillus plantée en France, après le chêne sessile, et c'est l'un des arbres dont le cycle de production est le plus rapide avec une durée moyenne de 15 à 20 ans. La question, qui se pose avec une telle essence à rotation courte, est de connaître la surface nationale occupée, sa répartition géographique et son évolution d'une année à l'autre.

En France, trois principales sources d'information existent : la BD FORÊT® de l'IGN, l'inventaire forestier national et le cadastre.

La BD FORÊT®IGN est une base de données géographique nationale des principales essences forestières, mise à jour tous les 5 à 10 ans. Elle est obtenue par une interprétation visuelle de photographies aériennes et éditée par département 2 à 6 ans après l'acquisition de ces photographies. Depuis fin 2018, tout le territoire métropolitain est couvert par la version la plus récente (V2) de la BD FORÊT®IGN (figure 1). Selon cette base de données, la surface des peupleraies est de 206 751 ha (2018).

La deuxième source d'information est l'inventaire forestier national qui est également fournie par l'IGN, mais établie avec une approche statistique. Elle consiste à visiter environ 15 000 points par an tirés au hasard dans une grille d'échantillonnage à maille carrée de 1 km de côté. Cette méthode d'inventaire s'avère

peu adaptée aux peupleraies du fait de leur répartition territoriale particulière (proche des cours d'eau). L'inventaire statistique estime la surface des peupleraies à 159 000 ha \pm 18 000 (2019).

La troisième source d'information est le cadastre, qui est basé sur des informations déclaratives plus ou moins mises à jour, comme le montre la figure 2 (bois peuplier qui sont des vergers ou des champs agricoles ou des peupleraies non déclarées en bois peuplier). La surface cadastrale nationale déclarée en peuplier est de **233 985 ha** (2016).

Ces trois sources d'information ne satisfont pas les besoins des acteurs de la filière en raison, soit d'une marge d'erreur importante, soit d'une durée d'acquisition trop longue, soit d'une mise à jour difficile.

Figure 1 - Carte des années d'édition de la BD FORÊT®IGN par département (Version 2)

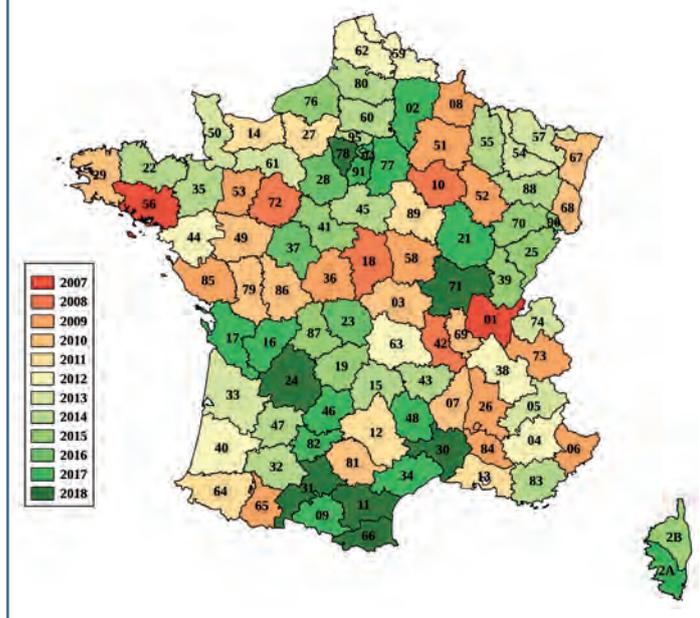
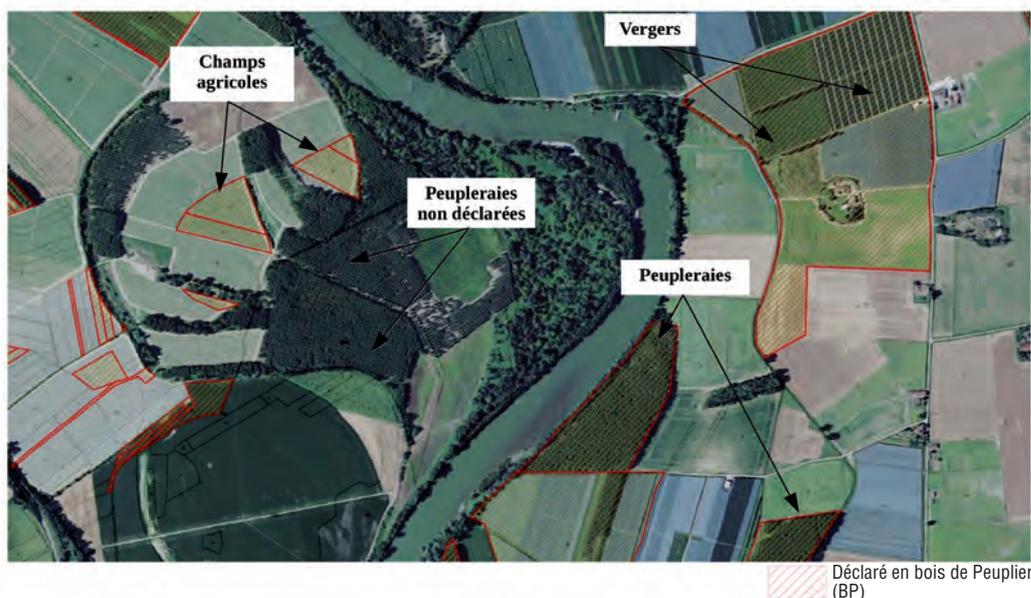


Figure 2 - Superposition du cadastre sur photo aérienne



La superposition du cadastre sur une photo aérienne montre quelques différences notables.

Source : BD ORTHO © IGN + Cadastre 2013

Copernicus : une révolution dans le domaine de la télédétection

Parallèlement au besoin des acteurs d'avoir une information précise et un suivi régulier de la ressource, l'Agence spatiale européenne (ESA) a mis en place une constellation de satellites - les Sentinel - dans le cadre du programme Copernicus (*Global Monitoring for Environment and Security*), avec notamment deux missions Sentinel-1 et Sentinel-2 dédiées à l'observation de la terre. Sentinel-2 consiste en deux satellites jumeaux : Sentinel-2A mis en orbite en juin 2015 et Sentinel-2B lancé en mars 2017.

Les deux satellites Sentinel-2 embarquent chacun un ensemble de capteurs optiques

passifs : ils ne génèrent pas de rayonnement, mais ils mesurent l'énergie solaire réfléchi par les objets situés en surface de la terre.

Ces capteurs acquièrent l'information dans dix longueurs d'onde (**bandes spectrales**) différentes allant du domaine du visible jusqu'au moyen infrarouge. À chaque passage du satellite, dix images sont générées (*figure 3 et 4*) correspondant aux dix bandes spectrales (en réalité, l'acquisition se fait dans 13 fenêtres du spectre, mais 3 d'entre elles ne sont pas exploitées pour les applications qui nous concernent).

En fonction de ses propriétés intrinsèques, chaque objet observé (champ, forêt, arbres, cours d'eau...) a un comportement défini dans

Figure 3 - Image Sentinel-2 en infrarouge fausses couleurs du 15/02/2019



Figure 4 - Image Sentinel-2 en vraies couleurs du 15/02/2019



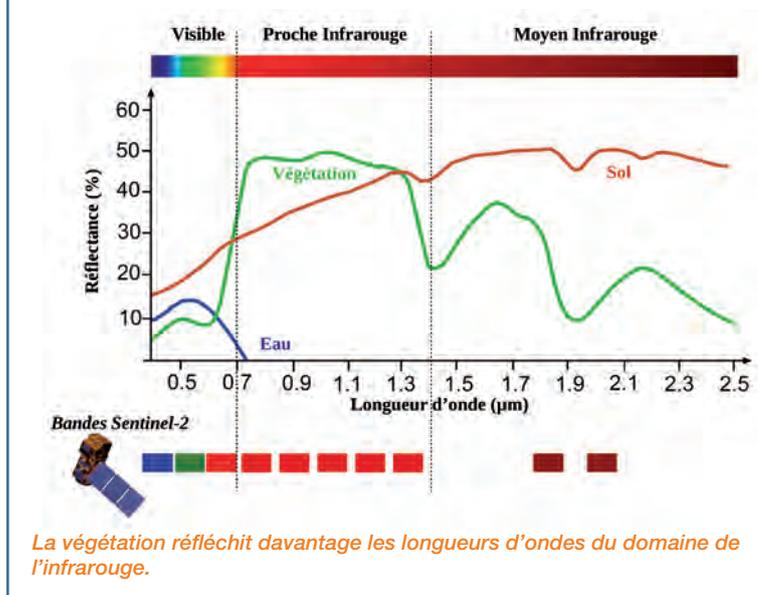
Source : Données Copernicus Sentinel-2 [2019] traitées au niveau 2A par le CNES pour le centre de données THEIA

chacune des 10 bandes de longueurs d'onde acquise. On parle ainsi de *signature spectrale* (figure 5), qui est la carte d'identité de l'objet et qui permet de l'identifier dans les images satellites. Plus le satellite a de bandes spectrales, plus l'information est riche et facilite la différenciation des objets entre eux. L'inconvénient des données Sentinel-2 et des capteurs passifs en général est leur dépendance face au rayonnement solaire. Sous un ciel couvert et selon le taux de couverture nuageuse, le rayonnement réfléchi peut être bloqué par les nuages et l'image acquise est plus au moins exploitable. La fréquence de passage des satellites Sentinel-2 peut compenser la présence de nuages et permet d'assurer un suivi régulier (figure 6).

Les satellites Sentinel-1 (Sentinel-1A et Sentinel-1B) sont des satellites radar actifs, ils envoient un rayonnement à la surface de la terre et mesurent ensuite le rayonnement rétrodiffusé. Leur fonctionnement est par conséquent indépendant du soleil et peu affecté par les conditions climatiques. Comme tous les radars satellitaires, les Sentinel-1 opèrent dans une seule longueur d'onde : la bande C centrée sur 5,6 cm. L'information radar mesurée dépend de la rugosité de surface des objets, du contenu en eau et également de la structure de la cible observée.

La période de revisite des satellites Sentinel sur la même zone est révolutionnaire : elle est de 5 et 6 jours respectivement pour Sentinel-2 et Sentinel-1. Autrement dit, pour un même endroit, une image est acquise tous les 5 ou 6 jours et on parle ainsi de données hypertemporelles étant donné la fréquence d'acquisition très élevée. Cette très haute répétitivité temporelle permet d'assurer un suivi régulier et quasi en temps réel.

Figure 5 - Signature spectrale de la végétation, de l'eau et du sol nu dans le domaine optique



Une autre caractéristique des données Sentinel est leur haute résolution spatiale. L'information est fournie au sein de pixels carrés de 10 ou 20 m de côté (selon la longueur d'onde), ce qui correspond à un haut niveau de détail spatial. Les données Sentinel sont mises à disposition gratuitement par l'Agence spatiale européenne. Des plateformes nationales comme Theia* assurent la distribution et le prétraitement des images. C'est dans ce nouveau contexte que les capacités de la télédétection satellitaire sont questionnées pour évaluer leur pertinence pour le suivi des peupleraies françaises.

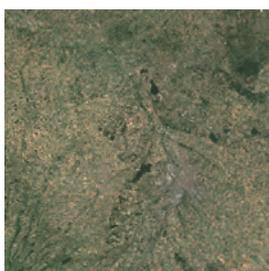
Une thèse multi partenariale pour la filière peuplier

Ce travail fait l'objet d'une thèse en contrat CIFRE¹ d'une durée de trois ans (2017-2020),

¹ Convention industrielle de formation par la recherche

Figure 6 - Acquisitions Sentinel-2 à différents taux de nuage

La fréquence de passage des satellites Sentinel-2 peut compenser la présence de nuages et permet d'assurer un suivi régulier.



a) Image Sentinel-2 du 25/07/2018 : 0 % nuages



b) Image Sentinel-2 du 26/04/2018 : 54 % nuages



c) Image Sentinel-2 du 07/12/2017 : 86 % nuages

Source : Données Copernicus Sentinel-2 [2018] traitées au niveau 2A par le CNES pour le centre de données THEIA

² Laboratoire de DYNamiques et écologie des paysages AgriFORestiers, unité mixte de recherche Inra / Toulouse INP

encadrée par l'UMR Dynafor² et le Centre national de la propriété forestière, et portée par le Conseil national du peuplier. Elle est financée par plusieurs partenaires : le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, l'Association nationale de la recherche et de la technologie, le Comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois (Codifab), les conseils régionaux Nouvelle-Aquitaine et Grand-Est, France Bois Forêt, Alliance Forêt Bois, conseil départemental de Lot et Garonne et Garnica Plywood. L'originalité de ce projet est double : elle est d'abord professionnelle, car c'est une demande issue de la filière peuplier, réalisée avec l'aide de la filière et pour répondre à leurs besoins. La deuxième est scientifique et réside dans la définition d'une méthodologie pour combiner l'information spectrale, temporelle et spatiale des données Sentinel avec une évaluation de cette méthodologie.

L'objectif principal de la thèse est ainsi de développer une démarche méthodologique et un outil opérationnel pour :

- reconnaître les peupleraies par traitement de séries temporelles d'images satellites et d'estimer annuellement leur surface,
- distinguer les classes d'âge (3 stades) et d'identifier les coupes,
- discriminer des groupes de cultivars en fonction de leur phénologie.

La mise au point de cette méthodologie doit aboutir, à terme, à la production annuelle d'une couche cartographique des peupleraies sur le territoire national, via le Centre d'expertise scientifique Theia « Occupation du Sol »³.

³ Dejoux J.-F., 2019. Suivis annuels d'occupation des sols et ressources forestières. Forêt-entreprise n° 247, p. 25-30.

L'oeil de Sentinel sur les peupleraies

L'apport des données Sentinel est évalué pour l'identification et la caractérisation des peupleraies à large échelle en exploitant toute l'information temporelle, spatiale et spectrale disponible. Pour ce travail, trois grands bassins populi-coles ont été identifiés dans la vallée de la Garonne, la région Grand Est et la région Centre, ce qui correspond à cinq tuiles Sentinel-2 (carrés de 100km*100km) (figure 7).

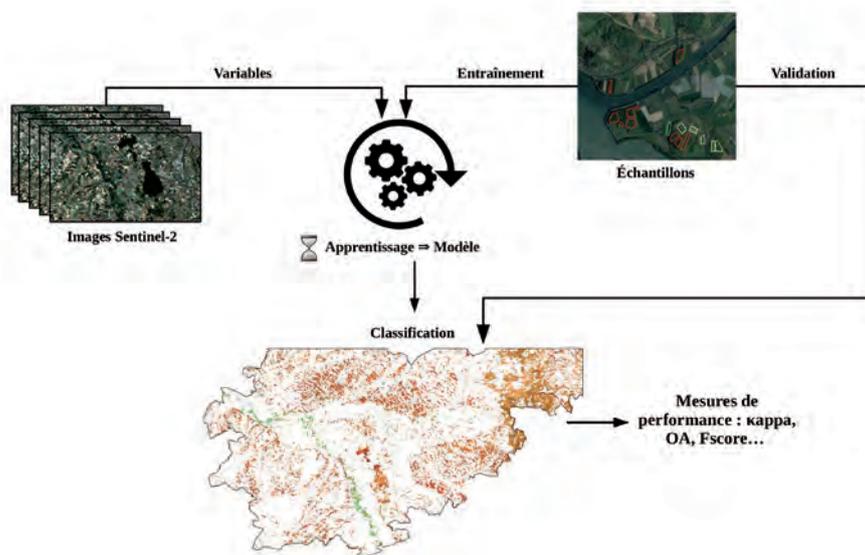
Ces sites retenus couvrent la variabilité nationale en termes de modes de gestion sylvicole.

Figure 7 - Emprise des 5 tuiles Sentinel-2 sur les 3 principaux sites d'étude : Grand-Est, Centre et Sud-Ouest



Source : GEOFLA® IGN

Figure 8 - Schéma méthodologique pour la cartographie des peupleraies à partir des données Sentinel-2



Pour la cartographie des peupleraies, la méthodologie adoptée consiste à faire de la classification supervisée (figure 8). Il s'agit de partir d'un jeu de données d'entraînement préalablement renseigné avec les différentes classes de feuillus à identifier, dont les peupleraies (50 % des références disponibles en général), de le caractériser avec des variables extraites des images satellites et d'entraîner ensuite un modèle de classification.

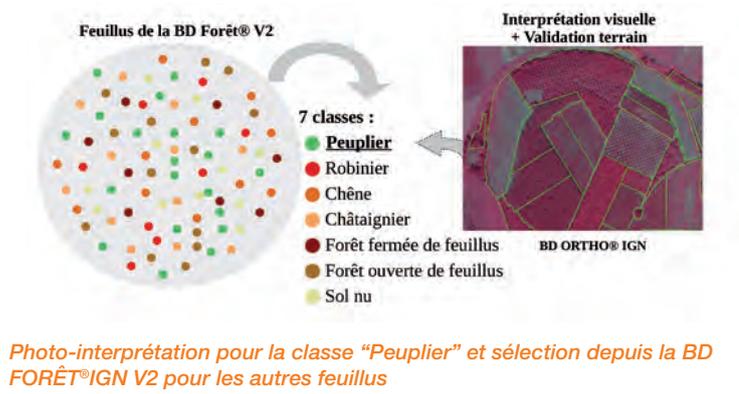
Les échantillons de référence pour la classe peuplier ont été créés par interprétation visuelle des photographies aériennes BD ORTHO®IGN. Ils ont ensuite fait l'objet d'une validation terrain. Six autres classes de feuillus ont été échantillonnées à partir de la version 2 de la BD FORÊT®IGN : robinier, chêne, châtaignier, forêt fermée de feuillus, forêt ouverte de feuillus et sol nu (figure 9).

Le modèle est d'abord calé à partir d'un jeu de données d'entraînement, puis il est ensuite appliqué à l'ensemble de la zone d'étude en attribuant à chaque pixel (de 10 m de côté) une valeur de classe de feuillus, par prédiction, avec un niveau de confiance associé. Les performances de la prédiction sont évaluées sur un jeu de données de validation indépendant (50 % des pixels restants), n'ayant pas servi dans la phase d'apprentissage du modèle.

Quelques résultats

La classification avec les images Sentinel-2 de 2016 sur la tuile du Sud-ouest centrée sur le

Figure 9 - Création du jeu de données d'entraînement



département du Tarn-et-Garonne a donné une précision globale moyenne de 81 % pour les sept classes de feuillus (figure 10).

Afin de mieux évaluer et traduire la qualité de la classification réalisée, une matrice de confusion est calculée sur le jeu de données de validation (figure 11).

Les lignes représentent les classes initiales « réelles » et les colonnes traduisent les classes prédites par le modèle.

Dans l'exemple suivant, horizontalement, et sur tous les échantillons de peuplier (1 000 pixels au total), 96,6 % ont été correctement classés en peuplier contre 0,2 % faussement prédits comme étant du robinier, 1,9 % du chêne et 1,3 % affectés à la classe forêt fermée de feuillus. Un extrait du résultat cartographique (figure 12) d'une peupleraie suivie au bord de la Garonne (département du Tarn-et-Garonne) montre que

Figure 10 - Résultat cartographique sur le département du Tarn-Garonne à partir des images Sentinel-2 de 2016

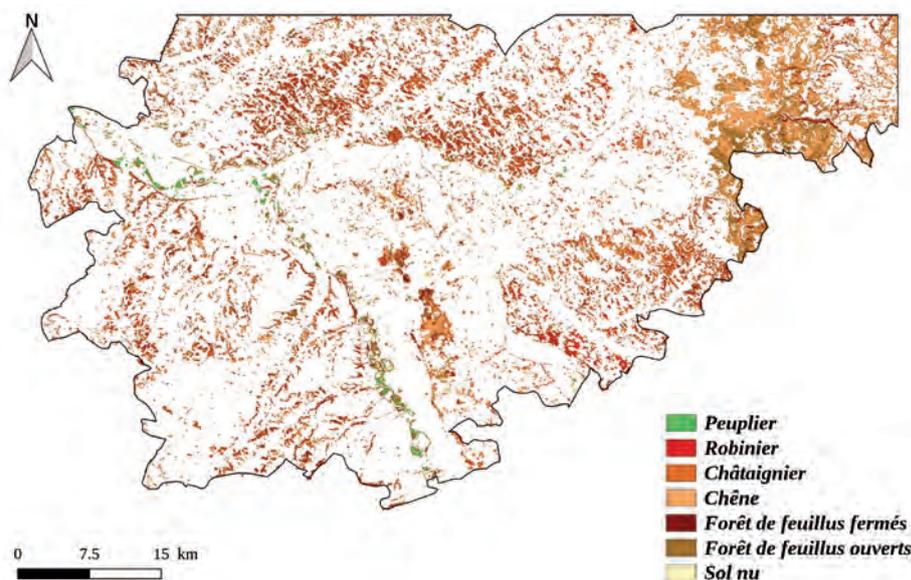
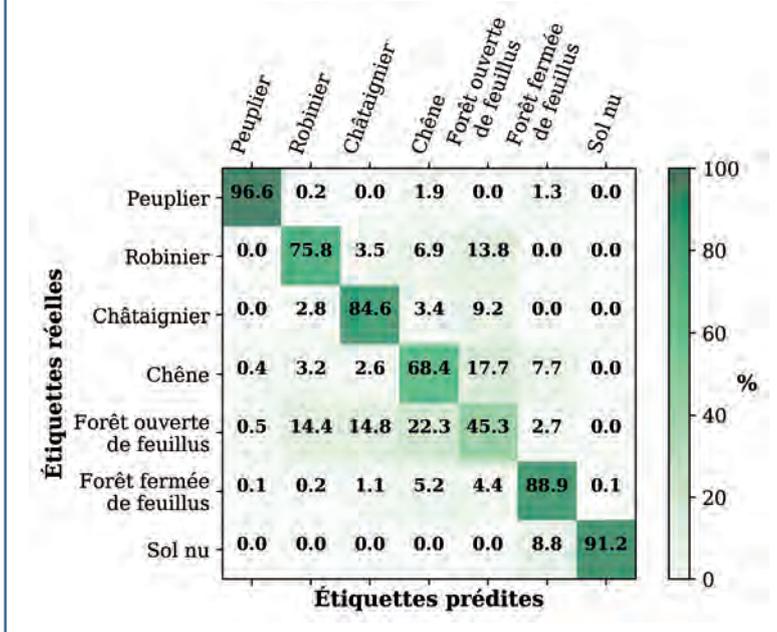


Figure 11- Matrice de confusion



les plantations les mieux identifiées sont surtout celles ayant atteint un certain âge (> 5 ans).

Les très jeunes plantations peuvent être confondues avec la classe *Forêt ouverte de*

À retenir

À la demande de la filière peuplier, la surface en peupleraie est estimée par une méthode de traitement de séries temporelles d'images satellites est développée sur trois bassins populi-coles français. L'objectif est de distinguer annuellement les peupleraies, 3 classes d'âge, les coupes rases, et enfin de discriminer des groupes de cultivars en fonction de la phénologie.
Mots-clés : télédétection, peupleraie, cartographie.

feuillus ainsi qu'avec la classe *Sol nu*. Ceci peut s'expliquer par la faible biomasse et le taux important d'ouverture des jeunes peupleraies laissant entrevoir le sol en dessous. D'autres cas de confusions avec du sol nu traduisent certaines coupes de l'année.

Dans des peupleraies mal entretenues voire abandonnées, la présence d'un sous-étage bas et surtout arborescent peut porter à confusion avec la classe *Forêt fermée de feuillus*. Ceci est dû à l'hétérogénéité dans le signal enregistré par satellite qui n'est pas que celui du peuplier, mais également celui de la végétation sous-jacente.

Malgré les limites évoquées, la prédiction obtenue s'avère très performante et laisse entrevoir la possibilité d'appliquer la méthode sur de larges étendues.

Quelle suite ?

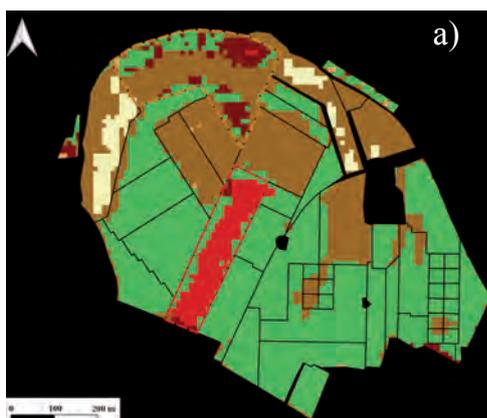
La suite consiste à adapter la méthode de classification sur les autres sites d'études et de la généraliser afin de permettre ensuite un transfert à l'échelle nationale.

Dans un deuxième temps, il s'agira d'exploiter les données radar de la mission Sentinel-1, sensibles à la structure de la végétation, afin de distinguer les trois classes d'âge des peupleraies identifiées et d'identifier des changements (coupes).

L'exploitation de l'information temporelle des images Sentinel-2 / Sentinel-1 est également prévue pour séparer les groupes de cultivars (précoce, tardif...) qui ont un décalage phénologique pouvant aller de quelques jours à quelques semaines. ■

Figure 12 - Extrait cartographique

a) extrait cartographique et b) extrait de la BD ORTHO®IGN correspondant à l'emprise de a)



Les peupleraies de + de 5 ans sont plus facilement identifiables.



Quaspare : qualification spatialisée de la ressource en pin maritime dans le massif des Landes de Gascogne

Par Loïc Commagnac et Fabienne Benest, IGN* – Département écosystèmes forestiers



10 min

* Institut national de l'information géographique et forestière

L'IGN développe de nouvelles techniques pour rapprocher l'évaluation de la ressource de l'échelle de la gestion. Première application avec le pin maritime en Nouvelle-Aquitaine.

L'IGN produit, dans le cadre de sa mission d'inventaire forestier national, une évaluation régulièrement actualisée de la ressource forestière et de sa dynamique (accroissement, mortalité, prélèvements) à l'échelle nationale, régionale et par sylvoécocorégion. Le massif des Landes de Gascogne, majoritairement constitué de futaies régulières de pin maritime, correspond pratiquement à une unique sylvoécocorégion. Les calculs statistiques classiques permettent de produire des résultats pour ce massif divisé en cinq sous-entités géographiques, mais une division plus fine rend les estimations réalisées trop imprécises. Or, il existait depuis plusieurs années un souhait des acteurs de la filière sur ce territoire de disposer d'une « spatialisation » de la ressource décrite par l'inventaire forestier, une description cartographique de la situation des différents types de peuplements en fonction de leur âge ou de leur capital sur pied, et notamment une localisation des peuplements les plus âgés, actuellement minoritaires dans un massif, qui a été parcouru par deux tempêtes lors des vingt dernières années.

Porté par le Syndicat des sylviculteurs du Sud-ouest (Sysso) et co-financé par le fonds stratégique forêt-bois, le projet Quaspare vise à produire, à partir des données de terrain de l'inventaire forestier national et de données auxiliaires, une cartographie de la ressource en place.

Les données sources utilisées et la méthodologie mise en œuvre

La méthode mise au point pour la spatialisation de la ressource en pin maritime s'appuie sur la production d'un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC).

Ce modèle est calculé à partir d'un modèle numérique de surface (MNS) (voir encadré p. 38), description continue du « sur-sol », c'est-à-dire le sommet de la canopée en forêt, obtenu par corrélation automatique des prises de vues aériennes à axe vertical réalisées par l'IGN en 2015 dans le massif des Landes de Gascogne. L'IGN a en effet développé et mis en place, à partir de 2015, une chaîne de production systématique de ces MNS après les missions aériennes classiques (résolution 25 cm) réalisées en moyenne tous les trois ans dans chaque département. Pour le projet Quaspare, le calcul des MNS utilisés a été optimisé pour une meilleure description du couvert forestier.

Le modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) est ensuite calculé en soustrayant au MNS un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution métrique obtenu par l'utilisation d'un lidar aérien (figure 4). Le MNHC est une représentation continue de la hauteur des peuplements. Il a été ici circonscrit aux futaies de pin maritime de plus de cinq ans, à l'aide de l'information sur les peuplements extraite de la BD Forêt (orthophotographie de référence 2009) produite par l'IGN réactualisée grâce aux données de l'observatoire de la reconstitution. Cet observatoire géré par le GIP ATGeRi a été constitué à la suite de la tempête Klaus de 2009 et recense les opérations de nettoyage et de replantation des parcelles. Le MNHC ainsi obtenu est une donnée complexe, qui témoigne de toute l'irrégularité de la canopée forestière. Sa résolution est fine : issu d'orthophotographies à 25 cm de résolution, il est constitué de pixels élémentaires de 50 cm de côté.

À partir des caractéristiques du MNHC, des indicateurs sont calculés sur des carrés de

Calcul d'un modèle numérique de surface par photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique qui repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité.

Une image constitue un enregistrement plan et déformé de l'environnement. Seule, elle ne permet pas d'obtenir les trois dimensions de l'espace. Pour reconstruire notre environnement en 3D, il faut deux images (au minimum...) prises

de deux points de vue différents et procéder par intersection. Ce principe est analogue au fonctionnement de notre système visuel qui nous permet d'appréhender notre environnement en relief, par nos deux yeux : c'est la stéréovision (*figure 1 et figure 2*). Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine (dont les points de vue sont parallèles mais décalés dans l'espace) forment un couple stéréoscopique qui permet de retrouver la sensation de relief par stéréoscopie (*figure 3*).

Figure 1 - Un œil seul ne peut déterminer où se trouve la maison. Avec deux yeux, les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue

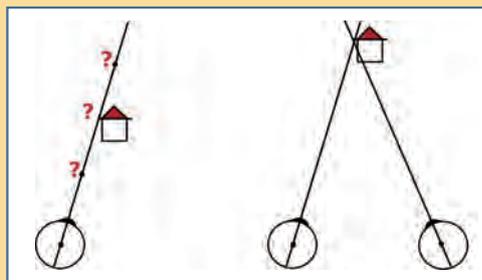
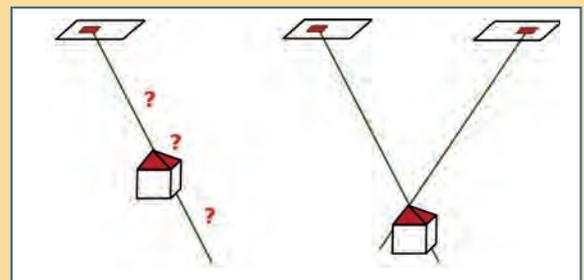
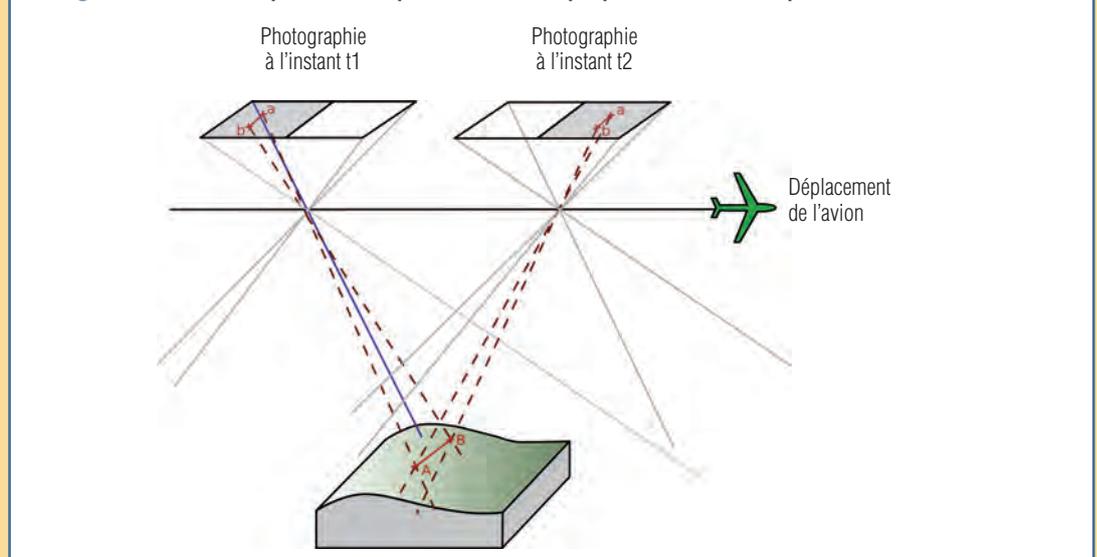


Figure 2 - Avec une seule image, on ne peut déterminer où se trouve la maison. Avec deux images (= un couple), les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue



Ce principe est appliqué aux prises de vues aériennes comme illustré dans la figure suivante :

Figure 3 - Principe du couple stéréoscopique lors d'une prise de vue aérienne



* <http://cours-fad-public.ensg.eu/mod/imscp/view.php?id=494>

Extrait du cours de Laure Chandelier, Département Imagerie Aérienne et Spatiale, École Nationale des Sciences Géographiques, 2011.*

30 m x 30 m, notamment la moyenne et l'écart-type des hauteurs des pixels élémentaires. Les placettes de terrain de l'inventaire forestier, dont les arbres ont été mesurés au vertex, sont positionnées précisément. Les indicateurs issus du MNHC sont mis en relation avec les mesures dendrométriques réalisées au même endroit. C'est le volume aérien total, calculé par l'inventaire forestier, qui a été retenu pour être mis en relation avec les indicateurs issus du MNHC. En effet, ce dernier semble un meilleur indicateur de la biomasse totale, que le volume commercial bois fort tige habituellement calculé par l'inventaire forestier.

Un modèle a été établi entre les variables issues du MNHC et le volume aérien total sur les placettes d'inventaire. Dans la pratique, plusieurs modèles sont construits avec différents sous-échantillons de placettes d'inventaire ; les placettes non utilisées pour construire un modèle donné sont ensuite utilisées pour la validation (validation croisée). Le modèle permet de prédire le volume de façon continue sur chaque carré de 30 m x 30 m à partir du MNHC avec une qualité de prédiction supérieure à 70 %.

Les résultats obtenus

La variable issue du MNHC la mieux corrélée au volume aérien total local est la hauteur moyenne des pixels élémentaires, pixels au sol inclus. Cette moyenne témoigne non seulement de la hauteur totale des peuplements, mais aussi de leur caractère plus ou moins ouvert, situation fréquente des peuplements « mités » parcourus par la tempête et laissés en place, car affectés à moins de 50 %.

Une carte de cet indice pour des pixels de 30 m x 30 m a été produite sur l'ensemble de la zone d'étude qui permet de situer géographiquement les zones où le capital sur pied reste important et celles constituées de jeunes peuplements (figure 5).

À partir des variables ainsi prédites, il a été possible de **calculer un volume total par territoire communal** et un **volume aérien total à l'hectare moyen pour chaque commune du massif**. Ces résultats en volume, regroupés par entités géographiques plus vastes, sont cohérents avec les calculs statistiques issus des campagnes de l'inventaire forestier national proches de la date de prise de vue (2014-2016).

Figure 4 - La différence entre le modèle numérique de surface et le modèle numérique de terrain permet d'obtenir le modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) qui décrit la hauteur des arbres.



Cela nécessite des traitements et calculs pour être rendu intelligible et utilisable.

Figure 5 - Moyenne des pixels élémentaires du MNHC, pixels au sol inclus, par carré de 30 mètres de côté dans le massif des Landes de Gascogne en 2015

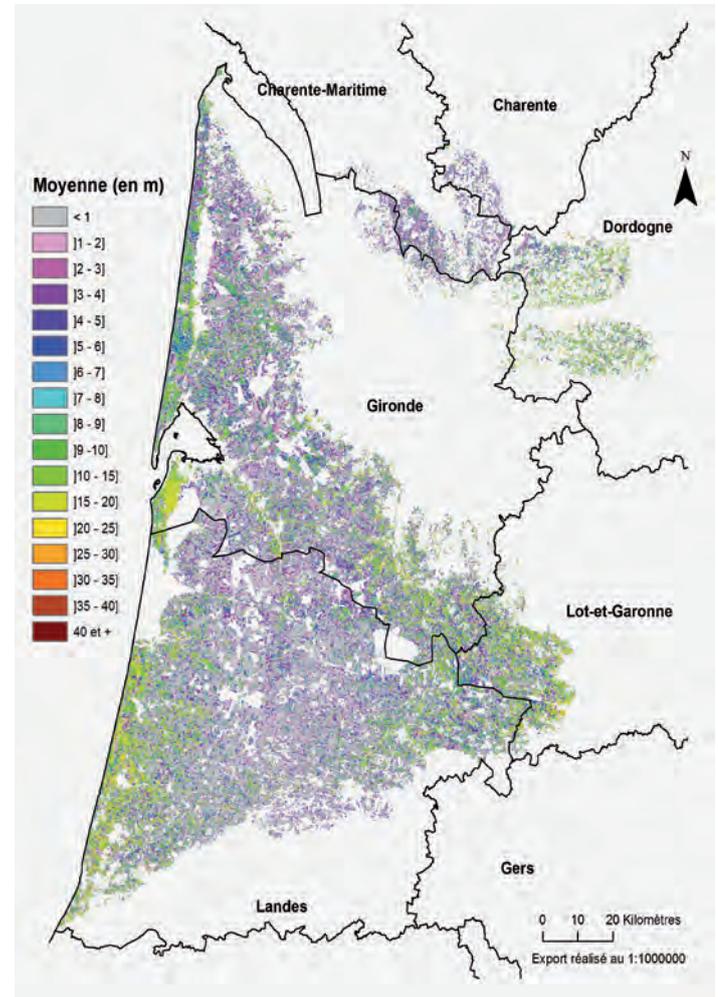
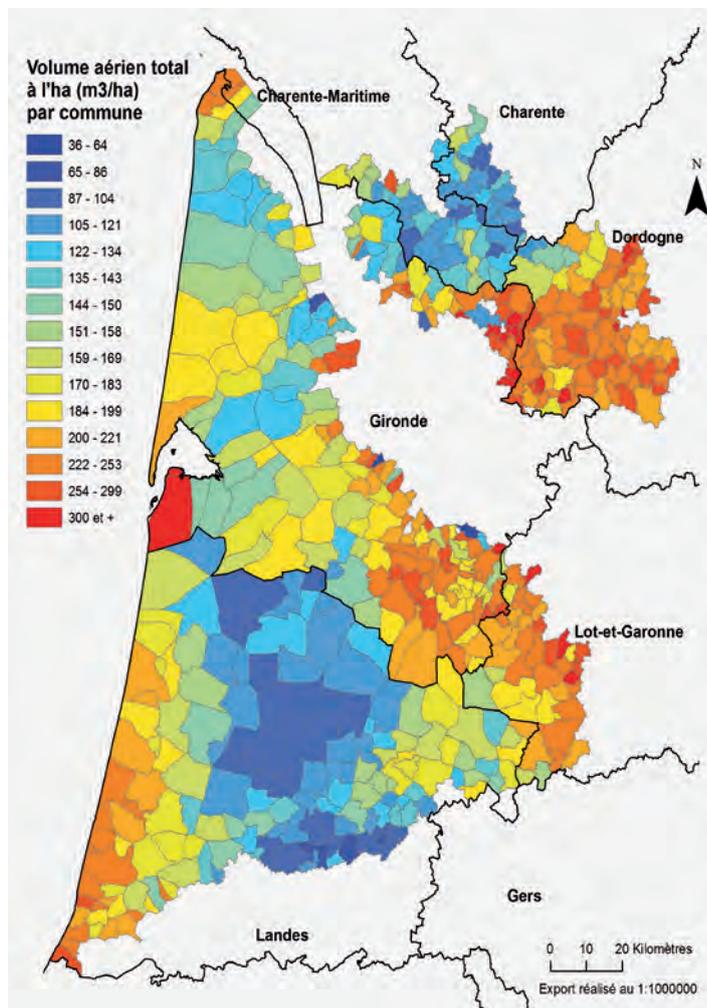


Figure 6 - Volume aérien total estimé des pins maritimes, par commune, dans le massif des Landes de Gascogne en 2015



Ces cartographies permettent de **situer géographiquement la ressource en place**. La carte de l'indice de volume à l'échelle locale (figure 6) pourra être croisée avec d'autres informations géographiques sur la situation des forêts, leur desserte, leur parcellaire, etc.

Perspectives

Cette méthode, mise en œuvre pour la première fois en France à une aussi large échelle, permet d'obtenir une information cartographique continue sur la ressource en place grâce à des techniques assez peu coûteuses, car elles ne nécessitent pas de survol spécifique. Les orthophotographies sont produites très régulièrement par l'IGN dans le cadre de ses missions de service public et peuvent donc permettre une réactualisation des prédictions de volume en fonction de l'évolution des peuplements, mais aussi une détection

très précise des coupes rases par comparaison de MNHC. Une seconde livraison de la cartographie de la ressource et des volumes par hectare par territoire communal est déjà prévue en 2019 à partir des photographies aériennes réalisées pendant l'été 2018 sur les Landes de Gascogne.

Cette approche a été mise en œuvre ici sur des futaies régulières monospécifiques. Le cas de peuplements plus complexes car plus mélangés a été introduit sur une zone géographique proche des Landes de Gascogne, où existe également une ressource en pin maritime (massif de la Double en Charente Maritime et Dordogne). Pour une extension à des peuplements feuillus mélangés, ou en secteur de montagne, d'autres investigations seraient nécessaires. Mais, cette méthode se prêterait déjà à l'identique à d'autres situations du même type : douglasiaies du Limousin et du Morvan, peuplements résineux en Bretagne, etc.

Ce travail a été permis par la disponibilité d'un modèle numérique de terrain de très bonne qualité issu de lidar aérien réalisé par l'IGN. Ce type d'information, dont l'acquisition est coûteuse, n'est pas disponible actuellement sur l'ensemble de la forêt française. Il est à souhaiter que l'extension géographique des MNT de nouvelle génération se développe dans l'avenir.

Pour aller plus loin et ventiler les volumes prédits à l'échelle communale par grand type de peuplement selon la catégorie majoritaire de dimension des arbres, il serait nécessaire d'introduire la notion de classe de fertilité et donc la connaissance de la répartition des surfaces par grand type de station. Une valorisation des relevés floristiques de l'inventaire forestier national est envisagée dans ce sens. Une classification semi-automatique des relevés floristiques en grands types de landes a été mise au point, qui pourra permettre de quantifier la fréquence des différents types de stations selon les différents secteurs du massif.

Le Syndicat des sylviculteurs du Sud-ouest, commanditaire de ce travail, souhaite l'utiliser pour une meilleure valorisation de la ressource disponible. Régulièrement mise à jour, cette évaluation spatialisée de la ressource constitue un élément essentiel de connaissance et de suivi du massif, dont les usages potentiels sont multiples. ■

Détection automatique de coupes rases

 13 min

Par Kenji Ose et Rémi Cresson, Irstea¹

¹ Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

Détecter automatiquement les coupes rases en analysant les images satellites est désormais possible. Cette méthode, mise au point par Irstea, compare l'évolution de l'occupation des sols à différentes dates. Les contrôles sur le terrain seront ainsi mieux optimisés et ciblés.

La coupe rase est une pratique sylvicole, qui consiste à couper tous les arbres d'une parcelle forestière. Réglementée par le Code forestier et dans une moindre mesure par le code de l'Urbanisme, elle est soumise à certaines obligations d'autorisation ainsi qu'à des mesures de reconstitution après coupe. Des sanctions sont applicables en cas de coupes dites illicites ou abusives, et également en cas d'absence de restauration. Dans ce cadre, les services de l'État – Draaf et DDT – ont pour mission de veiller au respect de la réglementation sur le parcellaire privé. Il s'agit d'un travail de terrain conduit sur environ 75 % des 16 millions d'hectares de forêt française métropolitaine. Récemment encore, ces contrôles étaient principalement réalisés sur délation ou ciblage de massifs réputés « sensibles ». Ce mode opératoire, en plus d'être fastidieux, présentait plusieurs limites inhérentes à la surveillance de vastes territoires, et ne pouvait prétendre à l'exhaustivité.

En 2011, le ministère de l'Agriculture, en charge des questions forestières, a commandé auprès d'Irstea, une étude de faisabilité pour estimer le potentiel de l'imagerie satellitaire dans la cartographie des coupes rases. En effet, les satellites d'observation de la Terre « scannent » en permanence notre planète. En apportant une information riche, détaillée et actualisée, ils permettent d'analyser les états de surface, de suivre les évolutions de l'occupation du sol, notamment dans le domaine forestier. Cette technologie est donc parfaitement adaptée pour fournir un pré-diagnostic et donner aux agents forestiers les moyens d'optimiser les contrôles sur le terrain.

Le satellite à l'affût des coupes rases

Plusieurs approches sont envisageables pour cartographier les coupes rases à partir

d'images satellitaires. La première repose sur la photo-interprétation. Un opérateur visualise les images et détoure toutes les parcelles forestières passées en sol nu. Cette solution est coûteuse en temps et loin d'être évidente. La seconde approche consiste à détecter automatiquement des changements apparus entre deux ou plusieurs images acquises à différentes dates. Il s'agit ensuite de qualifier ces changements pour cartographier uniquement les coupes rases.

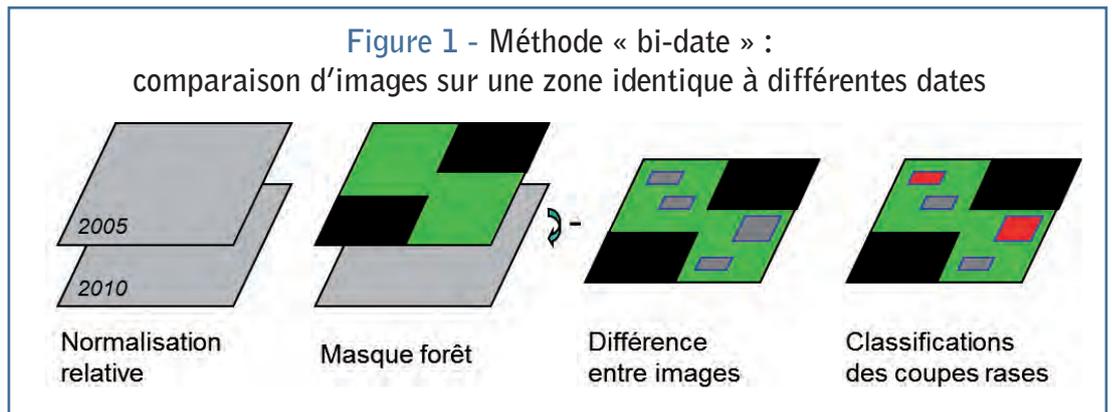
Irstea a développé successivement deux méthodes basées sur des données et des algorithmes différents. Inscrits dans un contexte favorable de mutualisation de l'imagerie satellitaire, ces outils informatiques ont évolué au cours du temps pour assurer un déploiement national et une utilisation pérenne dans la plupart des services déconcentrés.

La méthode bi-date et le programme Geosud

La première méthode, dite « bi-date », compare deux images d'une même zone, acquises à une année d'intervalle. Ces données sont converties en indice de végétation (IdV), soit IdV1 pour la première année et IdV2 pour la seconde année. De la différence de ces indices (IdV2 - IdV1) résulte une image monochrome dans laquelle deux types de changement majeur apparaissent : le passage d'un état arboré à un état non végétalisé, et inversement (*figure 1*). Un seuillage² est enfin appliqué pour ne conserver que les pixels correspondant à des coupes rases (*figure 2*).

La méthode « bi-date » exploite en entrée les images diffusées par le programme Geosud. Cet équipement d'excellence vise à développer une infrastructure nationale d'imagerie satellitaire pour la recherche sur l'environnement et

² Le seuillage d'image est une technique de binarisation d'image, de transformation d'une image en niveau de gris en une image dont les valeurs de pixels ne peuvent avoir que la valeur 1 ou 0, soit noir ou blanc.



les territoires, et ses applications à la gestion et aux politiques publiques. Depuis 2014, ce programme fournit gratuitement des couvertures nationales d'images acquises par les satellites Spot 6 et Spot 7, avec une résolution spatiale comprise entre 1,5 m et 6 m.

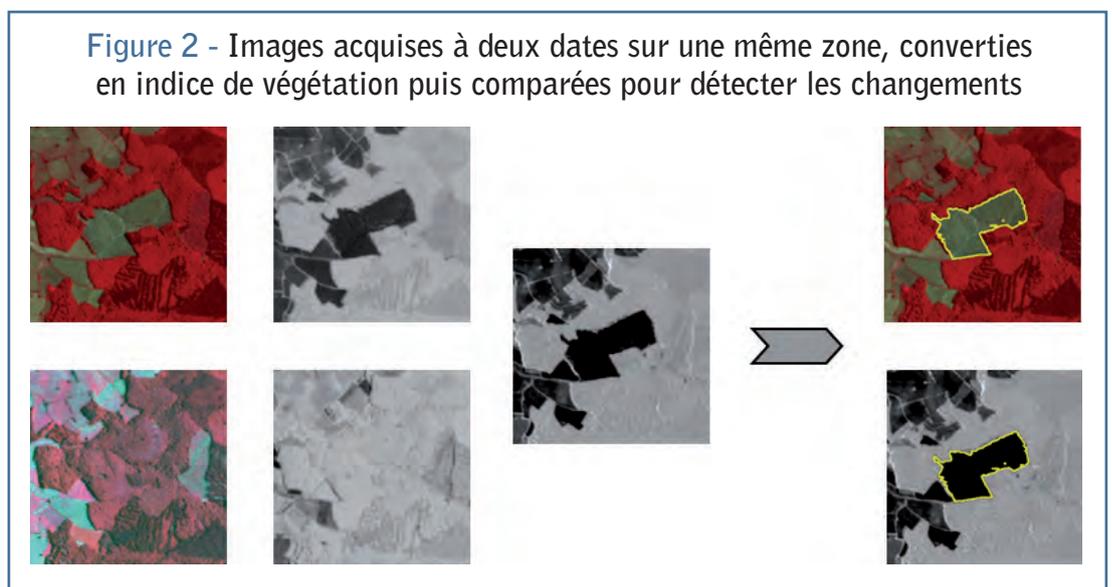
Parallèlement à cette activité de recherche et développement, Irstea construit une stratégie pour garantir le transfert auprès des services de l'État et résoudre au moins deux challenges :

- permettre aux agents des Draaf et DDT, pour la plupart inexpérimentés en télédétection, de prendre en main la chaîne de traitements en toute autonomie et,
- assurer la mise en œuvre sur un logiciel de cartographie libre et gratuit (QGis).

Dans cette optique, Irstea a créé une « valise pédagogique » constituée d'un guide et d'une formation certifiée par le ministère, ainsi que des outils visant à simplifier l'exécution de certaines étapes de la méthode. Le guide

methodologique comporte deux grandes parties, la première présente quelques notions théoriques en télédétection, la seconde décrit pas à pas les différents traitements sur un logiciel de géomatique. Quatre sessions de formation ont été dispensées pour environ 50 professionnels. La plupart d'entre eux appliquent désormais cette méthode au sein de leur service (*figure 6, page 45*).

Les retours d'expérience démontrent que l'utilisation des images satellitaires allège les processus de recherche d'infraction en matière de coupes illégales, abusives, voire même de défrichements illicites. Dans la pratique, les utilisateurs soulignent le fait qu'il est maintenant possible de déceler des parcelles masquées depuis la route par des peuplements mûrs. Cet outil et les cartographies, qui en découlent, sont aussi un appui indispensable pour de nouveaux agents qui n'ont pas suffisamment d'expérience sur leurs secteurs d'intervention.



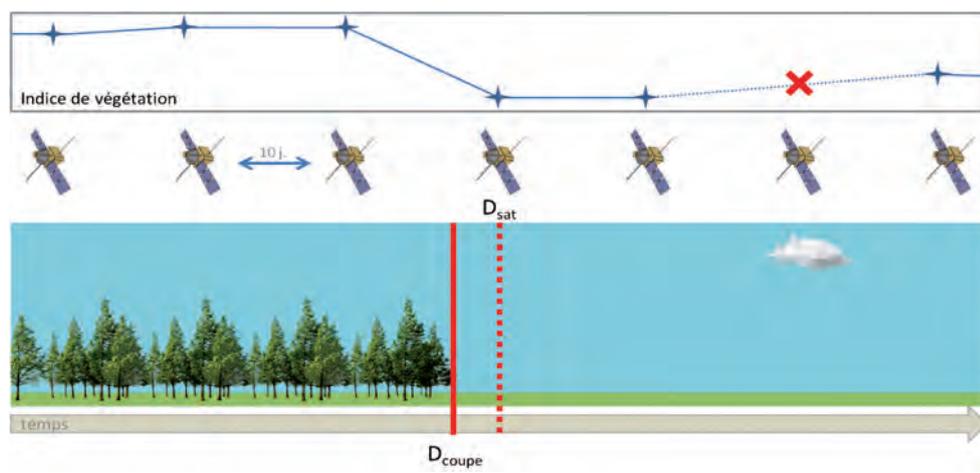
Limites de la méthode « bi-date »

Le déploiement national de cette première méthode est resté limité en raison des moyens humains, des moyens matériels et des temps alloués. En effet, les agents chargés de produire la cartographie des coupes rases devaient être relativement autonomes techniquement et disposer de connaissances de base en télédétection. La formation était alors un prérequis incontournable. En outre, les données satellitaires sont volumineuses et leur téléchargement sur les portails existants est limité par le débit des réseaux. Les images et produits intermédiaires créés lors des différentes étapes de la méthode peuvent atteindre quelques dizaines de giga-octets. De plus, la vitesse des traitements dépend des moyens de calcul (mémoire vive). Or, dans la plupart des services, le parc informatique est ancien ou peu adapté. Enfin, la

durée d'exécution repose en grande partie sur les facteurs précédemment cités, le degré d'expertise en télédétection et les moyens informatiques. Il faut compter environ une semaine pour conduire la méthode à son terme, depuis la sélection des images jusqu'à la production d'une cartographie et ce, quelle que soit la taille de la zone d'étude (département ou région).

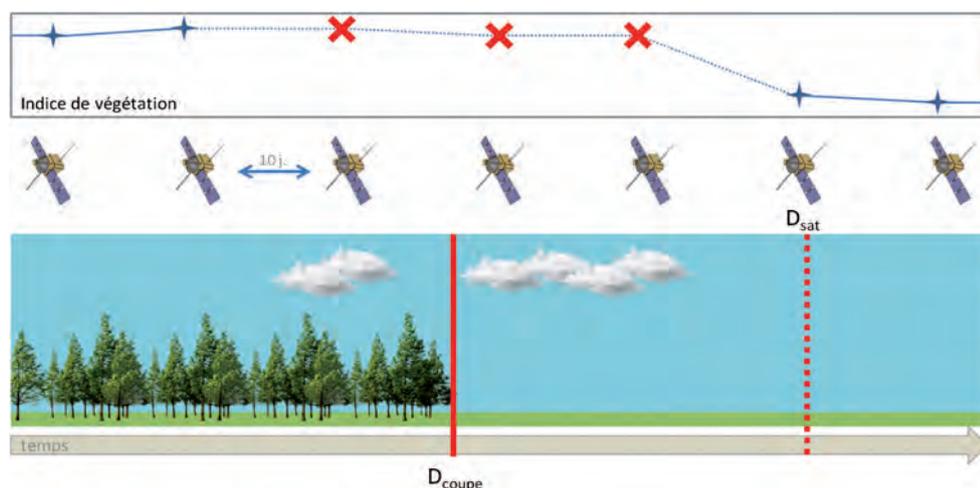
Concernant la qualité des résultats, il est apparu que la comparaison interannuelle augmentait le risque d'omission. **L'indice de végétation permet de différencier aisément les surfaces végétalisées des surfaces en sol nu.** Or, **l'état de sol nu suite à une coupe est bref.** La végétation reprend le dessus en quelques mois. Dès lors, une coupe ancienne peut ne pas être détectée. En d'autres termes, plus les acquisitions satellitaires sont éloignées dans le temps, plus le risque d'omission est important.

Figure 3 - Variation temporelle de l'indice de végétation sur une même zone



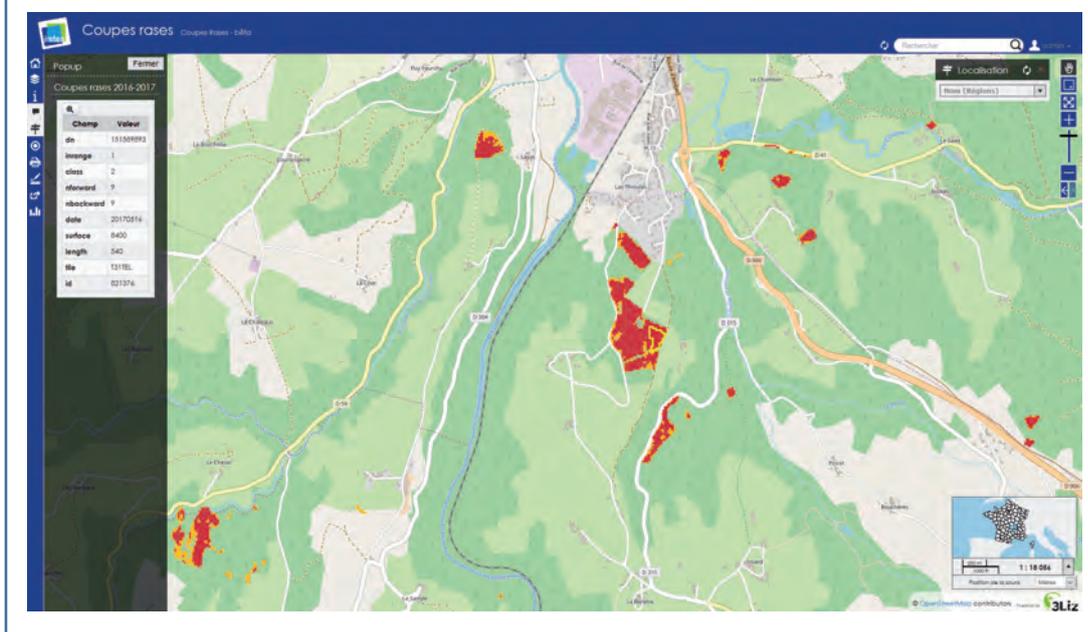
Source : Irstéa

Figure 4 - Couvert nuageux empêchant l'analyse des images satellites



Source : Irstéa

Figure 5 - Zoom sur des parcelles détectées en coupes rases.
Chaque polygone dispose d'attributs, notamment la date de détection et la superficie concernée



Source : Irstéa

L'arrivée de Sentinel-2, vers une automatisation complète

En juin 2015 puis en mars 2017, deux satellites optiques – Sentinel-2A et Sentinel-2B – ont été lancés par l'Agence spatiale européenne (ESA). Contrairement aux satellites Spot 6 et Spot 7, cette constellation acquiert en continu des images sur les surfaces continentales, avec une période de revisite sur un même lieu d'environ cinq jours et une résolution spatiale comprise entre 10 et 20 m selon les bandes spectrales. Ces capteurs, configurés à l'identique, offrent de nouvelles opportunités pour améliorer la cartographie des coupes rases et, systématiser *in fine* la détection sur l'ensemble de l'hexagone.

Cependant, de nombreuses questions se posent quant à la gestion et au traitement de ces nouvelles données... Comment gérer et stocker cette masse d'information qui ne cesse d'augmenter ? Comment en extraire des informations utiles dans un laps de temps raisonnable ?...

Irstea a donc conçu une nouvelle méthode dédiée à l'exploitation des séries temporelles d'images satellitaires. Le principe est de détecter, non plus entre deux dates, mais sur toute la profondeur temporelle disponible des baisses rapides de l'indice de végétation qui se confirment dans les mois qui suivent. La

chaîne de traitements est totalement automatisée, depuis le téléchargement des données satellitaires jusqu'à la publication des résultats sur le web. Étant donné le volume des données traitées, l'ensemble des calculs pour toute la France est centralisé sur un serveur informatique dédié (*figure 3 et 4, page 43*).

Le serveur télécharge et prétraite chaque semaine les données Sentinel-2, entre les mois de mai et d'août. Les images d'automne et d'hiver sont exclues afin d'éviter toute variation de l'indice de végétation due à la phénologie (couleur des feuilles, défoliation, etc.). L'algorithme cible ensuite les chutes d'indice de végétation dans le domaine temporel. Pour chaque pixel, il calcule une « magnitude de coupe ». En sortie, cet outil génère une couche vectorielle de polygones correspondant aux détections. Chaque polygone est décrit par un certain nombre d'informations, dont la magnitude et la date de détection. Ces résultats alimentent ensuite une base de données connectée à un service de cartographie web (*figure 5*).

Cette plateforme peut être consultée depuis un poste informatique ou bien avec un terminal mobile de type *smartphone*. Ainsi, un agent forestier peut se positionner précisément sur le terrain et retrouver les coupes rases détectées. L'accès à ce service web,

ouvert depuis l'été 2018, est actuellement restreint aux organismes publics. Une trentaine de DDT et près de dix Draaf sont inscrites à ce jour (figure 6).

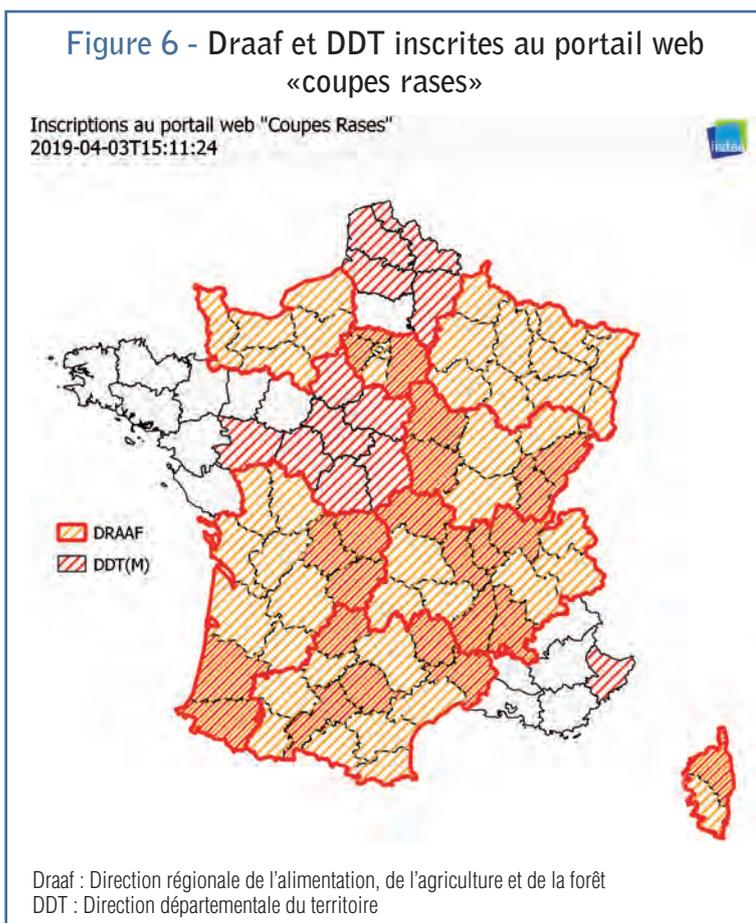
Cette nouvelle méthode présente plusieurs avantages. En plus d'être insensible à certaines variations ponctuelles du signal dans le temps, telle que la présence de nuages sur les images ou des erreurs de calage, elle permet de dater plus précisément l'apparition des coupes rases. En outre, l'application web résout les limites matérielles et logistiques identifiées dans les différents services de l'État. Désormais, un agent a juste besoin d'une connexion Internet pour accéder à une interface cartographique, consulter et télécharger les produits sur sa zone d'intérêt. Les prérequis théoriques et les infrastructures matérielles ne sont plus un frein au déploiement national. Le forestier peut se concentrer sur son métier et ses missions, notamment la constatation des infractions potentielles.

Conclusion et perspectives

Selon le ministère de l'Agriculture, les outils de détection des coupes rases sont aujourd'hui les premiers services de télédétection véritablement opérationnels pour accompagner les politiques publiques dans le domaine de la foresterie.

Cette réussite est en grande partie liée à un contexte favorable. L'émergence de programmes de mutualisation de l'imagerie satellitaire facilite l'accès aux données. La montée en puissance des outils libres et *open-source* permet aux organismes de s'approprier des méthodes innovantes et opérationnelles. Les nouveaux satellites, en particulier Sentinel-2, s'intègrent parfaitement dans des services de surveillance continue. La résolution spatiale de 10 m et la configuration des capteurs embarqués assurent la généricité³ de la méthode et son exploitation à l'échelle nationale. Enfin, le soutien des autorités publiques et la formation des agents sont également une des clés de ce succès.

Concernant la qualité des résultats, les utilisateurs estiment que le taux d'erreur dans la détection des coupes rases est inférieur à 10 %. Cette évaluation reste à confirmer. La forêt française est très hétérogène tant dans les espèces qui la composent que dans les pratiques sylvicoles. Il est probable que les



À retenir

Pour détecter et cartographier des coupes rases illégales, une méthode d'analyse d'images satellites est mise au point par Irstea. La comparaison d'images sur une même zone à différentes dates détecte automatiquement les changements d'occupation des sols, notamment la baisse rapide de l'indice de végétation. Les agents de l'État disposent d'une interface cartographique pour optimiser les contrôles d'infraction de coupes illégales ou abusives.

Mots-clés : détection coupe rase, images satellites, contrôle.

³ La généricité ou programmation générique consiste à définir des algorithmes identiques opérant sur des données de types différents.

outils développés soient plus ou moins performants selon les sylvo-écorégions. Irstea finalise actuellement cette qualification. Cette analyse sera aussi utile pour paramétrer finement les méthodes de détection et finalement, améliorer les plans de contrôle et le suivi de la ressource. ■

Faisabilité du diagnostic de l'état sanitaire des peuplements par télédétection, le châtaignier en Dordogne



13 min

¹ Dynafor – Unité mixte de recherche Dynamiques et écologie des paysages agroforestiers — Université de Toulouse, INRA, INPT, INP-PURPAN, Castanet-Tolosan, France.

Par Véronique Chéret, Michel Goulard et Yousra Hamrouni, Dynafor¹ et Michel Chartier, CNPF-IDF

Repérer des peuplements dépérissants grâce aux images satellites, est-ce possible ? Un ambitieux projet Casteldiag vise à identifier des classes de dépérissement de châtaigniers en Dordogne grâce à des images satellites.

Les dépérissements forestiers préoccupent les professionnels de la filière et posent de façon cruciale la question du diagnostic de l'état de santé des arbres. Le châtaignier en est un bon exemple. L'arrivée de nouvelles séries temporelles d'images telles Sentinel-2 donne à penser qu'un suivi de l'état sanitaire de la végétation par télédétection est possible.

⁴ Constellation de satellites Sentinel -1 et -2 dédiés à l'observation de la Terre.

Le châtaignier comme cas d'étude

Le châtaignier, 3^e essence feuillue de France en surface, est quasiment intégralement situé en forêt privée. Avec environ 50 % de la surface mondiale de la châtaigneraie à bois, la France y est un acteur économique incontournable. Cependant, le châtaignier apparaît être l'essence feuillue la plus touchée par des mortalités de branches (DSF, IGN²).

De nombreux châtaigniers malades et dépérissants sont observés par les correspondants observateurs du DSF, sans pour autant pouvoir chiffrer les surfaces atteintes. Le changement climatique augmente les risques de mortalité pour le châtaignier. En effet, l'accentuation du déficit hydrique peut impacter des peuplements déjà en limites stationnelles. Certains parasites profiteront également de la diminution des froids hivernaux comme le *Phytophthora* et le chancre³.

² *Dépérissement et mortalité : un éclairage de la situation en France.* If n° 16, 3^e trimestre 2007

³ Marçay *et al.*, 2007

Des outils à adapter/explorer

Les perspectives de discrimination par télédétection des peuplements sains des peuplements dépérissants, selon différents niveaux d'intensité reposent sur de nouveaux produits, en particulier ceux issus des missions Sentinel-2⁴ dédiés à l'observation de la terre. L'enjeu est d'élaborer des méthodes de traitement de ces nouvelles séries d'images acquises depuis 2015, pour suivre le fonctionnement de la végétation forestière et calculer des indicateurs d'état. Encore peu de travaux utilisent des images à haute résolution spatiale pour la détection du dépérissement forestier et plus largement des impacts du changement climatique.

Un programme de recherche nommé Casteldiag

Le projet Casteldiag, financé par le RMT Aforce, vise la détermination de l'état sanitaire d'un peuplement par télédétection en complément d'un diagnostic de terrain selon une méthode adaptée aux taillis de châtaignier. Le département de la Dordogne a été choisi comme zone d'étude. Le projet réunit le CNPF, le DSF, le groupe de travail châtaignier de l'IDF, l'IGN et l'UMR Dynafor.

La méthode d'analyse architecturale des arbres ou méthode Archi, élaborée par le CNPF-IDF (Drénou *et al.*, 2015) diagnostique les anomalies du développement (écarts à la normale) et les processus de résilience (retours à la normale).

La mise au point de la clé Archi châtaignier s'est appuyée sur des travaux antérieurs réalisés en Corse (Pavie *et al.*, 2008) et sur une étude de terrain faite dans les Pyrénées Orientales. L'outil se présente sous forme d'une clé à multiples questions fermées se terminant par le résultat correspondant à l'état du rejet de taillis.

Les objectifs du projet sont de :

- créer un outil d'évaluation de l'état sanitaire des taillis de châtaignier,
- constituer une méthode cartographique permettant de suivre annuellement, à partir d'images satellites, la réponse des taillis de châtaignier aux aléas biotiques et abiotiques. Seul le deuxième objectif est détaillé dans cet article.

La télédétection pour évaluer l'état sanitaire

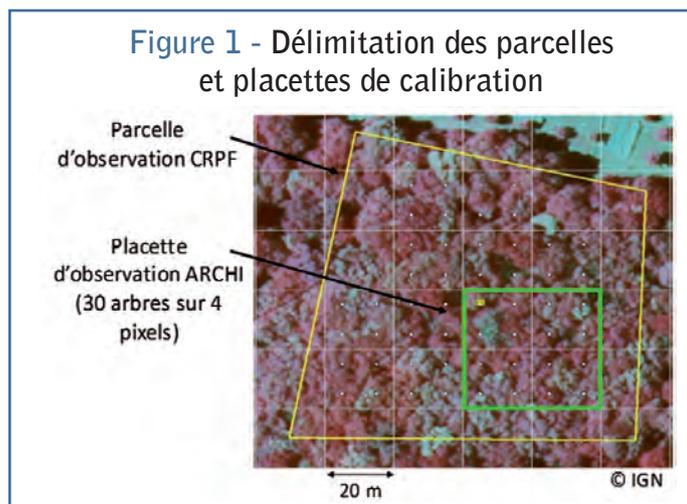
Il s'agissait d'explorer le potentiel de la télédétection pour la cartographie de l'état sanitaire de la châtaigneraie, en distinguant les peuplements sains des peuplements dépérissants⁵. Le travail a porté sur le traitement des images du satellite Sentinel-2A à haute résolution spatiale.

Pour les données Sentinel-2 et contrairement aux séries d'images Modis à moyenne résolution spatiale (disponibles depuis 2000), il n'y a pas d'archive qui puisse permettre de détecter des baisses significatives de vitalité des peuplements selon une méthode développée pour la cartographie de l'état de peuplements de résineux (Lambert *et al.*, 2013). Nous avons donc cherché à analyser, pour une année de données (2016), la représentation spatiale de l'état des surfaces en taillis de châtaigniers. L'objectif a été d'élaborer des modèles statistiques, intégrant plusieurs indices de végétation et des paramètres biophysiques.

Du terrain pour des références solides

La calibration des modèles a été réalisée sur la base de références terrain de l'état sanitaire des peuplements faites selon deux approches (figure 1) :

- par notation du niveau de dépérissement de 62 parcelles, évalué à dire d'expert (estimation visuelle d'un pourcentage de tiges présentant des signes de dépérissement). Elles sont nommées par la suite « parcelles CRPF » ;
- par application du diagnostic Archi adapté à la châtaigneraie sur 58 placettes d'une surface unitaire couvrant 4 pixels d'une image Sentinel-2 (0,16 ha), avec pour chacune un diagnostic de 30 brins. Une valeur de dépérissement a été attribuée à chaque « placette Archi » selon les proportions de types Archi identifiés sur celles-ci.



Source : IGN

Pour les besoins de l'analyse spatiale, les 5 classes de dépérissement initialement identifiées par les observations terrain ont été regroupées en 3 et 2 classes.

⁵ Un peuplement dépérissant est composé d'arbres présentant une détérioration de leur état général.

Les données Sentinel-2

Le potentiel de Sentinel-2 réside en premier lieu dans sa richesse spectrale. Ce capteur acquiert 10 bandes spectrales utiles à l'observation de la végétation : 4 bandes à 10 m de résolution spatiale dans le visible et le proche infra-rouge (PIR), et 6 bandes à 20 m (*Red-Edge*⁶, PIR et moyen infrarouge [MIR]). La fréquence d'acquisition est également un atout majeur, avec un temps de retour de 10 jours pour Sentinel-2A (5 jours avec Sentinel-2B lancé en mars 2017). Deux tuiles (de dimension 100 x 100 km) permettent de couvrir la quasi-totalité de la surface occupée par la châtaigneraie en Dordogne (figure 2).

⁶ Partie du spectre électromagnétique située dans la zone de transition rouge et proche de l'infrarouge.

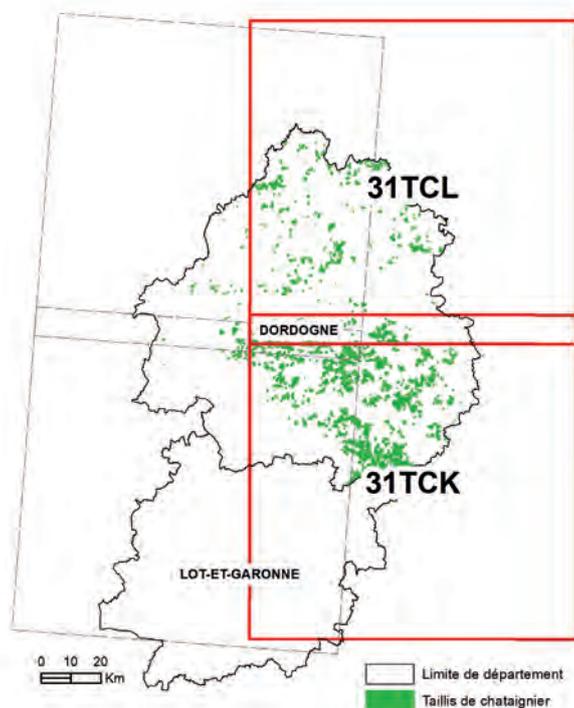
De manière assez logique, les images les plus pertinentes se situent sur la période de feuillaison (activité végétale). De mars à septembre 2016, 5 dates d'images sont disponibles, mais 3 ont dû être écartées pour cause d'abondance de nuages ou de localisation des nuages sur les parcelles de référence terrain. Les images utilisées sont celles du 30/07/2016 et du 28/09/2016.

L'analyse spatiale

Au total, 36 indices de végétation, choisis pour leur potentiel à traduire l'activité végétale, la productivité, la teneur en eau ou encore la teneur en pigments foliaires ont été calculés à partir des images Sentinel-2 (NDVI, NDWI, GNDVI, NDII, NBR, Cgreen...).

Figure 2 - Emprise des images Sentinel-2 utilisées (tuiles 31TCL et 31TCK) pour la zone d'étude

Deux images (100 x 100 km) couvrent la quasi-totalité de la surface occupée par la châtaigneraie en Dordogne.



Avec les mêmes images, l'estimation de paramètres biophysiques a été obtenue par application de modèles simulant le transfert radiatif dans la végétation. Avec le logiciel *Overland* développé par Airbus *Defense and Space*⁷, 5 paramètres biophysiques pour caractériser les peuplements ont été calculés :

- BLCV : fraction du sol couverte par de la végétation brune,
- GLCV : fraction du sol couverte par de la végétation verte,
- fAPAR : fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif,
- GLAI : indice de surface foliaire verte,
- WAT : teneur en eau des feuilles.

⁷ Airbus *Defense and Space* est l'une des trois divisions du groupe Airbus, spécialisée dans les avions militaires, les drones, les missiles et les lanceurs spatiaux et satellites artificiels.

Avec les 10 bandes spectrales, le nombre de variables de télédétection s'élève à 51. Pour certaines de ces variables, on a pu observer des corrélations hautement significatives avec les classes de dépérissement (figure 3).

La démarche d'analyse spatiale et statistique (figure 4) repose sur une première étape de sélection des variables. Les plus significatives sont utilisées pour la construction de modèles prédictifs, calibrés à partir des références terrain. C'est après une étape de validation reposant sur une deuxième campagne de terrain (d'une centaine de références) que les meilleurs modèles sont choisis en fonction de critères statistiques.

Par cette approche, le premier constat que l'on peut faire concerne la contribution des bandes spectrales. Ce sont les bandes spectrales B6 et B7 du Red-Edge, B8 et B8a du PIR qui sont le plus fréquemment retenues dans les modèles. Cela confirme l'importance des mesures de réflectance dans cette partie du spectre électromagnétique pour la caractérisation de l'état des peuplements. Celles-ci sont fortement liées à l'importance de l'activité végétale. La contribution des bandes B11 et B12 du MIR, sensibles à l'humidité, est par contre secondaire.

On a identifié les indices de végétation les plus fréquemment retenus pour les meilleurs modèles qui sont : NDII, NDWI, NBR, S2REP, NDVIre2n, DVI, Clgreen, CRI2, et GNDVI.

En ce qui concerne les paramètres biophysiques, ceux-ci interviennent assez peu dans les meilleurs modèles. C'est essentiellement le GLAI que l'on retrouve dans quelques modèles établis avec l'image de juillet.

Figure 3 - Exemple de corrélations significatives entre 3 variables de télédétection et la classe de dépérissement (Parcelles CRPF, image de juillet)

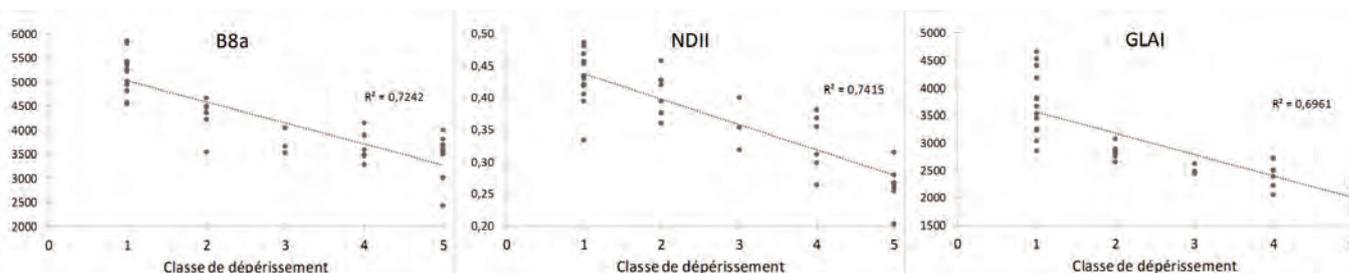
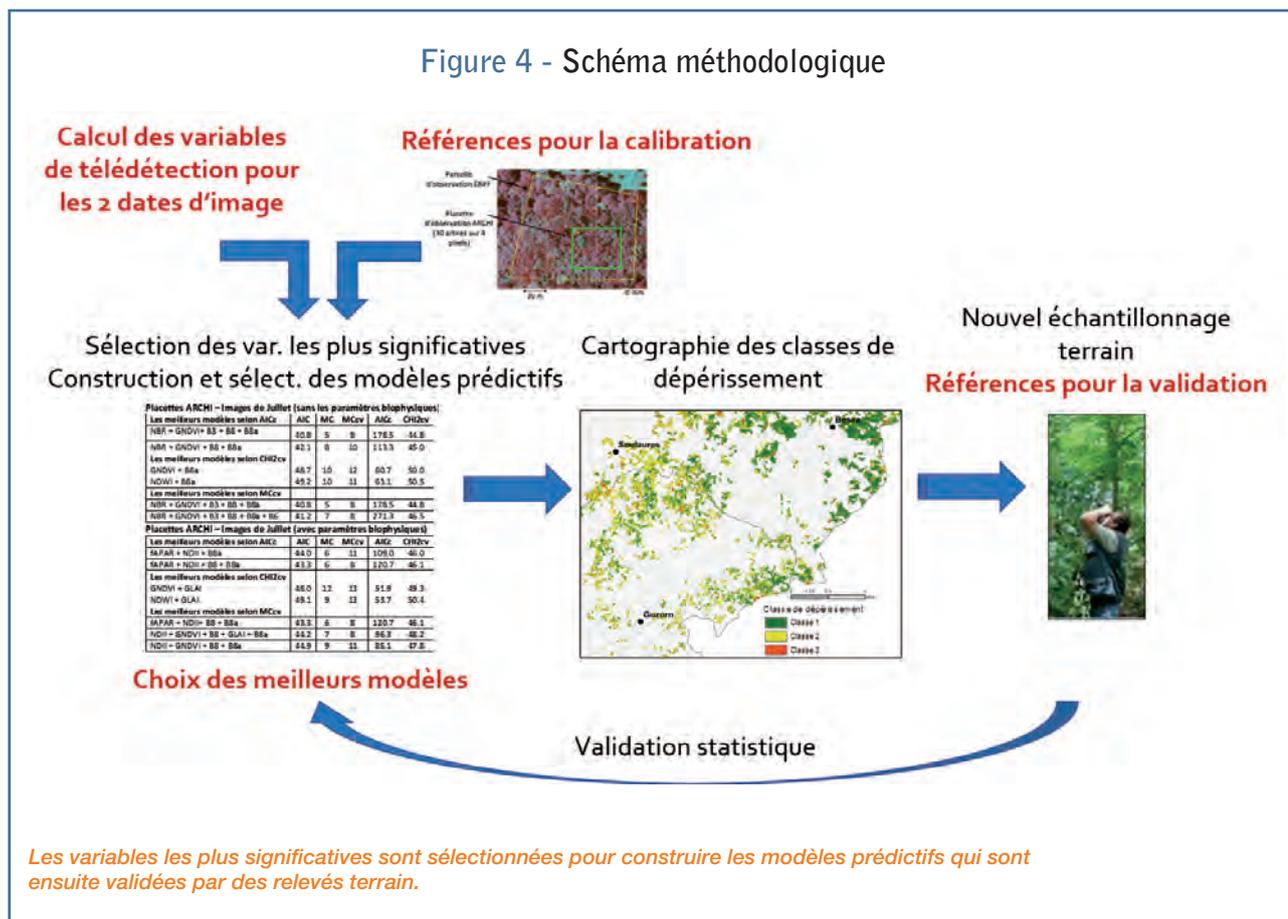


Figure 4 - Schéma méthodologique



Les variables les plus significatives sont sélectionnées pour construire les modèles prédictifs qui sont ensuite validés par des relevés terrain.

Au final, les 8 modèles présentant les meilleures prédictions sont retenus. Ils sont tous issus de l'image de juillet et proposés pour distinguer 2 ou 3 classes, à partir des références Archi ou CRPF. Un des critères de qualité est l'indice de Kappa qui varie de 0,37 à 0,64. Le meilleur résultat (0,64) est obtenu à partir des références Archi, avec l'image de juillet, et pour une classification en deux niveaux (sain/dépérissant).

Conclusions

Les résultats issus du traitement des données Sentinel-2 sont prometteurs. Plusieurs constats peuvent servir de base à la poursuite des travaux sur ce sujet.

L'utilisation de ce type d'information, même si c'est encore prématuré, pourrait être envisagée selon les deux niveaux de modèles :

- pour les modèles à 3 classes, des diagnostics complémentaires sont à prévoir en priorité pour les classes de dépérissement notées 2 (avenir incertain selon le modèle de télédétection) afin d'évaluer les raisons et potentiellement prévoir des améliorations du peuplement (éclaircies etc.). Les parcelles

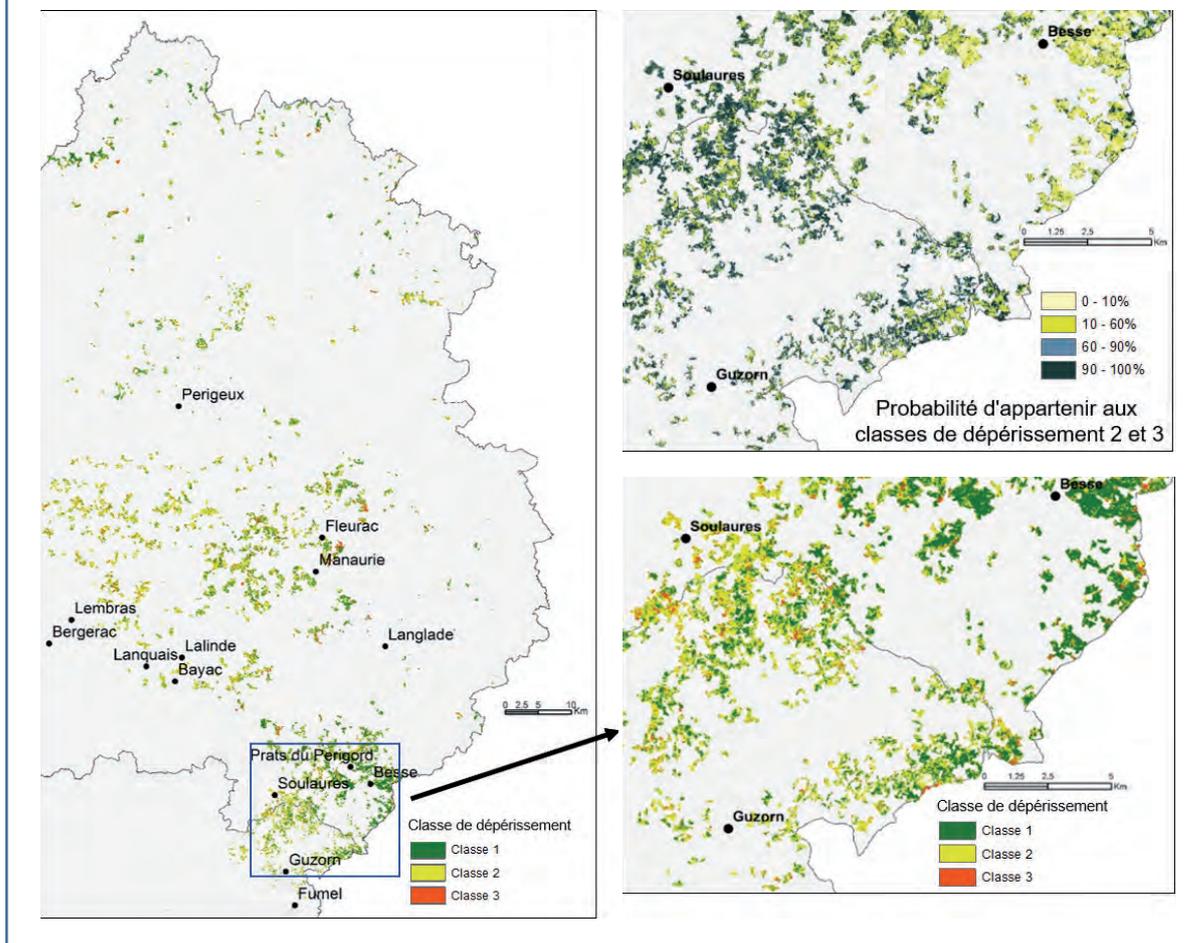
classées 3 ont un avenir déjà compromis et le renouvellement du peuplement (par parcelle ou par zone) sera ici au cœur des préoccupations. La classe 1 ne présente pas de problèmes sanitaires particuliers, mais mérite une attention sylvicole pour assurer une production de bois de châtaignier de qualité et maintenir cette ressource au risque de basculer dans un stade de dépérissement.

- les modèles à 2 classes mettent en avant la localisation des parcelles, classés 2, nécessitant un diagnostic du conseiller forestier afin d'envisager le renouvellement ou l'amélioration du peuplement. L'information est ici moins détaillée que dans les modèles à 3 classes, mais permet d'axer sur les priorités du technicien de secteur.

Pour confirmer et consolider le modèle de prédiction de l'état des châtaigneraies de Dordogne, il serait souhaitable de refaire un travail de calibration et de validation avec des images de 2018 et le jeu de référence terrain de cette même année.

La robustesse de ces modèles serait également à éprouver sur un autre territoire. ■

Figure 5 - Exemple de carte classant en 3 niveaux d'état sanitaire (modèle parcelles CRPF) les peuplements de châtaignier et de carte de probabilité d'être dépérissant (appartenance aux classes 2 et 3)



À retenir

Le projet Casteldiag évalue l'état sanitaire des taillis de châtaignier en Dordogne, par interprétation d'images satellites, en utilisant des références terrain de l'état des peuplements. L'intérêt du projet est d'étudier la richesse spectrale et les dates d'acquisition des images Sentinel-2. Les modèles cartographiques retenus définissent 2 ou 3 niveaux d'état sanitaire des châtaigneraies. Les résultats obtenus sont prometteurs.
Mots-clés : télédétection, état sanitaire, châtaigneraies, Dordogne.

Références :

- Drénou C., Bouvier M., & Lemaire J., 2015. The diagnostic method ARCHI applied on declining pedunculate oaks. *Arboricultural Journal*, 37 (3), 166-179.
- Lambert J., Drenou C., Denux J.P., Gérard B., & Chéret V., 2013. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis, *GIScience & Remote Sensing*, 50 (4), 437-457.

Remerciements :

Financier : RMT AFORCE
Partenaires : IGN, DSF
Contribution : Airbus DS



Rendre accessibles aux gestionnaires forestiers les produits issus de la télédétection

Par Clotilde Giry, Benjamin Chapelet, Michel Chartier, CNPF-IDF



Pour l'Union européenne, les forêts sont source de multiples avantages économiques, sociaux et environnementaux. Elles doivent être gérées conformément aux principes de durabilité énoncés dans la stratégie de l'Union européenne. Un programme européen MySustainableForest développera un service d'information géographique pour favoriser la gestion forestière européenne durable.

Les forêts couvrent plus de 215 millions d'hectares en Europe, soit 33 % de la superficie du territoire européen ; 49 % des forêts sont publiques, tandis que 51 % sont des propriétés privées appartenant à 7,8 millions de propriétaires, ce chiffre allant croissant. 87 % des zones forestières européennes ont un mode d'exploitation semi-naturel, tandis que 9 % sont des plantations. Le secteur forestier apporte une contribution significative à l'économie de l'UE : au moins 3 millions de personnes travaillent dans le secteur forestier, générant une valeur marchande de bois rond de plus de 18 000 millions d'euros, ce qui représente 0,9 % du PIB. Autant d'illustrations de la réalité complexe du secteur du bois et de la forêt, qui devraient, à de nombreux égards, accroître sa compétitivité et sa durabilité.

Le programme MySustainableForest cherche à fournir **des services de géo-information pour la gestion intégrée des forêts, au stade pré-commercial, via une plateforme de services web.**

Ces services combinent des données *in situ*, des images satellitaires et d'autres données (lidar¹, données aéroportées, et données sur la qualité du bois via les ondes sonores ainsi que des données transmises par les utilisateurs locaux). Ils permettent d'aborder des questions allant au-delà de la production de bois et de la transformation industrielle, telles que :

- la conservation des forêts,
- les besoins et les exigences relatifs aux mesures d'adaptation au changement climatique,
- les lignes directrices pour les plans forestiers nationaux,
- les obligations nationales de déclaration à l'UE,

- les inventaires de biomasse et de CO₂,
- les effets durables de la sécheresse,
- la sensibilisation croissante du public aux nouvelles technologies dans le secteur du bois.

Divers sites de démonstration ont été choisis à cet effet au Portugal, en Espagne, en France, en Croatie, en République tchèque et en Lituanie, dans les types de forêts atlantiques, méditerranéennes et continentales.

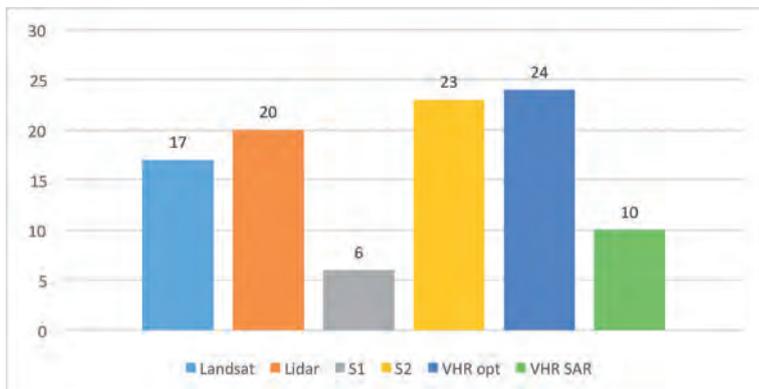
MySustainableForest a démarré en novembre 2017 et durera 36 mois jusqu'en octobre 2020. Les objectifs sont définis dans le cadre des principales politiques de l'UE (politique forestière, politique d'innovation, politique spatiale), ainsi que de son programme phare Copernicus. MySustainableForest cherche à **intégrer de manière significative les données satellitaires tout au long de la chaîne sylvicole dans l'industrie du bois.**

MySustainableForest envisage des **objectifs technologiques, commerciaux, sociaux et politiques ambitieux :**

- soutenir les aménagistes forestiers avec des produits d'information géographique provenant de données satellitaires, lidar, météorologiques, etc.,
- fournir ces produits via une plateforme *web* facile d'accès,
- démontrer la qualité, la facilité d'utilisation et le rapport coût/bénéfice de ces produits au sein de la communauté forestière en Europe,
- formuler des recommandations à l'intention des décideurs politiques afin de soutenir les propriétaires de forêts et les industries de transformation du bois de l'UE.

¹ La télédétection par laser ou lidar, en anglais « laser detection and ranging », est une technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur.

Figure 1 - Nombre de données utilisées (en ordonnée) par type de données (Landsat : données du satellite)



Landsat, lidar : données lidar, S1/S2 ; données des satellites Sentinel-1 ou 2, VHR opt : images optiques à haute résolution; VHR SAR : données radar à haute résolution).

Les données utilisées sont principalement issues des dernières innovations : Sentinel-2, images à hautes résolutions spatiales.

Que va produire et fournir le programme ?

Les partenaires du projet ont tous mis en évidence certains problèmes récurrents :

- inventaires forestiers périmés (généralement mis à jour tous les 10 ans),
- stocks de bois de qualité inégale entrant dans les industries de transformation,
- infrastructures forestières dégradées pour accéder à la matière première.

Sur la base de l'analyse des besoins des utilisateurs finaux, *MySustainableForest*, grâce aux technologies d'observation satellitaire (principalement Sentinel-2), mais également à des données lidar, fournira des services destinés à faciliter la gestion forestière, et ainsi optimiser la production.

Six services de géo-information seront créés :

- ➔ caractérisation du site forestier : ex. masque forestier, délimitation de peuplement...
- ➔ caractérisation du bois : ex. classement et rigidité de la densité du bois...
- ➔ biomasse et stockage de CO₂ : ex. estimation de la biomasse aérienne...
- ➔ état de la forêt : ex. stress de la végétation...
- ➔ vulnérabilité des écosystèmes : ex. indicateur de biodiversité...
- ➔ fonctions et conditions socioéconomiques : ex. analyses basées sur le Système de comptabilité économique environnementale des Nations unies (SEEA).

Comment les services seront-ils fournis ?

Les produits seront obtenus via une plateforme web, qui interrogera des composants de traitement modulaires tels que les modèles lidar, les modèles de satellites, les modèles de qualité du bois et les modèles socio-économiques. De plus en plus de citoyens sont habitués aux services Web, dont beaucoup sont accessibles via des appareils mobiles. Les services *MySustainableForest* cherchent à être facilement accessibles, de la requête aux spécifications du site, le cas échéant, à la fourniture de données de site locales, si nécessaire, jusqu'au produit géographique final.

Que vont obtenir les utilisateurs finaux ?

Dans la plupart des cas, l'utilisateur final obtiendra une carte, imprimable ou interactive, avec les données thématiques traitées demandées, par exemple la hauteur des pe-

Figure 2 - Copie d'écran de la plateforme de service (en cours de développement) qui permettra la mise à disposition des données.

En haut à gauche: Page d'accueil avec formulaire de requête en ligne. En haut à droite: Module cartographique de recherche et consultation des données avec possibilité de téléchargement. En bas à gauche et à droite: Différents exemples de représentation cartographique.



plements, l'état des infrastructures forestières ou les dommages causés par une tempête de vent ou les paramètres de qualité du bois sur la rigidité des fibres. Dans d'autres cas, l'utilisateur final obtiendra des résultats et des rapports statistiques.

Qui fournit les services ?

Les sociétés informatiques à valeur ajoutée, partenaires du consortium *MySustainableForest* produiront et fourniront les services.

Plus précisément :

- ➡ GMV² (entreprise privée spécialisée dans les technologies de l'espace) fournira les produits d'observation satellitaire ;
- ➡ Föra³ (entreprise spécialisée dans les données lidar et la modélisation) fournira les produits à base de lidar ;
- ➡ MADERA⁴⁺ (entreprise spécialisée dans la qualité du bois) fournira les produits touchant la qualité du bois ;
- ➡ European Forest Institute⁵ EFI (réseau de recherche forestière) fournira les produits d'analyse socio-économiques.

Qui doit tester la qualité des services ?

Certains partenaires du projet sont des acteurs forestiers représentant des associations de propriétaires forestiers, des industries de transformation, des centres de recherche ou des centres nationaux de politique forestière. Plus précisément, les partenaires suivants vont tester et valider les produits :

- ➡ RAIZ⁶, grand producteur de bois industriel et transformateur de pâte à papier, validera les produits destinés au Portugal, (forêts méditerranéennes et plantations d'eucalyptus) ;
- ➡ le CNPF⁷, Centre national de la propriété forestière, validera les produits destinés à la France (forêts atlantiques) ;
- ➡ CFRI⁸, l'Institut forestier croate, qui gère la politique forestière nationale, doit valider les produits destinés à la Croatie (forêts méditerranéennes, et de milieux humides) ;
- ➡ FORESNA⁹, l'association des propriétaires forestiers de Navarre, validera les produits en Navarre (forêts méditerranéennes, atlantiques et continentales) ;
- ➡ UFE¹⁰, la faculté de foresterie et de technologie du bois de l'université Mendel de Brno, validera les produits destinés à la République tchèque (forêts continentales) ;
- ➡ FOAL¹¹, l'Association des propriétaires forestiers de Lituanie, validera les produits destinés à la Lituanie (forêts continentales).

Le CNPF a proposé deux zones d'étude en France :

- ➡ l'une en région Centre - Val de Loire composée principalement de taillis sous futaie de chênes ;
- ➡ l'autre en Nouvelle-Aquitaine dans un secteur présentant majoritairement des futaies régulières de pin maritime.

Les enjeux sur ces sites sont multiples. Il s'agit en premier lieu de voir le potentiel des images satellites pour la description de ces différents types de peuplements (purs à mélangés voir irréguliers). Par ailleurs, certaines essences présentent des problèmes sanitaires (chênes, châtaignier). L'identification et le suivi de ces peuplements présentent souvent des difficultés. La télédétection est alors vue comme une source possible d'information.

Cependant, les méthodes classiques d'inventaires utilisées sont souvent coûteuses. Or, la télédétection semble offrir de fortes potentialités sur les peuplements couramment rencontrés dans cette zone d'étude. Les risques incendies sont également importants en Nouvelle-Aquitaine. Il est nécessaire de pouvoir évaluer ces risques et leurs impacts.

Quels sont les aspects innovants de ces services ?

Ils sont doubles, car ils concernent à la fois la mise en œuvre technologique du service opérationnel et la qualité scientifique des produits, ce qui rendra la production et la transformation du bois plus compétitives et durables.

L'innovation doit être particulièrement soulignée dans les éléments suivants :

- ➡ l'architecture de la plate-forme de service Web, qui proposera le traitement automatique des différents produits,
- ➡ les algorithmes des produits intégrés dans le module de traitement de la plateforme.

À l'avenir, qui pourrait demander à utiliser les produits et services de MySustainable-Forest ?

Tous les acteurs de la chaîne forêt bois au sens large : gestionnaires de forêts, propriétaires forestiers, scieries, industriels, décideurs et bureaux d'étude. ■

Site web : <https://MySustainableForest.com/project/>



² www.gmv.com

³ www.fora.es

⁴ www.maderaplus.es

⁵ Institut Européen de la Forêt : www.efi.int

⁶ www.raiz-iifp.pt

⁷ www.cnpf.fr

⁸ www.sumins.hr

⁹ www.foresna.org/

¹⁰ www.icv.mendelu.cz

¹¹ www.forest.lt

Les bons ingrédients d'un groupe Formation-action

Entretien avec Marc de Dreuille, président du Cetef de l'Indre et Claude Mannevy, Michel Godron et Jacques Henri, adhérents du Gedef Loiret-Sologne, propos recueillis par Nathalie Maréchal, CNPF-IDF

*Apprendre et mettre en pratique à plusieurs une technique sylvicole, cela donne confiance pour l'appliquer dans sa forêt : tel est l'objectif d'un groupe « Formation-action ». Les échanges entre adhérents motivés, le partage d'expériences profitent à tous. Le **Cetef de l'Indre**¹ et le **Gedef Loiret-Sologne**² indiquent les facteurs favorables au bon fonctionnement d'un groupe « Formation-action ».*

¹ Cetef : Centre d'études techniques et économiques forestières.

² Gedef : Groupe d'études et développement d'économie forestière



Le Cetef de l'Indre est pionnier dans la création de «Formation-action».

Comment ces groupes ont-ils démarré ?

Marc de Dreuille : l'idée de créer des groupes « Formation-action » dans l'Indre a germé dès l'année 2000 lors de réunions avec le CRPF. Elle s'est renforcée à la demande de propriétaires ayant participé à des formations de base Fogefor³ et qui souhaitent approfondir leurs connaissances pratiques et techniques. Le Cetef de l'Indre est l'organisme idéal pour relayer le Fogefor. Cette idée a rencontré un avis favorable auprès des administrateurs du Cetef et auprès de certains forestiers. L'objet de ces groupes est de confronter les avis des participants lors de la réalisation d'un travail sylvicole, et donc de prendre ensemble une décision après discussion. Cette façon d'opérer est plus motivante, car chez lui seul et sans technicien, le propriétaire peut être un peu désorienté. C'est pourquoi, en permettant à un sylviculteur de se faire aider par d'autres, dont la connaissance est plus approfondie ou ayant déjà été confrontés à la même situation, il en résulte une cohésion entre les participants qui les rapproche et les sécurise.

Nous avons, dans un premier temps, proposé aux adhérents une liste de travaux sylvicoles appropriés à ce genre de formation à savoir :

- amélioration de mélanges futaie-taillis (éclaircie de taillis...),

- amélioration de peuplements résineux,
- renouvellement de peuplements (régénération naturelle et artificielle),
- connaissance du milieu forestier (botanique, sol) et utilisation du Guide « Valorisation des stations et des habitats forestiers » de la région Centre⁴ qui inclut les connaissances actuelles sur le changement climatique,
- cartographie et description des peuplements forestiers (outils de cartographie...),
- gestion des jeunes peuplements (dépressage, taille et élagage),
- sylviculture du peuplier.

À partir des réponses obtenues notre conseil d'administration a décidé de démarrer des groupes pour :

- l'amélioration de mélanges futaie-taillis (marquage d'éclaircie de taillis),
- le renouvellement de peuplements (diagnostic de gestion pour régénération naturelle et artificielle).

Les propriétaires s'inscrivent au groupe qui les intéresse, une dizaine de participants par session. Il ne faut pas trop de participants, si l'on veut un échange constructif et pratique. Chaque réunion se déroule chez un propriétaire différent. L'originalité de la démarche réside dans le fait que le technicien animateur du Groupe de progrès n'est pas présent à chaque réunion : il est là à la première pour rappeler les aspects majeurs du parcours.

Ensuite, les participants interagissent ensemble. Les décisions de marquage ou autres sont prises après concertation du groupe, sachant que la décision finale revient au propriétaire.

³ Formation à la gestion forestière

⁴ https://ifc.cnpf.fr/data/441088_gs_region_centre_1_1.pdf

En cas de difficultés ou de questionnements non résolus, les propriétaires peuvent bien entendu faire appel au technicien, ou noter les questions à lui poser ultérieurement.

Une réunion finale de restitution est prévue avec le technicien pour faire le point sur le ressenti de chacun, répondre aux questions et voir les améliorations ou suites à donner au groupe « Formation-action ». **Avec le recul, cette méthode d'animation a nettement renforcé la cohésion et le dynamisme au sein de notre association.**

Justement, quels sont les bénéfices de ce travail en groupe ?

M. de Dreuille : cela crée une **concertation entre les membres du groupe et cela donne confiance à un propriétaire dans sa prise de décision.**

Concertation, cohésion, et mises en pratique concrètes sont les plus importantes vertus de ces groupes. L'ambiance pendant les réunions est chaleureuse. Le sérieux est néanmoins de mise, ce qui entretient la confiance du propriétaire envers les autres membres. **L'entraide** est sûrement un des aspects majeurs des « Formation-action », mais il n'est pas le seul. Face aux questionnements de celui qui veut gérer ses peuplements le mieux possible, le propriétaire trouve un appui fort et surtout une confiance dans la prise de décision. Après le travail d'un groupe, rien n'empêche de recourir à un professionnel, dont il sera plus facile de comprendre et d'apprécier les recommandations.

Un autre sujet de « Formation-action » a été suivi : la botanique. Chacun des membres du groupe a recueilli chez lui des herbacées et des plantes arbustives. L'identification des essences a été menée de façon collégiale et avec l'aide du technicien (avec entre autres, la *Flore forestière* tome 1, plaines et collines), avec pour certains la constitution d'un herbier. Ainsi, la connaissance des espèces principales rencontrées chez chacun des propriétaires, associée à quelques notions de pédologie, permet de vulgariser l'utilisation du *Guide de Valorisation des stations et des habitats forestiers de la région Centre*⁴.

En conclusion, le Cetef de l'Indre est satisfait de l'instauration de ces groupes. Tout en prolongeant la formation des membres, un approfondissement sur le terrain avec action directe, sans tout attendre du technicien, donne un atout majeur à l'amélioration de nos peuplements forestiers.



Exercice de description de peuplement et utilisation de la clé de détermination des stations forestières.

De l'avis du technicien du CRPF, animateur du Cetef, cela a également permis d'impulser une dynamique forte au sein de l'association, en permettant d'avoir des propriétaires motivés, responsables et acteurs de leur gestion. Ces propriétaires avisés deviennent des référents, sur qui le technicien peut s'appuyer lors de réunions forestières ou suite à des visites conseils chez d'autres propriétaires plus novices.



Chaque membre du groupe expérimente directement l'exercice proposé.

Sondage à la tarière pédologique pour connaître les caractéristiques du sol.



Le Gedef Loiret-Sologne mène deux groupes «Formation-action : le 1^{er} sur la sylviculture irrégulière et le 2^e sur la sylviculture dynamique du chêne.

Comment initier et animer un groupe de «Formation-action» ?

Claude Mannevy : Cela participe de la volonté du Gedef d'être à l'écoute de ses adhérents. Certains ont exprimé leurs besoins, leurs questions. Ils souhaitent échanger, progresser ensemble sur un sujet précis choisi par eux. Ce type de fonctionnement a été initié par le groupe de popuiculteurs de façon informelle : nous pratiquons déjà les échanges et stimulations mutuelles de bonnes pratiques popuicoles, notamment sur l'élagage. Dans ce groupe Popuiculture, nous mesurons les fruits de ce travail de formation par retour d'expérience : les popuiculteurs ont pris davantage conscience des travaux à faire, comment et quand les faire.

En 2012, quelques adhérents actifs ont manifesté leurs intérêts pour le traitement irrégulier. Un groupe « futaie irrégulière » s'est constitué, avec en préambule la question « La sylviculture irrégulière est-elle compatible avec les petites unités de gestion ? » et l'idée d'optimiser la gestion, le temps et les revenus.

Un premier comité de pilotage s'est réuni pour écouter et définir les questions. La visite de placettes de référence Prosylva a constitué une première étape pour mettre tout le monde au même niveau d'information

Le groupe est indépendant. Il s'auto-organise autour d'un ou deux « leaders », avec un fonctionnement *bottom up*⁵. Le technicien est présent à la 1^{re} réunion de l'année ainsi qu'un ingénieur du CRPF pour préciser les points importants à travailler ou à ne pas oublier, définir le vocabulaire propre à ce thème... et à la dernière réunion pour donner son avis. Le technicien n'est pas présent aux réunions, excepté lors d'un besoin particulier, car son temps dédié au Gedef est contingenté.

Dans un groupe «Formation-action», les niveaux de pratique et d'expérience sont différents. **Ce qui prime, c'est la motivation d'apprendre et de vouloir mettre en pratique dans sa forêt.** L'accueil des néophytes est néanmoins essentiel ; il s'agit bien **d'améliorer l'ensemble des compétences sylvicoles du groupe.** Le *leitmotiv* pourrait être : « En me formant, j'apprends et je mets en pratique ». Intégrer les différents cadres de référence est nécessaire. Par exemple, un popuiculteur est déjà habitué à mettre en œuvre une sylviculture interventionniste, ainsi il aura plus aisément un raisonnement propice à la sylviculture dynamique.

⁵ En management, *bottom up* consiste à prendre les décisions collectivement par la base puis les faire remonter au sommet de la hiérarchie à l'inverse de « *Top down* » du sommet vers la base.



Explications et déroulé de l'activité désignation, discussion des critères etc.

Il est important de fixer le cadre technique, ou cadre de référence, dès le démarrage du groupe « Formation-action » et bien définir les termes et clarifier les méthodes qui sont dans le périmètre du thème choisi. Le groupe « sylviculture dynamique » rédige un glossaire technique évolutif, en s'appuyant sur les ouvrages existants, comme le *Vocabulaire forestier* (IDF), pour définir les notions d'arbre objectif, de croissance libre, ou l'éclaircie au profit des arbres sélectionnés pour leur qualité.

Le groupe « sylviculture dynamique » expérimente aussi la mise en application directe : désignation des arbres-objectif dans une plantation de chêne selon les principaux critères de qualité : rectitude, absence de défauts rédhibitoires, vigueur, largeur du houppier... L'éclaircie est marquée ensemble avec la consigne claire d'un détournement dynamique, soit 1,5 m au-delà de la couronne. **La discussion autour des arbres à désigner n'est pas du temps perdu, elle contribue à l'enrichissement mutuel, c'est une étape indispensable.** Enfin, l'éclaircie et la taille de formation sont réalisées immédiatement après, pour que chacun visualise directement le résultat. Les avantages de la pratique de l'anneilage et du cassage ont pu aussi être démontrés lors d'une réunion sur les techniques de dégagement avec l'emploi de petit matériel. Les temps plus conviviaux (pique-nique partagé) sont aussi favorables aux échanges complémentaires.

M. Godron : Le déroulé d'une réunion commence par la présentation et le rappel des objectifs et des actions déjà réalisées. Un postulat à intégrer est d'accepter les contradictions et discussions, car elles permettent l'appropriation par chacun des divers éléments à prendre en compte. La journée de travail s'achève par une synthèse conclusive des notions et pratiques à retenir. Un compte-rendu de chaque réunion est envoyé aux participants

Comment ces groupes sont-ils animés ?

C. Mannevy : L'esprit du groupe est la collaboration entre pairs afin de casser la relation « sachant-apprenant ». L'animation est donc assurée par un propriétaire leader naturellement reconnu pour ses compétences comme référent. Il faut cependant éviter que le leader devienne le sachant. L'animation doit rester collaborative : « voilà ce qu'on fait, comment pourrait-on faire autrement ? ».

M. Godron : Le rythme d'une réunion de concertation suivie de réunions plus pratiques sur le terrain assure une bonne cohérence au

Les ingrédients d'un groupe « Formation-action »

1^{er} postulat : un groupe d'adhérents motivés, avec divers niveaux de compétences, travaille sur un thème défini ensemble ; l'expérience et la pratique des uns profitent aux autres. Au démarrage, il est essentiel de recueillir toutes les questions des participants, et de valider régulièrement que le groupe y répond bien.

2^e postulat : la bonne taille du groupe tourne autour d'une dizaine de personnes pour que chacune puisse bénéficier pleinement de l'émulation mutuelle pratiquée sur le terrain.

3^e postulat : l'importance de la discussion et de la collaboration entre pairs (le technicien étant en retrait), où chaque avis est utile au débat et à l'appropriation par le groupe de la technique mise en œuvre.

4^e postulat : la mise en pratique chez chacun des membres du groupe confronté à ses propres contextes et réalités. S'exercer ensemble conforte le propriétaire et lui donne confiance en ses décisions en le rendant plus autonome.

5^e postulat : la convivialité, mais qui dit Groupe de progrès dit plaisir de se rencontrer.

groupe et le respect d'un certain équilibre entre le temps d'apprentissage et de mise en pratique. Il est primordial que les forestiers de petite surface optimisent la rentabilité de leurs travaux en intervenant à bon escient et à temps (réduction du temps de travail), en concentrant leurs efforts sur les beaux arbres. Ainsi une réelle plus-value peut être attendue à la commercialisation. L'intérêt de conserver diverses essences dites secondaires (trembles ou bouleaux) est souvent rappelé.

Ce travail en commun et évolutif nous mène à approfondir les fondamentaux de la sylviculture d'arbres en ciblant nos efforts sur les beaux sujets d'avenir à haut potentiel de valeur ajoutée ; ainsi 80 % des actions concernent 20 % des tiges qui procureront à terme 80 % de la recette finale (loi de Pareto⁶). Chaque réunion du groupe a lieu chez l'un des participants. Il ressort de ces travaux que maintenir ou privilégier un traitement irrégulier ou en mélange est recommandé face aux changements climatiques.

C. Mannevy : l'aventure des groupes « Formation-action » va se poursuivre sur le thème peuplement mixte chêne-pin. Un recensement des parcelles de peuplements mixtes sera réalisé chez nos adhérents. Nous souhaitons également mettre en place des placettes expérimentales sur ces thèmes avec l'enregistrement de toutes les données utiles : coûts de travaux, temps d'inventaire, afin de

⁶ Le principe de Pareto, aussi appelé loi de Pareto, principe des 80-20, est un phénomène empirique constaté dans certains domaines : environ 80 % des effets sont le produit de 20 % des causes.

mieux comptabiliser le temps passé à travailler sur une parcelle.

Le rôle du Gedef est d'améliorer les connaissances des adhérents, mais aussi de les émanciper, pour qu'ils soient capables de rédiger leurs documents de gestion durable, ou d'être ainsi des interlocuteurs avertis lors des échanges avec des professionnels.

Jacques Henri, membre du groupe «Formation-action» Sylviculture dynamique.

Jacques Henri : je participe au groupe «Formation-action» sylviculture dynamique du chêne. J'apprécie ces réunions, car elles sont très concrètes sur le terrain avec des échanges d'expériences qui interrogent et confortent. L'intérêt de ce groupe est la motivation et les avis divers nous enrichissent. **De cette diversité naît la richesse !**

Le thème du chêne rejoint mes préoccupations, car le massif forestier, que j'ai acquis il y a 12 ans, comprend des plantations de chêne. Ce groupe est une opportunité relationnelle très positive, car une liberté de paroles est propice aux échanges sur des situations similaires. Nous dialoguons aussi en sous-groupe sur le PSG : j'ai décidé de rédiger moi-même ce document de gestion durable. Cela a créé

une synergie commune gagnant-gagnant, qui apporte une émulation mutuelle.

De mon point de vue, un des objectifs d'un Groupe de progrès devrait être d'encourager ses adhérents à rédiger leur PSG. Ainsi, chacun acquiert la connaissance de sa forêt, il définit sa gestion ; il sera plus impliqué à la mettre en œuvre car il l'aura décidée. C'est la base de tout ! C'est également le rôle du CRPF que d'appuyer ces initiatives par la formation des propriétaires forestiers via les Fogeфор ou autre. **Rédiger son PSG apporte beaucoup de satisfactions que l'on peut partager aussi avec ses ayants droits. ■**

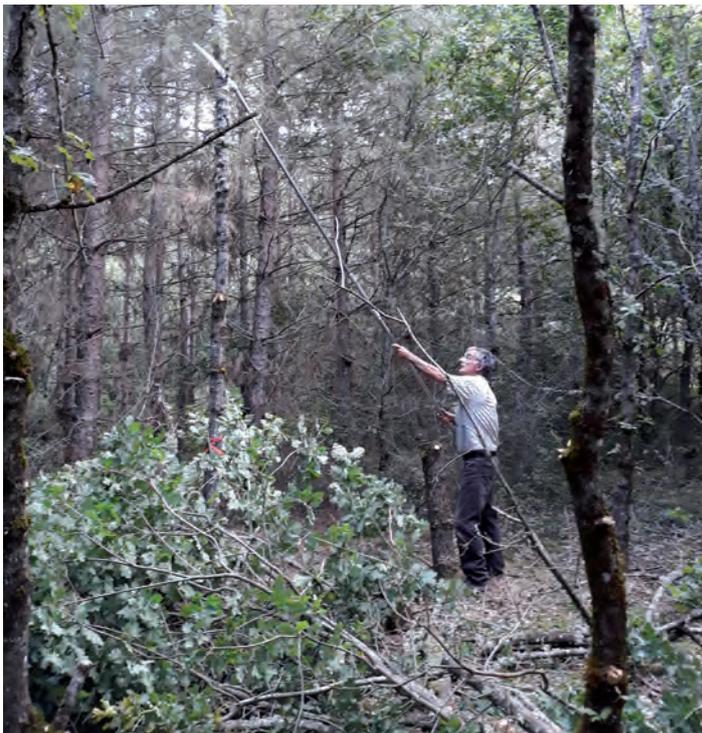
Exemple de Constats du groupe «Formation-action» Traitement irrégulier

La 1^{er} réunion fut consacrée à lister les questions du groupe :

- ➡ définir la futaie irrégulière et les fondamentaux de sylviculture irrégulière,
- ➡ comment décrire et traiter un peuplement avec des parquets ?
- ➡ ces peuplements vont-ils mieux résister au changement climatique ?
- ➡ comment noter le recouvrement au sol des cimes de chaque espèce dans chaque classe ? comment calculer la surface terrière ?
- ➡ ce traitement est-il applicable dans des forêts de petites surfaces ?
- ➡...

Un 1^{er} constat est que le traitement en futaie irrégulière est une sylviculture d'arbres et que cela demande des interventions régulières. Ce traitement peut assurer à chaque génération un revenu et favoriser la multifonctionnalité de la forêt en lien avec les souhaits du propriétaire, le maintien d'un équilibre forêt-gibier et les attentes de la société en évitant la coupe rase.

Lors de nos visites sur le terrain, nous avons compris que la 1^{er} question à se poser dans un peuplement est : « Quelles sont les tiges d'avenir susceptibles de produire du bois d'œuvre au profit desquelles il faut travailler ? ». Des interventions régulières et le maintien de mélange d'essences pour favoriser la biodiversité et la résilience du peuplement sont aussi un constat consensuel du groupe.



© X. Kasper

Une fois l'arbre désigné, une discussion s'engage avec les membres du groupe et le propriétaire pour confirmer le choix. Les travaux d'éclaircie et d'élagage sont réalisés de suite.

La maladie de l'encre complexifie la sylviculture du châtaignier

Par Cécile Robin¹, Institut national de recherche agronomique - Inra, et Jérôme Gaudry², Département de la santé des forêts - DSF

 15 min

L'évolution récente des dépérissements de châtaigniers liés à l'encre a conduit l'Inra et le DSF à analyser les causes et les effets de cette maladie. Les stations forestières restant favorables pour une production économique de bois et les recommandations sylvicoles préventives sont précisées par cet article.

¹ Directrice de recherches, UMR BIOGECO, INRA, Univ. Bordeaux, 33610 Cestas

² Adjoint au chef du pôle DSF nord-ouest

Après avoir participé à la régression de la châtaigneraie à fruit au cours du XIX^e siècle, la maladie de l'encre est devenue récemment un problème majeur en forêt, où elle complexifie la sylviculture du châtaignier.

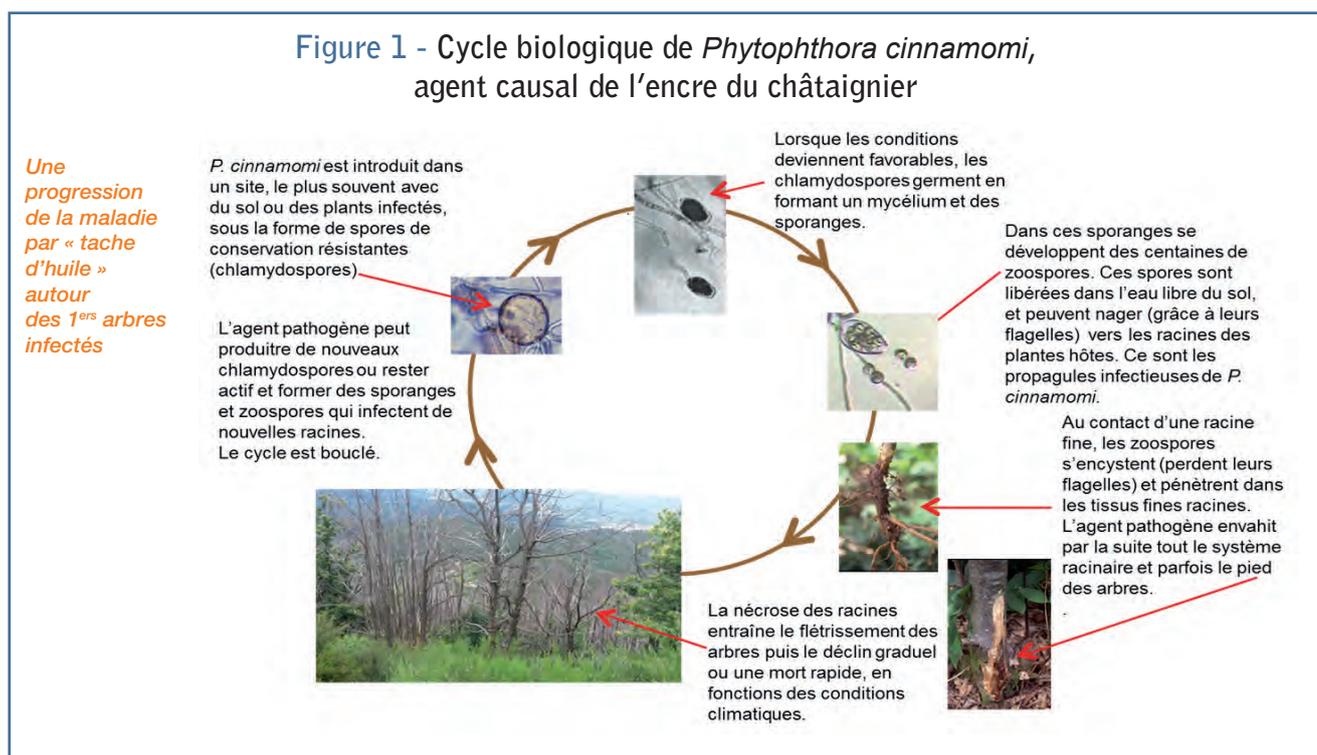
Deux agents pathogènes pour une même maladie

L'encre du châtaignier est causée par deux agents pathogènes (*Phytophthora cambivora* et *Phytophthora cinnamomi*). Ces organismes, proches des champignons, sont capables d'attaquer des arbres, en pleine vigueur, de

nombreuses espèces, dont la sensibilité varie fortement. Parmi ces dernières, le châtaignier européen (*Castanea sativa*) est l'une des plus sensibles.

P. cinnamomi et à *P. cambivora* se développent dans le sol et, lorsque les conditions sont favorables (étés pluvieux et des hivers doux), forment des spores biflagellées (zoospores, *figure 1*). Ces propagules attirées par les exsudats racinaires des plantes hôtes se déplacent de manière autonome dans l'eau libre à travers la microporosité du sol pour infecter les arbres. De ce mode de dissémination à courte distance dans le sol, il résulte une

Figure 1 - Cycle biologique de *Phytophthora cinnamomi*, agent causal de l'encre du châtaignier



progression par tache d'huile de la maladie autour des premiers arbres infectés. La dispersion à plus longue distance de ces deux *Phytophthora* se fait par le transport de sol, par les animaux et engins ou outils et par le transport de plants contaminés.

Les arbres infectés meurent plus ou moins rapidement selon le taux d'infection des racines et la co-occurrence d'autres stress (biotiques ou abiotiques).

La réémergence en forêt d'une maladie ancienne

La maladie de l'encre commence à faire parler d'elle à la fin du XIX^e siècle, époque à partir de laquelle elle est observée dans les châtaigneraies à fruit à travers l'Europe. Décrite dans le Pays basque en 1860 puis en Ardèche en 1871, elle gagne par le biais de plants contaminés l'ensemble de la zone castanéicole française dans la première partie du XX^e siècle. À cette période de déclin économique où les parcelles sont laissées à l'abandon, les dépérissements sont importants et l'encre, bien que présente, y a un rôle mal connu.

Même si Ducomet (1913) et Dufrenoy (1930) signalent respectivement des mortalités de châtaignier dues à l'encre dès 1875 en Bretagne et des dépérissements dans les taillis de châtaignier en Haut-Limousin, les cas d'encre en forêt sont rares jusqu'au début des années 2000, et cela malgré une recherche importante de l'agent pathogène au début des années 90 et la surveillance attentive des correspondants-observateurs du Département de la santé des forêts.

P. cinnamomi et *P. cambivora* ont bénéficié de conditions climatiques favorables à leur développement et dispersion entre 1999 et 2002. La sécheresse de 2003 a accentué le dépérissement, causé par les infections racinaires, et a mis en évidence des cas d'encre, notamment dans les régions soumises au climat océanique. Les foyers sont alors isolés et les zones atteintes de faible ampleur. Depuis, les signalements se multiplient dans l'ouest de la France avec, ces dernières années, une augmentation des surfaces atteintes et du niveau de dégradation des peuplements (figure 2a). Favorable aux *Phytophthora* et impactant pour le châtaignier, le contexte climatique joue donc un rôle majeur dans l'évolution de l'état sanitaire actuel des châtaigneraies. Celui-ci se dégrade dans de nombreuses régions depuis une dizaine d'années (Goudet 2016, figures 2b et c). Les signalements de dégâts d'encre sur châtaignier en forêt sont essentiellement localisés le long de la façade atlantique (figure 2a). Compte tenu des cas recensés en châtaigneraie à fruit, la distribution spatiale de *P. cinnamomi* et *P. cambivora* dans le sol est certainement plus large. C'est ce que confirment des travaux de modélisation menés par l'Inra : **les conditions climatiques actuelles et futures sont favorables à l'établissement de *P. cinnamomi* dans le sol sur la quasi-totalité du territoire** (Desprez-Loustau et al. 2007).

Figure 2 - Signalements par le DSF des dégâts d'encre en France (a) et déficit foliaire des châtaigniers mesuré dans les parcelles permanentes du réseau de surveillance systématique du DSF (b et c).

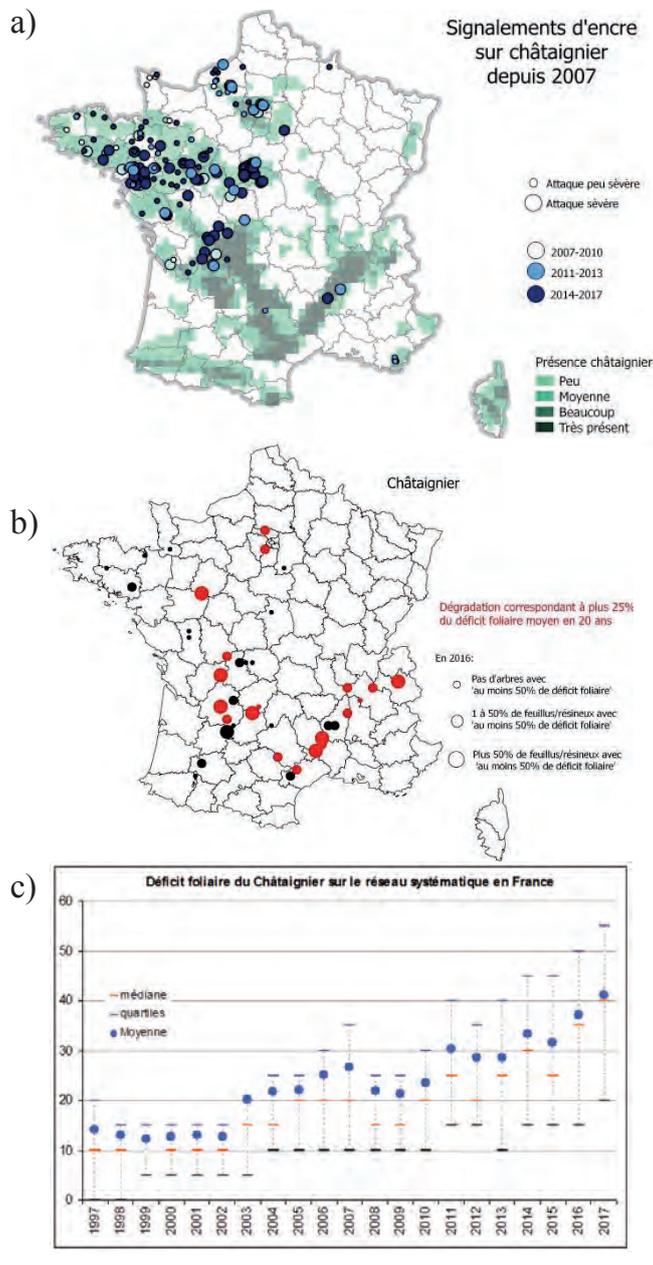


Figure 3 - De l'arbre adulte (a) aux semis (b et c), tous les stades sont atteints



© DSF nord-ouest et C. Robin© Inra

L'eau, le sol et le climat, trois facteurs déterminants pour l'encre

En favorisant la multiplication et la croissance de *P. cinnamomi* et *P. cambivora*, l'eau dans le sol est, de fait, un facteur explicatif prépondérant du niveau d'impact de la maladie. Les châtaigniers sur sols hydromorphes (hors station...) sont donc en tout premier lieu concernés par la problématique, au point où l'on conseille de **proscrire les sols avec présence de traces d'hydromorphie à moins de 50 cm pour le châtaignier**. Mais ce ne sont pas les seuls ! La présence de sols à mauvais drainage, de remontées de nappe d'eau (printemps pluvieux, coupe,...) ou les tassements de sol (même sur les cloisonnements !) augmentent considérablement le risque de dégâts d'encre.

En conditions favorables, le châtaignier est capable, en puisant dans ses réserves glucidiques, de réémettre des racines compensant celles attaquées par le pathogène. À l'inverse,

en cas de stress préalable ou ultérieur, la capacité de l'arbre à réagir est beaucoup plus faible et l'arbre peut entrer dans une phase de dépérissement avec des houppiers clairs, des mortalités de branches et l'apparition de pathogènes secondaires.

La succession de périodes pluvieuses (ou d'événements favorisant la remontée de nappe), bénéfiques à la multiplication et dispersion de *P. cinnamomi* et *P. cambivora*, et de sécheresses, engendre des dégâts importants et rapides. Les arbres soumis à ces stress hydriques se retrouvent sans aucune résilience avec un système racinaire nécrosé, non fonctionnel (Maurel *et al.* 2004). Les mortalités apparaissent donc en période de manque d'eau même si l'encre se développe en période humide.

Comment diagnostiquer la problématique ?

Le châtaignier est soumis à plusieurs problématiques sanitaires. Avant de prendre toute

Figure 4 - Différents types de symptômes sur tiges de châtaignier

a : nécrose en flamme au niveau du collet caractéristique de l'encre après écorçage sur arbre adulte, b : nécrose sur tronc caractéristique de l'encre, c : chancre du châtaignier (déformation du tronc avec mortalité au-dessus du chancre), d : maladie de Javart (complexe de champignons secondaires qui traduisent un stress des arbres).



© C. Husson © DSF

© DSF nord-ouest

décision de gestion, il est primordial de les connaître pour pouvoir agir à bon escient. Les correspondants observateurs du DSF sont là pour accompagner les gestionnaires dans leur démarche.

Les premiers symptômes d'encre témoignent de l'atteinte racinaire des arbres par *P. cinnamomi* ou *P. cambivora*. Ils sont observés sur la partie aérienne des arbres et sont non spécifiques : il s'agit de chlorose, nanification des feuilles, chute des feuilles avec éclaircissement du houppier, puis des mortalités de branches et de l'arbre entier (figure 3a). Les arbres de toutes dimensions sont atteints, du semis à l'arbre de franc pied en passant par la cépée (figure 3b). Ces symptômes peuvent être confondus avec ceux causés par des stress hydriques. Cependant, l'arrachage de semis en zone contaminée permet de facilement observer l'état du système racinaire. Lorsque *P. cinnamomi* ou *P. cambivora* infectent ces semis, les racines fines sont détruites et le pivot est nécrosé (figure 3c). Lorsque l'arbre ne dépérit pas suite à ces infections racinaires, les nécroses peuvent atteindre le collet des arbres adultes. Ces nécroses en forme de flamme pouvant s'accompagner de suintements et d'écoulements d'un liquide noirâtre, sont caractéristiques de l'encre (figure 4a). Sur troncs, les lésions causées par *P. cinnamomi* et *P. cambivora* (figure 4b) se distinguent des

chancres causés par d'autres agents pathogènes (figure 4c et d).

Pour diagnostiquer sur le terrain la maladie de l'encre, il est nécessaire de prélever des fragments de tissus corticaux nécrosés, au niveau des racines, du collet ou du tronc pour réaliser un test de détection. Celui-ci permet de confirmer la présence d'une espèce de *Phytophthora* dans les tissus végétaux. À partir de 2013, l'utilisation en routine de ces tests par les agents du DSF a permis de mieux identifier les symptômes d'encre et d'améliorer ainsi le diagnostic terrain.

Des études en cours à l'Inra ont comme objectif de mieux appréhender le risque encre pour le châtaignier. Les objectifs sont de préciser la zone de distribution des deux *Phytophthora* et pour cela d'améliorer les méthodes de détection dans le sol, d'évaluer la vulnérabilité du châtaignier à l'encre en interaction avec ses bioagresseurs et les stress abiotiques, et d'analyser le rôle de la biodiversité forestière sur la dissémination et multiplication des agents de l'encre. En effet, la diversité spécifique d'une communauté peut modifier la prévalence de maladies infectieuses à travers des effets de dilution ou d'amplification (Haas *et al.*, 2011). Ces effets de dilution ou d'amplification peuvent être liés aux différences de sensibilité des espèces végétales présentes ou à la flore du sol qui leur est associée.

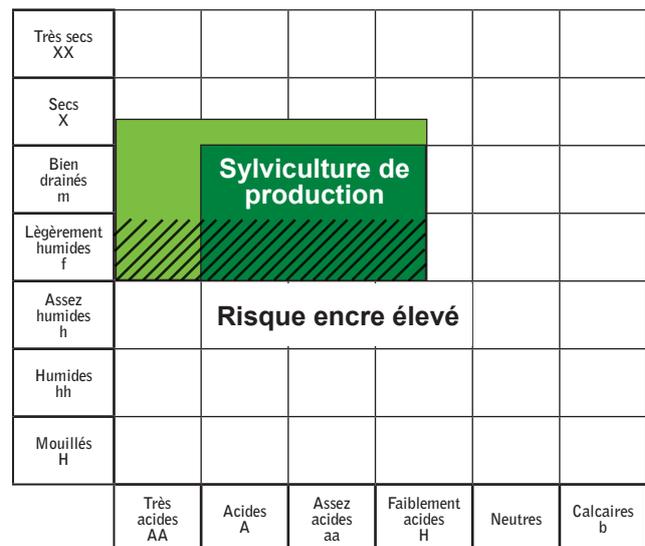
Figure 5 - Écogramme de répartition du châtaignier combinant les gradients trophiques et hydriques

La maladie de l'encre restreint les stations à châtaignier avec une bonne réserve utile et bien drainées (modifié d'après Flore Forestière Française, IDF).

Vert clair : présence de l'essence

Vert foncé : optimum stationnel pour une production de châtaignier (Flore Forestière)

Hachures : station à risque élevé d'encre



Source : expertise DSF

Tableau 1 - Les principaux facteurs de risques pour la sylviculture du châtaignier

	Risque faible	Risque modéré	Risque élevé
Sol	Sol drainant (texture sableuse à sablo-limoneuse, sans plancher argileux)	Sol à tendance limoneuse	Sol à tendance argileuse ou présence d'un plancher argileux
Hydromorphie	Pas de traces d'hydromorphie	Traces d'hydromorphie entre 50 cm et 1 m de profondeur	Traces d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur
Topographie	Haut de versant, plateau	Versant	Bas de versant, cuvette, proximité réseau hydrique
Climat	Climat continental, montagnard	Climat semi-océanique, méditerranéen	Climat océanique
Tassement de sol	Exploitation sur sol ressuyé sur cloisonnements avec rémanents	Exploitation sur sol ressuyé sans cloisonnements ou avec cloisonnements sur sol non ressuyé	Exploitation sur sol non ressuyé sans cloisonnements
Sylviculture	Éclaircie légère en sylviculture dynamique	Coupe rase, éclaircie dans un peuplement en retard d'éclaircie	Diminution brutale de densité, coupe rase sur plus d'un hectare Surdensité

Quelle sylviculture pour le châtaignier demain ?

Bien que présent sur de grandes surfaces du fait de sa plasticité dans le jeune âge, le châtaignier est une essence exigeante pour produire des bois de qualité (figure 5). L'encre a notamment restreint ses stations de production aux stations avec **une bonne réserve utile et bien drainées**. Les objectifs de production doivent donc tenir compte de ce changement majeur et limiter l'implantation du châtaignier à ces stations (Tableau 1).

Le châtaignier nécessite une sylviculture dynamique, mais des interventions douces sans tassement de sol. Les éclaircies devront être progressives pour éviter remontées de nappes ou mise en lumière brutale des peuplements. Toute déstructuration de peuplements de châtaignier risque de conduire à des dépérissements tout comme une sylviculture trop conservatrice. Les peuplements vieillissants, en surdensité seront donc complexes à gérer, le forestier devant trouver l'équilibre entre le risque d'une éclaircie de rattrapage trop forte (accentuant les effets de l'encre) et le risque de dépérissement inhérent au vieillissement des châtaigniers.

En tout état de cause, l'exploitation de l'essence devra être soignée et respecter scrupuleusement les sols.

Tout sol tassé accroît considérablement les risques de mortalités de châtaignier liées à l'encre. Compte tenu de la difficulté de gestion des châtaigneraies à l'heure actuelle, **la mise en place de cloisonnements est une nécessité absolue**. Même dans ces conditions, il convient d'intervenir sur des sols ressuyés. Un tassement des cloisonnements peut entraîner une perturbation des circulations latérales d'eau et là aussi un risque d'atteinte par l'encre.

Lorsque l'encre a été diagnostiquée dans un site, il faut envisager une substitution d'essence.

Les plantations d'essences sensibles à *P. cinnamomi* et *P. cambivora* (châtaignier, chêne rouge, chêne pédonculé...) sont à proscrire. Le chêne sessile peut être une essence de remplacement de choix dans les meilleures stations. Lorsque l'hydromorphie est plus marquée et/ou la pluviométrie plus limitée, le gestionnaire pourra se tourner vers des résineux tels les pins.

Autre élément important, le choix des plants. Il convient d'exiger auprès du pépiniériste des plants sains sans traitement fongicide préalable, qui masquerait les symptômes sans se débarrasser du pathogène, qui pourrait alors proliférer en forêt.

Dans un contexte de reboisement, la maîtrise de la végétation sera un élément d'importance avec une concurrence forte des rejets et dragons de châtaignier les premières années.

Afin de reconstituer les châtaigneraies, des introductions de châtaigniers asiatiques (*Castanea crenata* et *C. mollissima*) ont été réalisées dès le début du XX^e siècle, mais ont été arrêtées à partir de 1926 pour ne pas introduire l'agent du chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*). Ces tentatives de reconstitution, réalisées dans des régions où l'encre était observée, ont permis de confirmer la résistance de ces espèces asiatiques et de leurs hybrides avec le châtaignier européen. Mais ces espèces et hybrides se

sont avérées mal-adaptés au climat français. Ces observations ont conduit l'Inra, à partir de 1946, à mettre en place un programme d'amélioration génétique dont l'objectif principal était la création de porte-greffes hybrides résistants à l'encre (Ramos Guedes-Lafargue & Salesses, 1999). Des variétés clonales hybrides sont ainsi utilisées en production fruitière comme porte-greffe. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de variétés améliorées de châtaignier européen résistantes à l'encre et adaptées à une production forestière. Des études sont en cours pour mieux comprendre le déterminisme génétique de la résistance à l'encre et le mettre à profit dans un programme d'amélioration (Robin *et al.*, 2006). ■

À retenir

Les dépérissements de châtaigniers liés à l'encre augmentent considérablement depuis le début des années 2000. La pression des deux agents pathogènes en cause (*Phytophthora cambivora* et *P. cinnamomi*) conduit à une réduction des stations forestières possibles pour l'essence. La sylviculture du châtaignier devient complexe. L'article apporte des clés permettant d'identifier et comprendre la maladie, d'objectiver le niveau de risque en forêt afin de pouvoir mieux en appréhender la gestion.

Mots-clés : Maladie de l'encre, châtaignier, santé des forêts.

Bibliographie :

Goudet M., 2016. *Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, quelques informations sur l'état sanitaire de la forêt française.*

Lemaire J., Saintonge F.-X., Robin C., Rabin J.-F., & Soutrenon A., 2005. Dossier : *Les pathologies du châtaignier évoluent, ses sylvicultures aussi.* Forêt-entreprise, 165 (2005/5), 17-49.

Desprez-Loustau M.-L., Robin C., Reynaud G., Déqué M., Badeau V., Piou D., Husson C., Marçais B., 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. *Can J*

Plant Pathol. 249 (2007) 246-253.
Haas *et al.* 2011. Forest species diversity reduces disease risk in a generalist plant pathogen invasion. *Ecology Letters*, 14 : 1108-1116.

Maurel M., Robin C., Simoneau T., Loustau D., Dreyer E., Desprez-Loustau M. L., 2004. Stomatal conductance and root-to-shoot signalling in chestnut saplings exposed to *Phytophthora cinnamomi* or partial soil drying. *Functional Plant Biology* 31, 41-51.

Robin C., Morel O., Vettrano A.M., Perlerou C., Diamandis S, Vannini A., 2006. Genetic variation in susceptibility to *Phytophthora cambivora* in European chestnut (*Castanea sativa*). *Forest Ecology Management* 226:199-207.

Ramos Guedes-Lafargue M., Salesses G., 1999. Ink disease resistance: some preliminary elements from the study of different crosses. *Acta Horticulturae*, 494 : 355-361.

Grente J, 1961. *La maladie de l'encre du châtaignier.* *Annales des Epiphyties* 12 : 5e59.

Schad C., Solignat G., Grente J., Venot P., 1952. *Recherches sur le châtaignier à la station de Brive.* *Annales de l'amélioration des plantes* III, 376-458.

Ducomet V., 1913. *Recherches sur les maladies du chêne et du châtaignier en Bretagne.* *Ann. Epiph.* 1, 87-105.

Dufrenoy J., 1930. *La lutte contre les maladies du châtaignier.* *Ann. Epiph.* 16 (1), 25-49.

PARUTIONS



Index acta biocontrôle 2019 : la référence pour comprendre et adopter le biocontrôle

Mis à jour chaque année, ce guide pratique donne les clés pour comprendre le fonctionnement des solutions de biocontrôle et leur application concrète dans différentes filières de productions végétales, ainsi qu'un répertoire actualisé des substances, produits de biocontrôle et macro-organismes commercialisés en France.

Nouveauté ! Les produits utilisables en agriculture biologique (UAB) et ceux dont l'emploi est autorisé dans les jardins par les amateurs sont clairement identifiables dans les répertoires.

Un extrait à feuilleter : <https://www.calameo.com/read/005661387b8c5204eeb7c?authid=trYvMmi5SyaQ>
La fiche produit de l'ouvrage sur le site [www.acta-editions.com](https://acta-editions.com/shop/product/index-acta-biocontrôle-2019-2013?category=1) : <https://acta-editions.com/shop/product/index-acta-biocontrôle-2019-2013?category=1>

L'index acta phytosanitaire 2019, 1040 pages, 24 cm x 15,5 cm, 46 € TTC ;
commande <https://acta-editions.com>

ou Acta éditions, Corlet logistic, ZA La Tellerie, CS 20016, 61438 Flers cedex



L'école de la forêt, jeux et apprentissages dans les bois pour aventuriers en herbe

Les jeux et apprentissages en forêt prennent une place plus importante dans l'éducation des enfants en Angleterre, au Danemark, ou en Allemagne.

Les activités et jeux, décrits avec les conseils pédagogiques, développent les qualités sociales, émotionnelles et cognitives des enfants de 3 à 11 ans, dans le respect de soi, de l'autre et de la nature.

Éditions Ulmer, 160 pages, 20 x 14,5 cm, 14,95 € ; www.editions-ulmer.fr



Le scolyte

Un polar rural forestier, co-auteurs Yves Lescourgues, ancien directeur du CRPF Aquitaine et Jacques Ripoché, journaliste.

Après la tempête Klaus de janvier 2009, le scolyte a proliféré dans la forêt landaise sinistrée, provoquant des dégâts considérables, dans les Landes déjà meurtries. Une série d'événements sanglants vient ébranler encore un peu plus le système forestier. Du massif landais accroché à ses traditions, des pays baltes à l'Uruguay, une enquête complexe et un suspense garanti.

Éditions Société de Borda, 321 pages, 20 € ;

www.societe-borda.com/editions.html



La lande, le pin, le feu, le grand incendie de 1949

Un ouvrage de l'historien José Cubéro, pour découvrir l'histoire sociale de la forêt landaise et notamment l'épisode du grand incendie de 1949.

La forêt, exploitée dans l'entre-deux-guerres, puis peu entretenue, subit une décennie d'incendies de 1937 à 1947, ponctuée par le cataclysme de 1949.

Il fit 82 victimes, dont de nombreux habitants de la forêt qui, face au feu, avaient pour tradition d'aller le combattre. Il ne restait plus qu'à restaurer la forêt, tout en s'interrogeant sur la meilleure façon de la préserver, avec le gemmage disparaissant progressivement au profit de l'usine à bois.

Aujourd'hui, la réflexion des experts et des aménageurs porte aussi sur son devenir à l'horizon 2050.

Éditions Cairn, 232 pages, 24 x16 cm, 18 € ;

www.editions-cairn.fr

FORESTER® BY ARYSTA

Insecticide forêt, plantations et bois abattus

A CHOISI ADKALIS

POUR SA DISTRIBUTION EN FRANCE

Entre les experts du bois et de la préservation, la forêt grandit !

Produit pour les professionnels : Utilisez les produits phytopharmaceutiques avec précaution. Avant toute utilisation, lisez l'étiquette et les informations concernant le produit. Avant toute utilisation, assurez-vous que celle-ci est indispensable. Privilégiez chaque fois que possible les méthodes alternatives et les produits présentant le risque le plus faible pour la santé humaine et animale et pour l'environnement, conformément aux principes de la protection intégrée. Consultez : <http://agriculture.gouv.fr/ECOPHYT> - Cyperméthrine 100 g/L (9,8% poids) - Émulsion de type aqueux (EW). AMM n°2080097 (Arysta LifeScience Benelux Sprl). ATTENTION. H302 : Nocif en cas d'ingestion. H317 : Peut provoquer une allergie cutanée. H410 : Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme. EUH401 : Respecter les instructions d'utilisation pour éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement.



adkalis

CONTACT :
Tél. : +33 (0)5 64 31 06 85
Email : commandes-adkalis@berkem.com

www.adkalis.com
f in t p ▶

adkalis est une filiale du
b groupe berkem



Pourquoi choisir du plant en motte ?

Reprise garantie à 90%*

+

Adaptation aux changements climatiques

+

Sylviculture moderne et performante

**Capacité de production
+ de 20 millions de plants par an
Pins, Douglas, Chênes...**

*Après acceptation du contrat de fourniture et de garantie