

Vue sur la sapinière du pays de Sault au cœur des Pyrénées ariégeoises et audoises.



© F. Giraud, CNPF-IDF

Jumelles et satellites : des outils pour la surveillance sanitaire des forêts

Christophe Drénou¹⁾, Jonas Lambert, Véronique Chéret²⁾

La surveillance sanitaire de nos forêts se fait aujourd'hui à l'échelle de l'arbre, au sein de placettes de faible superficie. La télédétection pourrait permettre de suivre la dynamique d'un dépérissement à l'échelle de territoires beaucoup plus grands, mais comment passer des jumelles aux satellites et vice versa ? Tel est l'enjeu de cette étude menée sur le sapin pectiné en Midi-Pyrénées.

1) CNPF-IDF Toulouse

2) Université de Toulouse, INPT, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, UMR 1201 DYNAFOR

3) OPCC, <http://www.opcc-ctp.org>.

La télédétection est un outil qui peut permettre de suivre l'évolution d'un dépérissement forestier à l'échelle de vastes massifs. Cependant, la méthode nécessite une validation par croisement des données satellitaires avec des observations d'arbres dépérissants sur le terrain. Cela sous-entend la mise au point d'un protocole de diagnostic des dépérissements, ainsi que l'élaboration d'un plan d'échantillonnage adapté. Tel est le double objectif de cette étude réalisée dans le cadre de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique³⁾ L'essence cobaye est le sapin pectiné, espèce pour laquelle de nombreux dépérissements sont signalés par le Département de la Santé des Forêts depuis les années 1990, en particulier dans le pays de Sault, au cœur des Pyrénées ariégeoises et audoises.

Les jumelles pour le visible

La méthode ARCHI

Un dépérissement est un phénomène évoluant au cours du temps qui traduit une altération de l'aspect extérieur d'un arbre (mortalité de branches, réduction de la croissance, feuillage anormal...). Si la situation semble parfois inquiétante, l'expérience montre qu'un dépérissement n'entraîne pas systématiquement la mortalité de l'individu. Il ne présume pas de causes particulières, contrairement aux maladies provoquées par un seul agent biotique ou abiotique. Ainsi, dans le terme « dépérissement » émane l'idée d'une cause non identifiée ou non immédiatement identifiable avec certitude. À l'inverse d'un animal qui conserve

une forme globale identique durant toute son existence, un arbre change d'architecture en se développant et en réagissant aux stress du milieu. C'est grâce à cette propriété que l'appréciation visuelle donne tant d'informations. **Pour un diagnostic sanitaire, les jumelles sont donc des instruments indispensables.**

Avec l'arrivée de nouveaux concepts en matière d'architecture végétale (ordre de ramification, unité architecturale, réitération...), la lecture des arbres s'est perfectionnée et a pris une dimension scientifique. Elle permet désormais de pronostiquer l'avenir proche des arbres dépérissants. Le principe de la méthode, dite « méthode ARCHI », est de décomposer l'arbre en deux images. La première regroupe les symptômes de dégradation du houppier (appauvrissement de la ramification, mortalité...); la deuxième concerne les processus de restauration (redressement de branches, développement de gourmands...). La comparaison des deux approches permet ensuite de porter un diagnostic sur l'arbre, le nombre de résultats possibles étant limité à six :

- > l'arbre sain (développement normal),
- > l'arbre stressé (écart à la normale),
- > l'arbre résilient (retour à la normale),
- > l'arbre en descente de cime (formation d'un houppier à un niveau inférieur),
- > et l'arbre en dépérissement irréversible (point de non-retour à la normale),
- > l'arbre mort.

L'originalité de la méthode ARCHI est triple. Une attention particulière est portée aux gour-

mands. Ne pas tenir compte de ces structures vivantes, parfois vigoureuses, parfois chétives, ne donnerait qu'une vision partielle de l'état physiologique d'un arbre. Comme chaque espèce présente des caractéristiques architecturales uniques, la méthode ARCHI se décline essence par essence. Enfin, les observations nécessaires au diagnostic sont hiérarchisées et synthétisées sous forme de questions à réponse binaire oui/non dans des clés de détermination.

Le cas du sapin pectiné

L'architecture du genre *Abies* a fait l'objet de plusieurs travaux (Drénou *et al.*, 2013). Pour cette étude, les critères architecturaux retenus

concernent la mortalité, la densité du feuillage et les gourmands. Afin de limiter les interférences entre les symptômes d'un dépérissement et ceux liés à la concurrence entre végétaux, seuls les arbres de l'étage dominant sont concernés par le diagnostic. Pour les mêmes raisons, seule la partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence est observée pour la notation des symptômes de dégradation.

La mortalité est souvent considérée comme le symptôme le plus évident d'un dépérissement. Il convient cependant de ne pas confondre les axes morts entre eux.

Par exemple pour le sapin pectiné, il existe

Figure 1 - Les trois types de gourmands chez le sapin pectiné. Orthotrope (en haut), plagiotrope (au milieu) et agéotrope (en bas).

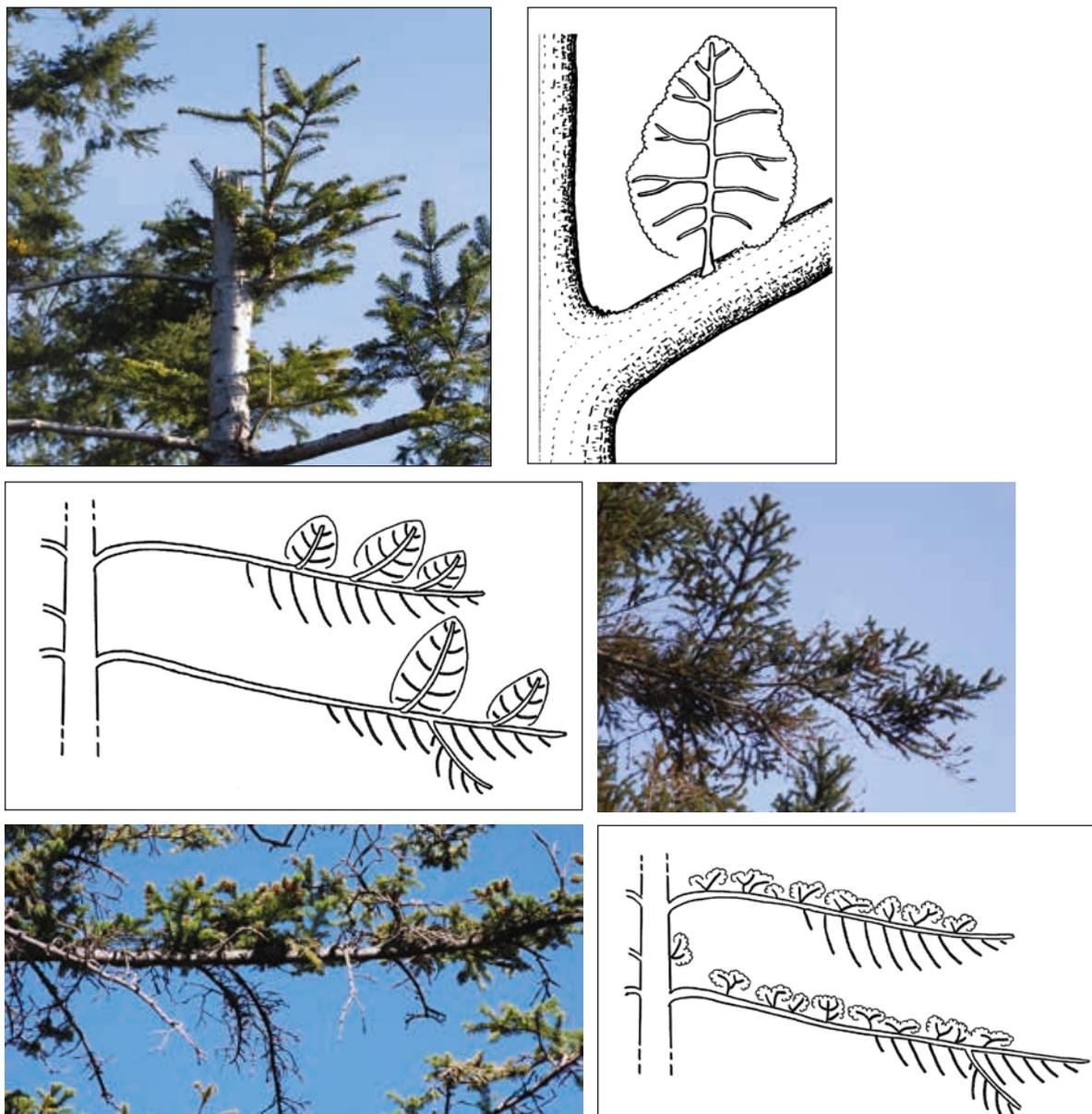
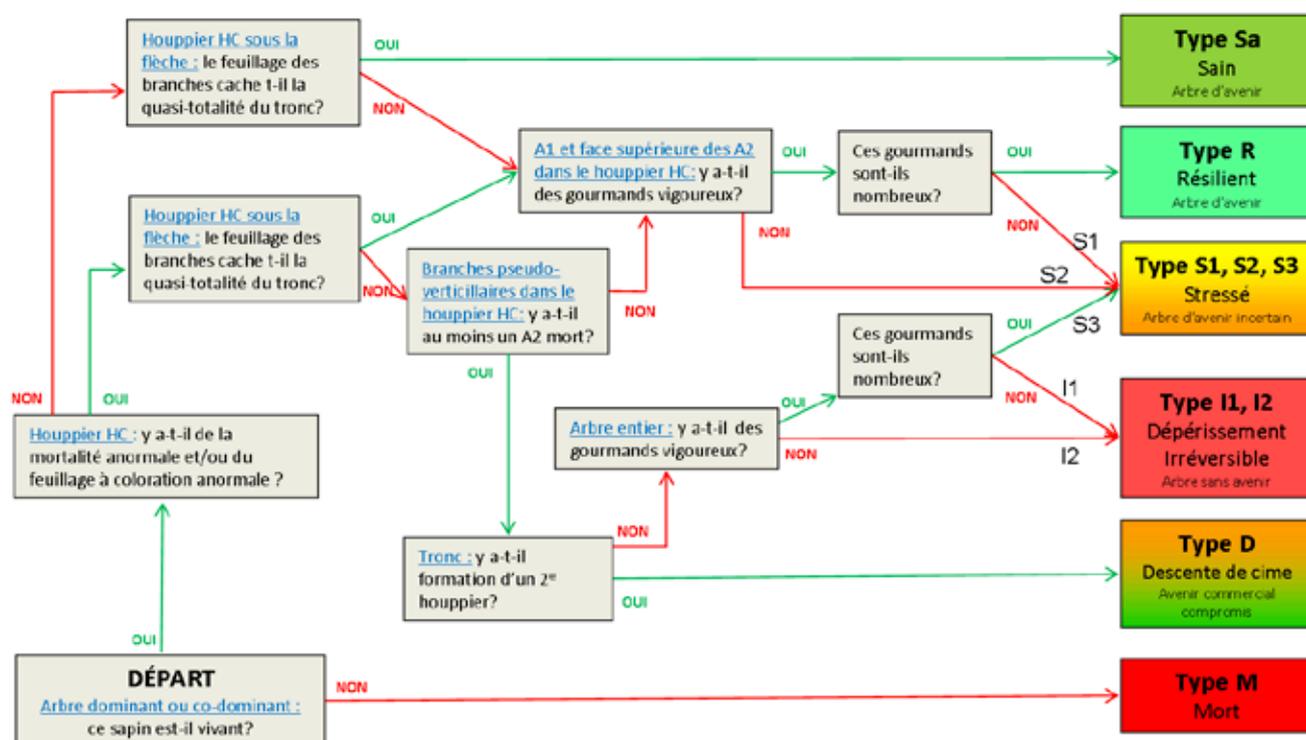


Figure 2 - La clé de détermination des types ARCHI utilisée pour le sapin pectiné (*Abies alba*)



Houppier HC ou houppier Hors Concurrence : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.
Flèche : partie sommitale du tronc comprenant les six derniers étages de branches.
A1, A2, A3 : le tronc est l'axe d'ordre 1 (A1), il porte des étages de branches appelées A2, lesquelles portent des rameaux A3. L'ordre de ramification du sapin est de 5.
Gourmands vigoureux : gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale, une forte croissance et une sexualité absente ou rare.
Gourmands nombreux : gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.
2e houppier : situé sous le houppier HC, est constitué de branches et de gourmands vigoureux, ces derniers étant hiérarchisés entre eux (soit dominants, soit dominés).

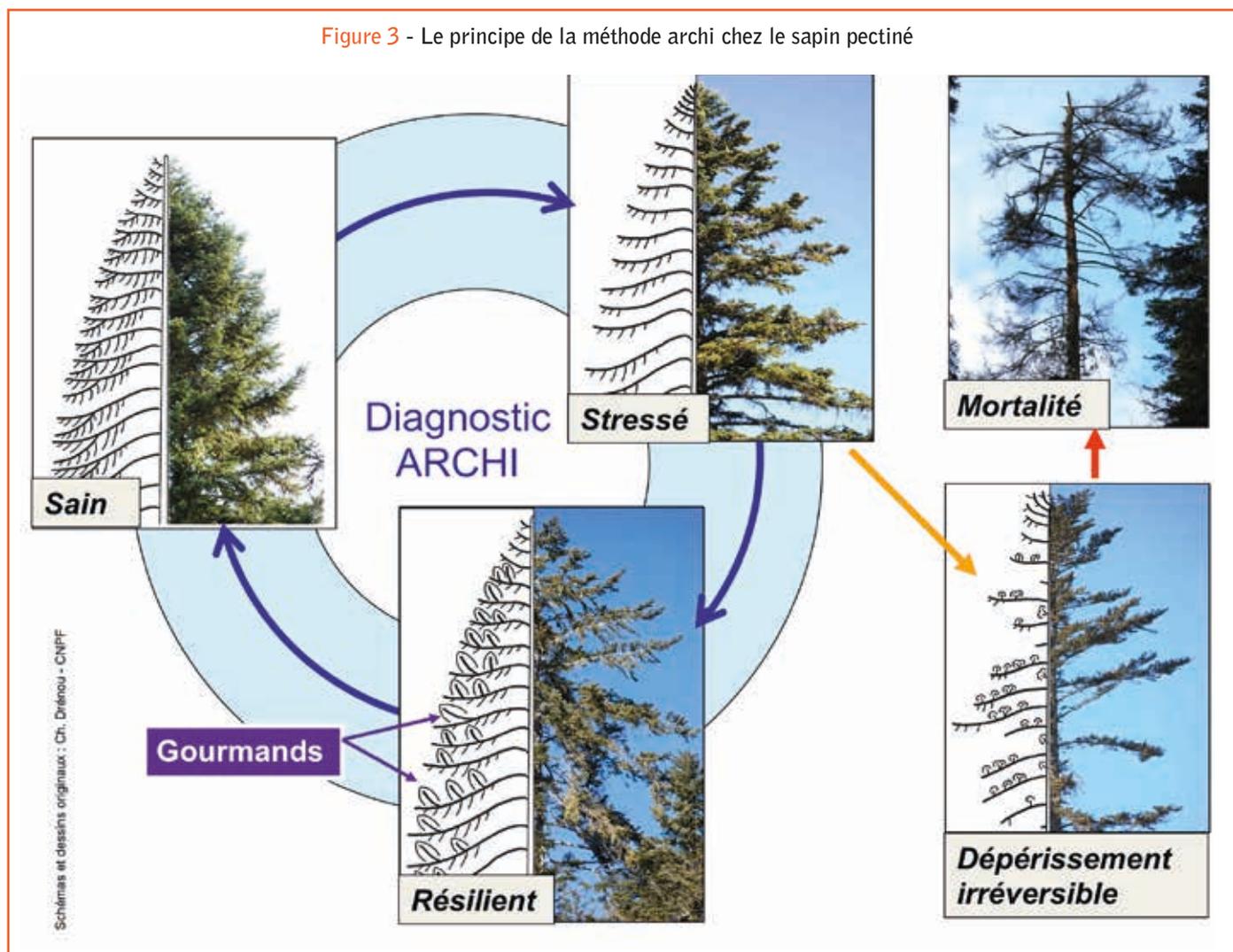
cinq catégories d'axes. L'axe issu de la graine est dénommé axe d'ordre 1 (A1), il porte des axes d'ordre 2 (A2) qui se ramifient en produisant des axes d'ordre 3 (A3), et ainsi de suite. Leur distinction se fait sur la base de critères morphologiques, mais les fonctions de chaque catégorie diffèrent également. L'A1 est l'organe d'exploration verticale du milieu, les A2 explorent horizontalement l'espace, les A3 ont un rôle essentiellement d'interception de la lumière, et les axes A4 portent la sexualité mâle.

Les axes d'ordre 5 sont peu nombreux, de petite taille et ne portent pas de sexualité. La mortalité concernant les axes A4 et A5 est liée à leur faible durée de croissance ; elle est normale et passe inaperçue. Celle survenant sur les branches basses situées à l'ombre ou celle visible sur les rameaux A3 internes au houppier s'expliquent par une pénurie en lumière. En revanche, dès que la mortalité concerne des axes A3 en pleine lumière, ou pire, des A2 entiers, alors il s'agit de symptômes de dépérissement. La flèche (extrémité de l'A1) peut également être touchée.

La répartition et la densité du feuillage sont directement liées au développement du sapin, mais attention aux apparences ! La transparence d'un feuillage n'est pas systématiquement due à une perte foliaire. Elle peut être la conséquence d'une forte croissance se traduisant par un plus grand espacement des étages de branches le long du tronc. À l'inverse, un feuillage dense reflète parfois un brutal tassement des étages de branches. Malheureusement, les observations deviennent vite problématiques quand les arbres dépassent 25 mètres de hauteur, surtout en forêts denses. Par simplification, nous avons considéré, pour un sapin sans anomalie architecturale, que le feuillage porté par les branches doit être suffisamment dense pour cacher la quasi-totalité du tronc.

Le sapin pectiné, au cours de la ramification, n'utilise pas tous les bourgeons formés à l'aiselle des aiguilles. Certains restent latents pendant plus d'une année avant de se développer. Ils restent au niveau de l'écorce et suivent la croissance secondaire de l'axe porteur. Cette attente peut durer plusieurs dizaines d'années

Figure 3 - Le principe de la méthode archi chez le sapin pectiné



(jusqu'à 35 années au moins selon Taugourdeau, 2011). Quand les bourgeons latents entrent en activité, ils donnent naissance à des structures nommées « gourmands » ou « axes épïcormiques ».

Les *Abies* sont connus pour produire des gourmands. Ceux-ci sont reconnaissables : ils apparaissent en dehors des zones habituelles de ramification sur le tronc, sur la face dorsale des A2, ou à proximité des axes morts et cassés. Les gourmands les plus vigoureux sont visibles à l'œil nu. Ils sont qualifiés d'orthotropes (du grec « *orthos* » : droit et de « *tropos* » : direction) lorsqu'ils présentent une symétrie axiale et une direction de croissance verticale ; et de plagiotropes (du grec « *plagios* » : oblique) si leur symétrie est bilatérale et leur direction de croissance horizontale à oblique. D'autres gourmands nommés agéotropes (du grec « *a* » : sans, « *géo* » : terre et « *tropos* » : direction) ne présentent aucune symétrie, aucune direction de croissance privilégiée, et ont une croissance très limitée, tant en longueur qu'en épaisseur (figure 1).

Quand un sapin s'écarte de la normale, il tente d'y revenir de différentes façons. La plus rapide et la plus efficace est la production de gourmands. On les estime nombreux quand ils sont présents sur plus de 50 % des A2 et qu'ils recouvrent ces derniers sur plus du quart de la longueur. Sur l'A1, les gourmands sont jugés nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.

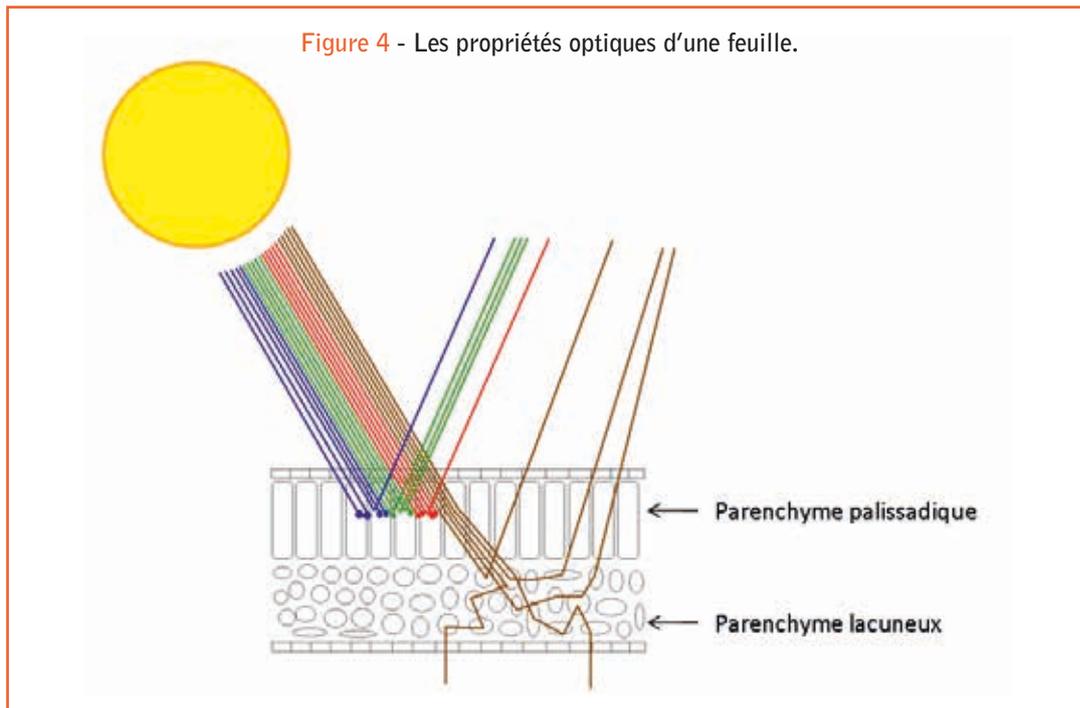
C'est en fonction de l'ampleur de la mortalité et du déficit foliaire d'une part, et en fonction de l'importance des gourmands d'autre part, qu'un diagnostic est établi (figures 2 et 3).

Les satellites pour l'invisible

La méthode ARCHI décrite précédemment s'appuie sur une analyse morphologique des arbres. Reflète-t-elle leur activité photosynthétique ? Mais comment évaluer cette dernière ? **Deux feuilles de couleur identique n'ont pas nécessairement le même rendement en termes de CO₂ absorbé !** Les images prises par les satellites nous apportent des réponses.



La plus grande partie de la lumière visible est absorbée au niveau du parenchyme palissadique riche en chlorophylle, tandis que presque la moitié du rayonnement proche infrarouge est réfléchi par le parenchyme lacuneux riche en gaz (bleu, vert et rouge: rayonnements bleus, verts et rouges; marron: rayonnement proche infrarouge).



Les propriétés optiques des feuilles

Même si les plantes nous apparaissent vertes, la réflectance²⁾ dans le vert n'excède pas les 10-15 % de la lumière incidente. C'est pour les rayonnements invisibles, en particulier dans le proche infrarouge (longueur d'onde comprise entre 700 nm et 1 300 nm) que la réflectance est la plus forte. Le proche infrarouge (PIR) traverse les feuilles jusqu'au parenchyme lacuneux, lieu d'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone, et c'est à ce niveau qu'il est réfléchi. Toute déstructuration cellulaire de ce parenchyme entraîne une diminution de la réflectance dans le PIR. Ce phénomène est na-

turel en automne, au cours de la sénescence des feuilles, mais il se produit aussi après un stress (figure 4).

La chlorophylle absorbe dans le rouge et seul ce pigment possède cette propriété. Le rouge présente ainsi une très faible réflectance. D'autant plus faible que la concentration en chlorophylle, reflet de l'état de santé d'une plante, est grande. Rouge et PIR étant deux régions adjacentes du spectre lumineux, la faible réflectance dans le rouge est donc immédiatement suivie par une forte réflectance dans le PIR (figure 5).

2) En optique, et en particulier en photométrie, la réflectance désigne le rapport entre le flux lumineux réfléchi Φ_r et le flux lumineux incident Φ_0 , également nommée facteur de réflexion.

Nm = Nanomètre

La végétation a une faible réflectance dans le visible et une réflectance élevée dans le proche infrarouge (bleu, vert et rouge: rayonnements bleus, verts et rouges; marron: rayonnement proche infrarouge).

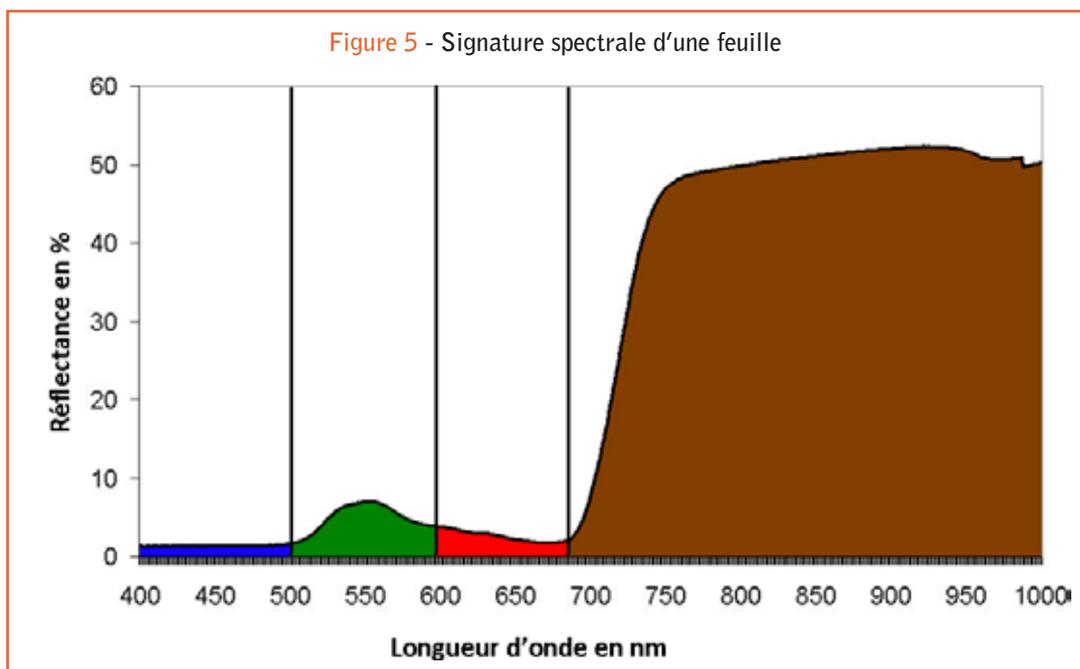
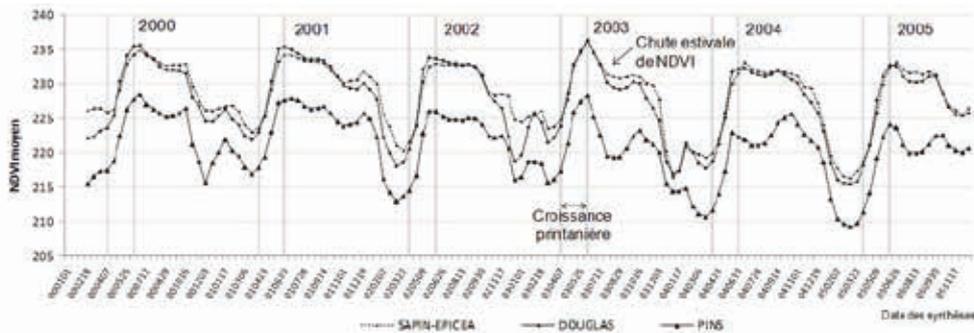
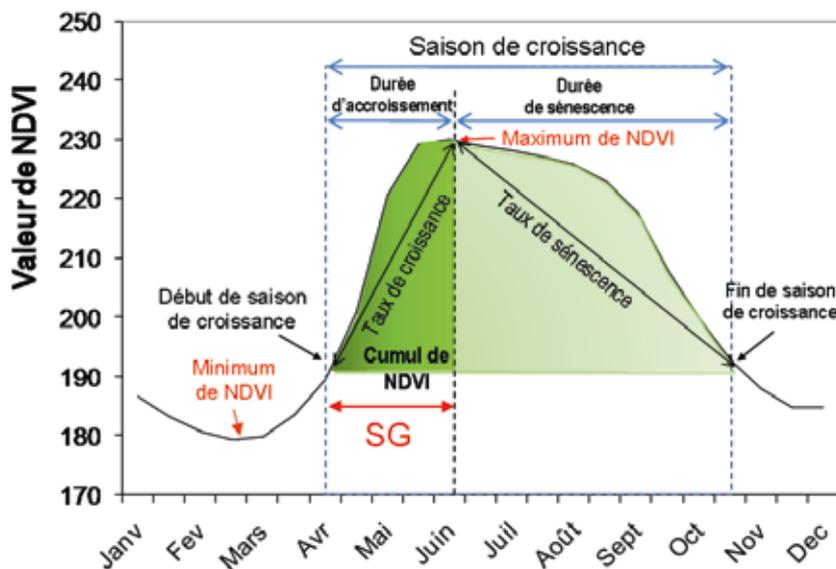


Figure 6 - Profils pluriannuels de NDVI pour des peuplements de sapin-épicéa, de douglas et de pins.



Pour des facilités de traitement informatique, l'axe des NDVI est gradué de 205 à 240 (Chéret et al., 2011).

Figure 7 - Profil annuel du NDVI



La somme des NDVI sur la durée de croissance végétale, de mi-avril à fin juin, correspond à l'indicateur SG (« Spring Greenness ») retenu pour cette étude. Pour des facilités de traitement informatique, l'axe des NDVI est gradué de 170 à 250 (figure modifiée d'après Reed et al., 1994).

La différence de réflectance entre le rouge et le PIR est corrélée au stade phénologique des plantes ainsi qu'à leur état de santé. Elle sert à calculer des indices de végétation réduisant l'information spectrale à une valeur unique. Le NDVI, Indice de Végétation par Différence Normalisée, est le plus utilisé (Rouse *et al.*, 1974). Il est égal à la différence des réflectances entre le PIR et le rouge rapportée à la somme de ces deux réflectances. La normalisation par la somme des réflectances permet de réduire les effets d'éclairage. Les mesures de NDVI sont comprises entre -1 et 1.

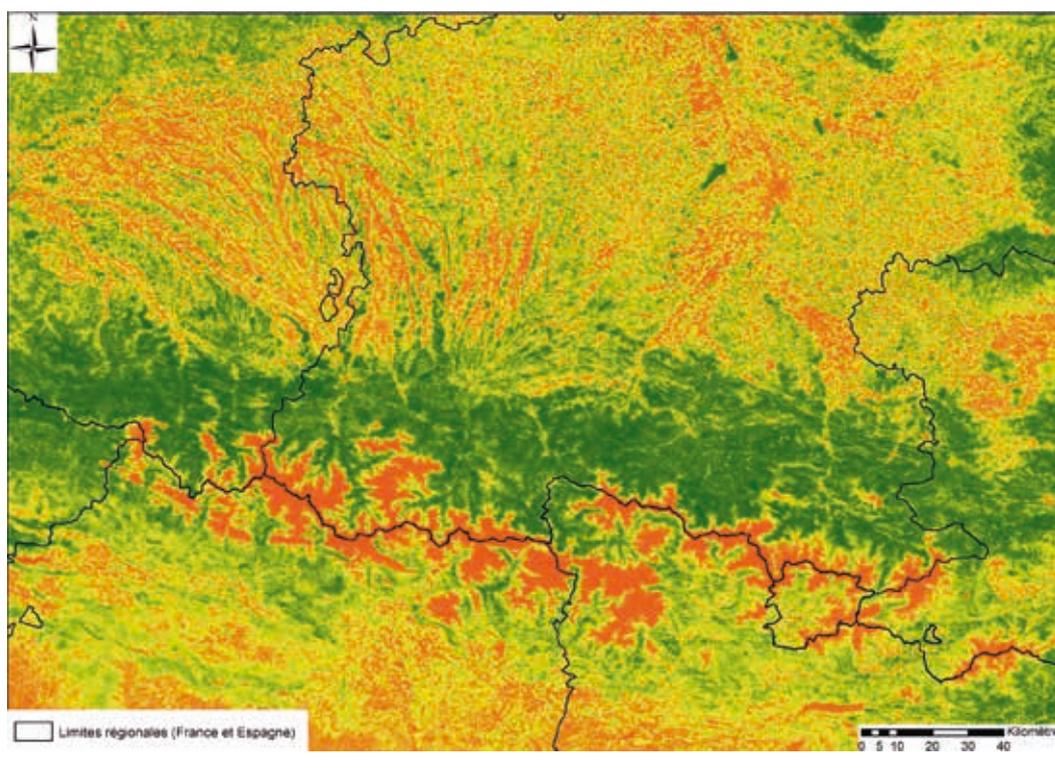
Le cas des forêts de résineux

L'étude de la végétation par le NDVI doit tenir compte du type de couvert végétal. Quand celui-ci est épais et dense, que du ciel on ne voit que la canopée, alors le signal enregistré provient de la forêt elle seule. Par contre, quand le couvert végétal n'est pas fermé, certaines zones situées sous la canopée sont visibles. Dans ce cas, la proportion du signal enregistré qui provient réellement de la végétation est égale à la proportion du couvert végétal. Enfin, si une forêt est constituée d'un mélange d'essences, le signal global sera un mélange de

deux signatures spectrales. L'intérêt des forêts de résineux, souvent monospécifiques, denses et occupant de grandes surfaces, est de limiter ces inconvénients.

Des études antérieures sur des forêts de résineux ont montré que les variations intra et interannuelles du NDVI permettent de mettre en évidence les différentes phases d'un cycle phénologique. Ainsi, la date et le maximum de NDVI indiquent la fin du développement printanier avec un niveau maximum d'activité photosynthétique, alors que le démarrage de la phase de sénescence s'accompagne d'une baisse progressive de NDVI (figure 6 - Chéret *et al.*, 2011). Ces résultats ont permis de retenir un indicateur annuel de vigueur de la végétation traduisant quantitativement l'activité végétale durant la période d'accroissement printanier. Cet indicateur est le SG (« Spring Greenness »). Déjà utilisé dans plusieurs études (Chéret et Denux, 2007 ; Lambert *et al.*, 2012), le SG est obtenu en faisant la somme des NDVI sur la durée de croissance végétale, de mi-avril à fin juin. Sa valeur permet de caractériser chaque année et d'indiquer, par comparaison, les fluctuations interannuelles (figure 7).

Figure 8 - Image de l'indice NDVI prise par le satellite MODIS le 26 juin 2011 sur la chaîne des Pyrénées. Plus la couleur verte est foncée et plus la valeur du NDVI est forte.



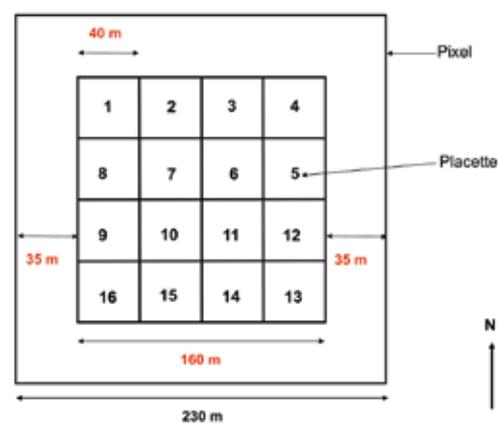
Application dans les Pyrénées

Protocole d'échantillonnage

Le site d'étude est centré sur le Pays de Sault au cœur des Pyrénées ariégeoises et audoises. Le sapin pectiné y recouvre près de 15 000 hectares, ce qui représente 36 % de la surface boisée. Depuis les années 90, le DSF³⁾ enregistre des dépérissements sur les sapins pectinés de cette région et des mortalités rapides et importantes ont été recensées en 2003 et 2004.

En télédétection il existe plusieurs types d'images NDVI satellitaires pour l'étude des peuplements forestiers. Les images à haute résolution spatiale ont souvent une faible fréquence d'acquisition, ce qui diminue le nombre d'images utilisables. Les images à basse ou moyenne résolution spatiale présentent au contraire une forte répétitivité (tous les jours), ce qui permet de suivre finement l'évolution de l'activité de la végétation. Au vu de la dimension importante du territoire étudié et du caractère évolutif des dépérissements, la deuxième option est choisie. Ainsi, des séries temporelles d'images issues du satellite MODIS Terra, produites à une résolution de 250 mètres, et synthétisées tous les 16 jours, sont utilisées (Produit MOD13Q1 collection 5).

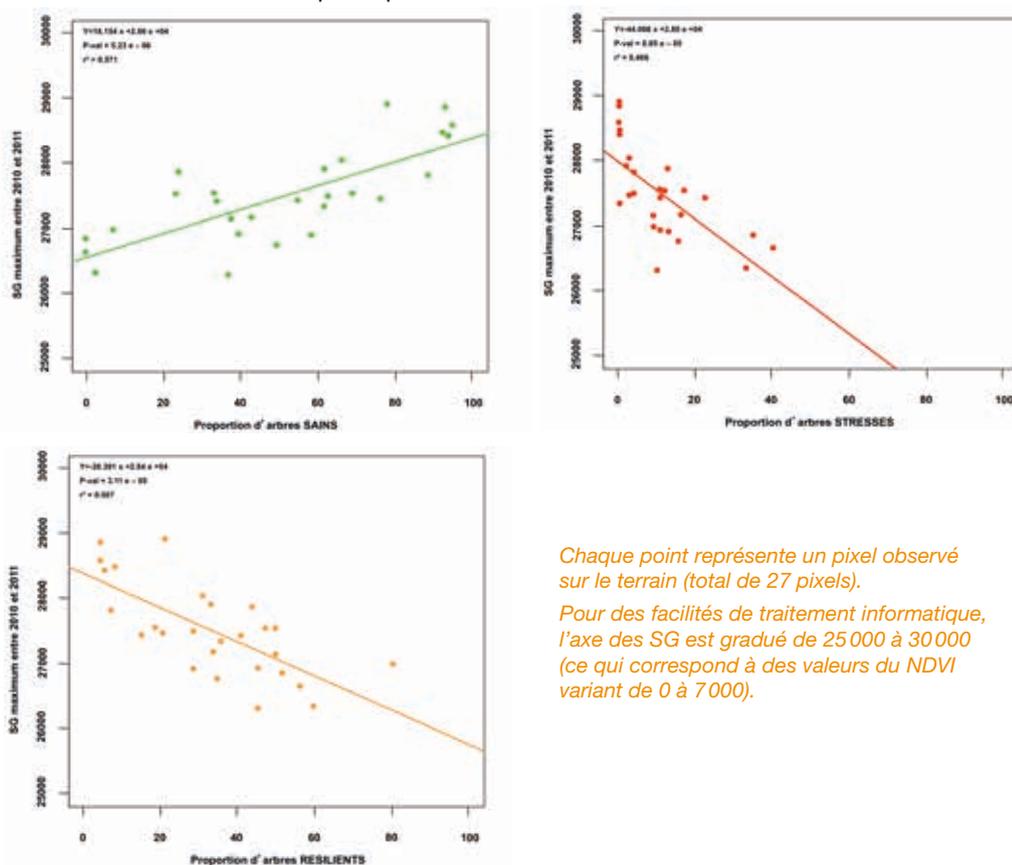
Figure 9 - Schéma du plan d'échantillonnage d'un pixel (Giraud, 2012).



Le choix des pixels destinés à être étudiés sur le terrain s'est fait selon un échantillonnage orienté. Leur sélection en effet tient compte de la variabilité de l'indicateur SG. Par ailleurs, plusieurs précautions sont prises : les zones présentant un risque d'interventions humaines de type « coupe-rase » sont éliminées, seuls les pixels correspondant à des peuplements adultes et denses de sapin pectinés sont retenus, enfin, de manière à faciliter l'accès aux placettes, les zones avec une pente supérieure à 45 degrés et trop éloignées d'une route forestière (distance supérieure à 1 000 m) sont exclues. Au total, 27 pixels sont choisis, leur altitude variant entre 850 et 1 800 m.

3) Département de la Santé des Forêts du ministère de l'Agriculture.

Figure 10 - Relations entre les proportions des principaux types ARCHI et la plus grande des valeurs prises par l'indicateur SG entre 2010 et 2011.



Chaque point représente un pixel observé sur le terrain (total de 27 pixels).

Pour des facilités de traitement informatique, l'axe des SG est gradué de 25 000 à 30 000 (ce qui correspond à des valeurs du NDVI variant de 0 à 7 000).

Sur la surface de chacun des 27 pixels, 16 placettes sont définies et réparties de manière systématique. Une zone tampon de 35 mètres de côté est délimitée afin d'éviter de sortir du pixel sur le terrain. Le centre des placettes a été retrouvé sur le terrain grâce à un GPS, et en partant du centre de chaque placette, les 7 arbres dominants les plus proches sont diagnostiqués avec la méthode ARCHI. 112 arbres sont ainsi observés par pixel, soit un total de 3024 sapins pour l'étude (figure 9 - Giraud, 2012; Lambert et al., 2013).

Résultats

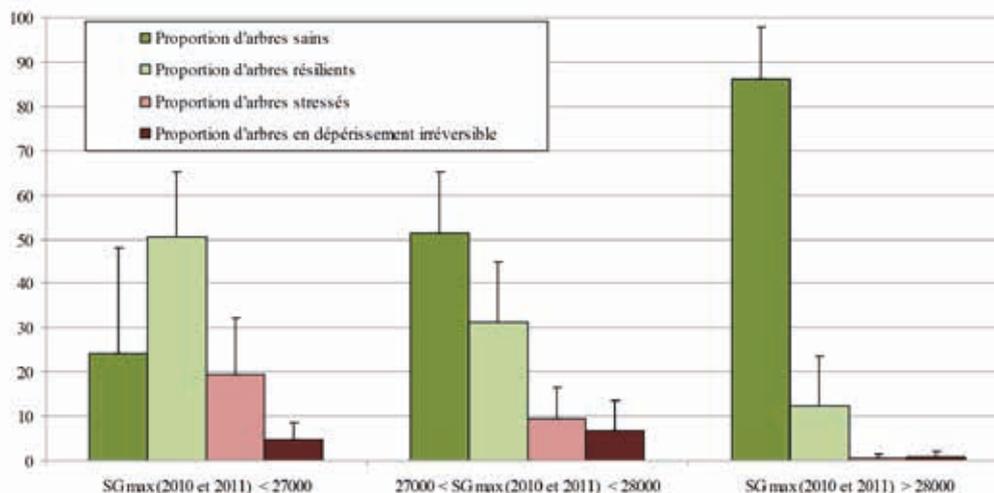
En moyenne, au sein des 27 pixels de l'étude, plus de la moitié des arbres observés sont classés comme sains (51 %). La proportion d'arbres diagnostiqués comme résilients est de 33 %, celle des arbres stressés de 11 % et celle des arbres en situation de dépérissement irréversible d'environ 5 %. La quantité d'individus en situation de descente de cime est négligeable. Les écart-types importants montrent la forte variabilité de ces répartitions. Par exemple, la proportion intra-pixel d'arbres stressés varie de 0 à 40 %.

Les résultats montrent des relations significatives entre les observations de terrain réalisées au printemps 2012 et les images satellitaires

enregistrées en 2010 et en 2011. Ces corrélations concernent la proportion intra-pixel des principaux types ARCHI et la plus grande des valeurs prises par l'indicateur SG entre 2010 et 2011. Prendre la plus grande des valeurs du SG permet d'atténuer les effets annuels du climat et ainsi d'accentuer la part de l'activité photosynthétique liée à l'état intrinsèque des arbres.

De façon logique, sur la période 2010-2011, l'activité photosynthétique printanière déterminée par télédétection (le SG) est d'autant plus forte que la proportion de sapins sains est élevée. Inversement, elle diminue quand le taux d'individus du type ARCHI « Stressé » augmente. Les résultats relatifs au type ARCHI « Résilient » sont plus nuancés. Plus la proportion des résilients augmente et plus le SG diminue, mais cette baisse est beaucoup moins prononcée que pour les arbres stressés (figure 10). Les séquelles de stress passés, encore visibles chez les sapins résilients (mortalité, déficit foliaire), semble donc être fortement atténuées par le développement de gourmands orthotropes et plagiotropes. Par ailleurs, la composition des pixels montre que les sujets résilients sont généralement associés à de nombreux sujets stressés. Ces derniers

Figure 11 - Proportions moyennes des différents types ARCHI par pixel après répartition des pixels selon trois classes de l'indicateur SG (plus grande des valeurs prises par le SG entre 2010 et 2011). Classe inférieure à 27000: 8 pixels; classe comprise entre 27000 et 28000: 13 pixels et classe supérieure à 28000: 6 pixels.



doivent certainement impacter de façon négative le SG des pixels contenant des sapins résilients.

Les résultats conduisent à définir des seuils en termes d'indicateur SG (*figure 11*). Quand la plus grande des valeurs prises par le SG entre 2010 et 2011 est inférieure à 27 000, moins de la moitié des arbres sont sains, ce qui correspond à une situation de dépérissement inquiétante. Quand le SG est au contraire supérieur à 28 000, les sujets sains sont présents à plus de 80 %. La robustesse de ces relations prouve qu'il est donc possible d'établir un lien entre les valeurs de SG et l'état des sapinières.

Conclusion

Cette étude montre qu'il est possible d'établir des corrélations entre l'activité photosynthétique des sapinières (mesurée par l'indicateur SG) et l'architecture des sapins (estimée par la méthode ARCHI).

Un protocole original d'échantillonnage sur le terrain adapté aux images satellitaires MODIS est mis en place. Plus de 142 hectares de sapinières sont analysés par télédétection (soit 27 pixels MODIS) et plus de 3000 sapins ont fait l'objet d'un diagnostic visuel aux jumelles. L'intérêt de la méthode ARCHI est triple. D'une part, la méthode ne s'appuie pas sur les estimations délicates du pourcentage de déficit foliaire, ce qui lui permet de fortement atté-

nuer les différences d'appréciation entre notateurs. D'autre part, la distinction sur le terrain entre les sapins stressés et les sujets résilients semble refléter des différences d'activité photosynthétique, et ceci pour des déficits foliaires souvent comparables. Enfin, la proportion d'arbres résilients et d'arbres en situation de dépérissement irréversible permet d'anticiper l'évolution d'un peuplement, avec respectivement de probables retours à la normale ou au contraire des aggravations de l'état sanitaire.

En ce sens, la méthode ARCHI apporte une aide aux gestionnaires forestiers lorsqu'il s'agit d'éclaircir un peuplement en faveur des arbres d'avenir.

Au sein d'un même peuplement, sur une même station et pour une même essence, certains individus résistent aux aléas climatiques, d'autres dépérissent irréversiblement, et d'autres enfin font preuve de résilience. Il y a donc là une richesse génétique qui ouvre de nouvelles perspectives pour la sélection et l'obtention d'un matériel végétal moins vulnérable aux effets du changement climatique.

Les seuils de l'indicateur SG identifiés au cours de ce travail sont prometteurs pour la surveillance de l'état de nos forêts, notamment dans le cadre de l'Observatoire Pyrénéen des Changements Climatiques (<http://www.opcc-ctp.org>). Des études complémentaires visant à consolider ces seuils et à les interpréter au regard des variables climatiques, topogra-



Bourgeons axillaires insérés sur un jeune tronc de sapin pectiné.



Apparition d'un gourmand (ou épïcormique) sur le tronc d'un sapin pectiné adulte.

phiques et édaphiques sont en cours (thèse de Jonas Lambert). Elles devraient contribuer à l'établissement de cartes de vigilances forestières destinées aux professionnels avec des mécanismes d'alerte en cas d'augmentation brutale des dépérissements. De telles cartographies réalisées par télédétection existent déjà en matière de sensibilité de la végétation au feu (Chéret et Denux, 2007). ■

Résumé

La surveillance sanitaire de nos forêts se fait aujourd'hui à l'échelle de l'arbre, au sein de placettes de faible superficie. La télédétection pourrait permettre de suivre la dynamique d'un dépérissement à l'échelle de territoires beaucoup plus grands, mais comment passer des jumelles aux satellites et vice versa ? L'étude sur les sapinières pyrénéennes du Pays de Sault présentée dans cet article apporte des réponses. Un protocole d'échantillonnage adapté est appliqué, une méthode originale de diagnostic visuel des sapins est utilisée (la méthode ARCHI) et un indicateur annuel de vigueur de la végétation est identifié (le SG ou « Spring Greeness »). Plus de 142 hectares de sapinières sont analysés par télédétection (soit 27 pixels MODIS) et plus de 3000 sapins font l'objet d'un diagnostic visuel aux jumelles. L'étude établit des corrélations entre l'activité photosynthétique des sapinières mesurée par télédétection et l'architecture des sapins décrite sur le terrain.

Mots-clés : méthode ARCHI, télédétection, corrélations mesures de terrain et « Spring Greeness »

Bibliographie

- Chéret V., Denux J.P., 2007. *Mapping wildfire danger at regional scale with an index model integrating coarse spatial resolution remote sensing data*, J. Geophys. Res., 112.
- Chéret V., Denux J.P., Gacherieu C., Ortisset J.P., 2011. *Utilisation de séries temporelles d'images satellitaires pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central*. RDV techniques n° 31 - ONF, p. 55-62.
- Drénou C., Giraud F., Gravier H., Sabatier S., Caraglio Y., 2013. *Le diagnostic architectural : un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes*. Forêt Méditerranéenne. T. XXXIV, n° 2, 87-98.
- Giraud F., 2012. *Suivi du dépérissement du sapin pectiné (Abies alba Mill.) dans les Pyrénées : croisement de deux méthodes, l'architecture et la télédétection, à deux échelles spatiales différentes*. Mémoire de fin d'études, ENSSA, Université de Bordeaux 1, 34 p.
- Lambert J., Denux J.P., Jacquin A., Chéret V., 2012. *Detection of clear-cuts using decomposition of NDVI-MODIS time series and breakpoint detection*. ForestSAT 2012, 11-14 September, Oregon State University, Corvallis, Oregon USA.
- Lambert J., Drénou C., Denux J.P., Balent G., Chéret V., 2013. *Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis*. *GIScience & Remote Sensing*. Vol. 50, n° 4, 437-457.
- Reed, B.C., Brown J.F., VanDerZee D., Loveland T.R., Merchant J.W., Ohlen D.O., 1994. *Measuring phenological variability from satellite imagery*, *Journal of Vegetation Science*, 5, 703-714.
- Rouse J.W., Haas R.H., A. S.J., Deering D.W., 1974. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*, pp. 309-317, *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Godard Space Flight Center, NASA, Science and Technical Information Office, Washington D.C.

Remerciements

Les auteurs remercient les partenaires de l'Observatoire Pyrénéen des Changements Climatiques (OPCC), en particulier le GEIE FORESPIR, chef de file de l'action « Forêts » ainsi que Flore Giraud, Grégory Sajdak, Jean Lemaire (IDF), Herminie Gravier (CRPF Auvergne), Michel Goulard, Laurent Burnel, Florence Courdier et Nicolas Mariotte (INRA).