

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DE LA SANTÉ DES FORÊTS

Thierry Bélouard (MASA/DSF), Jean-Baptiste Féret (INRAE TETIS), Raphaël Dutrieux (INRAE TETIS),
Anne Jolly (ONF), Michel Chartier (CNPF)

Colloque SANTECOFOR
Paris, 21 et 22 mars 2023



Plan

- Introduction : le suivi de la santé des forêts sur le terrain aujourd'hui
- Un contexte favorable au déploiement de la télédétection
- Des images satellitaires acquises régulièrement pour un suivi permanent
- Des images satellitaires très haute résolution pour un suivi plus fin
- Des images aériennes pour un suivi à l'arbre
- Conclusion : intérêts, limites et perspectives

Introduction

Le suivi de la santé des forêts sur le terrain aujourd'hui

- La **santé de la forêt** est la condition qui permet le maintien de cet écosystème complexe et de ses fonctions : production, biodiversité, qualité des eaux, récréation, paysage, prévention des risques, carbone...
- Mission du **Département santé des forêts (DSF)** : établir un état des lieux sanitaire de la forêt française, réaliser un inventaire des dommages et des agents responsables, en suivre la répartition, déterminer les facteurs de sensibilité ou de risques, en suivre l'évolution éventuelle dans le contexte des changements globaux
- **Veille sanitaire** : 1 124 problèmes différents enregistrés
- **Suivis à long terme** :
 - Réseau systématique de suivi des dommages forestiers (réseau européen) dit « réseau 16x16 »
 - Réseau RENECOFOR (ONF)
- Observations sur le **terrain** : réseau des correspondants-observateurs du DSF au contact des gestionnaires forestiers (ONF, CNPF, services forestiers...)



Un contexte favorable au déploiement de la télédétection

Hier

- Quelques exemples d'utilisation de la télédétection pour le suivi de la santé des forêts

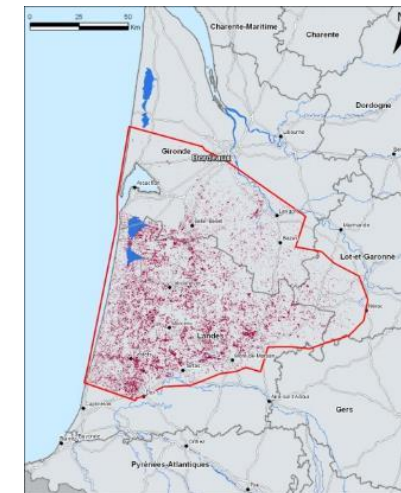
Aujourd'hui

- Programme européen **Copernicus**
 - Constellation de satellites multi-capteurs (optique et radar) : images **Sentinel**
 - Open access
- Actions nationales
 - **DINAMIS** : accès facilité pour les services publics à de l'imagerie commerciale à très haute résolution spatiale (Spot 6/7, Pléiades...)
 - Pôle **Théia** : développement de méthodes, de services et de produits
 - Meilleure accessibilité aux données IGN
- Accès facilité aux données satellitaires et développement de services opérationnels
- **Explosion de l'offre** d'images et d'outils

Image Spot 5 du 26/11/10



Peuplements scolytés



Télédétection des dégâts dus aux scolytes dans le Massif Landais en 2010. Source : Sertit



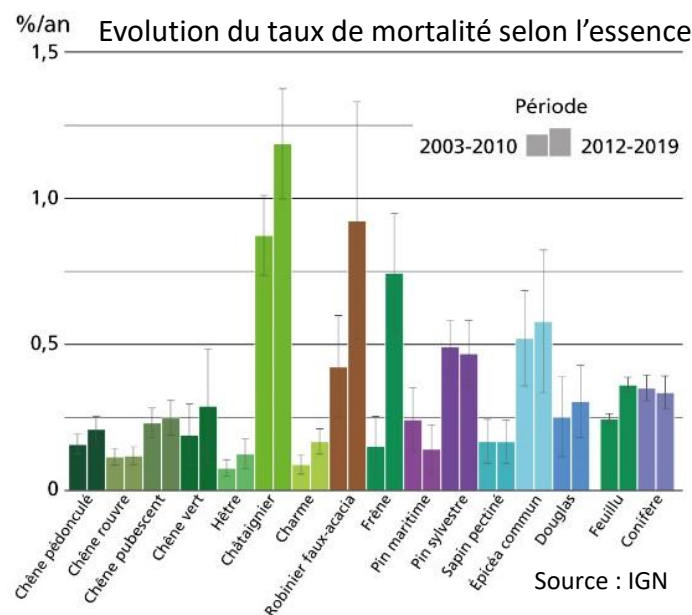
Des images satellitaires acquises régulièrement pour un suivi permanent

Contexte : une forêt française en mauvaise santé

- Nombreux **dépérissements** et **mortalité** croissante
 - Dépérissement du châtaignier (chancre, encre)
 - Chalarose du frêne
 - Scolytes de l'épicéa (typographe)
 - Dépérissement du hêtre, du sapin, du pin sylvestre, des chênes
 - Echec dans les plantations
- Diminution de la production biologique
- Impact du changement climatique (**sécheresses** 2018, 2019, 2020 et 2022)

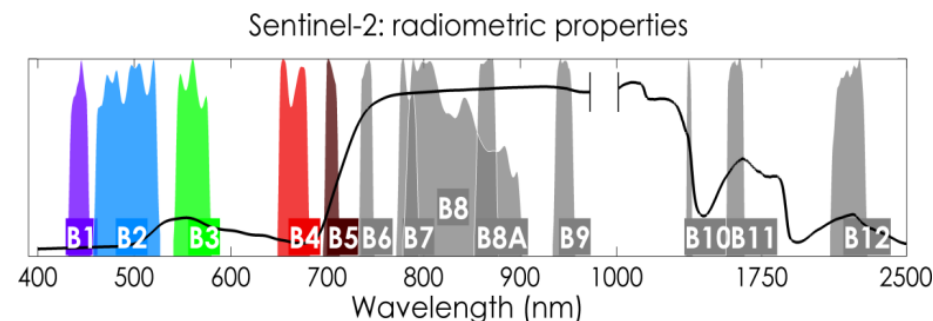


Mortalité de châtaigniers (95)



Sentinel-2 : un satellite adapté pour le suivi de la forêt

- Résolution spatiale : 10 et 20 m
- **Acquisition** systématique **tous les 5 jours** (attention à la nébulosité) depuis 2017 (Sentinel-2A : 2015, Sentinel-2B : 2017)
- 10 bandes spectrales (visible, infrarouge)
- **Données libres**, produits de haut niveau (correction des effets atmosphériques et topographiques, synthèses mensuelles...) : portail Theia, Copernicus Hub, etc.
- Sensibilité des données optiques (réflectance) à de nombreuses propriétés de la végétation (teneur en chlorophylle, en eau, surface foliaire)



Application 1 – Cartographie des dépérissements des châtaigneraies Région parisienne

Contexte

- **Dépérissements** importants dus à la **maladie de l'encre** (*Phytophthora sp.*)
- Enjeu : récréation, accueil du public

Méthode

- **Classification supervisée** ('random forest')
- **Images Sentinel-2**
 - ✓ 2 tuiles
 - ✓ 3 mois, années 2018, 2019 et 2020
- Calibration et validation à partir d'**observations sur le terrain** : placettes de 20 arbres dominants
- Protocole dépérissement du DSF

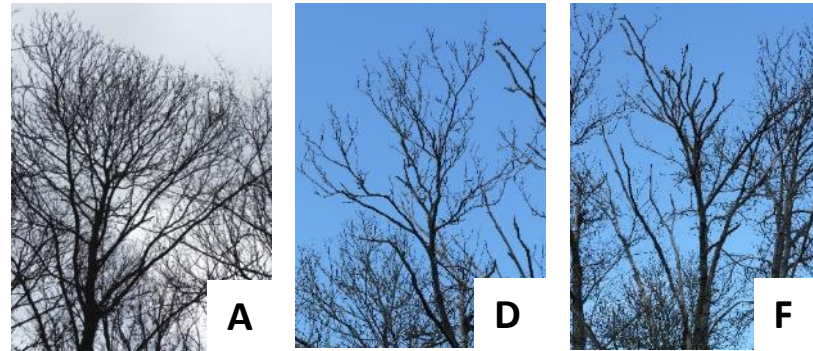
Application à la gestion forestière

- **Aide à l'identification des peuplements ruinés**
- Renouvellement des peuplements (plan de relance)

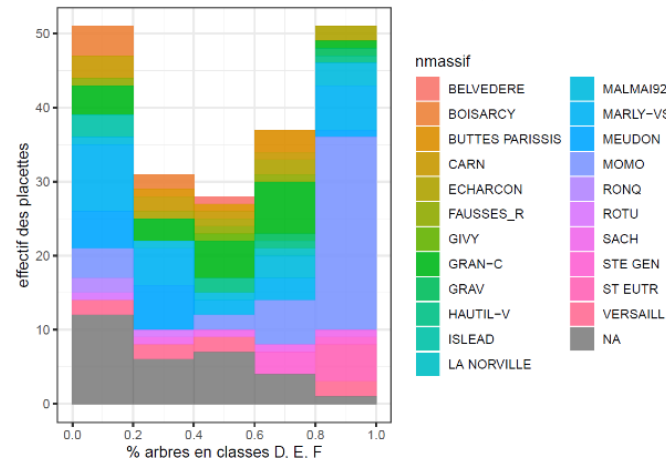
Données de référence

- ~ 200 placettes observées en 2020 et 2022 sur l'ensemble de la région
- Réalisation : ONF, CNPF et DSF

Protocole DEPERIS

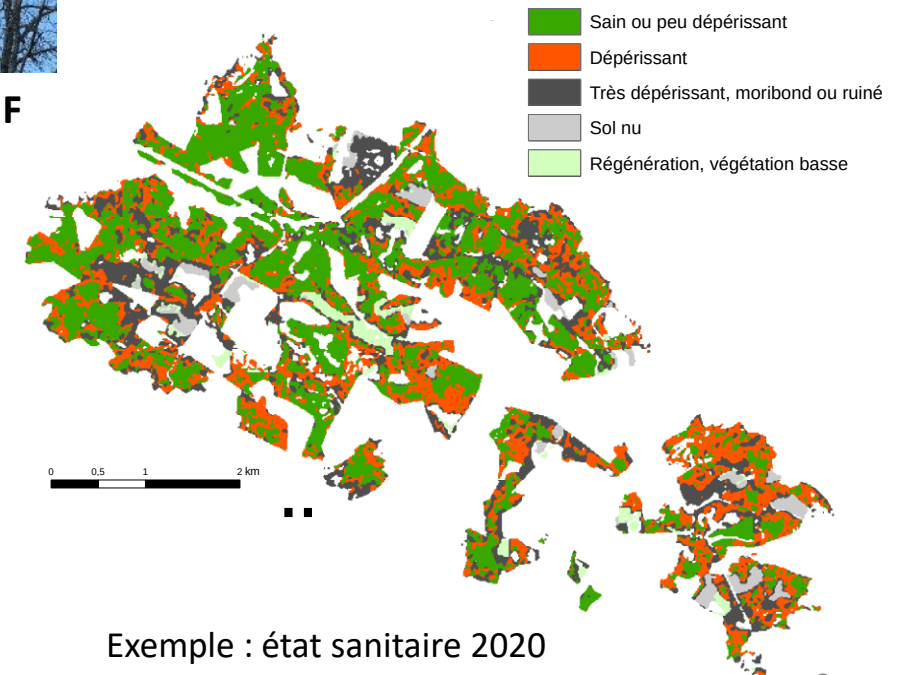
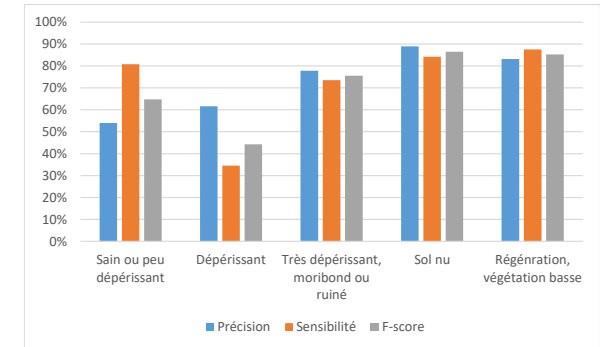


Echantillon des placettes 2020
selon le % d'arbres dépérissants



Résultats

- Précision globale : 72%. Indice Kappa : 0,65



Exemple : état sanitaire 2020
de la forêt domaniale de Montmorency (95)

Application 1 – Cartographie des dépérissements des châtaigneraies Région Nouvelle-Aquitaine

Contexte

- **Dépérissements** importants, **multifactoriels** (pathogènes, station) et anciens

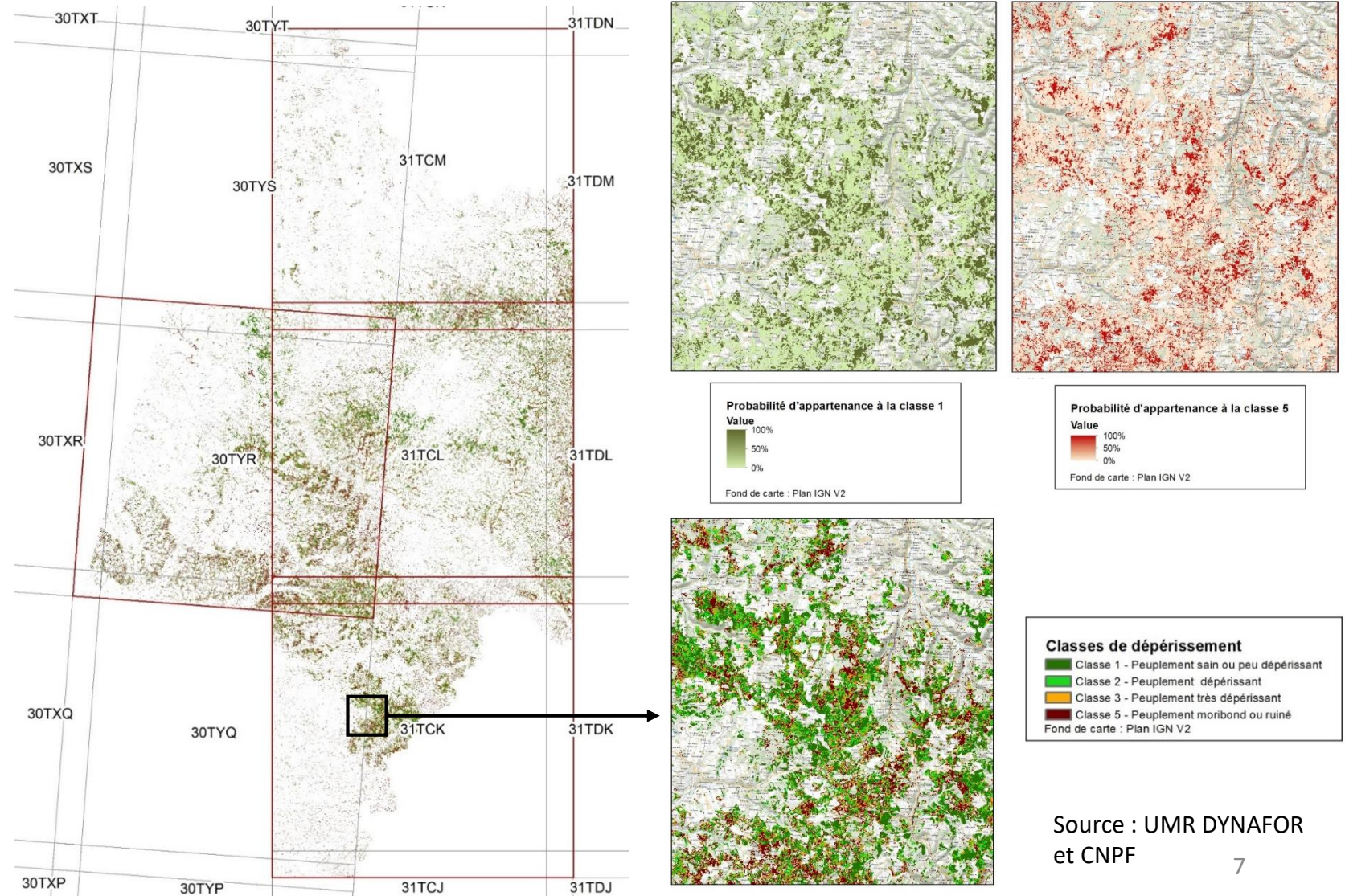
Méthode

- Images Sentinel-2
 - ✓ 4 tuiles
 - ✓ 6 images en 2020, 2 en 2021
- Calibration à partir d'observations sur le terrain (2020)
- Protocole dépérissement du DSF
- **Sélection des variables** les plus pertinentes (bandes spectrales et indices)
- Modèle de **régression polytomique**
- **2 modèles finaux** : cartes de probabilité et carte de prédiction
- Validation : données 2021

Précision

	4 classes de dépérissement	
	Kappa index	Overall acc
Modèle Probabilité	0,61	0,73
Modèle Prédiction	0,62	0,74

Résultats



Source : UMR DYNAFOR
et CNPF

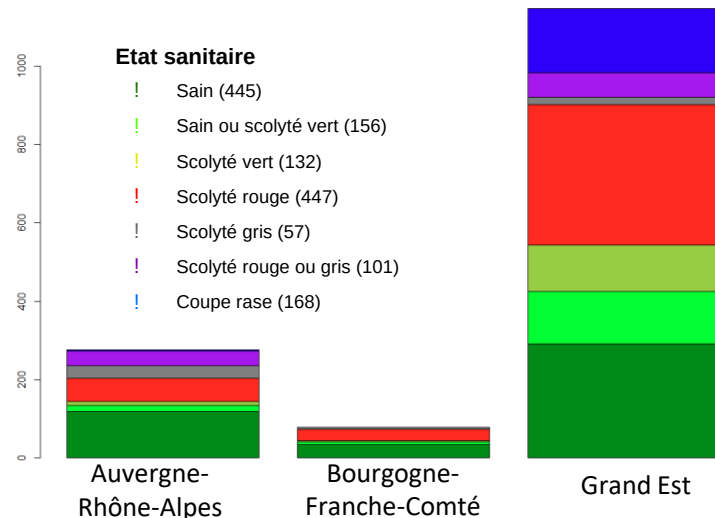
Application 2 – Suivi des dégâts dus aux scolytes dans les pessières du Nord-Est

Contexte

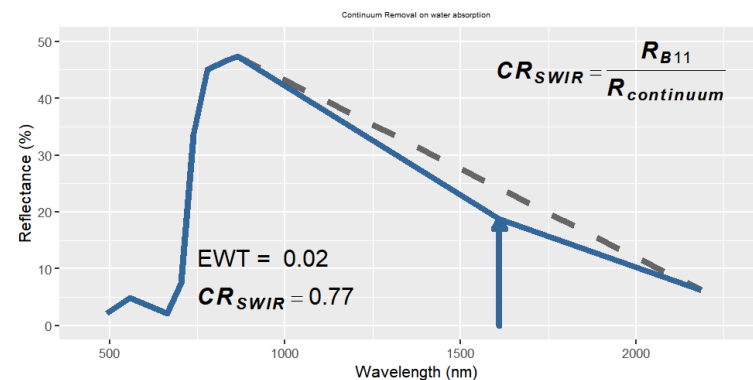
- Sécheresses 2018, 2019, 2020 et 2022 dans le Nord-Est
- Epidémie de **scolytes** (typographe) dans les **pessières**

Données de référence

- Mise au point de la méthode
- Collecte ONF, CNPF et DSF (2018 et 2019)
- 1 500 observations

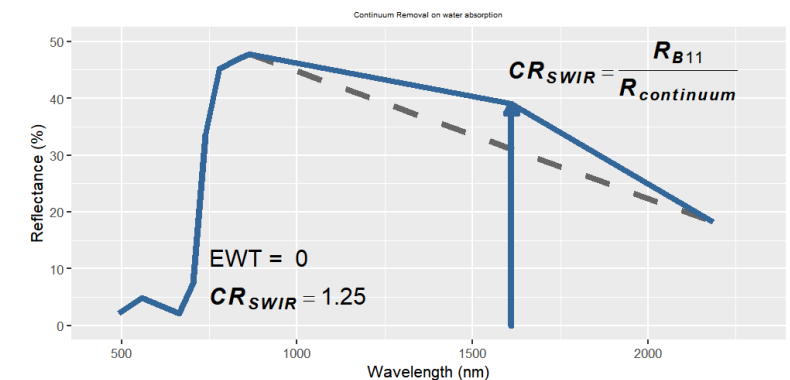


Mortalité d'épicéas à Godoncourt (88)



Méthodologie

- Détermination des symptômes les plus pertinents à identifier pour une détection précoce :
 - Diminution de la teneur en eau foliaire (EWT) associé au stress
 - CR_{SWIR} : indice optimisé pour la détection de la teneur en eau de la végétation avec les images Sentinel-2

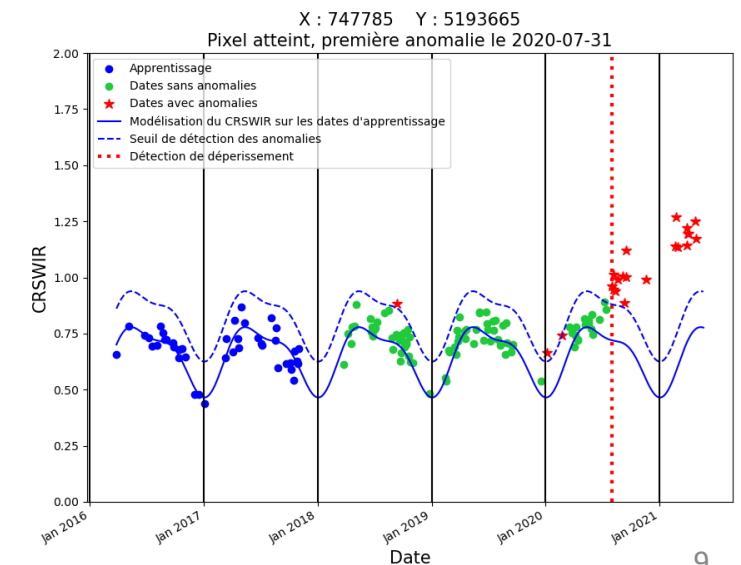
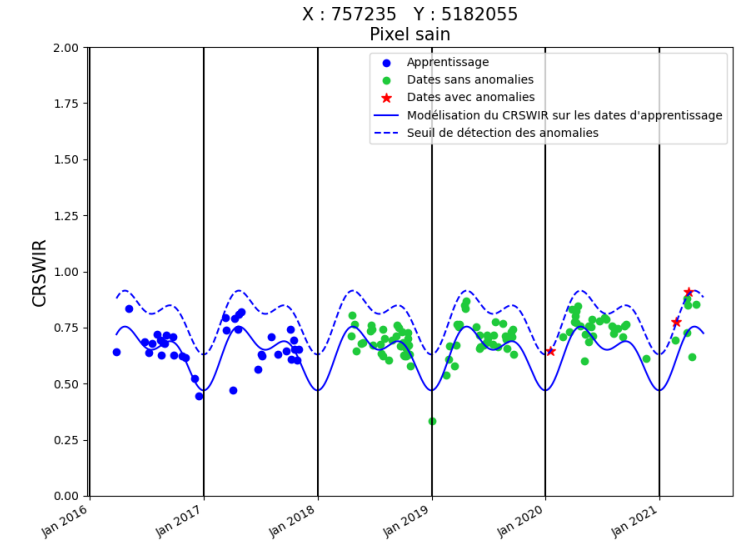
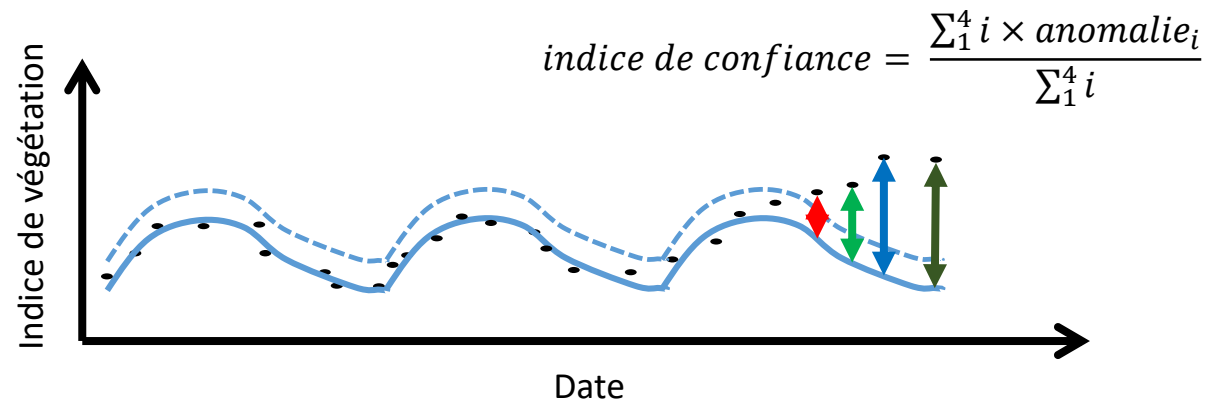


Application 2 – Suivi des dégâts dus aux scolytes dans les pessières du Nord-Est

Traitement des images

Détection d'**anomalies de végétation** dans les **séries temporelles** d'**indices CR_{SWIR}** à partir de l'ajustement d'un modèle harmonique

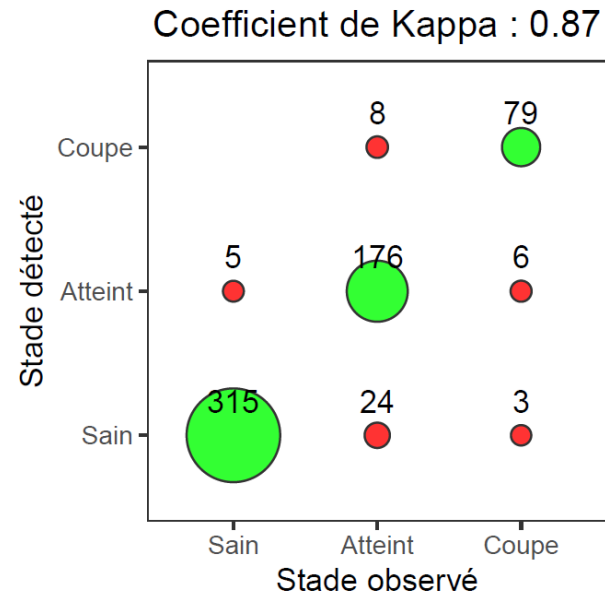
1. Calcul des masques de nuage et de l'indice de végétation sur chaque image
2. Modélisation du comportement saisonnier de l'indice de végétation de chaque **pixel** (peuplement sain)
3. **Détection** de l'anomalie de végétation et calcul d'un **indice de confiance**
4. Application d'un **masque** (thèmes sapin-épicéa et 3 autres thèmes résineux de la BD Forêt® IGN)



Application 2 – Suivi des dégâts dus aux scolytes dans les pessières du Nord-Est

Précision des résultats

- Jeu de qualification des données de référence
- Détections conformes aux observations à la même date
- Détections précoces pour ~ 70% des observations au stade scolyté vert (symptômes peu visibles)



Développement de la chaîne de traitement FORDEAD

- Package Python hébergé sur dépôt gitlab **ouvert au public** (https://fordead.gitlab.io/fordead_package)

2015-12-03



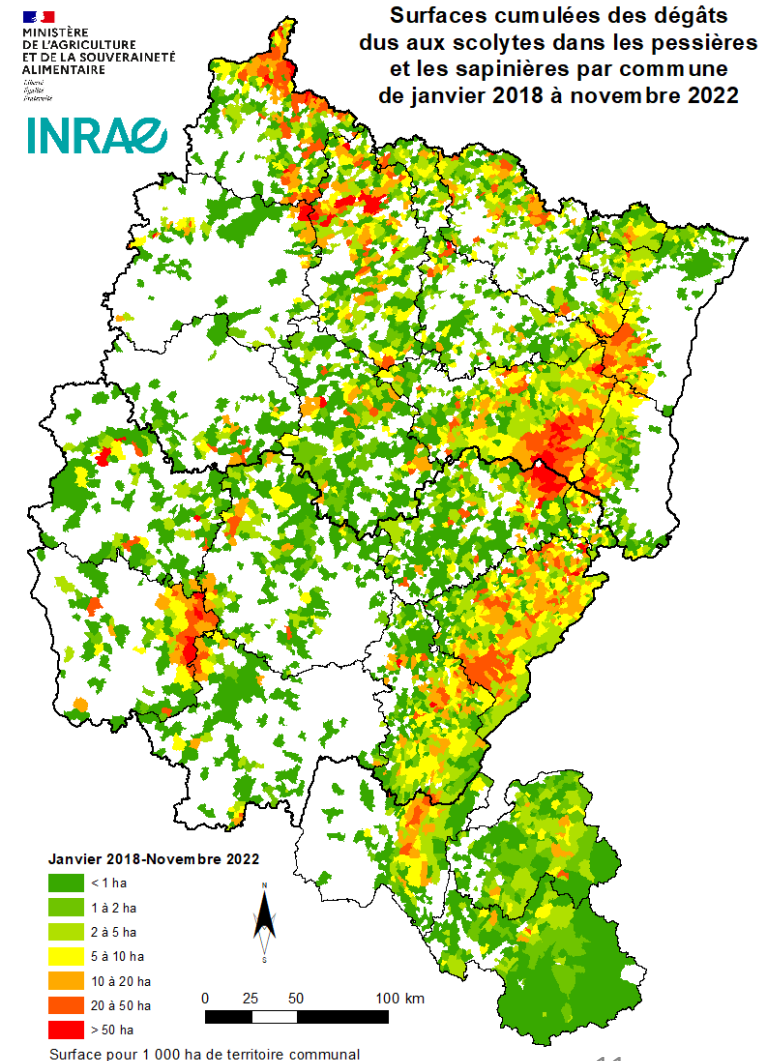
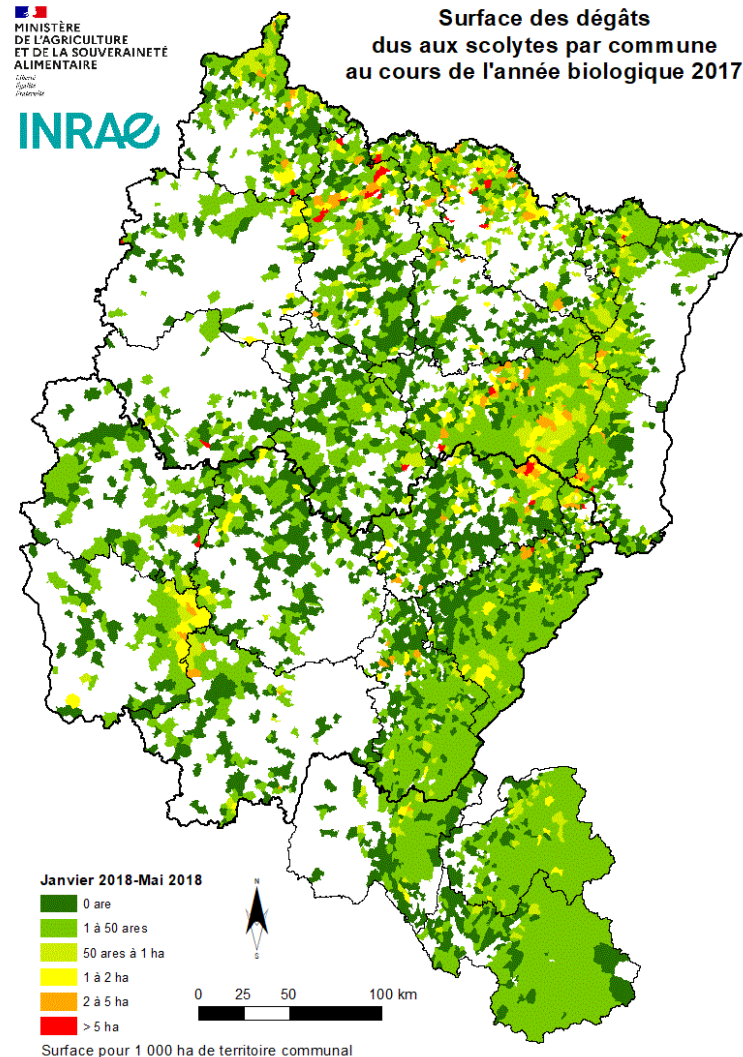
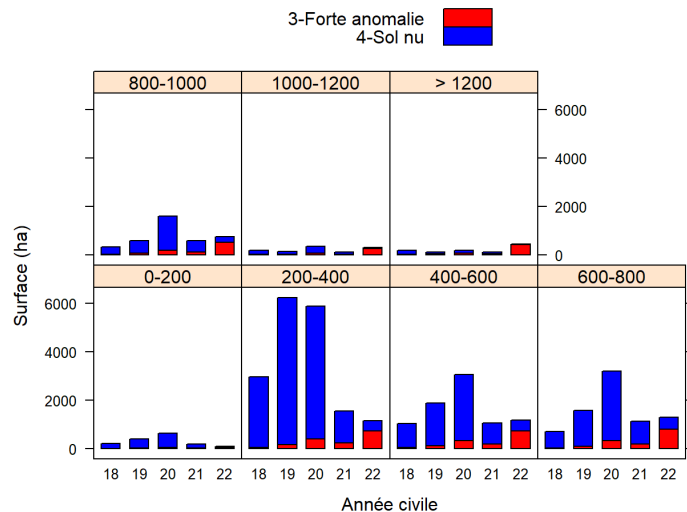
- Sain
- Anomalie
- Coupe sanitaire
- Sol nu

Application 2 – Suivi des dégâts dus aux scolytes dans les pessières du Nord-Est

Résultats

- **Cartographie SIG** : polygones avec classe d'anomalie et date de détection
- Possibilité de croisement avec d'autres couches d'information (limites administratives, GRECO, altimétrie...)

Surface des anomalies selon l'altitude



Application 2 – Suivi des dégâts dus aux scolytes dans les pessières du Nord-Est

Diffusion des résultats

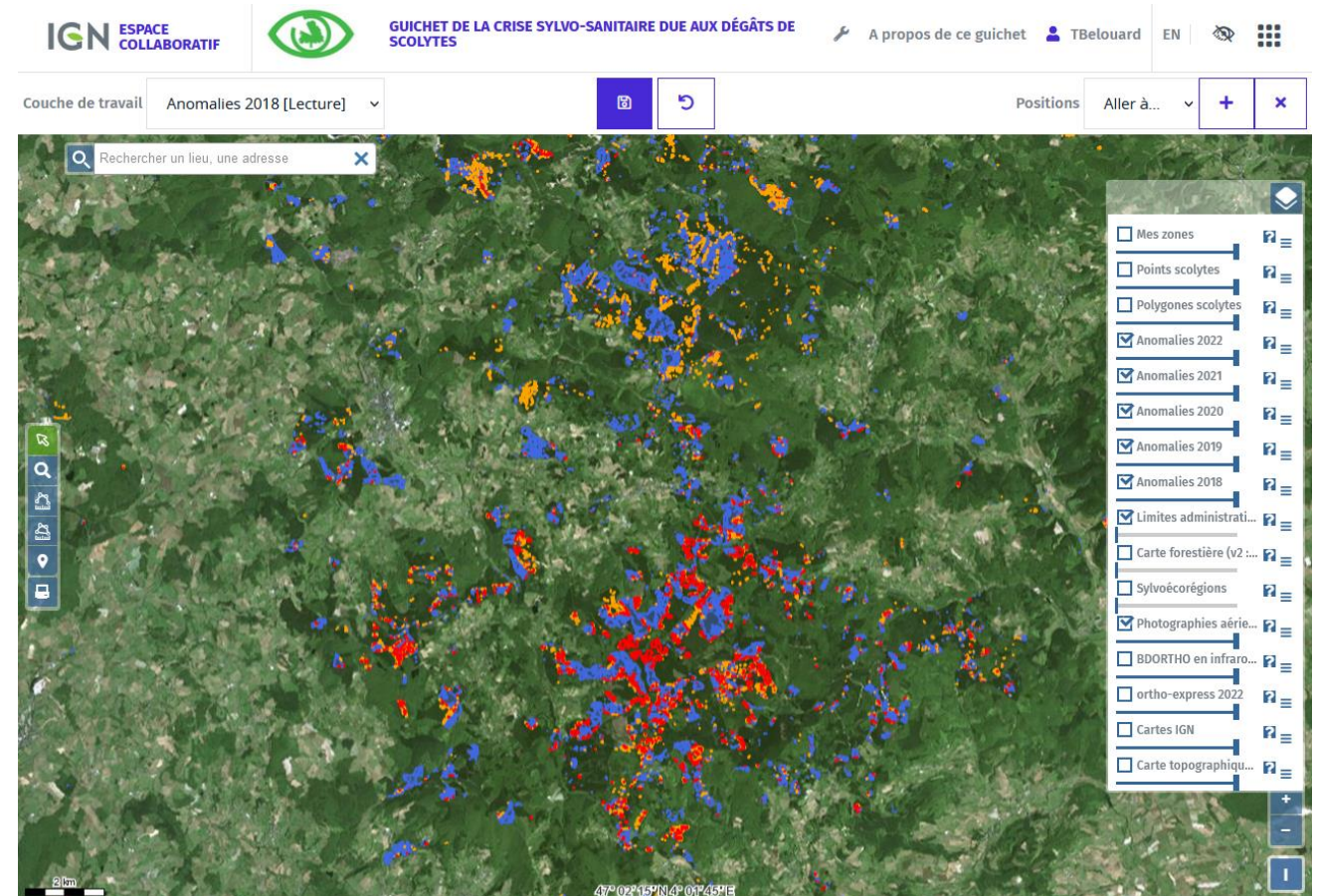
- Transmission au DSF, aux DRAAF, à l'ONF, au CNPF et à la recherche
- **Guichet de la crise sylvo-sanitaire** due aux dégâts de scolytes (**espace collaboratif IGN**)
- Publications DSF

Application

- Surveillance des Massifs (exemple : Jura)
- Aide à l'optimisation des exploitations (ONF)



Exploitation d'une pessière scolytée (54)



Rouge : mortalité ; orange : moyennes anomalies de végétation et bleu : sol nu après anomalie (coupe sanitaire). Exemple au cœur du Morvan

Des images satellitaires très haute résolution pour un suivi plus fin et mieux localisé

Contexte et objectifs

- Détection de *Phytophthora ramorum* sur mélèze dans le Finistère
- Organisme de quarantaine
- Evaluation du **potentiel de la télédétection** précoce

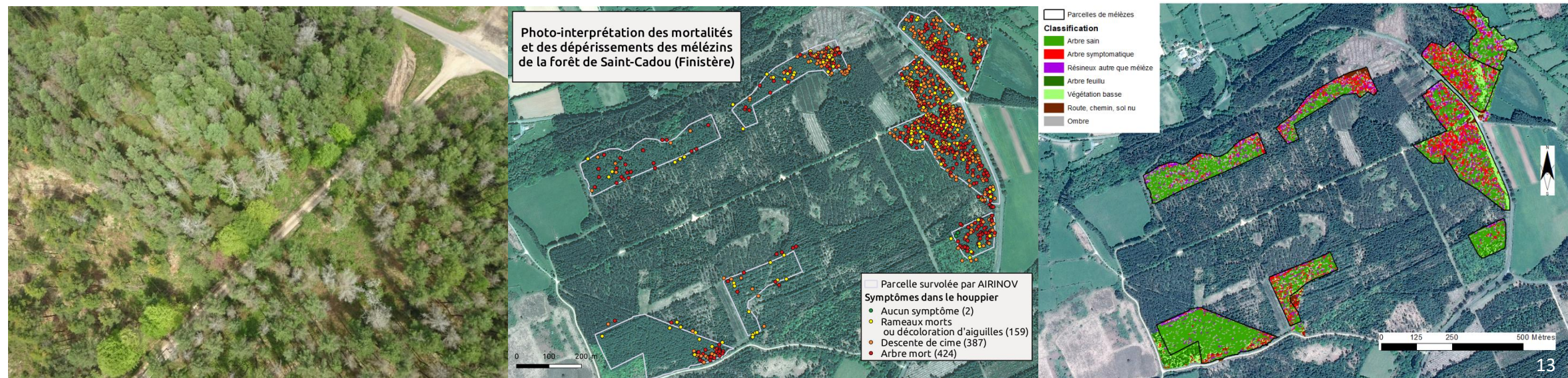
Mélézins de la forêt de St-Cadou (29)
Image drone AIRINOV, mai 2018

Données et méthode

- Images **drone**
 - Caméra multispectrale
 - Photo-interprétation
- Images satellitaires très haute résolution
 - **Images Pléiades** (70 cm, RVB + PIR)
 - Classification orientée objet

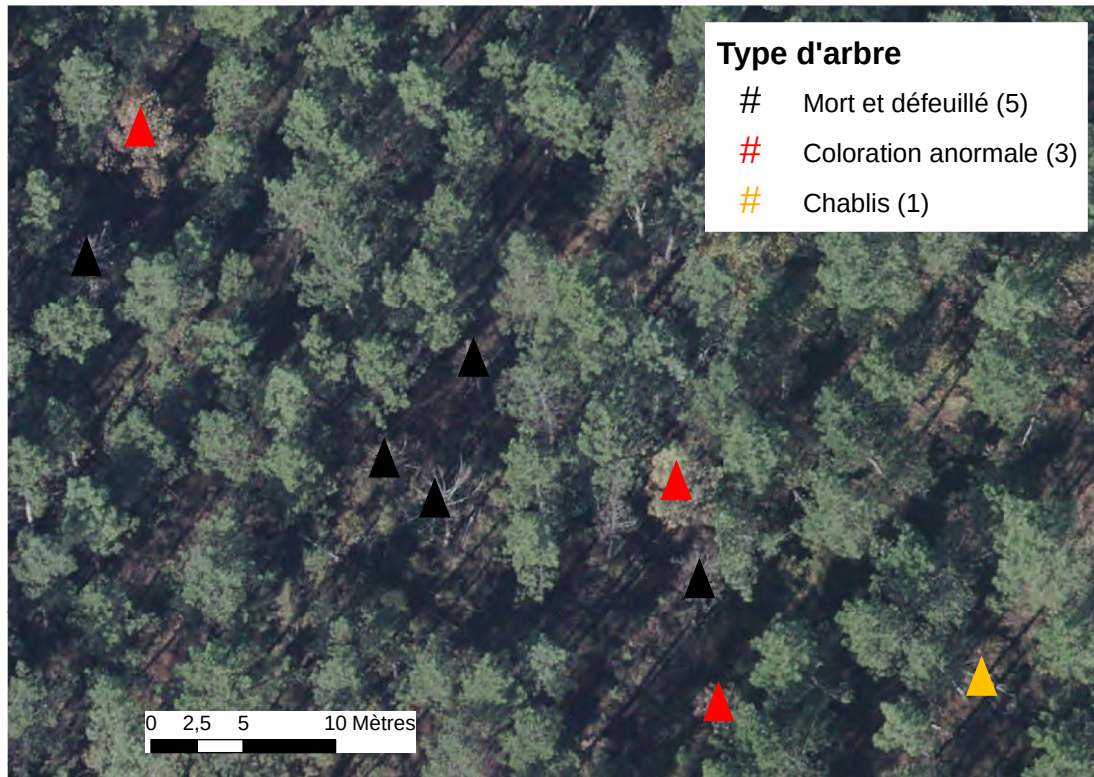
Résultat

- Photo-interprétation des images drone
 - Bonne détection des descentes de cimes et des arbres morts
 - Sous-détection des faibles symptômes
- Classification des images Pléiades
 - AO : 89%. Indice Kappa : 86%
 - Confusions entre mélézins dépérissants et autres résineux (problème de masque)

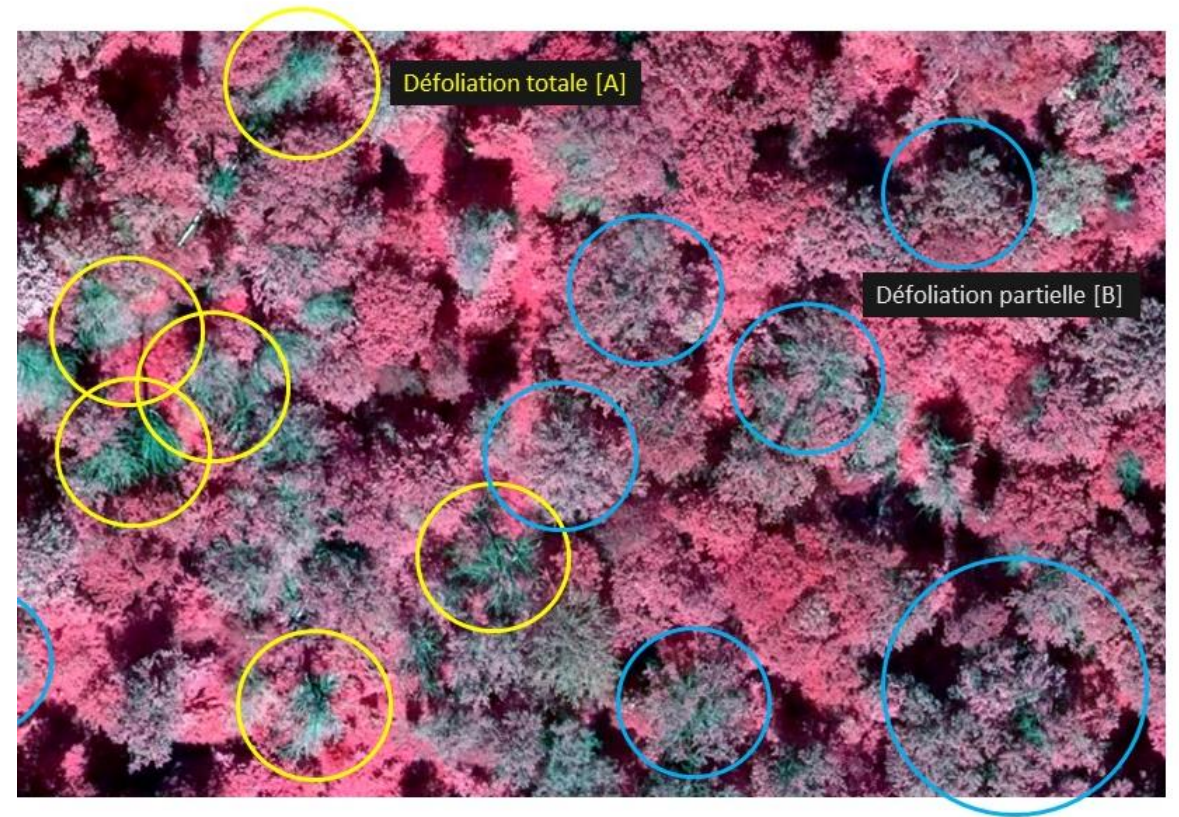


Des images aériennes pour un suivi à l'arbre ou des problèmes diffus

Données et méthode : photo-interprétation d'images aériennes très haute résolution



Dépérissement de pins maritimes dû au fomes (pourridié racinaire) en forêt domaniale de Campet (47)
PVA couleurs naturelles, résolution de 5 cm
Source : IGN et DSF



Dépérissement de hêtres dû à la sécheresse dans le Doubs
PVA IRC, résolution de 10 cm
Source : IGN et ONF

Conclusion : intérêts, limites et perspectives de la télédétection pour le suivi de la santé des forêts

Intérêts

- Traitement de **grandes surfaces** avec les données satellitaires
- Possibilité d'une approche dynamique (série temporelle)
- Rapidité
- Disponibilité des images et des outils

Limites

- Observations des symptômes uniquement, **pas de diagnostic précis**
- Observations des houppiers seuls
- Faible qualité des masques
- Précision des résultats (omissions, surdétections)
- **Nécessité d'observations sur le terrain**
- Volume de données et capacité de traitement
- Compétences (technicité)

Perspectives

- Généralisation des méthodes : **adaptation de FORDEAD à d'autres contextes sylvo-sanitaires** (feuillus)
- Méthodologie : progrès de l'IA ('deep learning')
- Intérêts des scientifiques et des gestionnaires forestiers
- CES « Changements et santé des forêts tempérées »
- Epidémiologie spatiale
- Nouvelle stratégie de l'UE pour les forêts en 2030 : **surveillance** intégrée des **forêts** à l'échelle de l'UE, en utilisant des technologies de **télédétection** et des données géospatiales **intégrées à la surveillance au sol** afin d'améliorer la précision de la surveillance