



# Détection des problèmes sanitaires des forêts par imagerie satellite optique: principes et application au cas des scolytes de l'épicéa

**JB Féret, R Dutrieux, K Ose, F de Boissieu**





### Détection des problèmes sanitaires par imagerie optique: Principes

- Comment l'imagerie optique permet-elle d'identifier et suivre ces problèmes sanitaires?
  - Dimension spatio-temporelle des symptômes
  - Quel(s) capteur(s) utiliser pour la détection des problèmes sanitaires ?
  - Quelles informations extraire des données acquises par télédétection ?
  - Quelles méthodes appliquer pour exploiter cette information ?

### Détection des problèmes sanitaires par imagerie optique: Application

- Application au cas des scolytes de l'épicéa lors de la crise récente



# Comment identifier les problèmes sanitaires par télédétection ?

- Problèmes sanitaires des forêts :
  - Dynamique spatiale: diffusion de proche en proche, arbres isolés...
  - Dynamique temporelle: cycle de développement des vecteurs & agents pathogènes...
  - Symptômes observables plus ou moins facilement: rougissement, perte de feuillage, stress hydrique...
- Une variété de capteurs peuvent fournir des informations pertinentes pour le suivi de la santé des forêts (pas nécessairement exhaustif mais spatialement explicite)
  - Imagerie optique multispectrale & hyperspectrale (THRS & HRS, satellite, avion, drone...)
  - LiDAR
  - Radar
  - Imagerie infrarouge thermique

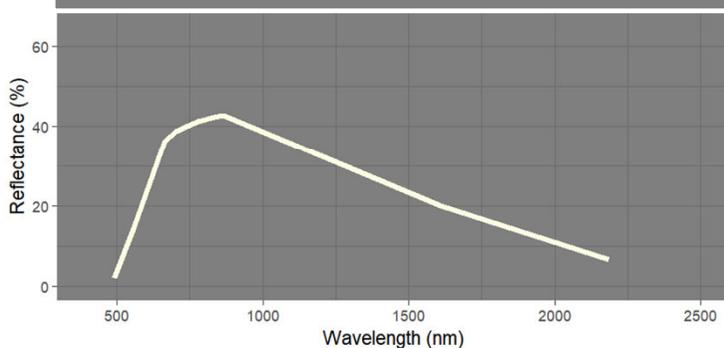
**→ Compromis entre résolution spatiale, richesse spectrale, temps de revisite & accessibilité des données**



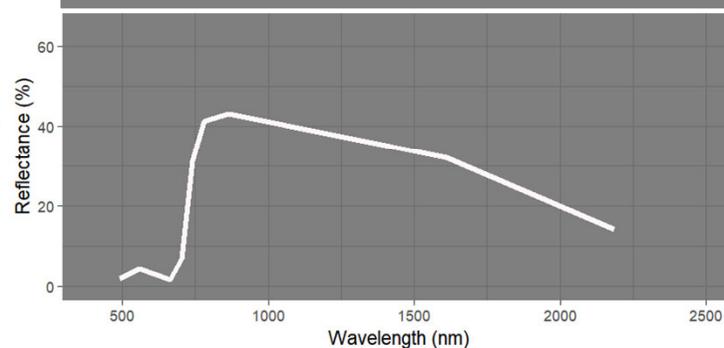
# Sentinel-2: un satellite adapté pour le suivi des massifs forestiers

- Résolution spatiale: 10 m / 20 m
- Revisite théorique de 5 jours (à moduler en fonction de l'enneuagement)
- 10 bandes spectrales dans les domaines visible & infrarouge
- Données libres et téléchargeables gratuitement (portail THEIA, Copernicus Hub, ...)
- Lancement Sentinel-2A: 2015 ; Sentinel-2B: 2017
- Sensibilité des données optiques mesurées (reflectance du couvert) à de multiples propriétés de végétation :

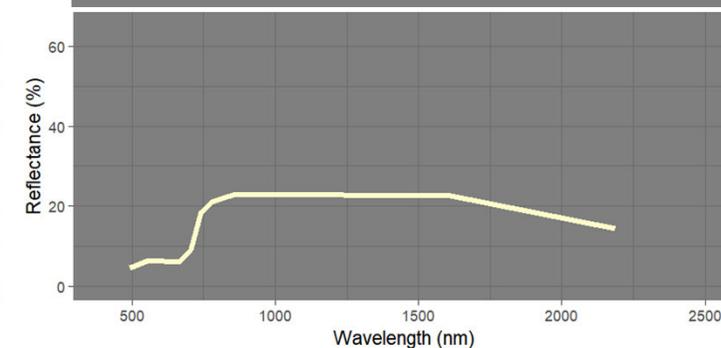
### Teneur en chlorophylle foliaire



### Teneur en eau foliaire



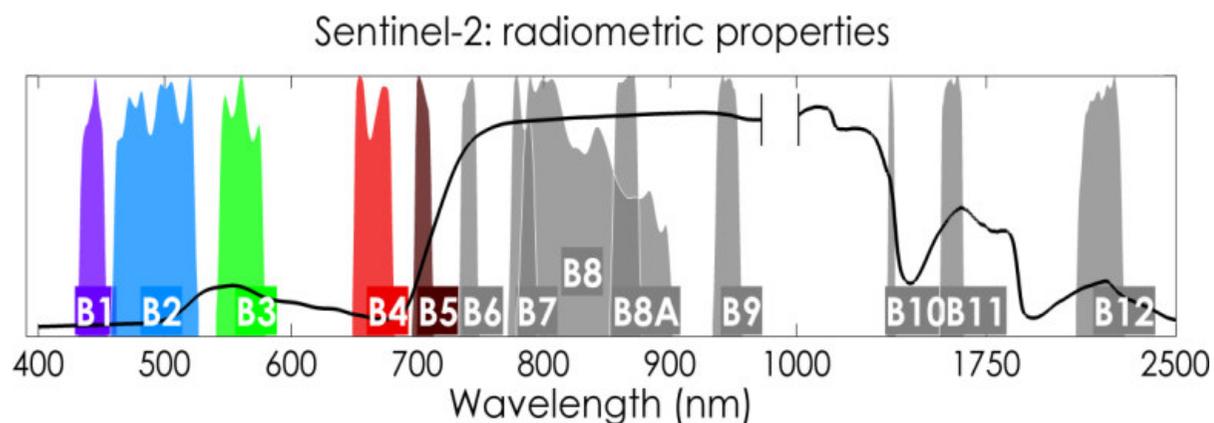
### Surface foliaire (LAI)





# Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité à une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la réflectance : géométrie d'acquisition, sol...



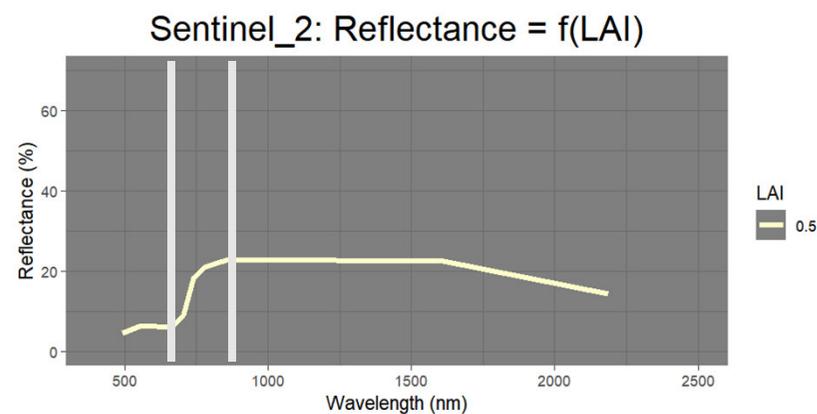
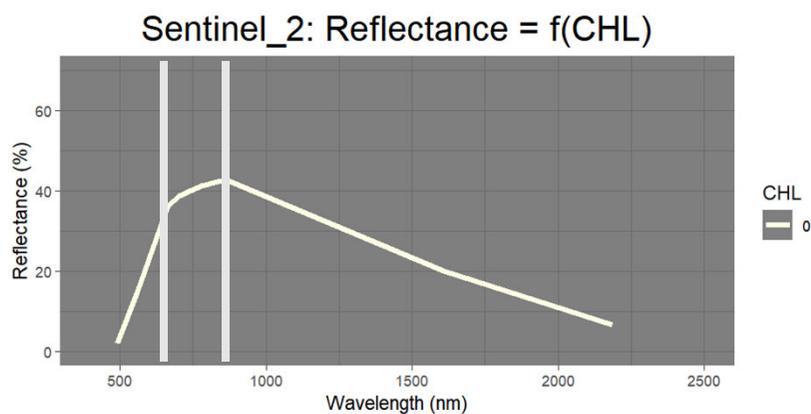
**Sentinel-2 : 10 bandes spectrales exploitables**  
→ **Nombreuses possibilités de combinaisons envisageables...**



## Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la réflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le **NDVI (normalized difference vegetation index)**

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}}$$





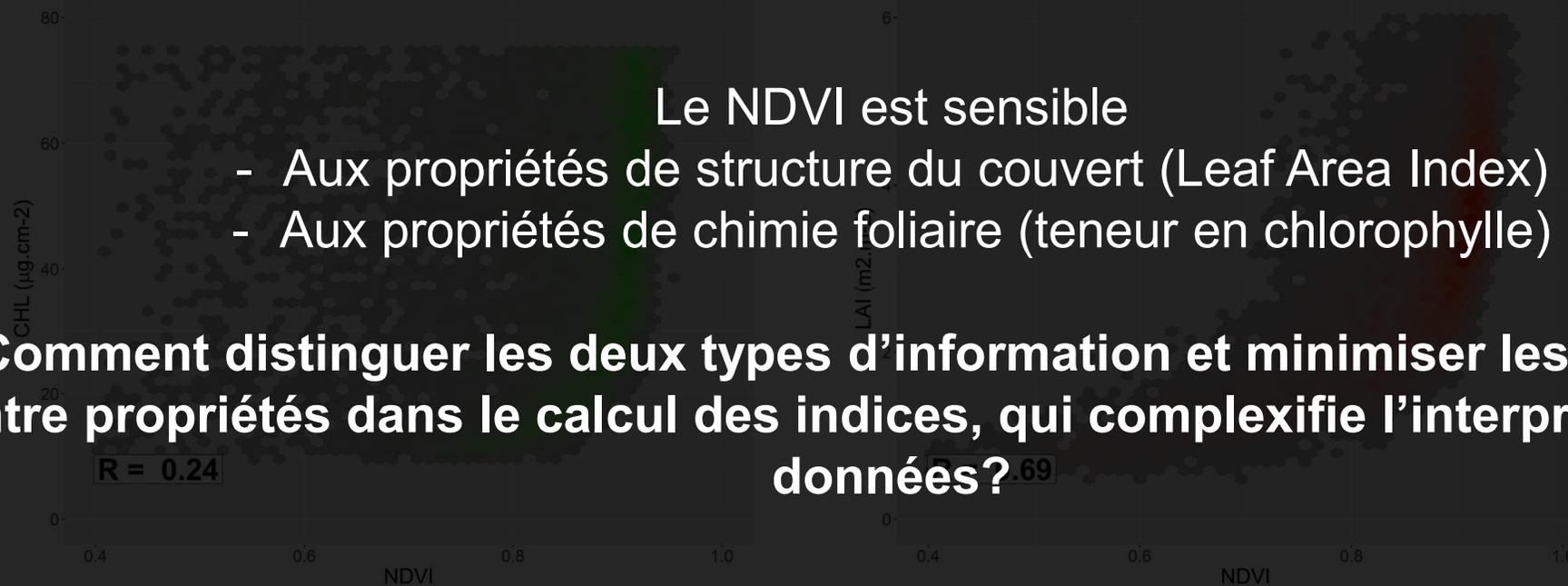
### Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la réflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le **NDVI (normalized difference vegetation index)**

Le NDVI est sensible

- Aux propriétés de structure du couvert (Leaf Area Index)
- Aux propriétés de chimie foliaire (teneur en chlorophylle)

→ Comment distinguer les deux types d'information et minimiser les interactions entre propriétés dans le calcul des indices, qui complexifie l'interprétation des données?

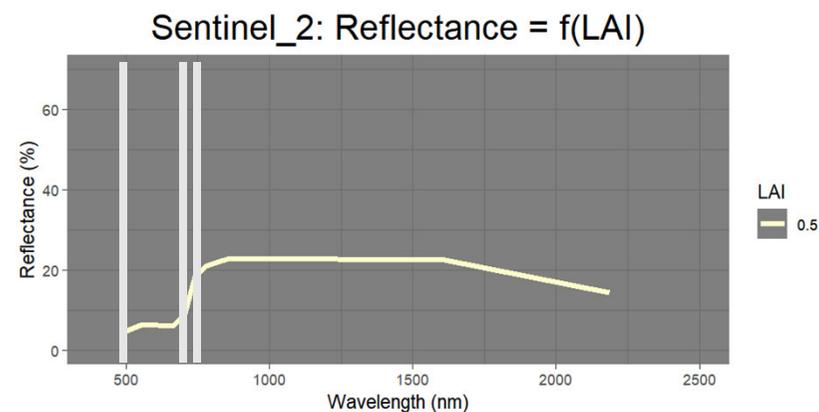
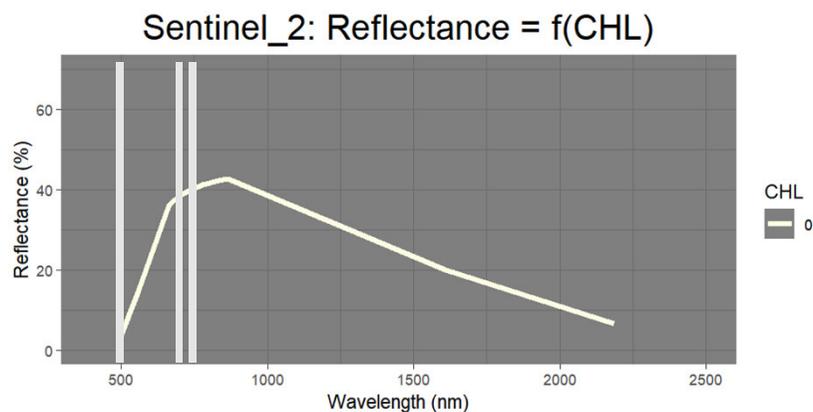




## Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la reflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le **mNDVI<sub>705</sub>**

$$\mathbf{mNDVI}_{705} = \frac{\mathbf{B6} - \mathbf{B5}}{\mathbf{B6} + \mathbf{B5} - 2 \times \mathbf{B2}}$$





### Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la réflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le **mNDVI<sub>705</sub>**

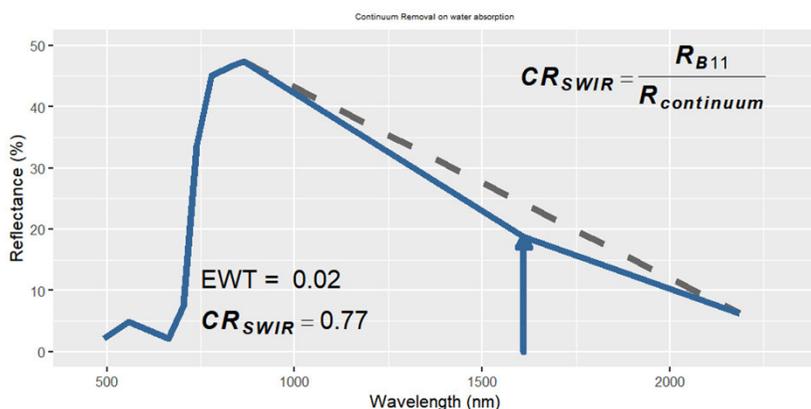
- Le  $mNDVI_{705}$  peut se calculer a partir de données Sentinel-2 grâce aux bandes spectrales localisées au niveau du red-edge
  - Les satellites Landsat ne permettent pas de calculer le  $mNDVI_{705}$
  - Les satellites SPOT ne permettent pas de calculer le  $mNDVI_{705}$
-



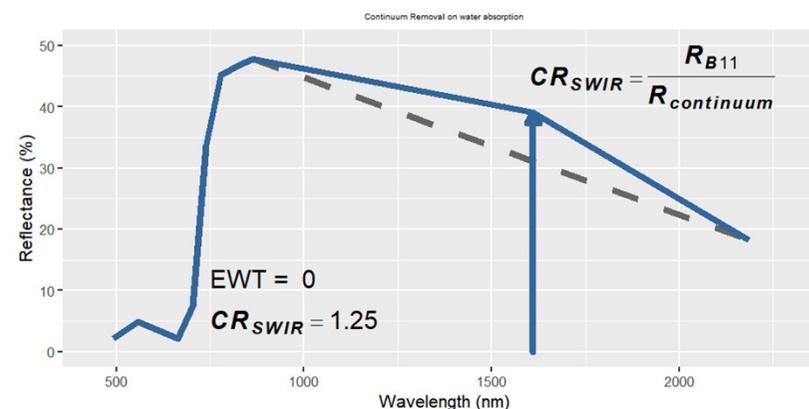
## Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la reflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le  $CR_{SWIR}$  -- **sensibilité maximale a la teneur en eau de la végétation**

$$CR_{SWIR} = \frac{R_{B11}}{R_{B11} + \left( \frac{R_{B12} - R_{B8A}}{\lambda_{B12} - \lambda_{B8A}} \right) \times (\lambda_{B11} - \lambda_{B8A})}$$



Végétation saine  
pas de stress hydrique

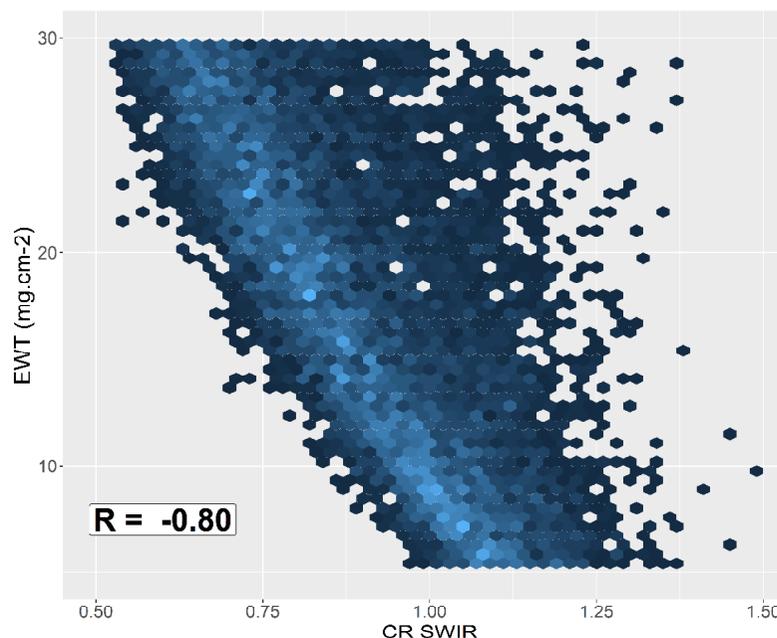


Végétation stressée / attaque de scolytes  
Déficit en eau du feuillage



### Comment extraire l'information des données Sentinel-2 ?

- Indices spectraux: combinaison de 2-3 bandes spectrales permettant de :
  - Maximiser la sensibilité a une propriété d'intérêt (teneur en chlorophylle, en eau, LAI...)
  - Réduire la sensibilité à des facteurs influençant la reflectance : géométrie d'acquisition, sol...
  - Exemple d'indice : le  $CR_{SWIR}$  -- **sensibilité maximale a la teneur en eau de la végétation**





# Quelle méthode utiliser pour identifier les problèmes sanitaires ?

- Approches supervisées: apprentissage a partir de données d'observation terrain & satellite
  - Besoin de données d'observation terrain en quantité pour l'apprentissage du modèle de classif
  - Mise en œuvre relativement simple, beaucoup d'outils disponibles (via logiciels ou codes)
  - Possible manque de robustesse des modèles dans le temps et l'espace (pratiques, contexte...)
- Approches non supervisées: pas de connaissance terrain préalable pour l'apprentissage
  - S'appuient sur des hypothèses d'anomalies (radiométrie ponctuelle ou au cours du temps)
  - Théoriquement moins sensibles a la variabilité des pratiques sylvicoles
  - Besoin de données d'observation pour valider les modèles
- Approches supervisées par apprentissage profond (deep learning)
  - Besoin de données d'observation en très grande quantité



# Suivi sanitaire des massifs d'épicéa par télédétection optique

- Contexte & objectifs
- Données utilisées : télédétection & observations terrain
- Méthodes appliquées pour tirer parti des données disponibles
- Résultats
- Conclusions et perspectives



## Contexte & objectifs

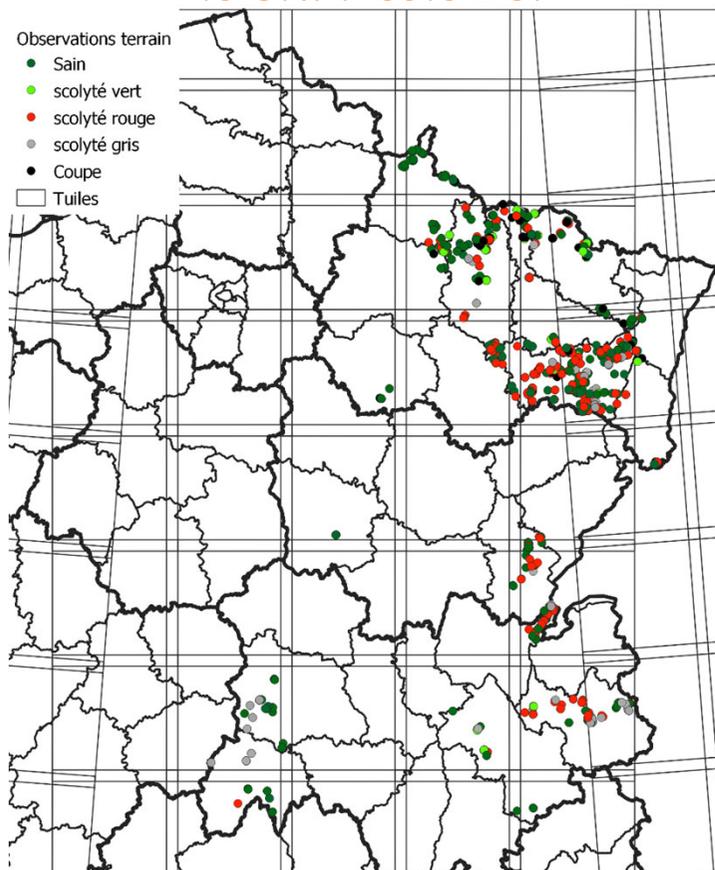
- **Les forêts françaises sont touchées par de nombreux problèmes sanitaires induits et amplifiés par le réchauffement climatique**
  - Accroissement des sécheresses en fréquence, intensité et durée
  - Années 2018, 2019, 2020, 2022 : 3 années de sécheresse successives, canicules
  - Surmortalité et vulnérabilité des massifs forestiers à plusieurs facteurs (Stress hydrique, incendies, insectes, champignons...)
  - Dépérissements inégalement répartis sur le territoire
- **Crise sylvosanitaire dans les pessières et les sapinières dans le Nord-Est de la France depuis 2018**
  - Ravageur principal : le typographe (*Ips typographus*), un scolyte (insecte coléoptère)
- **Besoin de mettre en place un système de suivi opérationnel**
  - Quantifier précisément les surfaces et volumes de bois touchés
  - Faciliter le travail des 'correspondants-observateurs', agents de terrain du Département santé des forêts (MAA/DSF)
  - Détection précoce par méthodes ouvertes, s'appuyant sur des données libres et informations disponibles
  - Adaptation à enjeux variables en fonction des régions: espèces touchées, nature et temporalité des problèmes sanitaires...
- **Collaboration INRAE (TETIS), MAA (DGPE, DSF), ONF et CNPF**



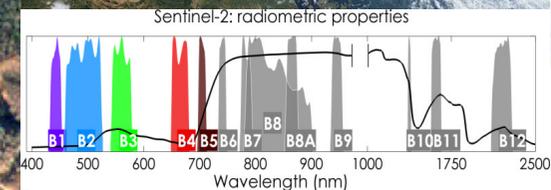
## Données utilisées

Séries temporelles d'images Sentinel-2  
L2A produites par le pôle THEIA

Données de terrain collectées par l'ONF,  
le CNPF et le DSF



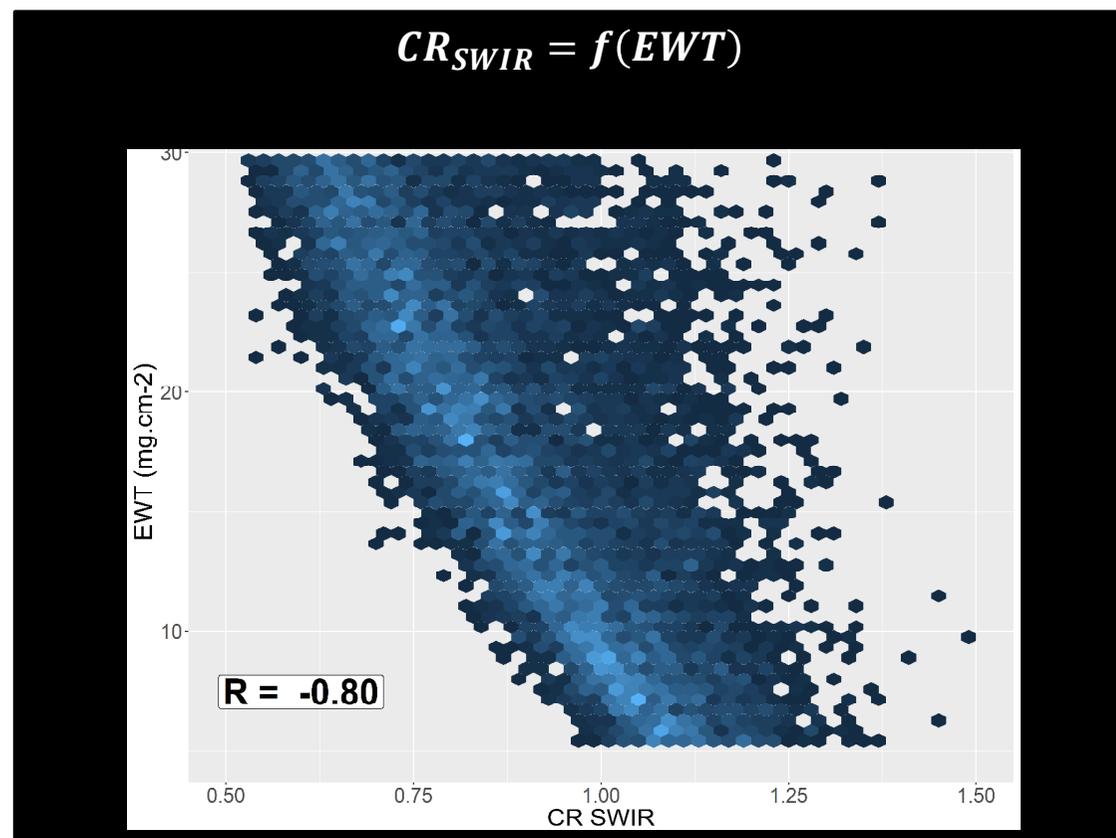
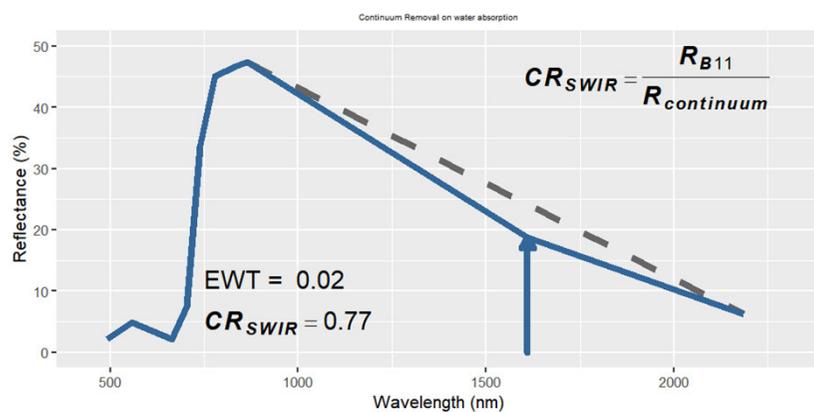
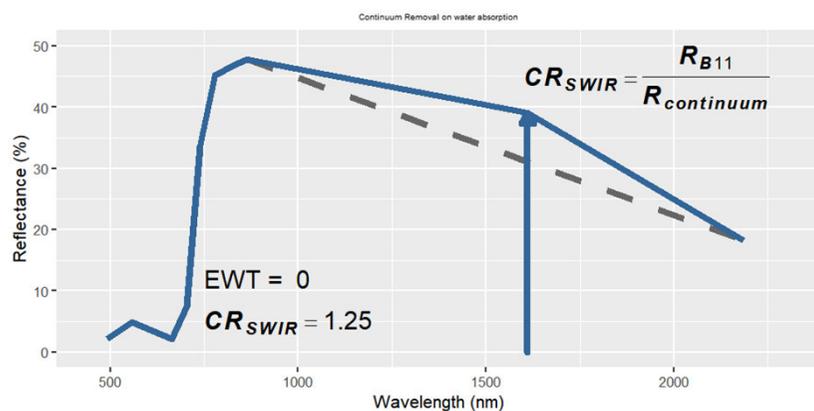
2015-12-03





## Méthodes développées

- **Identification des symptômes les plus pertinents à identifier pour envisager une détection précoce**
  - Stress associé à une diminution de la teneur en eau foliaire (EWT) identifié comme pertinent dans la littérature
  - $CR_{SWIR}$ : indice optimisé pour la détection de la teneur en eau de la végétation par imagerie Sentinel-2.

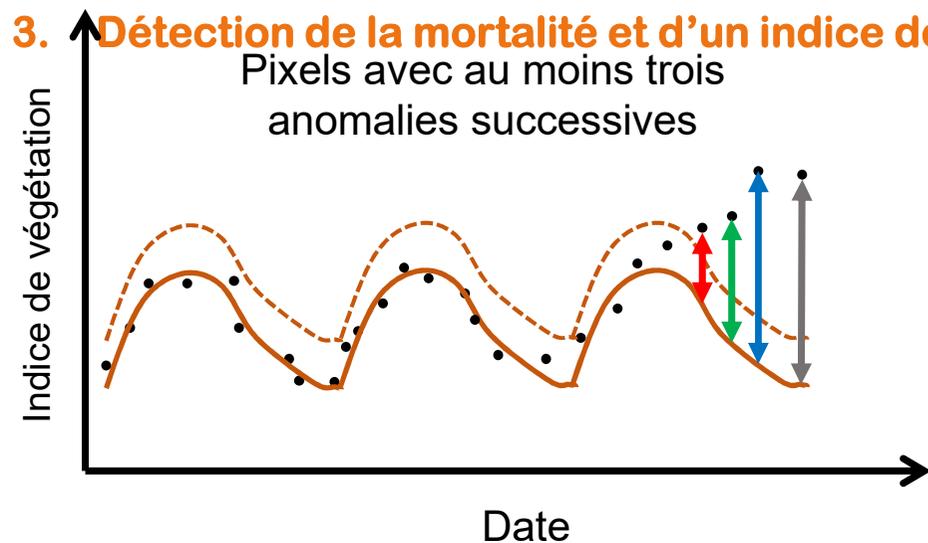




## Méthodes développées

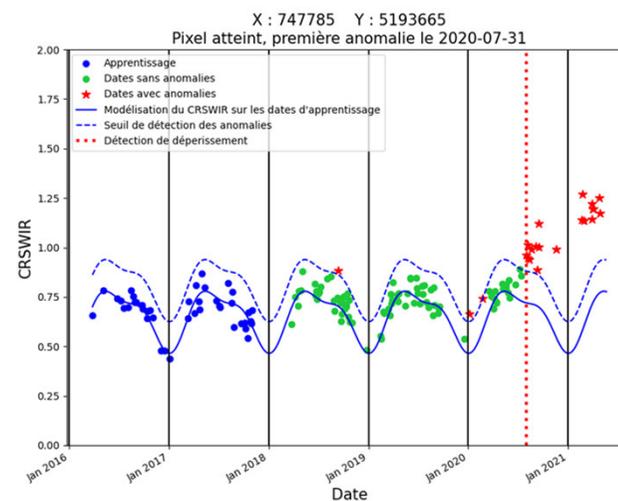
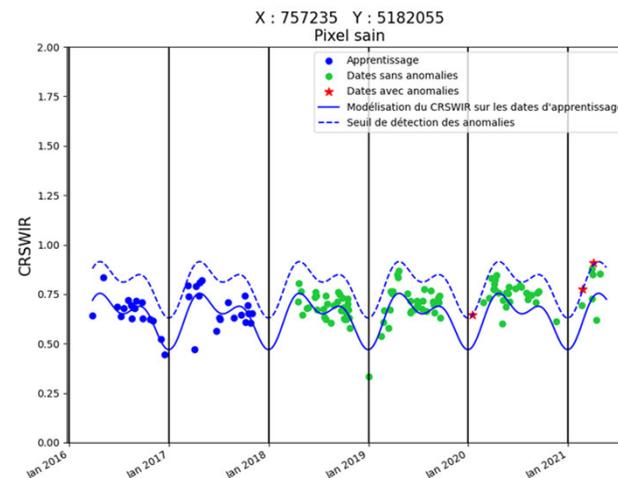
Détection d'anomalies dans les séries temporelles d'indices  $CR_{SWIR}$  à partir de l'ajustement d'un modèle harmonique

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
3. Détection de la mortalité et d'un indice de confiance



*indice de confiance* =

$$\frac{\sum_1^4 i \times anomalie_i}{\sum_1^4 i}$$





## Méthodes développées

Détection d'anomalies 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
3. Détection de la mortalité et d'un indice de confiance
4. Prise en compte d'un masque forêt si disponible
5. Exportation des résultats

- Sain
- Anomalie
  - Coupe sanitaire
  - Sol nu

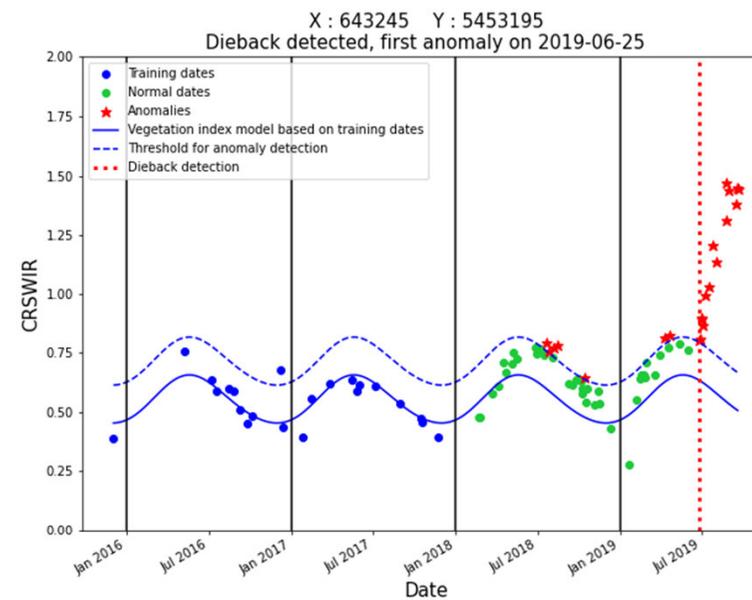
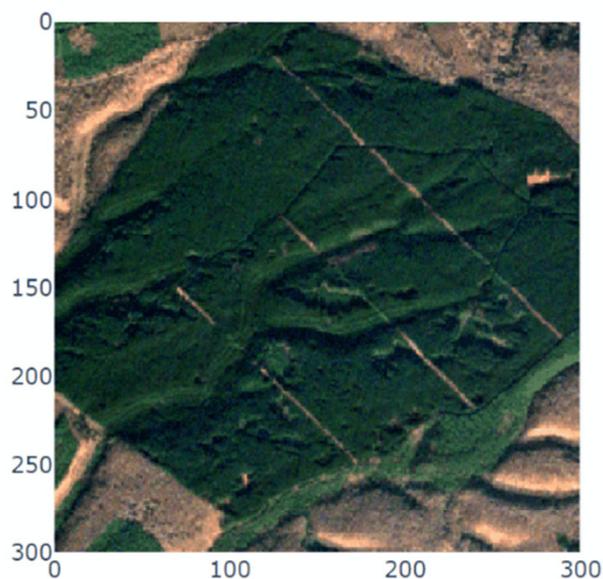
2015-12-03



(Dutrieux et al, 2020)



## Méthodes développées



Date : 2015-12-03



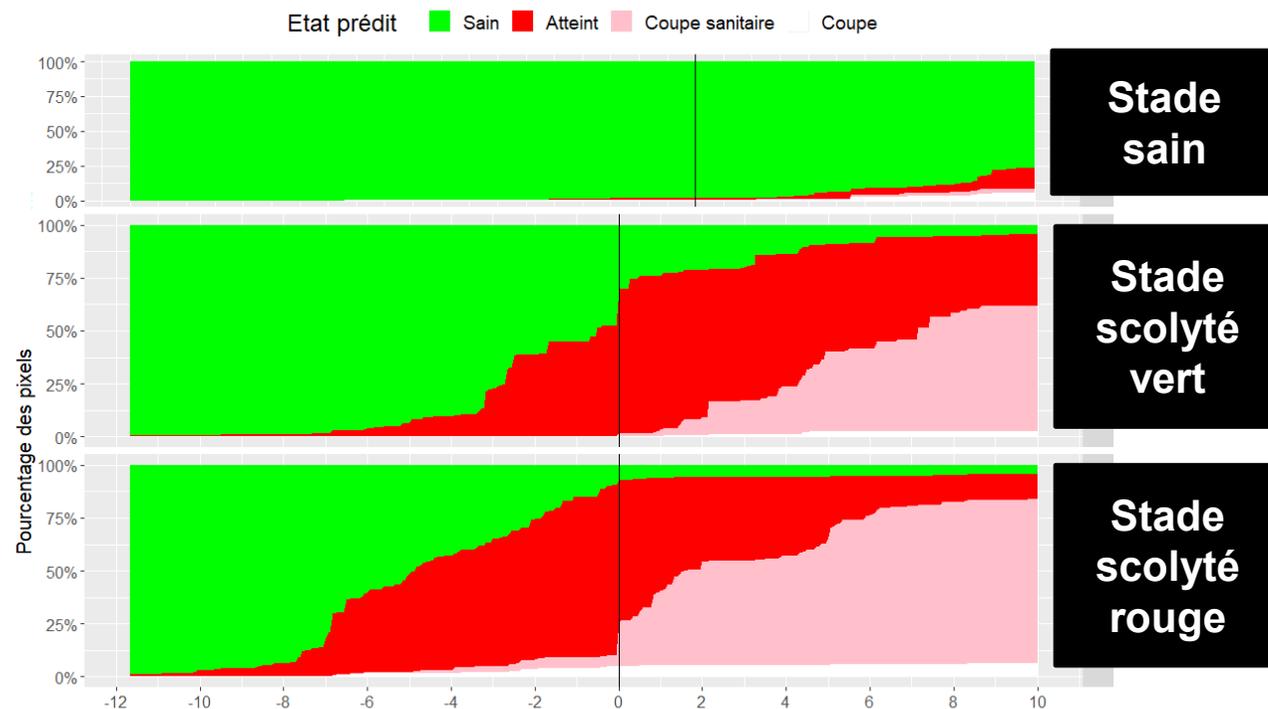
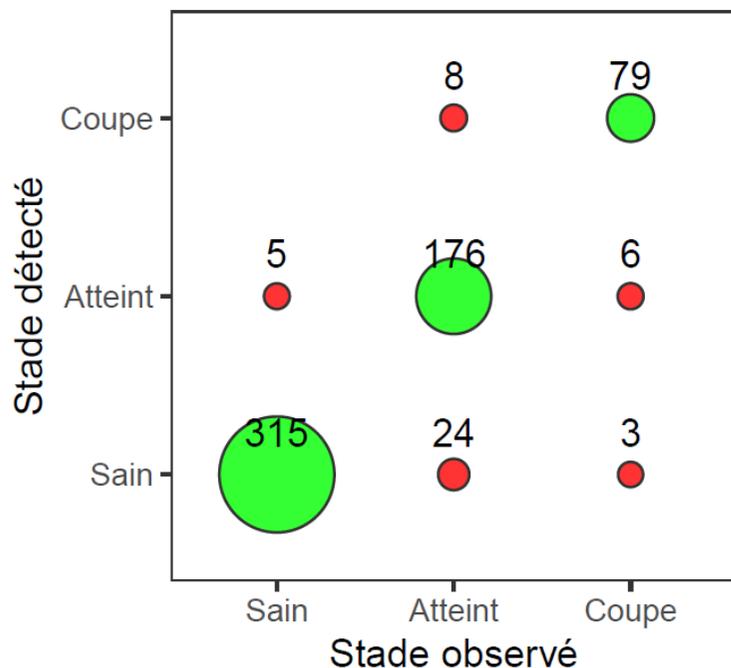
(Dutrieux et al, 2020)



## Résultats

- Validation de la méthode à partir de données de terrain collectées par l'ONF, le CNPF et le DSF
  - Détections conformes aux observations à la même date
  - Détections précoces pour ~ 70% des observations au stade scolyté vert (symptômes peu visibles)

Coefficient de Kappa : 0.87

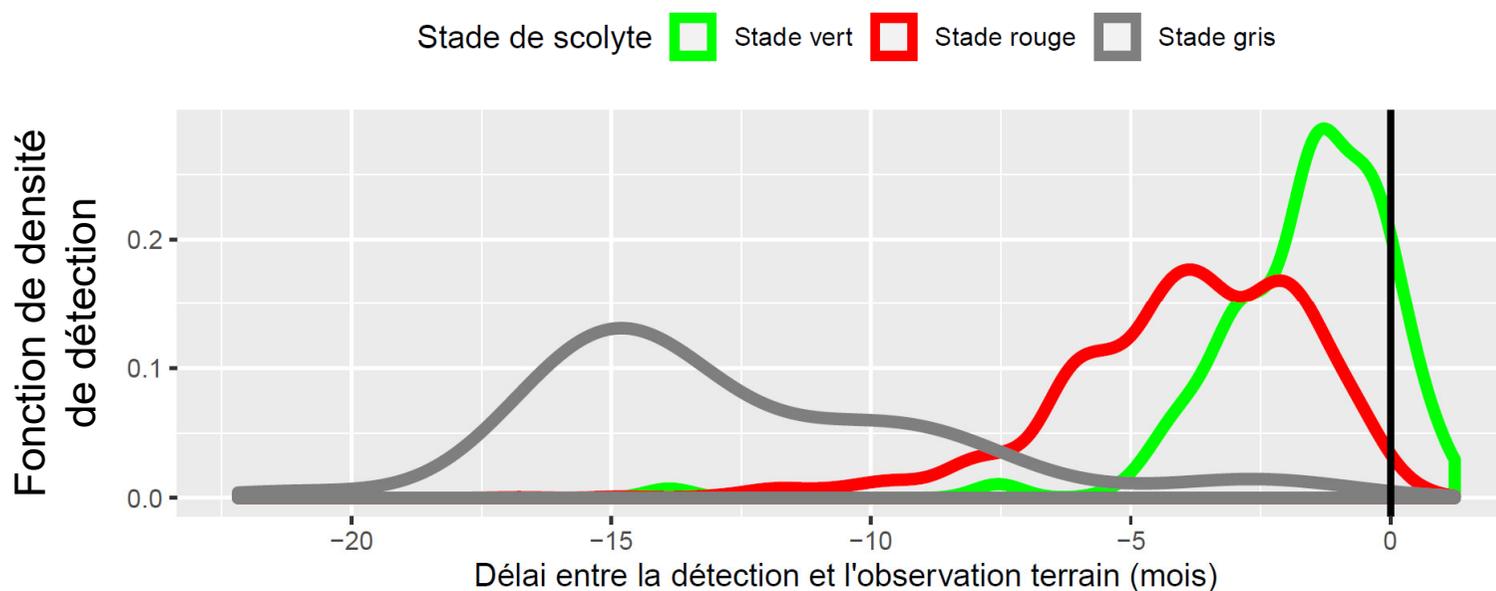


Nombre de mois entre date de relevés terrain (t<sub>0</sub>) et détection par S2



## Résultats

- Validation de la méthode à partir de données de terrain collectées par l'ONF, le CNPF et le DSF
  - Détectés conformes aux observations à la même date
  - Détectés précoces pour ~ 70% des observations au stade scolyté vert (symptômes peu visibles)

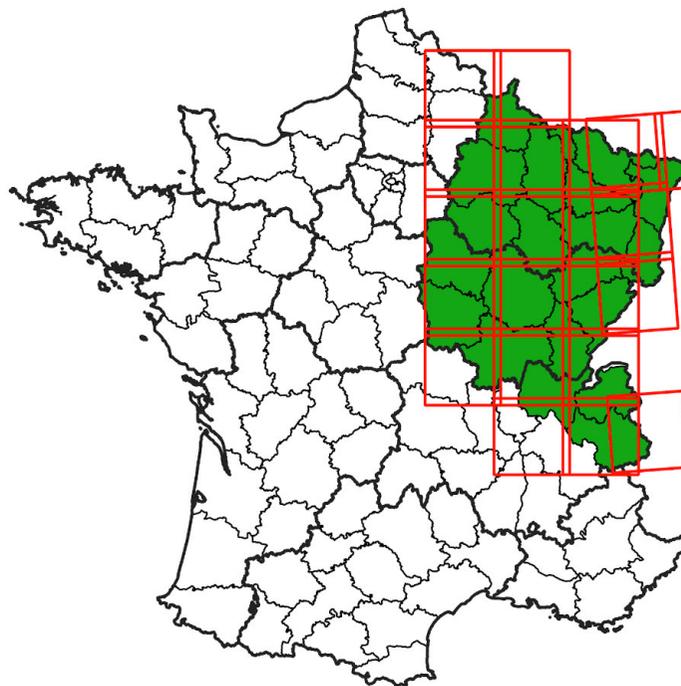


Stade de scolytes	Stade vert	Stade rouge	Stade gris
Délai d'observation médian (mois)	-1.5	-3.7	-13.8



## Résultats

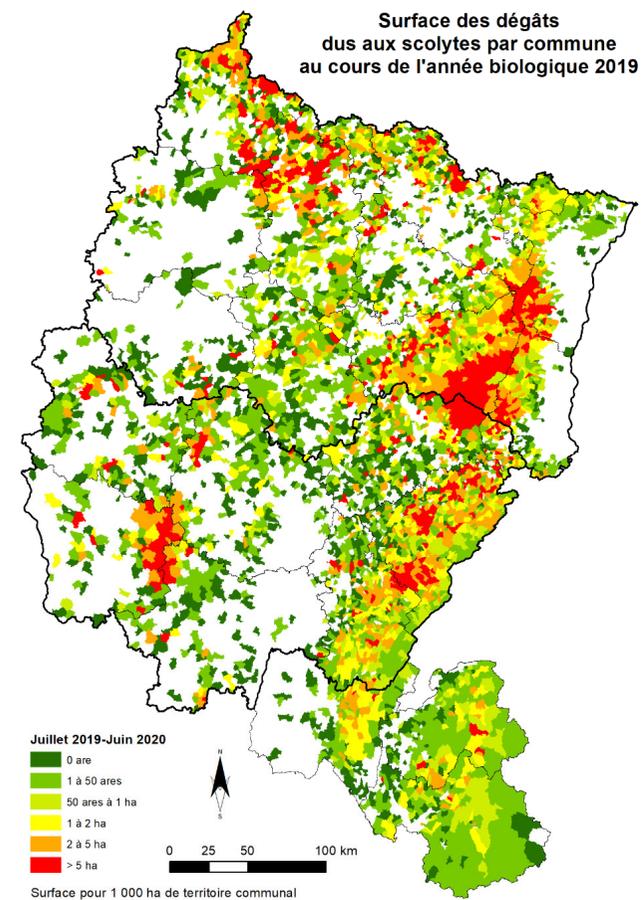
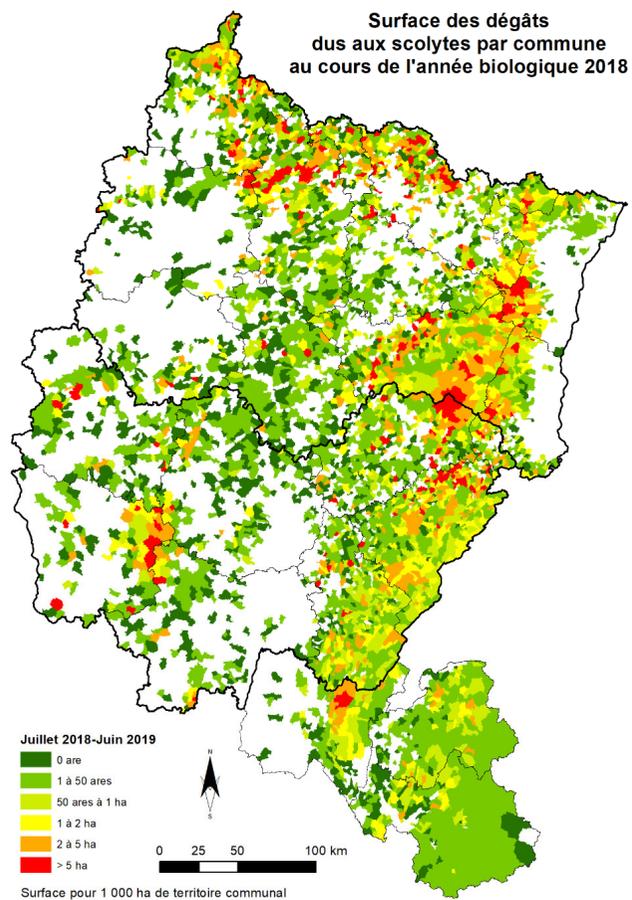
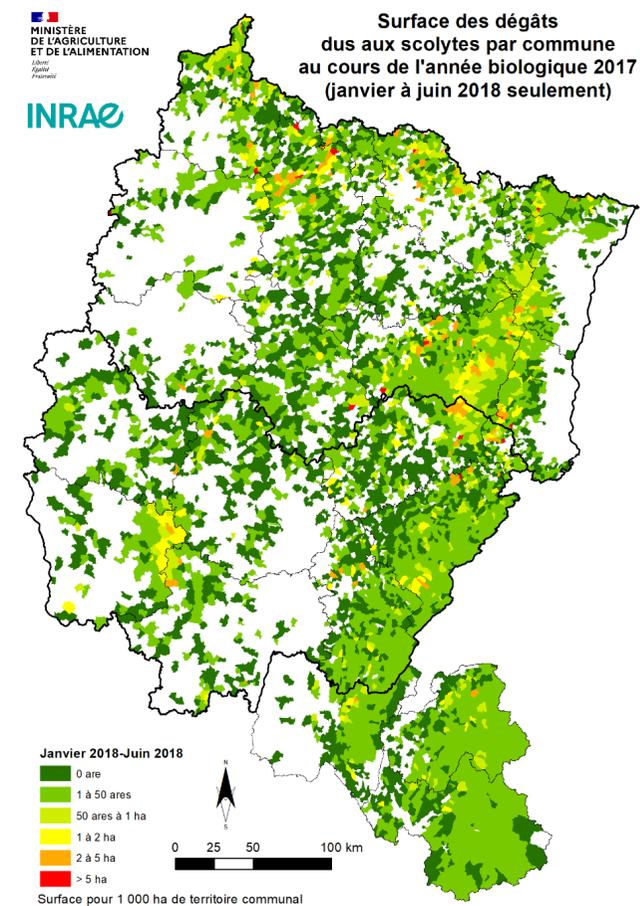
- **Application au quart nord est de la France**
  - 120 000 km<sup>2</sup> analysés
  - 21 tuiles Sentinel-2
  - Production de cartes de foyers de scolytes mises à jour tous les 2-3 mois fournies au ministère en charge de la forêt





## Résultats

- Dynamique temporelle des dégâts: 2017-2021

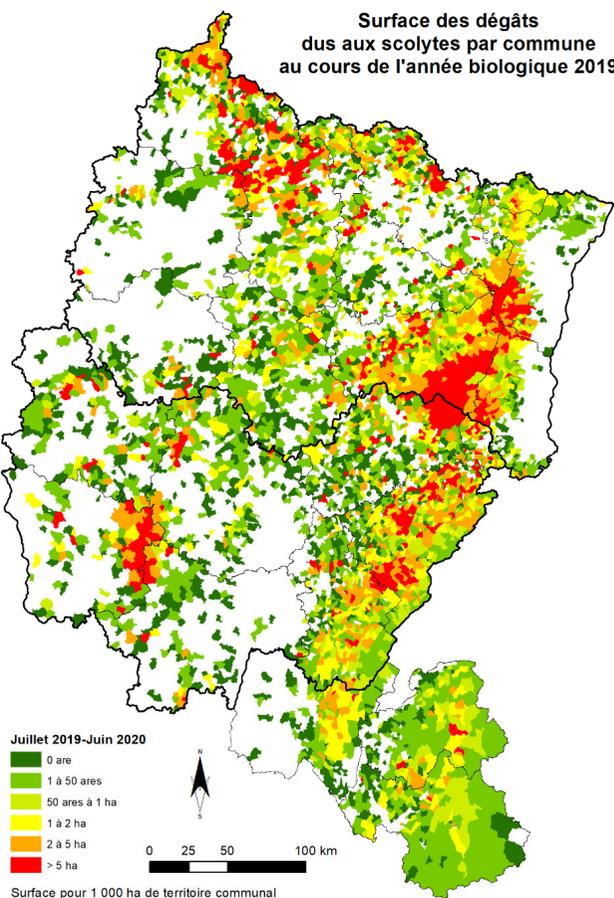




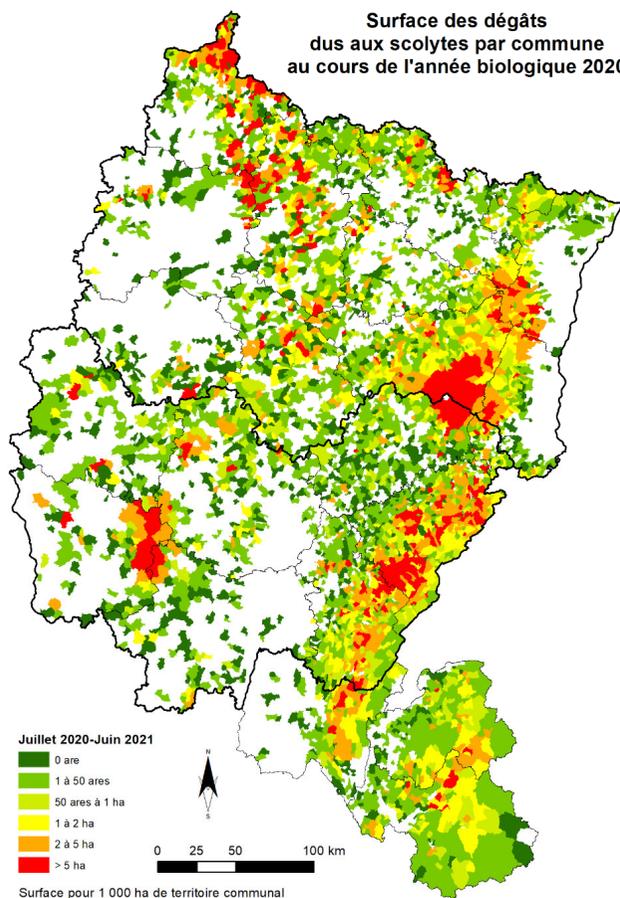
## Résultats

- Dynamique temporelle des dégâts: 2017-2021

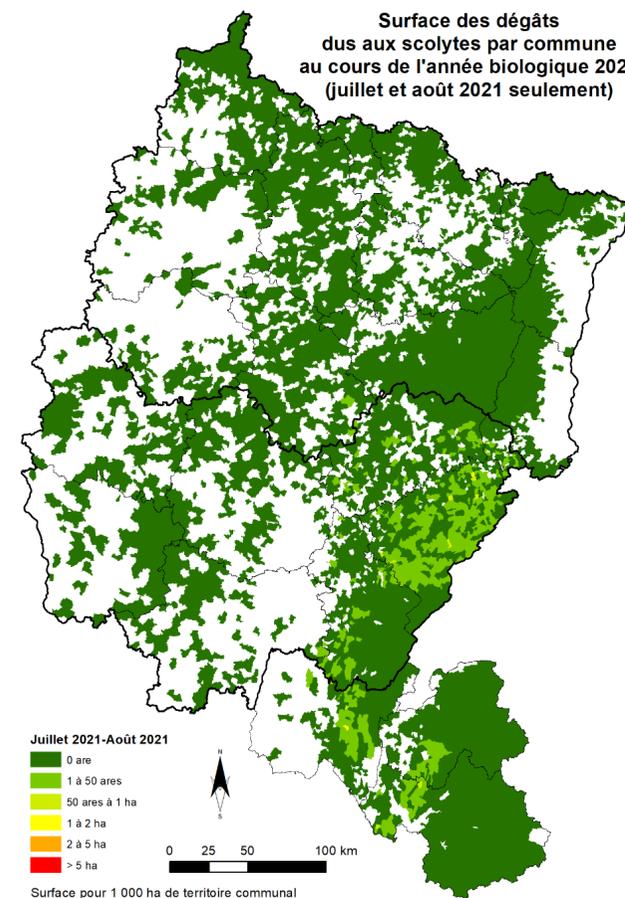
Surface des dégâts  
dus aux scolytes par commune  
au cours de l'année biologique 2019



Surface des dégâts  
dus aux scolytes par commune  
au cours de l'année biologique 2020



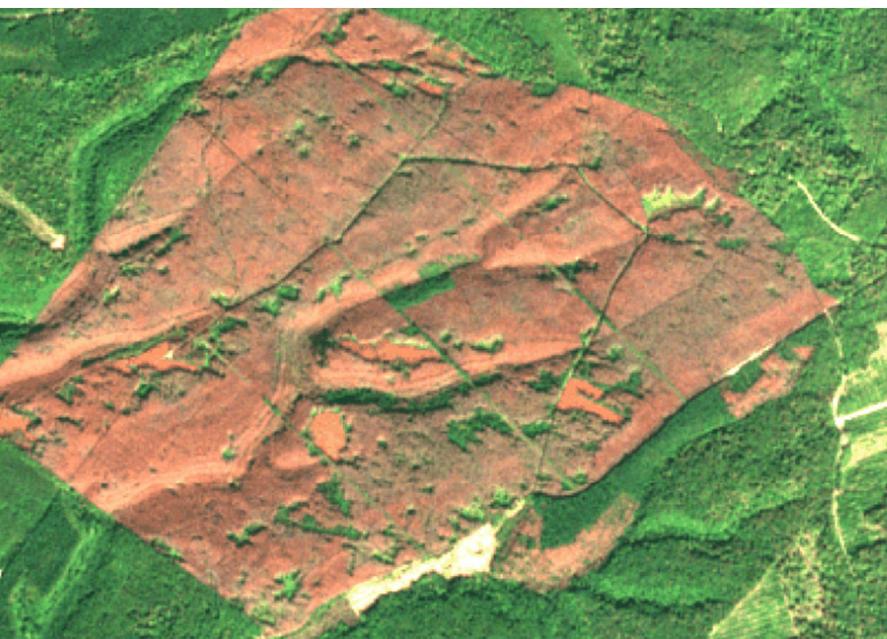
Surface des dégâts  
dus aux scolytes par commune  
au cours de l'année biologique 2021  
(juillet et août 2021 seulement)





## Résultats

- **Produits obtenus a l'issue du traitement de la série temporelle Sentinel-2**
  - Carte des dates auxquelles ont été détectées les anomalies
  - Carte d'incertitudes associées aux détections





# Conclusions et perspectives

- L'analyse de saisonnalité de séries temporelles Sentinel-2 permet d'identifier les foyers de mortalité des conifères touchés par des attaques de scolytes avec une bonne précision.
- L'évolution du  $CR_{SWIR}$ , dédié au suivi du contenu en eau de la végétation, permet potentiellement une détection précoce des foyers de scolytes au stade vert
- Méthode développée sous forme du package python **FORDEAD**, hébergé sur dépôt gitlab [ouvert au public](https://fordead.gitlab.io/fordead_package/)

[https://fordead.gitlab.io/fordead\\_package/](https://fordead.gitlab.io/fordead_package/)

- Production à l'échelle régionale réalisée pour les années 2017 à 2022 sur les région Grand Est, Bourgogne-Franche-Comté et les départements de l'Ain, de la Savoie et de la Haute-Savoie
- Une formation a été effectuée en Janvier 2021 (ONF, DSF, CNPF ...)
- FORDEAD est utilisé dans le contexte d'autres essences: pin, sapin, feuillus...
- Maintenance évolutive et correction de potentiels bugs à assurer : Besoin de ressource humaine



**Merci de votre attention !  
Questions ?**



**Crédit photo @Sylvain Gaudin (mortalité de pessières dans la Marne)**



Retrouvez toutes les présentations de  
l'atelier  
TÉLÉDÉTECTION & SANTÉ DES FORÊTS



sur [www.theia-land.fr/2022-sante-foret/](http://www.theia-land.fr/2022-sante-foret/)

