

# Suivi et apport de la phénologie pour la classification des essences forestières

N. Karasiak<sup>1</sup>, J.-F. Dejoux<sup>2</sup>, C. Monteil<sup>1</sup>, J. Willm<sup>1</sup>, J. Molina<sup>1</sup>, D. Sheeren<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>DYNAFOR, Université de Toulouse, INRA, Castanet-Tolosan, France

<sup>2</sup>CESBIO, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, INRA, Toulouse, France.

<sup>3</sup>TETIS, IRSTEA, Montpellier, France.



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution  
Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.  
Pas d'adaptation et d'utilisation commerciale.



# Contexte et enjeux

Absence de cartographie détaillée des essences forestières à l'échelle nationale

## Pourquoi la forêt ?

Biodiversité :

- ▶ Richesse
- ▶ Mesurer les services écosystémiques
- ▶ Évaluer la résilience

Ressource :

- ▶ Gestion / Production
- ▶ Détection des situations à risques

## Pourquoi la télédétection ?

- ▶ Indispensable sur de larges étendues
- ▶ Renouvelable

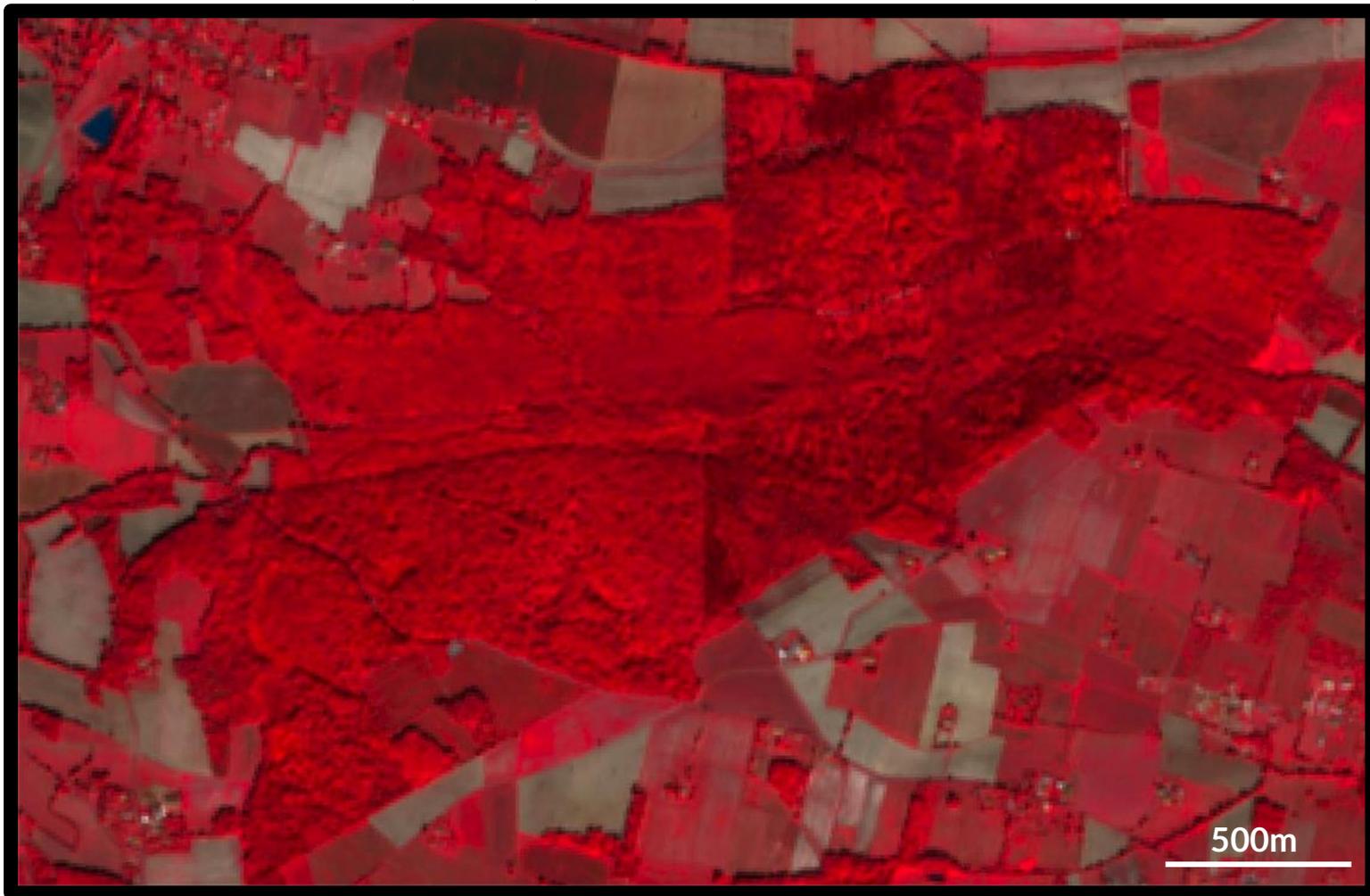
Comment enrichir la connaissance sur les espaces forestiers de façon régulière sur de larges étendues ?

# FORÊT DE RIEUMES, IGN, 2013



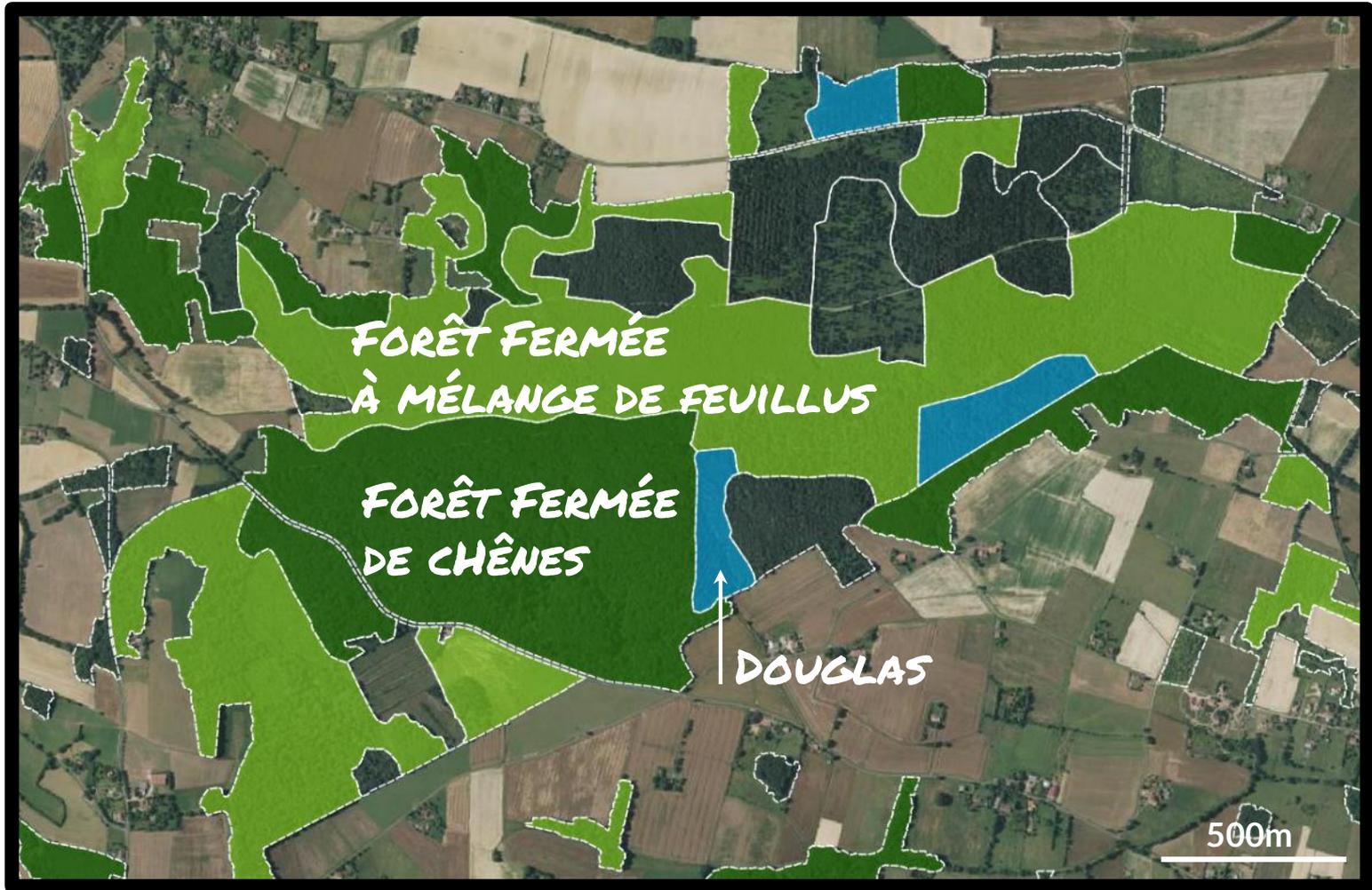
500m

# FORÊT DE RIEUMES, IGN, 2013



500m

# FORÊT DE RIEUMES, IGN, 2013



# Revue de la littérature

“

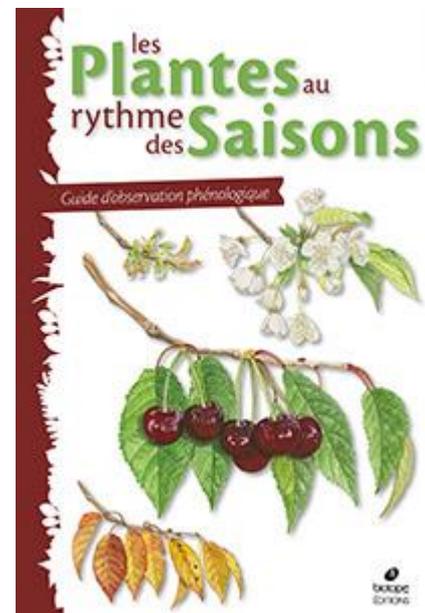
Due to increased information on phenology, dense series of multitemporal, multispectral Landsat-8 and Sentinel-2 data can serve as a good basis for the mapping of forest composition at national scales, considering major tree species typically occurring in temperate and boreal ecosystems.

”

Fassnacht *et al.*, 2016<sup>1</sup>

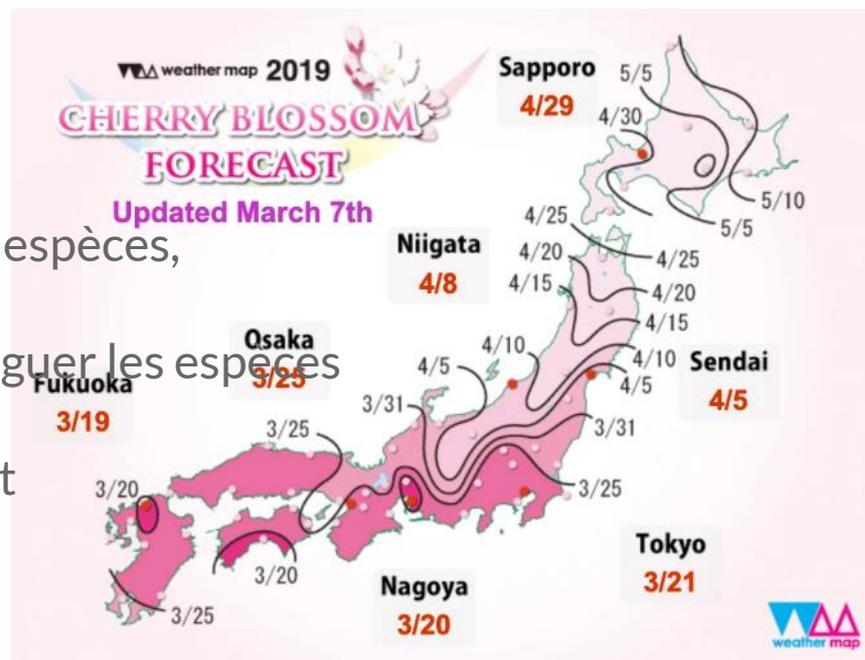
# Qu'est-ce que la phénologie ?

- Cycle annuel de la végétation
- Des comportements différents entre espèces,
- Qui doivent nous aider à mieux distinguer les espèces
- Permet de suivre l'évolution du climat



# Qu'est-ce que la phénologie ?

- Cycle annuel de la végétation
- Des comportements différents entre espèces,
- Qui doivent nous aider à mieux distinguer les espèces
- Permet de suivre l'évolution du climat et la floraison des cerisiers

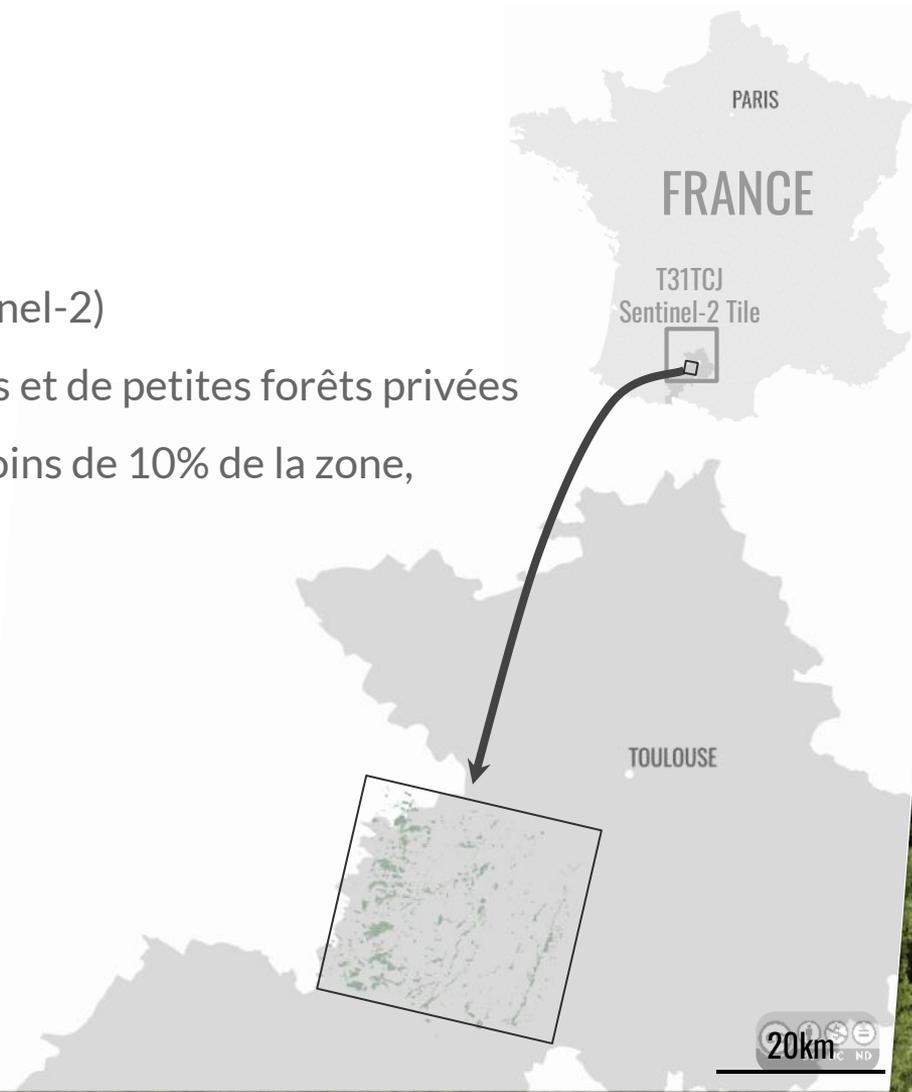


# Questions de recherche

- 1 Est-ce que les séries temporelles du satellite Sentinel-2 permettent de cartographier automatiquement les essences forestières ?
- 2 Quelle cohérence entre les observations phénologiques in-situ et les dates privilégiées par l'algorithme ?

# Zone d'étude

- Carré de 25x25km (1/16 de la tuile Sentinel-2)
- La zone est surtout composée de cultures et de petites forêts privées
- Milieu tempéré où la forêt représente moins de 10% de la zone, soit 54km<sup>2</sup>.



2018-01-01



500 m

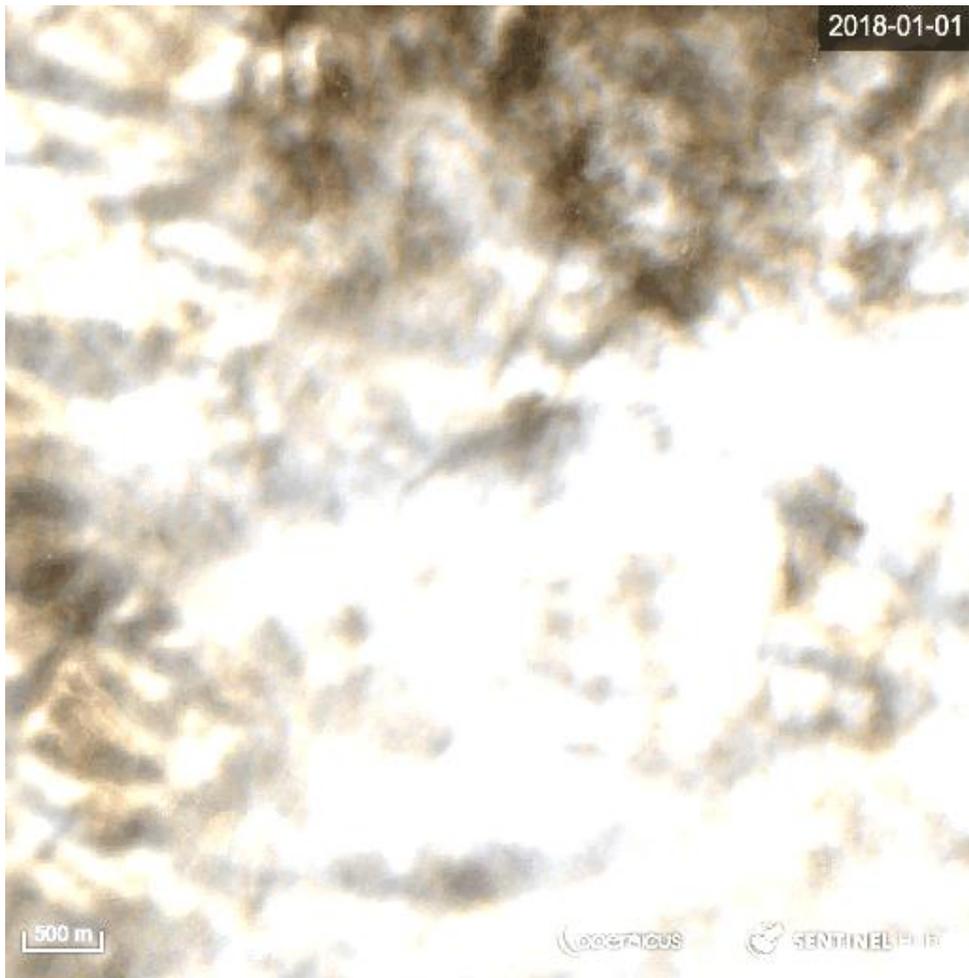
Copernicus

SENTINEL Hub

**MODIS, FORÊT DE RIEUMES, 2018**



2018-01-01



**SENTINEL-2, FORÊT DE RIEUMES, 2018**

2018-02-10



**SENTINEL-2 (-25% NUAGES), FORÊT DE RIEUMES, 2018**

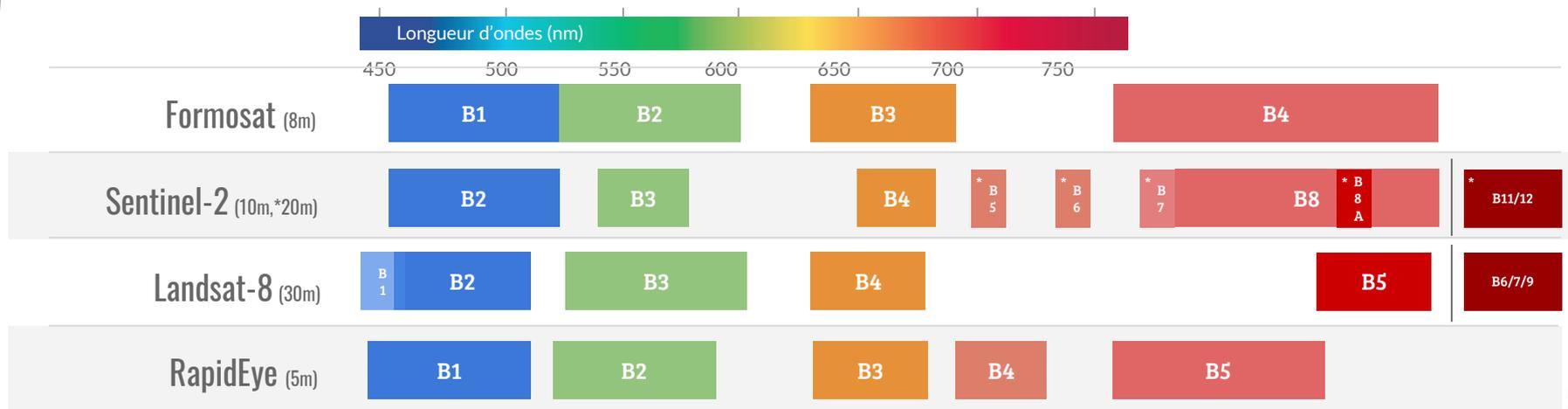
2018-02-10 (1) +0



**SENTINEL-2 GAP-FILLED, FORÊT DE RIEUMES, 2018**

# Data / Images

## Sentinel-2



# Pourquoi Sentinel-2 ? Un parfait compromis

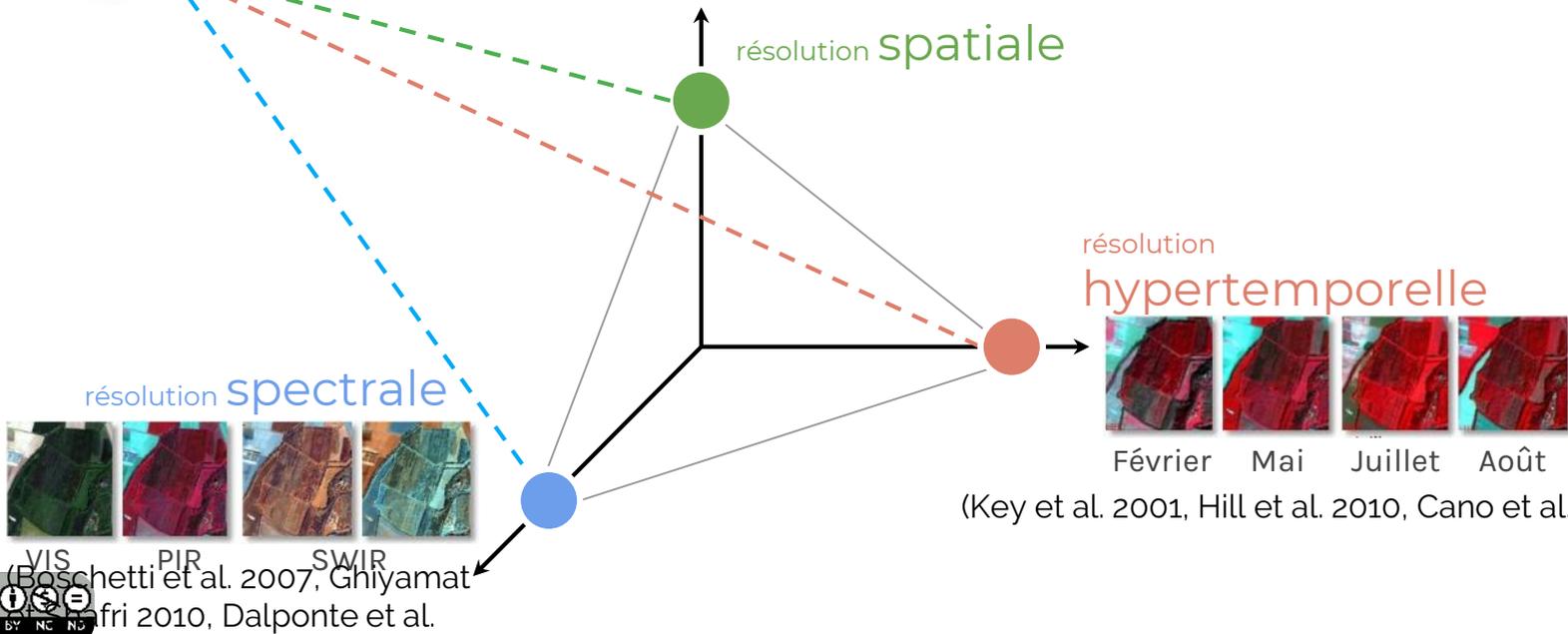


Sentinel-2



SPOT-5 (10m)

(Foody et Hill 1996, Kayitakire et al. 2002, Carleer et Wolff 2004, Immitzer et al. 2012)

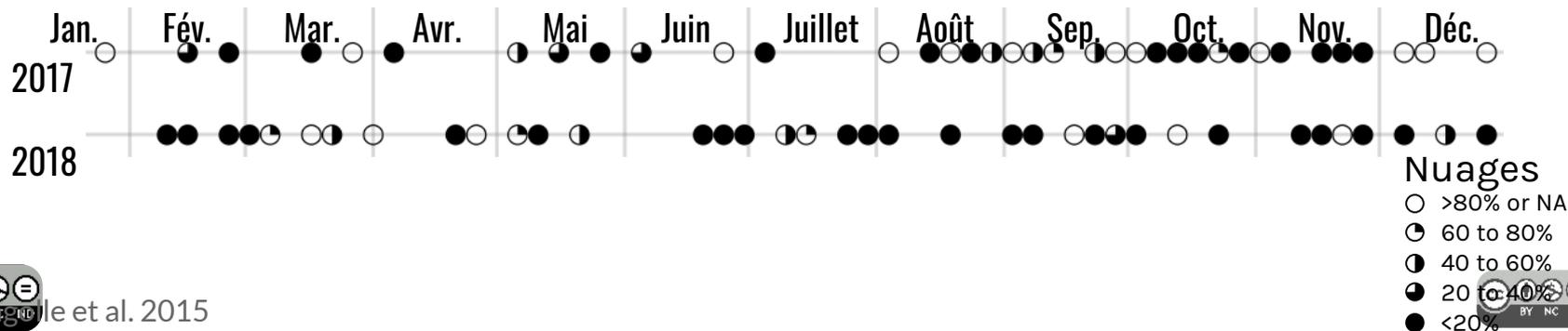


# Data / Images



Série temporelle Sentinel-2, tuile T31TCJ, Level 2A<sup>1</sup> distribué par Theia

- 36 images en 2017, du 26 janvier au 27 décembre
- 37 images de 2018, du 10 février au 27 décembre



# Data / Références terrain des essences

1 échantillon = 1 pixel Sentinel-2

Total : 1626 pixels

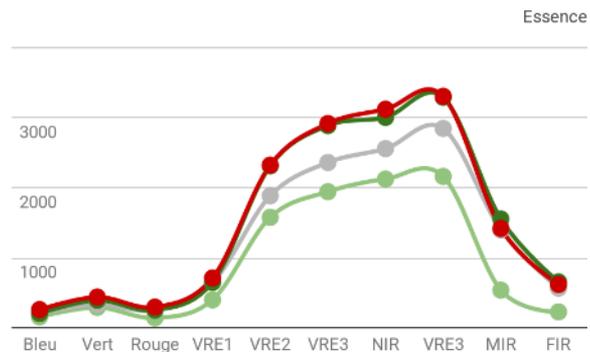
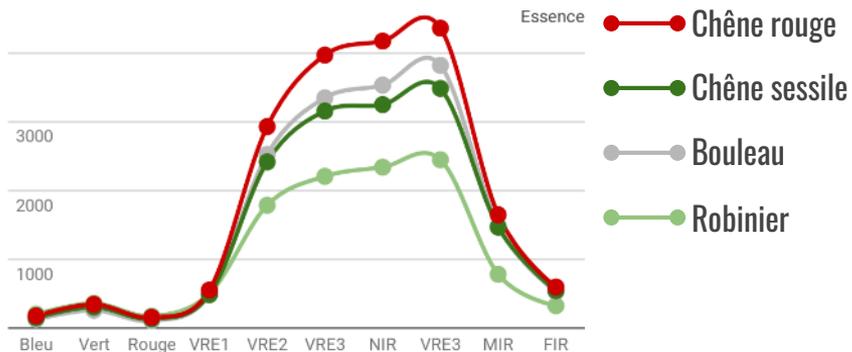
	Espèce	Échantillon	Peuplements
Feuillus	Bouleau ( <i>Betula pendula</i> )	67	3
	Chêne ( <i>Quercus robur/pubescens/petraea</i> )	247	12
	Chêne rouge ( <i>Quercus rubra</i> )	205	9
	Frêne ( <i>Fraxinus excelsior</i> )	139	7
	Peuplier ( <i>Populus tremula</i> )	130	5
	Robinier ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	88	9
	Saule ( <i>Salix alba</i> )	52	4
	Eucalyptus ( <i>Eucalyptus spp.</i> )	143	5
Conifères	Pin corse ( <i>Pinus nigra subsp. Laricio</i> )	201	9
	Pin maritime ( <i>Pinus pinaster</i> )	157	5
	Pin noir ( <i>Pinus nigra</i> )	52	2
	Sapin blanc ( <i>Abies alba</i> )	53	3
	Sapin douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	50	8
	Cyprès ( <i>Cupressus</i> )	42	1



25 JUILLET 2018

11 NOVEMBRE 2018

1km



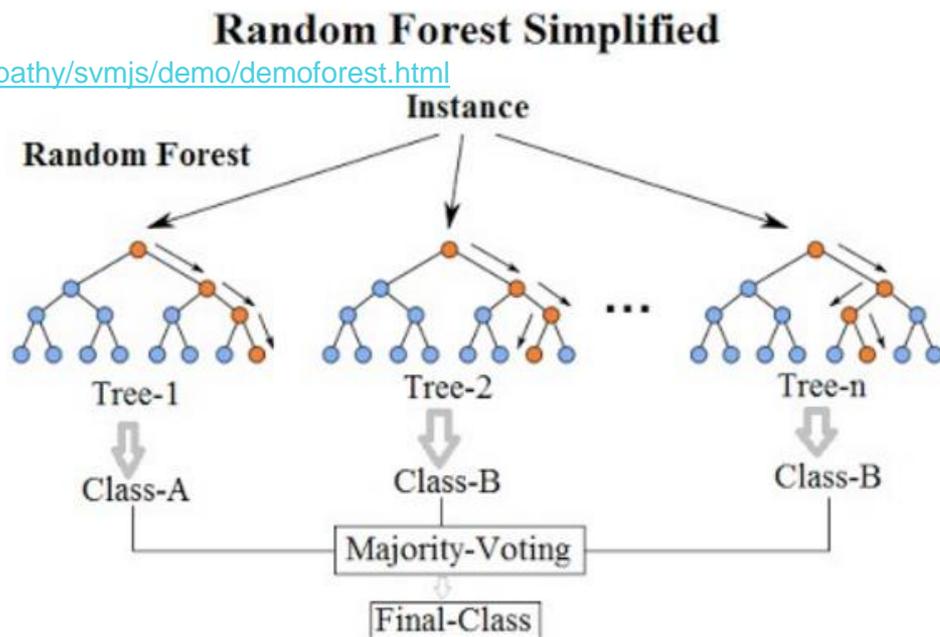
# Méthodologie / Indices spectraux

Indice	Utilisation	Formule
NDVI	Activité de la végétation	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
ACORVI	NDVI pour 2A	$(B8 - B4 + 0.5) / (B8 + B4 + 0.5)$
ACORVinarrow	NDVI avec red-edge	$(B8A - B4) / (B8A + B4)$
LChloC	Leaf Chlorophyll Content	$B7 / B5$
LCaroC	Leaf Carotenoid Content	$B7 / (B2 - B5)$
LAnthoC	Leaf Anthocyanin Content	$B7 / (B3 - B5)$
ARI2	Anthocyanin 2	$(B8 / B2) - (B8 / B3)$
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	$(B4 - B2) / B5$

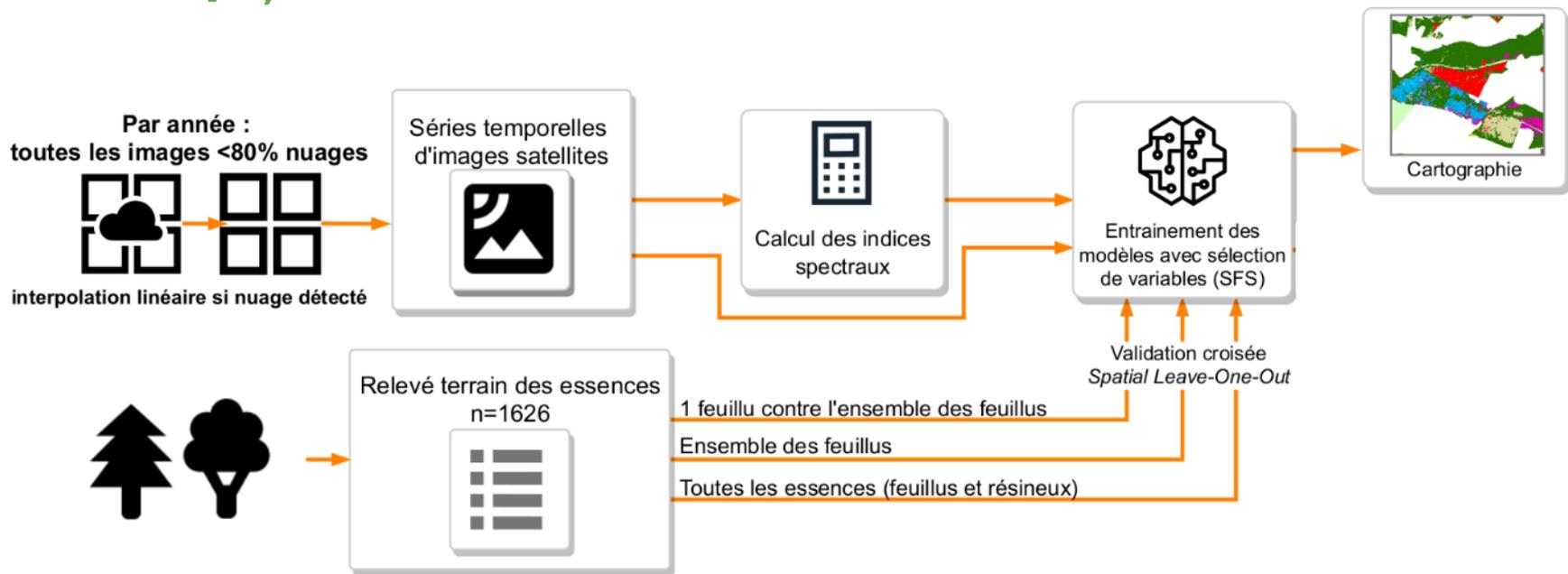
# Méthodologie / Les algorithmes

SVM : <https://cs.stanford.edu/people/karpathy/svmjs/demo/>

RF : <https://cs.stanford.edu/~karpathy/svmjs/demo/demoforest.html>

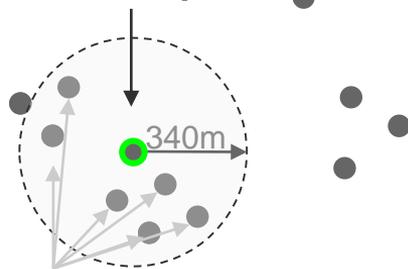


# Méthodologie / Résumé pour la classification



# Méthodologie / Validation croisée

Validation pixel



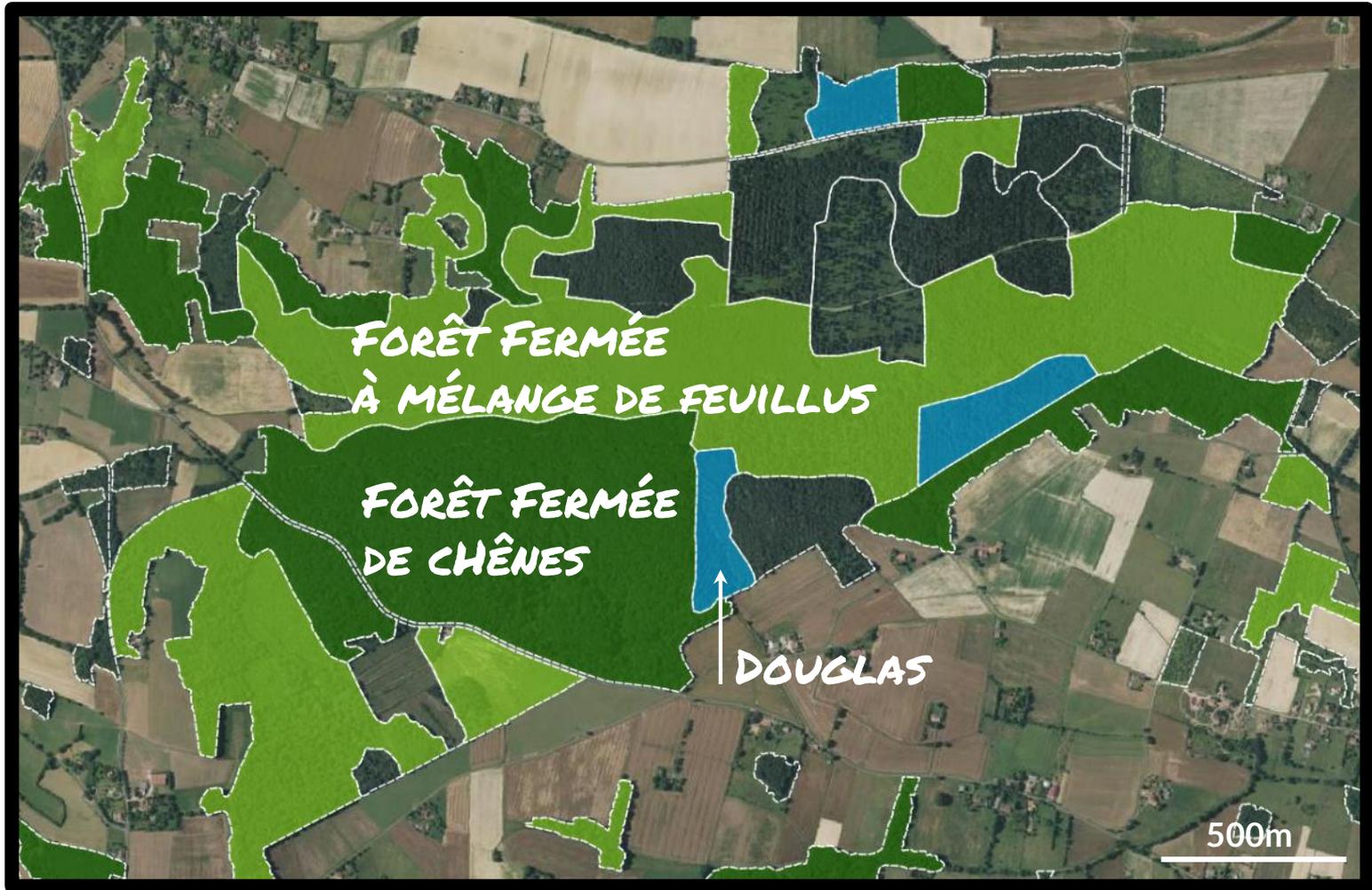
**Pixels spatialement autocorrélés**

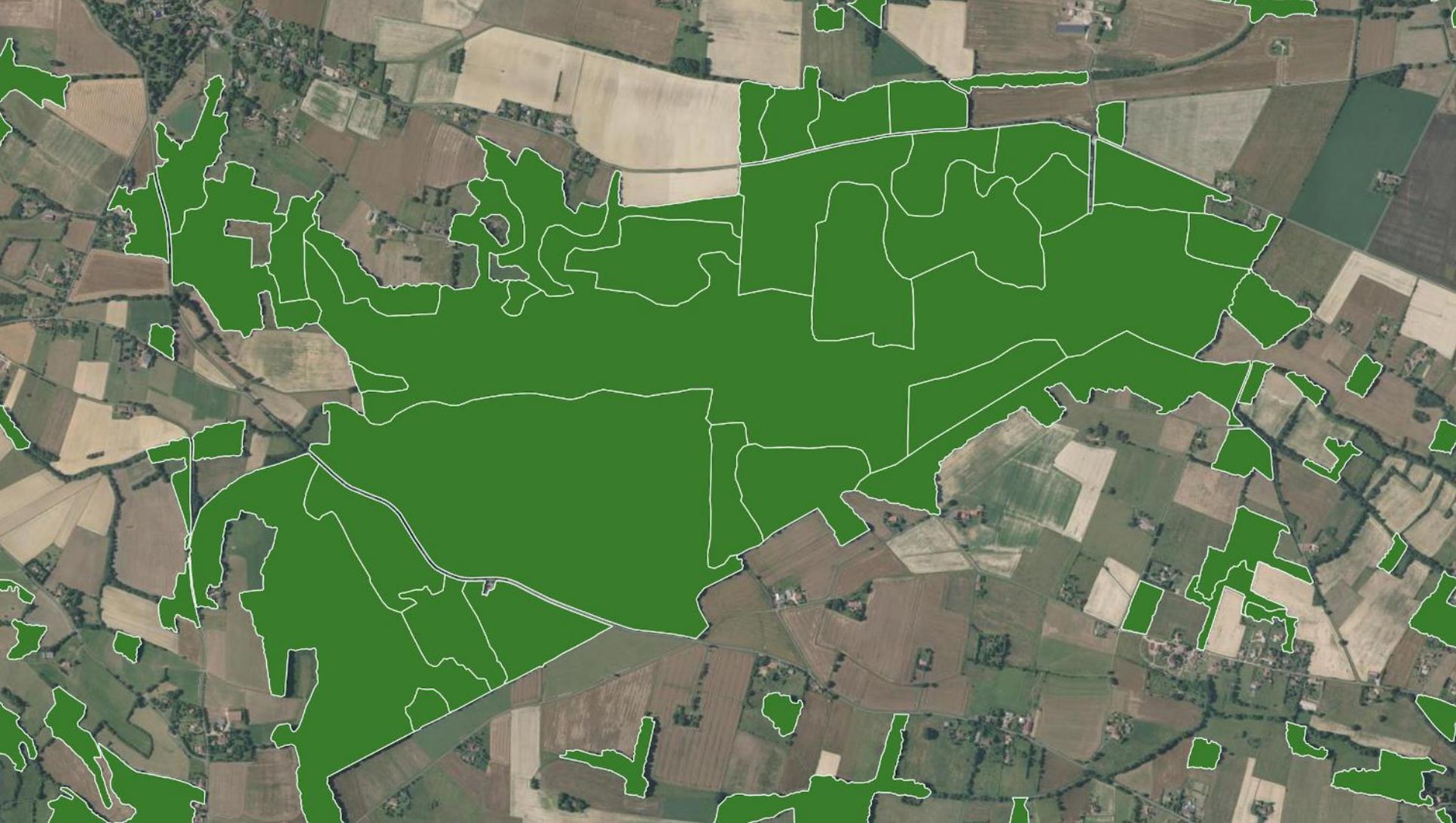
Calcul de l'autocorrélation avec indice de Moran

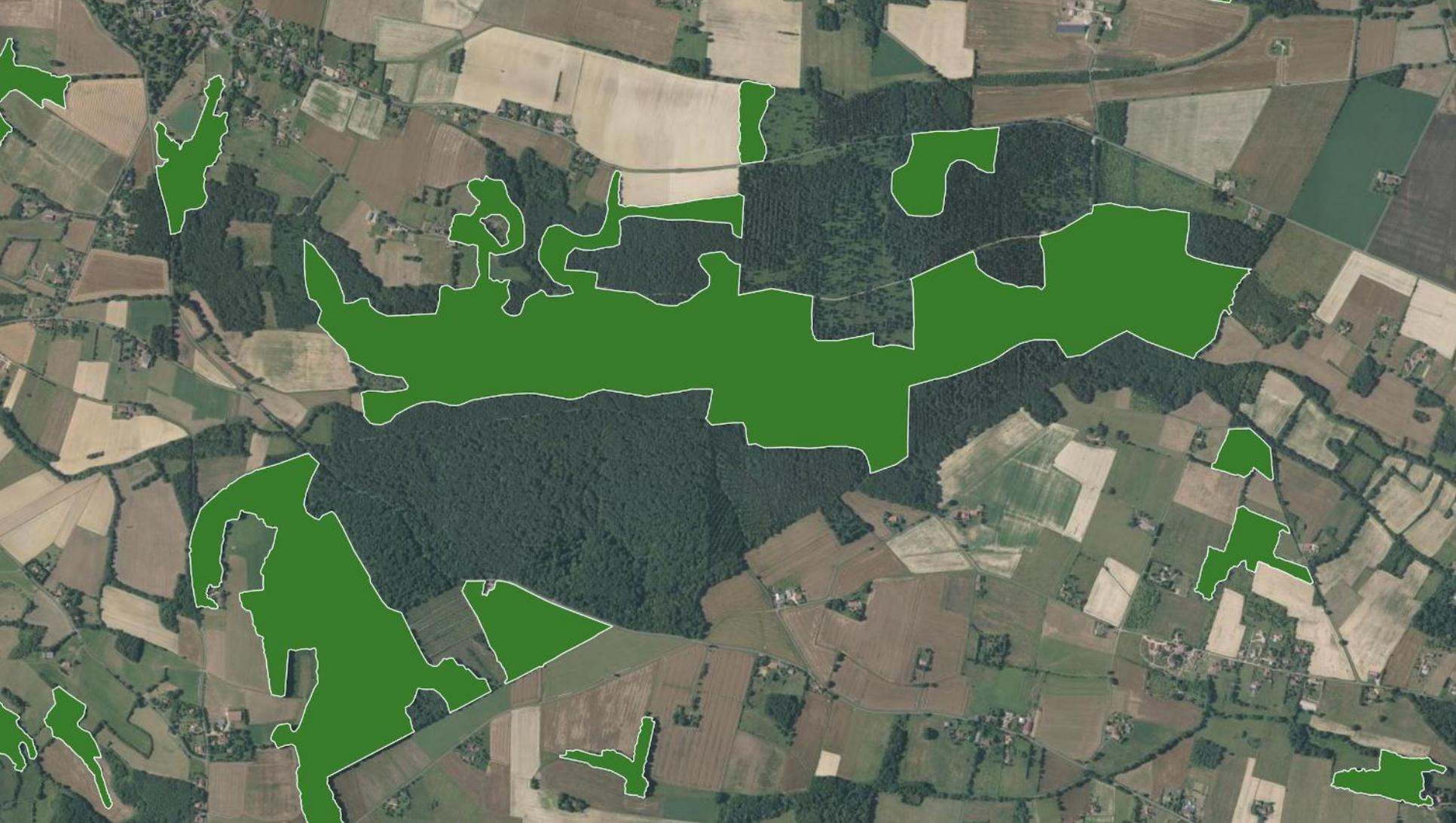
Valeur moyenne de chaque bande spectrale sur les forêts quand Moran's I  $\leq 0.2$

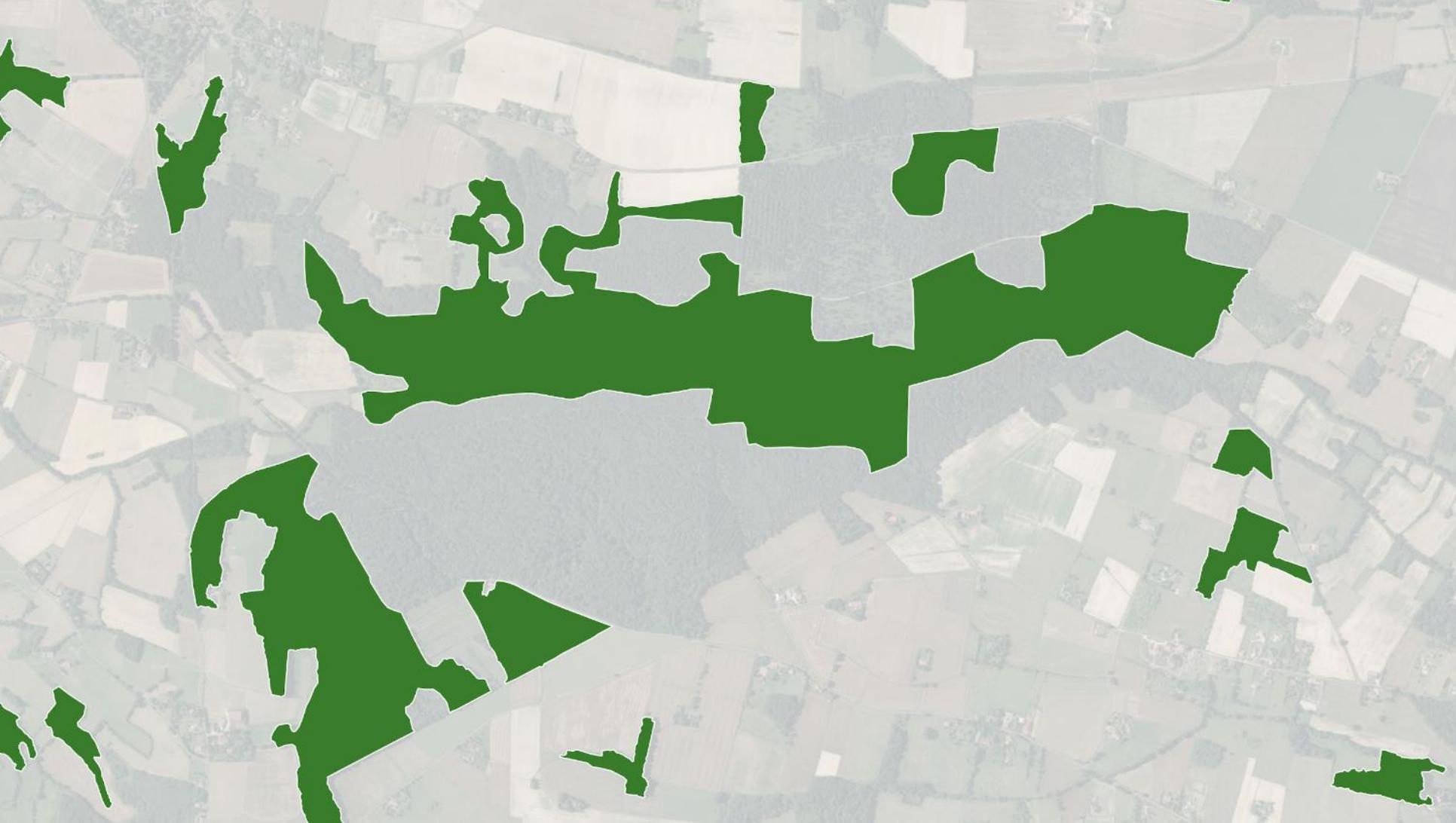


# FORÊT DE RIEUMES, IGN, 2013



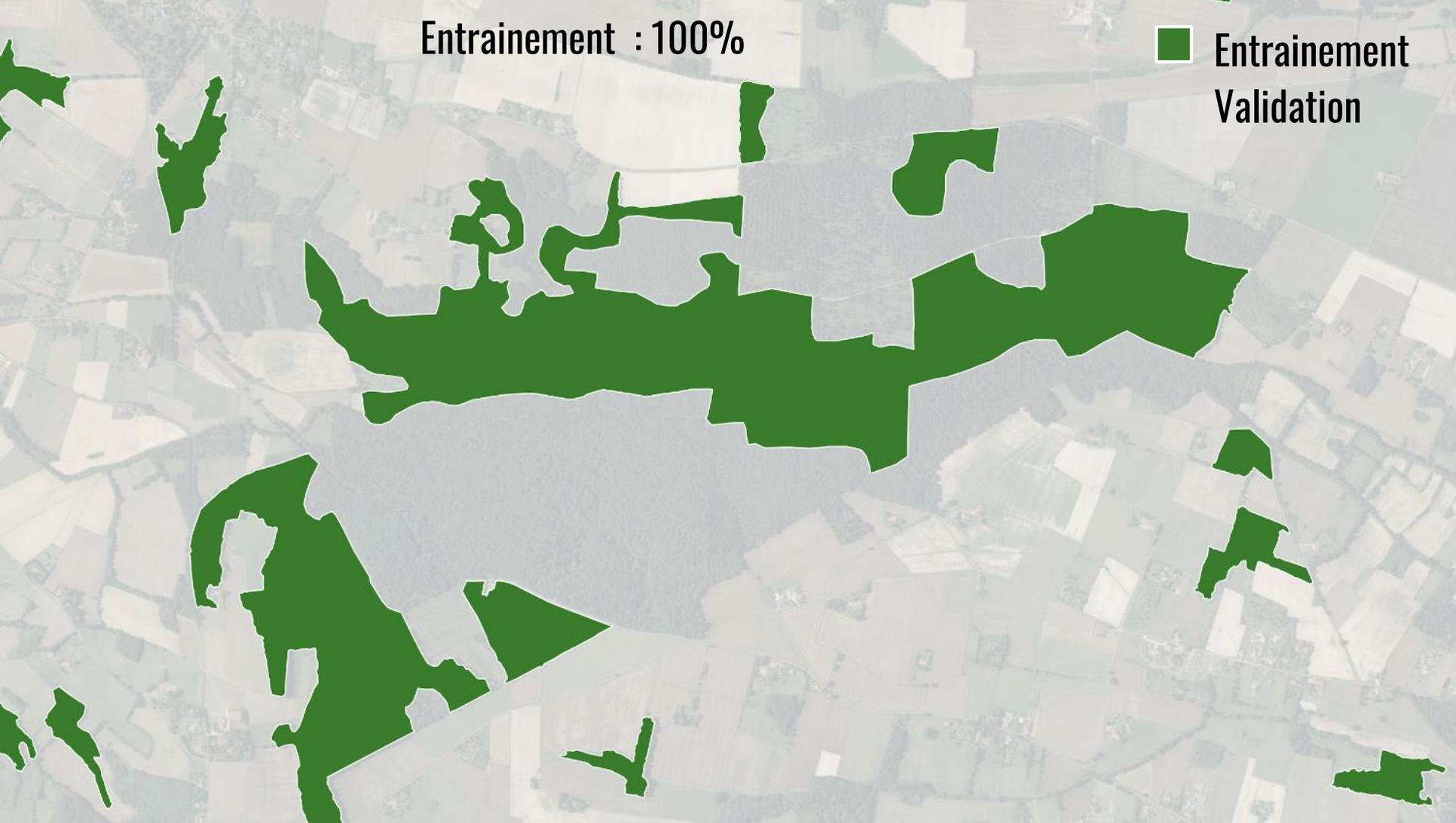






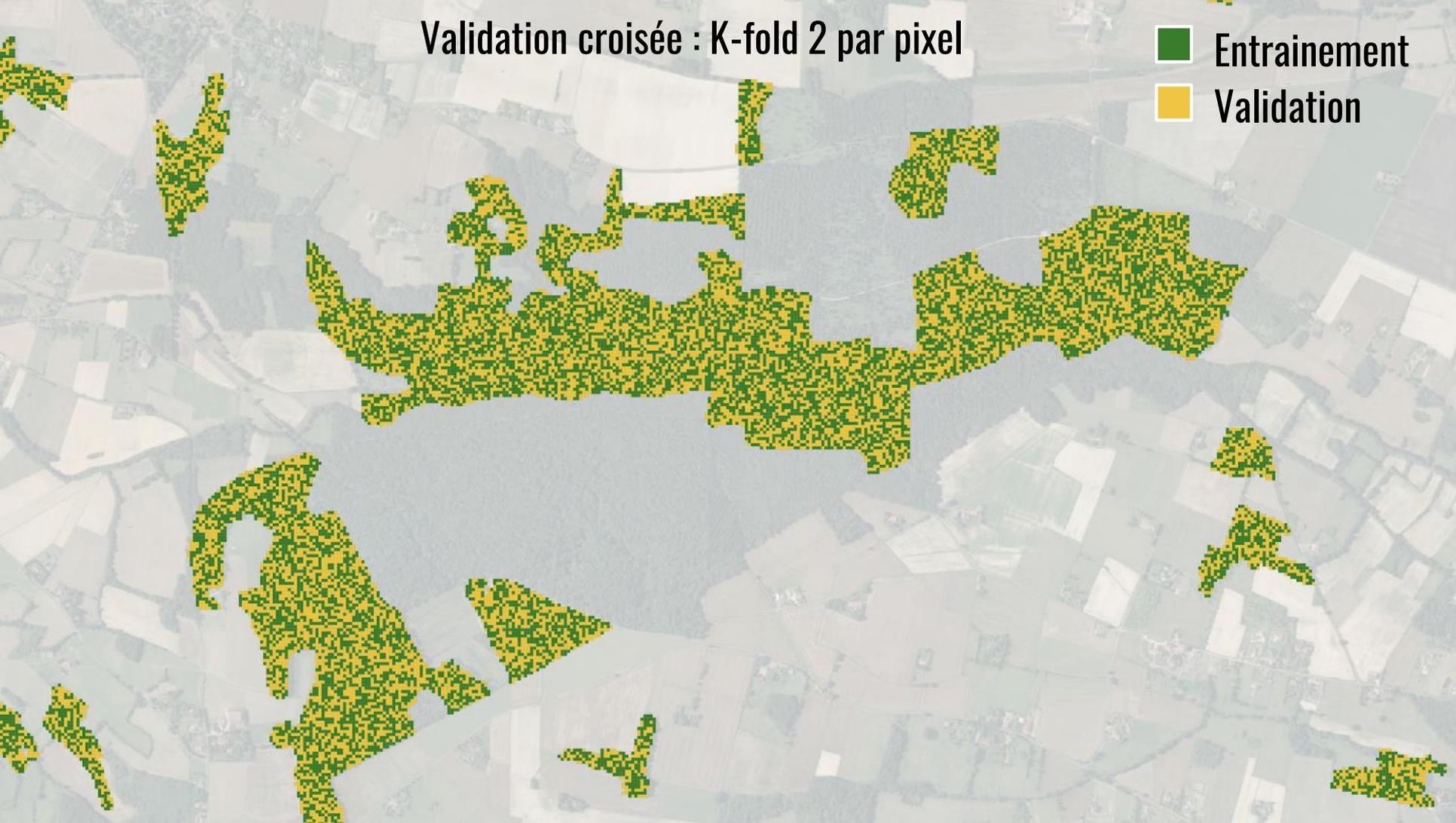
Entrainement : 100%

■ Entrainement  
Validation



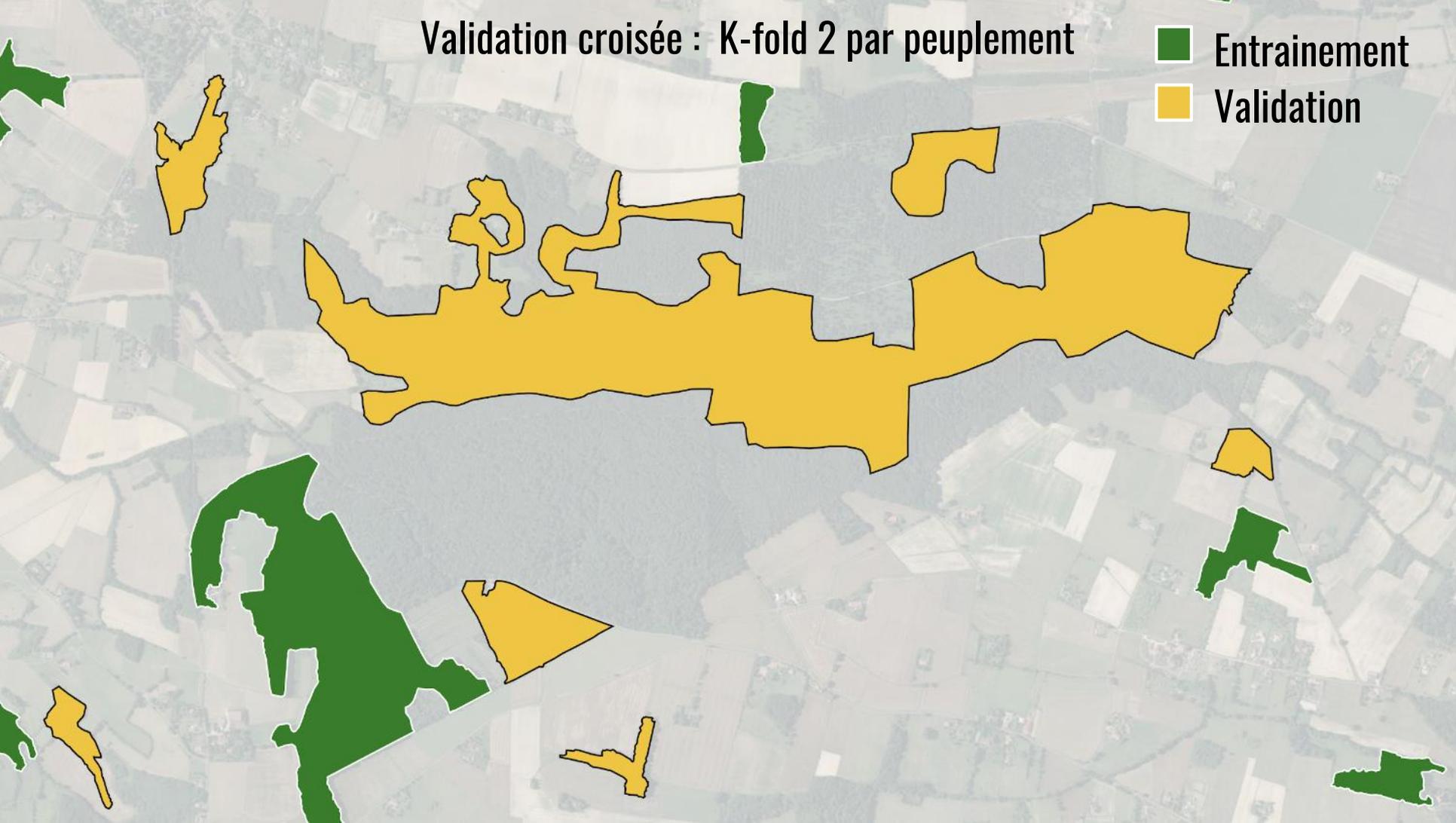
Validation croisée : K-fold 2 par pixel

■ Entrainement  
■ Validation



Validation croisée : K-fold 2 par peuplement

■ Entrainement  
■ Validation



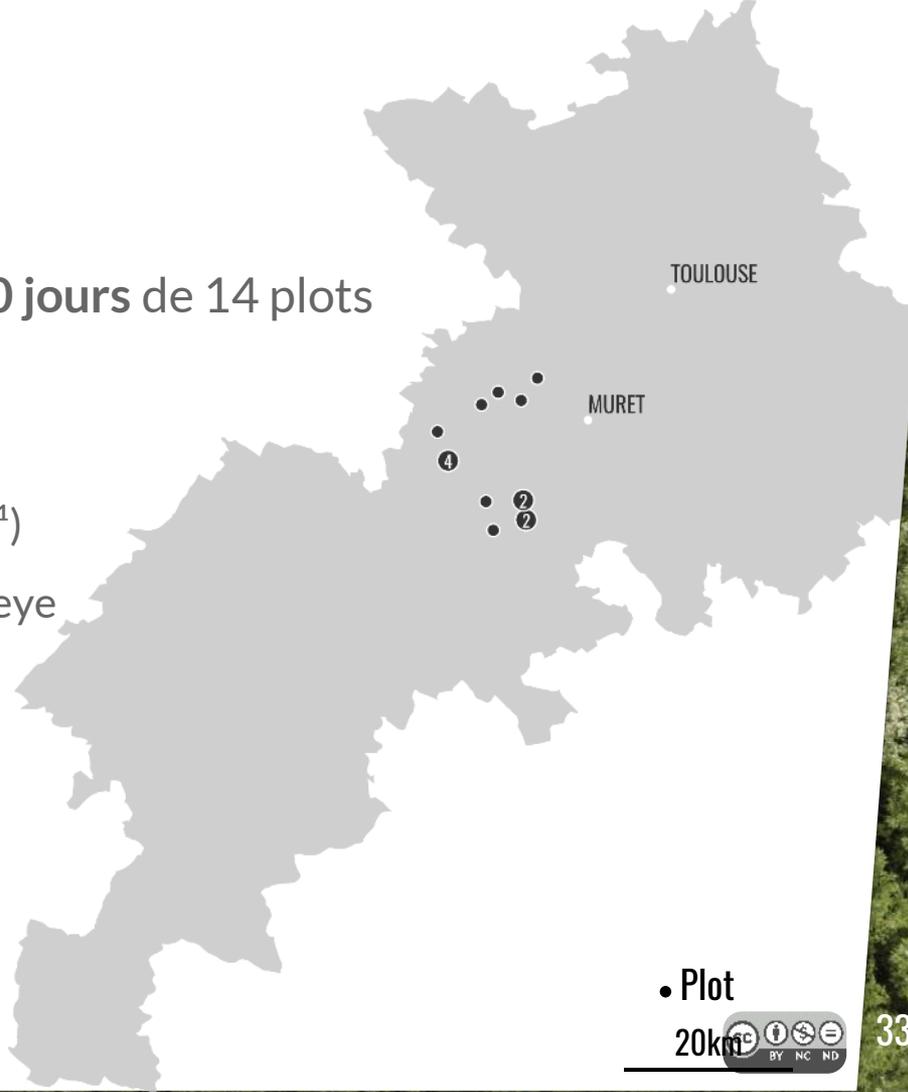


# Data / Suivi phénologique

Depuis septembre 2017 : **visite tous les 10 jours** de 14 plots

(2 par essence)

- **Stade phénologique** (nomenclature BBCH<sup>1</sup>)
- **Ouverture de la canopée** à partir d'un fisheye
  - Application GLAMA<sup>2</sup> pour Android
  - 230° Fisheye pour smartphone
- **Mesure de chlorophylle** avec SPAD
- **État de la végétation** du sous-étage



<sup>1</sup> Badeau et al. 2017

<sup>2</sup> L, Collins B. 2016

• Plot

20km



# Data / Suivi phénologique



Branches nues



Coloration et chute  
des feuilles



Débourrement



Élongation des tiges

# BBCH 09 : bourgeonnement

## Stade 0 Germination

BBCH 00 : dormance

BBCH 05 :  
gonflement des  
bourgeons



Branches nues



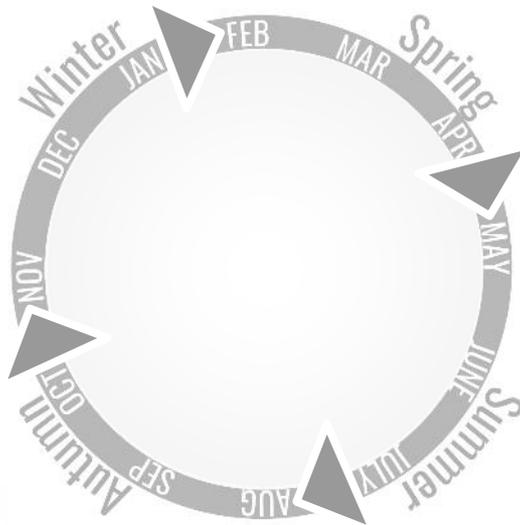
Coloration et chute  
des feuilles

BBCH 92 : 20%

BBCH 97 : 70%

Stade

Pourcentage de  
complétion(x10)  
du stade



## Stade 1 Développement des feuilles

BBCH 12 : 20%

BBCH 17 : 70%



Débourrement



Pousse des tiges

BBCH 32 : 20%

BBCH 37 : 70%

## Stade 3 Élongation des tiges

11 novembre  
2017



20 avril  
2018



5 mai  
2018



11 novembre  
2017



20 avril  
2018



5 mai  
2018



11 novembre  
2017



20 avril  
2018



Stage 1  
Leaves coming out

15 : 50%  
18 : 80%

5 mai  
2018



# Méthodologie / Suivi phénologique

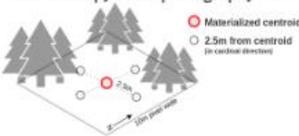
Saisie terrain avec Memento Database

BBCH moyen sur 10x10m à partir du plot.

Mesure d'ouverture de la canopée :

- Objectif Fisheye pour smartphone
- Level Camera pour photo à l'horizontal
- 5 photos traitées avec GLAMA android
- Code python pour sortir les statistiques par peuplement et par date et sauvegarder chaque image

Pour chaque peuplement (et chaque essence), devra être rempli à chaque sortie le tableau suivant :

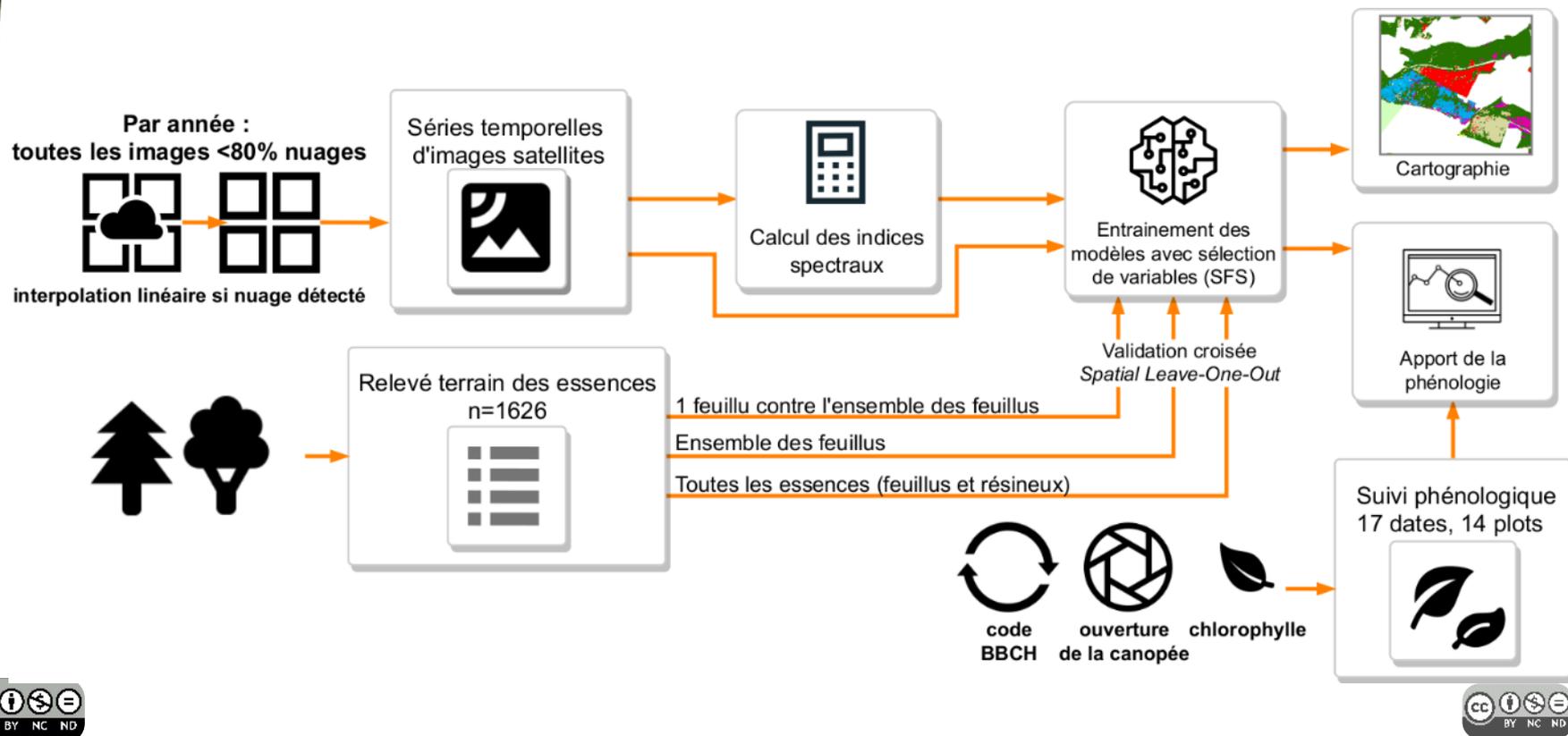
Élément à relever	Exemple
Code BBCH	62 (début de floraison, 20 % de fleurs ouvertes)
Photo du lieu (en mode portrait)  Flèche P notée sur le piquet symbolisant le centroid. Possibilité de voir les précédentes photos en regardant les précédents relevés de la parcelle sur Memento Database.	
% ouverture de la canopée (Indice CACO) (5 photos de la canopée à 2m du sol, horizontal, au centroid et aux 4 points cardinaux, à 2,5m du centroid) Take a canopy cover photography from :  Materialized centroid 2.5m from centroid (in cardinal direction)	

Avec le logiciel Level Camera, prendre la photo à 2m du sol, à l'horizontal. Sauvegarder le résultat sous la forme "Numéro de la parcelle + Première lettre du point cardinal" dans l'application GLAMA, ex:  
2C (Saulé, centroid)  
5E (Frêne, est)...

# Démonstration avec Memento



# Méthodologie / Résumé



# Résultats



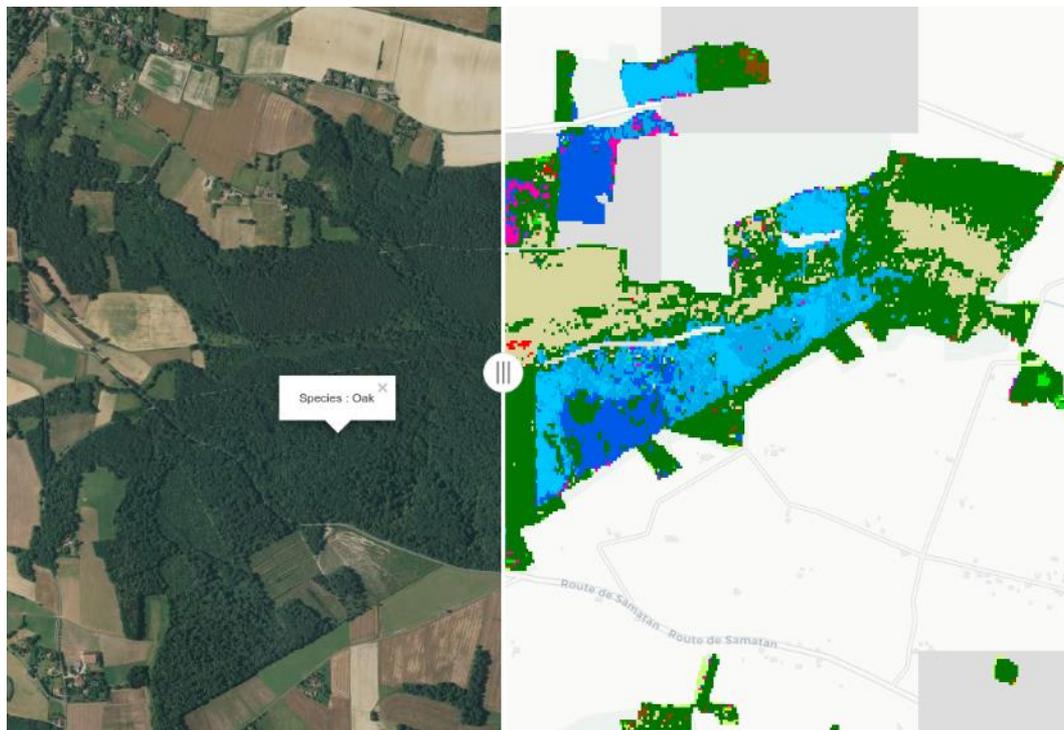
# Résultats

1 Classification des essences et meilleures dates

2 Phénologie in situ (14 plots) et ex situ

# Résultats

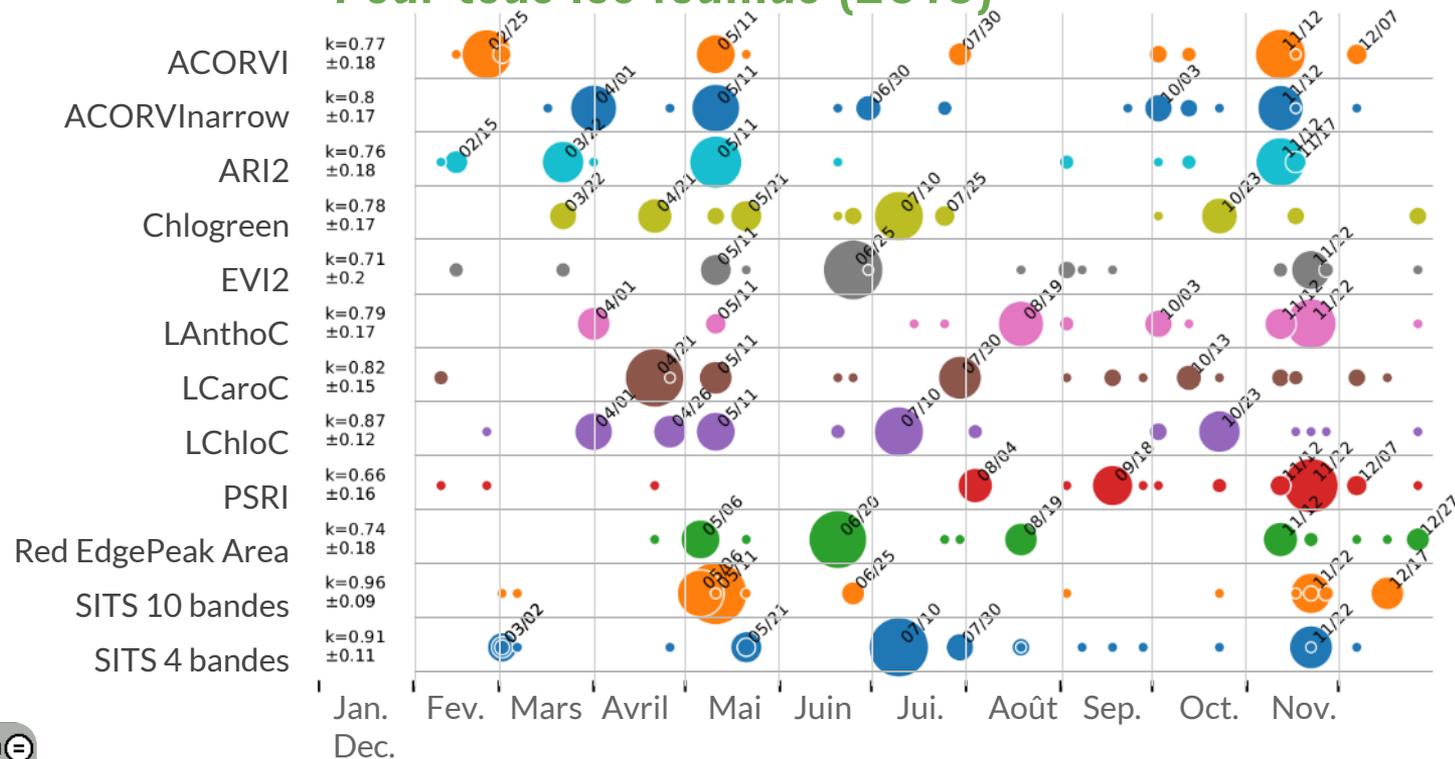
Carte : <https://dynafor1201.github.io/publications/maps/treespeciesformosat2/>



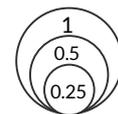


# Résultats / 1 Apport des dates selon indices spectraux

## Pour tous les feuillus (2018)



Kappa

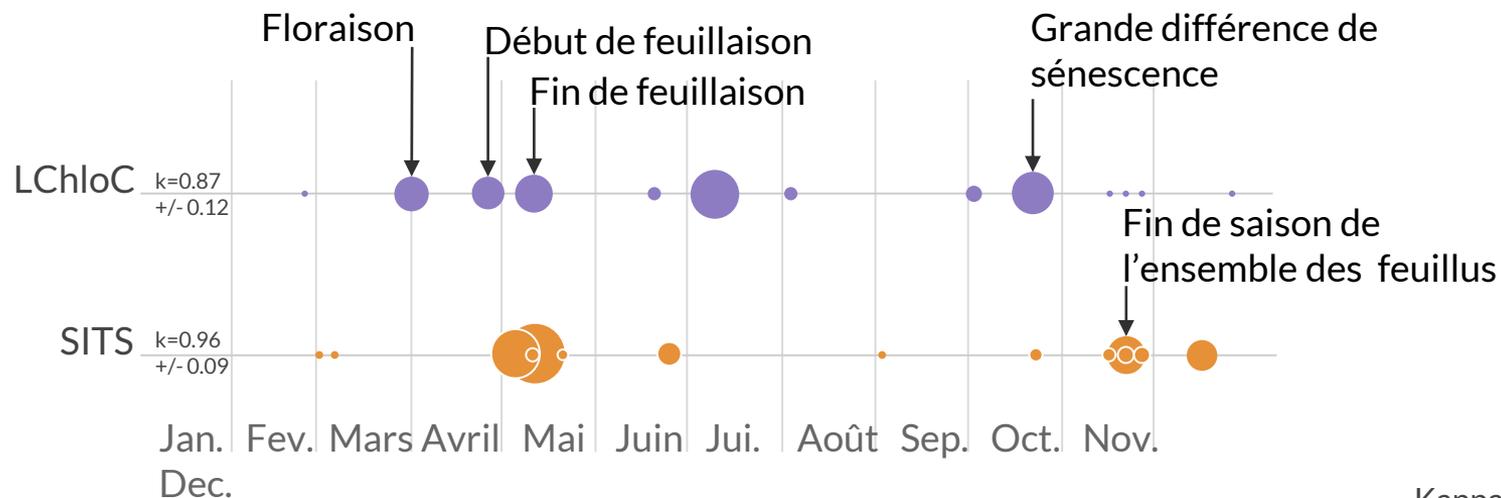


Bande sélectionnée  
(e.g.: B12)

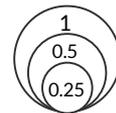


# Résultats / ① Apport des dates selon indices spectraux

## Pour tous les feuillus (2018)



Kappa



Bande sélectionnée  
(e.g.: B12)



# Résultats / ① Classification des 14 essences (SFS'18)

0.89  $\pm 0.09$   
kappa

$\kappa = 0.89$

	Bouleau	Chêne	Chêne rouge	Peuplier	Frêne	Robinier	Saule	Eucalyptus	Pin laricio	Pin maritime	Pin noir	Sapin blanc	Sapin douglas	Cyprès	F1
Bouleau	84	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89
Chêne	2	84	0	2	4	6	0	0	0	2	0	0	0	0	84
Chêne rouge	2	0	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	97
Peuplier	0	0	0	88	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92
Frêne	8	0	0	6	88	4	0	0	0	0	2	0	0	0	84
Robinier	4	10	0	0	4	90	2	0	0	0	0	0	0	0	85
Saule	0	0	0	0	0	0	86	2	0	0	0	0	0	0	91
Eucalyptus	0	2	0	0	0	0	8	88	0	8	0	0	6	0	83
Pin laricio	0	2	0	0	0	0	0	0	94	4	2	0	6	0	90
Pin maritime	0	0	0	2	0	0	4	10	0	82	0	0	4	0	81
Pin noir	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	94	0	0	0	94
Sapin blanc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	6	0	96
Sapin douglas	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	2	2	76	0	81
Cyprès	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100

Truel label

# Résultats / ① Classification des 14 essences (SFS'18)

0.89  $\pm 0.09$   
kappa

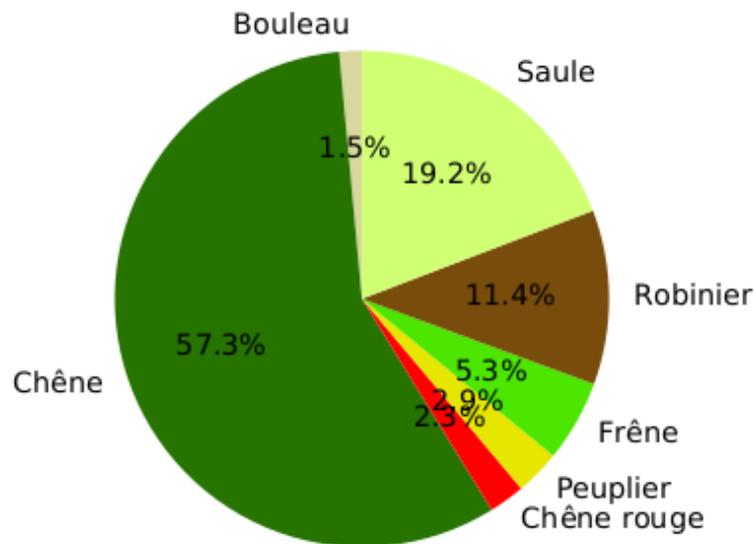
	Bouleau	Chêne	Chêne rouge	Peuplier	Frêne	Robinier	Saule	Eucalyptus	Pin laricio	Pin maritime	Pin noir	Sapin blanc	Sapin douglas	Cyprès	F1
Bouleau	84	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89
Chêne	2	84	0	2	4	6	0	0	0	2	0	0	0	0	84
Chêne rouge	2	0	100	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	97
Peuplier	0	0	0	88	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92
Frêne	8	0	0	6	88	4	0	0	0	0	2	0	0	0	84
Robinier	4	10	0	0	4	90	2	0	0	0	0	0	0	0	85
Saule	0	0	0	0	0	0	86	2	0	0	0	0	0	0	91
Eucalyptus	0	2	0	0	0	0	8	88	0	8	0	0	6	0	83
Pin laricio	0	2	0	0	0	0	0	0	94	4	2	0	6	0	90
Pin maritime	0	0	0	2	0	0	4	10	0	82	0	0	4	0	81
Pin noir	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	94	0	0	0	94
Sapin blanc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	6	0	96
Sapin douglas	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	2	2	76	0	81
Cyprès	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100

k=0.89

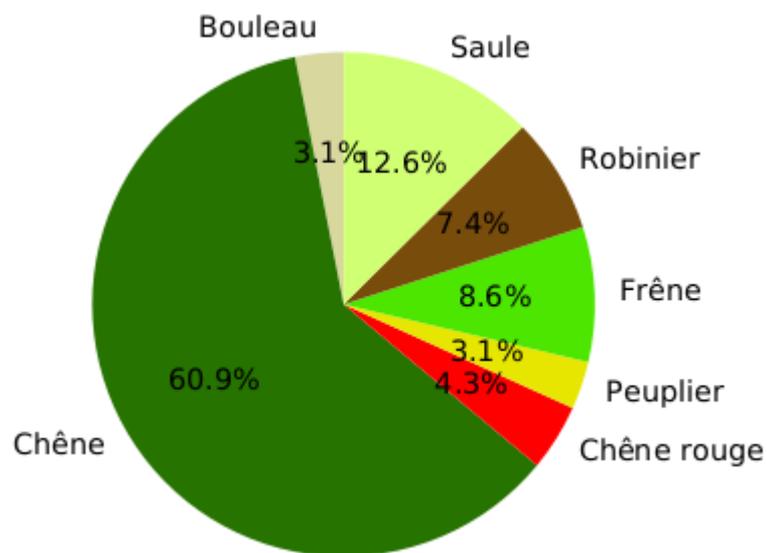
# Résultats / ① Classification des 14 essences

(2017)

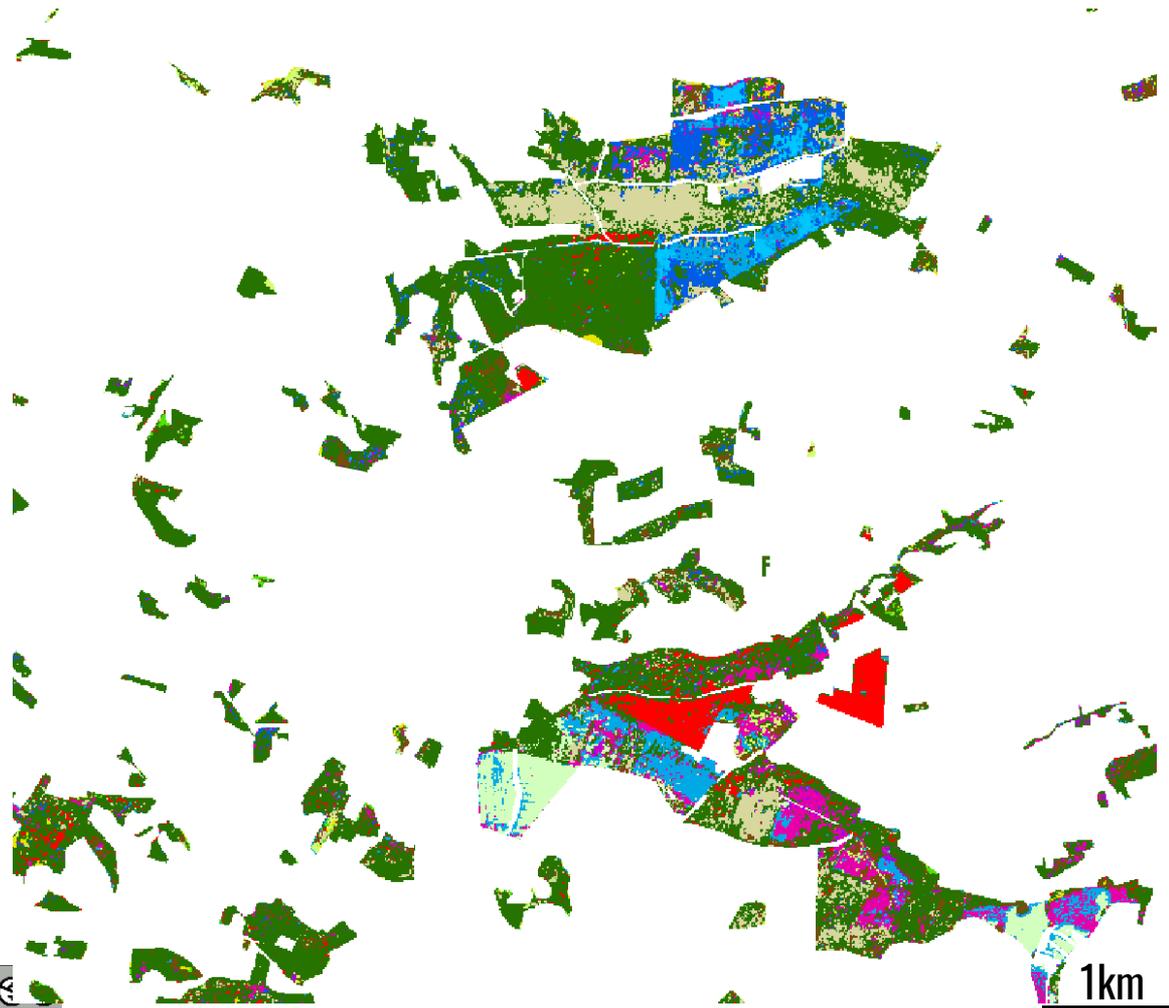
2017



2018

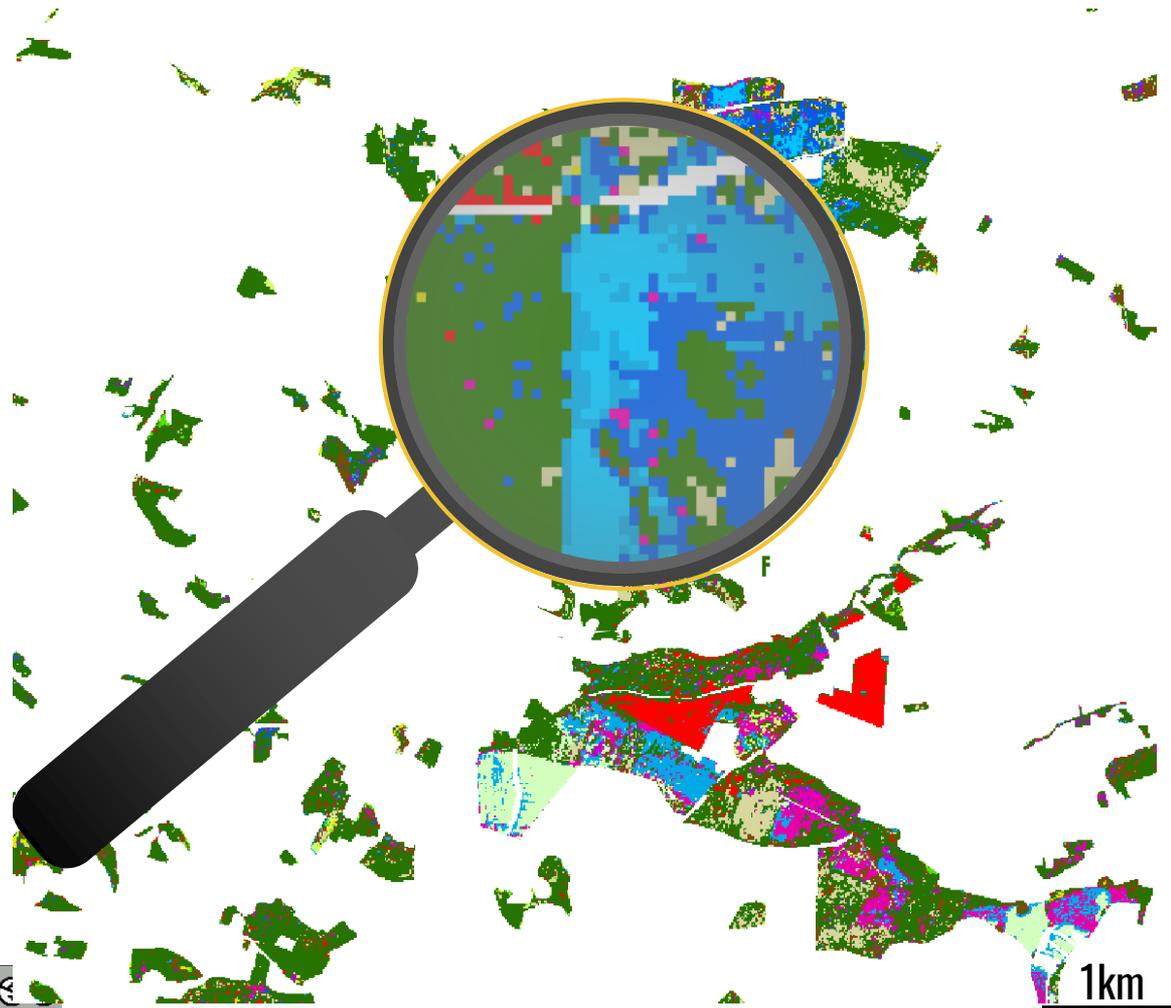


# Carte des essences



1km

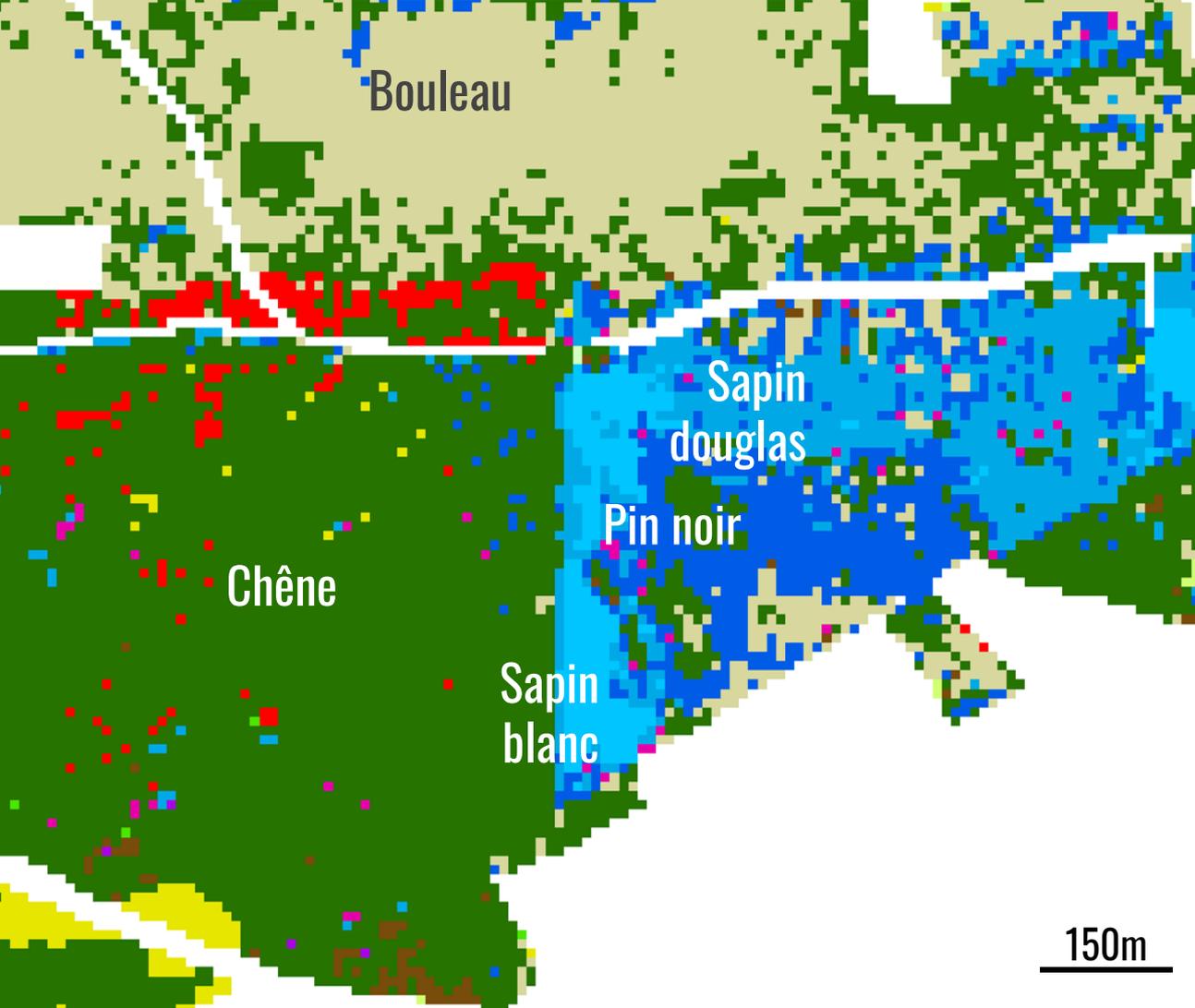
# Carte des essences



- |   |              |   |               |
|---|--------------|---|---------------|
|  | Oak          |  | Corsican pine |
|  | Red oak      |  | Maritime pine |
|  | Silver birch |  | Black pine    |
|  | European ash |  | Douglas fir   |
|  | Black locust |  | Silver fir    |
|  | Aspen        |  | Cypress       |
|  | Willow       |   |               |
|  | Eucalyptus   |   |               |

1km

# Tree species map with Spatial Leave-One-Out



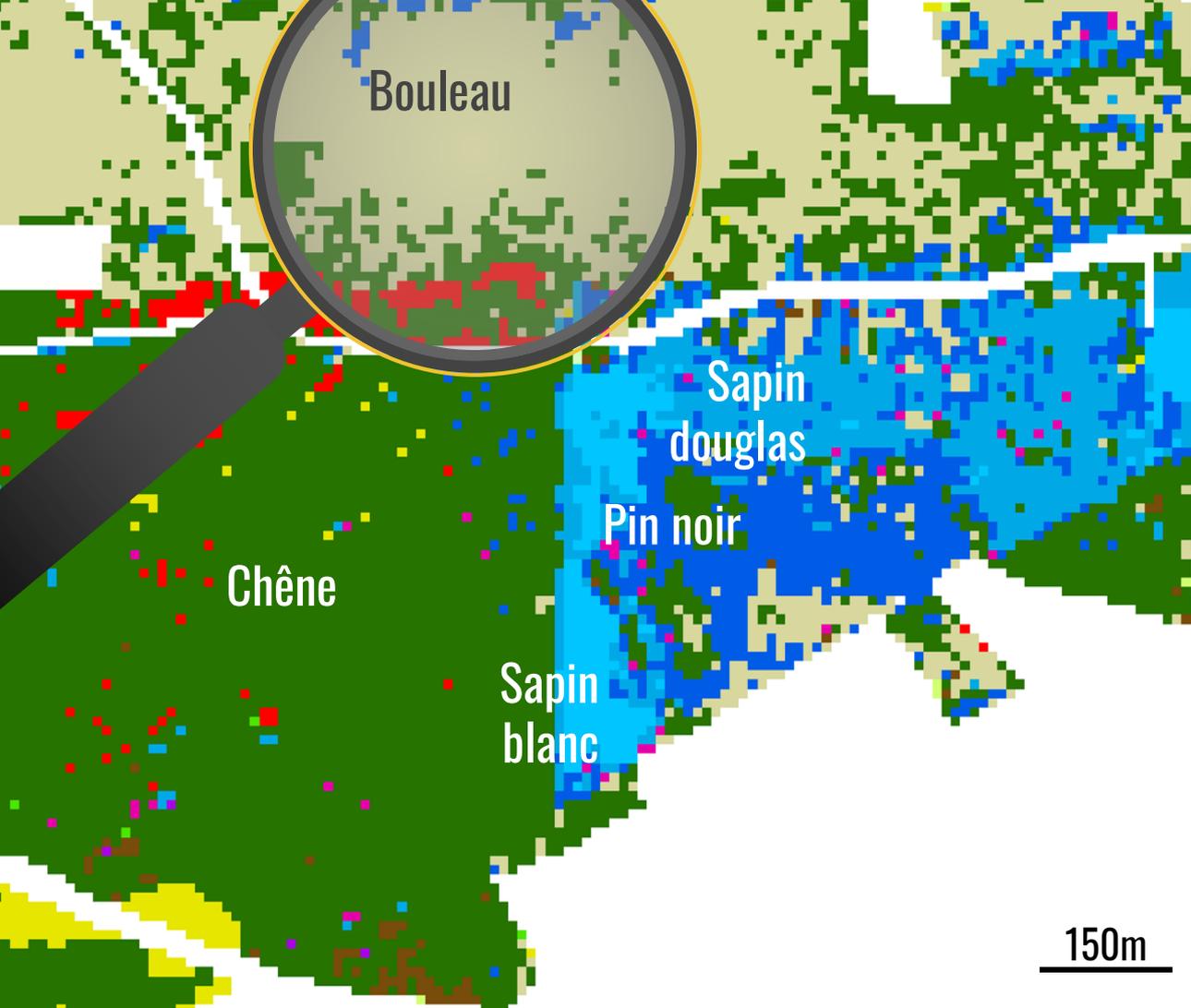
- |  |   |
|--|---|
|  Oak          |  Corsican pine |
|  Red oak      |  Maritime pine |
|  Silver birch |  Black pine    |
|  European ash |  Douglas fir   |
|  Black locust |  Silver fir    |
|  Aspen        |  Cypress       |
|  Willow       |   |
|  Eucalyptus   |   |



150m

IGN - ORTHO-SAT © SPOT 6/7 2017

# Carte des essences avec Spatial Leave-One-Out



- |  |   |
|--|---|
|  Oak          |  Corsican pine |
|  Red oak      |  Maritime pine |
|  Silver birch |  Black pine    |
|  European ash |  Douglas fir   |
|  Black locust |  Silver fir    |
|  Aspen        |  Cypress       |
|  Willow       |   |
|  Eucalyptus   |   |



IGN - ORTHO-SAT © SPOT 6/7 2017

feb 15

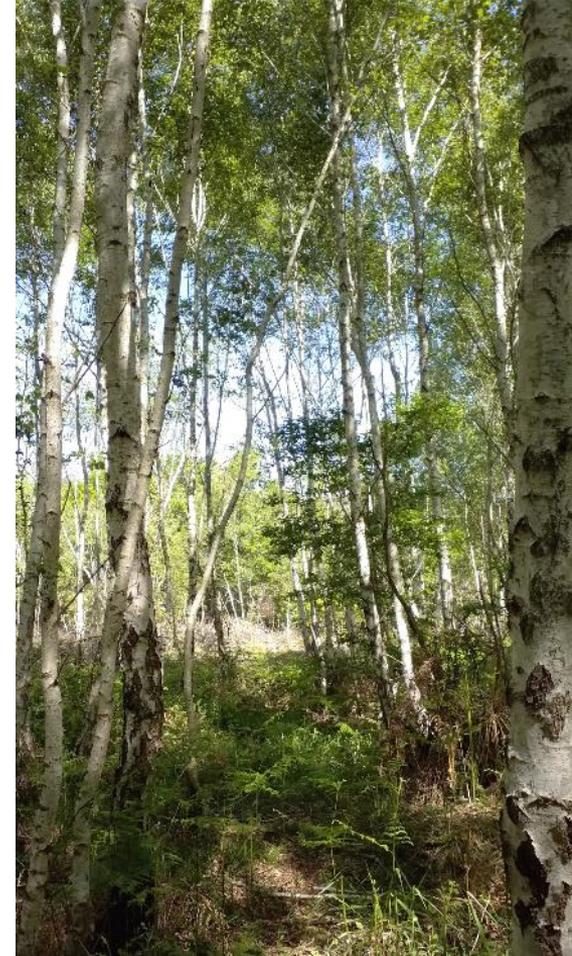


april 20



La fougère pousse en même temps que la canopée

may 2



feb 15



11%

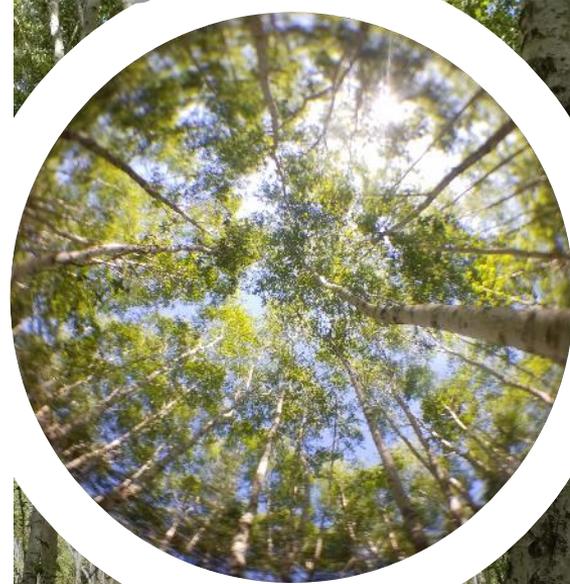
april 20



55%

La fougère pousse en même temps que la canopée

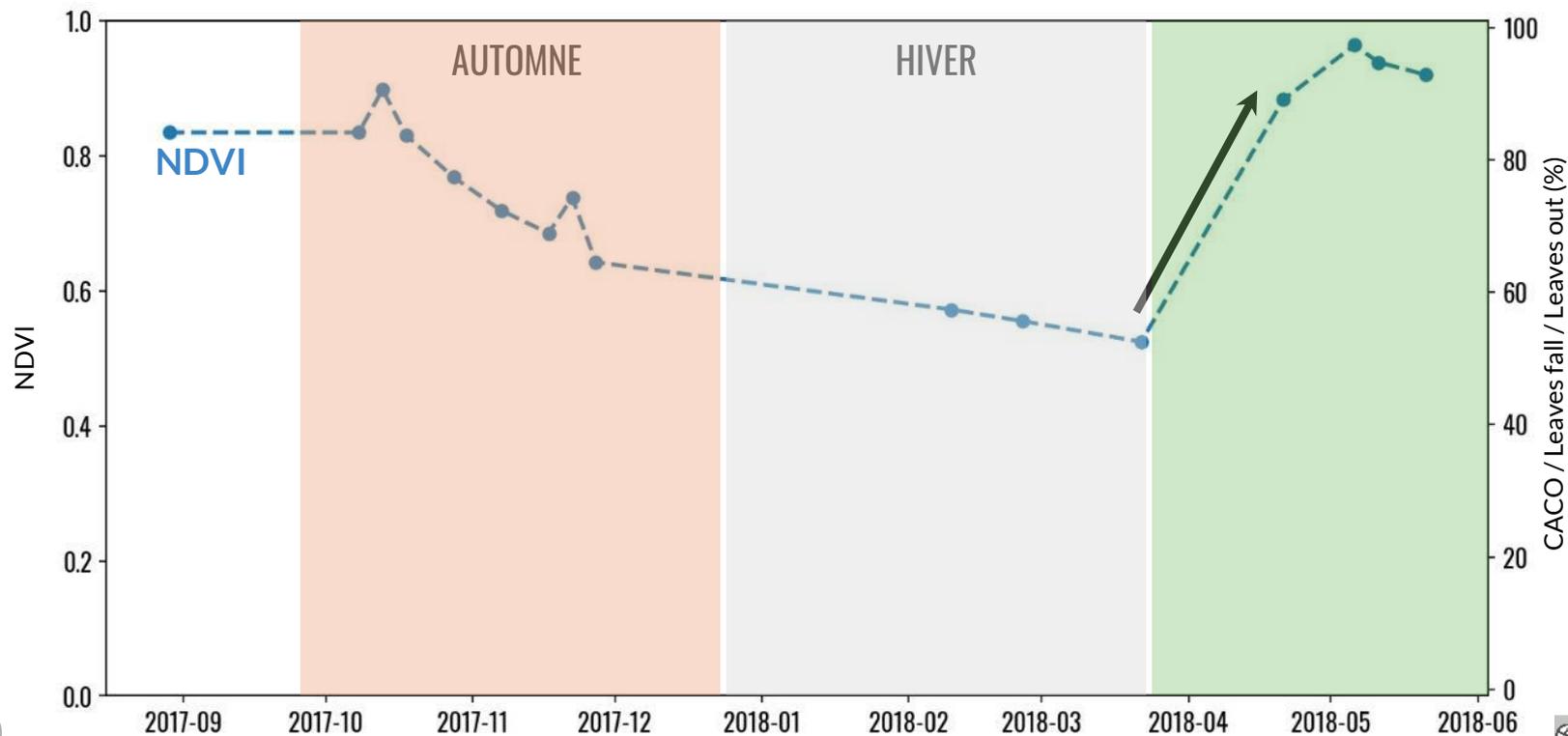
may 2



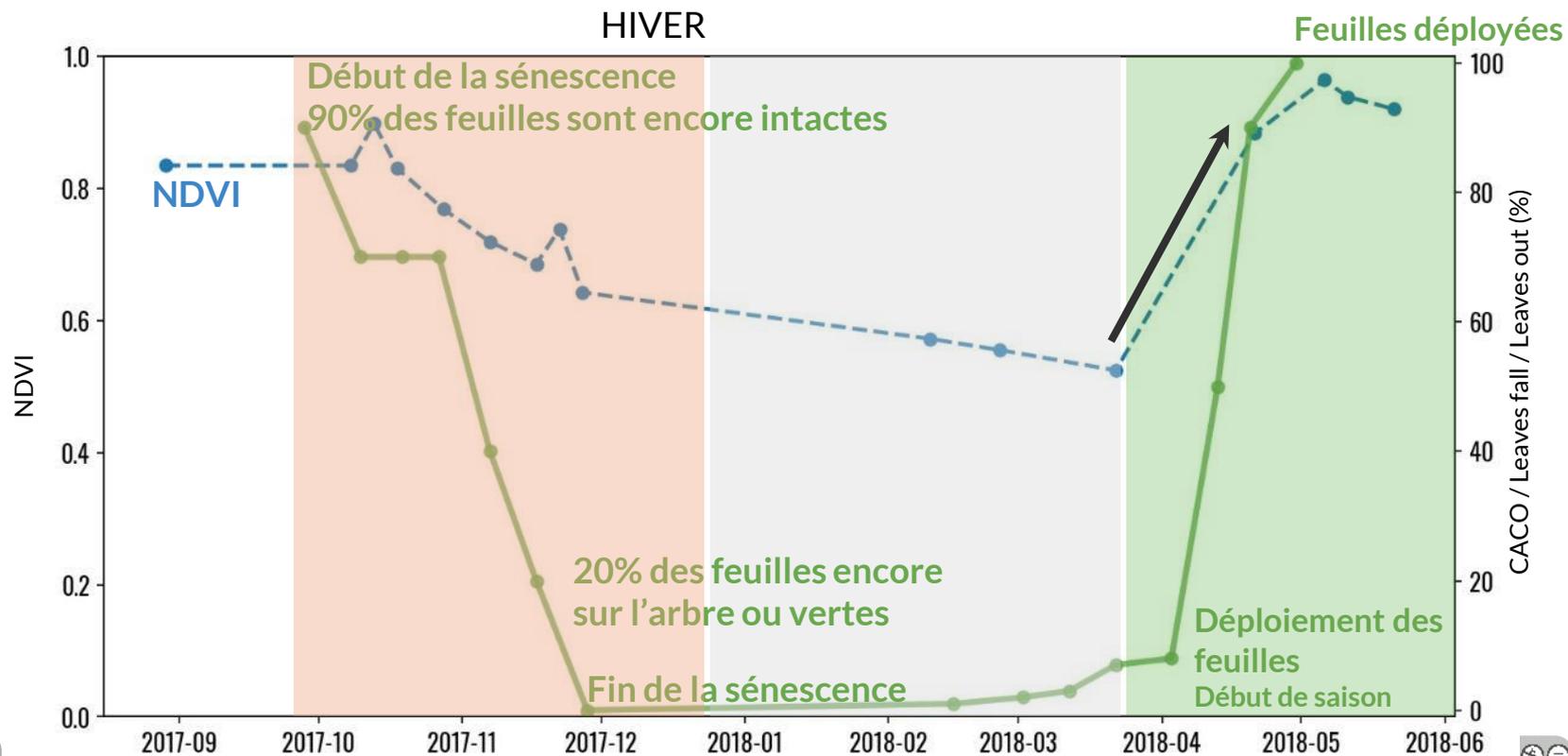
58%



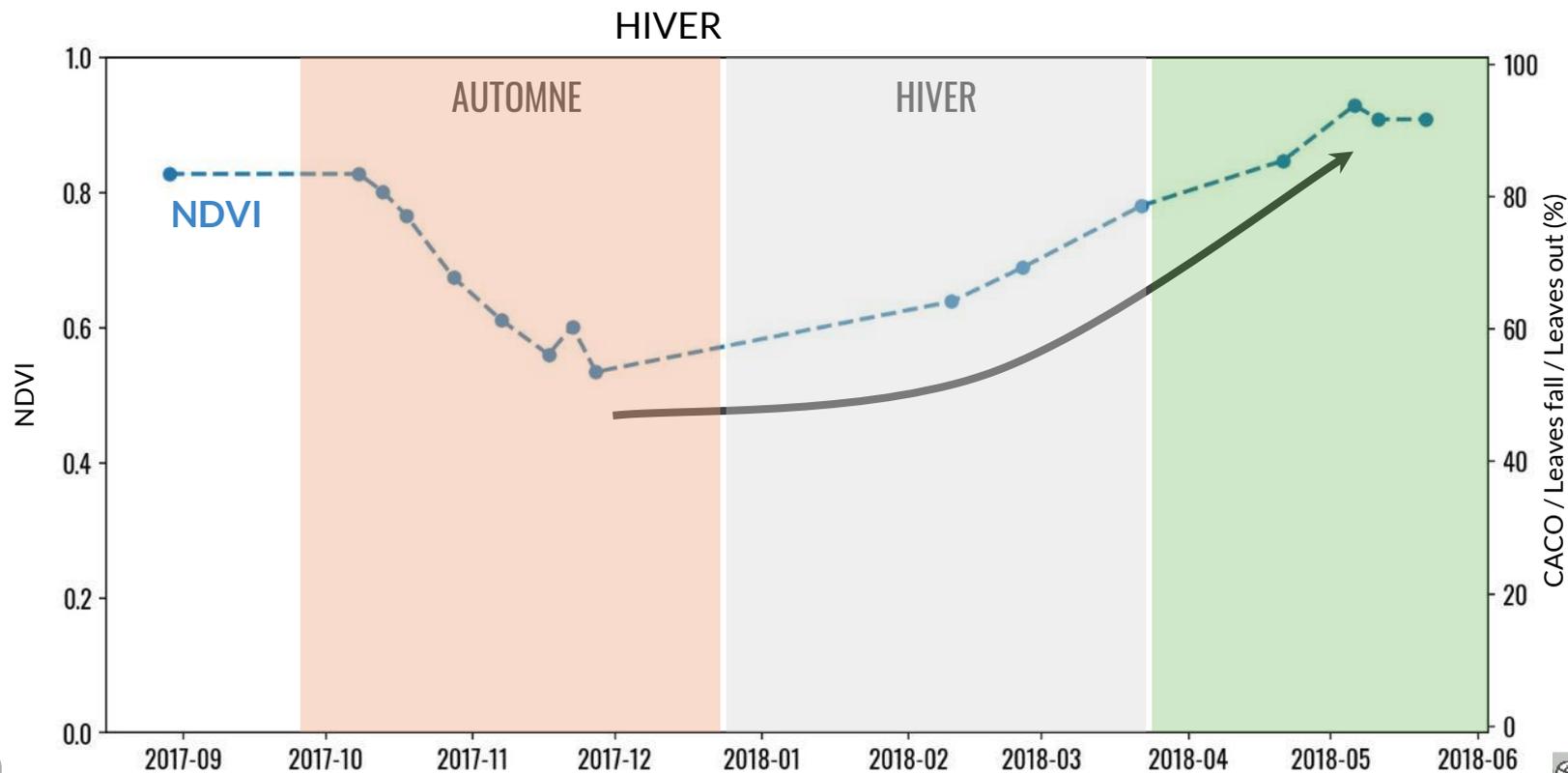
# Résultats / ② Phénologie / Bouleau (plot 1)



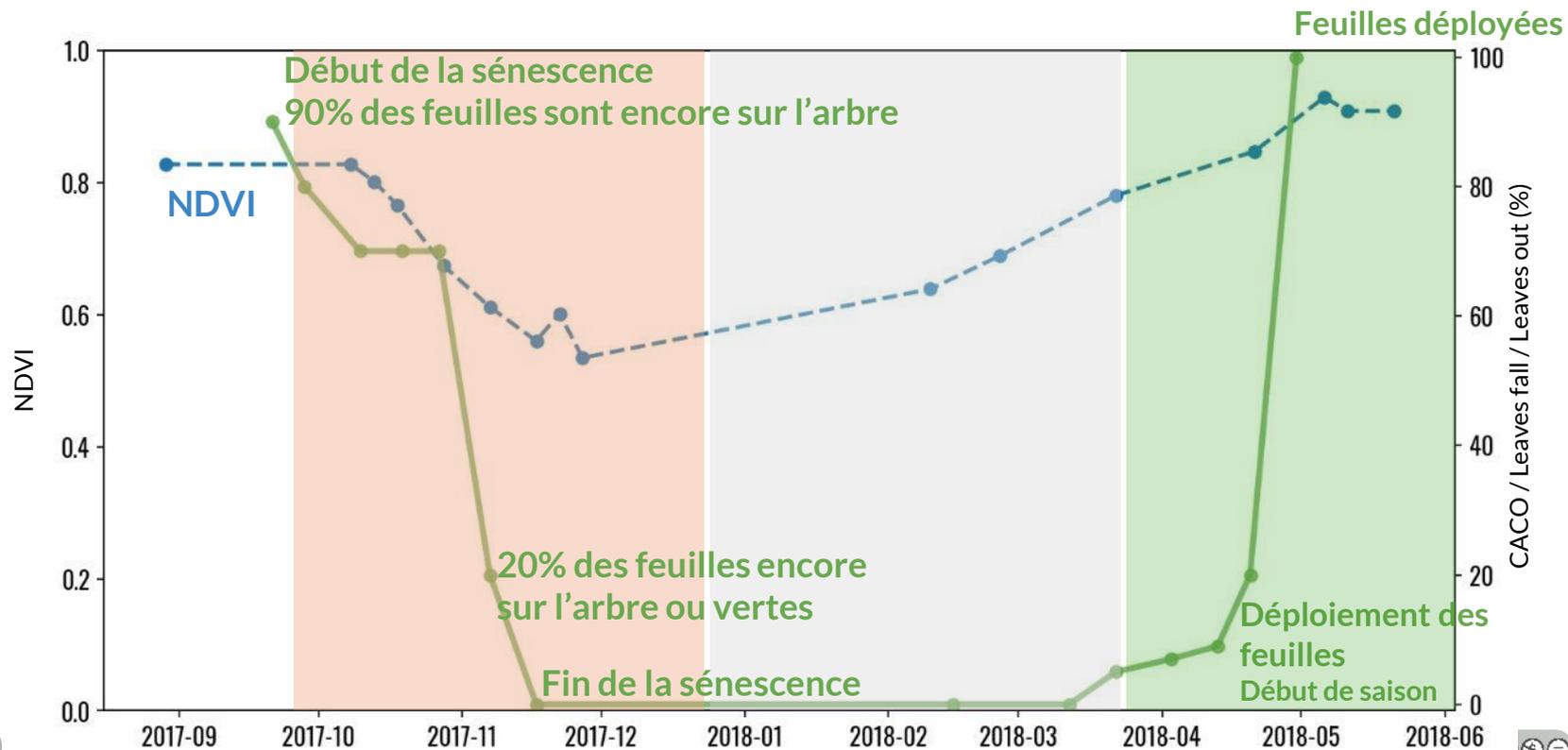
# Résultats / 2 Phénologie / Bouleau (plot 1)



# Résultats / 2 Phénologie / Robinier (plot 2)



# Résultats / ② Phénologie / Robinier (plot 2)



# Résultats / 2 Phénologie / Robinier







10 oct



7 nov



27 nov



Red oak plantation<sup>66</sup>

10 oct



7 nov



27 nov



Red oak plantation

# Chêne rouge

CACO 42%

BBCH 97

CHLO 14,4

19 octobre 2017



# Chêne rouge

CACO 38%

BBCH 99

CHLO 9

27 octobre 2017



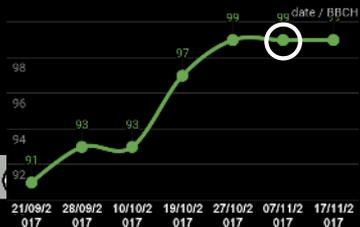
# Chêne rouge

CACO 31%

BBCH 99

CHLO N/A

7 novembre 2017



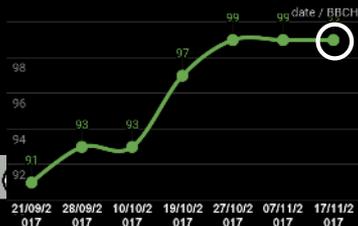
# Chêne rouge

CACO 19%

BBCH 99

CHLO N/A

17 novembre 2017



# Chêne

CACO 47%

BBCH 94

CHLO 23,7

19 octobre 2017



date / BBCH



# Chêne

CACO 52%

BBCH 95

CHLO 17,9

27 octobre 2017



date / BBCH



# Chêne

CACO 50%

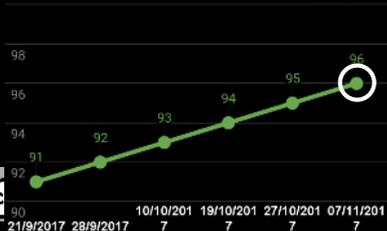
BBCH 96

CHLO 9,9

7 novembre 2017



date / BBCH



# Bouleau

CACO 34%

BBCH 93

CHLO 38,8

19 octobre 2017



date / BBCH



# Bouleau

CACO 43%

BBCH 93

CHLO 37,5

27 octobre 2017



date / BBCH



# Bouleau

CACO 36%

BBCH 96

CHLO 32,5

7 novembre 2017

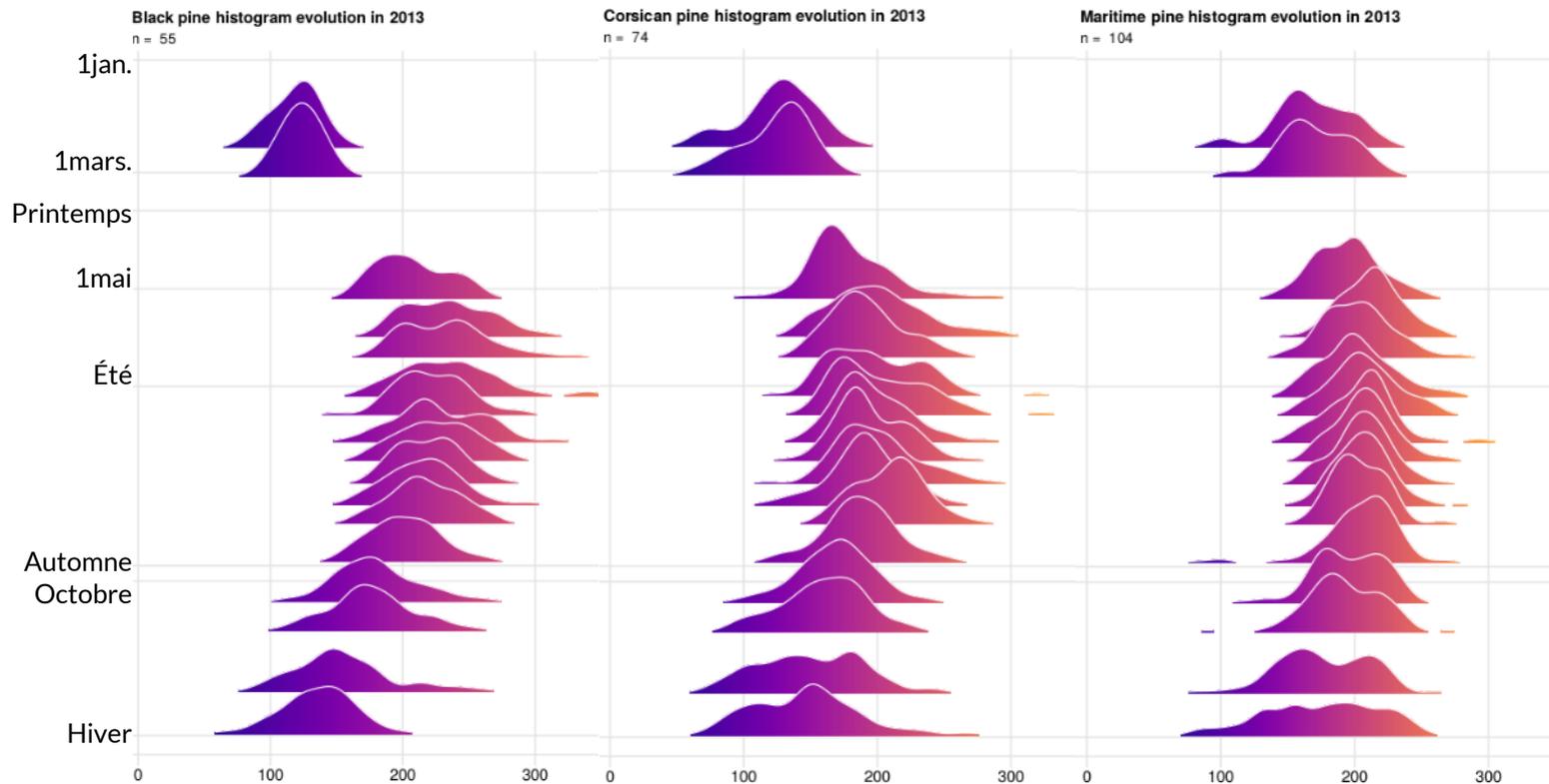


date / BBCH





# Phénologie (à partir de l'infra-rouge)



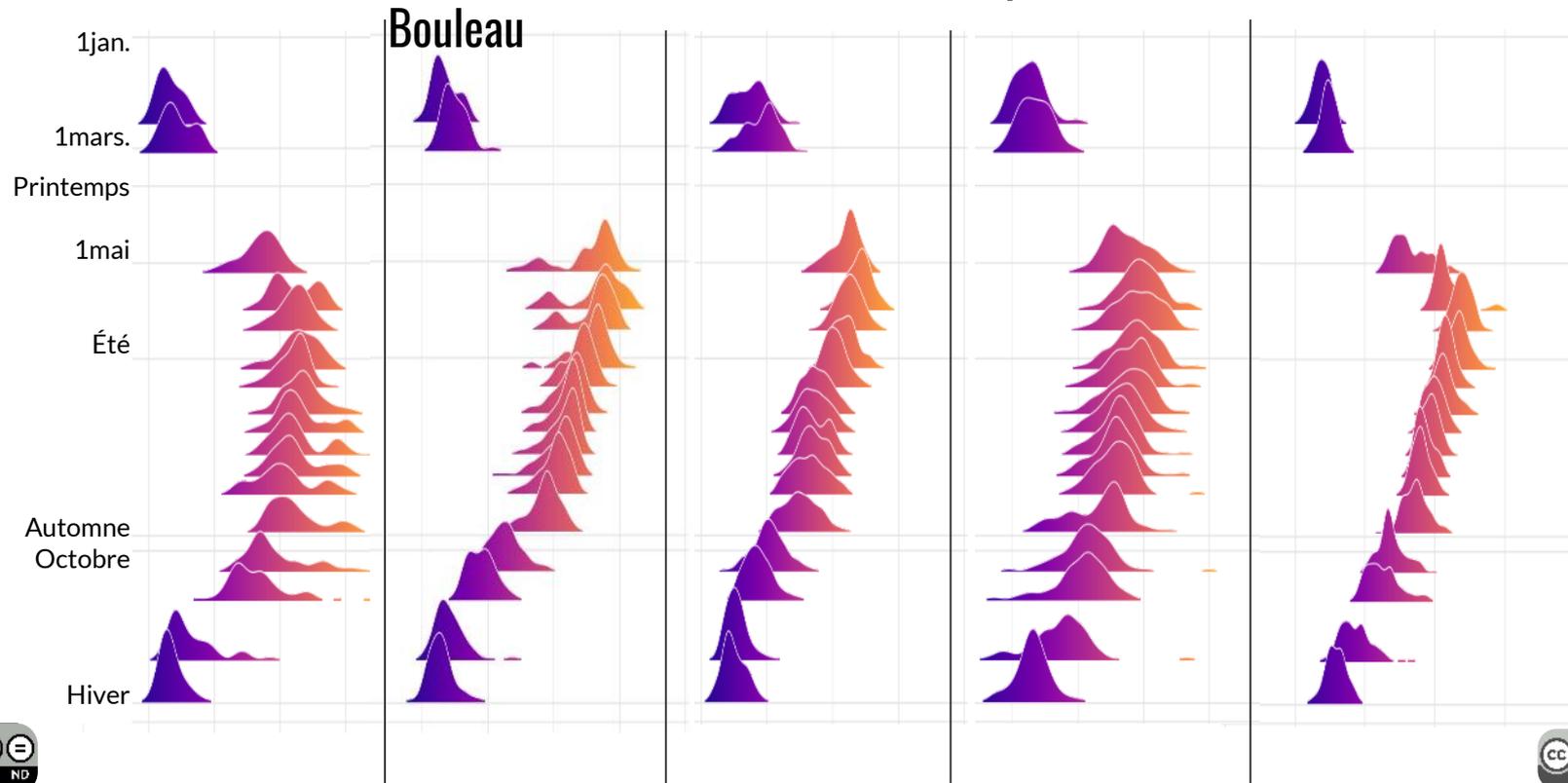
# Phénologie (à partir de l'infra-rouge)

Robinier

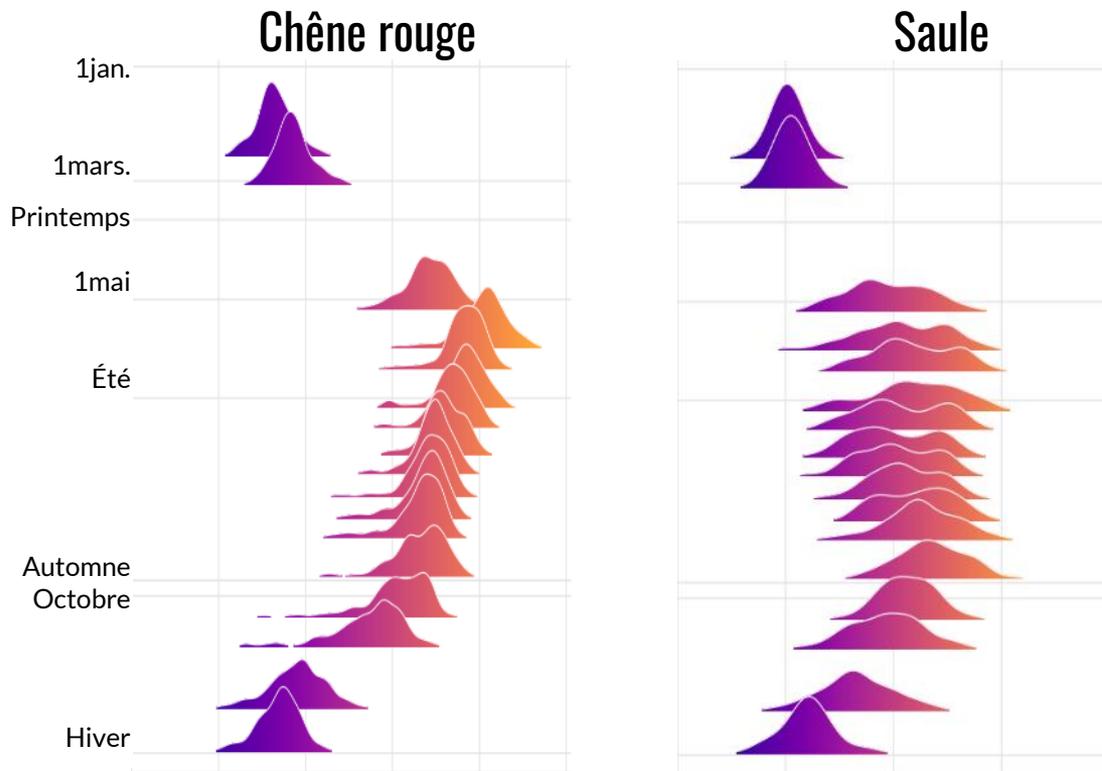
Frêne

Peuplier

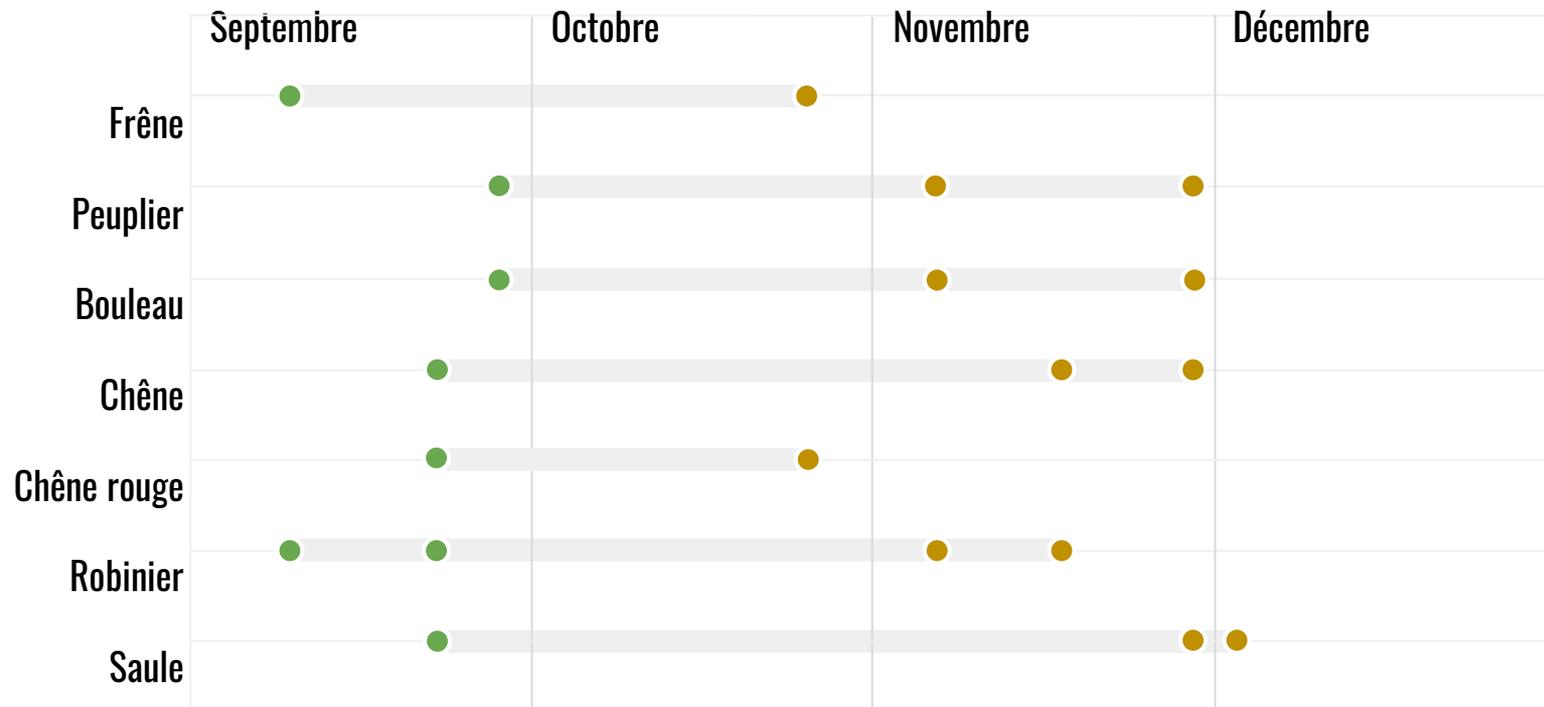
Chêne



# Phénologie (à partir de l'infra-rouge)



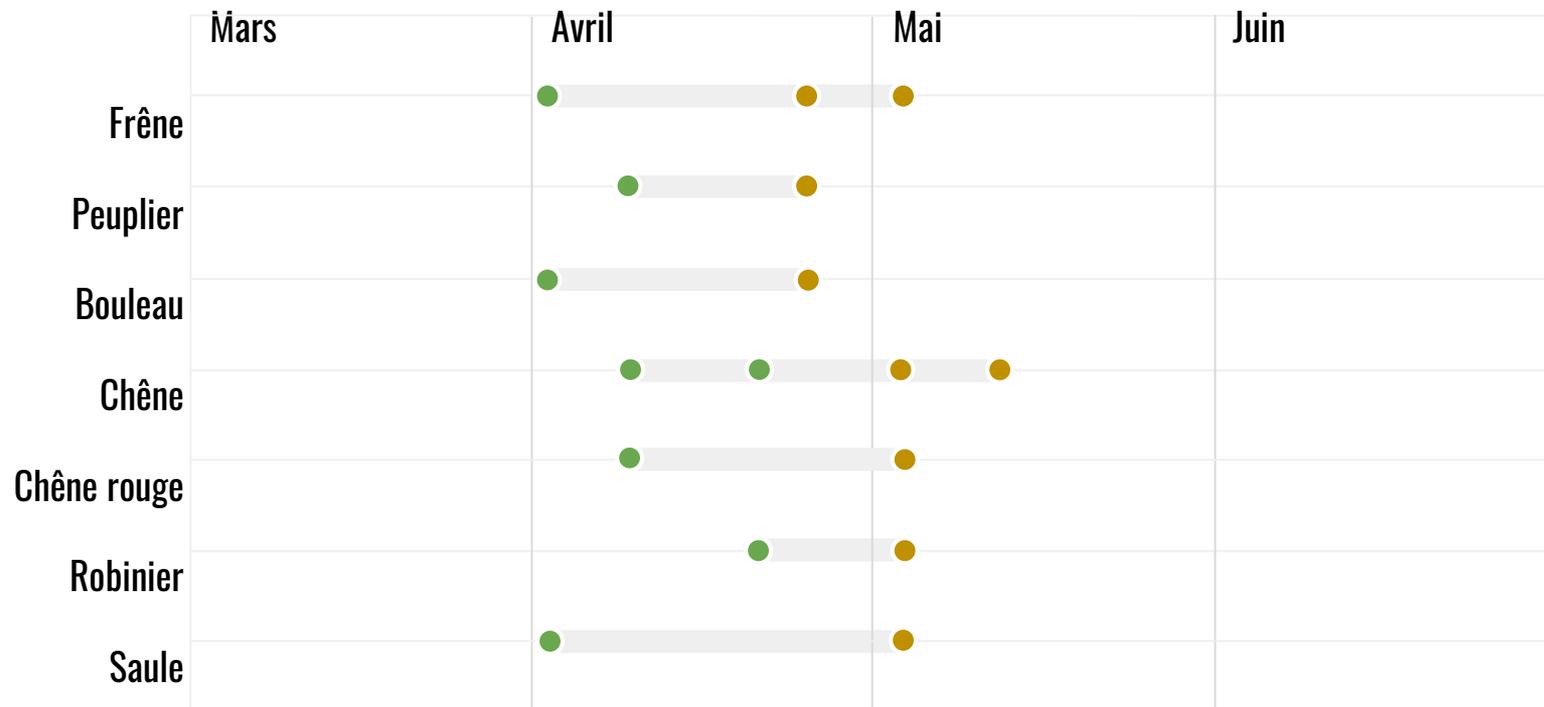
# Sénescence (automne 2017)



● Début de la sénescence (coloration/chute des feuilles)

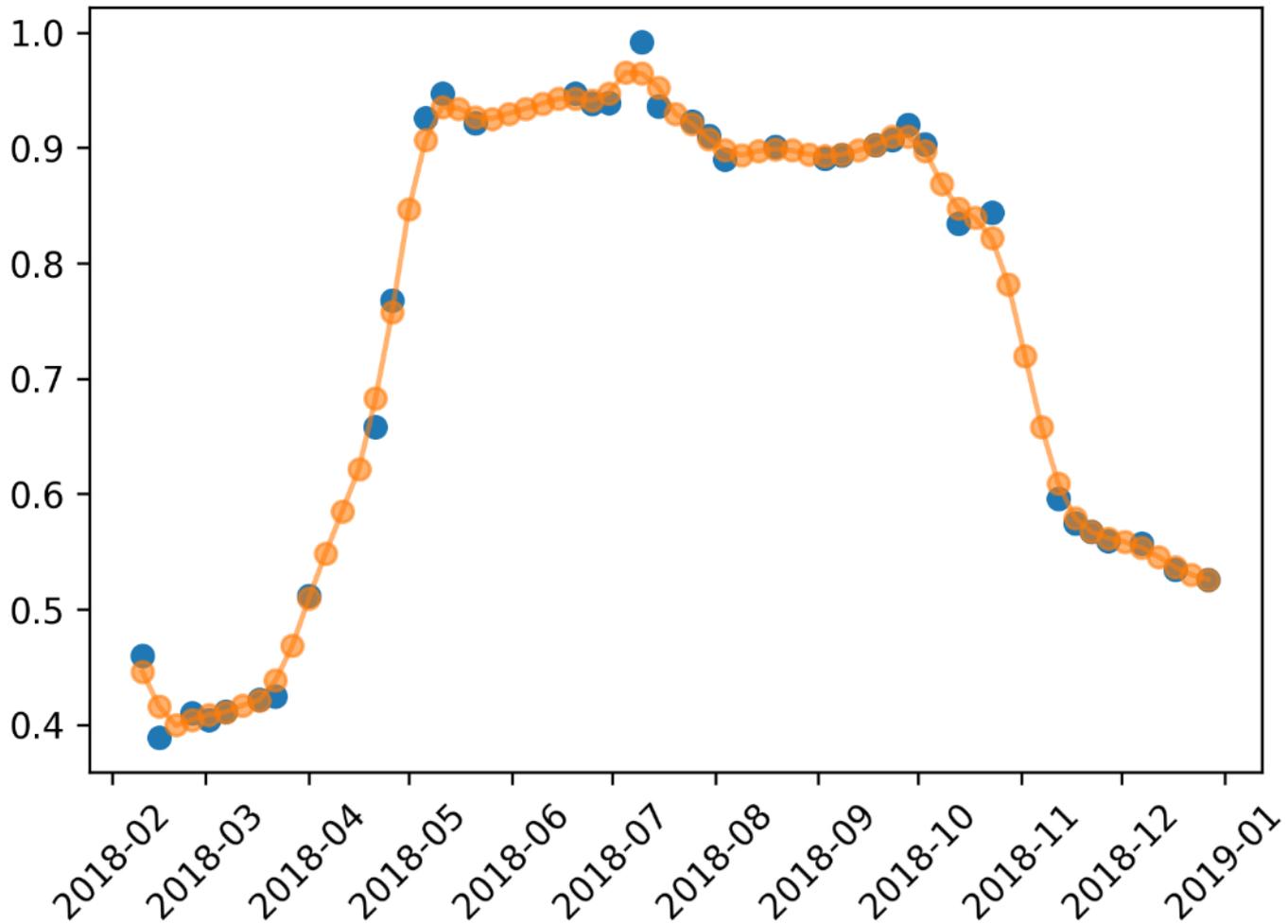
● Fin de la sénescence

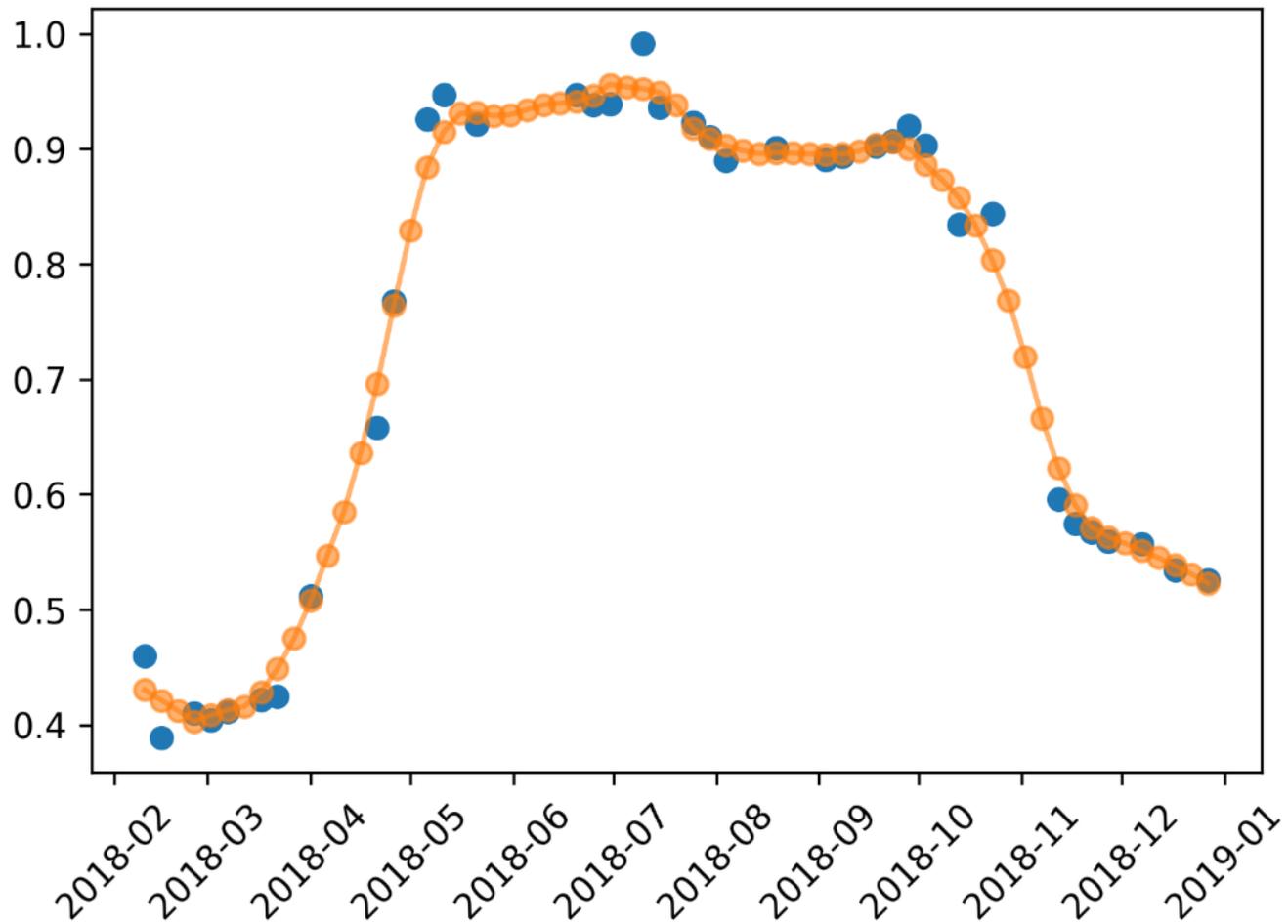
# Feuillaison (printemps 2018)

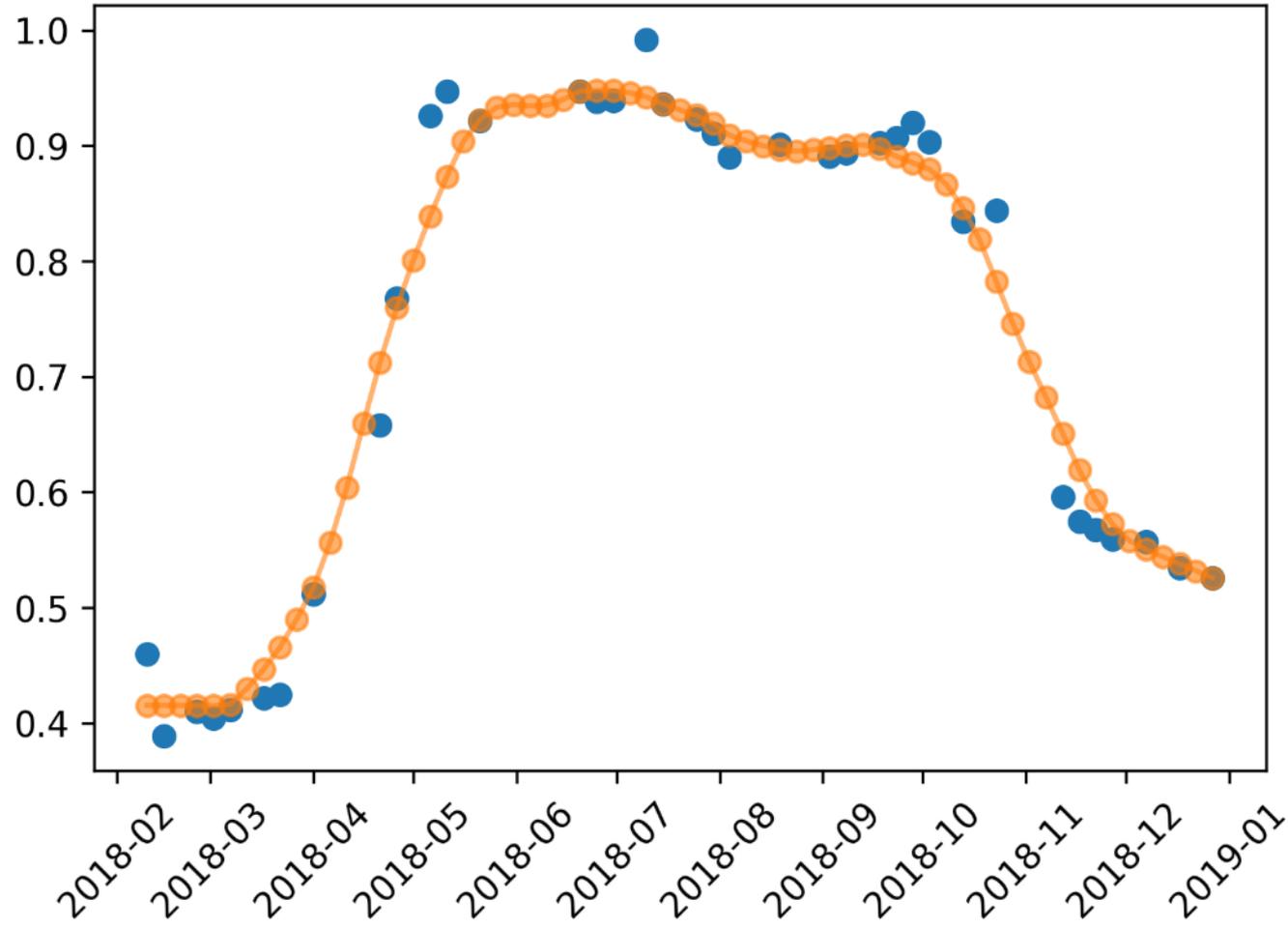


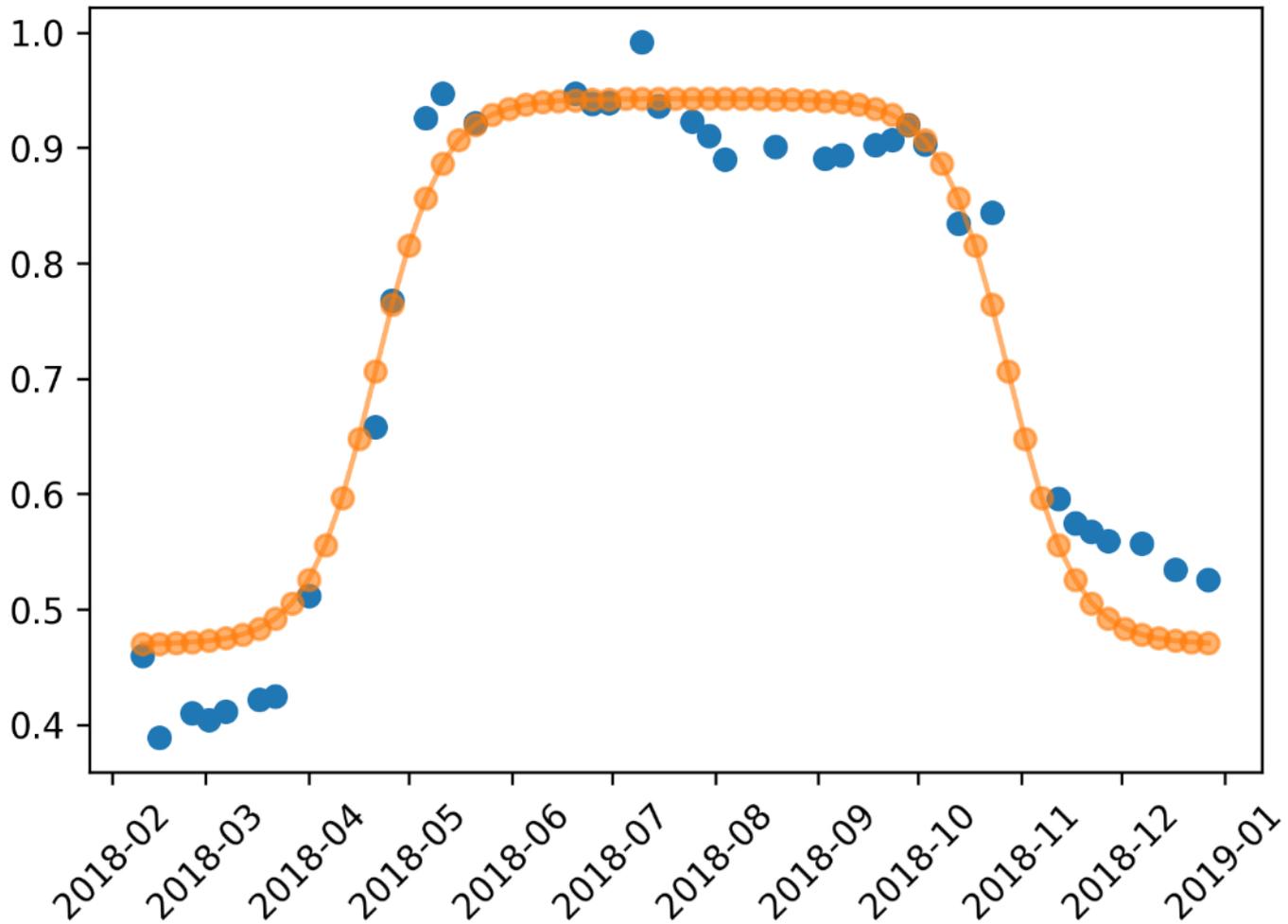
● Début de la pousse des feuilles

● Feuilles pleinement sorties





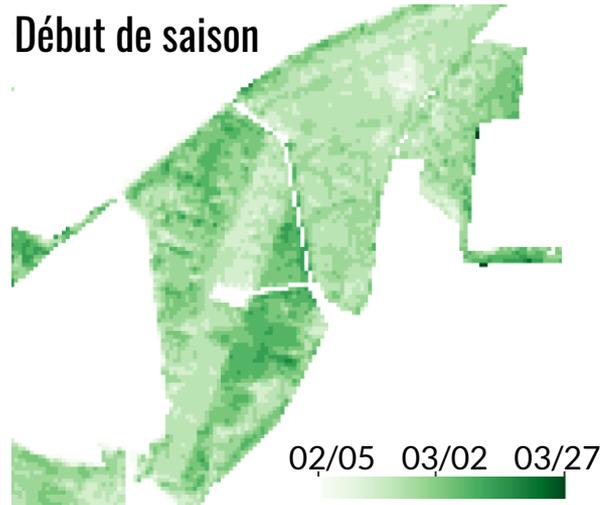




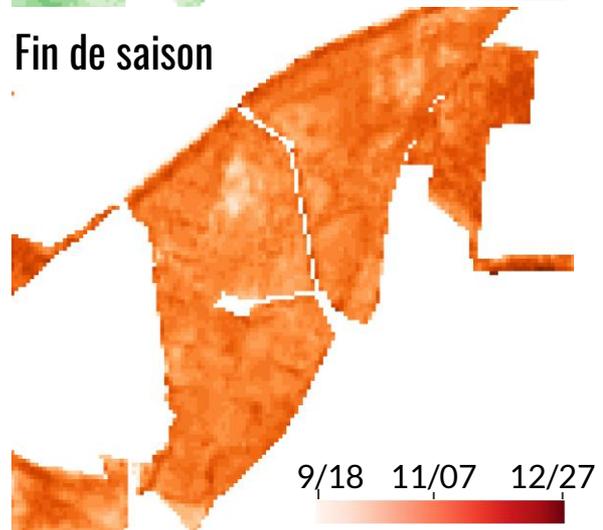


Plantation de peupliers

Début de saison



Fin de saison



# Adapter la phénologie d'une année sur l'autre

Image 1



Image 2



Image 1

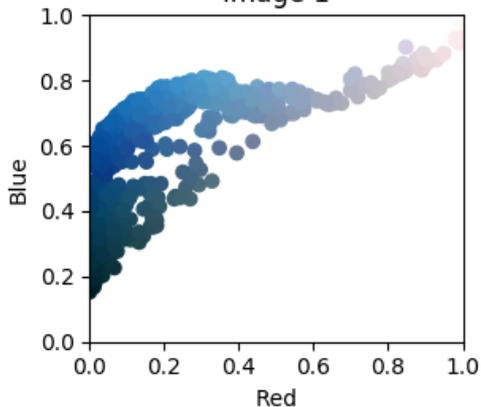
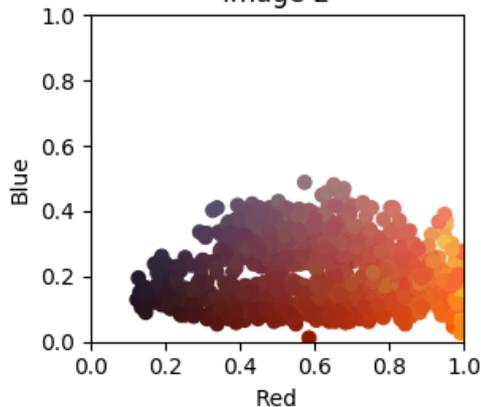


Image 2



# Adaptation de domaine

Image 1



Image 1 Adapt



Image 1 Adapt (reg)



Image 2



Image 2 Adapt

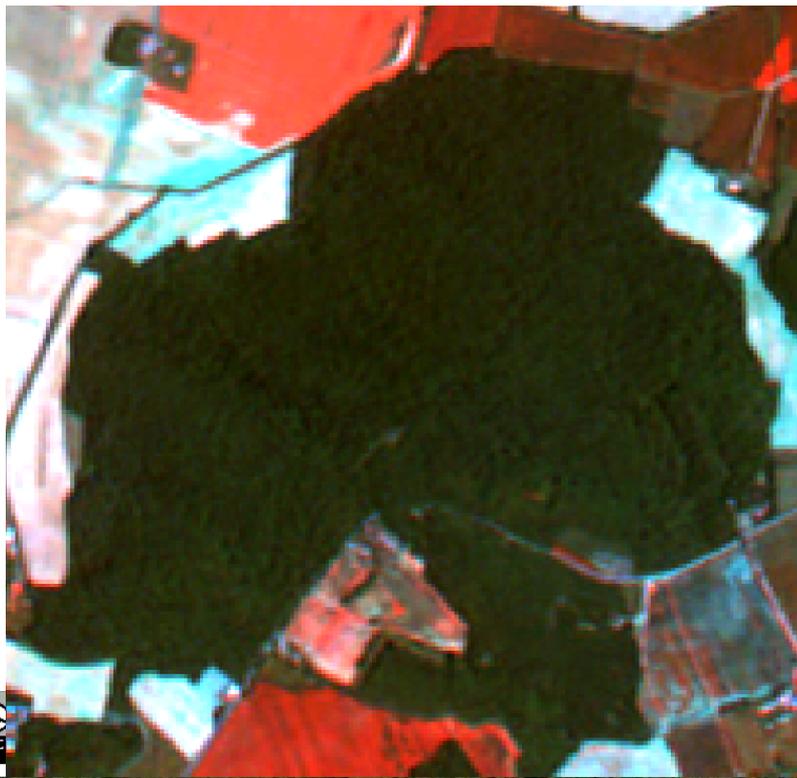


Image 2 Adapt (reg)



# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique

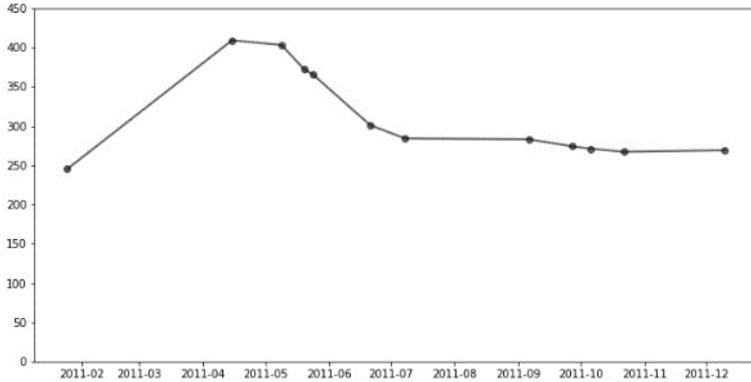


# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique

2011

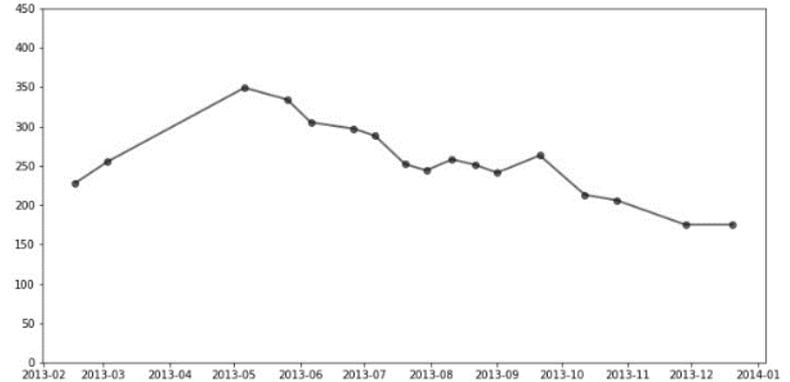
2011  
12 dates



2013  
17 dates

02/16

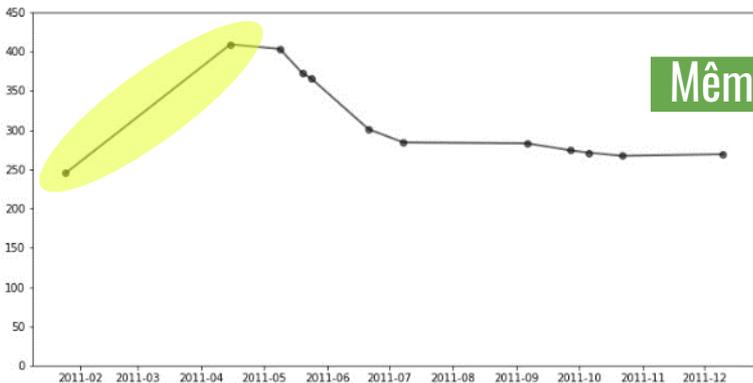
2013



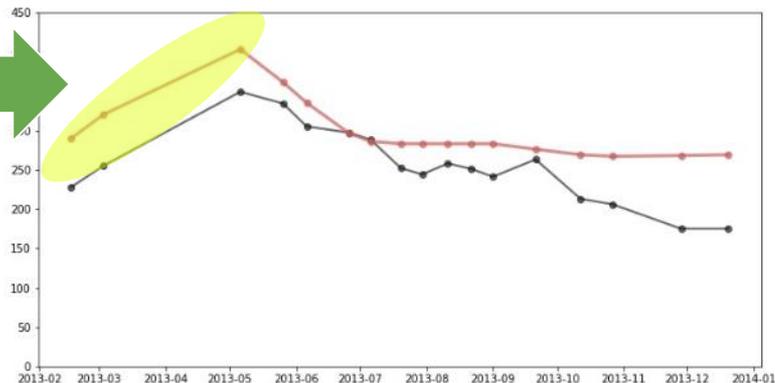
# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique

2011

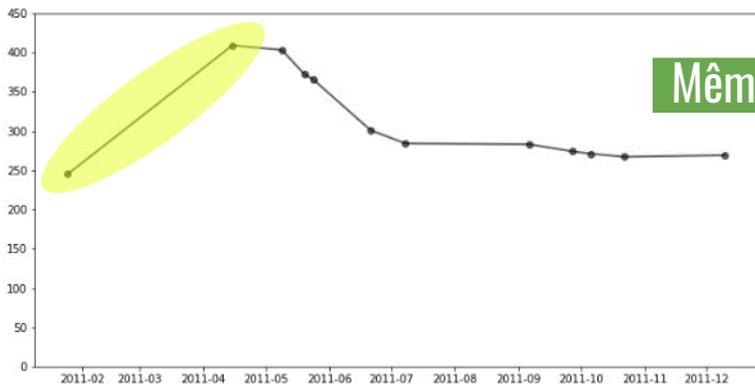


Même DOY

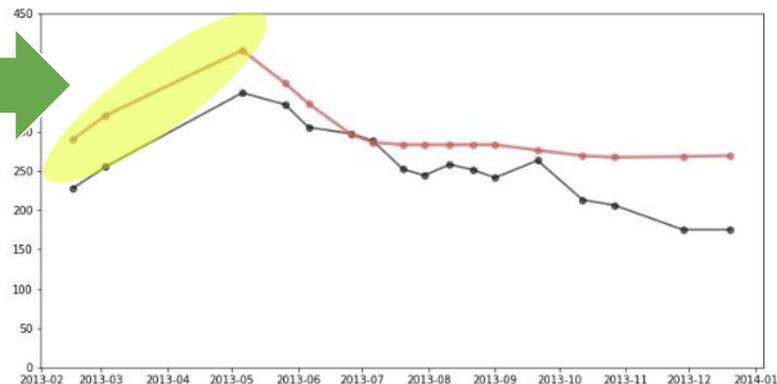


# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique



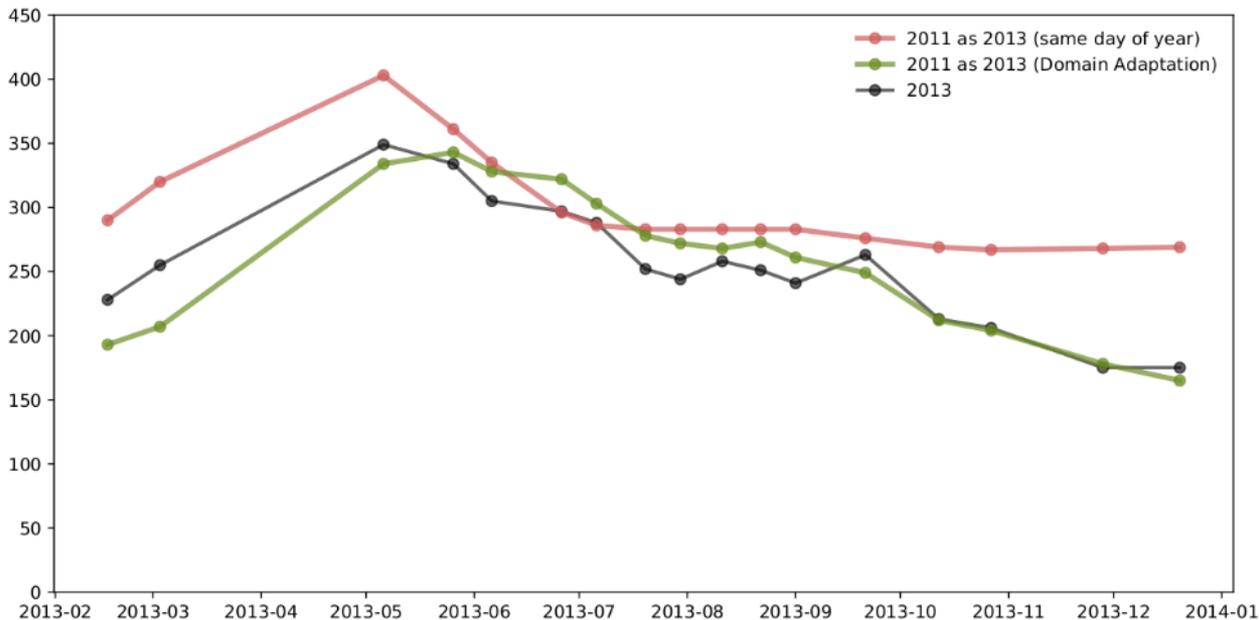
Même DOY



La réflectance spectrale est plus forte en 2011 : on surestime donc la réflectance pour 2013

# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique (Adaptation sans label)



# Adaptation d'un modèle

## Cas pratique (Adaptation sans label)

2011

aux mêmes DOY que 2013



Même DOY

2011

aux mêmes DOY que 2013 + Domain Adaptation



Adaptation

2013



# Conclusion

## 1 Cartographie automatique des essences, un grand potentiel :

- **Grande précision** pour plusieurs **conifères** ( $F1 > 90\%$ )
- Indice **LChloC** très **efficace** pour les feuillus et reflète bien la phénologie
- La sélection de bandes ↗ la qualité estimée... mais instabilité entre années  
Besoin de tester la stabilité des prédictions sur 3 années (2017, 2018 et 2019) et la stabilité du LChloC.

## 2 Détection de la phénologie :

- Grande **influence du sous-étage** (influence le cycle phénologique observée)
- Consistant avec les relevés terrain mais difficile de prédire à 5 jours près.
- Besoin d'automatiser les paramètres pour détecter les débuts et fin de saison  
(via une grille de recherche par ex.)

# Vers une recherche reproductible

# MUSEO TOOLBOX

Bibliothèque python3 pour l'apprentissage automatique

(basée sur Scikit-learn).

Objectif ? Rendre + **accessible** les classifications d'images, les traitements d'images, et fournir des **validations croisées spatialisées**.

Permet de reproduire l'ensemble des méthodes de ma thèse (et bien +).



Documentation complète sur :  
<https://museotoolbox.rtfid.io/>

# Vers une recherche reproductible

# MUSEOPHENO

# EN FINALISATION

Bibliothèque python3 dédiée aux séries temporelles et à la phénologie.

(basée sur Scikit-learn).

Objectif ? Calcul reproductible en quelques lignes de l'ensemble de la partie phénologie de ma thèse.

À savoir :

- Calcul des indices spectraux à partir d'une série temporelle
- Lissage et/ou gap-filling en utilisant une double logistique, savitzky-golay...
- Détection du début, longueur et fin de saison

# Partage des données

DOI: **zenodo**

**TEMP**   
Réseau National d'Observatoires  
de la phénologie du vivant

- CSV
- gpkg
- python3



Téléchargement direct  
(Zenodo)

licence GPL v3

Références terrain : gpkg  
Données phéno : CSV

# Présenté par Nicolas Karasiak

## Merci de votre attention



[www.karasiak.net](http://www.karasiak.net)

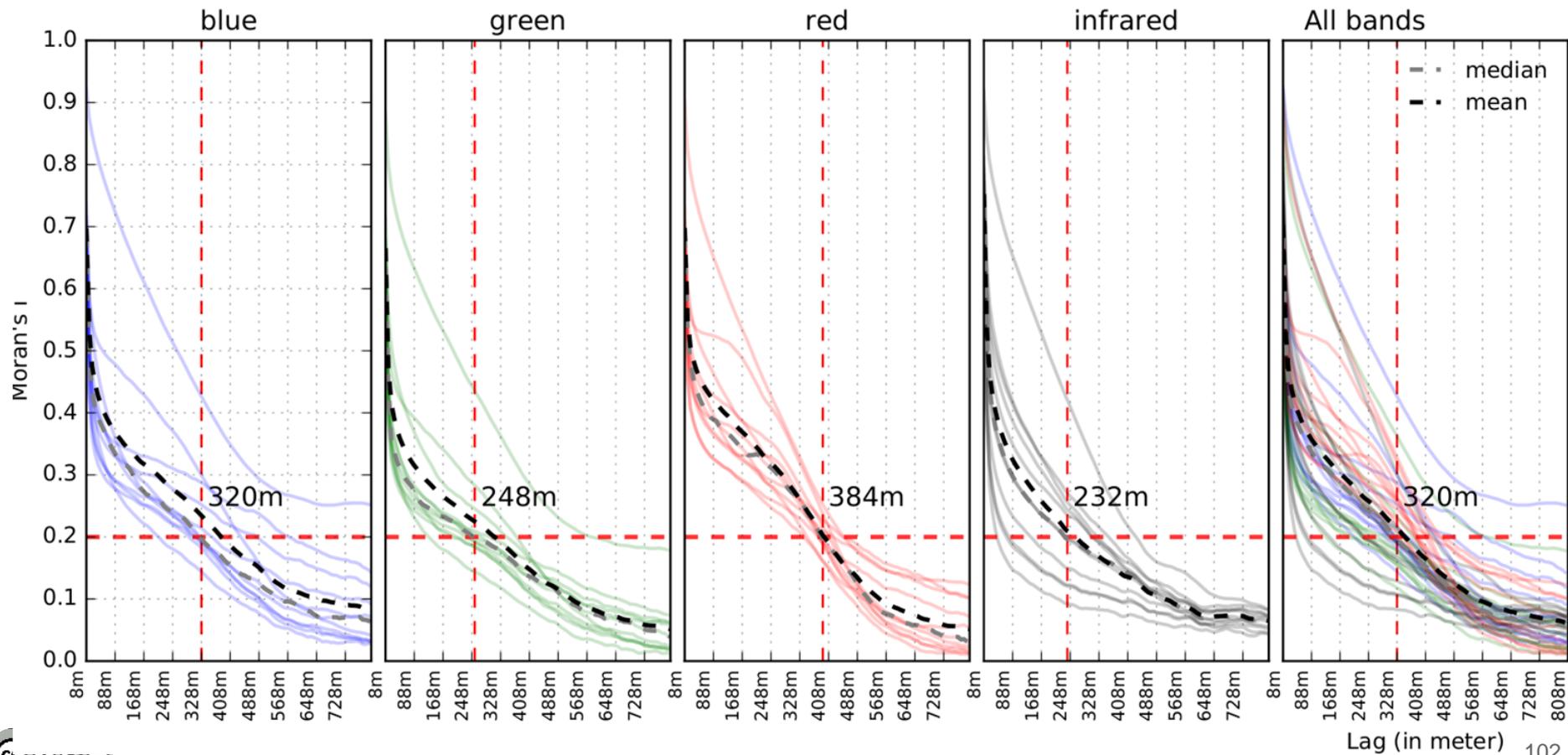


[@nkarasiak](https://twitter.com/nkarasiak)



[nicolas.karasiak@inra.fr](mailto:nicolas.karasiak@inra.fr)

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$



Lag (in meter) 102

