



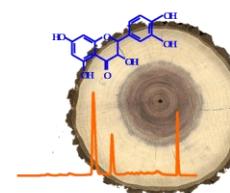
# La Spectroscopie proche infrarouge au service de la détermination des essences forestières

26èmes Rencontres HélioSPiR 24-25 Juin 2025

Nassim BELMOKHTAR  
Rémy GOBIN



INRAE



PHENOBOTS

# ▶ Les essences forestières en France métropolitaine

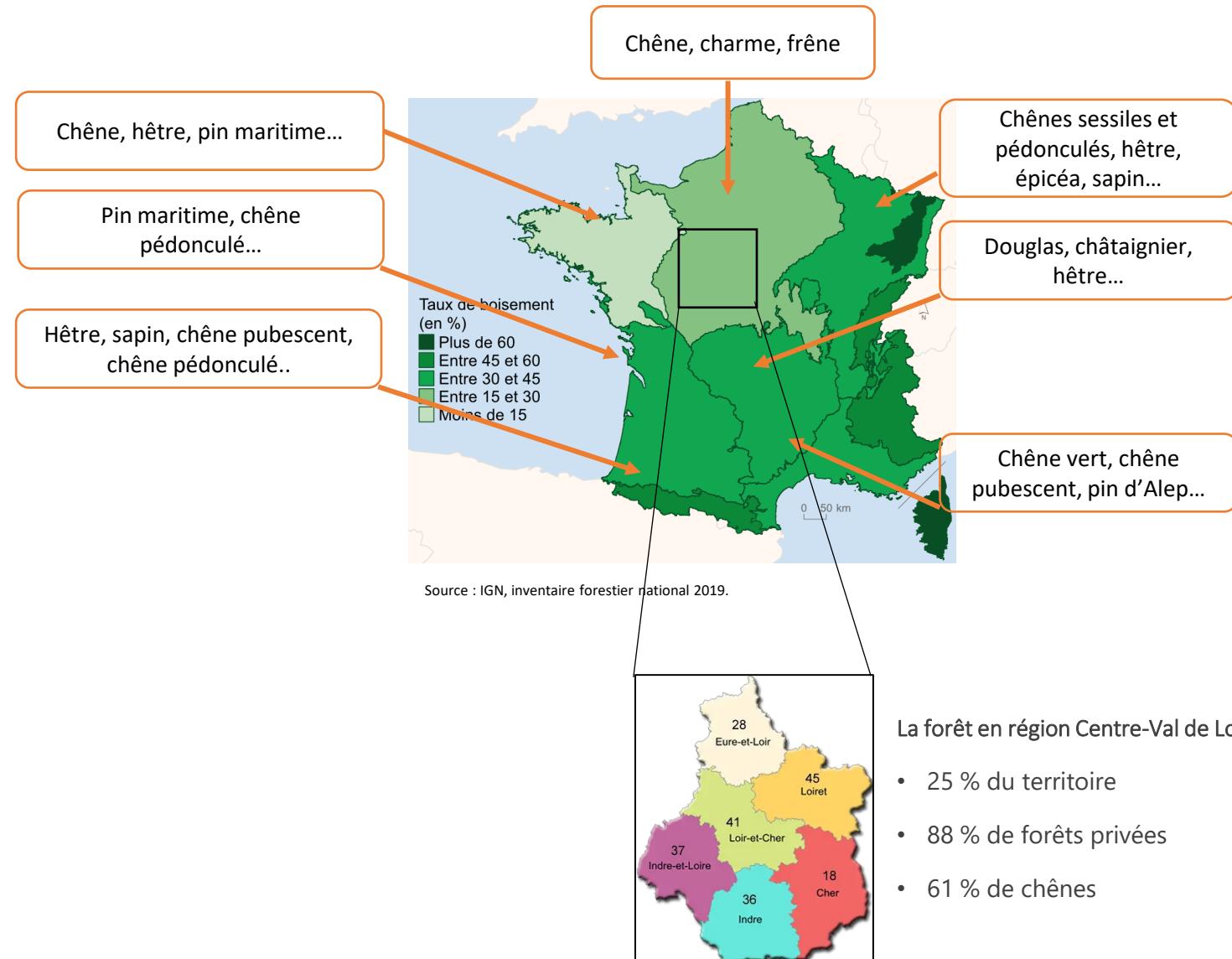
## Une répartition hétérogène

**Essences principales :** (64 %) Feuillus vs (34 %) Résineux.

**Surface forestière :** progression de 20 % depuis 1985 ~ 17 millions d'hectares, soit environ 31% du territoire.

**Riche diversité :** Plus de 190 essences d'arbres recensées, avec environ 30 principales espèces ligneuses utilisées en sylviculture ou industries du bois.

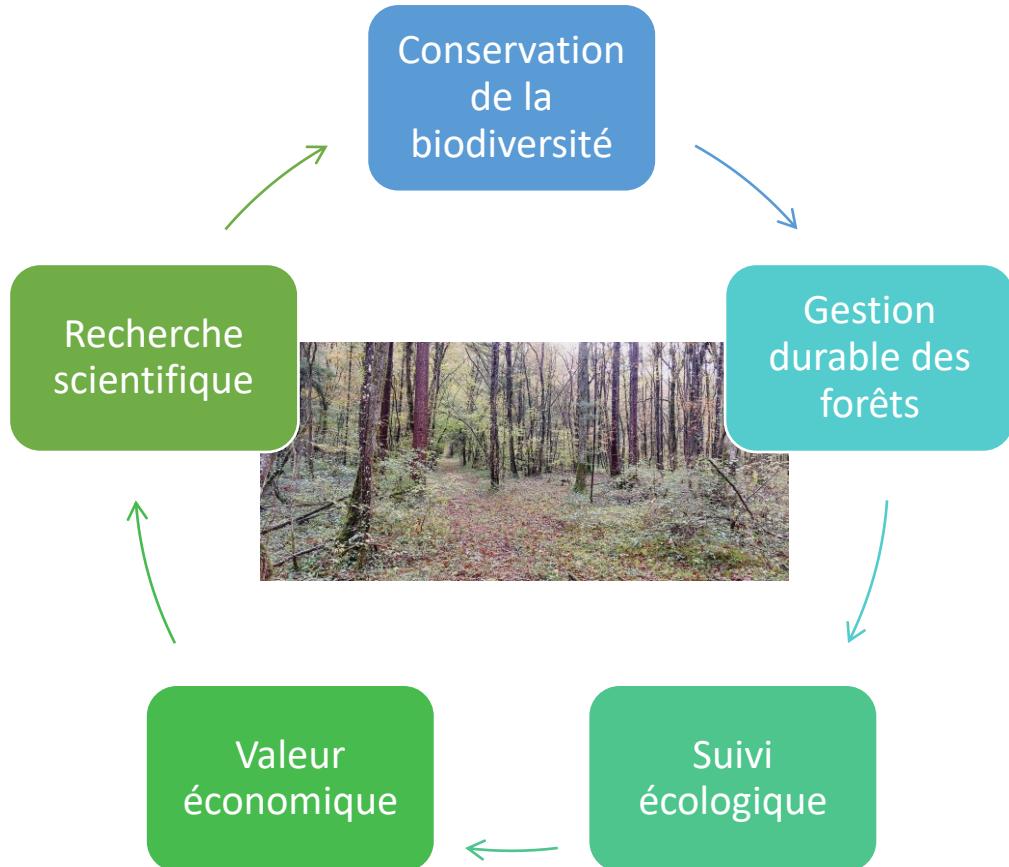
**Répartition :** Dépend des conditions climatiques, altitude, sols, et usages forestiers.



# ➤ Pourquoi identifier les espèces forestières ?

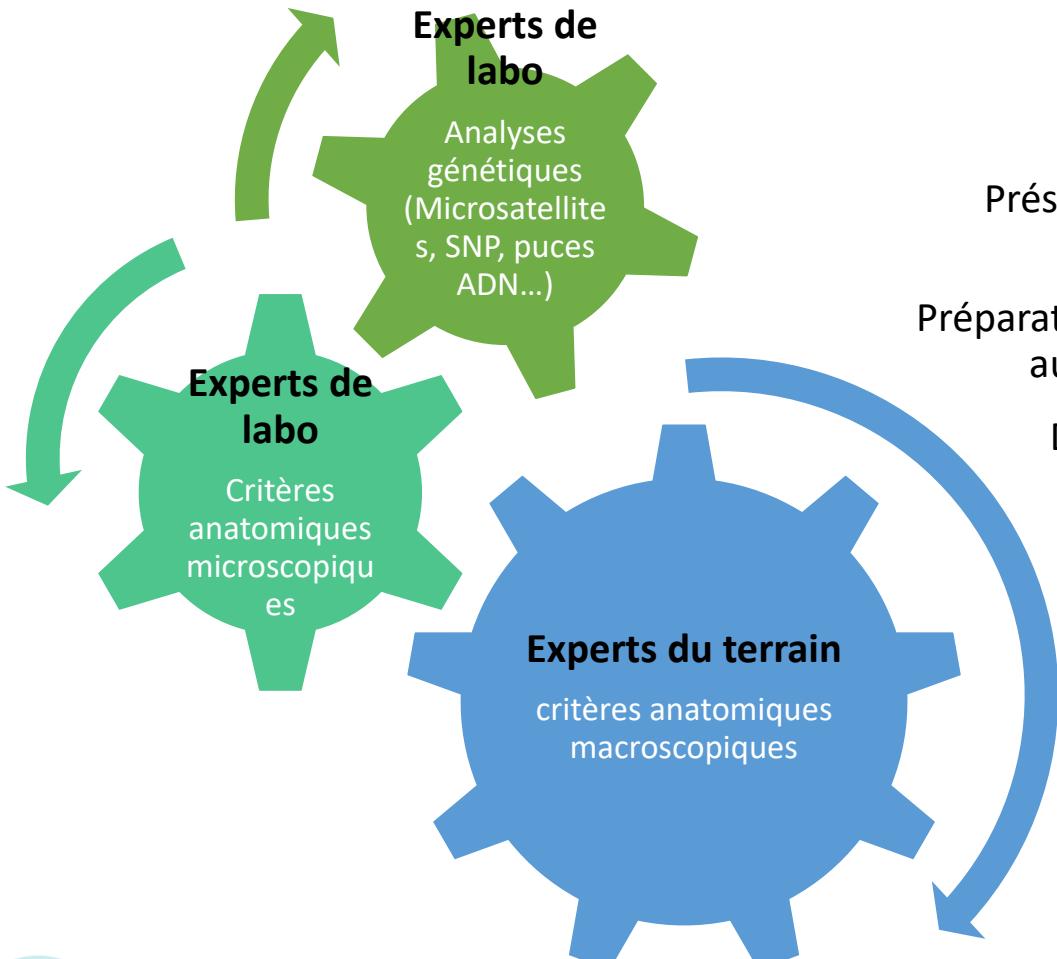
## Un enjeu crucial

- Connaitre les espèces présentes afin de mieux protéger les écosystèmes
- Planifier l'exploitation forestière de manière durable, en sélectionnant les espèces à couper ou à préserver pour maintenir l'équilibre écologique et assurer la régénération des forêts
- Surveiller les changements environnementaux (climat, pollution, maladies) et leur impact sur la forêt (indicateur)
- Optimiser leur utilisation de certaines espèces d'importance économique
- Contribue à la recherche en écologie, en botanique et en zoologie, permettant de mieux comprendre les interactions entre les organismes et leur environnement

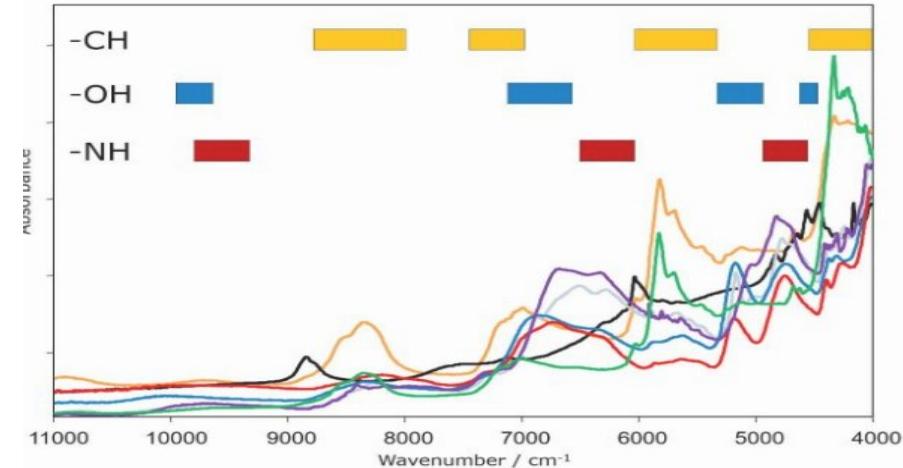


# Comment identifier les espèces forestières ?

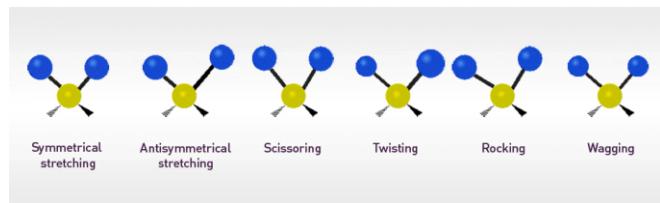
Les méthodes classiques existent, mais elles ne sont pas adaptées au haut débit.



Présence d'organes nécessaire  
Préparations d'échantillons au laboratoire  
Débit limité



Modèle de vibration entre 2 atomes (C-H, O-H, N-H...)



- Masses différentes
- Forces de liaison différentes

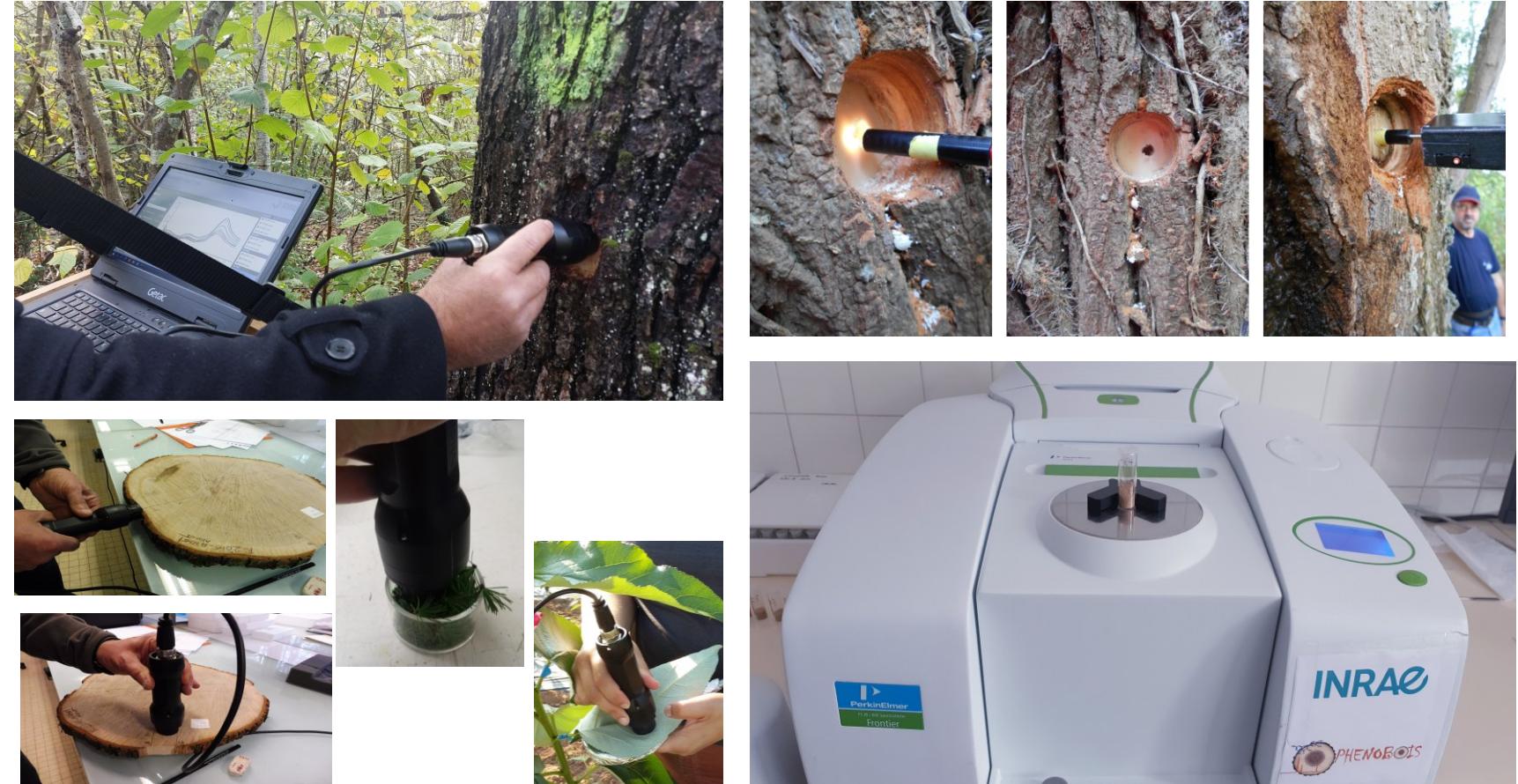
⇒ Vibration différentes enregistrées dans un spectre NIRS

## ➤ La spectroscopie proche infrarouge à Phénobois (BioForA)

## Des équipements de terrain et de laboratoire



- Gammes et résolution spectrales variables
  - Avec plus au moins de préparation d'échantillons



## ➤ Quelques exemples d'identification d'espèces forestières

Essentiellement en région Centre-Val de Loire

- Le chêne
- Le frêne
- Le mélèze
- Le peuplier
- L'orme

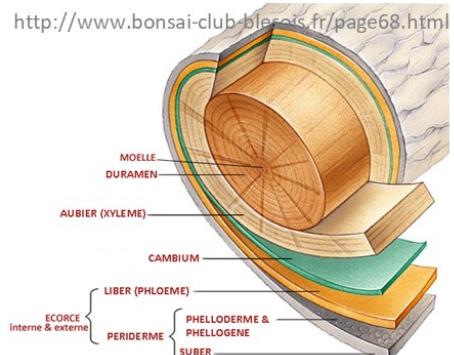
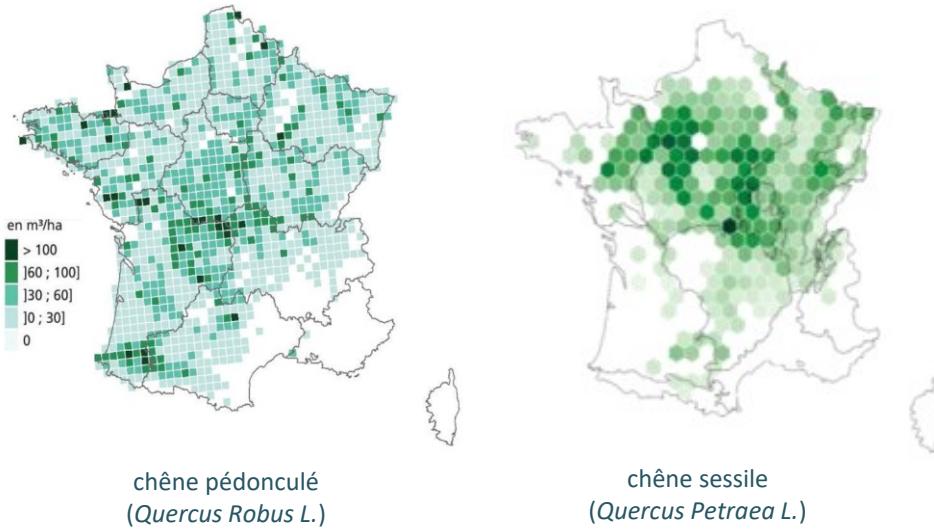
# ➤ Le chêne

Plusieurs espèces morphologiquement proches...et des hybrides



Prise de spectres en forêt sur 70 arbres vivants

- 4 mesures par arbres
- Sous l'écorce (cambium)



INRAE

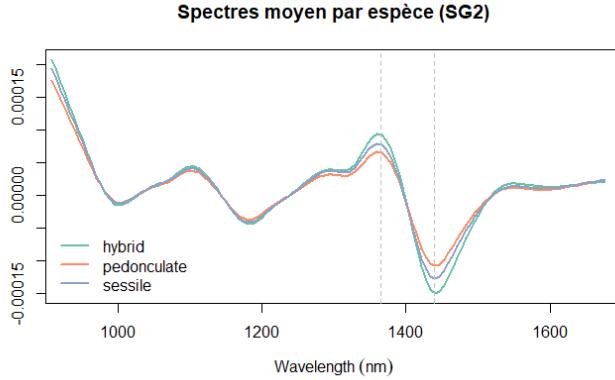
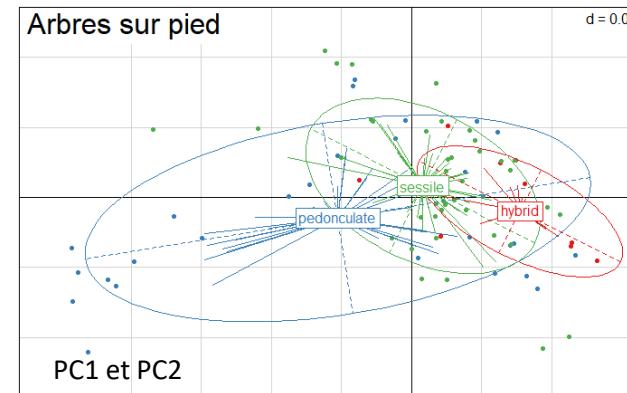
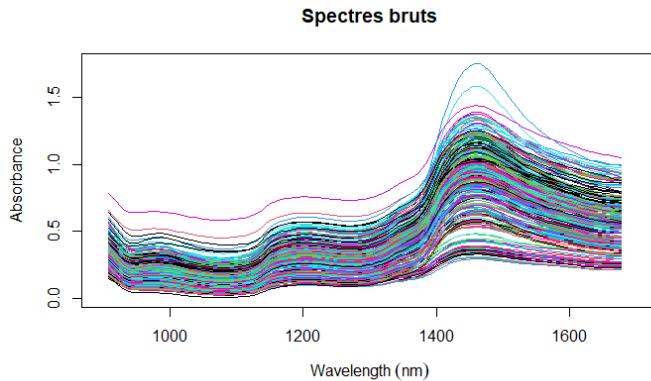
Titre de la présentation  
Date / information / nom de l'auteur

Identification de deux espèces majeures de la forêt française:

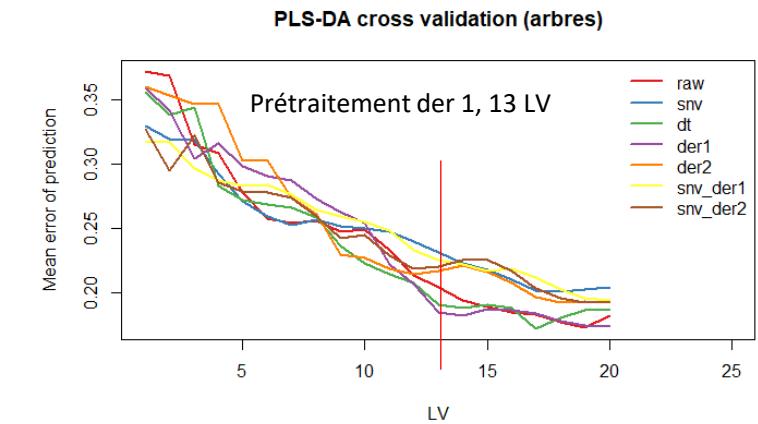
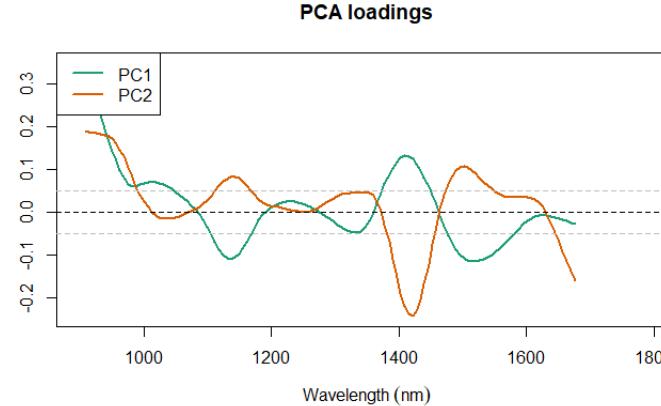
- Les chênes pédonculés (*Quercus robur*)
- Les chênes sessiles (*Quercus petraea*)
- *Interfertile, même nombre de chromosomes (24), se croisent librement*

# Le chêne

## Analyse des données spectrales



Différence d'absorbance entre espèces  
à 1365 et **1440** nm



	hybrid	pedonculate	sessile
Sensitivity	0.75000	0.7857	0.9545
Specificity	0.93617	0.9744	0.9000

Accuracy : 0.8868

# Le chêne

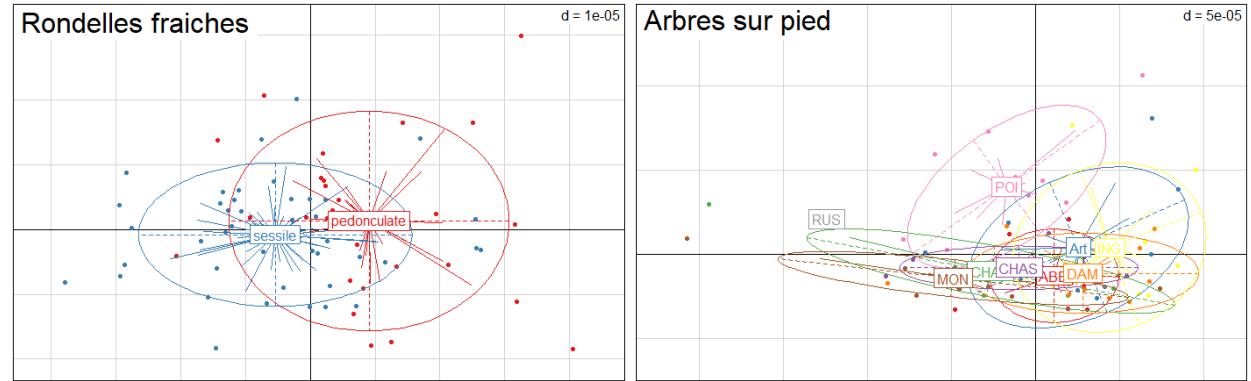
## Modèles SPIR en forêt sur rondelles fraîches



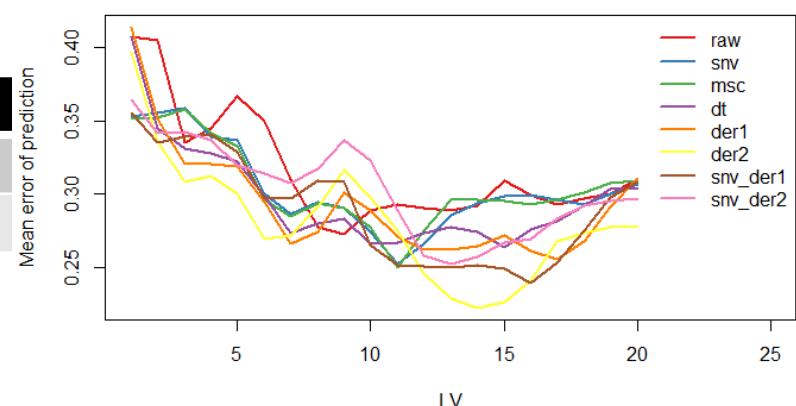
### Prise de spectres sur matériau frais

Plusieurs tissus (4 barreaux) :

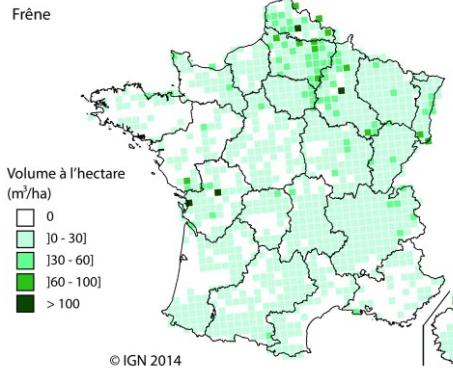
- 1.2.3.4      *xylème*
- 5.6.7.8      *aubier*
- 9.10.11.12    *duramen externe*
- 13.14.15.16   *duramen interne*



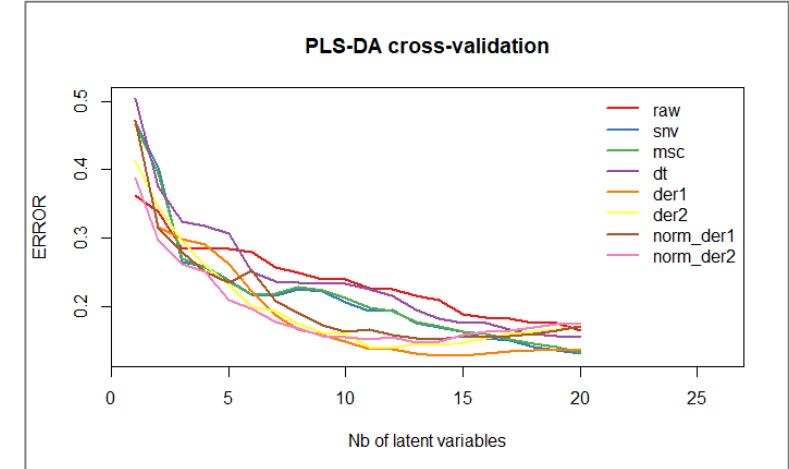
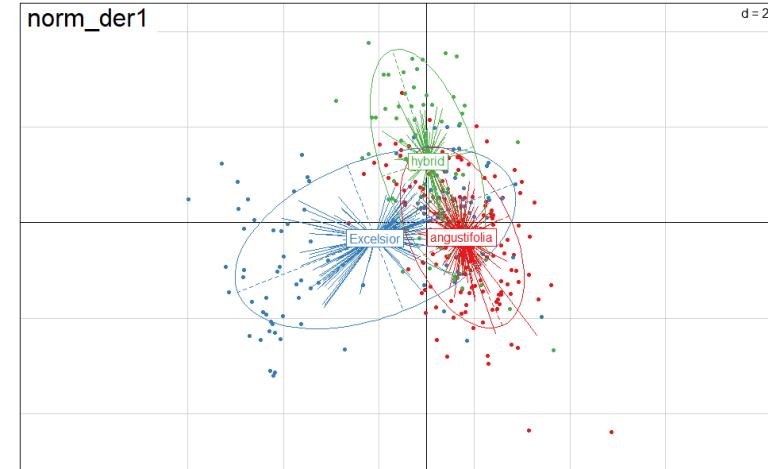
Précision	90,67 %
Détection pédonculé	85,71 %
Détection sessile	93,62 %



# ➤ Le frêne



- Cinquième essence feuillue de la forêt française
- Bois de bonne qualité
- Utilisé en plantation d'ornement

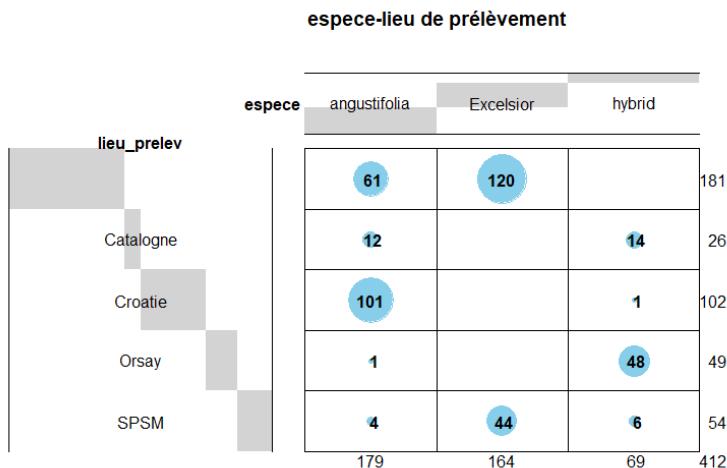


Prediction	angustifolia	Excelsior	hybrid
Sensitivity	0.9587	1.0000	0.9184
Specificity	0.9688	1.0000	0.9750

Accuracy : 96,39 %

Test	angustifolia	Excelsior	hybrid
Sensitivity	0.8158	0.9375	0.8462
Specificity	0.9111	0.9020	0.9714

Accuracy : 86,75 %



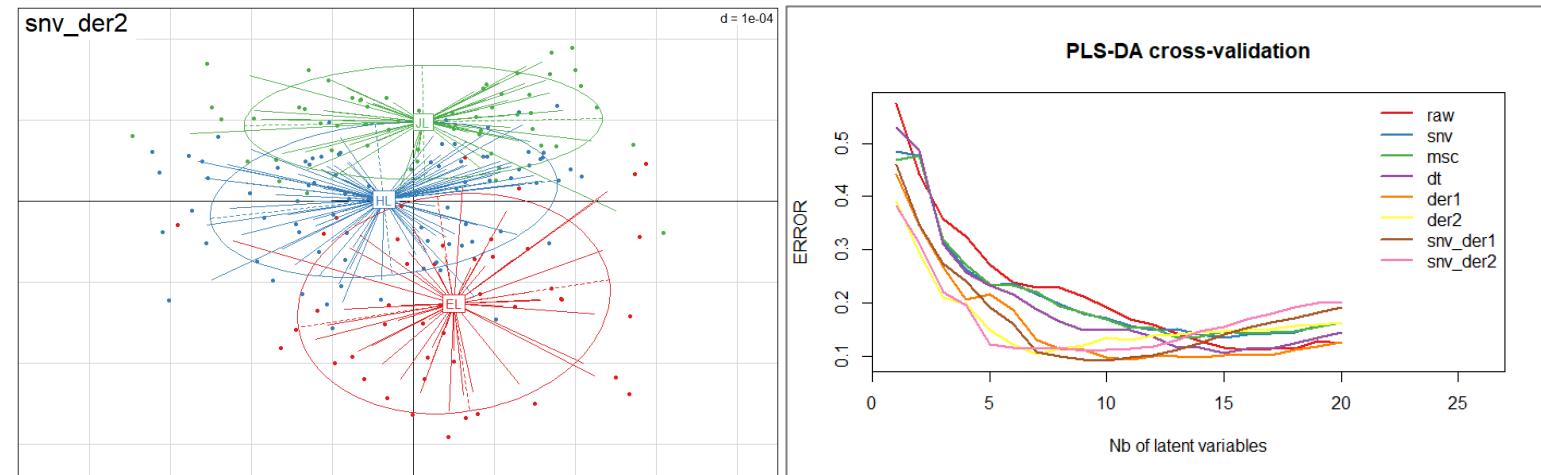
# ➤ Le mélèze



**Mélèze du Japon (*Larix kaempferi*)** : Espèce asiatique, souvent appréciée pour sa croissance rapide et sa qualité de bois. Adaptée à des conditions climatiques différentes de celles d'Europe.

**Mélèze d'Europe (*Larix decidua*)** : Espèce autochtone européenne, bien adaptée aux conditions locales, souvent utilisée en reboisement et sylviculture.

**Hybrides (*Larix x eurolepis*)** : Résultant du croisement entre les deux espèces, ils combinent souvent la croissance rapide du mélèze du Japon avec la rusticité et l'adaptation du mélèze d'Europe.



Prediction	Europe	Hybrid	Japan
Sensitivity	1.0000	0.9107	0.9737
Specificity	0.9615	0.9886	0.9717

Accuracy : 95,83 %

Test	Europe	Hybrid	Japan
Sensitivity	1.0000	0.8333	0.8947
Specificity	0.9767	0.9167	0.8966

Accuracy : 87,50 %

# ➤ Discrimination d'espèces du genre *Populus* (R. Gobin, P. Poupart)

- Echantillonnage : n = 162, collection GIS Peuplier, pépinière de Guémené-Penfao (44), Mai 2022
- Acquisition des spectres : MicroNIR, feuilles fraîches, face adaxiale
- Analyse : 8 prétraitements, 10 échantillons par espèce pour la calibration, PLSR-DA

		Nb outliers	Nb variables latentes	Taux d'erreur (CV)
Prétraitements	raw	<b>3</b>	<b>19</b>	<b>0.02</b>
	snv	3	15	0.04
	dt	2	12	0.05
	der1	1	19	0.07
	der2	3	20	0.04
	msc	3	17	0.03
	msc der2	1	17	0.06
	base	3	13	0.05

## Validation sur le jeu de test

		Référence					
		DD	DN	MM	NN	TM	TT
Prédiction	DD	3	0	0	4	0	0
	DN	0	16	0	0	0	0
	MM	0	0	25	0	0	0
	NN	0	0	0	29	0	0
	TM	0	0	0	1	13	0
	TT	0	0	0	0	0	8

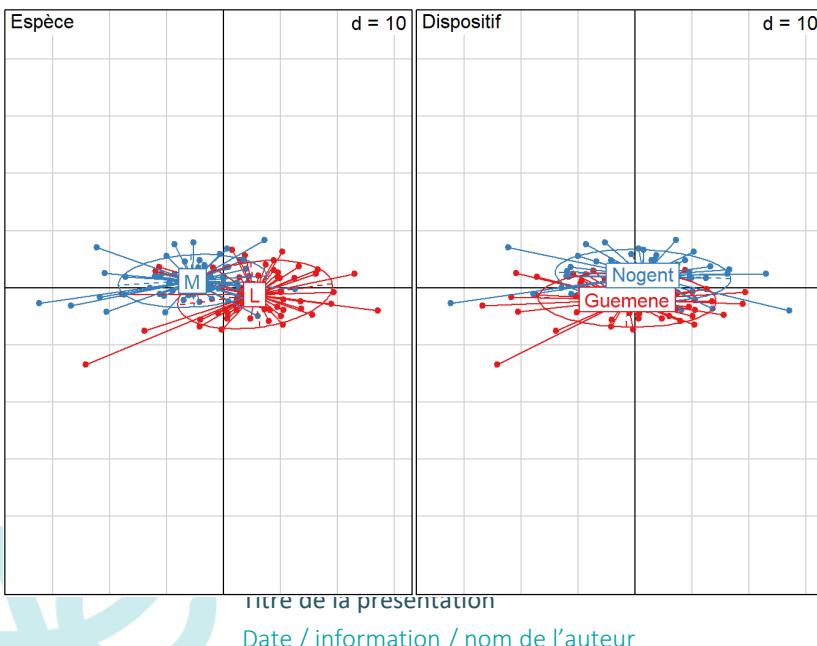
Précision : 0.95

# ➤ Discrimination d'espèces du genre *Ulmus*

R. Gobin, A. Desgroux, S. Matz, C. Joyeau, M. Rondouin, P. Poupart

- - Echantillonnage : 2 pépinières (Nogent-sur-Vernisson, Guémené-Penfao), 2 espèces (*Ulmus laevis* et *Ulmus minor*), n = 120
- - Acquisition des spectres : MicroNIR, feuilles fraîches, face adaxiale
- - Analyse : 5 prétraitements, absence d'outlier, train/test : 0.7/0.3, PLSR-DA

## ACP sur les spectres bruts



## Calibration

Prétraitements	Nb variables latentes	Taux d'erreur (CV)
raw	13	0.08
snv	12	0.09
dt	17	0.13
<b>der1</b>	<b>19</b>	<b>0.06</b>
der2	13	0.08
msc	10	0.09

## Validation sur le jeu de test

Prédiction	Référence	
	<i>U. laevis</i>	<i>U. minor</i>
<i>U. laevis</i>	21	2
<i>U. minor</i>	0	14

**Précision : 0.95**

# Discrimination d'espèces du genre *Ulmus*

R. Gobin, A. Desgroux, S. Matz, C. Joyeau, M. Rondouin, P. Poupart

Calibration : Nogent-sur-Vernisson → Jeu de test : Guémené-Penfao

## Calibration

Prétraitements	Nb variables latentes		Taux d'erreur (CV)
	raw	15	0.11
snv	15	0.11	
dt	14	0.11	
der1	16	0.10	
<b>der2</b>	<b>14</b>	<b>0.09</b>	
msc	13	0.11	

## Validation sur le jeu de test

Prédiction	Référence	
	<i>U. laevis</i>	<i>U. minor</i>
<i>U. laevis</i>	24	3
<i>U. minor</i>	6	28

Précision : 0.85

Calibration : Guémené-Penfao → Jeu de test : Nogent-sur-Vernisson

## Calibration

Prétraitements	Nb variables latentes		Taux d'erreur (CV)
	raw	12	0.01
snv	12	0.01	
<b>dt</b>	<b>7</b>	<b>0.02</b>	
der1	12	0.01	
der2	13	0.02	
msc	12	0.01	

## Validation sur le jeu de test

Prédiction	Référence	
	<i>U. laevis</i>	<i>U. minor</i>
<i>U. laevis</i>	24	5
<i>U. minor</i>	6	25

Précision : 0.82

Très bonne calibration avec le regroupement des deux pépinières

Bonne prédiction d'une pépinière avec un modèle établit sur l'autre pépinière

# Conclusion

## Principales conclusions :

- Performances variables, mais des prédictions globalement bonnes (accuracy > 80 %)
- Efficacité des spectromètres de terrain → permet l'identification directement sur le terrain
- Possibilité d'intégrer ces outils dans les programmes de sélection et de phénotypage haut débit

## Perspectives :

- Développement de bases spectrales plus larges, en incluant davantage de forêts et de dispositifs sur la métropole
- Standardisation des protocoles d'acquisition et d'analyse
- Exploration du potentiel des spectromètres bas coût pour faciliter le transfert vers la filière forêt-bois
- Élargissement à d'autres essences et espèces forestières d'intérêt

