Utilisation de spectromètres Proche Infra Rouge portables pour l'évaluation de propriétés du bois sur arbres sur pieds : Approche méthodologique et premiers résultats

Jean-Paul Charpentier

Vincent Segura, Kévin ADER, Rémy Gobin, Esther Merlo*

INRA Val de Loire BioForA, Orléans, France

*** Madera+, Ourense, Espagne**

Spectrométrie Proche Infra Rouge et Bois

De nombreux exemples de développement de modèles pour la calibration et la prédiction de diverses propriétés du bois (chimiques, physiques, mécaniques)

Reviews :

Tsuchikawa, 2007
Tsuchikawa and Schwanninger, 2013
Tsuchikawa and Kobori, 2015
Hein et al , 2017
N° « spécial » JNIRS sur bois : 2010, 2011, 2016

Nombreux développements en laboratoire
mais peu d'applications transférées dans le milieu industriel

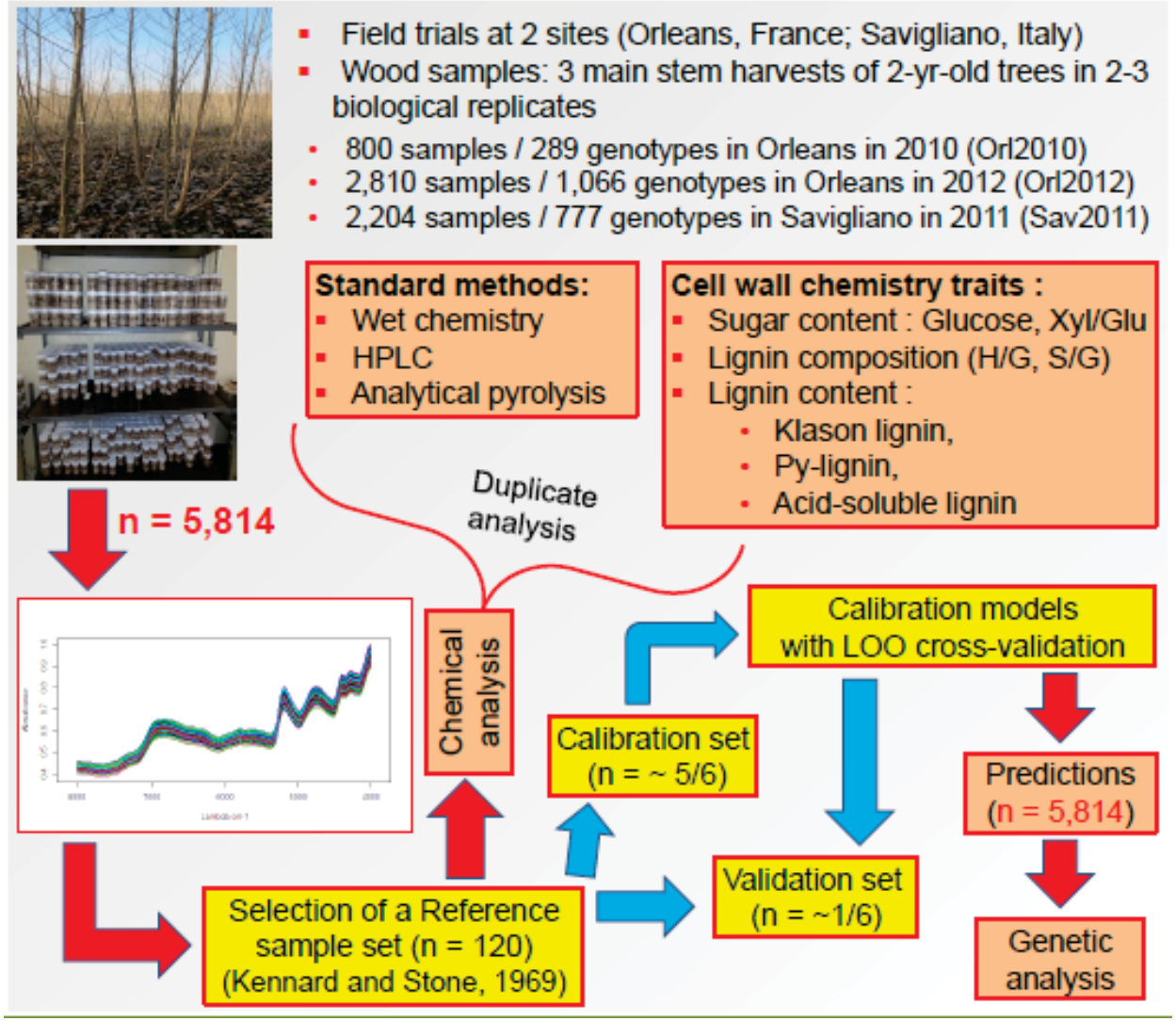
Construction et utilisation de modèles SPIR sur le bois pour des études génétiques

Peuplier noir (*Populus nigra*)

Développement de calibrations par spectroscopie PIR pour l'analyse génétique des propriétés du bois

Propriétés chimiques du bois → utilisation de la biomasse (énergie renouvelable, bioraffinerie)

Architecture génétique du rendement et de la qualité de la biomasse lignocellulosique



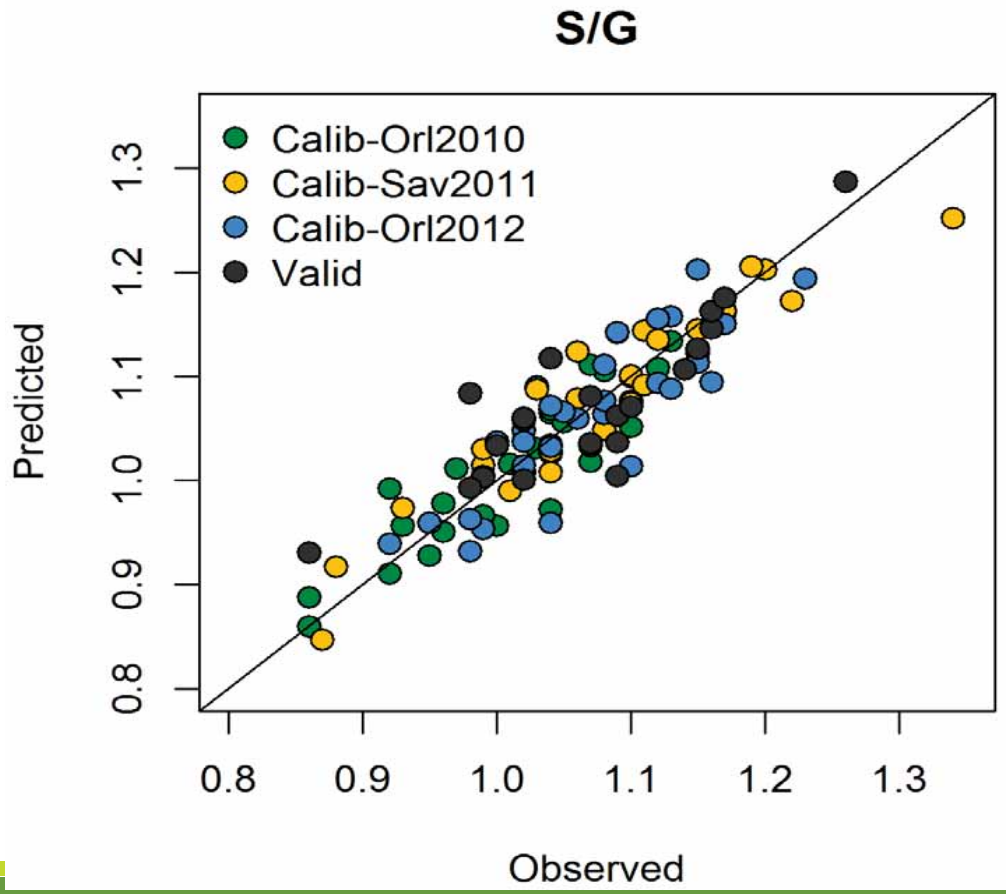
Gebreselassie et al., 2017, Industrial Crops & Products, 107: 159-171

Modèles d'étalonnage NIRS pour différentes propriétés chimiques du bois de peuplier noir :

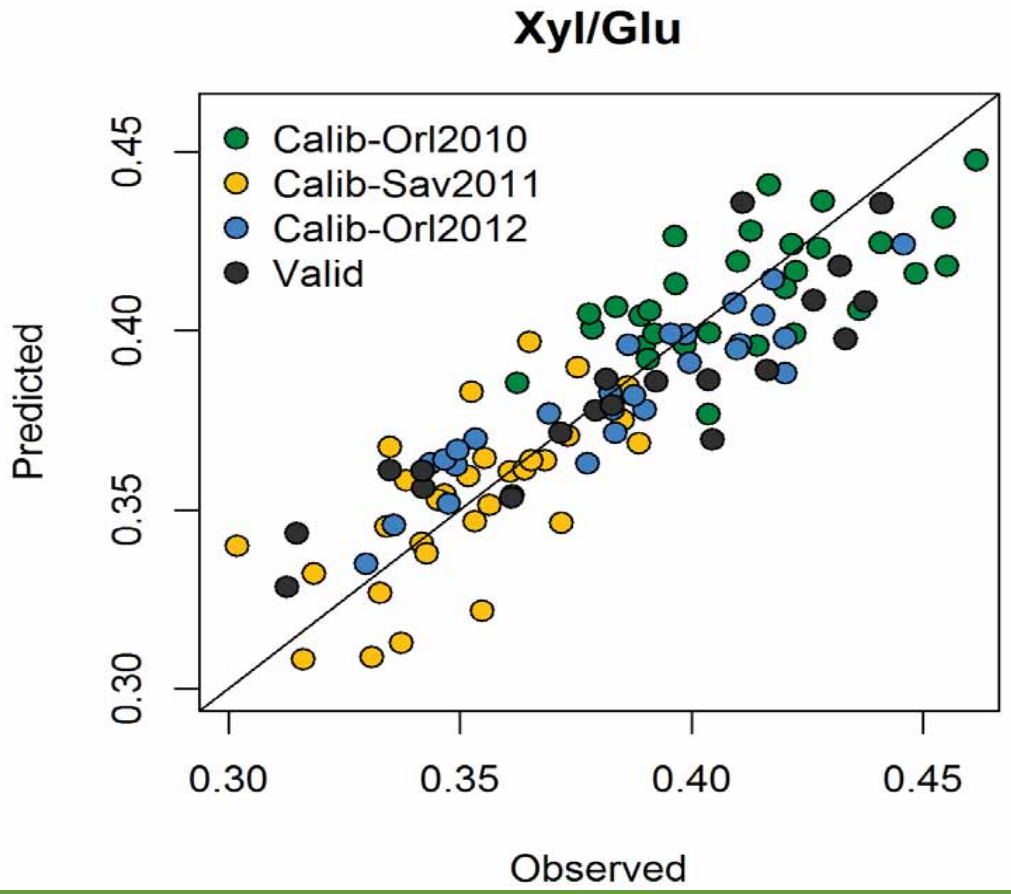
Trait	Model type	Calibration set (n = ~ 5/6)				Validation set (n = ~ 1/6)			RMSE of lab. Method
		Factors	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	Nb. obs	R^2_{val}	$RMSE_{val}$	Nb. obs.	
Glucose	global	6	0.76	1.49	94	0.64	1.25	18	1.87
Xylose/Glucose	global	8	0.79	0.02	90	0.75	0.02	20	0.03
H/G ratio	global	8	0.82	0.02	92	0.83	0.02	19	0.01
S/G ratio	global	12	0.84	0.03	91	0.72	0.04	21	0.03
Klason lignin	Site	6	0.78	0.94	56	0.6	1.31	13	1.61
Py-lignin	Site	8	0.79	0.39	26	0.73	0.35	6	1.49
Acid-soluble lignin	Site	8	0.77	0.16	30	0.79	0.15	6	0.32

Modèles d'étalonnage NIRS pour différentes propriétés chimiques du bois de peuplier noir :

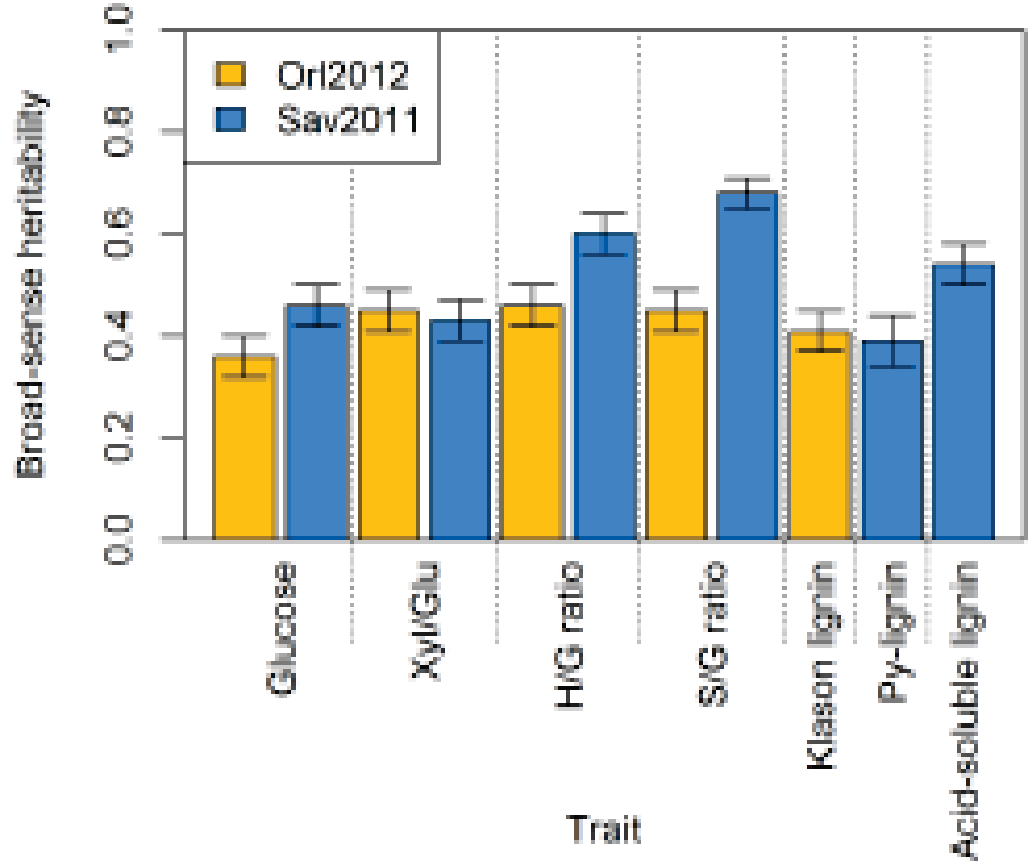
Lignines



Cellulose/Hémicellulose



Estimations de l'héritabilité au sens large (H2i) des caractéristiques chimiques du bois prédites par NIRS :



- Predicted wood properties were under moderate to high genetic control (H^2_i ranging from 0.25 to 0.68).
- Site differences were apparent in the expression of the phenotypes.

Rincent *et al.*, 2018, Phenomic selection: a low-cost and high-throughput method based on indirect predictions. Proof of concept on wheat and poplar. *G3: Genes, Genomes, Genetics* Online, doi:10.1534/g3.118.200760

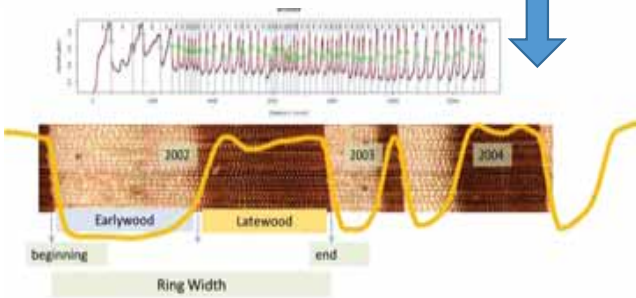
Prélèvement destructif pour l'arbre

Prélèvement non-destructif pour l'arbre

carotte de bois

Photo 3 : planchette de bois d'épaisseur constante

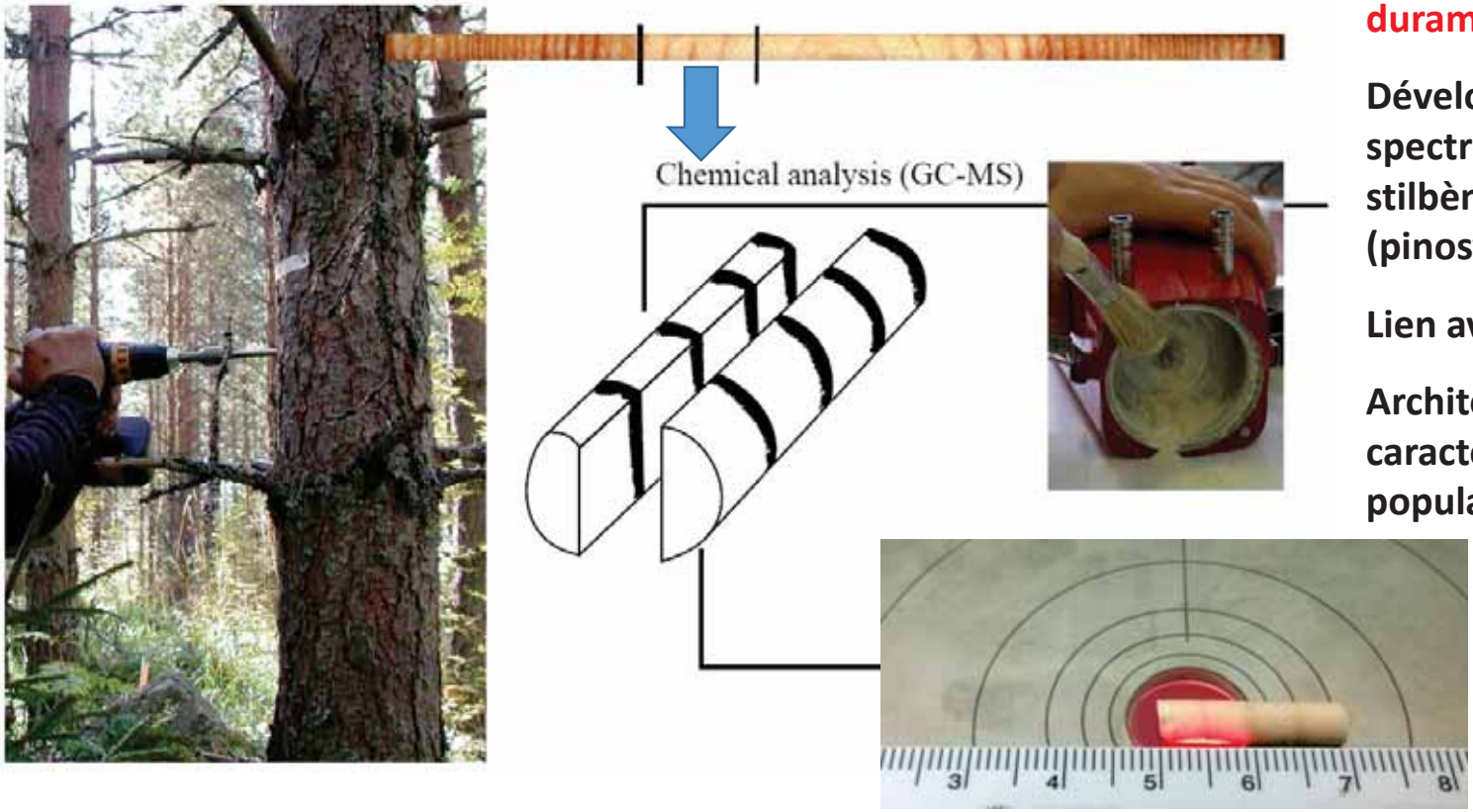
Spectres PIR sur planchette



Microdensitométrie par rayon X

Spectres PIR sur carotte

Méthode non destructive pour l'arbre : analyses à partir de carottes de bois :



Exemple : évaluation des stilbènes dans le duramen de pin sylvestre

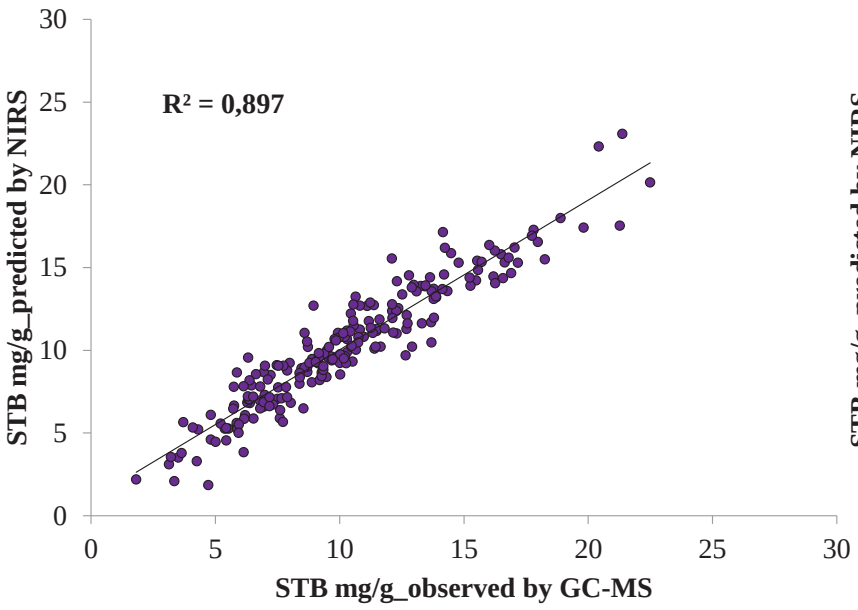
Développement de calibrations par spectroscopie NIR pour l'évaluation des stilbènes et molécules spécifiques (pinosylvine et pinosylvine mono-ethyl ether)

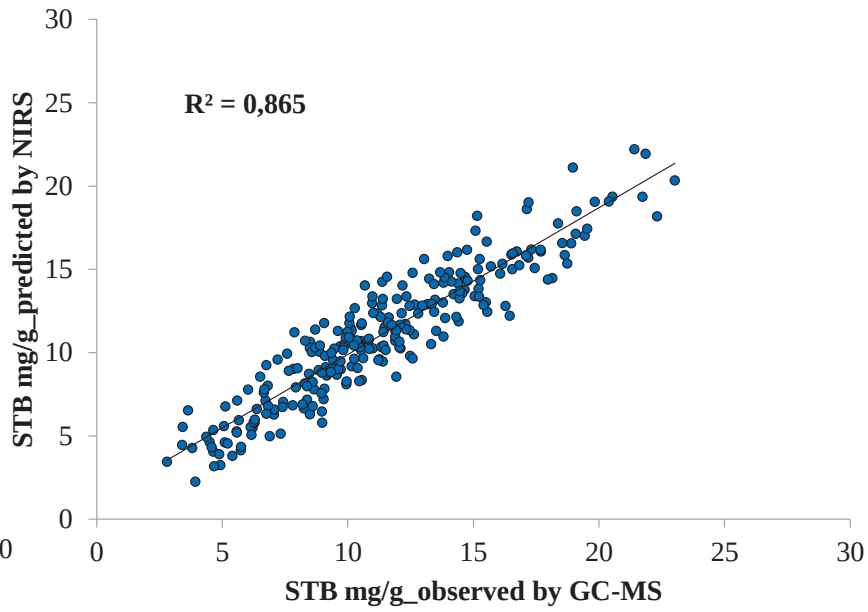
Lien avec la durabilité naturelle du bois

Architecture génétique (héritabilité) du caractère durabilité naturelle dans les populations

Le meilleur modèle en PLSR

- **Prétraitement : 2nde derivative sur spectres normalisés**
- **R^2: 0,90 pour la calibration et 0,87 pour la validation des stilbènes**
- **Nombre d'observations : 212 pour calibration and 262 pour validation**





Pulkka et al. 2016, J. Near Infrared Spectrosc. 24, 517–528

Utilisation de la SPIR dans l'industrie de la filière bois

Un exemple industriel, *OakScan®* : évaluation des tannins dans le bois de chêne sur la chaine de production des douelles

En France, le premier exemple d'application industrielle mis en place dans la tonnellerie

Utilisation de spectromètres (capteur infra rouge) installés sur les lignes de production

Giordanengo et al., 2009, Revue Française d'Œnologie, 234: 10-15.

Giordanengo et Charpentier, Forêt-Entreprise, n ° 203, mars 2012.

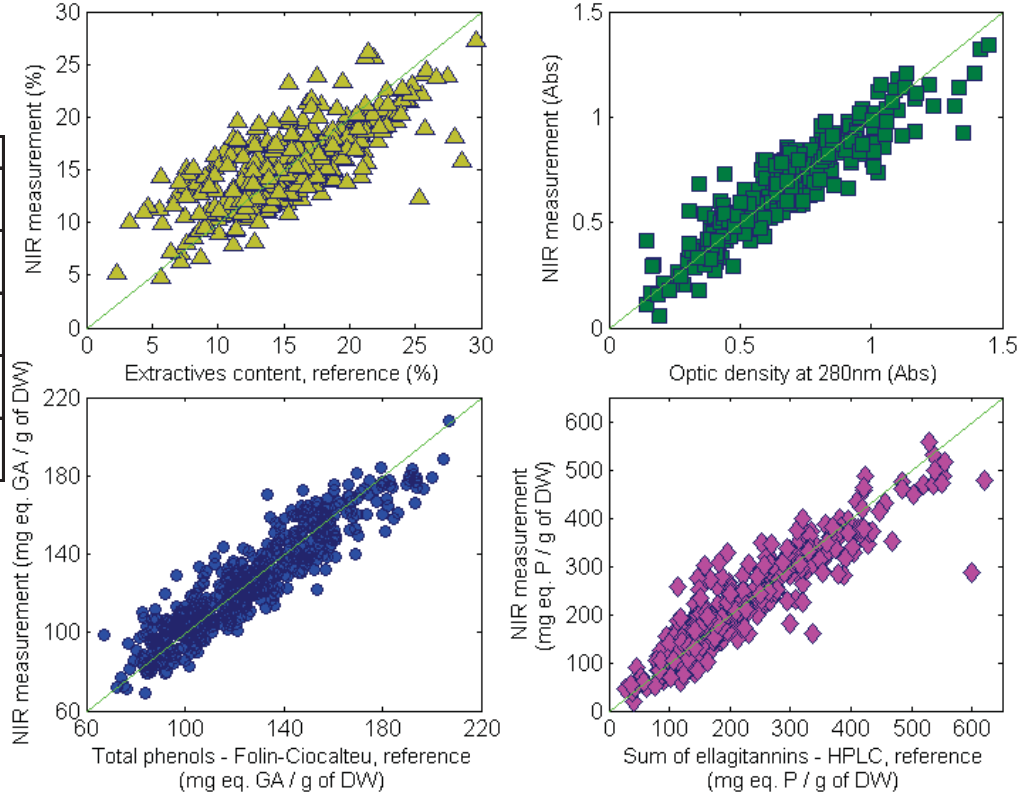
Gilles Chaix et al., 2018, in Chemistry of Lignocellulosics: Current Trends. Tatjana Stevanovic Editor, CRC Press Taylor & Francis Group

Utilisation de la SPIR dans l'industrie de la filière bois : *Oakscan®*

Mise en place des modèles au laboratoire

Reference analyses	Reference chemical analyses			Near infrared calibrations				
	mean	standard deviation	SEL	rank	SECV	R^2_{CV}	$bias_{CV}$	SECV / SEL
Ext	15.4	4.9	2.1	6	3.3	0.56	-0.004	1.6
OD280	0.64	0.24	0.05	5	0.09	0.85	-0.0008	1.9
Folin	122	24	6.9	4	10.7	0.86	-0.2	1.5
Ellagit	223	116	21	10	49	0.82	-0.08	2.3

Calcul d'un indice de polyphénols (IP) basé sur ces trois estimations



Transfert et mise en place en milieu industriel

Le capteur NIRS calcule l'indice de polyphénols pour chaque plage d'index / base [0 - 100].
Les tonneaux sont fabriqués avec des douelles selon les sélections suivantes:

	Label	IP threshold
Low tannin content	**A**	**26**
Medium tannin content	**M**	**56**
High tannin content	**F**	**67**

Et maintenant, l'utilisation de NIRS portables .....?

.....directement sur les arbres sur pieds ?

Acquisition de spectres directement sur les arbres sur pieds

→ **un nouvel axe de recherche innovant**

→ **les équipements portables proposés sont en pleine évolution**

→ **peu d'études engagées pour l'instant**

La mise au point de méthodes *in situ* d'évaluation de la qualité du bois, rapides, précises, non destructives, sans prélèvement d'échantillon présenterait un grand intérêt pour les sélectionneurs d'arbres, les gestionnaires de forêts et les études génétiques.

Exemples :

➢ sur les grumes

Étude destinée à la détection et discrimination à l'aide de la SPIR de différentes origines des acajous indigènes récoltés en Bolivie, Brésil, Guatemala, Mexique et Pérou.

Références anatomiques

Deux NIRS portables testés : MicroNIR et Phazir

Approches chimiométriques PLS-DA et SIMCA.

Forest Products Laboratory (FPL) of the Brazilian Forest Service

Bergo et al, 2016, IAWA journal 37 (3):420-430
Silva et al, 2018, Holzforschung 2018; 72(7): 521–530
https://wildtech.mongabay.com/2016/04/portable-scanners-identify-timbers-detect-illegal-logging/

Exemples :

➢ sur les grumes et arbres sur pieds

Projet européen SLOPE :

Fournir une technologie fiable pour le classement automatique de la qualité et l'utilisation potentielle de la grume

Différents défauts du bois tels que nœuds, poches de résine, pourriture, bois de compression,…

Modèles établis en laboratoire sur échantillons prélevés puis transférés pour MicroNIR pour détection sur le terrain

Les indices de qualité NIRS combinés avec des informations sur la qualité provenant d'autres capteurs.

Sandak et al, 2016. J. Near Infrared Spectrosc. 24, 587–594.

Unité de Recherche sur la génétique des arbres forestiers

→ **nombreux dispositifs génétiques et plantations**

→ **besoins de sélection précoce des génotypes sur des critères d'intéret**

→ **évaluation de paramètres génétiques (croissance, qualité du bois,…)**

→ **méthode rapide et fiable**

→ **non destructive, non ou peu dommageable pour l'arbre**

→ **facilement utilisable sur le terrain**

Deux solutions possibles pour la prise de spectres sur les arbres :

→ en surface du tronc au niveau du bois

→ en profondeur dans le bois

Différents types de spectromètres portables et miniaturisés possibles

Les différents équipements que nous avons essayés

LabSpec 4, ASD

MicroNIR, JDSU/Viavi

Phazir

Ocean Optics, IDIL Fibres optiques

Notre choix de spectromètres portables

MicroNIR, (*Viavi*)

Pour travailler en surface du tronc

***NIRQuest* 512**, (*Ocean Optics*)

Intégré avec une fibre optique par IDIL Fibres Optiques

Pour travailler en profondeur dans le bois de l'arbre

Préparation des arbres

Eucalyptus

Arbre à écorce lisse et fine

Préparation des arbres

Peuplier noir

Arbre âgé
écorce épaisse

Pin sylvestre

écorce épaisse

Transport du matériel

Prise de spectres avec le MicroNIR

En surface du bois

Clones eucalyptus, Galice, Espagne

Prise de spectres avec le MicroNIR

En surface du bois

Peuplier noir bords de Loire

Prise de spectres avec la fibre optique

En surface

En profondeur

Peuplier noir bords de Loire

Prise de spectres avec la fibre optique

NIRQuest

Peuplier noir bords de Loire

Prise d'échantillons (carottes)

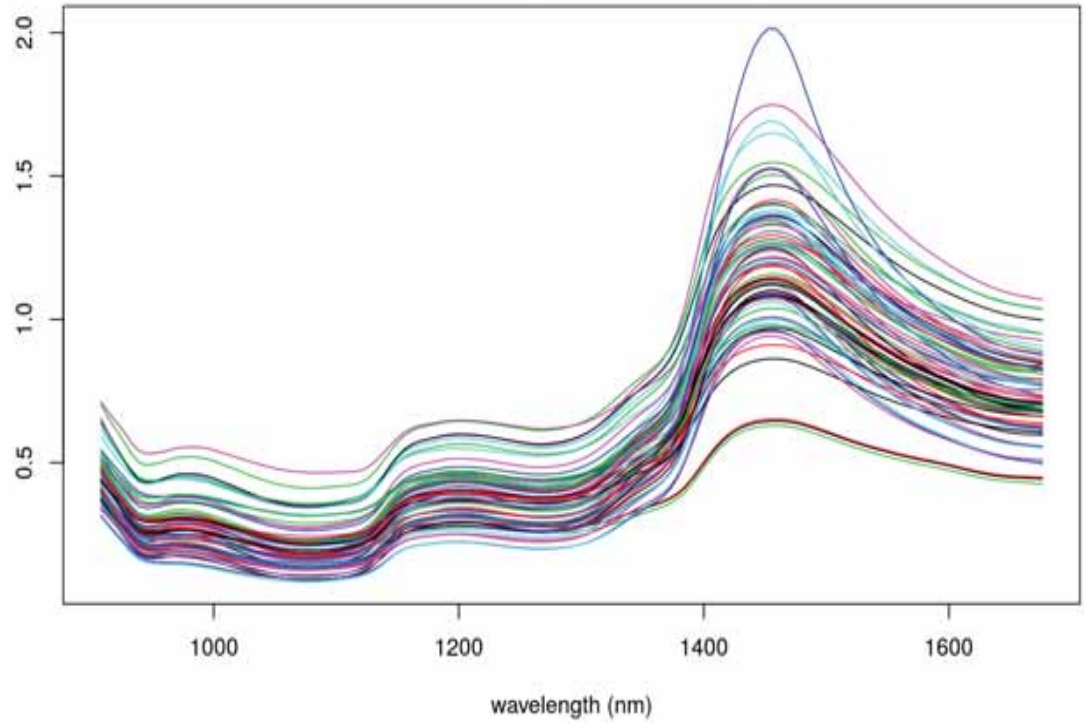
Pour mesure directe sur place et évaluation de paramètres en laboratoire (densité, humidité,….)

Comparaison avec autre méthode *in situ*

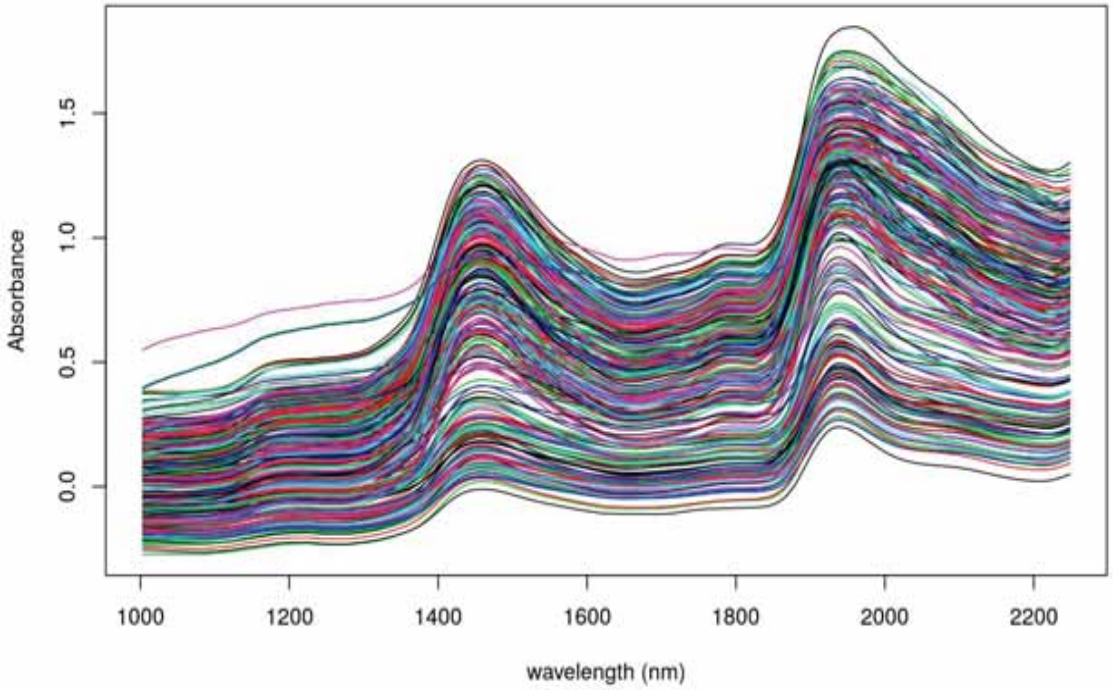
Méthode acoustique

Comparaison des spectres acquis avec les deux appareils (Eucalyptus globulus)

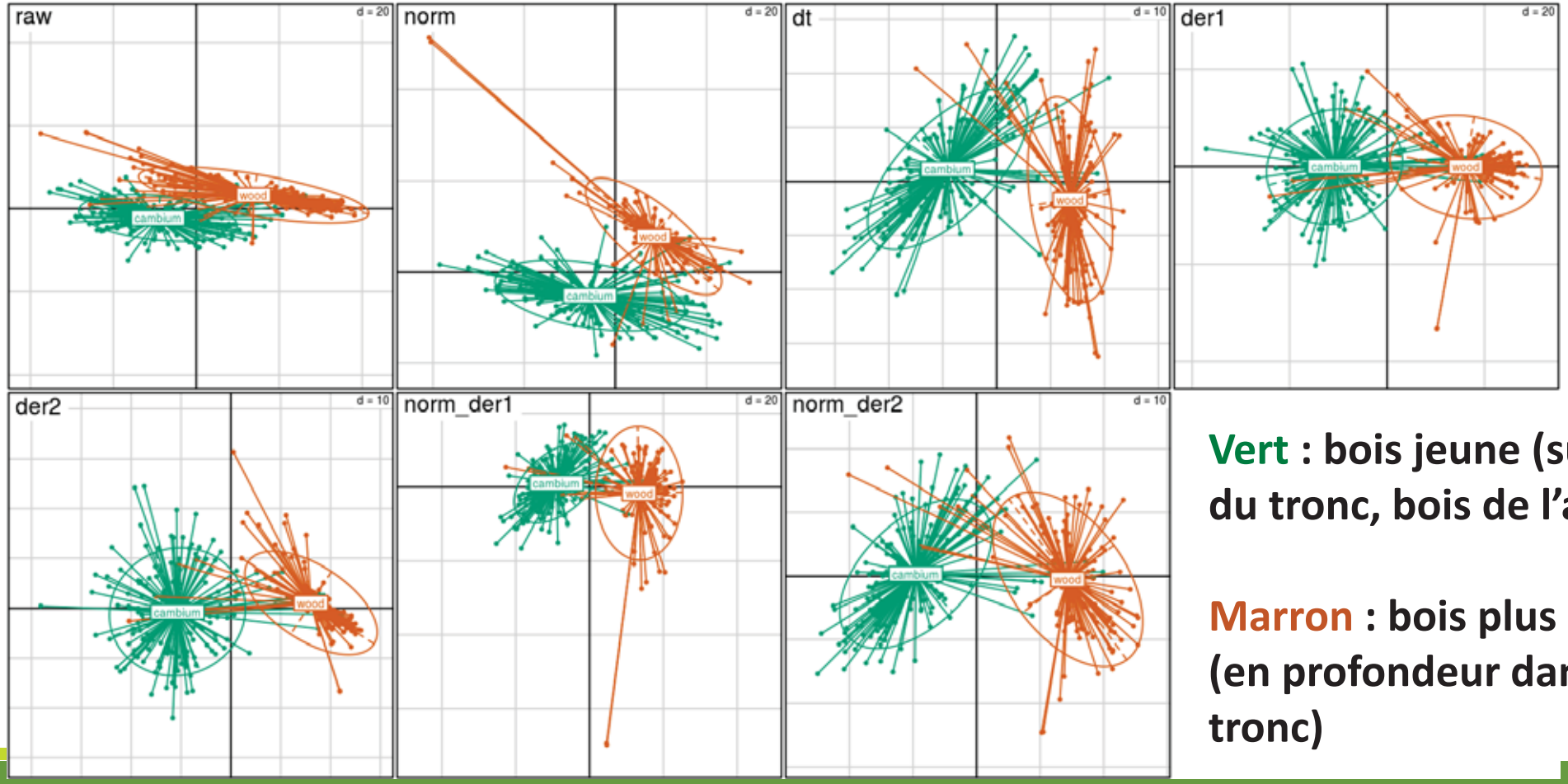
MicroNIR



NIRQuest (fibre optique)



NIRQuest (fibre optique) : différents âges du bois (Eucalyptus)



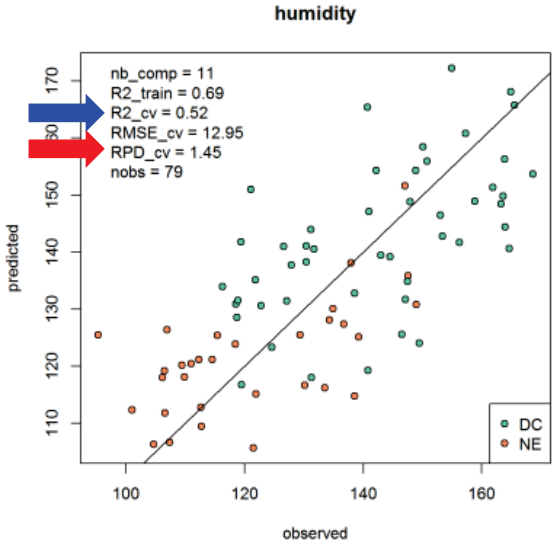
Vert : bois jeune (surface du tronc, bois de l'année)

Marron : bois plus âgé (en profondeur dans le tronc)

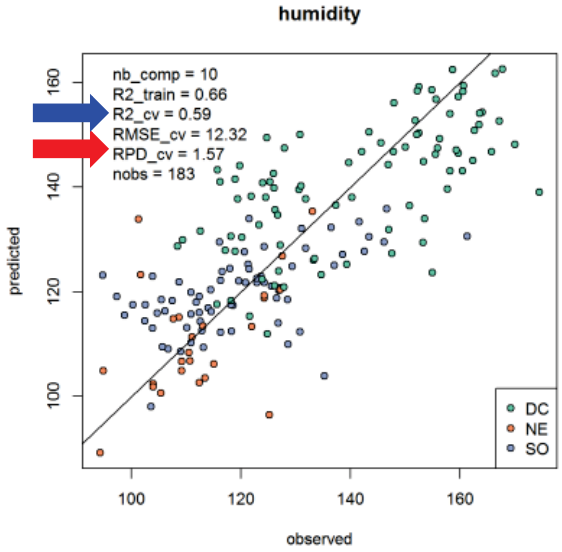
MicroNIR (surface du tronc)

Eucalyptus globulus

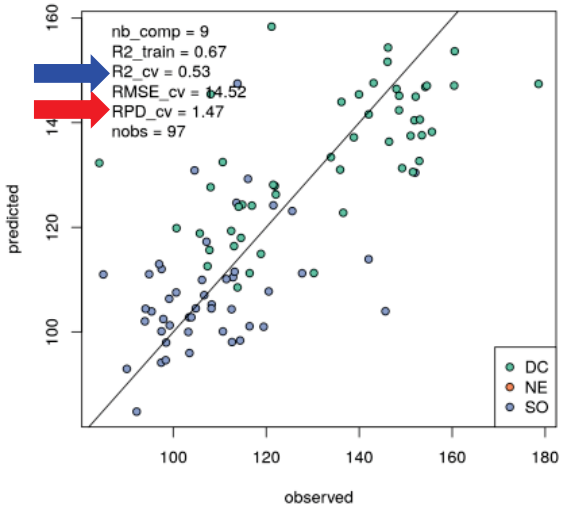
Humidité mesurée au labo sur une carotte prélevée en même temps que le spectre (clones eucalyptus, 3 sites)



nov 2016



avril 2017

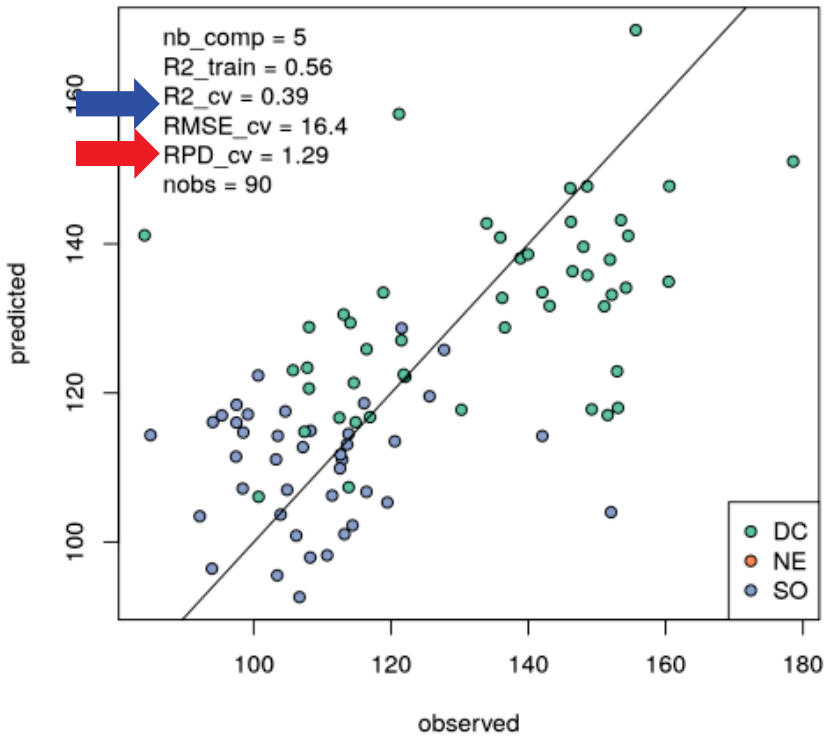


oct 2017

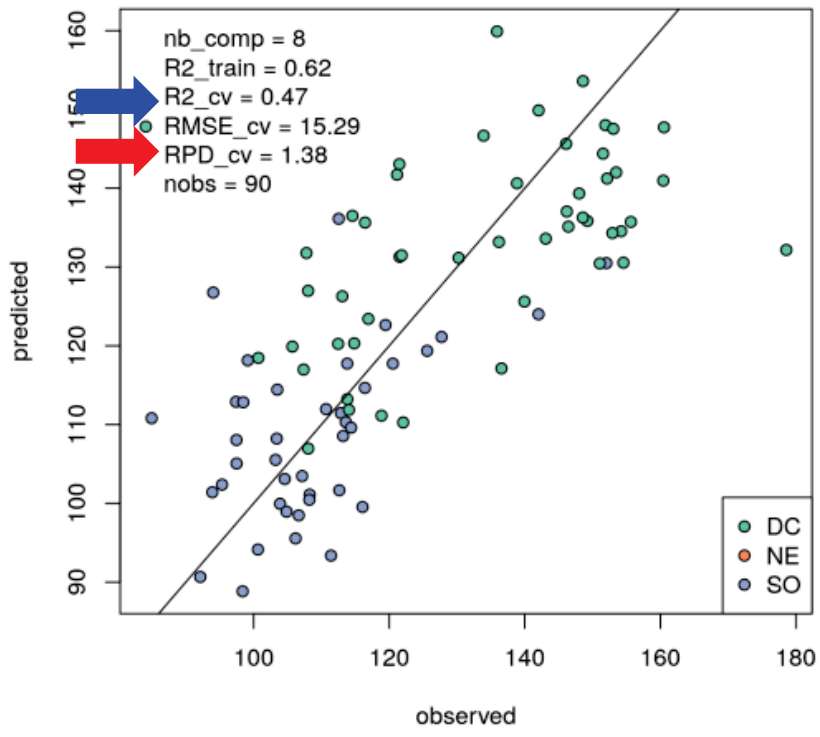
Un peu plus profond dans le bois

NIRQuest (fibre optique) :
Eucalyptus globulus

Humidité mesurée au labo sur une carotte prélevée en même temps que le spectre (clones eucalyptus, 3 sites)



en surface



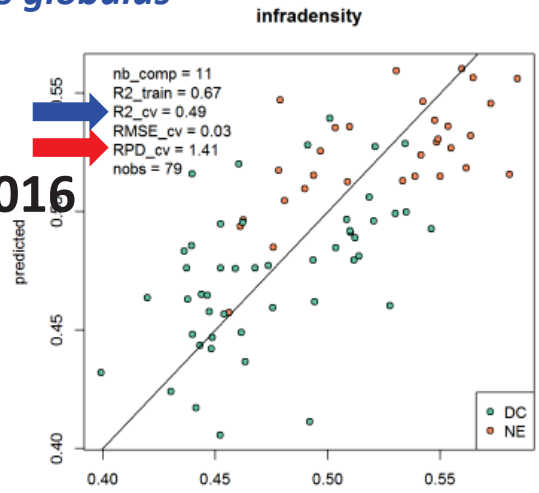
en profondeur

MicroNIR (surface du tronc)

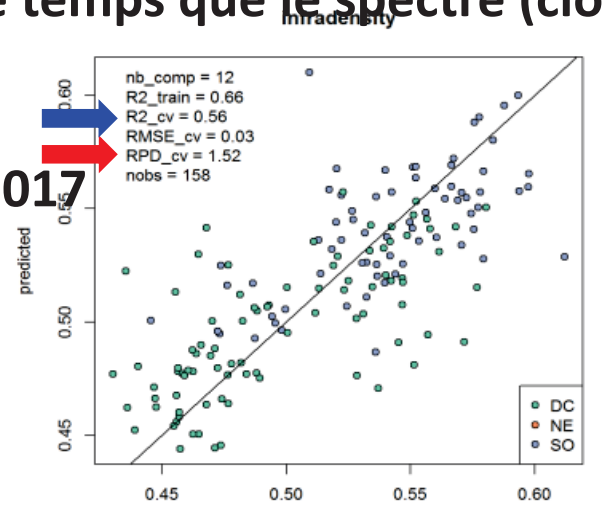
Eucalyptus globulus

Infradensité mesurée au labo sur une carotte prélevée en même temps que le spectre (clones eucalyptus, 3 sites)

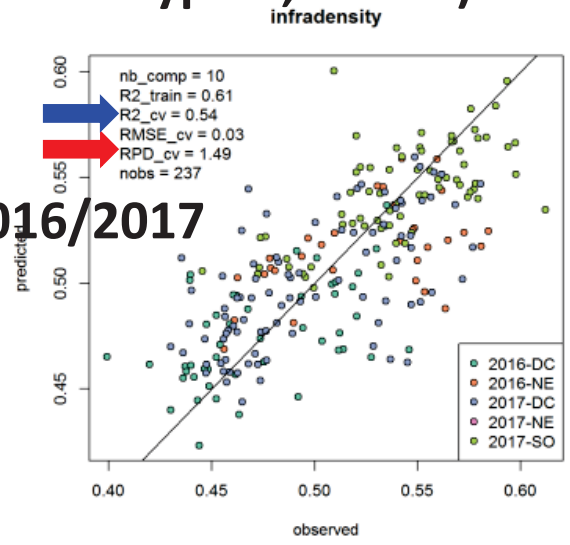
nov 2016

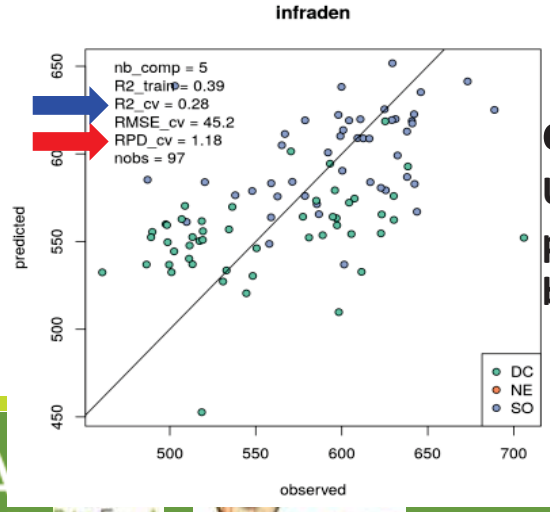


avril 2017



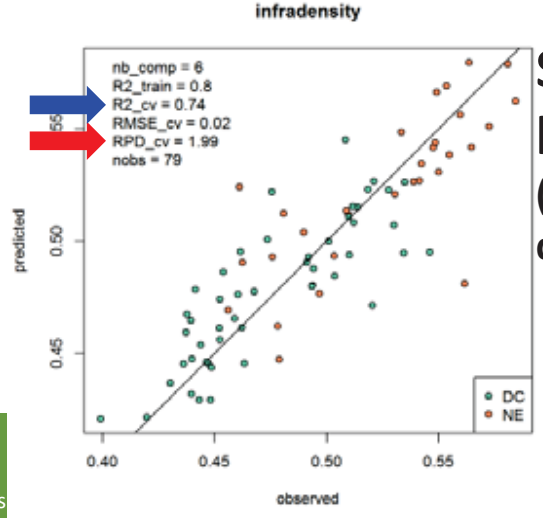
2016/2017





oct 2017

Un peu plus profond dans le bois



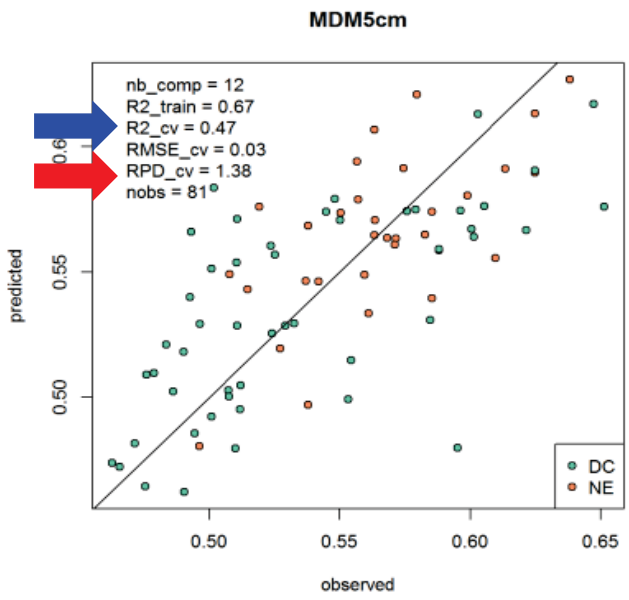
Spectres pris sur la carotte

(face transverse, sens des fibres différent)

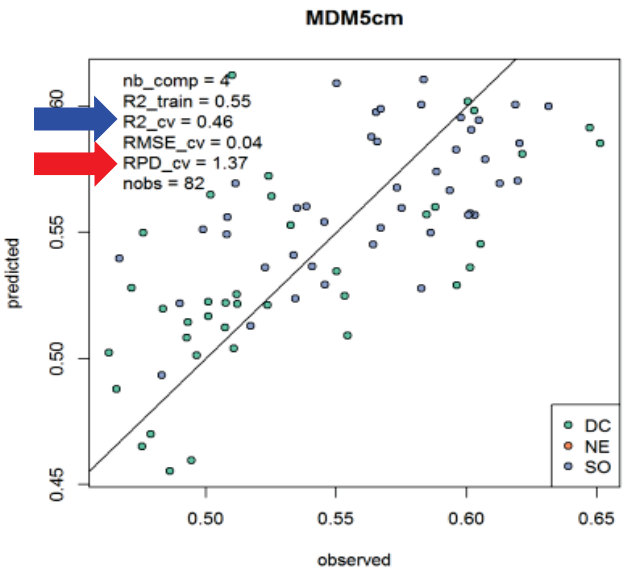
MicroNIR (surface du tronc)

Eucalyptus globulus

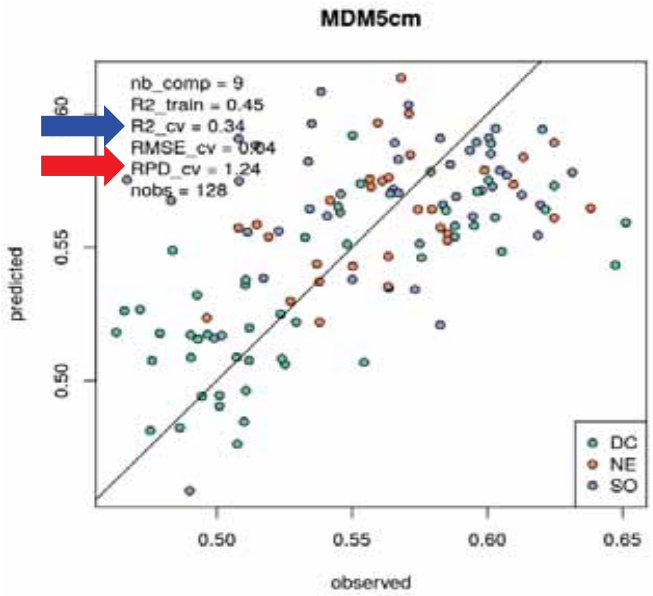
densité mesurée par microdensitométrie (RX) sur une carotte prélevée précedemment à la prise de spectre (clones eucalyptus, 3 sites)



nov 2016



avril 2017

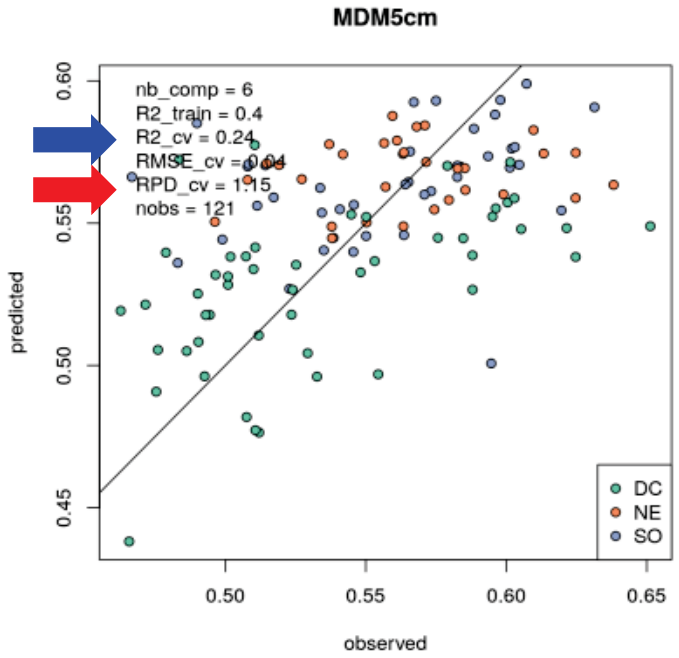


oct 2017

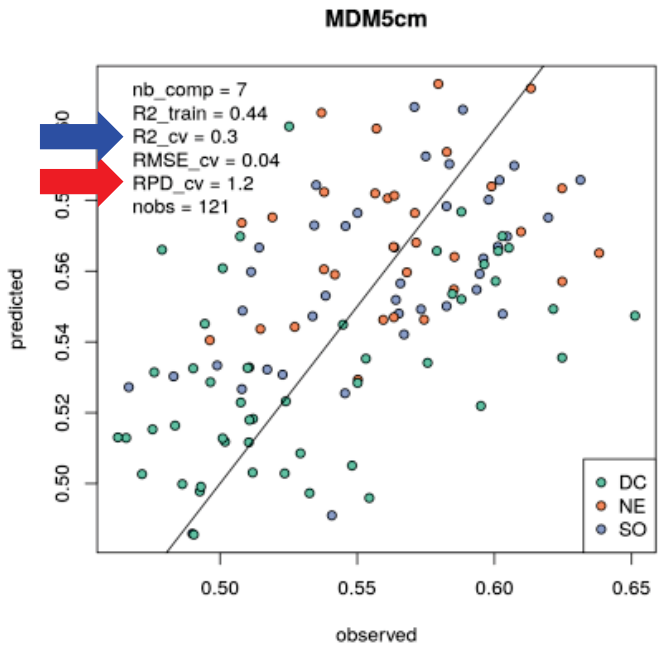
Un peu plus profond dans le bois

NIRQuest (fibre optique) :
Eucalyptus globulus

densité mesurée par microdensitométrie (RX) sur une carotte prélevée précedemment à la prise de spectre (clones eucalyptus, 3 sites)



en surface



En profondeur

Perspectives sur l'utilisation de NIRS portables dans le secteur de la foresterie / exploitation forestière

Sur les arbres sur pieds :

- sélection précoce ou avant éclaircie :

aide à la gestion et prise de décision

- paramètres de sélection possibles : qualité du bois, résistance aux maladies, résistance à la sécheresse (cavitation), …

Sur les grumes, première transformation :

- sélection et classification pour une utilisation optimisée et orientée, optimisation des ventes

- paramètres de sélection possibles : qualité du bois (propriétés chimiques, physiques et mécaniques), durabilité naturelle, discrimination d'espèces du même genre (chênes, eucalyptus), ...

- traçabilité

Merci beaucoup pour votre attention

Je réponds à vos questions…

Projets européens : *GenTree* et *Topwood*
Projets Région Centre-Val de Loire : *EmPIR, Chêne & Vin, 2EBioPop*

Remerciements à la société IDIL Fibres Optiques