



Durabilité des structures bois

Marianne PERRIN (ICA) et Florent EYMA (ICA)

A. Pourquoi construire des structures en bois?

1. Avantages des structures bois
2. Le matériau bois
3. Techniques de mise en œuvre : le bois Lamellé-collé
4. Les ouvrages d'art bois en France

B. Durabilité des structures bois

1. Pathologies
2. Conditions d'apparition
3. Comment garantir la durabilité ?

C. Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

1. Choix et développement d'une instrumentation intégrée
2. Vieillesse accélérée et tenue mécanique
3. Vieillesse en conditions naturelles

D. Conclusions et perspectives

A - Pourquoi construire des structures en bois?



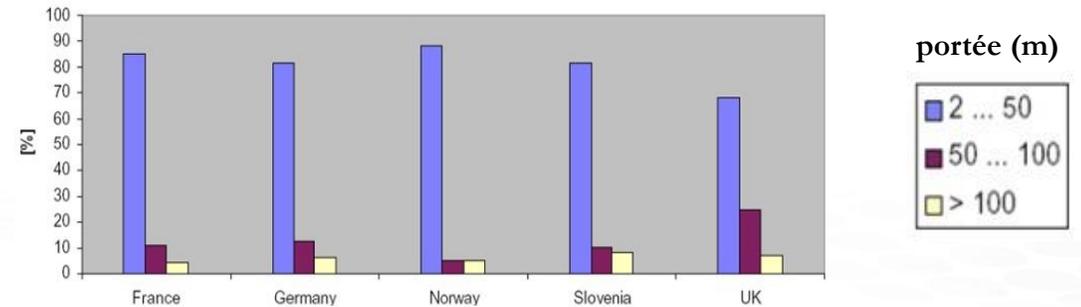
- Répondre aux exigences des politiques publiques (intégration d'une quantité minimale de bois dans les constructions) ([Loi sur l'air 1996](#))
- Répondre aux nouveaux challenges imposés par le développement durable (matériau écologique et renouvelable)



Pont de Merle en Douglas LC (portée = 57 m, largeur = 10 m) (*Le Roy 2013*)



Pont de Cognin en Douglas LC (portée = 40 m, largeur = 13 m) (*Renaudin et al. 2017*)



Répartition des types d'ouvrages en Europe (*Le Roy 2013*)

1. Avantages des structures bois

Rapides à mettre en œuvre:



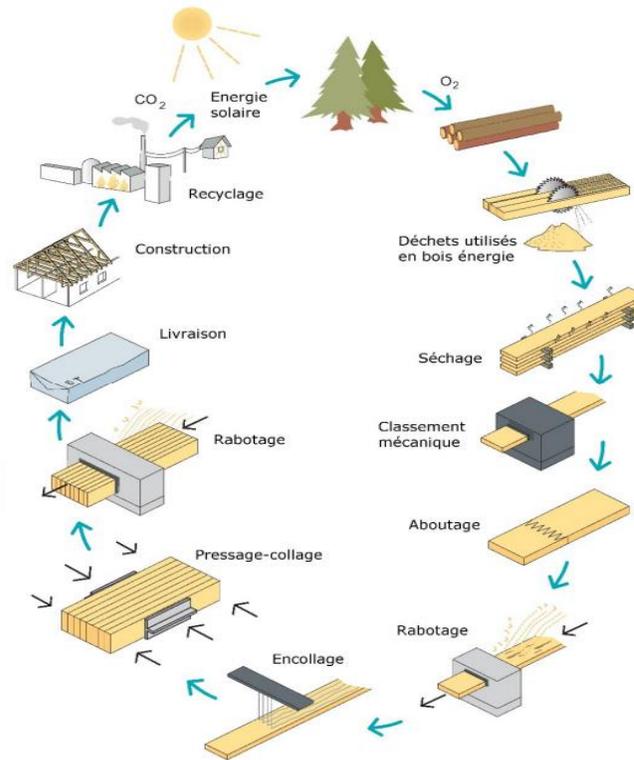
Pont de Cognin (73) en bois LC (Portée 40 m) (BDA 2015)

Associés à d'autres matériaux:

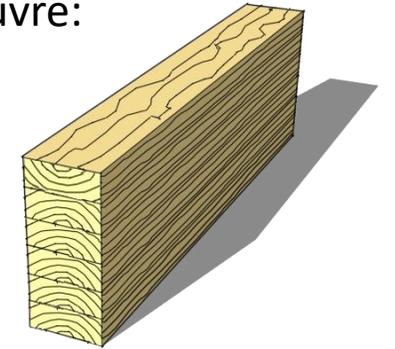


Tablier d'un pont bois/béton/composite (Ben Mekki 2007)

Bénéficiant de l'évolution des techniques de mise en œuvre:



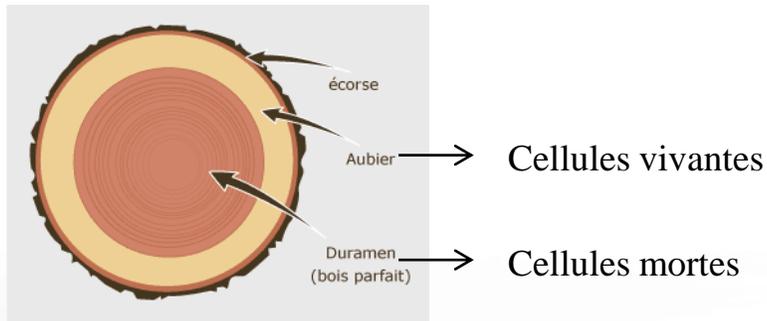
Cycle de vie du bois LC (*Glulam Handbook 2018*)



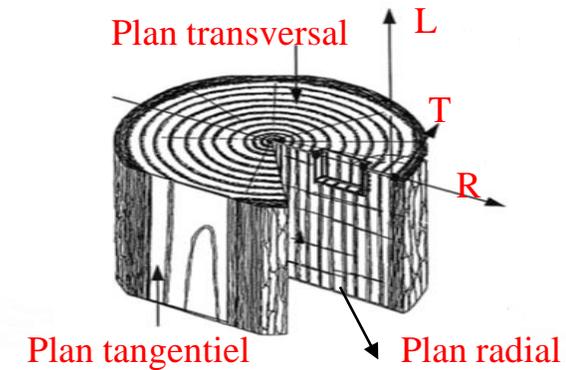
Bois Lamellé-Collé (LC)

2. Le matériau bois

- Matériau composite naturel multi-couches :
 - Assure un rôle de conduction de la sève et de soutien mécanique de la plante



[Sétra 2006]

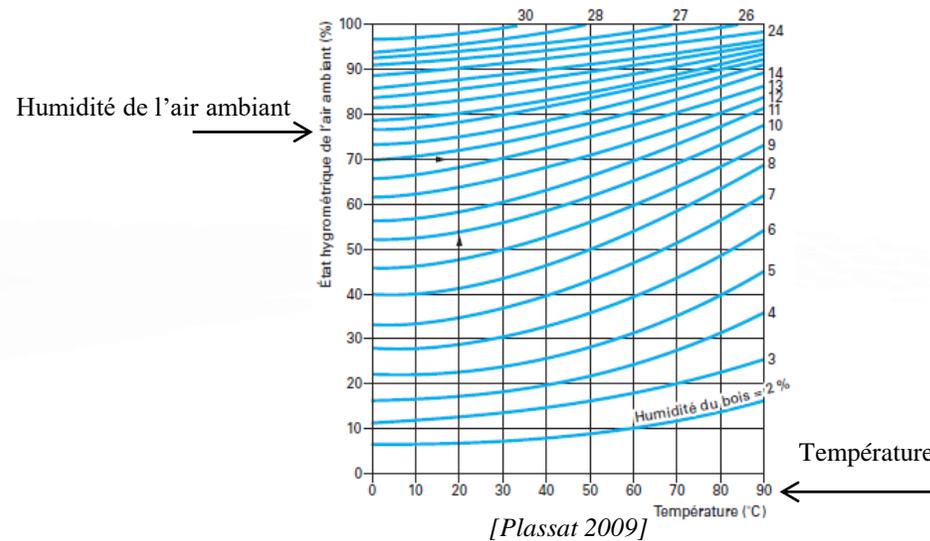


[Trouy et Triboulot 2012]

- Matériau anisotrope et hétérogène
 - Repères et plans d'orthotropie : 3 directions privilégiées (L : longitudinale, R : radiale et T : transversale)

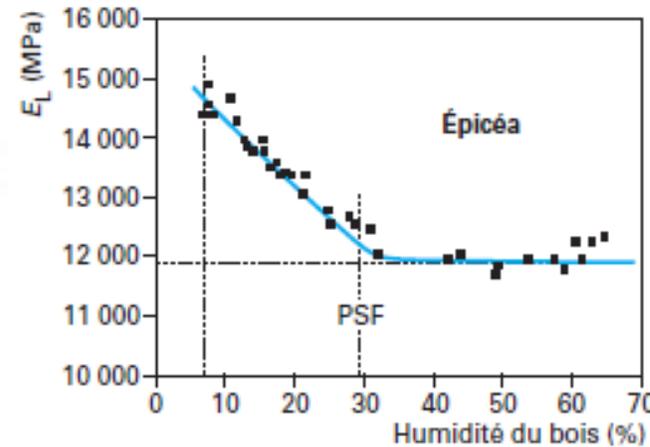
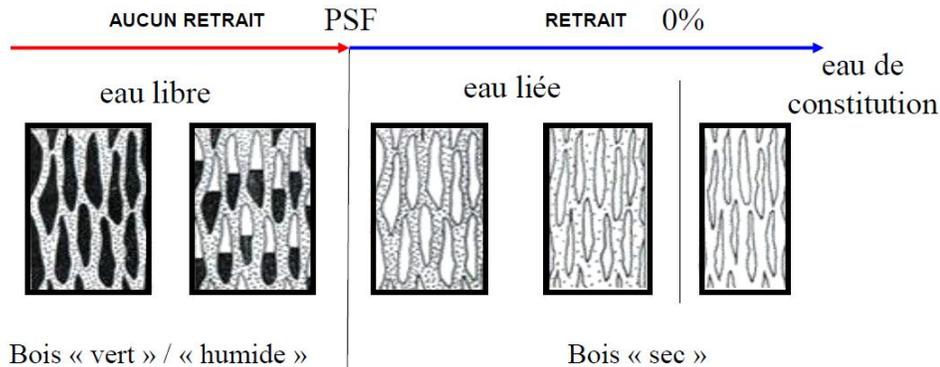
2. Le matériau bois

- Matériau hygroscopique
 - Il se stabilise en fonction de la température et surtout de l'humidité de l'air ambiant



2. Le matériau bois

- Matériau hygroscopique
 - Il se stabilise en fonction de la température et surtout de l'humidité de l'air ambiant
 - L'humidité influence presque toutes ses propriétés mécaniques



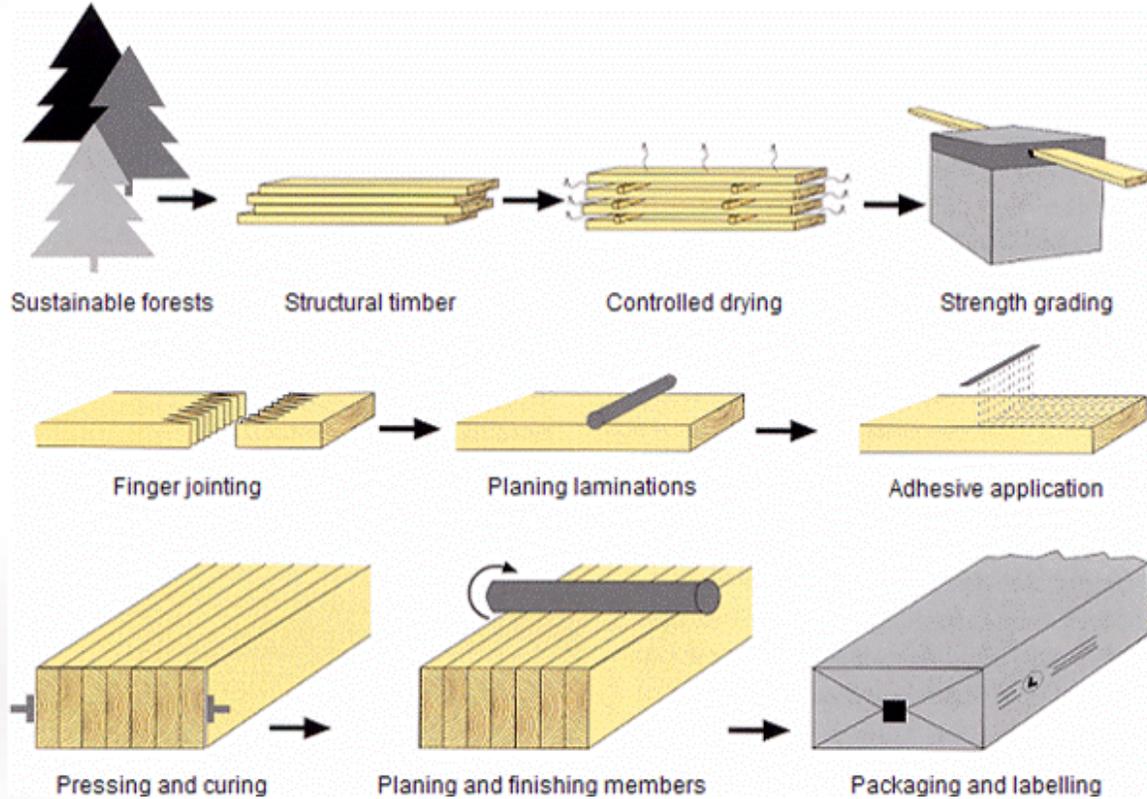
Influence du taux d'humidité sur le module d'élasticité longitudinale (épicéa)

[Trouy et Triboulot 2012]

PSF (Point de Saturation des Fibres) :

- L'eau libre : circule dans les vides cellulaires
- L'eau liée : présente dans les parois cellulaires
- Lorsque le bois ne contient plus que de l'eau liée, on dit que le bois atteint le PSF, qui correspond à environ 30% d'humidité

3. Techniques de mise en œuvre : le Lamellé-Collé

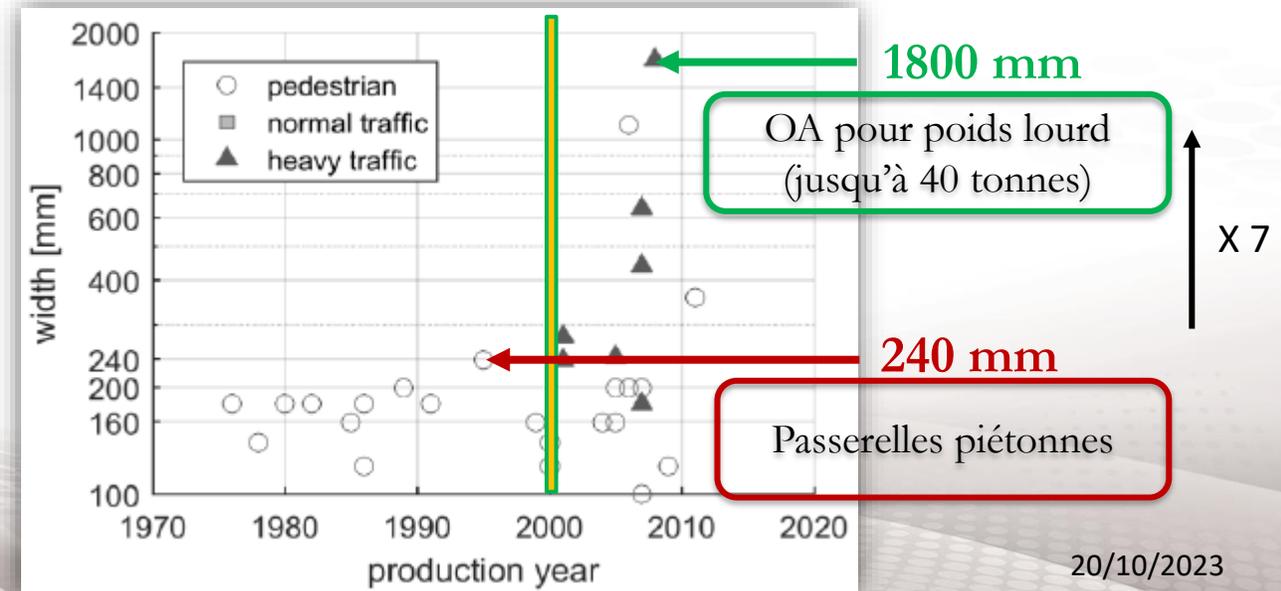


Manufacturing process of Glulam (*Handbook 1 – Timber structures 2008*)

Résistance mécanique plus élevée que le bois massif
(purge des singularités)

Permet de construire des OA de grandes longueurs
(jusqu'à 200 m)

Evolution de la largeur des sections des poutres en bois au cours des années (*Franke et al. 2018*)



4. Les ouvrages d'art bois en France : quelques exemples



Pont routier sur la Drôme (Pont de Crest, 92m, structure complète en douglas purgé d'aubier)



Pont routier sur la Dore à St Gervais sous Meymont (33m, structure complète en pin sylvestre et platelage en chêne)



Pont de l'aire de Chavanon (53m, structure en LC de douglas)



Pont d'Avoudrey (44m, structure en pin sylvestre et mélèze)

A. Pourquoi construire des structures en bois?

1. Avantages des structures bois
2. Le matériau bois
3. Techniques de mise en œuvre : le bois Lamellé-collé
4. Les ouvrages d'art bois en France

B. Durabilité des structures bois

1. Pathologies
2. Conditions d'apparition
3. Comment garantir la durabilité ?

C. Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

1. Choix et développement d'une instrumentation intégrée
2. Vieillesse accélérée et tenue mécanique
3. Vieillesse en conditions naturelles

D. Conclusions et perspectives

1. Pathologies :



- Affaiblissement des propriétés mécaniques
 - Risques de ruptures

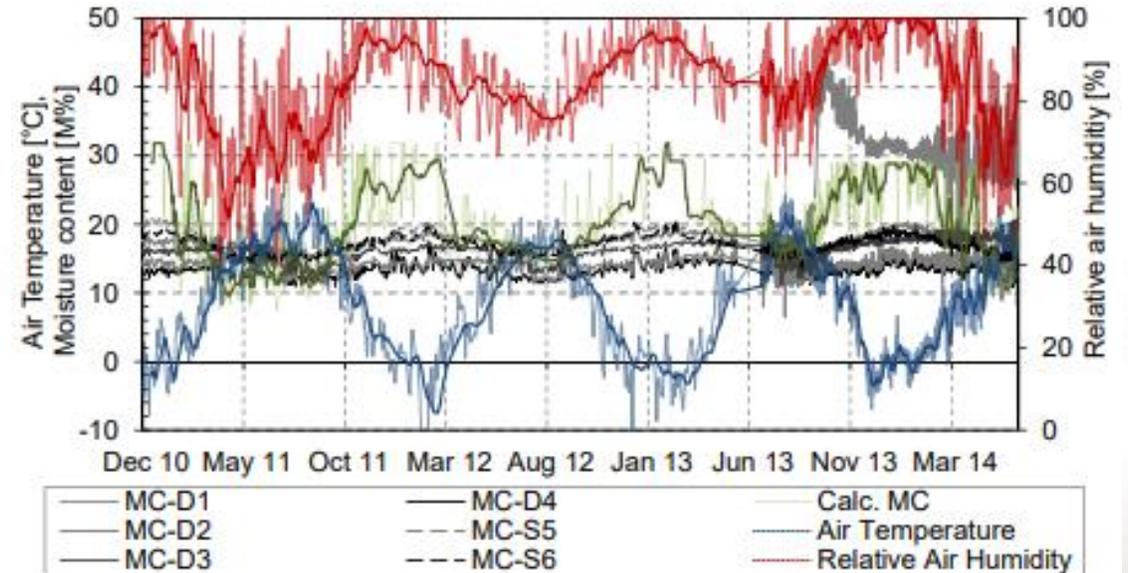
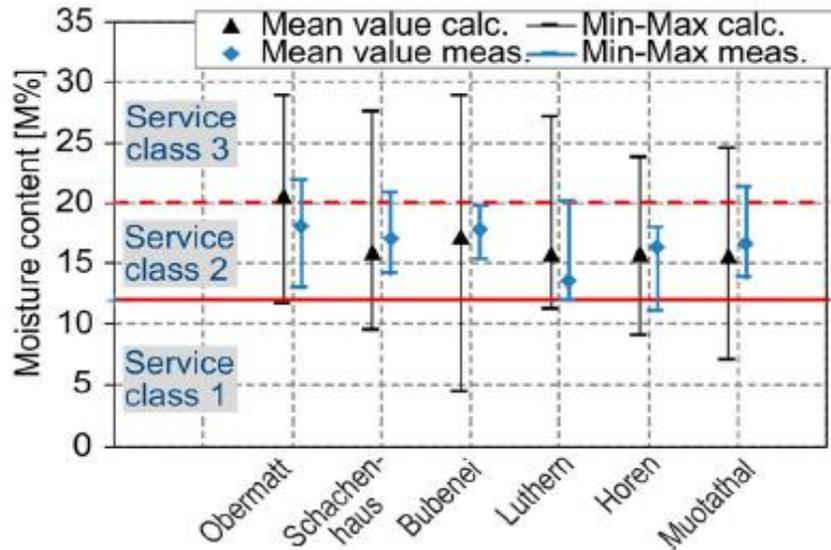
Pont de Tretten, Norvège (15 aout 2022)



2. Conditions d'apparition de ces pathologies

Origine de ces pathologies :

- Humidité excessive ($> 20\%$)
- Cycles climatiques d'humidification/séchage



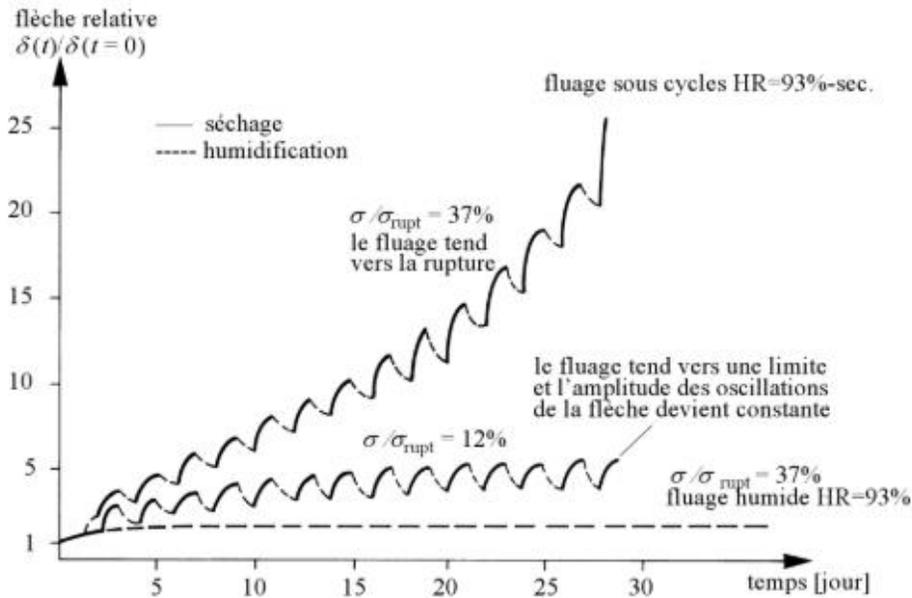
Humidités absolues minimales, maximales et moyennes dans les six ponts en bois en Suisse (Franke et al. 2018)

Suivi du pont d'Obermatt en Suisse (Franke et al. 2017)

2. Conditions d'apparition de ces pathologies

Origine de ces pathologies :

- Humidité excessive ($> 20\%$)
- Cycles climatiques d'humidification/séchage
- Couplé au chargement mécanique



Fluage en flexion sous conditions hygrothermiques cycliques, d'après Hearmon et Paton 1964 (cité par Navi et Heger 2005)

3. Comment garantir la durabilité?

- Conception adaptée => éviter la rétention d'humidité, protéger les éléments en bois
- Utiliser du bois de structure adapté à la classe de service

Classe de service	1	2	3
Emplacement	Local chauffé	Sous abri	Extérieur
Humidité du bois	$H_{\text{bois}} < 12\%$	$12\% < H_{\text{bois}} < 20\%$	$H_{\text{bois}} > 20\%$

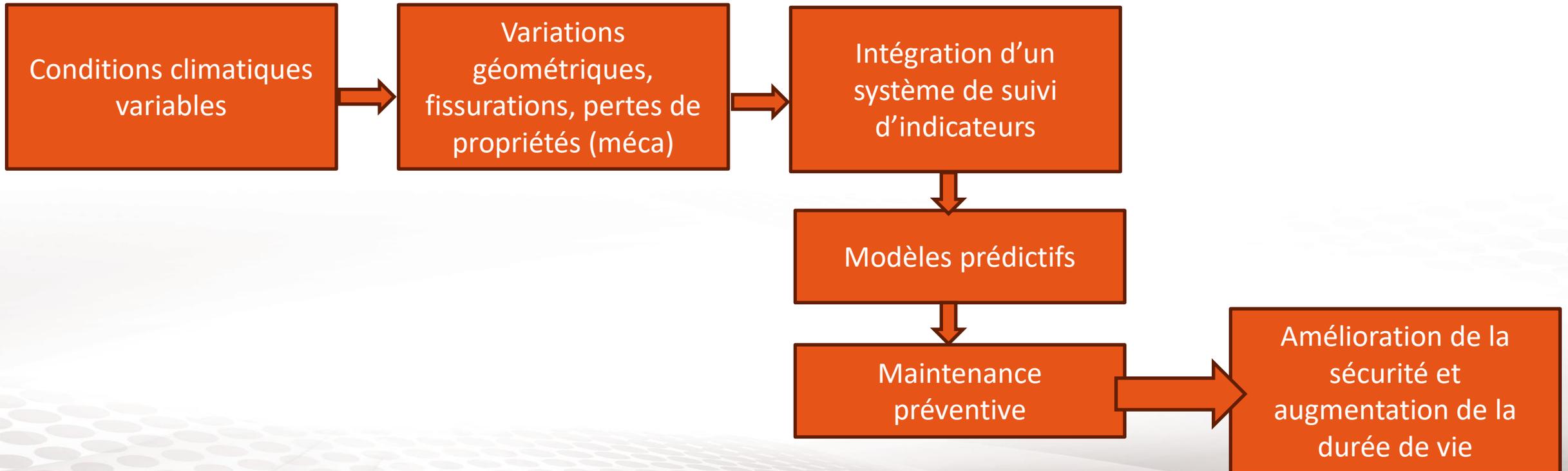
Classes de service du bois de structure selon l'Eurocode NF EN 1995-1-1 (AFNOR 1995)

3. Comment garantir la durabilité?

- Développer des outils de suivi et de diagnostic :
 - Méthodes de contrôle actuelles : contrôle visuel
 - Durée de vie d'un ouvrage bois 10-20 ans (ouvrage en béton 100 ans !!!)
 - On change l'ouvrage quand il est trop tard pour envisager d'autres solutions
 - Solution ?
 - Transformer les structures LC en matériau « intelligent » par intégration des systèmes de suivi d'indicateurs de durabilité

3. Comment garantir la durabilité?

- Développer des outils de suivi et de diagnostic = transformer le matériau bois en matériau « intelligent »



A. Pourquoi construire des structures en bois?

1. Avantages des structures bois
2. Le matériau bois
3. Techniques de mise en œuvre : le bois Lamellé-collé
4. Les ouvrages d'art bois en France

B. Durabilité des structures bois

1. Pathologies
2. Conditions d'apparition
3. Comment garantir la durabilité ?

C. Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

1. Choix et développement d'une instrumentation intégrée
2. Vieillesse accélérée et tenue mécanique
3. Vieillesse en conditions naturelles

D. Conclusions et perspectives

C- Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

- 10 ans de développement avec l'aide de nos partenaires:
 - Région Occitanie,
 - l'IUT de Tarbes,
 - la Communauté d'Agglomération Tarbes-Lourdes-Pyrénées,
 - Pyrénées Charpentes,
 - Charles&Mouysset,
 - Le département GElI de l'IUT de Tarbes (Emmanuel Laügt)
- 3 grandes étapes :
 - 1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée
 - 2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique
 - 3- Etude du vieillissement en conditions naturelles

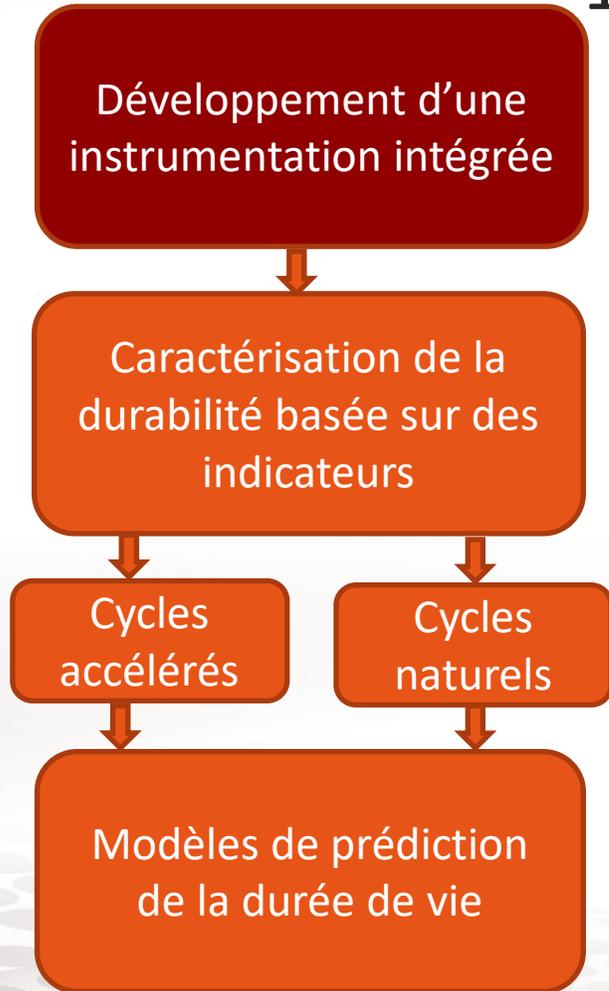
C- Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

Thèse de doctorat de Hang LI: 01 octobre 2014 – 30 septembre 2017

Encadrement : M.Perrin, F.Eyma, X.Jacob, V.Gibiat

Cofinancement : 70% région Midi-Pyrénées - 30% CG Hautes Pyrénées - le Grand Tarbes



Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

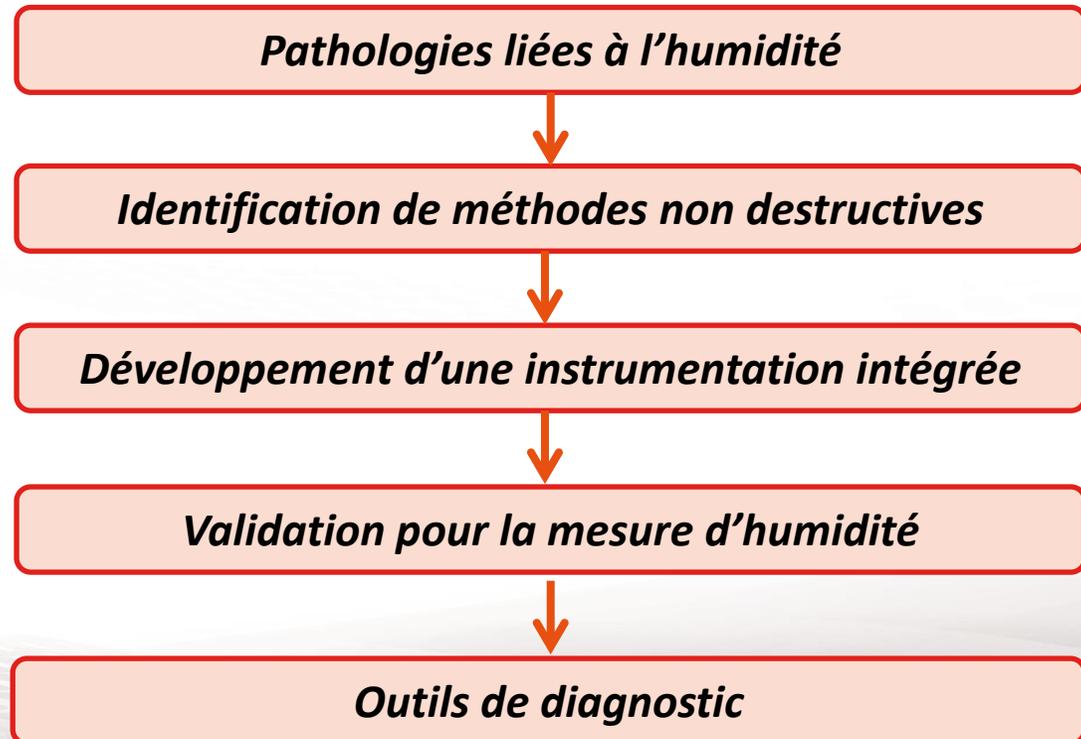


1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

Objectif :

- Identifier la ou les méthodes non destructives permettant de mesurer l'humidité et pouvant être intégrées dans le LC

Démarche scientifique



1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

- Identification de méthodes non destructives :
 - Cahier des charges : choix des capteurs
 - Supporter le processus de fabrication : pression de collage de 10 bars
 - S'intégrer dans l'épaisseur du joint de colle soit 0,3 mm
 - Ne pas affecter la résistance du joint après l'intégration
 - Avoir un coût modéré
 - Technologies permettant la mesure d'humidité :
 - Radar, micro-ondes, thermographie infrarouge, radiographie, résonance magnétique nucléaire, méthodes électriques, méthodes ultrasonores

1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée ¹²

- Identification de méthodes non destructives :
 - Méthodes investiguées :

Méthodes électriques

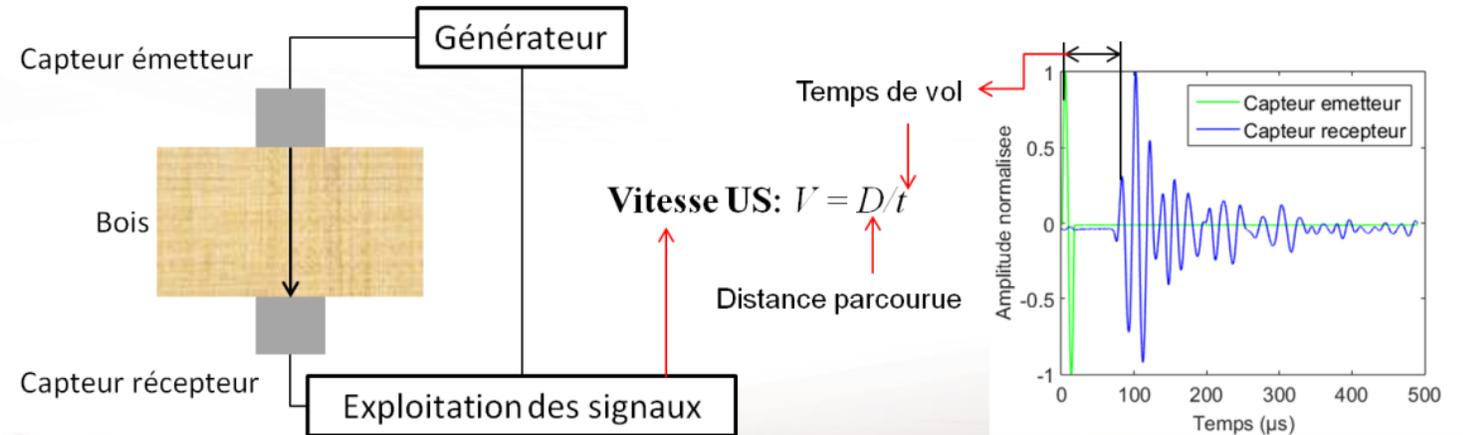
Méthodes ultrasonores



Humidimètre résistif

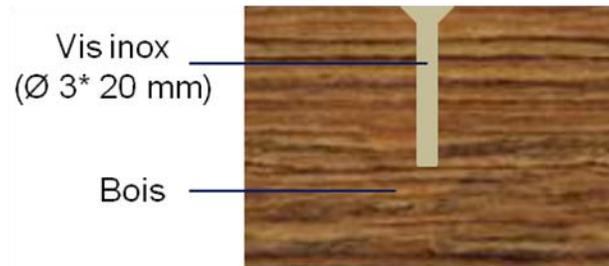


Humidimètre capacitif

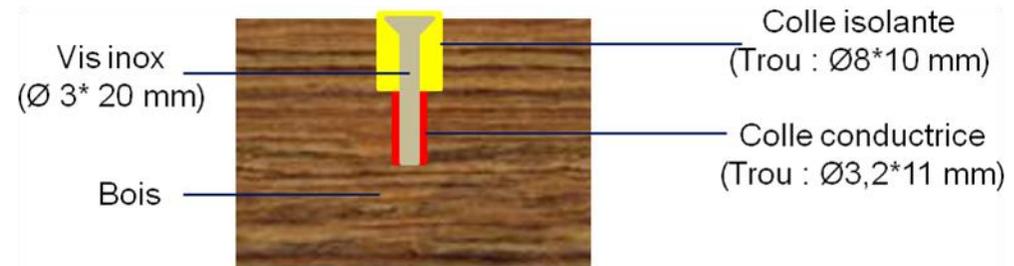


1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

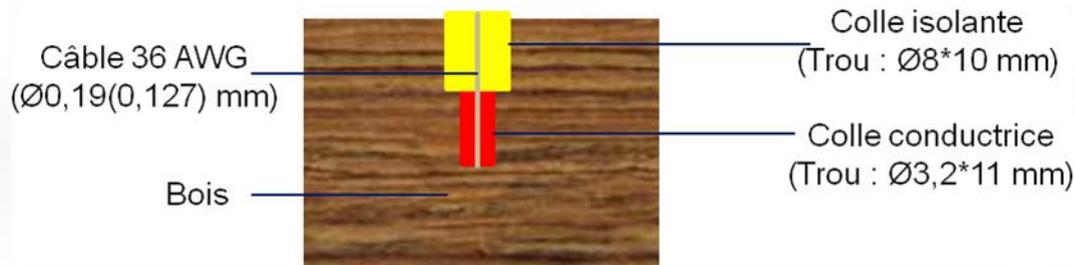
- Mesures électriques



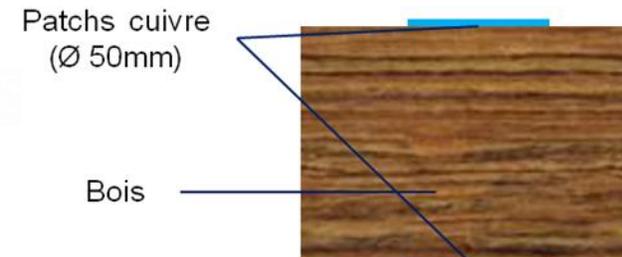
Configuration 1 :
Vis inox fileté vissée dans le bois



Configuration 2 :
Vis inox fileté placée dans le trou percé



Configuration 3 :
Câble électrique (dénudé au bout) plié dans le trou percé

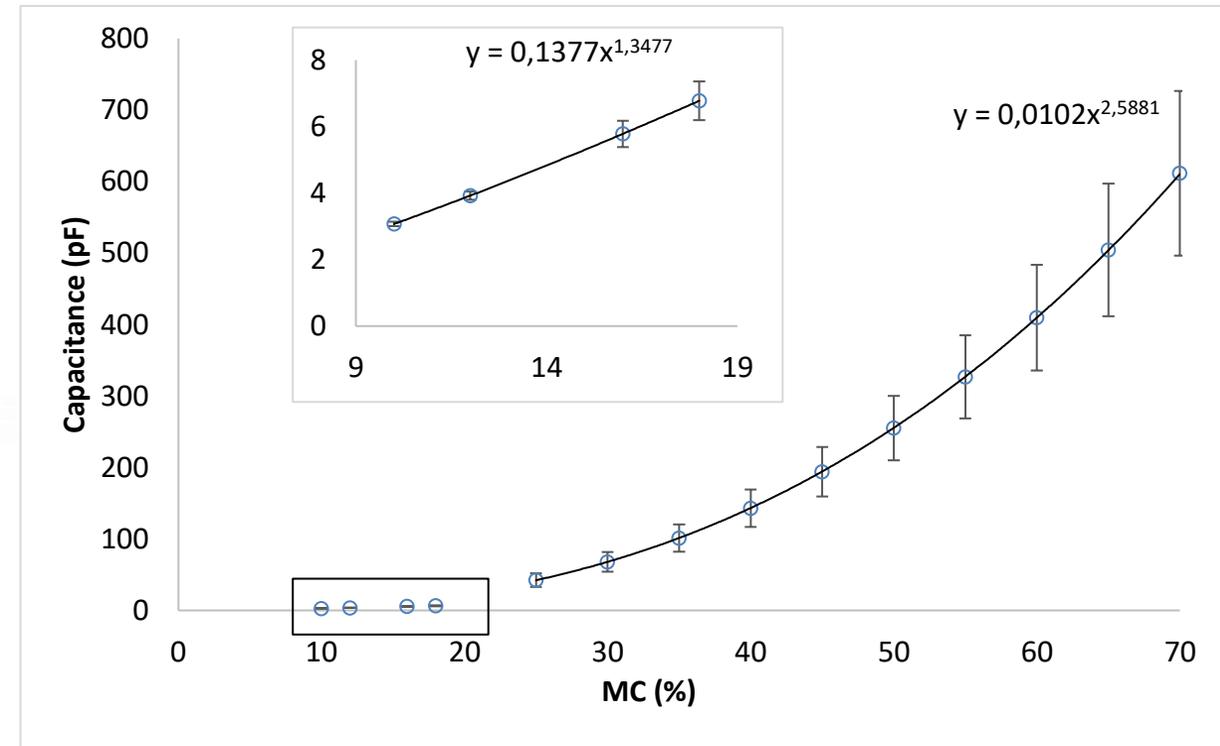
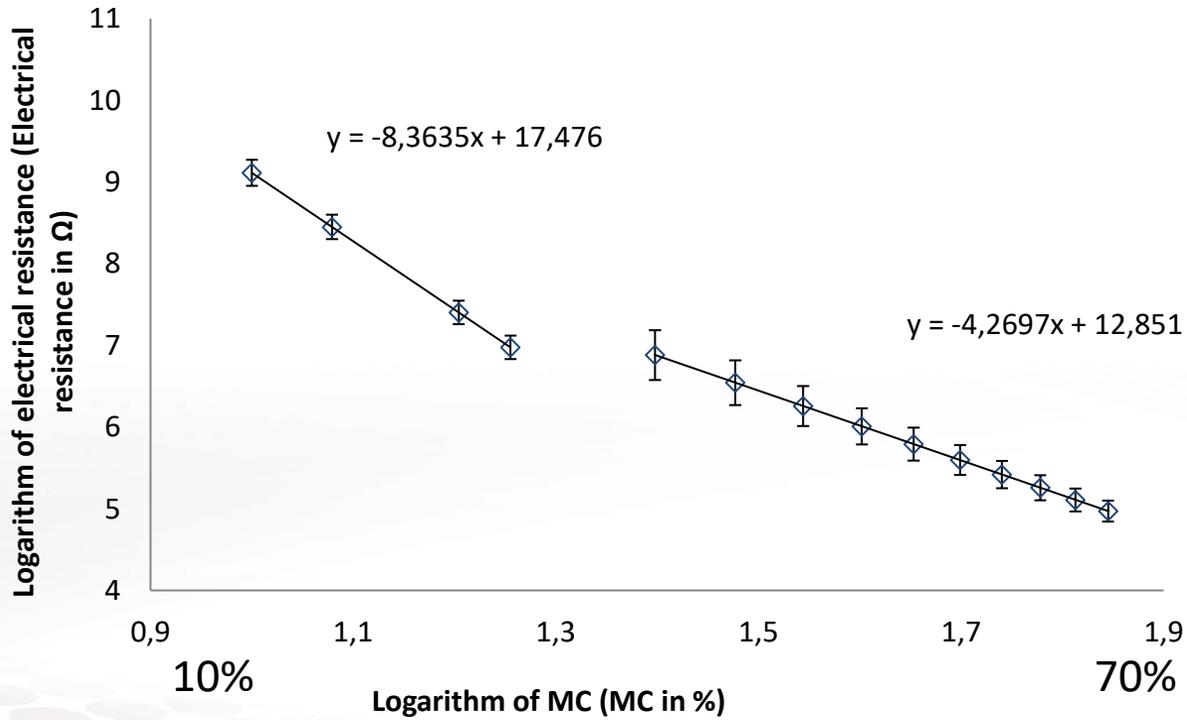


Configuration 4 :
Patches cuivre collés de chaque côté d'une lamelle

Mesures électriques : 2 types de capteurs, 4 configurations identifiées

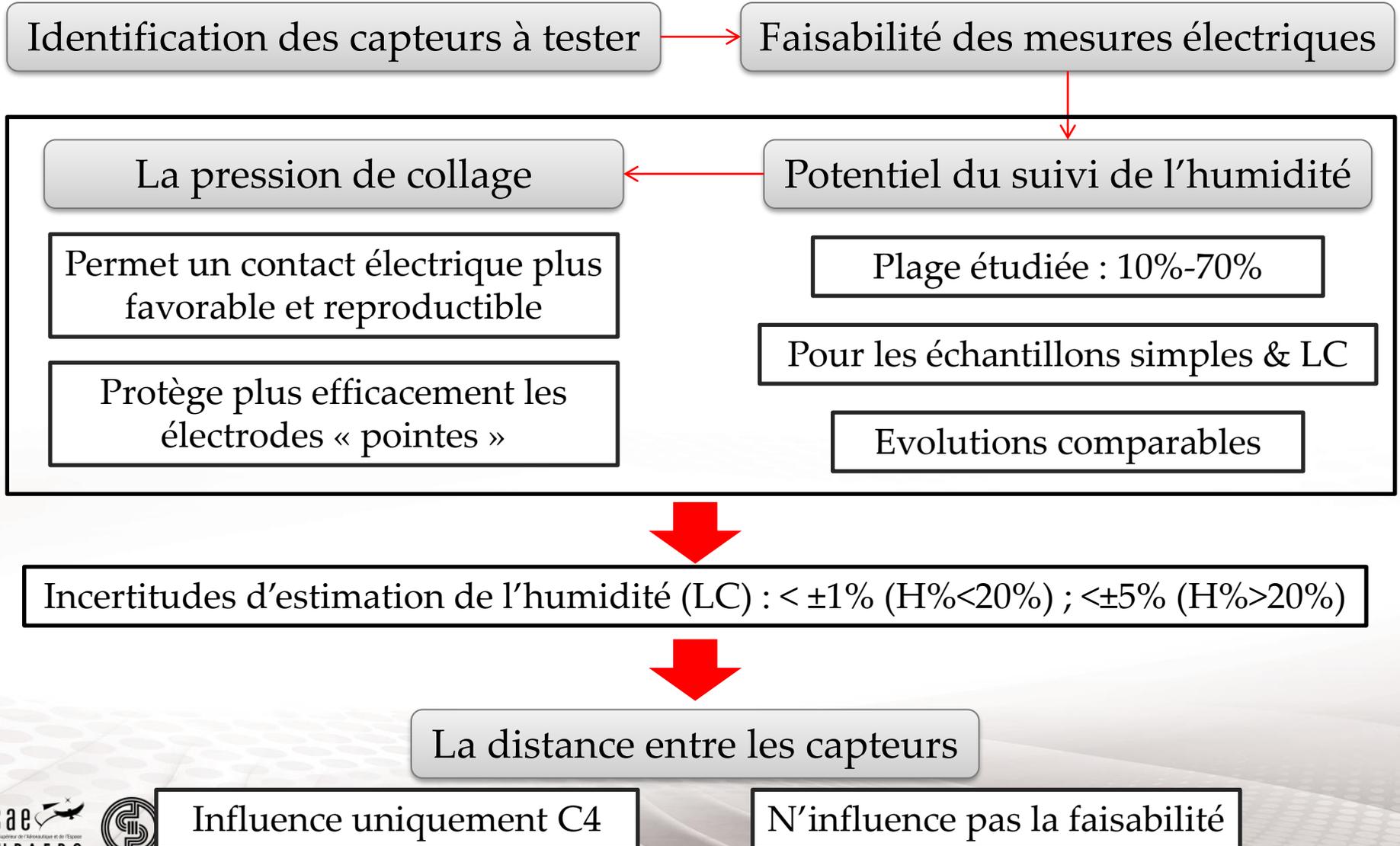
1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

- Mesures électriques : principaux résultats



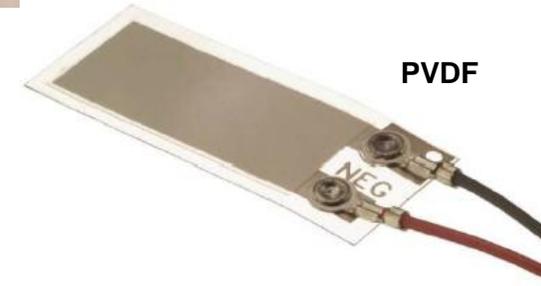
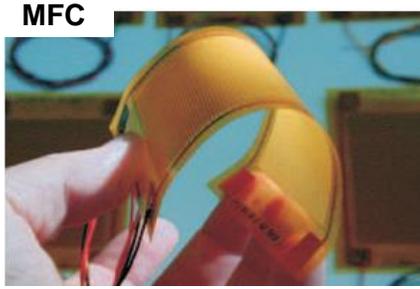
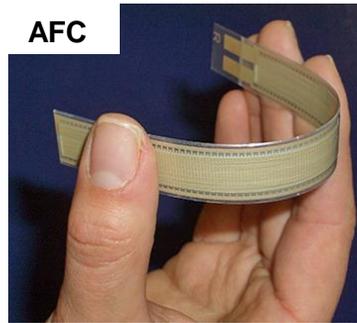
[LI 2018]

1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

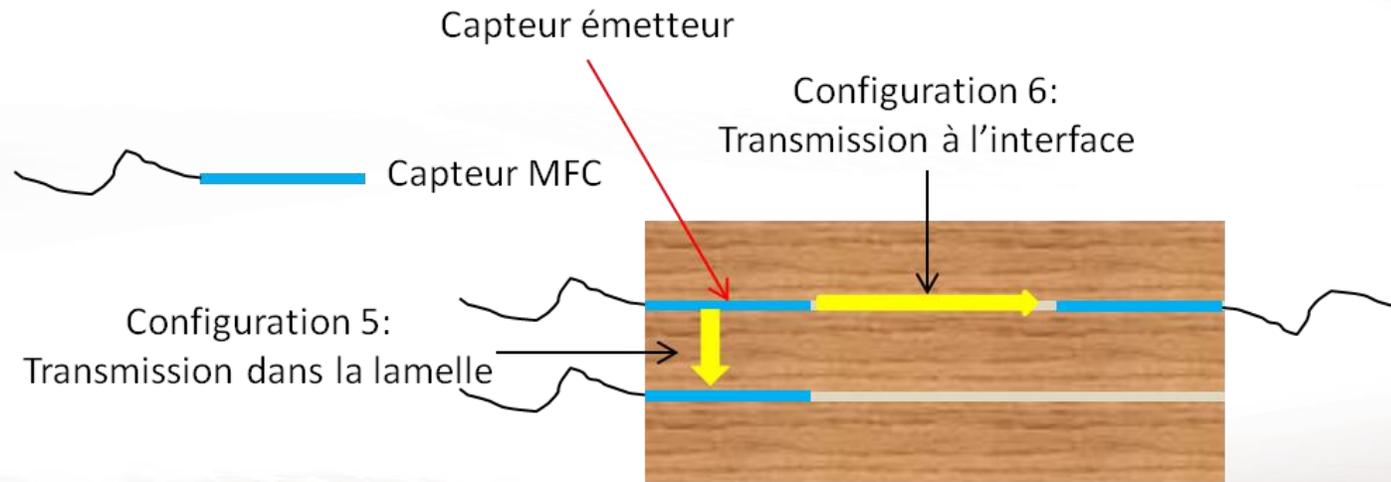


1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

- Mesures ultrasonores



AFC : Active Fiber Composite
MFC : Macro-Fiber Composite
PVDF : Polyvinylidene Fluoride



Mesures ultrasonores : 3 types de capteurs, 2 configurations identifiées

1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée¹⁷

Sélection du capteur => MFC M4010
Fréquence optimale => 60 kHz
Longueur optimisée de l'échantillon = 300 mm

Influence de la variation de pression/ du passage sous presse

Modifie l'amplitude des signaux, mais n'influence pas la mesure de vitesse

Potentiel du suivi de l'humidité

Plage d'humidité : 10%-70%

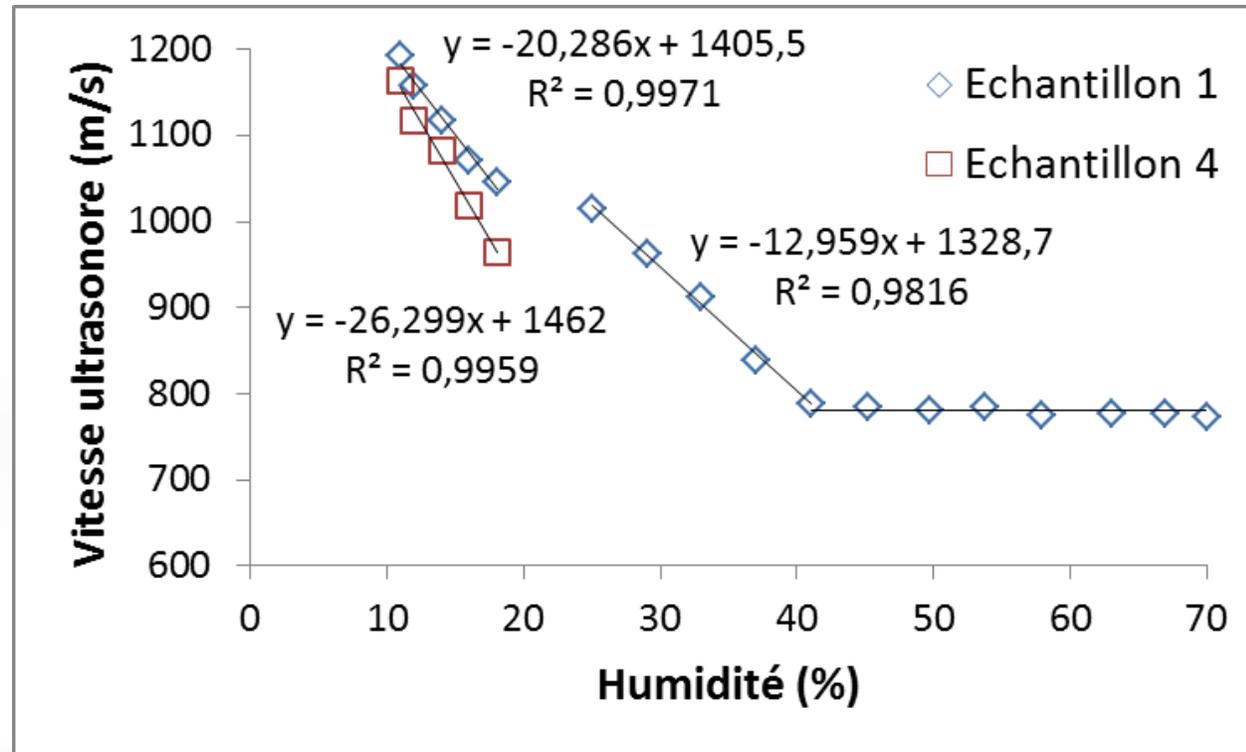
Délamination à cause de la présence des capteurs

Futurs essais

Définir une utilisation optimale des capteurs pour une intégration dans le bois LC

1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

- Mesures ultrasonores : principal résultat



1- Choix et développement d'une instrumentation intégrée

- Bilan :
 - La faisabilité de l'intégration des deux technologies a été démontrée
 - Les mesures électriques se sont montrées les plus robustes sur la plage d'humidité 10%-70%
 - Compte-tenu de sa polyvalence (mesures résistives et capacitives), le capteur patch a été retenu pour la suite du développement

C- Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

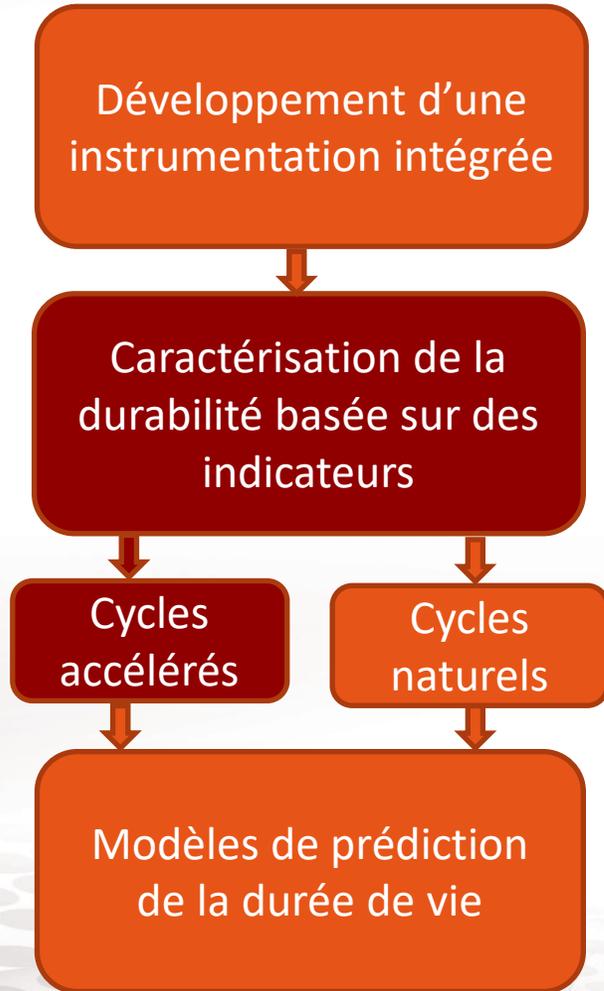
2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Thèse de doctorat de Placide UWIZEYIMANA : 01 novembre 2017 – 19 mars 2021

Encadrement : M.Perrin, F.Eyma

Cofinancement : région Occitanie – IUT de Tarbes – Communauté d'agglomération Tarbes-Lourdes-Pyrénées

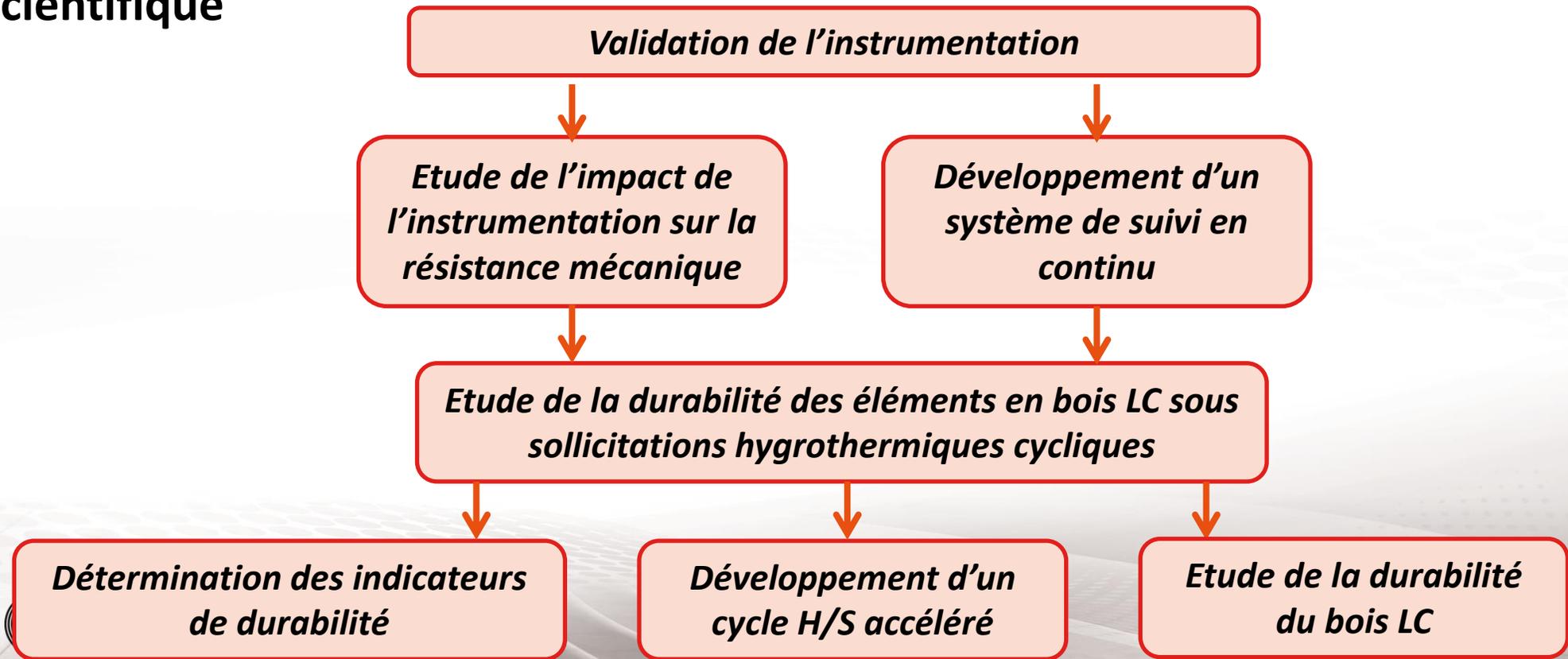
Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs



2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

- Objectifs :**
- Proposer une méthodologie de suivi en continu des indicateurs de durabilité des éléments en bois LC
 - Identifier le lien entre durabilité des éléments en bois LC et les cycles H/S

Démarche scientifique

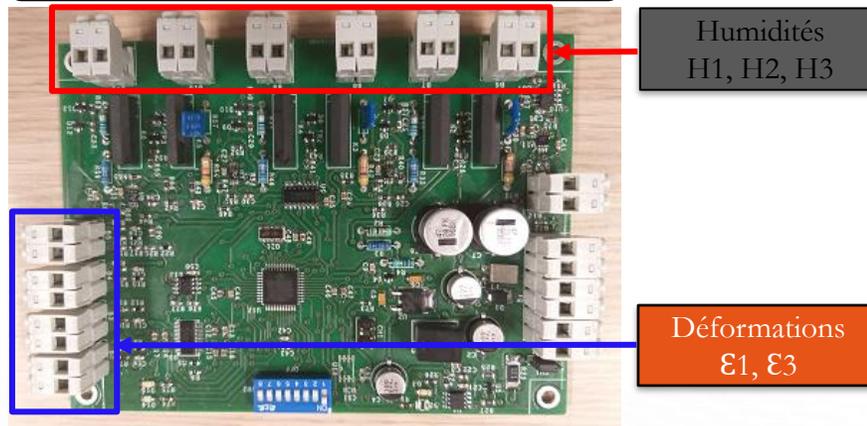


2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Développement d'un système de suivi en continu

Système de mesure (*durée de développement et mise au point = 11 mois*) **en collaboration avec le département GEII (IUT de Tarbes)**

1 Carte de mesures



2 Carte émettrice



Logiciel d'acquisition des données



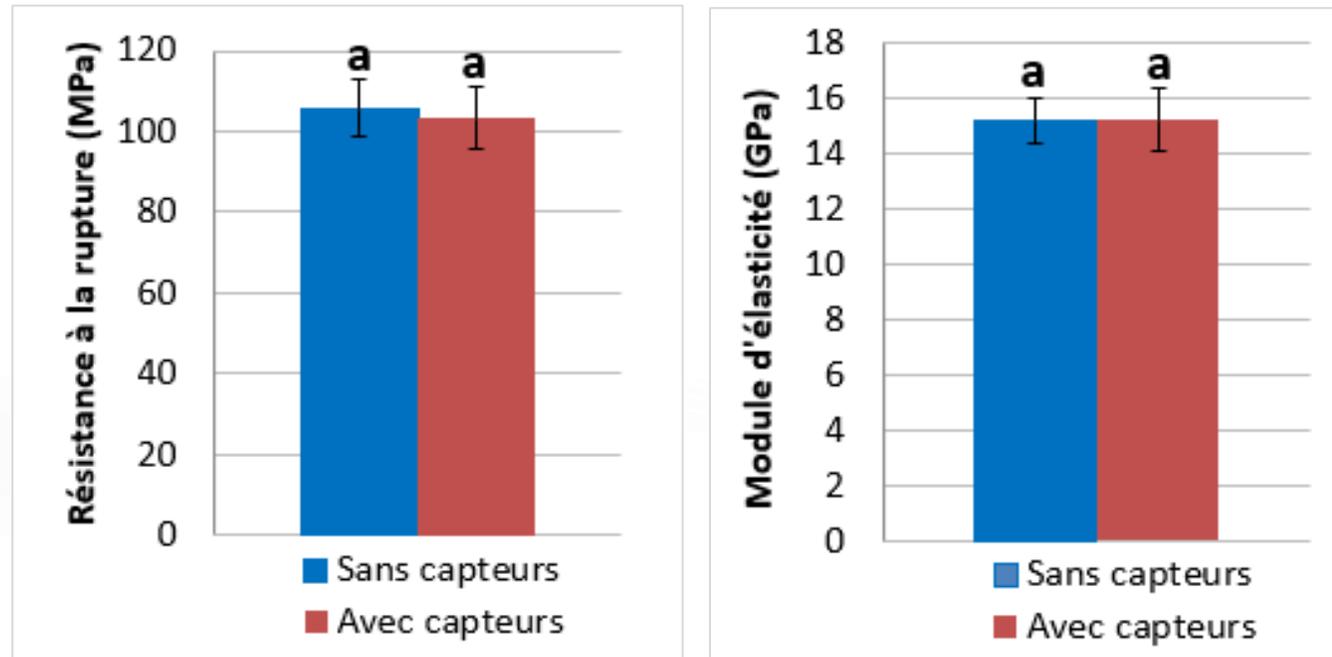
3 Carte réceptrice



2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Impact de l'instrumentation sur la résistance mécanique :

Influence des capteurs intégrés



Les capteurs d'humidités n'ont pas d'impact sur les propriétés mécaniques en flexion

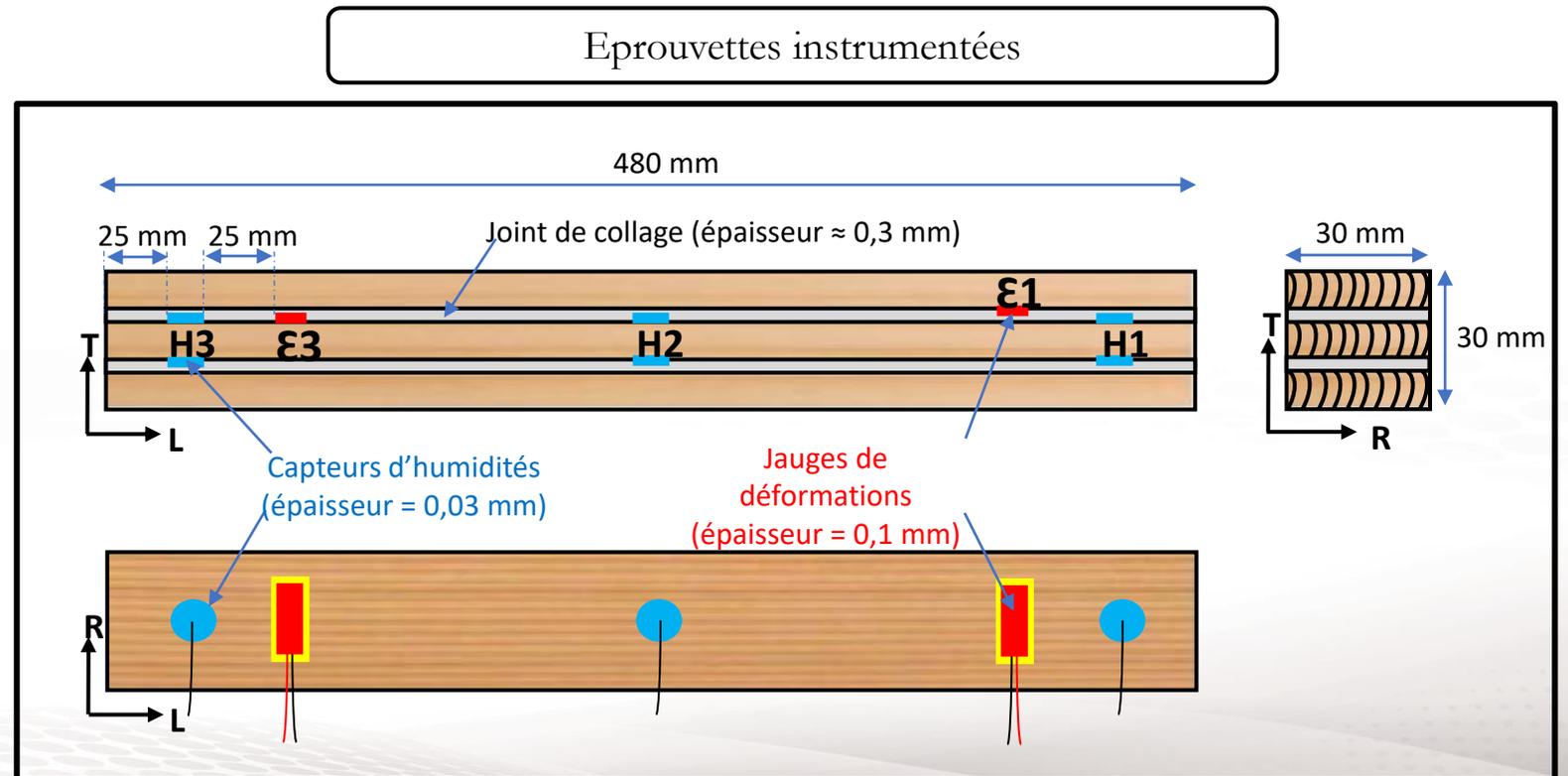
(les 3 capteurs occupent 1,64% de la section de collage)

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

Indicateurs de durabilités :

- Humidité
- déformation



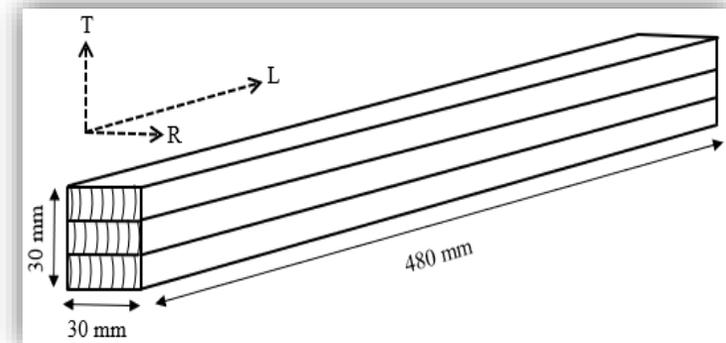
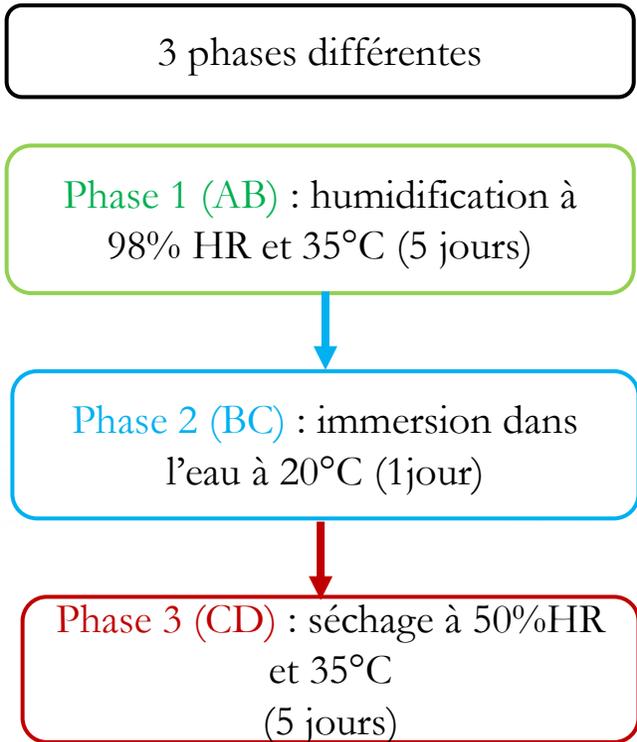
2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

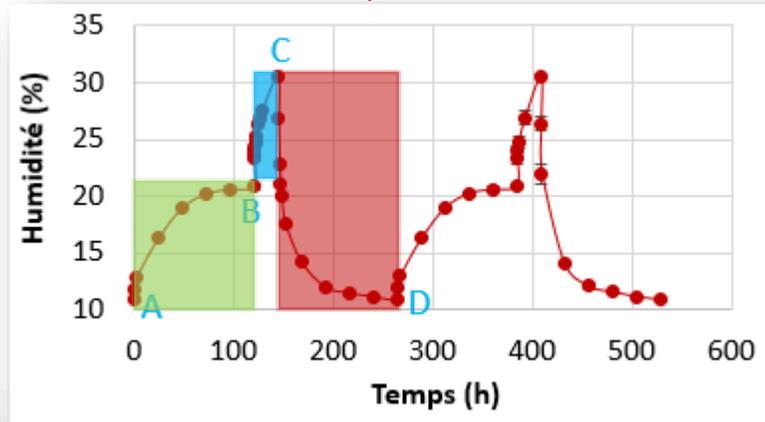
Développement d'un cycle H/S accéléré :

- prise en compte des taux d'humidité atteints au cœur d'un ouvrage bois extérieur (12%-30%)

- intégration des aspects eau libre/eau liée



Deux cycles H/S

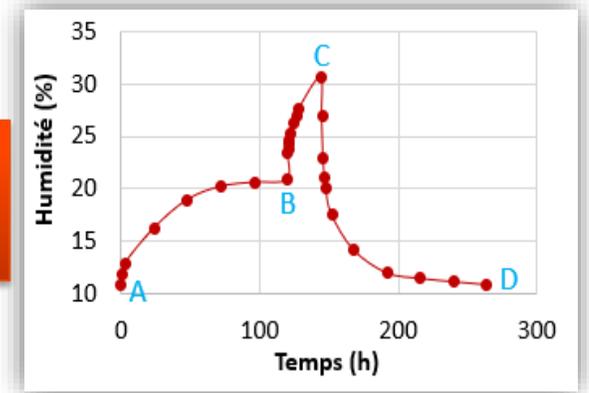


Deux modèles d'étalonnage pour le suivi de l'humidité
 Modèle 1 : en enceinte climatique
 Modèle 2 : en immersion dans l'eau

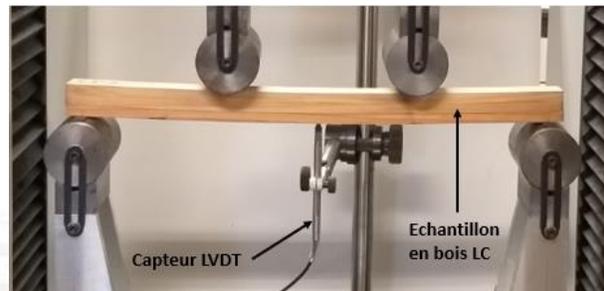
2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

Principe : soumettre les éprouvettes à plusieurs cycles accélérés H/S, puis évaluer leur durabilité



Caractérisation mécanique en flexion



Suivi des indicateurs de durabilité

- Humidités
- Déformations

Comprendre les mécanismes de dégradation au cours des cycles H/S

60 éprouvettes non instrumentées

6 éprouvettes témoins instrumentées

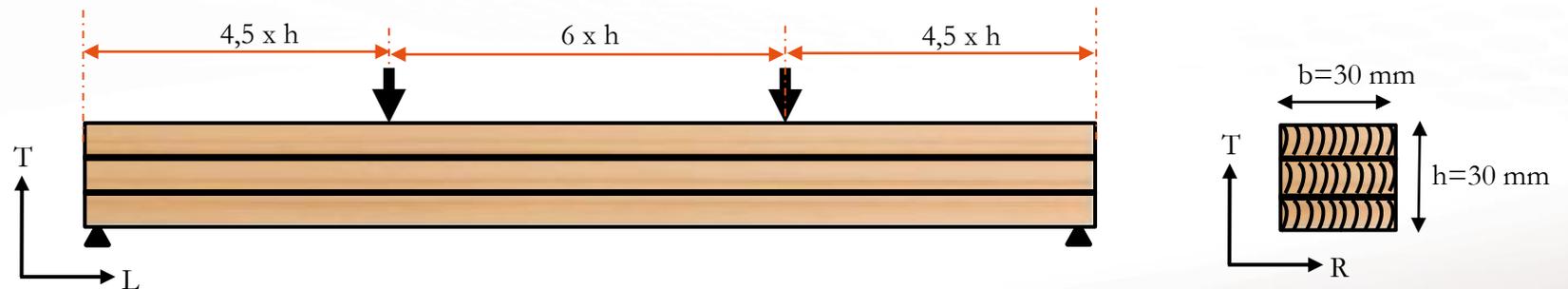
2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

- 17 cycles H/S et essais de flexion (NF EN 408) en 11 séquences

N° cycle	0	1	2	3	5	7	9	11	13	15	17
N° séquence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

- Essais de flexion sur 10 éprouvettes pour les propriétés initiales et sur 5 éprouvettes pour les séquences suivantes
- Masse volumique des éprouvettes = $558 \pm 26 \text{ kg/m}^3$ à $12 \pm 1 \%$ d'humidité absolue



Conditions d'essais

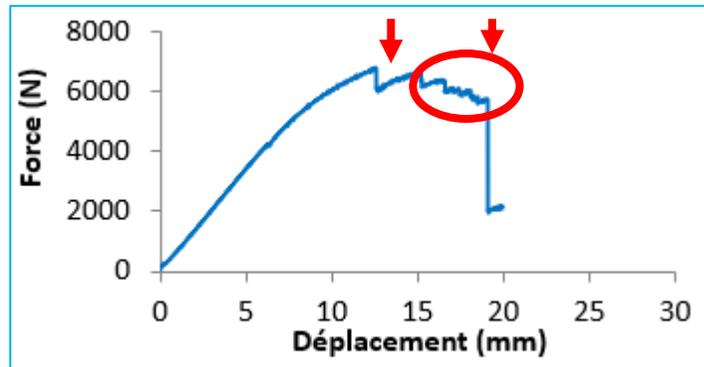
- Conditionnement : HR = 65% ; T = 20°C
- Déplacement imposé : 5,4 mm/min

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

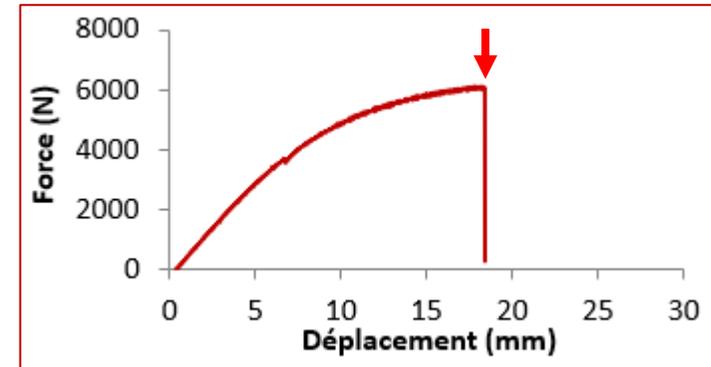
Deux types de comportement

Rupture « séquentielle »

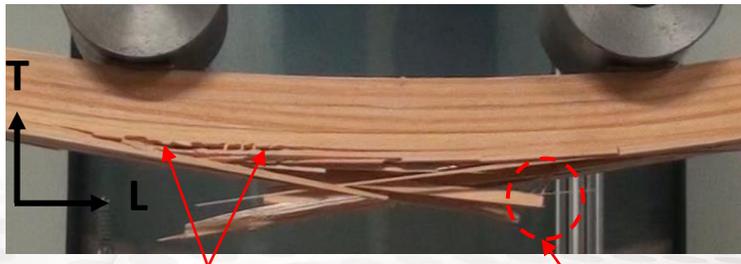


*Tran (2014) ;
Yahyaoui (2017)*

Rupture « brutale »



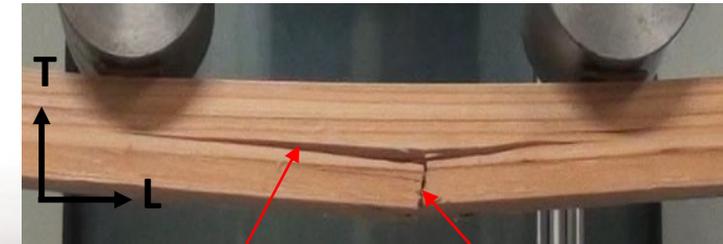
- Une 1^{ère} fissure \perp à l'axe de l'éprouvette, suivie par plusieurs fissures partielles longitudinales



Plusieurs fissures longitudinales

1^{ère} fissure transversale

- Une fissure \perp à l'axe de l'éprouvette, suivie directement par une grande fissure longitudinale



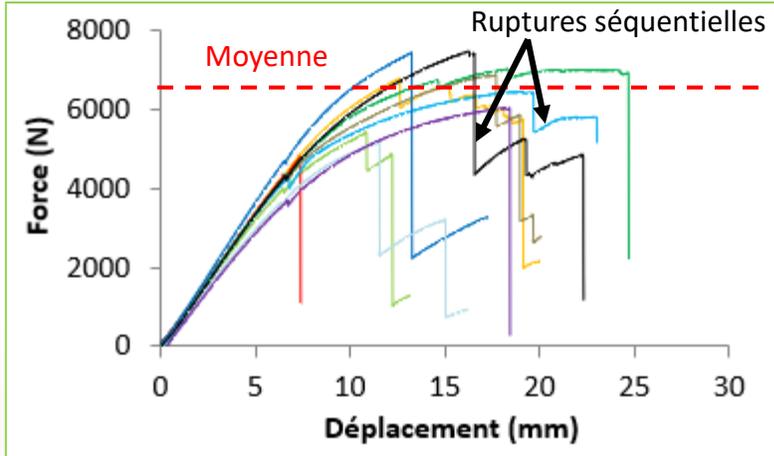
Une grande fissure longitudinale

1^{ère} fissure transversale

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

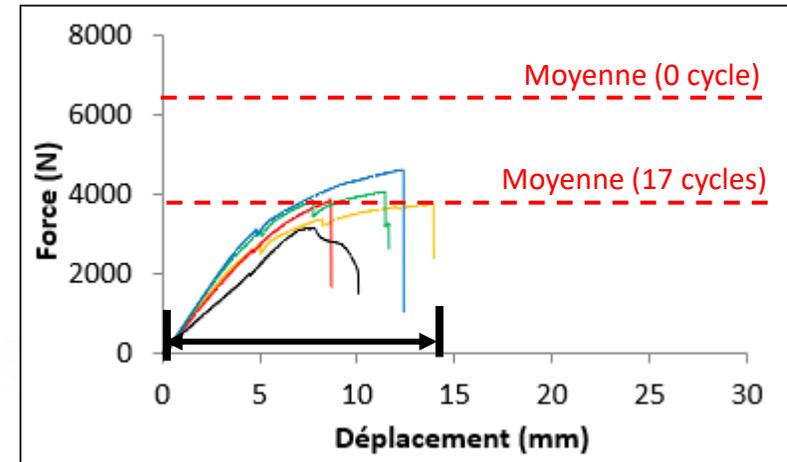
Eprouvettes saines « 0 cycle »



Ruptures séquentielles plus prononcées

Reprise d'effort après rupture

Eprouvettes vieilles « 17 cycles »



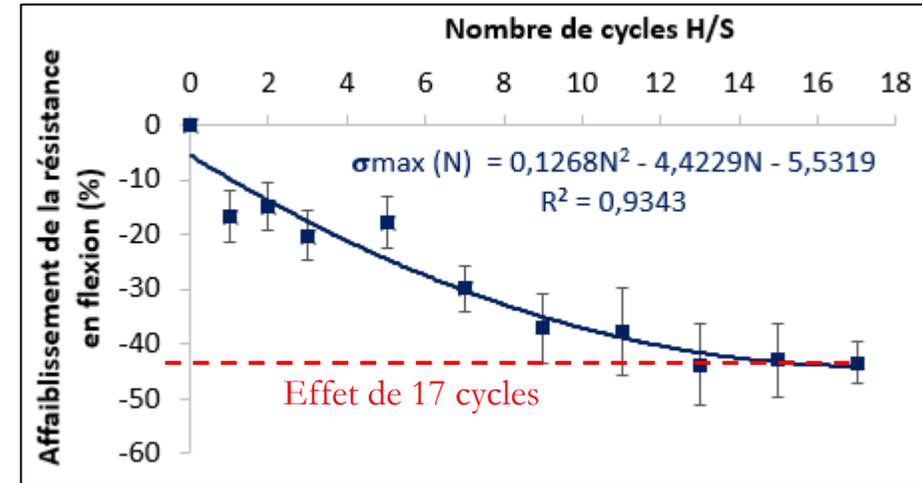
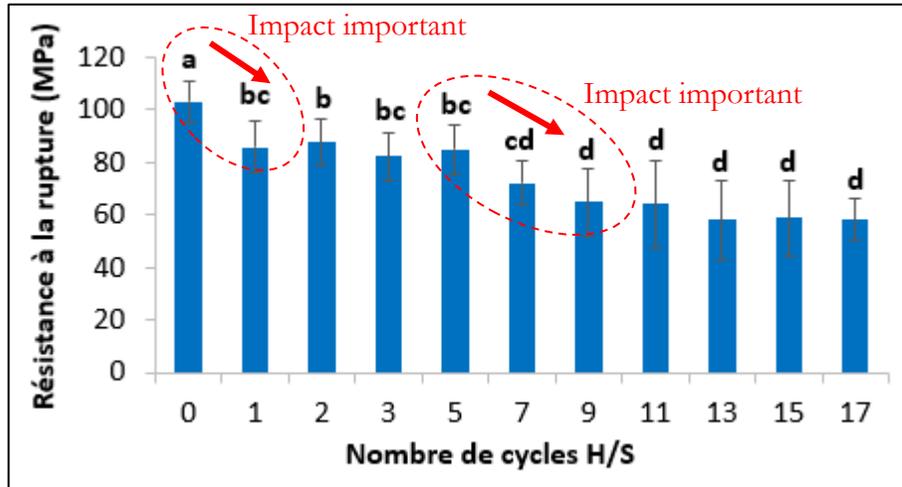
Ruptures séquentielles quasi-inexistantes

Diminution de l'effort à la rupture

Taux de déformation plus faible

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :



Différence significative entre les éprouvettes saines et les éprouvettes soumises aux 17 cycles

17 cycles H/S provoquent un affaiblissement de $43,5 \pm 3,9 \%$

Impact important après le 1^{er} cycle et après le 7^{ème} cycle

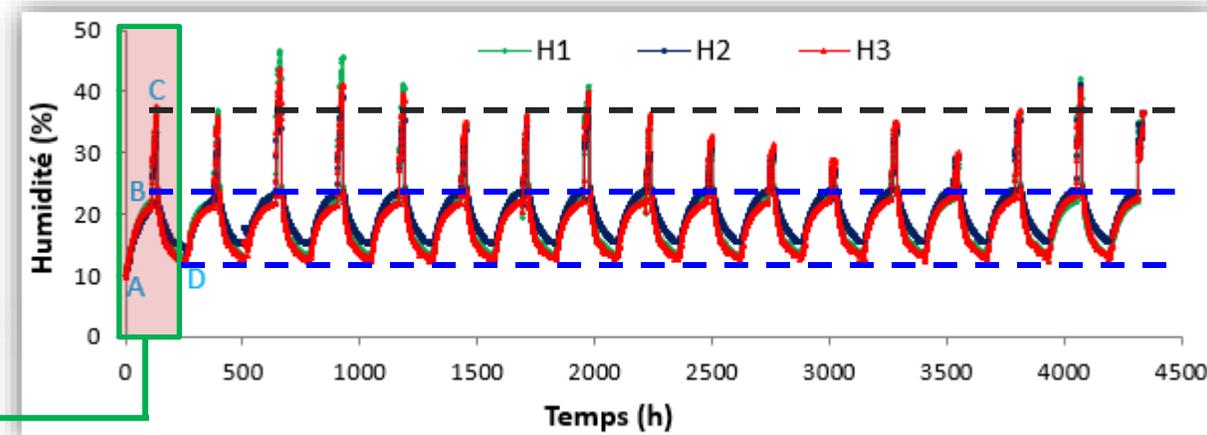
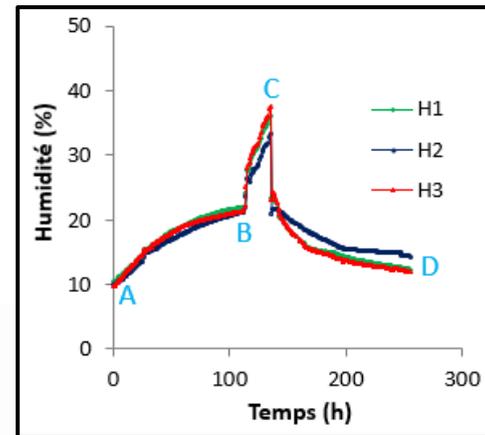
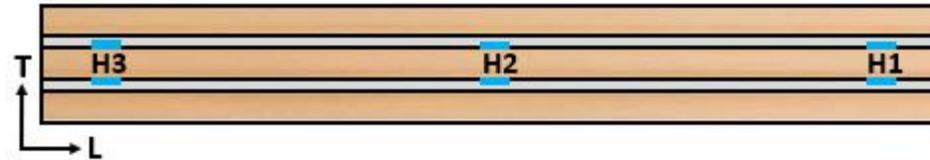
Modèle expérimental : $\sigma_{\max} (N) = a N^2 + b N + c$

N : nombre de cycles H/S

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

Evolution des humidités



Mêmes humidités en-dessous du PSF (points B et D)

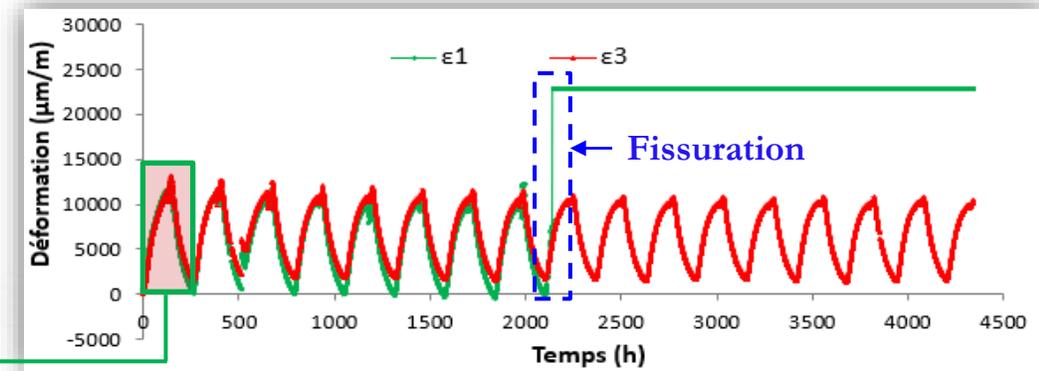
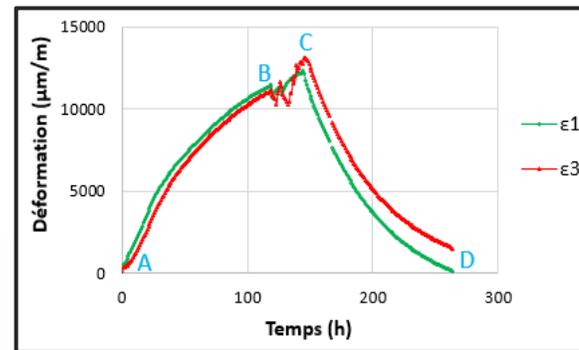
- Humidités variables en immersion (point C)
 - Effet de la variation de température de l'eau
 - Effet de l'électrolyte de l'eau sur la résistance électrique

H% du bord (H1 et H3) \neq H% du centre (H2) \rightarrow gradients d'H%

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

Evolution des déformations



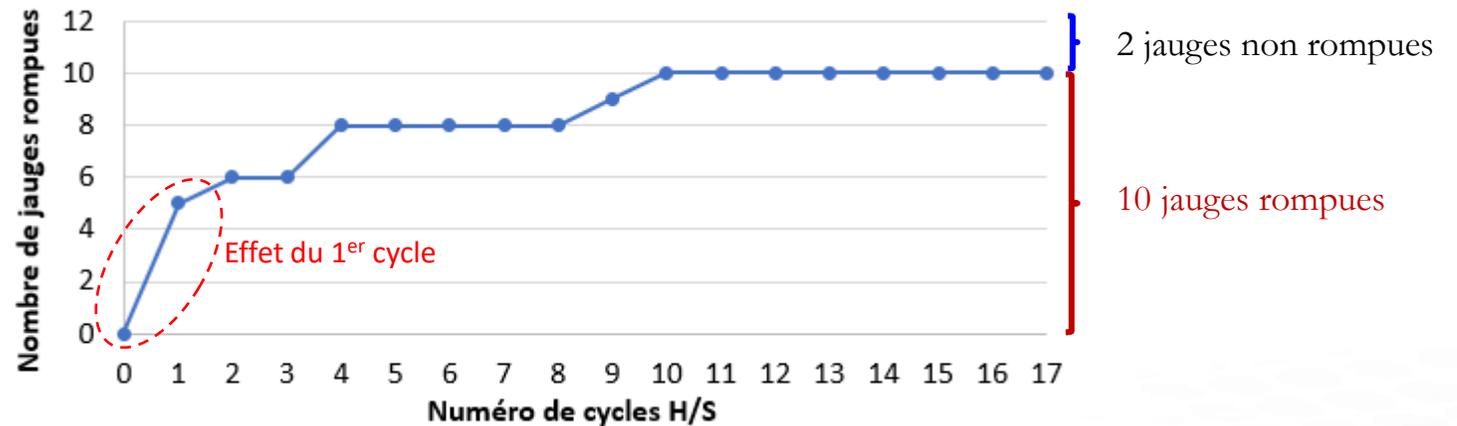
- Différence de déformations entre deux lamelles ($\Delta\epsilon_B = 317 \mu\text{m}/\text{m}$; $\Delta\epsilon_D = 1410 \mu\text{m}/\text{m}$)
 ➤ Comportement différent des lamelles → risque de fissuration
- Décrochage de la jauge → Hypothèse : fissuration du matériau

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

Etude de la durabilité des éléments en bois LC sous sollicitations hygrothermiques cycliques :

Fissuration du matériau

Evolution des déformations



- 83% des jauges (soit 10/12) ont rompu au cours des 17 cycles réalisés
→ Hypothèse : présence de microfissures internes (non visibles à l'extérieur)
- Effet accentué du 1er cycle sur l'endommagement du matériau
→ Résultats compatibles avec l'influence significative du 1er cycle sur « σ_{max} »

2- Etude du vieillissement accéléré et de la tenue mécanique

- Bilan :
 - Développement d'un système de suivi en continu : humidité, déformation
 - Définition d'un cycle de vieillissement accéléré
 - Influence des cycles accélérés sur:
 - La tenue mécanique
 - Le comportement mécanique
 - Mise en évidence de la dégradation du matériau : fissuration
 - Proposition d'un modèle expérimental reliant la contrainte à la rupture au nombre de cycles accélérés

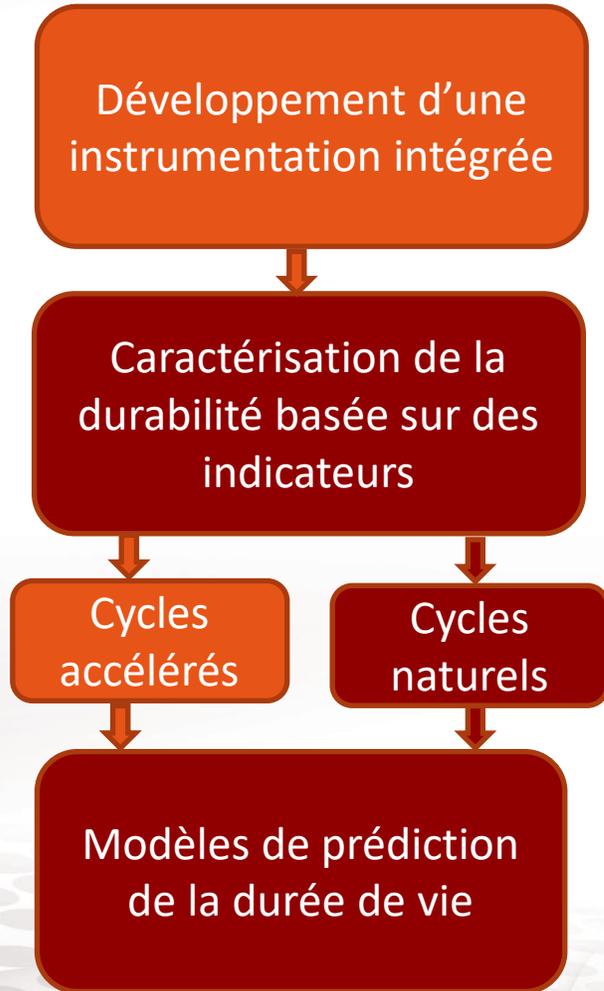
C- Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

3- Etude du vieillissement en conditions naturelles

Thèse de doctorat de Guilhem GREFFIER : 01 octobre 2020 – 30 septembre 2023 => soutenance début 2024

Encadrement : M.Perrin, F.Eyma, L.Espinosa

Cofinancement : région Occitanie – IUT de Tarbes – Communauté d'agglomération Tarbes-Lourdes-Pyrénées

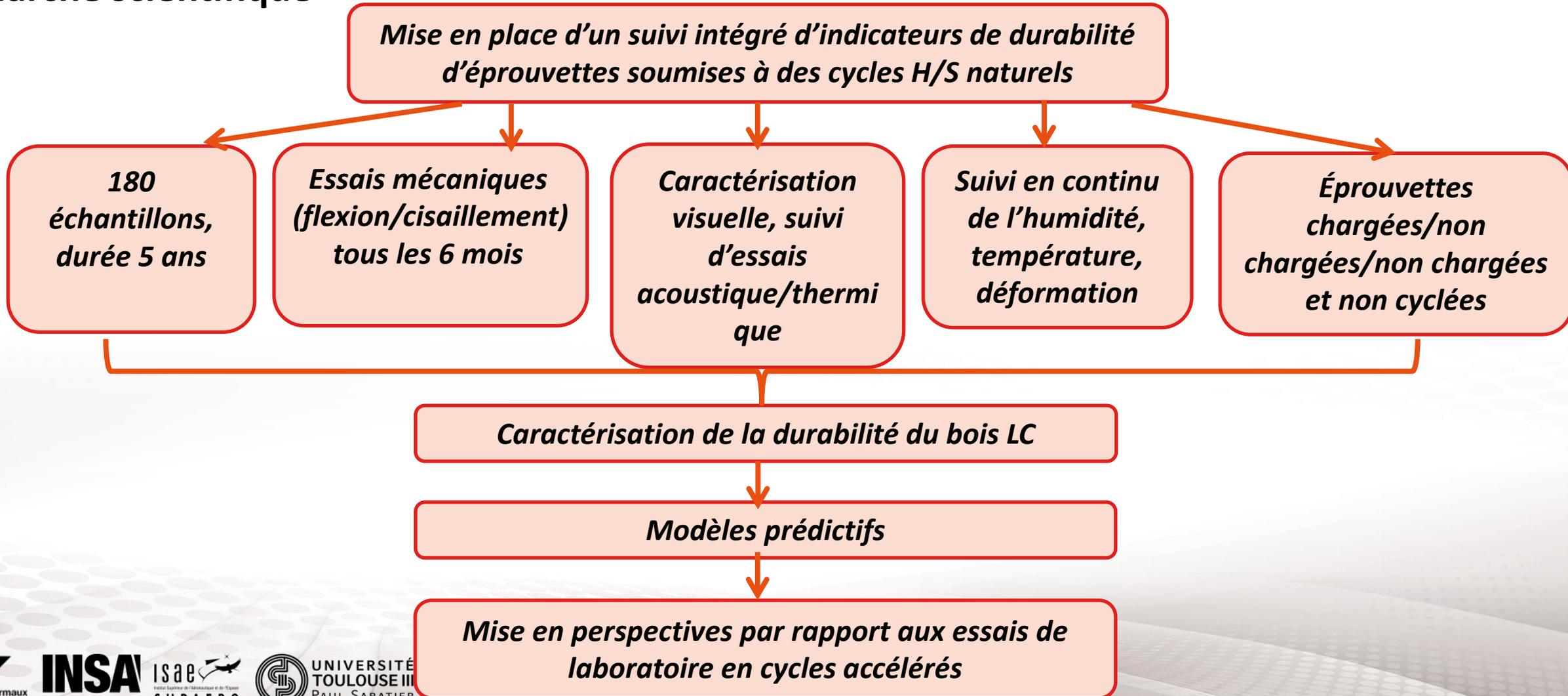


PREDIBOIS : modèles prédictifs associés à l'endommagement des infrastructures en bois

- Objectifs :

- Proposer un protocole expérimental permettant de comprendre l'influence des cycles naturels couplés au chargement mécanique sur la durabilité du bois LC
- Identifier les points de convergence entre essais naturels et essais accélérés
- Identifier les données d'entrée des modèles prédictifs

Démarche scientifique



3- Etude du vieillissement en conditions naturelles

Suivi intégré d'indicateurs de durabilité d'éprouvettes soumises à des cycles H/S naturels

1

Suivi en continu des paramètres de durabilité du LC

Données de la station météo

Système de monitoring

Interface utilisateur:
Teneur en humidité,
déformations et conditions
climatiques

Échantillons pour la compensation en température

Intérieur

6 échantillons instrumentés

60 échantillons tests

Extérieur

6 échantillons instrumentés

60 échantillons tests

Extérieur et chargé

6 échantillons instrumentés

60 échantillons tests

2

Evaluation de la tenue mécanique à long terme du LC

6 échantillons de chaque série, tous les 6 mois

Evaluation mécanique:

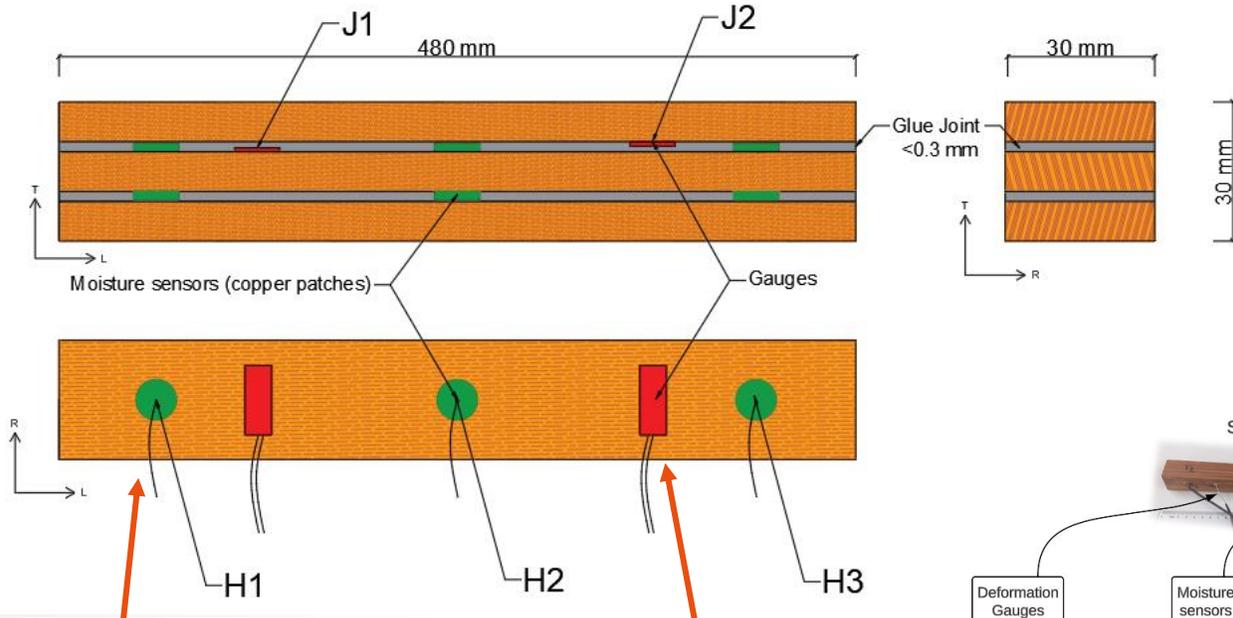
- Flexion 4 points
- Résistance au cisaillement du joint de colle
- Analyse visuelle de l'endommagement
- Mesure du taux de délamination

À cause du nombre important de fissures observées sur les échantillons pendant l'été 2022, une série d'échantillons a été testée après 9 mois d'exposition extérieure

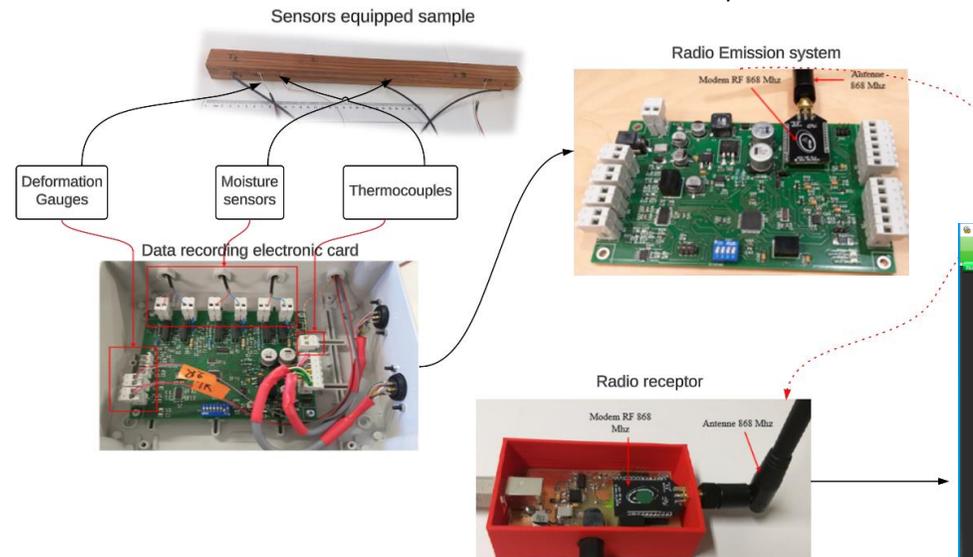
3- Etude du vieillissement en conditions naturelles

Suivi intégré d'indicateurs de durabilité d'éprouvettes soumises à des cycles H/S naturelles

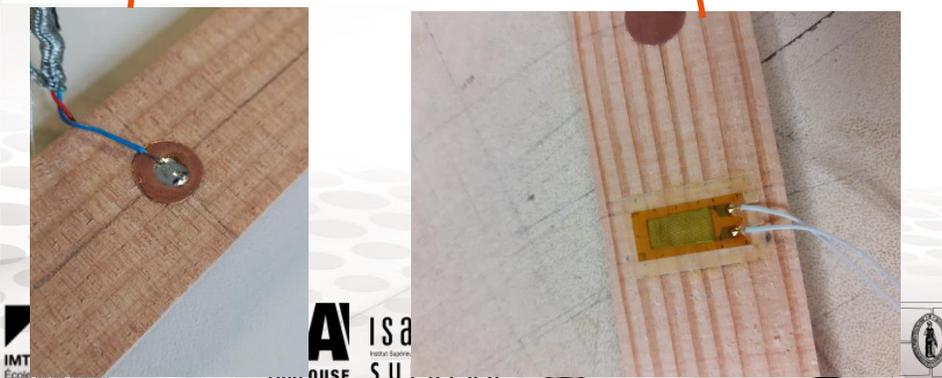
Instrumentation et dispositifs d'essais



Eprouvettes en conditions d'exposition naturelles

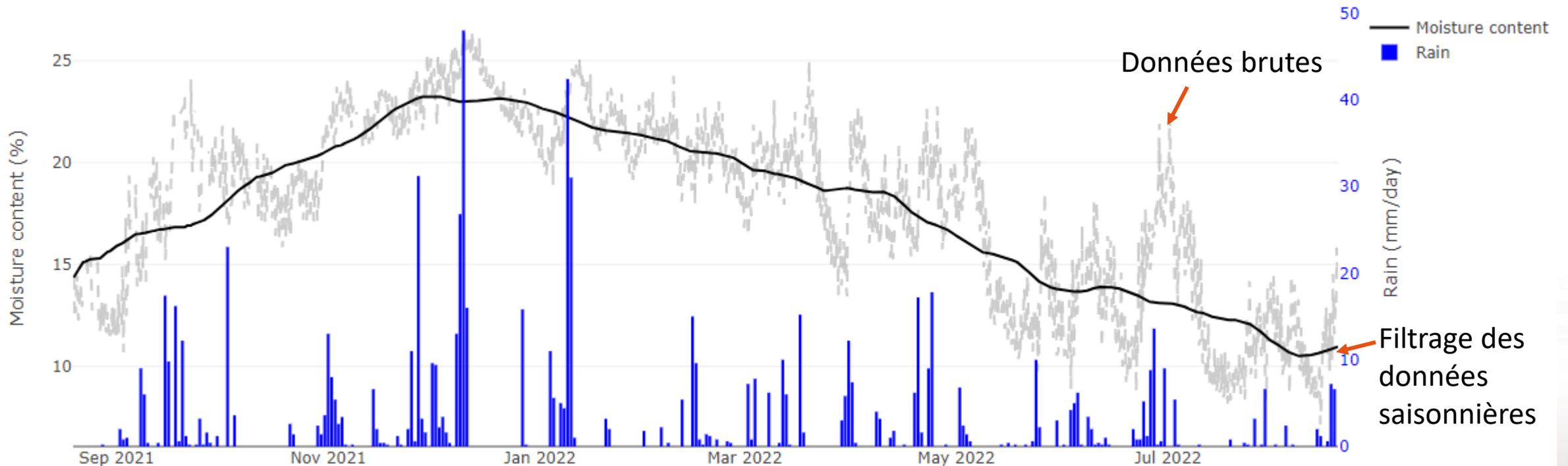



Carte 1	Carte 2	Carte 3	Carte 4	Carte 5	Carte 6
Acid	Acid	Acid	Acid	Acid	Acid
RF1: 511 225 kbit/s	RF1: 0 bit/s				
RF2: 12,66 %	RF2: 0,00 %	RF2: 0,00 %	RF2: 0,00 %	RF2: 0,00 %	RF2: 0,00 %
RF3: 1 468 924 kbit/s	RF3: 0 bit/s				
RF4: 11,74 %	RF4: 0,00 %	RF4: 0,00 %	RF4: 0,00 %	RF4: 0,00 %	RF4: 0,00 %
RF5: 15 000 000 kbit/s	RF5: 0 bit/s				
RF6: 7,51 %	RF6: 0,00 %	RF6: 0,00 %	RF6: 0,00 %	RF6: 0,00 %	RF6: 0,00 %
RF7: 20,10 °C	RF7: 0,00 °C	RF7: 0,00 °C	RF7: 0,00 °C	RF7: 0,00 °C	RF7: 0,00 °C
RF8: 0 bit/s	RF8: 0 bit/s	RF8: 0 bit/s	RF8: 0 bit/s	RF8: 0 bit/s	RF8: 0 bit/s
RF9: 0 bit/s	RF9: 0 bit/s	RF9: 0 bit/s	RF9: 0 bit/s	RF9: 0 bit/s	RF9: 0 bit/s
RF10: 0 bit/s	RF10: 0 bit/s	RF10: 0 bit/s	RF10: 0 bit/s	RF10: 0 bit/s	RF10: 0 bit/s
RF11: 0 bit/s	RF11: 0 bit/s	RF11: 0 bit/s	RF11: 0 bit/s	RF11: 0 bit/s	RF11: 0 bit/s
RF12: 0 bit/s	RF12: 0 bit/s	RF12: 0 bit/s	RF12: 0 bit/s	RF12: 0 bit/s	RF12: 0 bit/s
RF13: 0 bit/s	RF13: 0 bit/s	RF13: 0 bit/s	RF13: 0 bit/s	RF13: 0 bit/s	RF13: 0 bit/s
RF14: 0 bit/s	RF14: 0 bit/s	RF14: 0 bit/s	RF14: 0 bit/s	RF14: 0 bit/s	RF14: 0 bit/s
RF15: 0 bit/s	RF15: 0 bit/s	RF15: 0 bit/s	RF15: 0 bit/s	RF15: 0 bit/s	RF15: 0 bit/s
RF16: 0 bit/s	RF16: 0 bit/s	RF16: 0 bit/s	RF16: 0 bit/s	RF16: 0 bit/s	RF16: 0 bit/s
RF17: 0 bit/s	RF17: 0 bit/s	RF17: 0 bit/s	RF17: 0 bit/s	RF17: 0 bit/s	RF17: 0 bit/s
RF18: 0 bit/s	RF18: 0 bit/s	RF18: 0 bit/s	RF18: 0 bit/s	RF18: 0 bit/s	RF18: 0 bit/s
RF19: 0 bit/s	RF19: 0 bit/s	RF19: 0 bit/s	RF19: 0 bit/s	RF19: 0 bit/s	RF19: 0 bit/s
RF20: 0 bit/s	RF20: 0 bit/s	RF20: 0 bit/s	RF20: 0 bit/s	RF20: 0 bit/s	RF20: 0 bit/s
RF21: 0 bit/s	RF21: 0 bit/s	RF21: 0 bit/s	RF21: 0 bit/s	RF21: 0 bit/s	RF21: 0 bit/s
RF22: 0 bit/s	RF22: 0 bit/s	RF22: 0 bit/s	RF22: 0 bit/s	RF22: 0 bit/s	RF22: 0 bit/s
RF23: 0 bit/s	RF23: 0 bit/s	RF23: 0 bit/s	RF23: 0 bit/s	RF23: 0 bit/s	RF23: 0 bit/s
RF24: 0 bit/s	RF24: 0 bit/s	RF24: 0 bit/s	RF24: 0 bit/s	RF24: 0 bit/s	RF24: 0 bit/s



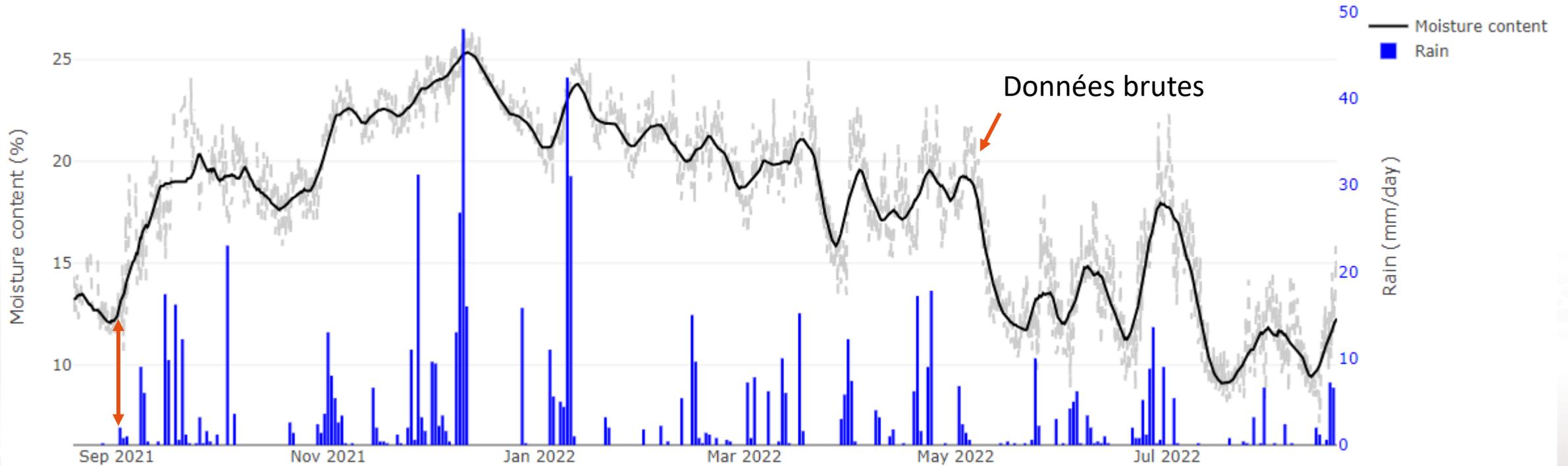
Suivi en continu des indicateurs de durabilité :

- Suivi de l'humidité : **cycles saisonniers**, météorologiques, nuit/jour



Suivi en continu des indicateurs de durabilité :

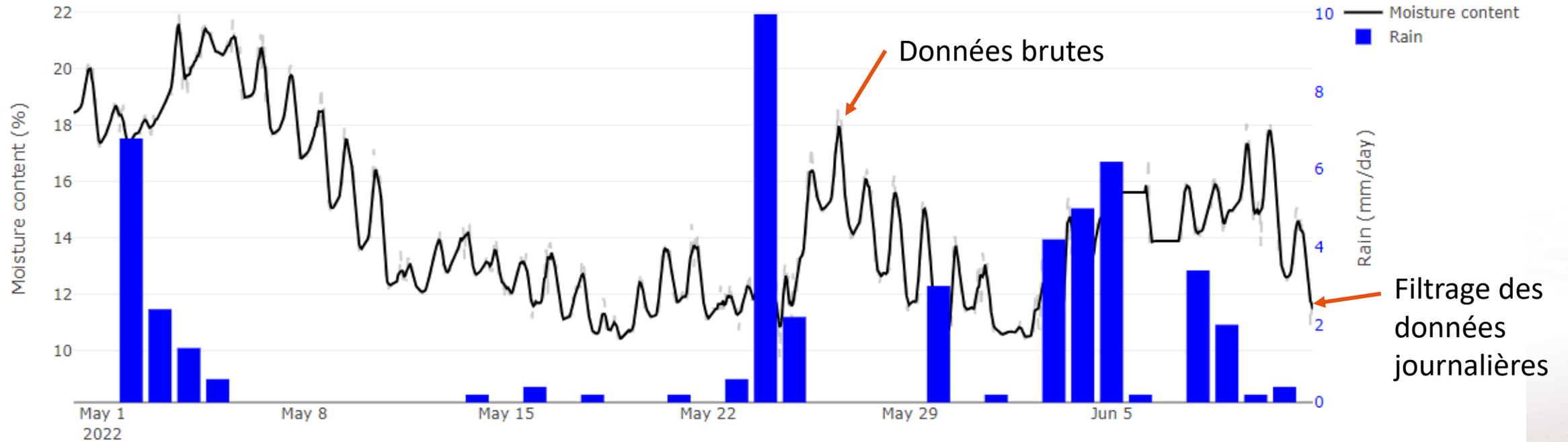
- Suivi de l'humidité : cycles saisonniers, **météorologiques**, nuit/jour



Correspondance entre les périodes de pluie et l'augmentation de l'humidité des éprouvettes

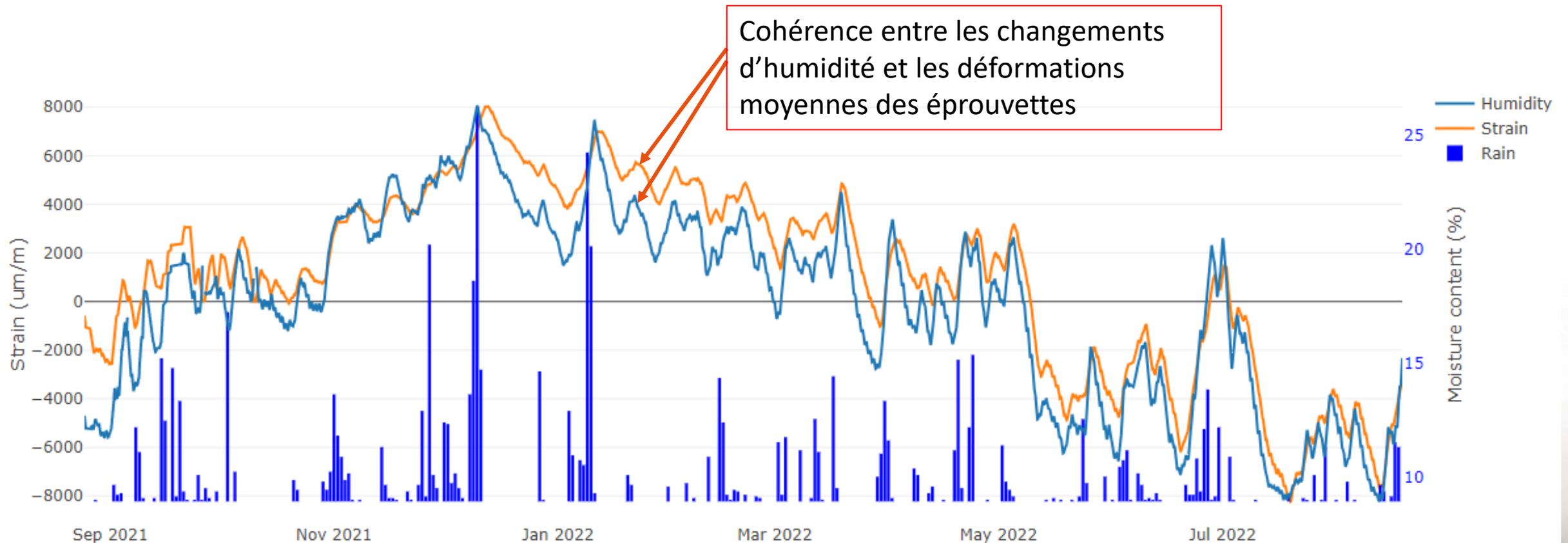
Suivi en continu des indicateurs de durabilité :

- Suivi de l'humidité : cycles saisonniers, météorologiques, **nuit/jour**



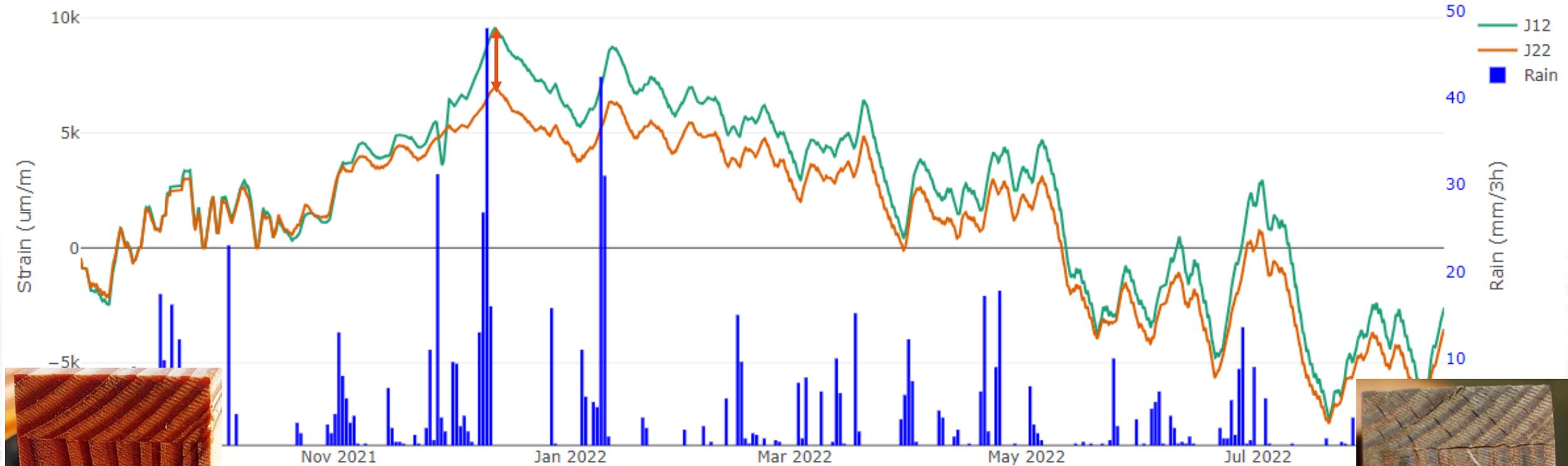
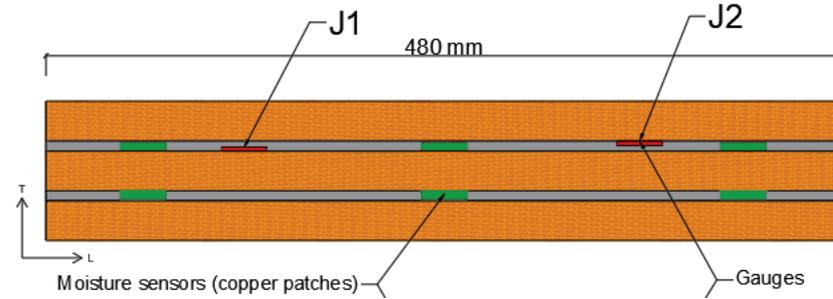
Suivi en continu des indicateurs de durabilité :

- Suivi des déformations



Suivi en continu des indicateurs de durabilité :

- Suivi des déformations

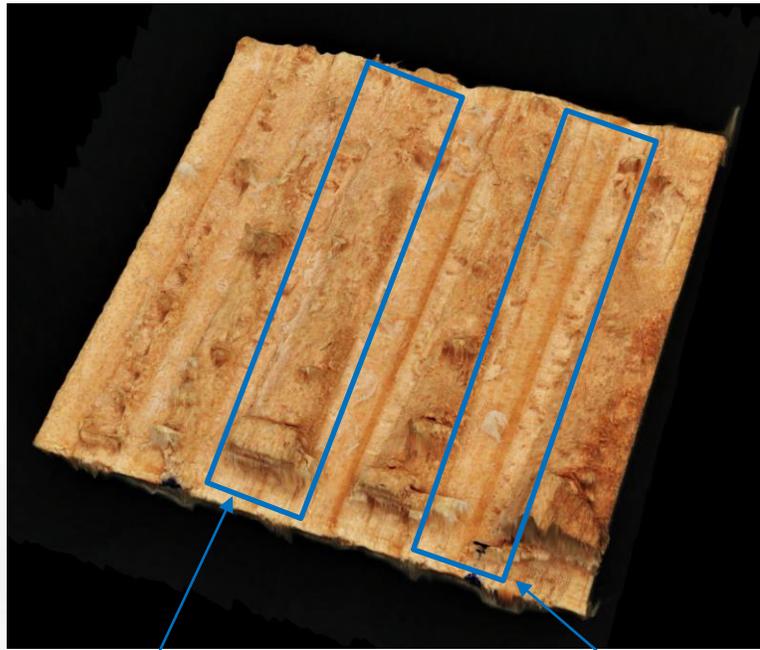


Échantillon à t0

Échantillon à 6 mois

Evaluation de la tenue mécanique :

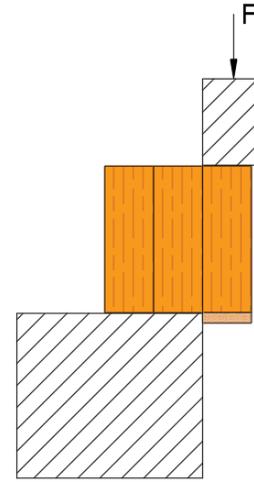
- Endommagement des joints collés



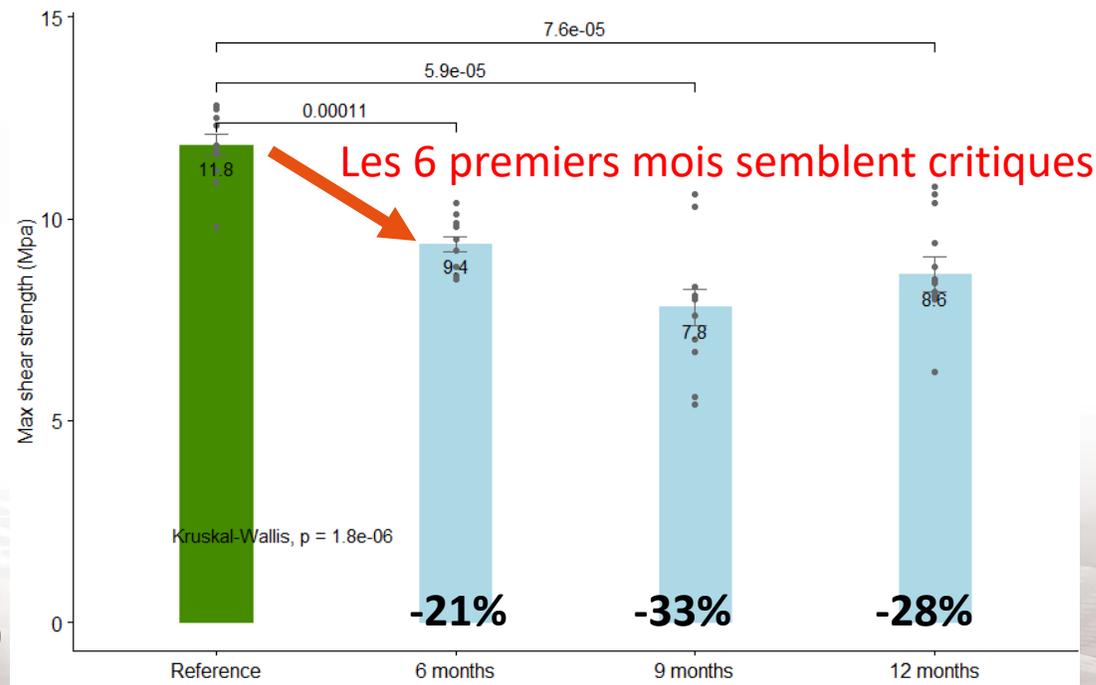
Rupture cohésive

rupture adhésive

Faciès de rupture

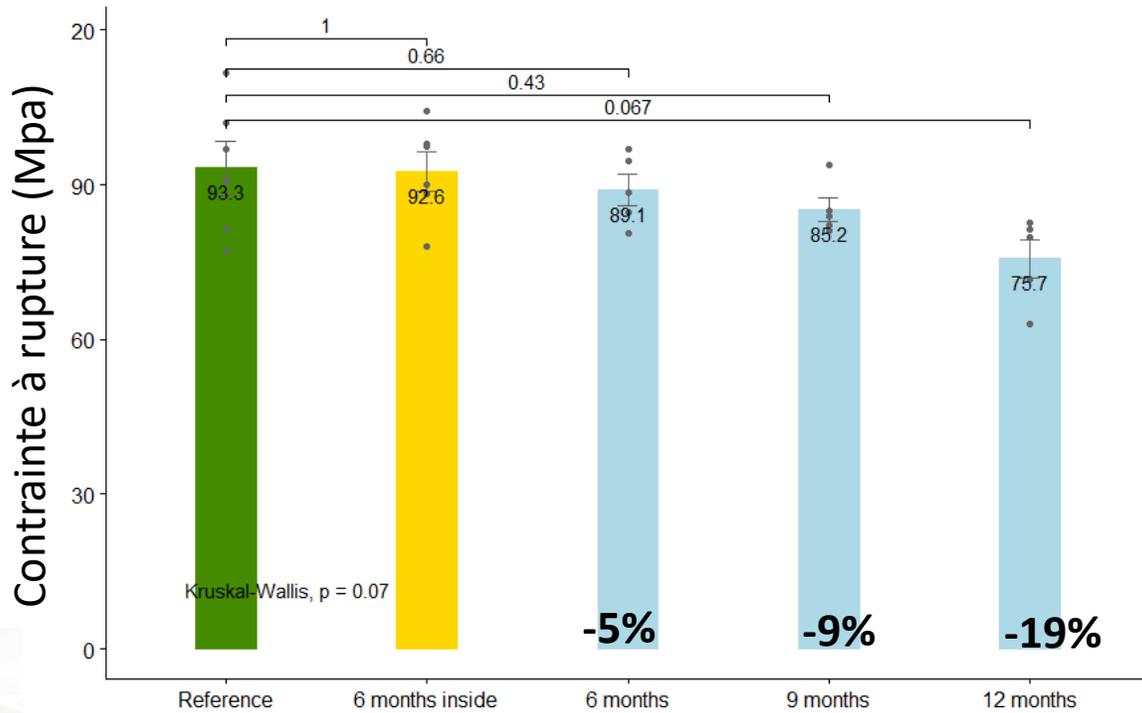


Dispositif de cisaillement

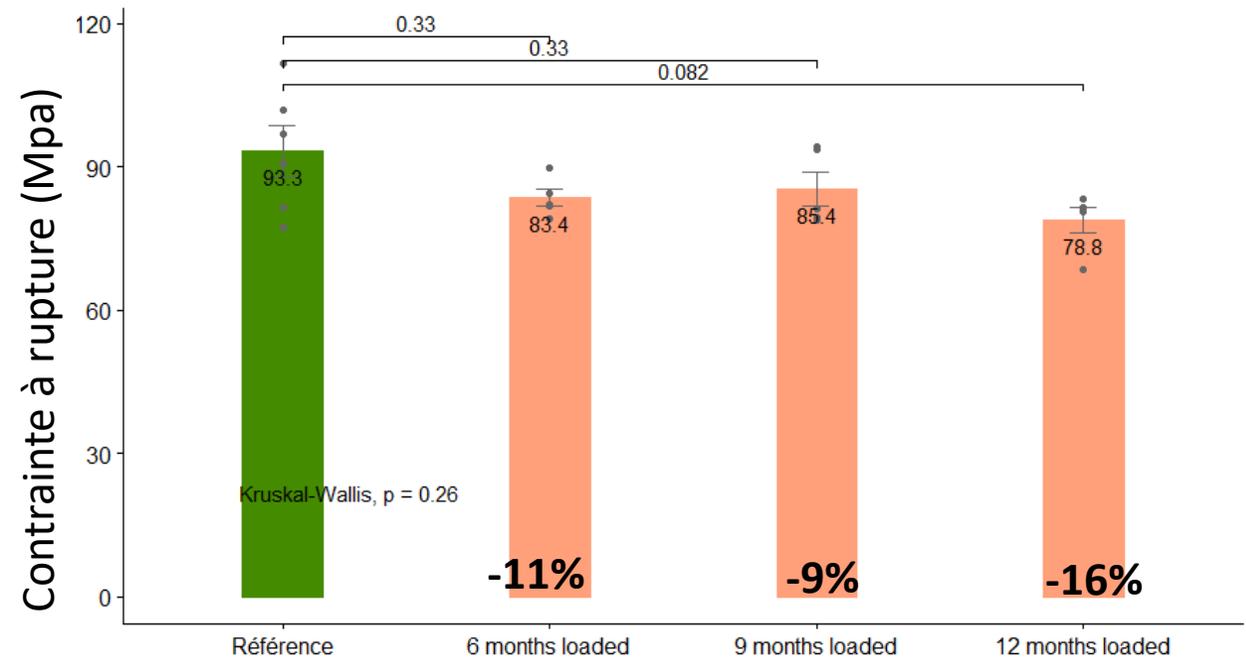


Evaluation de la tenue mécanique :

- Evolution des propriétés mécaniques et modification des modes de rupture



Evolution sur 1 an des éprouvettes non chargées en conditions extérieures



Evolution sur 1 an des eprouvettes chargées en conditions extérieures

Evaluation de la tenue mécanique :

- Evolution des propriétés mécaniques et modification des modes de rupture

Rupture brutale des éprouvettes :



T0 : ruptures séquentielles




Vieillissement



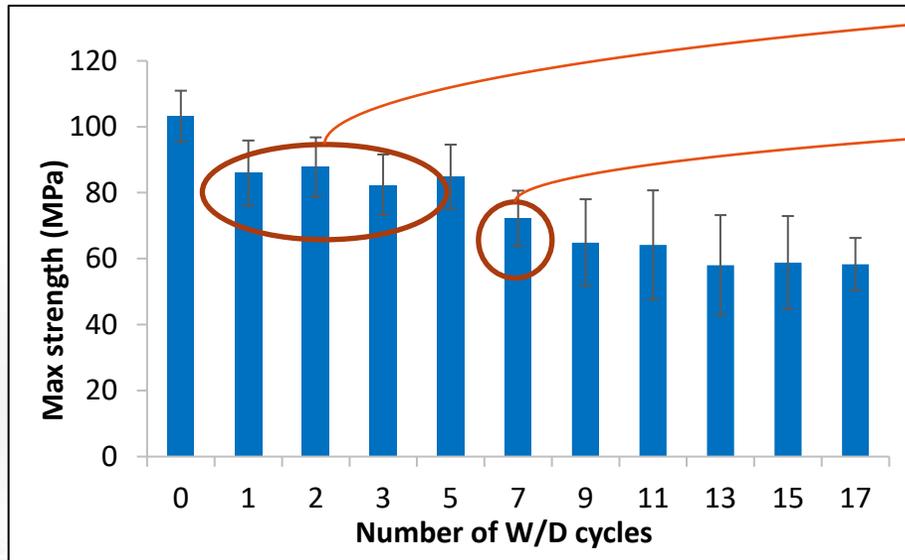
Nouveaux mécanismes de rupture après vieillissement
causés par l'endommagement du joint de colle :



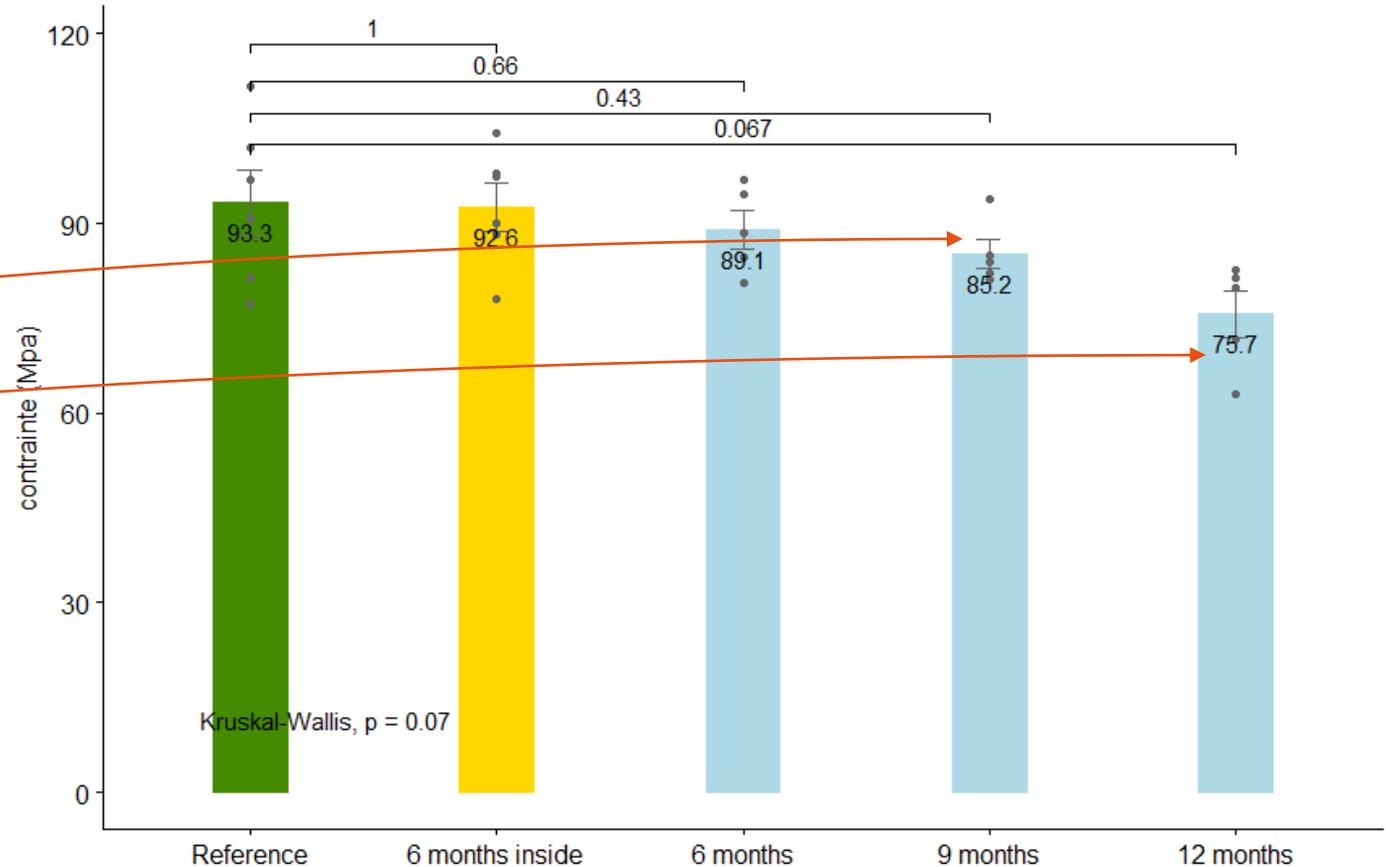
Rupture en cisaillement du joint de colle

Evaluation de la tenue mécanique : comparaison avec les essais accélérés

La perte de propriétés mécaniques après 1 an de vieillissement naturel semble équivalent à 7 cycles H/S accélérés



Evolution de la contrainte à rupture en flexion sous cycles de vieillissement accéléré (Uwizeyimana 2021)



L'analyse des données recueillies sur 2,5 ans est en cours => serviront à enrichir les modèles prédictifs et à creuser le lien entre les essais naturels et les essais accélérés

- Bilan :
 - Le système de suivi d'indicateurs de durabilité permet :
 - D'identifier les cycles saisonniers, météorologiques, journaliers
 - D'identifier les déformations différentielles des lamelles du LC
 - Le vieillissement naturel du LC montre :
 - Des pertes de propriétés mécaniques et de tenue du joint collé dès 6 mois d'exposition
 - Des modifications des mécanismes d'endommagement
 - Des points d'accroche avec les résultats de vieillissement en conditions accélérées

C- Fonctionnalisation du matériau bois pour une gestion durable

- Conclusions après 10 ans de développements:
 - Le dispositif de suivi d'indicateurs de durabilité est opérationnel
 - Une première étape a été franchie concernant l'évaluation de la durabilité du bois LC sous cycles H/S accélérés
 - L'évaluation de la durabilité du bois LC sous cycles naturels est en cours
 - Prochaines étapes :
 - développement de modèles prédictifs
 - Applications à d'autres types de matériaux bio-sourcés

3^{ème} Ecole d'automne du GDR
Durabilité des matériaux de construction biosourcés



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Merci pour votre attention

Marianne.perrin@iut-tarbes.fr

Florent.eyma@iut-tarbes.fr