

Qualité et usages industriels des fibres végétales : de l'origine à la mise en place d'outils dans le cadre du LPA 4FM



A Day, M Audouin, A Decker, C Isierte Capone,
X Dreux, B Kurek, B Chabbert, T Peyrache, A Goupil,
A Delahaies, F Morain-Nicolier, P Bono

Sommaire



- ❖ Chaîne de valeur du lin et du chanvre
- ❖ Qualité des fibres végétales : clés pour les marchés
 - Qualité in planta
 - Qualité suite au rouissage
 - Qualité suite à l'extraction
 - Qualité suite aux transformations industrielles
- ❖ En résumé



Chaîne de valeur du lin et du chanvre



● *Aperçu des étapes de transformation de la paille et des constituants*



Récolte



Rouissage



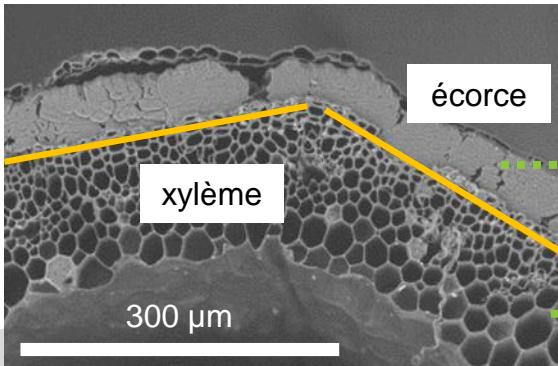
Stockage



Extraction



Transformations



Teillage/Défibrage

- **Extraction** : séparation des différents constituants (fibres, anas/chènevotte, ...)
- **Transformations** : Production de semi-produit ou produit fini pour des applications

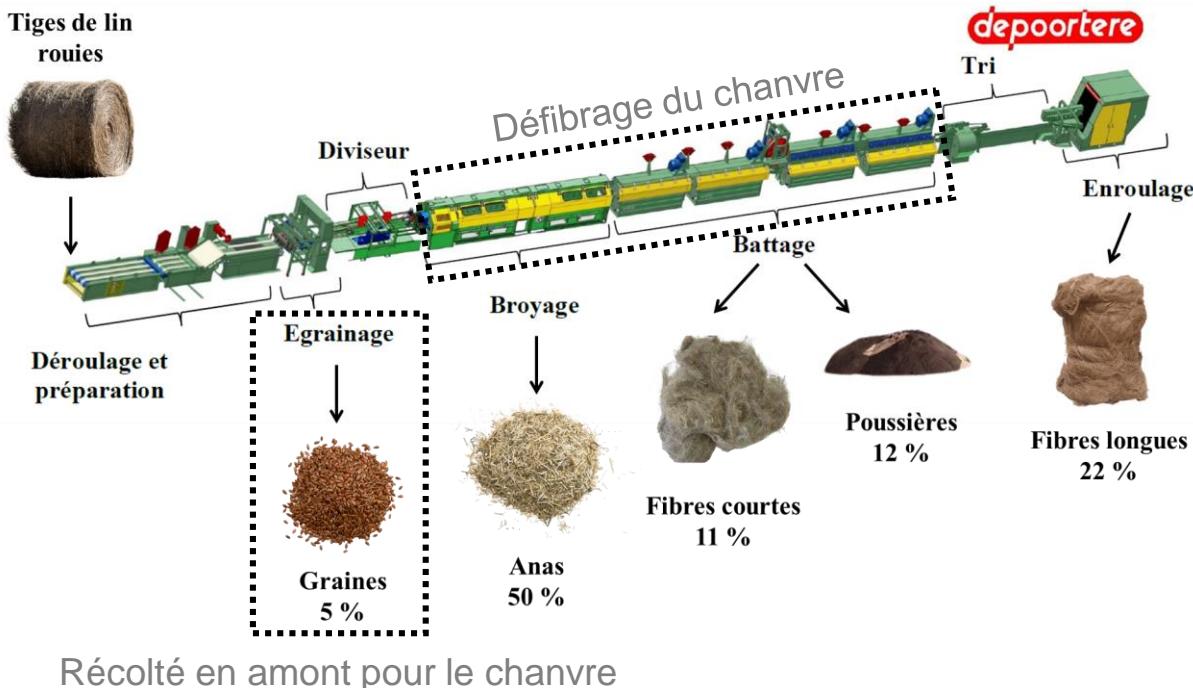
Chaîne de valeur du lin et du chanvre

● Extraction des différents constituants

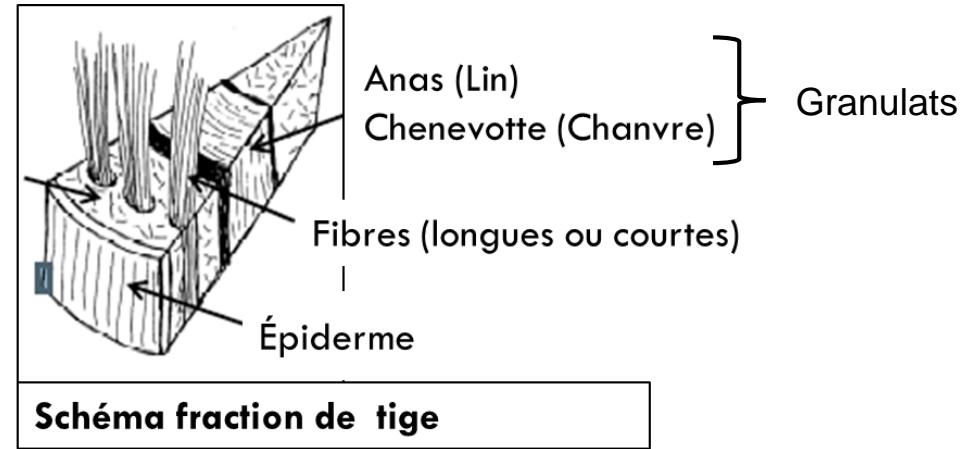
Fractionnement mécanique (Teillage / Défibrage)

- Environ **30 %** de **fibres** (issues du sclérenchyme) et **50 %** de **granulats** (issus du xylème)
- Pas de produit économique majoritaire dans le chanvre

© Adapté de la thèse de N. Martin



Représentation d'une ligne de teillage de lin et des fractions récupérées



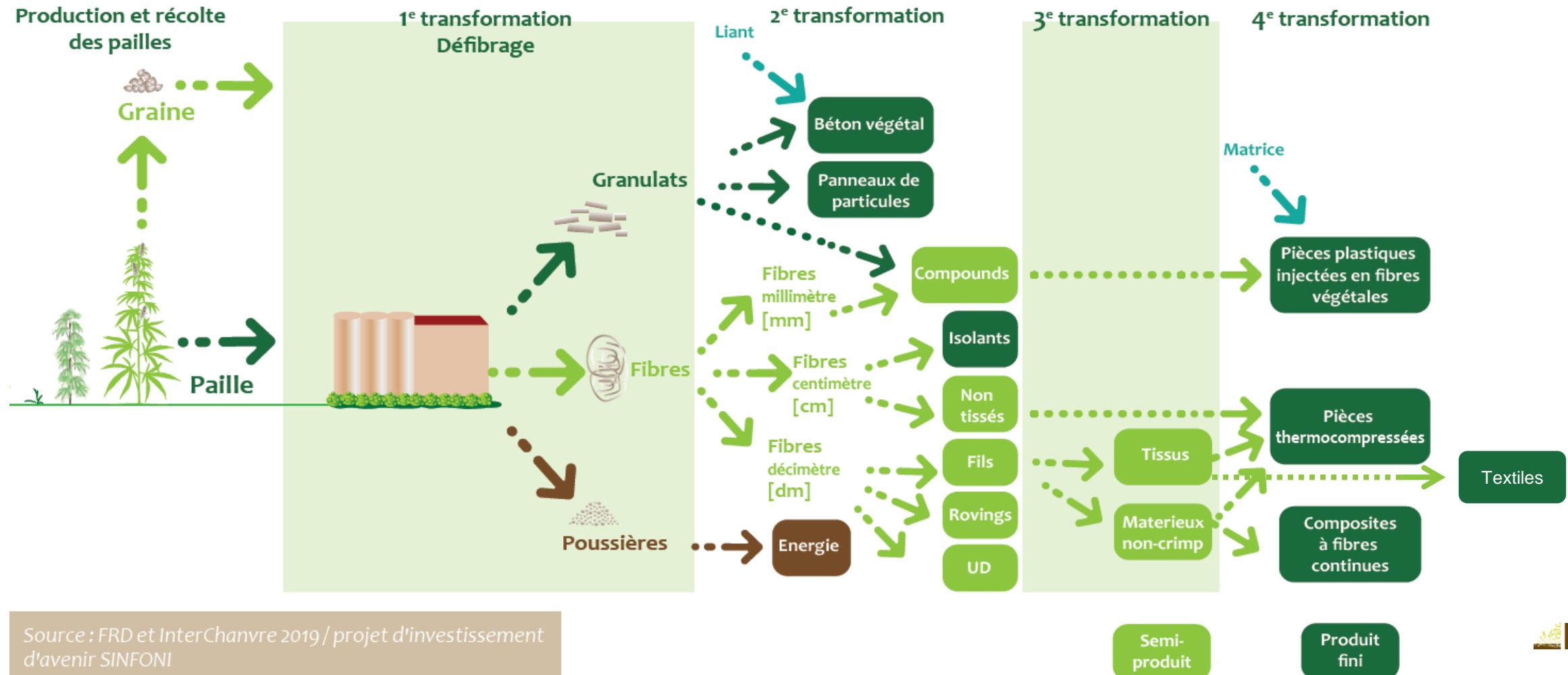
| Cultures | Subdivision massique | Subdivision économique € |
|------------------|----------------------|--------------------------|
| Lin fibre | | |
| Graines | 5 % | 2,4 % |
| Pailles | 95 % | 97,6 % |
| Fibres [dm] | 22 % | 82,6 % |
| Fibres [cm] | 11 % | 11,5 % |
| Granulats | 50 % | 3,5 % |
| Poudres | 12 % | 0 % |
| Chanvre | | |
| Graines | 11 % | 25 % |
| Pailles | 89 % | 59 % |
| Fibres [cm] | 24 % | 34 % |
| Granulats | 44 % | 40 % |
| Poudres | 21 % | 1 % |

© Mémento 2025, FRD-CODEM

Chaîne de valeur du lin et du chanvre

- Une large gamme d'étapes de transformation et de marchés

Différents itinéraires techniques pour divers marchés, dans le domaine des matériaux



Chaîne de valeur du lin et du chanvre



● *Une large gamme d'étapes de transformation et de marchés*

| Typologie de matériau | | Type de fibres et renforts | Taux d'incorporation en fibres végétales (%) | Volumes produits en France (T/an) |
|------------------------|--|--|---|-----------------------------------|
| Isolants | Isolants souples | Fibre [cm], isolant |  > 90 | 14 000 |
| | Isolants de remplissage | Bottes |  100 | 6 000 |
| Bétons | Enduits, mortiers, blocs/parpaings | Granulat |  20 à 50 | 41 000 |
| Panneaux de particules | Panneaux de particules allégés | Granulat |  90 à 95 | 330 000 |
| Composites | Pièces plastiques injectées renforcées en fibres végétales | Fibre [mm], Compound |  20 à 30 | 10 000 |
| | Pièces thermocompressées à base de non-tissés | Fibre [cm], Non-tissé |  50 | 8 000 |
| | Composites à fibres continues | Non-tissé, ruban, unidirectionnel, multiaxial... |  30 à 50 | 1 400 |
| Textiles | Mode, linge de maison | Fibre cotonisée, ruban, fil |  100 | 230 000 |

Source : FRD-CODEM 2025

Usage actuel des fibres et granulats en France, dans les matériaux (dont lin et chanvre)

- Production de textiles avec les fibres de lin
- Production de composites et isolants avec les fibres de lin et de chanvre
- Production de bétons et panneaux de particules avec la chènevotte et les anas
- **40 % du volume valorisé du lin (hors textile) et 20 % de celui du chanvre (hors papier)**

Applications multiples à partir du même type de produit

Chaîne de valeur du lin et du chanvre

- *Qu'en est-il de la qualité ?*

Comment définiriez-vous la qualité des fibres végétales ?

QualitéS des fibres végétales : clés pour les marchés

- *Les paramètres de qualité sont un prérequis pour l'utilisation du chanvre dans divers processus industriels.*

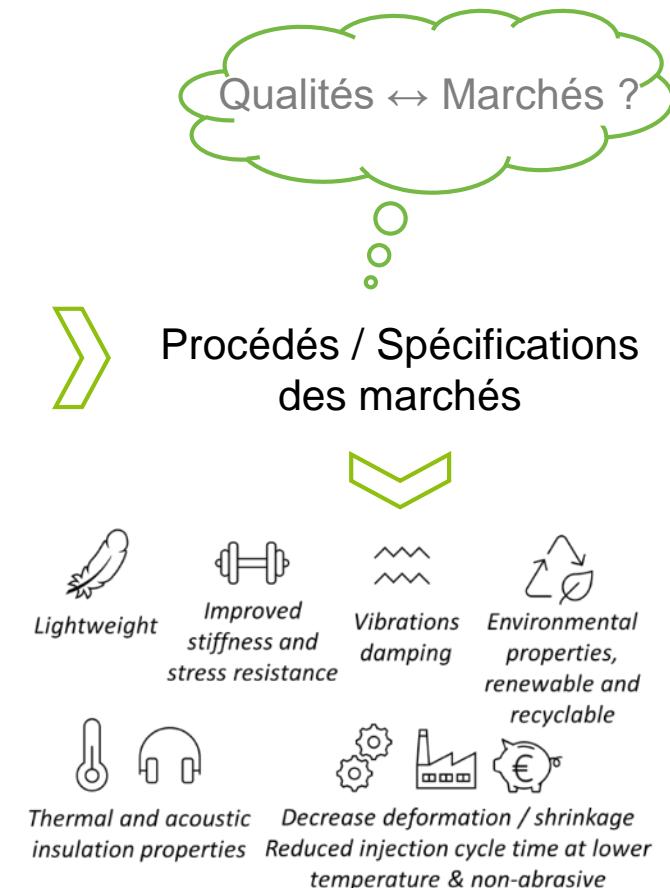
Le chanvre : une plante polyvalente

- Papier
- Composites : non-tissés / renfort en fibres courtes / renfort en fibres longues
- Textiles : cotonisées / filature à sec / filature humide
- Laine isolante
- Panneaux de particules
- Mortier / Béton
- Produits cosmétiques...

Propriétés remarquables :

- But ? / Marketing ?
- Objectives / Subjectives
- Réalité / Mythe

Quels liens ?



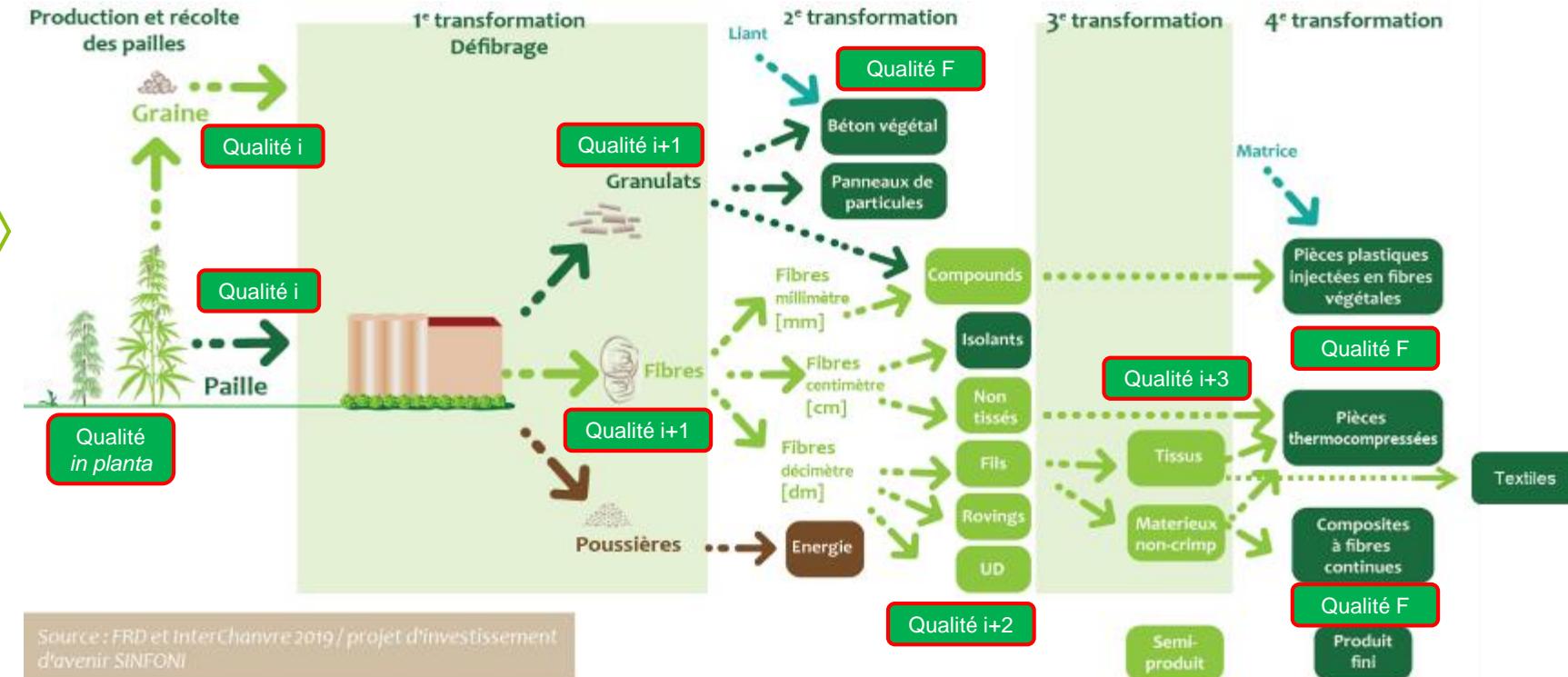
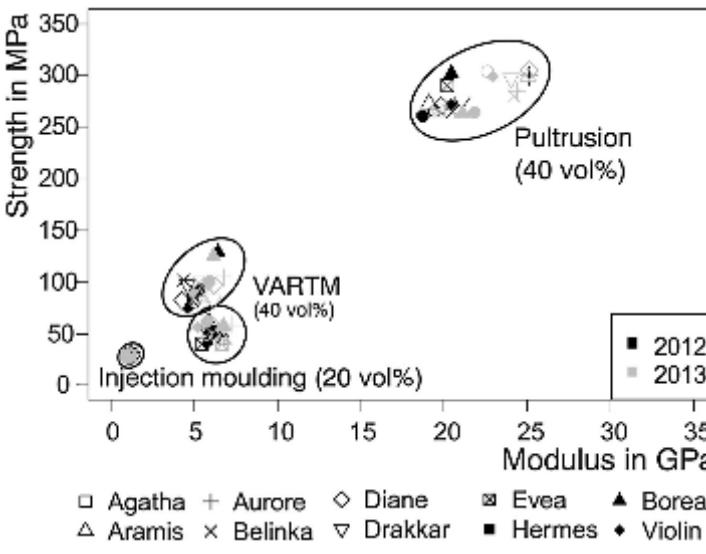
Pas une, mais des qualités

QualitéS des fibres végétales : clés pour les marchés

- *Les paramètres de qualité sont un prérequis pour l'utilisation du chanvre dans divers processus industriels.*

Qualités :

- Nombre et nature des étapes techniques de la tige au produit final
- Évolution dynamique pendant le processus



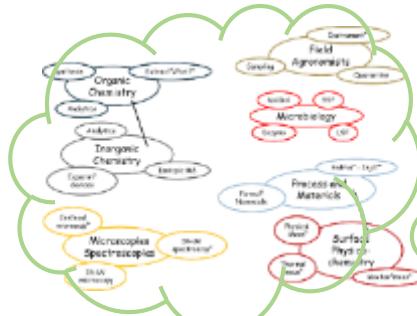
- Performances mécaniques dépendant du procédé de transformations
- Suivant le procédé, la différence de variété ou d'année s'efface ou non

4FM Lab : un laboratoire partenarial associé entre FRD-CODEM, l'UMR FARE (INRAE-URCA) et le CRESTIC (URCA)

Concevoir des OAD pour évaluer et contrôler la qualité de la biomasse et des fractions végétales destinées à des applications matériaux

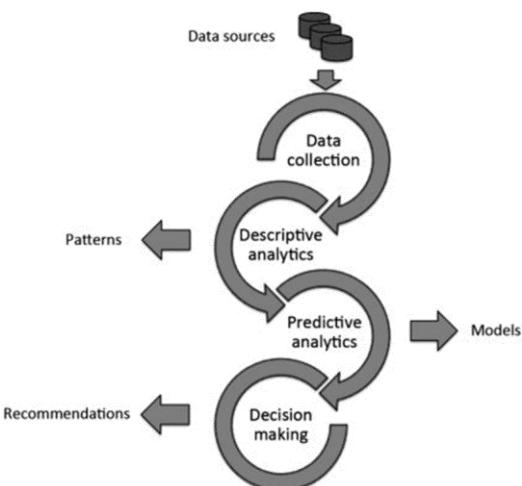
Une nécessité :

- Créer les conditions nécessaires à l'utilisation de la biomasse végétale dans un large éventail de processus industriels (textiles, plastiques, construction).



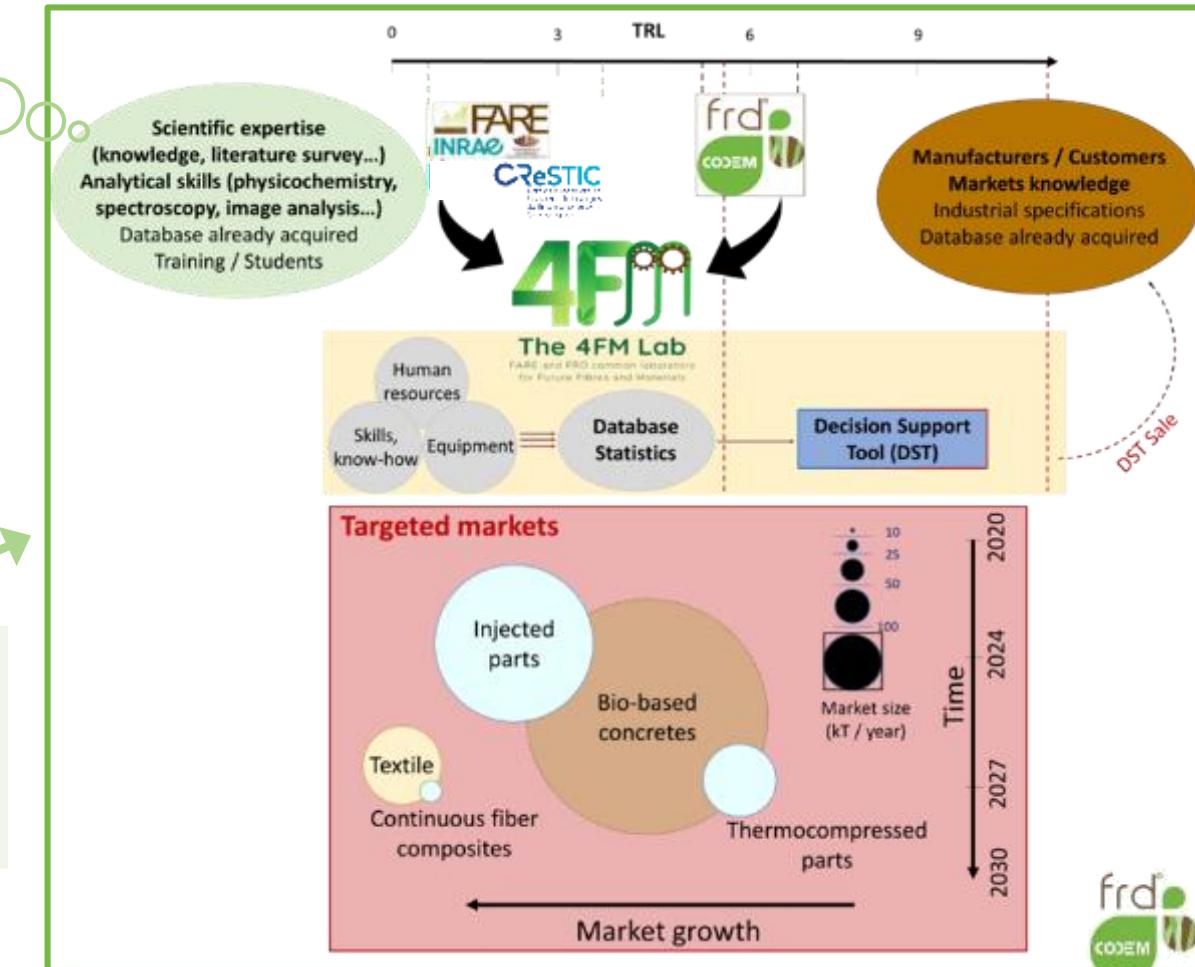
Une observation : Aucune méthode/stratégie permettant de qualifier les matériaux dans toute leur diversité

- Manque de confiance envers la matière
- Réticence à utiliser des fibres végétales vs. produits existants
- Entraves au développement des matériaux biosourcés



Les enjeux :

- Garantir la sécurité de l'approvisionnement : quantité et qualité → Assurer la disponibilité des fractions végétales avec des performances constantes
- Contrôler la variabilité pour améliorer la qualité





Récolte



Rouissage



Stockage



Extraction



Transformations

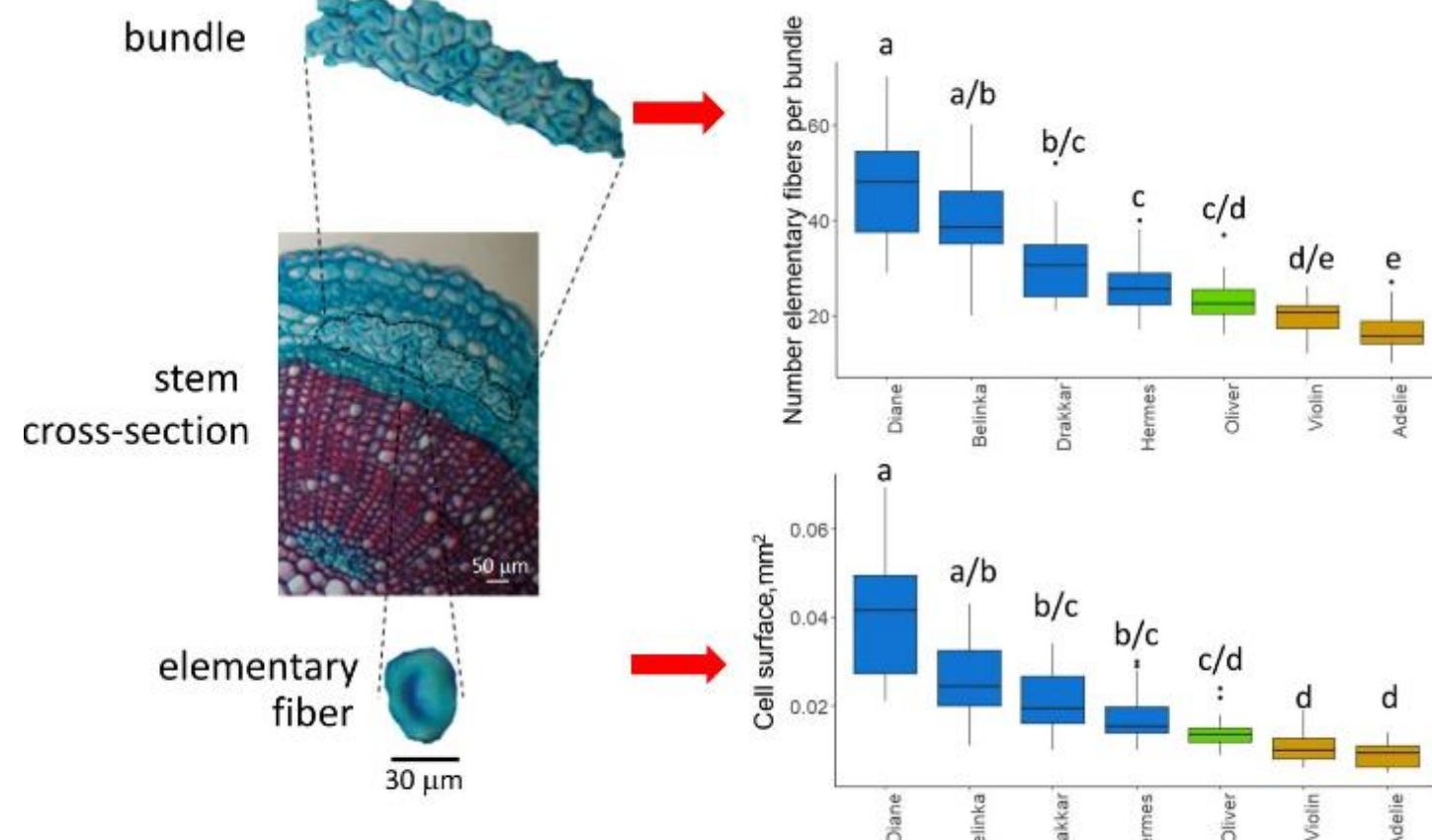
PARTIE I : LA QUALITÉ GERME DANS LA PLANTE

La qualité germe dans la plante

● Qualité des fibres *in planta* : finesse et nombre de fibres (lin)



Une année – 7 variétés (fibres printemps et hiver / oléagineux) – même stade (bourgeonnement)
Observations microscopiques de sections transversales après coloration au bleu Alcian et à la Safranine O – 270 mesures / variété, 3 faisceaux / coupe



Chabi et al. 2023 / Projet FIBRAGEN

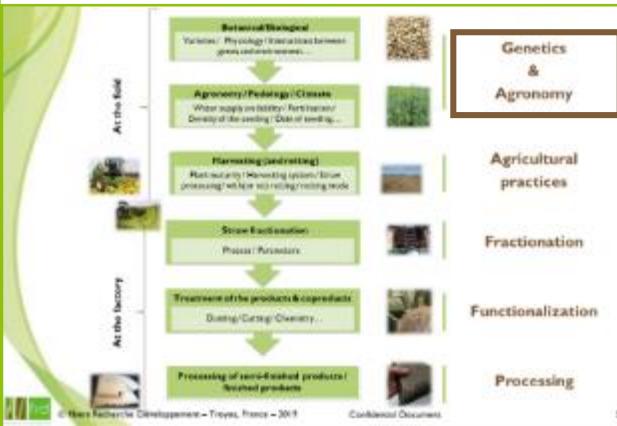
- Forte dispersion des résultats en fonction des variétés
- Variétés fibres de printemps montrent des faisceaux contenant plus de fibres élémentaires plus épaisses vs. variétés fibres d'hiver et oléagineux

La qualité germe dans la plante

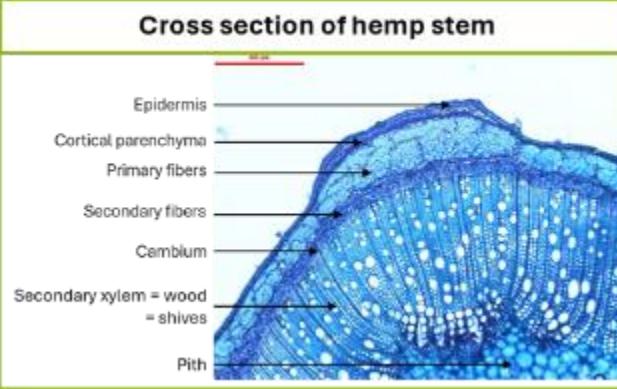


Qualité des fibres *in planta* : finesse et rapport FI/FII (chanvre)

Quelques déterminismes pour les qualités des fibres/granulats

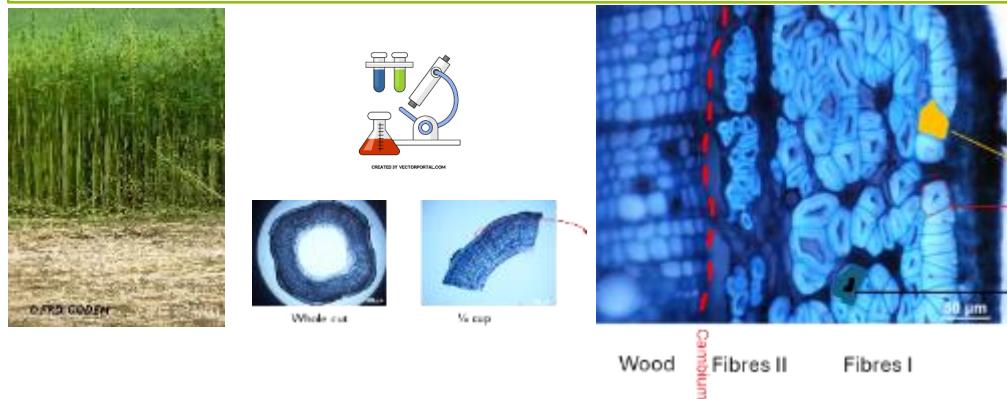


Cross section of hemp stem

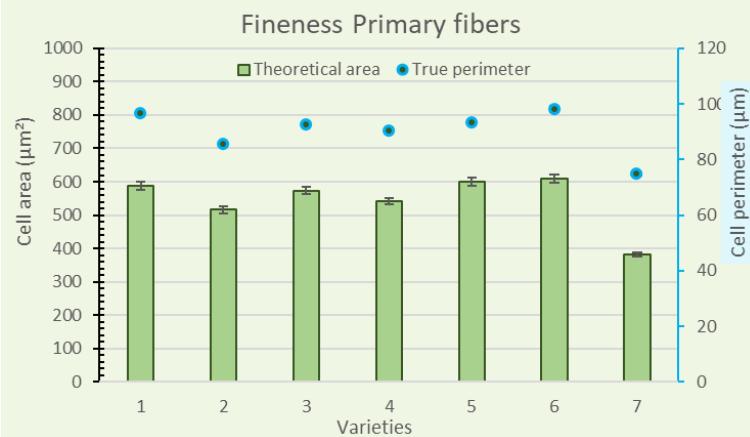
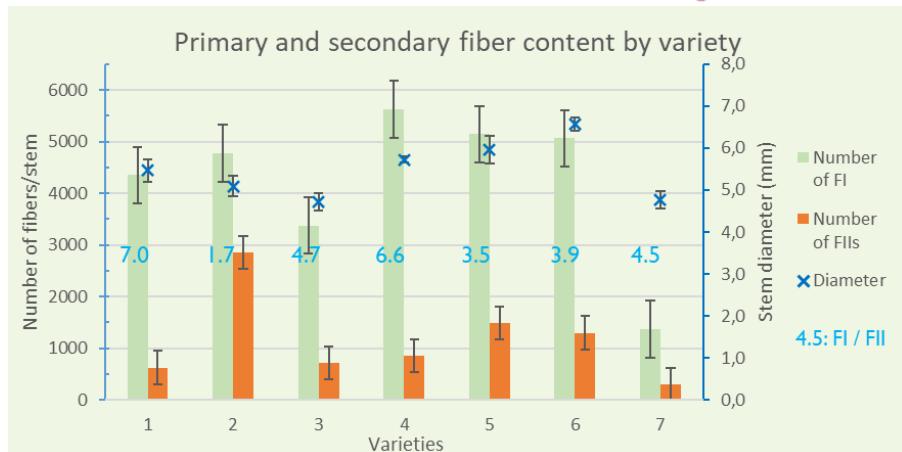


FII: plus courtes et lignifiés / FI

Une année – 7 variétés – même sol – même stade (fin de la pleine floraison)
Observations microscopiques de sections transversales après coloration au bleu de toluidine – 10 tiges / variété ~100 fibres (I & II) mesurées / coupe



| Measured criteria | Morphological parameter |
|----------------------------|--|
| FI & FII number | Fiber richness Fiber II "pollution" |
| Cell surface area FI & FII | Fineness |
| True perimeter | Fineness |
| Circularity (calculate) | Overall morphology |
| Filling (=wall thickness) | Physiological stage (control) |



La qualité germe dans la plante

- Qualité des fibres *in planta* : maturité des fibres, finesse, nombre de fibres, rapport FI/FII

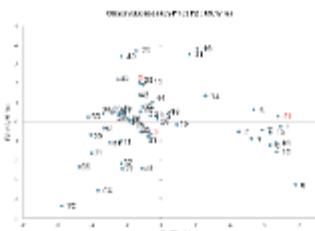


- Augmentation de la superficie consacrée au chanvre → réorganisation des cultures
- Développement du marché des textiles techniques → étape de rouissage
- (Changement climatique) – météo incertaine en automne
- Plus de paille → Variétés tardives
- MAIS à récolter le plus tôt possible...
- Évolution de la composition chimique des fibres pendant leur maturation (après la floraison) → signification

Quel est le niveau de signification ? Y a-t-il des corrélations ?

Etudes statistiques :

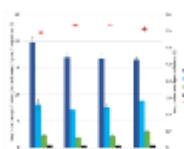
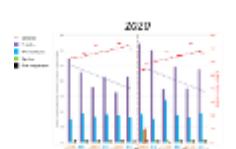
- Difficulté à établir des corrélations significatives
 - Corrélation avec le diamètre de la tige non démontrée clairement
- Une grande variabilité intraspécifique nécessite la collecte d'ensembles de données très volumineux et de nouveaux outils.



Contexte (actuel)



Réflexion et développement en cours de procédures/outils simples et rapides pour estimer la maturité des fibres et fournir une indication des dates de récolte.



4FM
The 4FM Lab
FAIR and FRD common laboratory
for Future Fibres and Materials





Récolte



Rouissage



Stockage



Extraction



Transformations

PARTIE II : LA QUALITÉ MÛRIT PENDANT LE ROUSSAGE

OAD pour le suivi du rouissage du chanvre

● *Fournir un OAD aux agriculteurs, aux coopératives de chanvre... pour les aider à gérer les pailles/fibres de chanvre*



| | | | | |
|-------------------------|---|---|---|---|
| • Morphology | x | x | x | |
| • Chemical composition | x | x | | x |
| • Surface properties | | x | | x |
| • Mechanical properties | x | x | x | |
| • Specific properties | | | | x |

Genetic & Agronomy Agricultural practices Fractionation Functionalization

Pratiques agricoles AVEC rouissage >> effet des variations intraspécifiques et/ou des conditions agronomiques

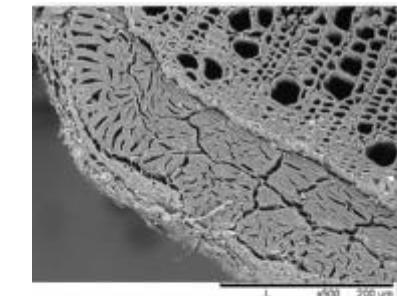


Le rouissage apparaît comme un élément clé pour fournir des fibres de chanvre à de nombreux marchés techniques et textiles

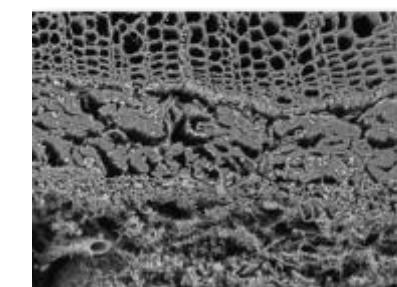
- De nombreux travaux et une grande diversité de processus...
- ... mais le rouissage à la rosée semble actuellement être la méthode la plus répandue : simple et peu coûteuse.

Inconvénients du rouissage à la rosée :

- Lié aux conditions pédoclimatiques : humidité et température → niveau variable de rouissage / peut entraîner une hétérogénéité qualitative des lots
- Aucun indicateur ne mesure objectivement le niveau de rouissage → Risque de lots non conformes



No retted hemp stem



Retted hemp stem (5 weeks)

OAD pour le suivi du rouissage du chanvre

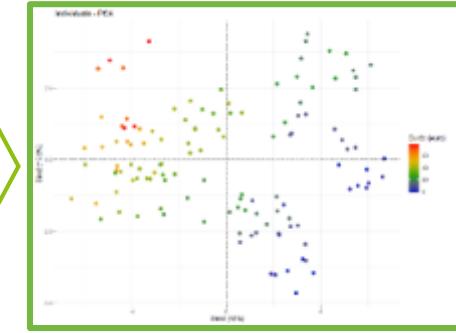
● Développement d'un premier OAD pour les pailles et fibres de chanvre

Projet RIGHTLAB :

- Évaluer l'impact du rouissage pour contrôler/certifier la qualité des pailles/fibres
- Rechercher des méthodes simples pouvant être utilisées sur le terrain/à l'usine.
- 3 marchés cibles : non-tissés / composites TP / textiles



5 à 8 semaines



Projets SUNRISE / CHRISTIE : un continuum d'actions/projets permis avec 4FM lab

- Discussions avec les agriculteurs/agents de terrain afin d'identifier leurs besoins/contraintes en matière d'outils de mesure et de méthodes accessibles
- Collecte à grande échelle (~150) de paires d'échantillons (paille/fibres de chanvre) pour le suivi du champ jusqu'à l'utilisation des fibres
- Caractériser les échantillons à l'aide de méthodes à « faible débit » (référence) ET à « haut débit »
- Étude statistique et stratégie d'IA : corrélations entre les données à faible/haut débit
- Sur 3 ans : validation sur le terrain et tests OAD sur 45 parcelles/champs (~250 ech)



Grande base de données



1^{er} OAD pour les pailles/fibres de chanvre → Ical



Récolte



Stockage



Extraction

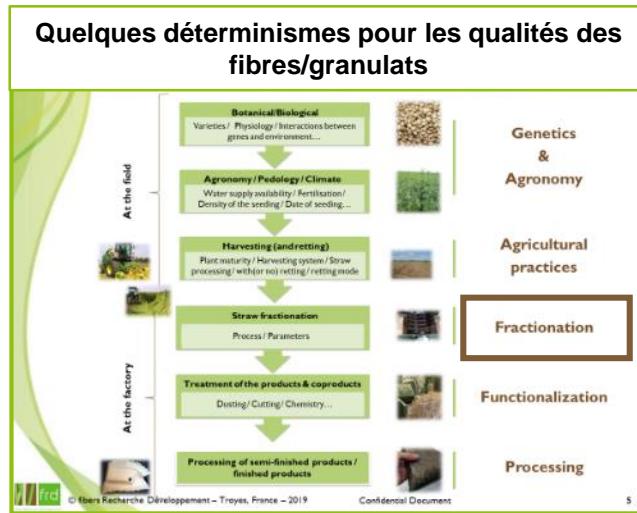


Transformations

PARTIE III : **LA QUALITÉ ÉVOLUE SUITE À L'EXTRACTION MÉCANIQUE**

Évaluation de l'hétérogénéité du lin

● Identification empirique et mesures morphologiques



Thèse T. Peyrache / Projet LinPLUS

- Identification de 5 lots de fibres par tri empirique
- Morphologies différentes (diamètre et facteur de forme)
- Présence de fractions de tissus externes (assemblage de faisceaux) et de faisceaux de fibres élémentaires
- Hétérogénéité qualitative provenant du processus d'extraction (rouissement + teillage)

Balle de fibres
teillées



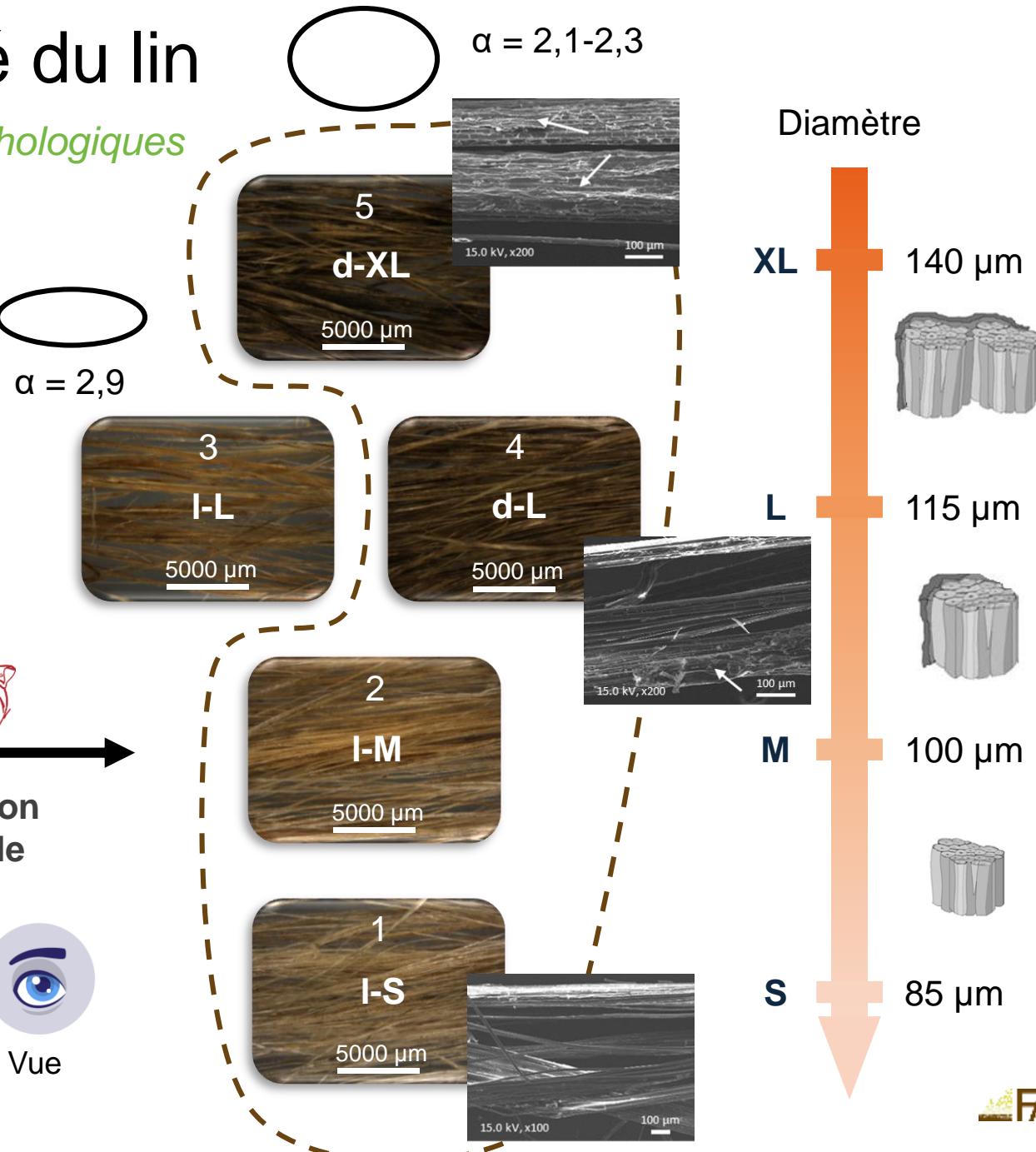
Séparation
manuelle



Toucher

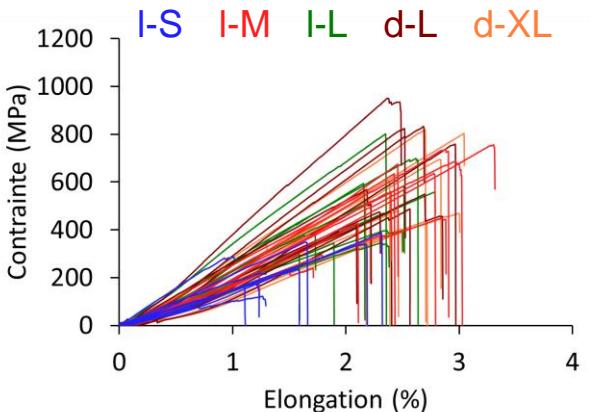
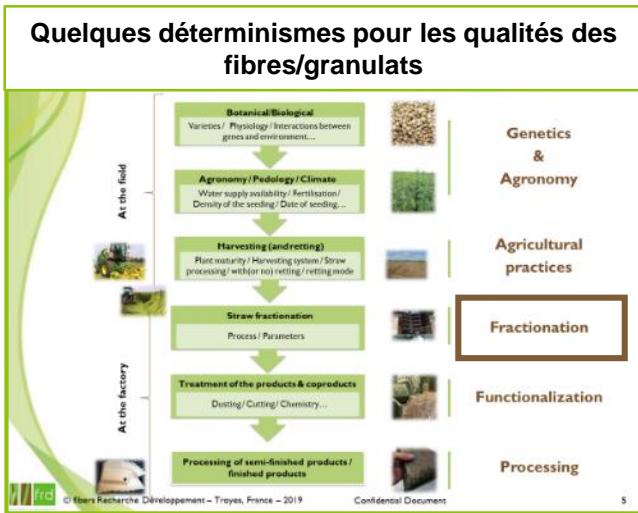


Vue

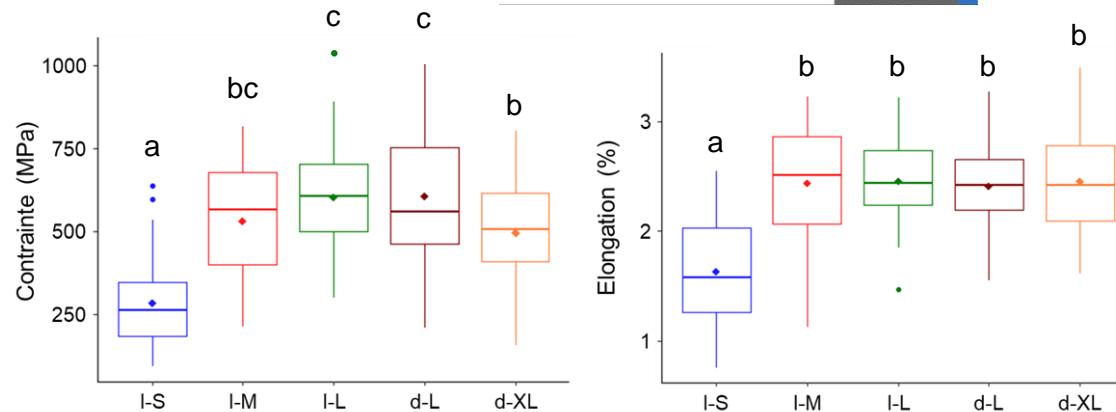


Évaluation de l'hétérogénéité du lin

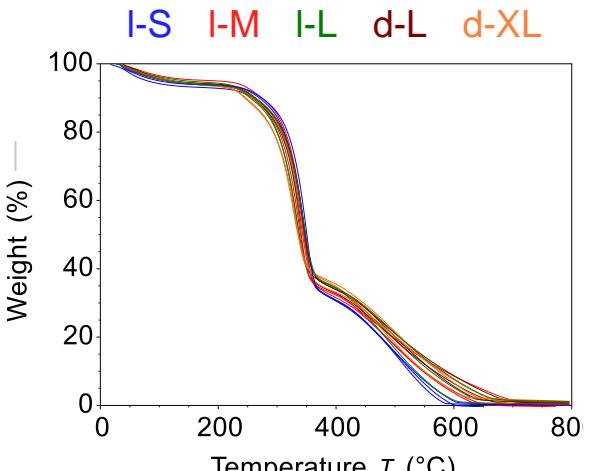
● Propriétés mécaniques et thermiques



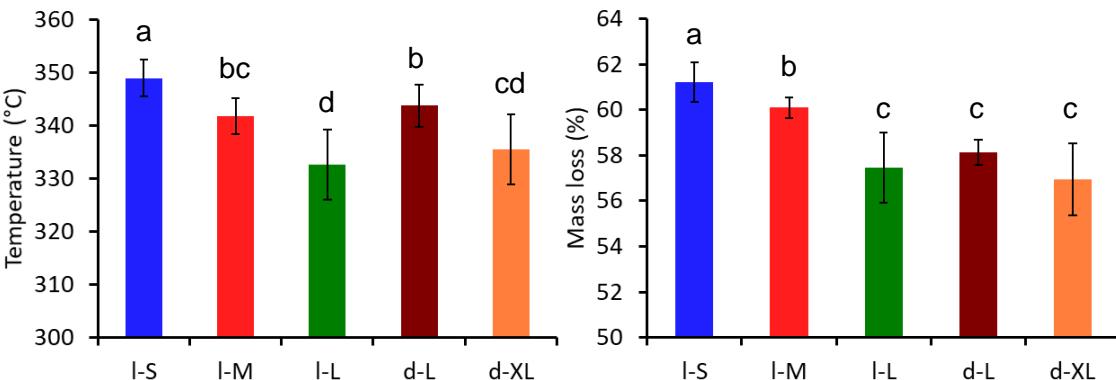
Courbes des essais de traction



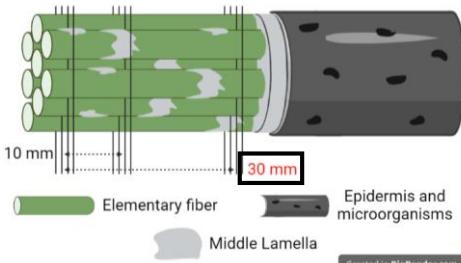
Contrainte et élongation à rupture des fibres techniques



Thermogrammes



Température et perte de masse du complexe cellulosique

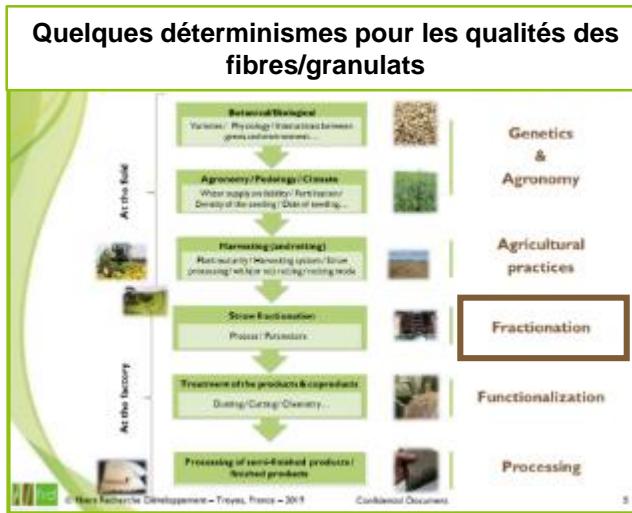


Thèse T. Peyrache / Projet LinPLUS

- Les fibres les plus fines et riches en cellulose (I-S) ont des propriétés à rupture plus faibles (tests sur 30 mm)
- Meilleure résistance thermique des fibres contenant moins de résidus d'épiderme
- Propriétés hétérogènes à l'issus de l'extraction → valorisation ?

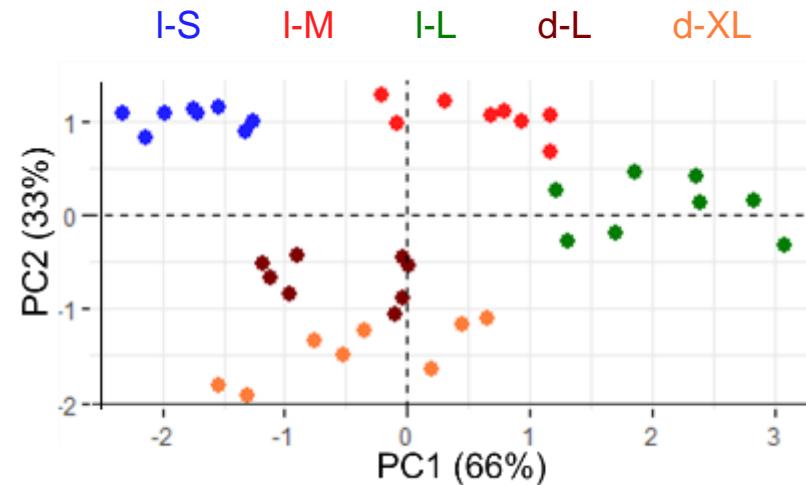
Évaluation de l'hétérogénéité du lin

● Mesure de l'hétérogénéité

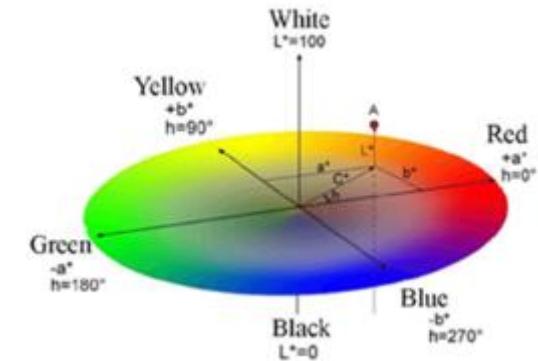


Thèse T. Peyrache / Projet LinPLUS

- Discrimination métrique par colorimétrie
- Séparation objectivable et réalisable avec une analyse haut-débit
- Transposition à des échelles plus grandes (en fonction des variétés et années par ex.)
- Evolution en fonction des transformations ?



Analyse en composantes principales discriminant les fibres sur les paramètres de couleur L^* , a^* , b^*



Domaine colorimétrique CIELab

(L^*, a^*, b^*)



Récolte



Rouissage



Stockage



Extraction



Transformations

PARTIE IV :
LA QUALITÉ CHANGE DURANT LES
TRANSFORMATIONS INDUSTRIELLES
& DOIT ÊTRE SUIVIE

OAD – suivi des qualités au cours des transformations industrielles



● Projet NAFLab (2022 – 2026)



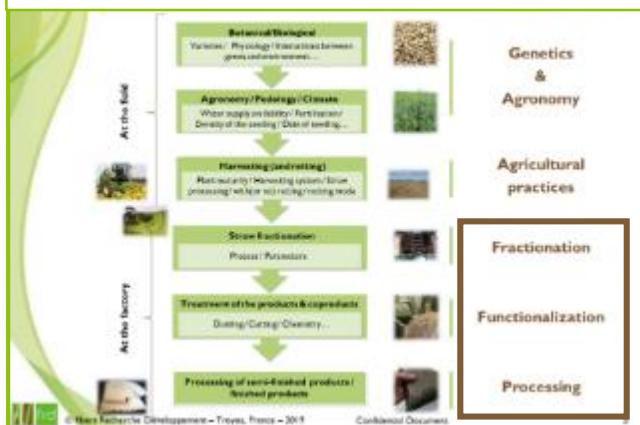
Suite du projet ENAFILIA



- 2015-2022 - 8,03 M€ / Forvia, APM, FRD-CODEM
- Développement du matériau NAFLlean Perf
- Réviser l'ensemble du processus de production technique → de la paille au produit fini
 - Sélection des qualités de paille et de fibres
 - Séparation de paille/fibres
 - Traitement des fibres : physique, mécanique, chimique
 - Mélange de différents ingrédients/compounding
 - Injection/moulage



Quelques déterminismes pour les qualités des fibres/granulats



La gestion de la qualité est un élément clé pour les chaînes de valeur dans l'industrie automobile



NAFLab → Massification de l'utilisation de NAFLlean Perf

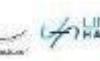


- Identifier les méthodes analytiques permettant de qualifier les fibres de chanvre et les composés à chaque étape
- Transférer ces méthodes à l'échelle industrielle
- Mettre en œuvre des outils pour le suivi des processus



OAD – suivi des qualités au cours des transformations industrielles

● Projet ICHAT (2024 – 2027)



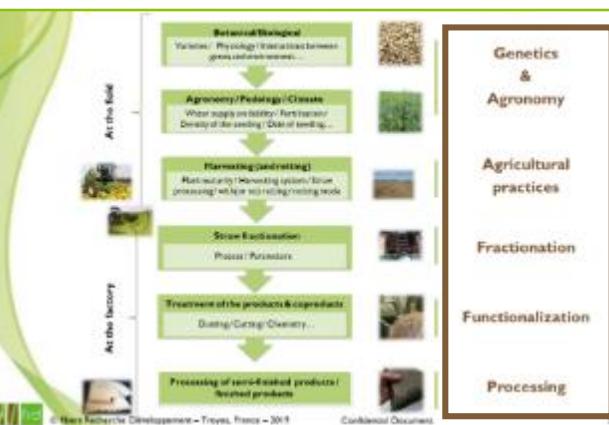
Contexte

- Demande croissante de produits textiles à base de chanvre pour toutes les applications
- L'expertise textile industrielle française en quête d'innovation
- Projets de R&D à l'échelle laboratoire → Nécessité de tests à l'échelle industrielle

Objectifs du projet

- Réduire les risques liés aux futurs investissements industriels en analysant les différentes technologies d'exploitation de la fibre de chanvre selon plusieurs critères :
 - Faisabilité technique, ACV et coûts d'entrée/sortie du marché.

Quelques déterminismes pour les qualités des fibres/granulats



Stratégies

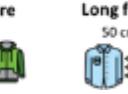
- Collaboration étroite entre les acteurs industriels
- Échanges interlaboratoires pour améliorer le contrôle de la qualité
- Réalisation d'analyses bibliographiques, techniques et matérielles au niveau européen et mondial (ASTM...)



industrie du chanvre toxique



Complexity and high added value



Trois typologies de fibres de chanvre :

- 20-30 mm, 10-20 cm and 50 cm

Différents itinéraires techniques textiles

Marché des applications diverses

- Vêtements, composites, ficelles...

Adapter la paille et les fibres
au marché approprié

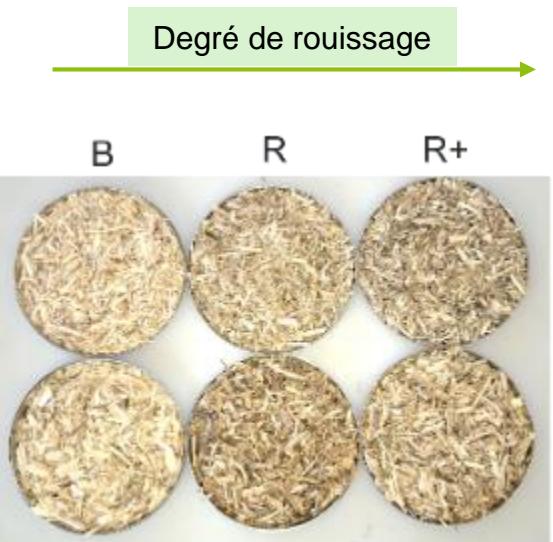
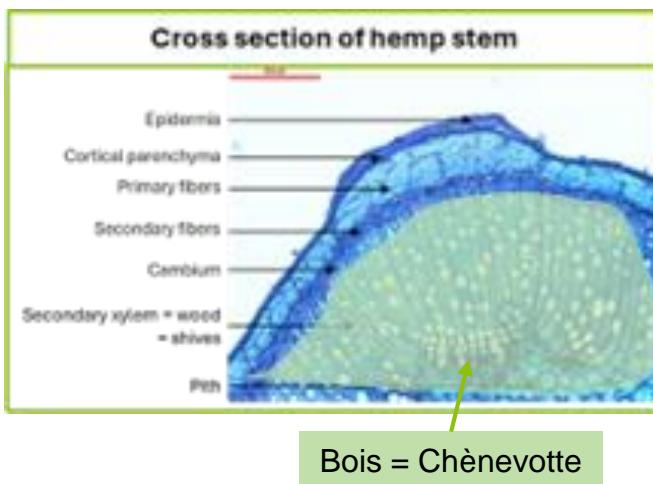
OAD – suivi des qualités au cours des transformations industrielles

● Projet CHABLER (2025 – 2028)



Contexte

- L'industrie du chanvre repose sur la valorisation complète de la paille (fibres & chènevotte)
 - Les marchés techniques pour les fibres ont besoin de paille rouie → Augmentation des volumes de chènevotte grise
 - Le label CenC pour la construction en chanvre et les règles professionnelles (2007) régit l'utilisation de la chènevotte pour le béton
- Stabilité de six exigences, dont la couleur blanche (chènevotte non rouie)



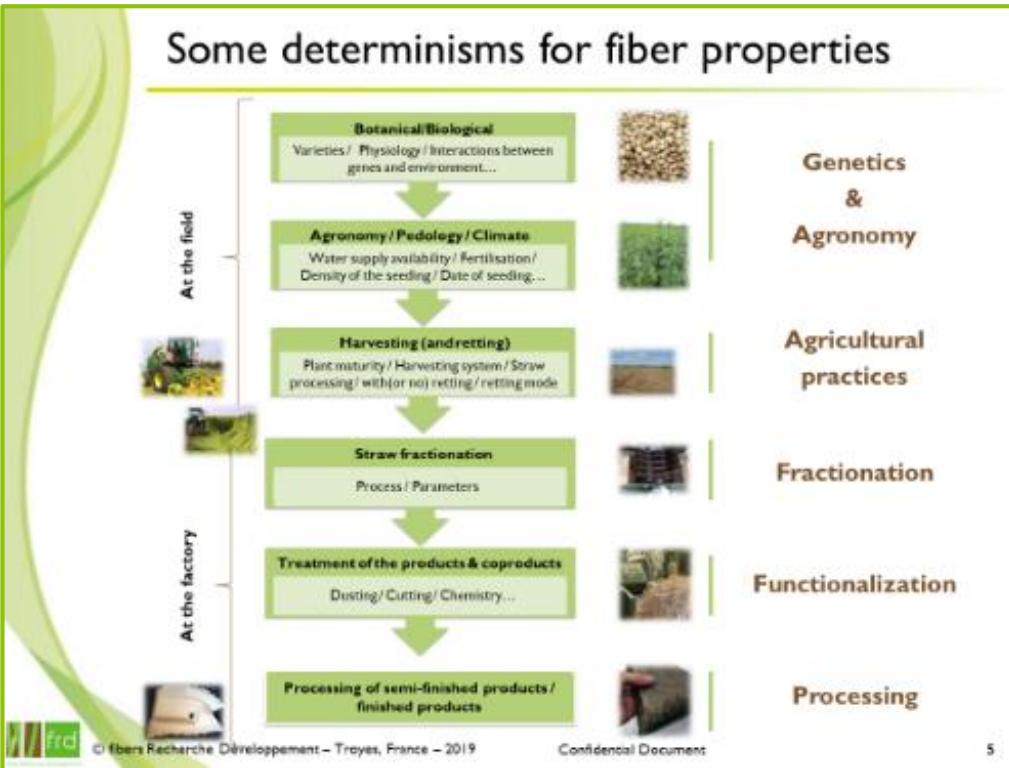


EN RÉSUMÉ :
**CONSTRUIRE DES OAD : UN DÉFI DE TAILLE
POUR LES BESOINS INDUSTRIELS**

Construire des OAD : un défi de taille pour les besoins industriels



● Développement d'OAD pour les tiges/fibres de chanvre à tous les niveaux de la chaîne de valeur



Le développement des marchés techniques et textiles du chanvre et du lin nécessite de savoir comment classer la biomasse sur le terrain

- Ical : premier OAD pour le suivi du rouissage du chanvre
- Travaux en cours pour concevoir de nouveaux OAD tout au long de la chaîne de valeur



Corrélation d'informations « distantes » : relier les champs aux matériaux

Disposer de données pertinentes, représentatives et de haute qualité



Transfert de technologie

- LPA / Labcom / CRT / Carnot semble être une excellente opportunité



Les techniques conventionnelles sont essentielles, mais souvent précises et chronophages → Coût

Merci de votre attention



Merci aux partenaires



Merci aux financeurs

