



Carrefours de l'innovation
agricole

5 novembre 2019 | Espace de conférence IRIS | PARIS



« Améliorer la qualité nutritionnelle des aliments »

**Enrichissement des produits céréaliers en fibres
alimentaires : opportunités & contraintes technologiques**

Guy Della Valle, Hubert Chiron & Luc Saulnier

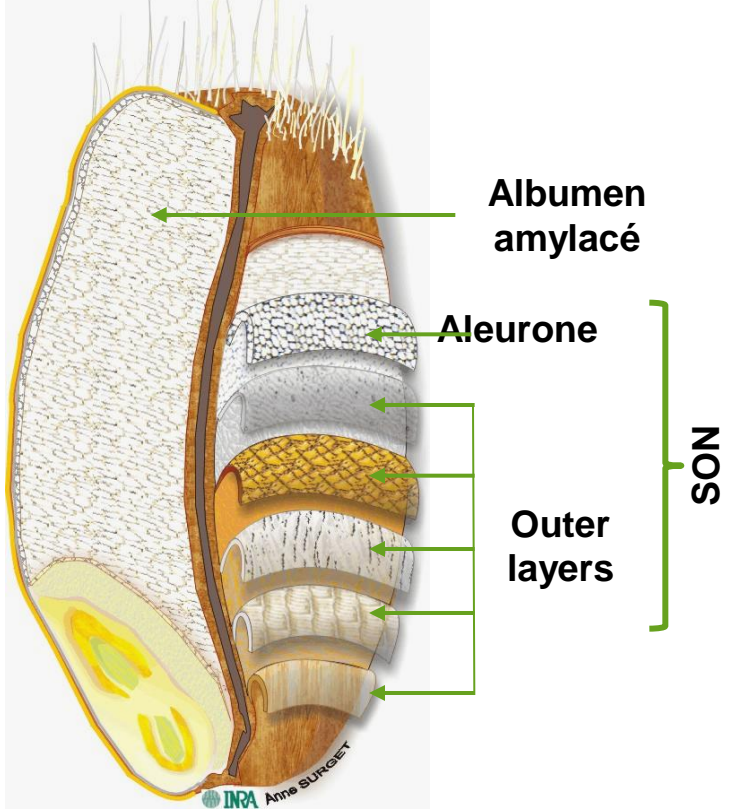


Définition des fibres alimentaires

➤ Directive 2008/100/EC

- **Polymères de glucides (DP>3), qui ne sont ni digérés ni absorbés au niveau de l'intestin grêle de l'homme appartenant aux catégories suivantes:**
 - présents naturellement dans les aliments (+lignines et composés associés)
 - extraits des végétaux et avec des effets bénéfiques scientifiquement démontrés
 - synthétiques avec des effets bénéfiques scientifiquement démontrés

Les fibres alimentaires dans le blé (Teneur: 12-18% p/p (grain entier))



Albumen amylicé
(80-83 % du grain)
~ **25% des fibres**
Amidon & protéines

Couche à aleurone
(6-7 % du grain)
~ **25% des fibres**
P, Mg, Mn, Fe
Vitamines, choline, bétaine
Lignanes

Enveloppes externes
(6-8 % du grain)
~ **50% des fibres**
Lipides phénoliques

Nature des parois

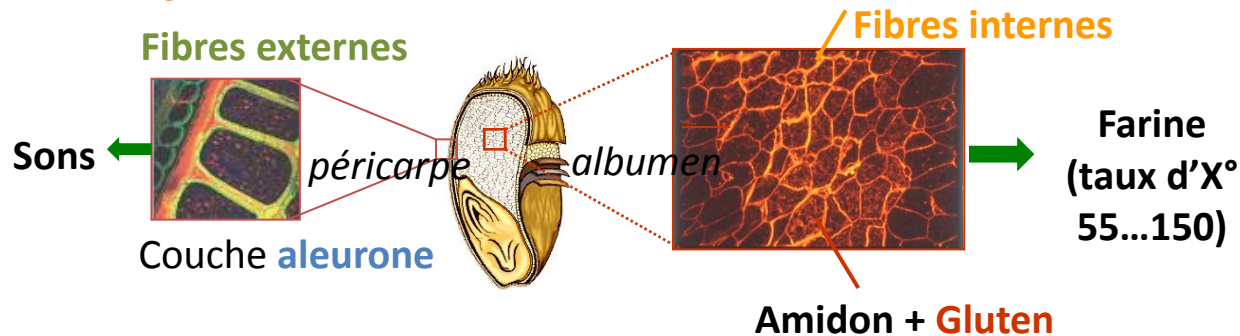
ArabinoXylanes (AX)
Beta-Glucanes
partiellement hydrosolubles
+ Cellulose

≠

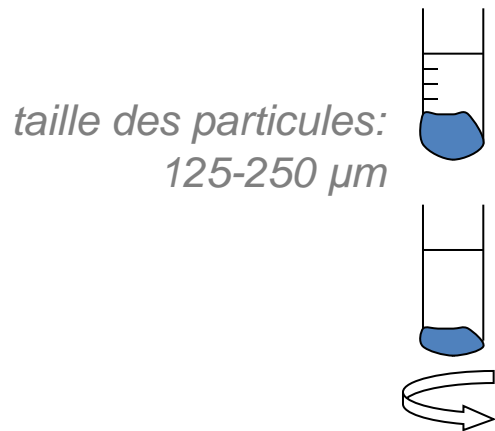
Xylanes
Cellulose
+ *Lignines*

+ Fructanes
~2 % du grain

Localisation et propriétés d'hydratation des fibres



	Son	Albumen
Gonflement (mL/g)	7	14
Capacité de Rétention d'Eau (CRE) (g/g)	5	10
Solubilité	0	+/-



Incorporation de fibres dans les aliments céréaliers

Opportunités / Contraintes

* Principaux fournisseurs de fibres alimentaires dans le régime alimentaire occidental

* Bon moyen d'atteindre les recommandations de consommation de fibres chez l'adulte (25 à 30 g par jour)

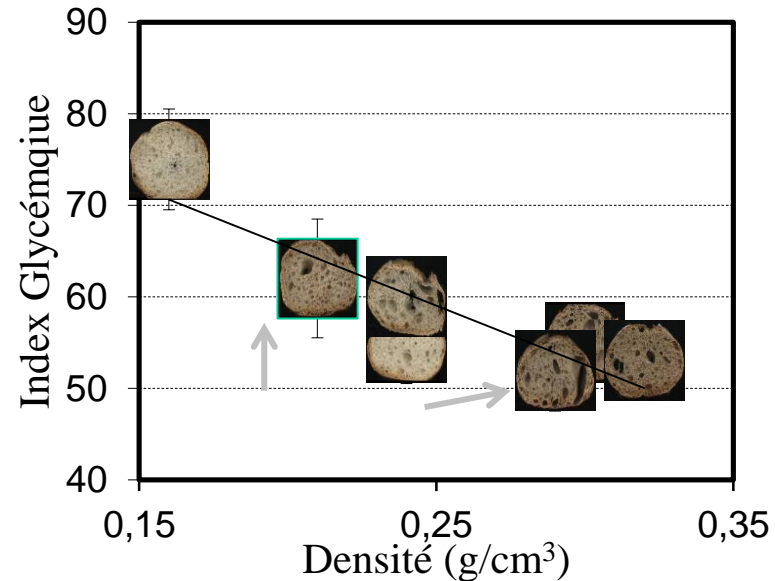
MAIS

- Réduction du volume de la mie et donc à une densification (du pain)
- Effet plutôt bénéfique sur le plan nutritionnel:

Baisse de l'index glycémique

- Croûte moins croustillante, mie + sombre, très ferme, plus sensible à l'émiettement.

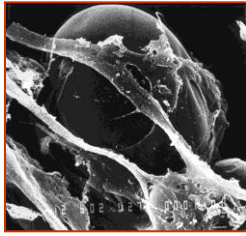
=> Mécanismes d'actions sur les procédés d'élaboration des aliments céréaliers.



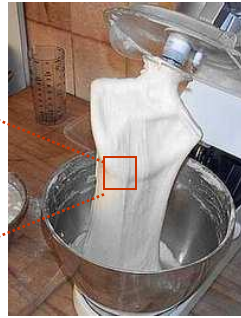
Contexte : de la farine à l'aliment céréalier (pain)

Grain d'amidon

+
« réseau »
de **gluten**

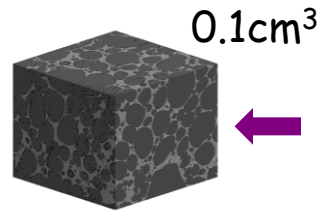


50 μ m

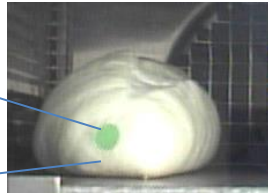
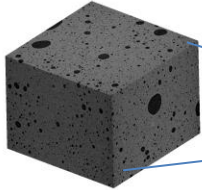


Texturation + incorporation d'air (pétrissage)

Porosité ≤ 0.2



0.1cm³



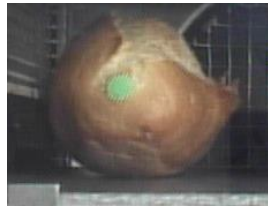
Alvéolation (fermentation)

Porosité = 0.1-0.7



Façonnage = laminage, étirement, enroulement

Réticulation
du réseau **gluten**
(+ gonflement **amidon**)

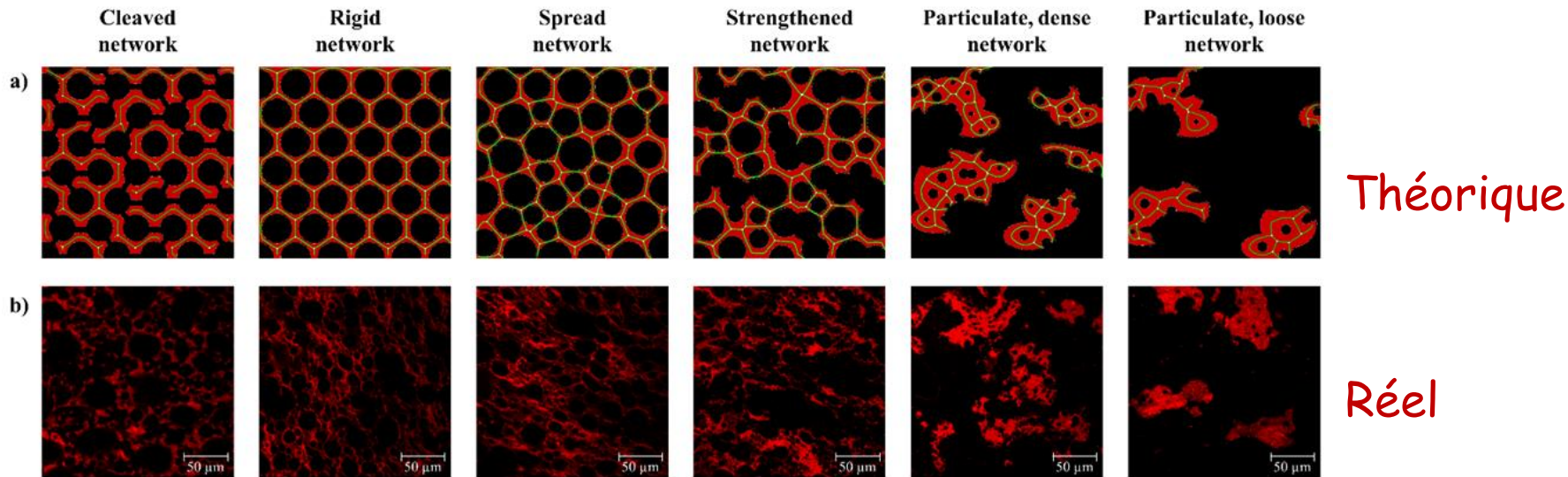


Cuisson: acquisition de la texture

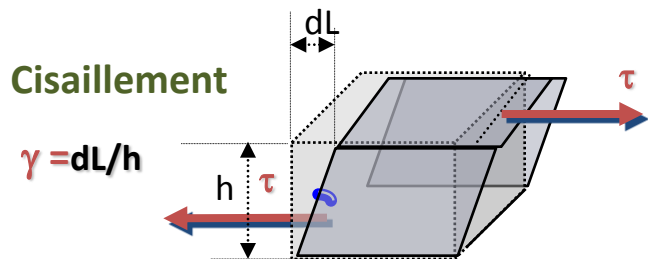
Porosité = 0.6-0.8

Imagerie (μ scopie confocale, MCBL) du réseau de gluten (215 μm)²

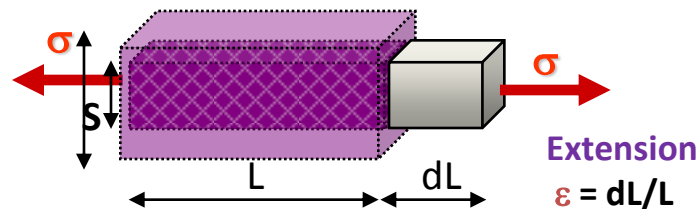
(Lucas et al., *Polymers*, 18, *Sci. Rep.*, 19)



Analyse d'images et quantification difficiles => mesure des **propriétés rhéologiques**

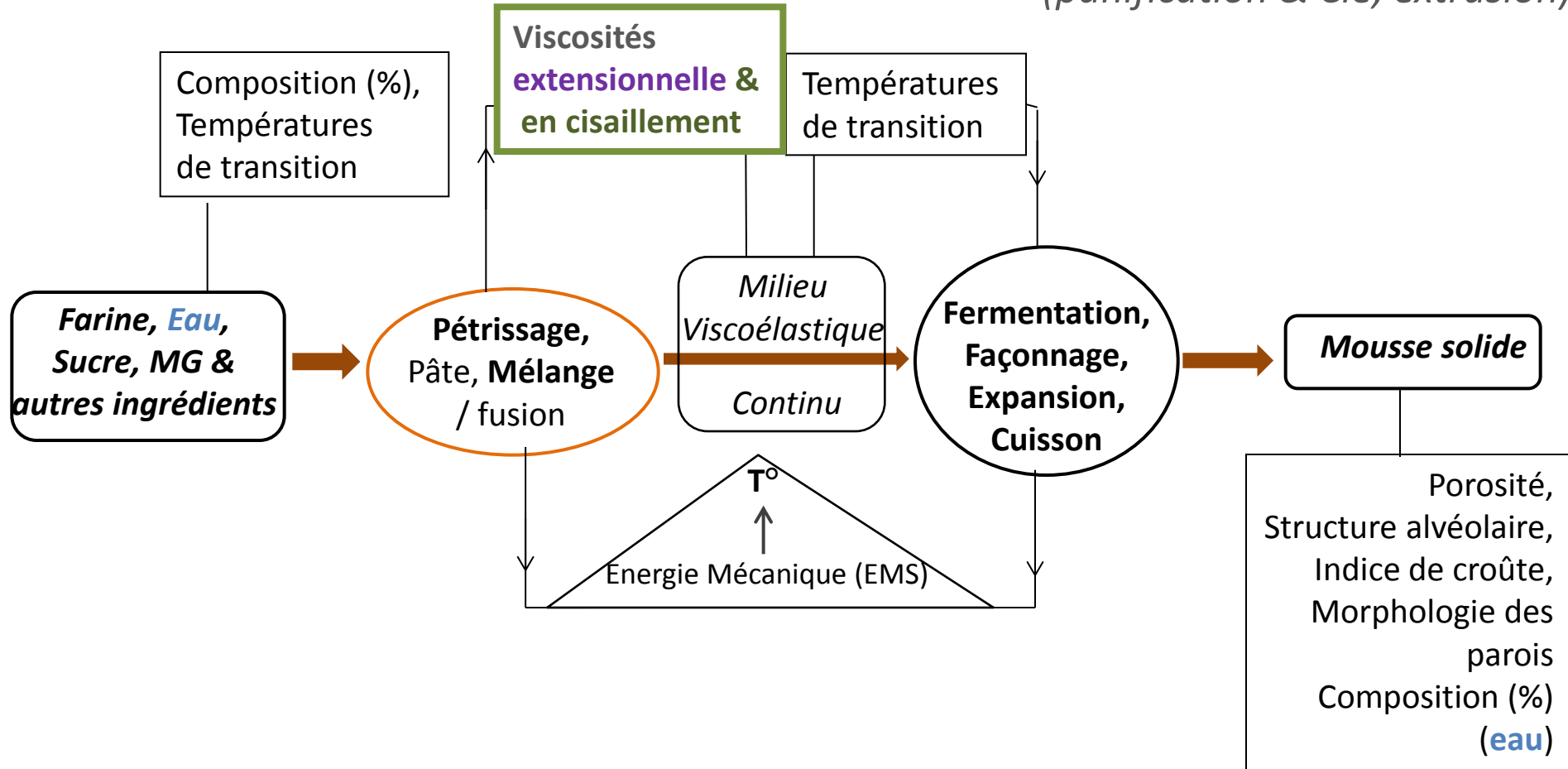


Les 2 modes de déformation



Représentation systémique de l'élaboration d'aliments céréaliers

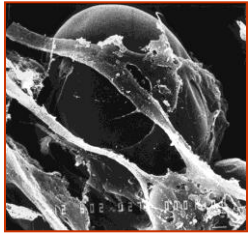
(panification & Cie, extrusion)



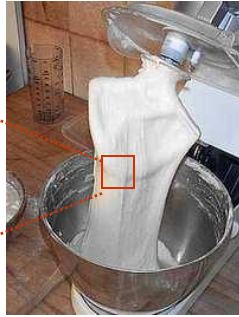
Contexte : de la farine à l'aliment céréalier (pain)

Grain d'amidon

+
« réseau »
de **gluten**



50µm

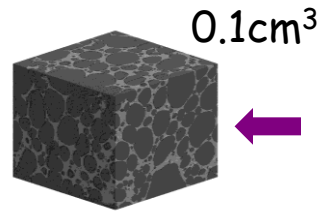


Texturation + incorporation d'air (pétrissage)

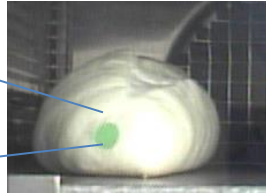
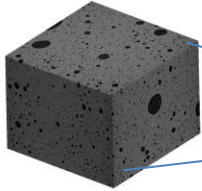
$$\dot{\gamma} = 10-10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\varepsilon} = 1-10 \text{ s}^{-1}$$

Porosité ≤ 0.2



0.1cm³



Alvéolation (fermentation) Porosité = 0.1-0.7

$$\dot{\varepsilon} = 10^{-3} - 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$



Façonnage = laminage, étirement...

$$\dot{\gamma} = 1-10^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\varepsilon} = 10^{-1} - 10 \text{ s}^{-1}$$

Réticulation
du réseau **gluten**
(+ gonflement amidon)



Cuisson: acquisition de la texture

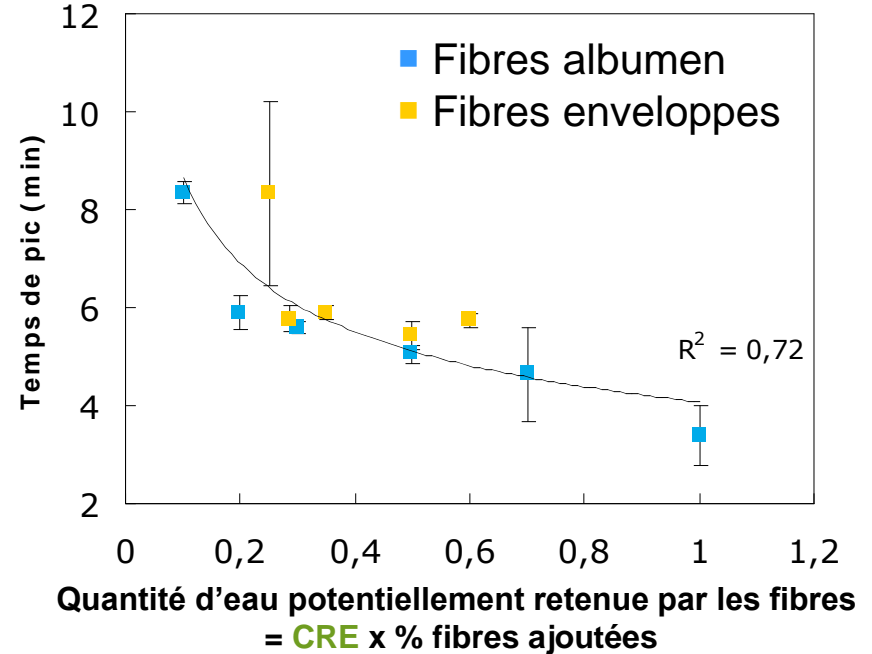
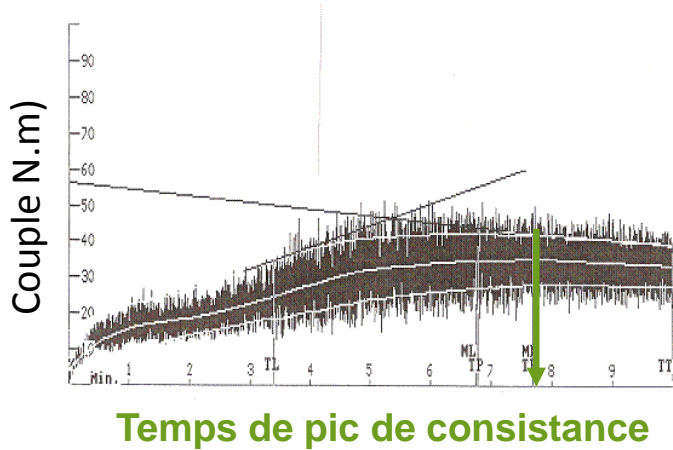
$$\dot{\varepsilon} = 10^{-2} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Porosité = 0.6-0.8

Effets des fibres sur la formation de la pâte

Formation de la pâte

Pétrin à aiguilles Mixograph®
Farine, eau salée, **fibres** (≠ %)
Hydratation constante 66%

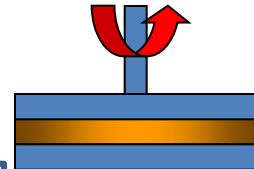


- Quelque soit leur origine, les **fibres** ont le même mécanisme d'action sur la formation de la pâte, **lié à la quantité d'eau qu'elles retiennent**

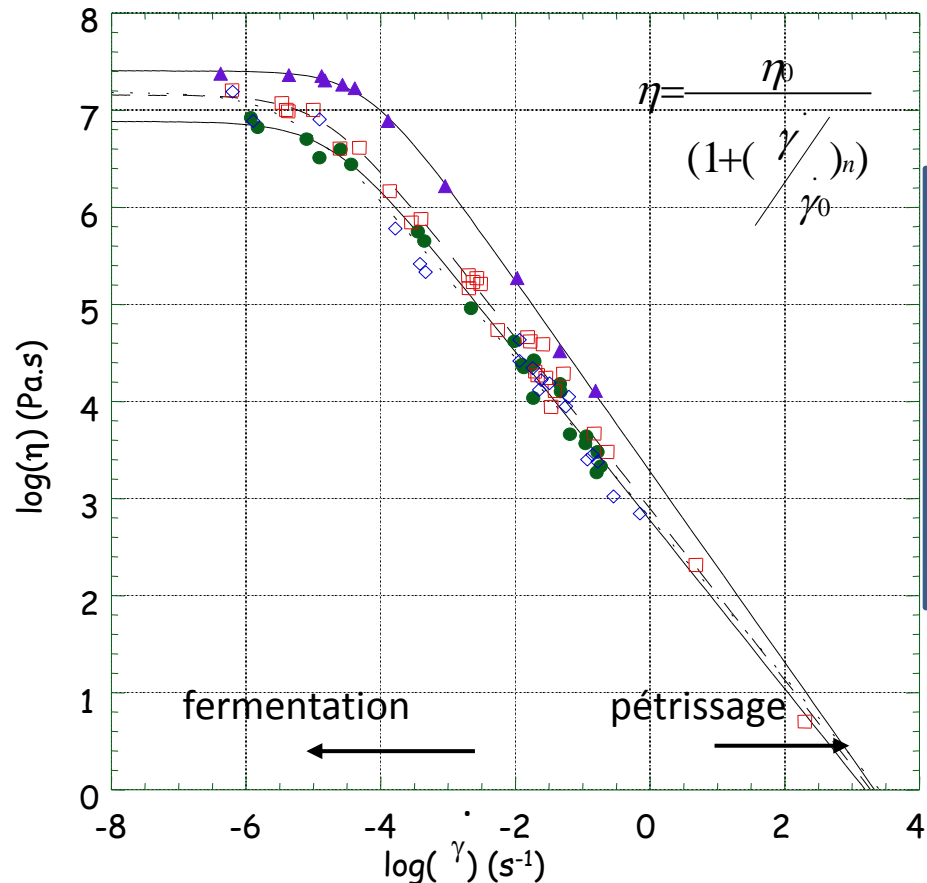
Courbes d'écoulement de pâtes en cisaillement

$$\eta(\dot{\gamma})$$

Contrainte σ
imposée



Plateau fixe
(T=20°C)



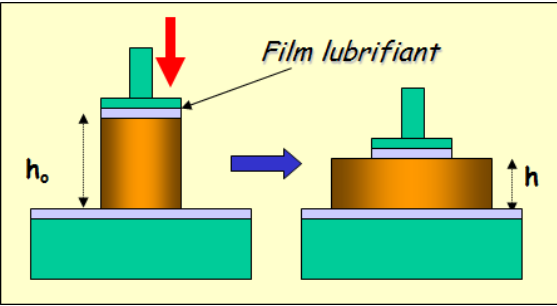
AX=ArabinoXylanes

	η_0	$\dot{\gamma}_0$	n
	(10^6Pa.s)	(10^{-5}s^{-1})	
● Témoïn	7,7	1,9	0,87
◇ + 1% AXs	15	0,47	0,82
□ + 1% AXi	14	1,5	0,88
▲ + 9% AXi	25	6,3	≈1

Les pâtes enrichies en fibres gardent le même comportement visqueux mais la présence des **fibres insolubles** renforce la pâte, soit par **rétenion d'eau**, soit à l'instar de **charges**.

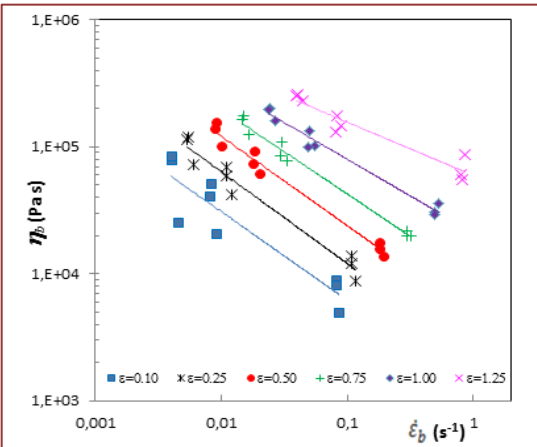
Effets des fibres sur les propriétés extensionnelles de la pâte

1-structuration



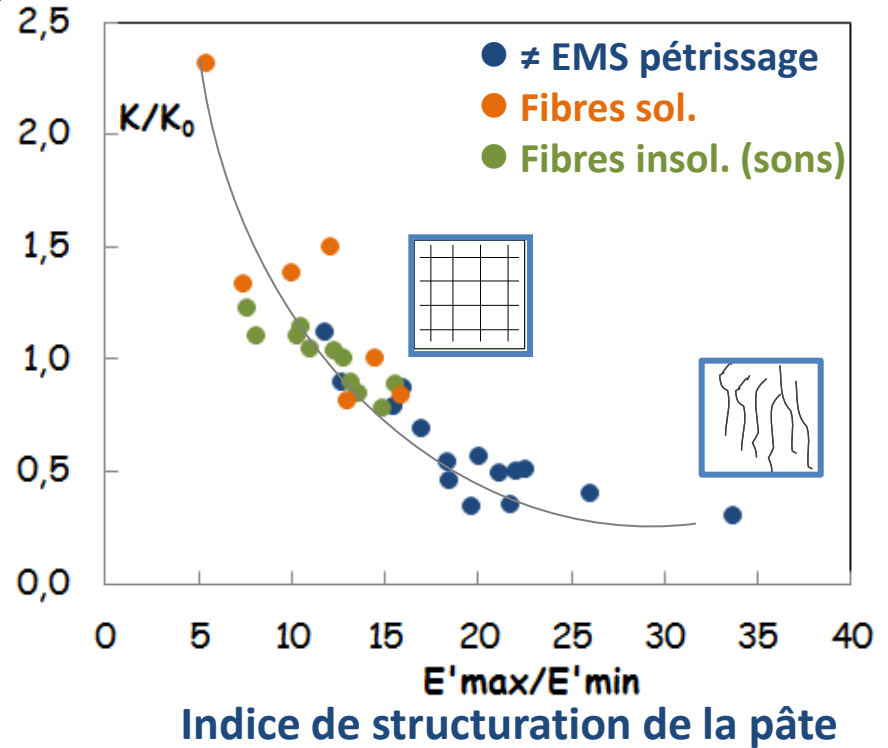
Test de Compression
Uniaxiale Lubrifié
(LSF)

Courbes d'écoulement



$$\eta = K(\dot{\epsilon}_b)^{n-1} \quad e=cst$$

K = consistance
 K_0 = ... de la pâte
(sans fibres ajoutées)



L'addition de fibres (∇ origine) accroît les propriétés extensionnelles de la pâte, à l'instar d'une structuration ou d'un renforcement du réseau.

Effets des fibres sur les propriétés extensionnelles de la pâte

2-charges

Les fibres agissent-elles
comme des **charges**
dans la matrice amidon-gluten ?

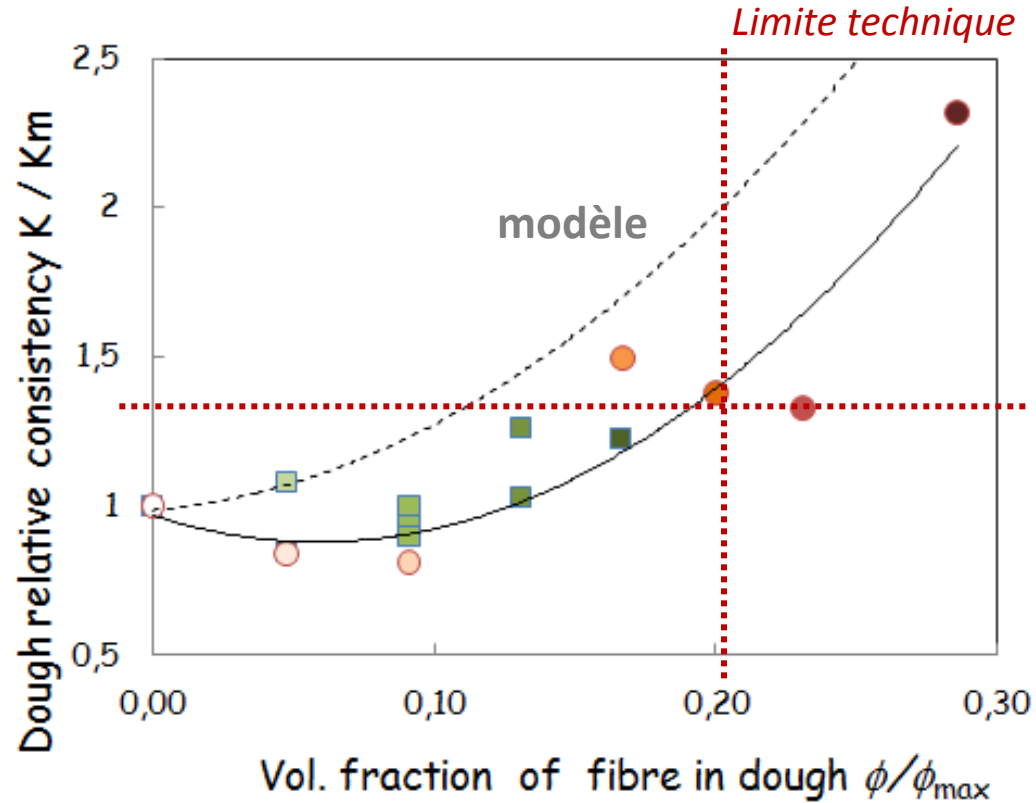
Modèle de **suspension** * :

$$K = K_0 (1 - \phi / \phi_{max})^{-2}$$

K_0 = consistance de la pâte sans fibres ajoutées

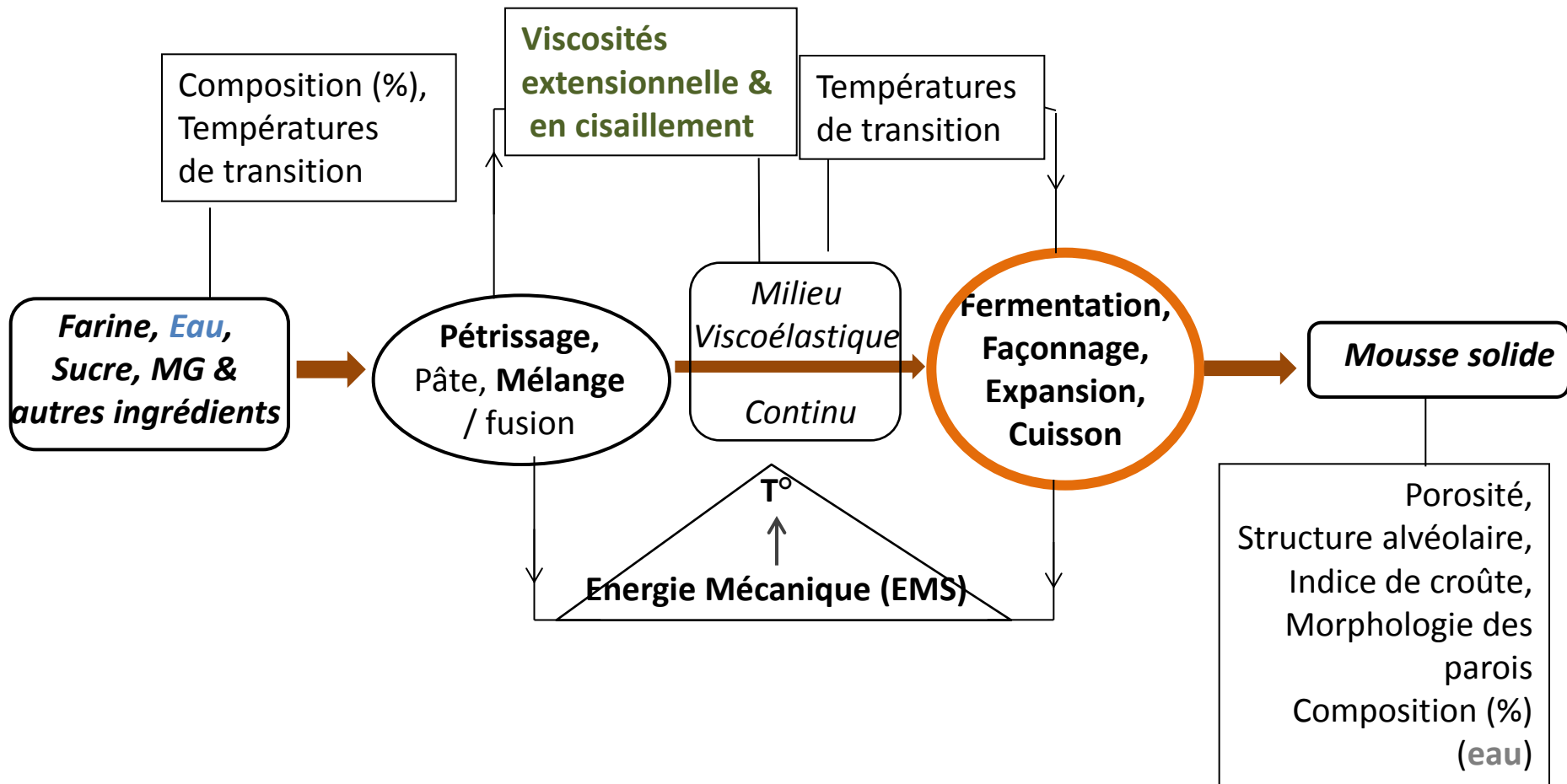
ϕ = fraction volumique des particules

* (Krieger-Dougherty, 1959)



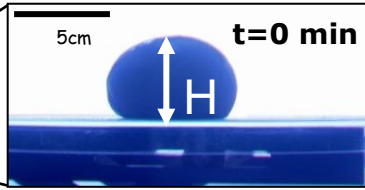
La déviation initiale du modèle de suspension peut-être due à:

(1) lubrification par l'eau ajoutée, (2) moindre développement du **réseau de gluten**

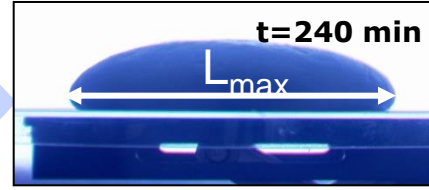


Suivi de fermentation (Porosité P et Stabilité S) de pâtes enrichies en fibres

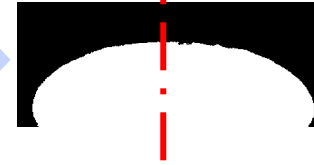
CCD Camera



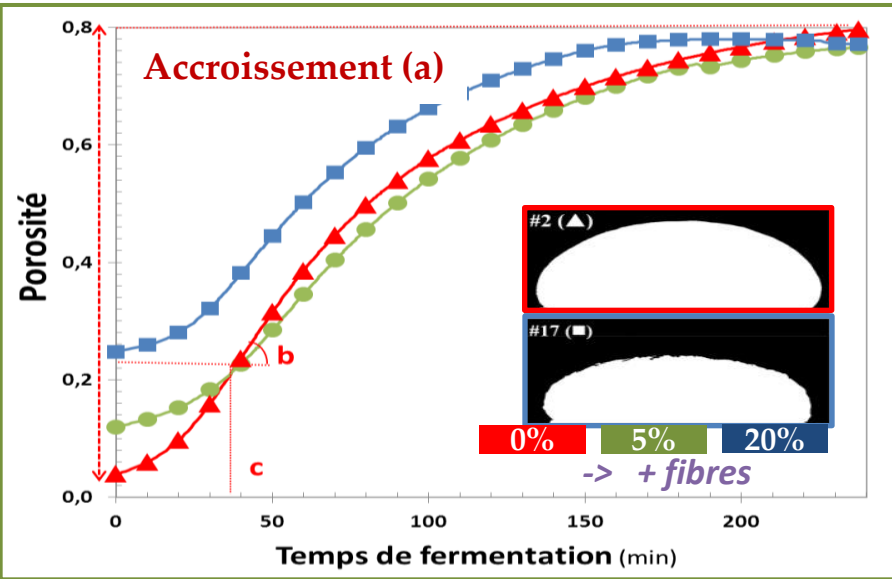
Temp. = 27°C
Aw = 75%
Fermentation



Traitement d'images



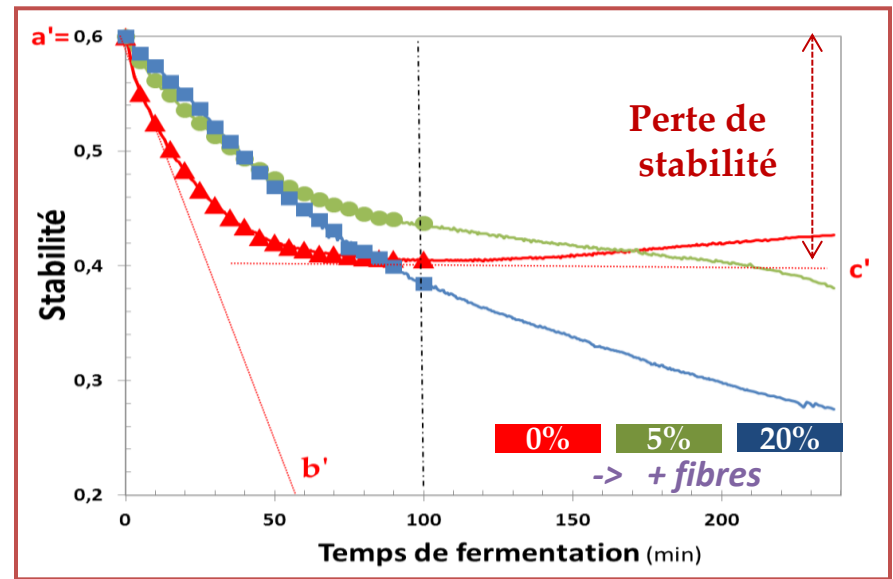
Porosité : $P(t) = \text{Volume de gaz} / \text{Volume total}$



a : Accroissement de porosité

$$P(t) = a \cdot \exp\left(-\exp\left(-\frac{b}{a} \times e(t - c)\right)\right) + d$$

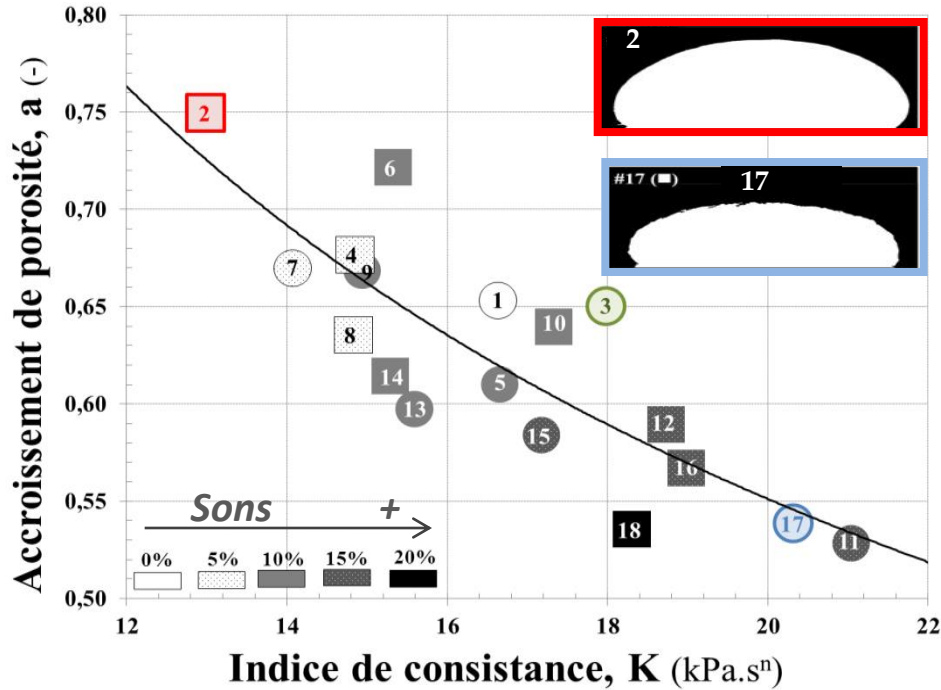
$S(t)$: Stabilité = Hauteur (H)/Largeur max (Lmax)



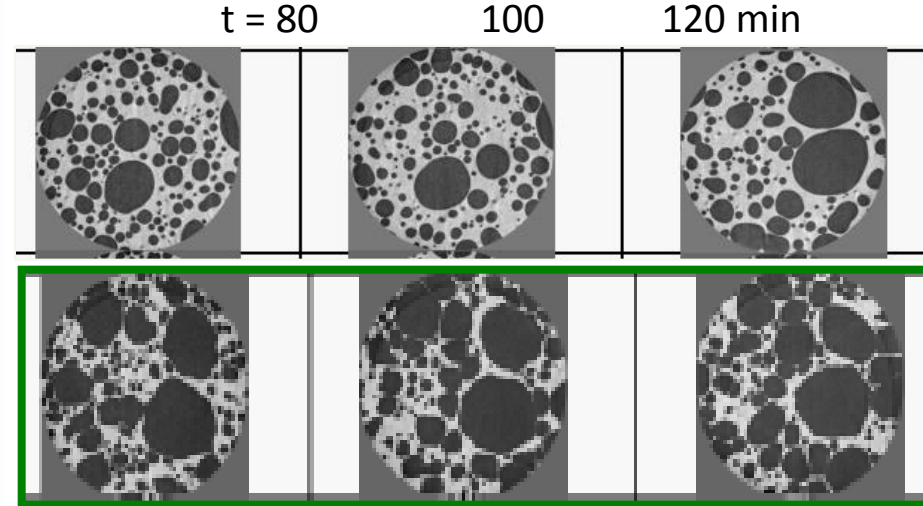
a'-c'
Perte de stabilité

$$S(t) = (a' - c') \cdot \exp^{-t/b'} + c'$$

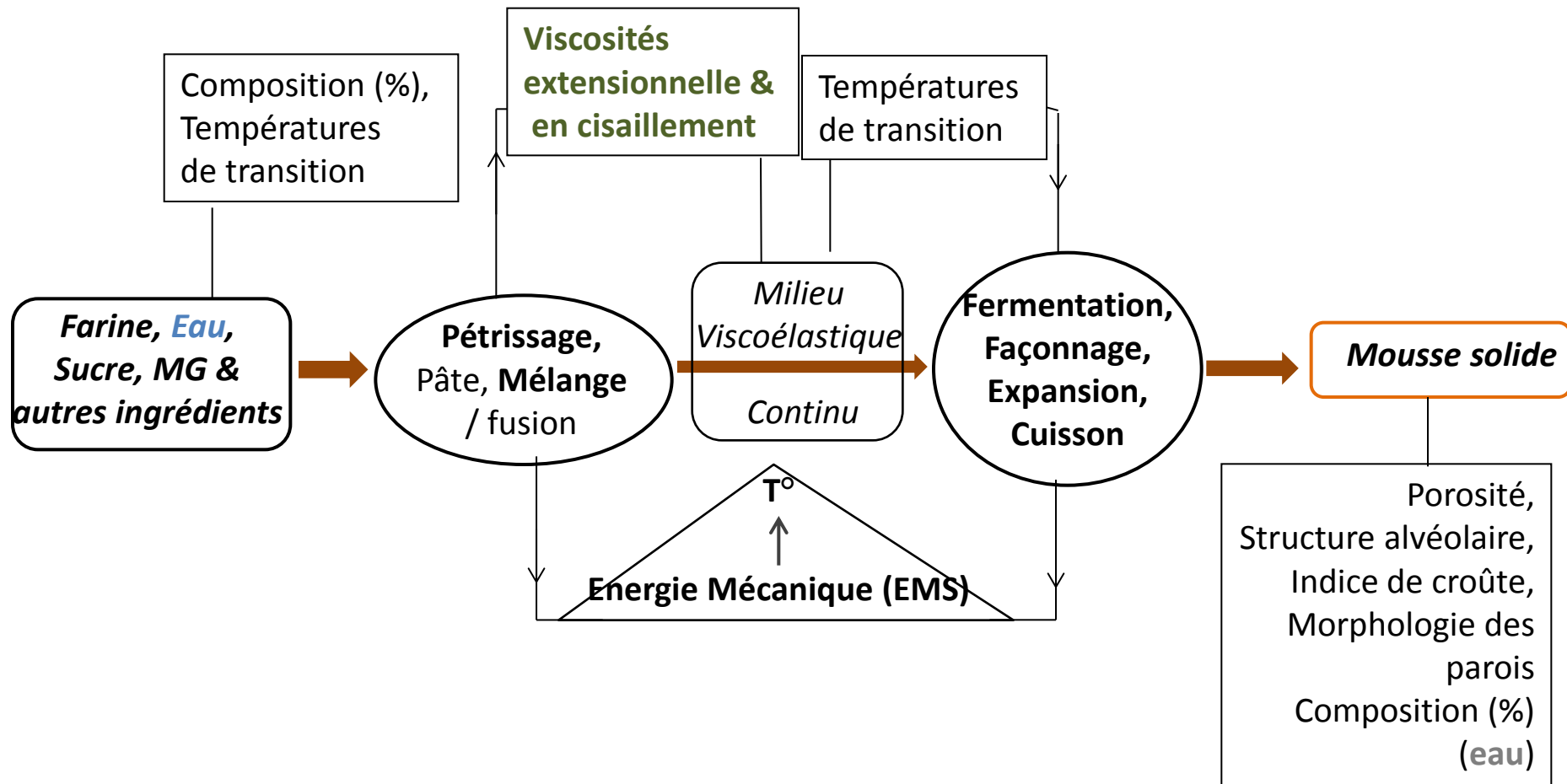
Effets des sons sur la porosité de la pâte



Images tomographie RX (\varnothing 5mm, ESRF)
de pâte en cours de fermentation



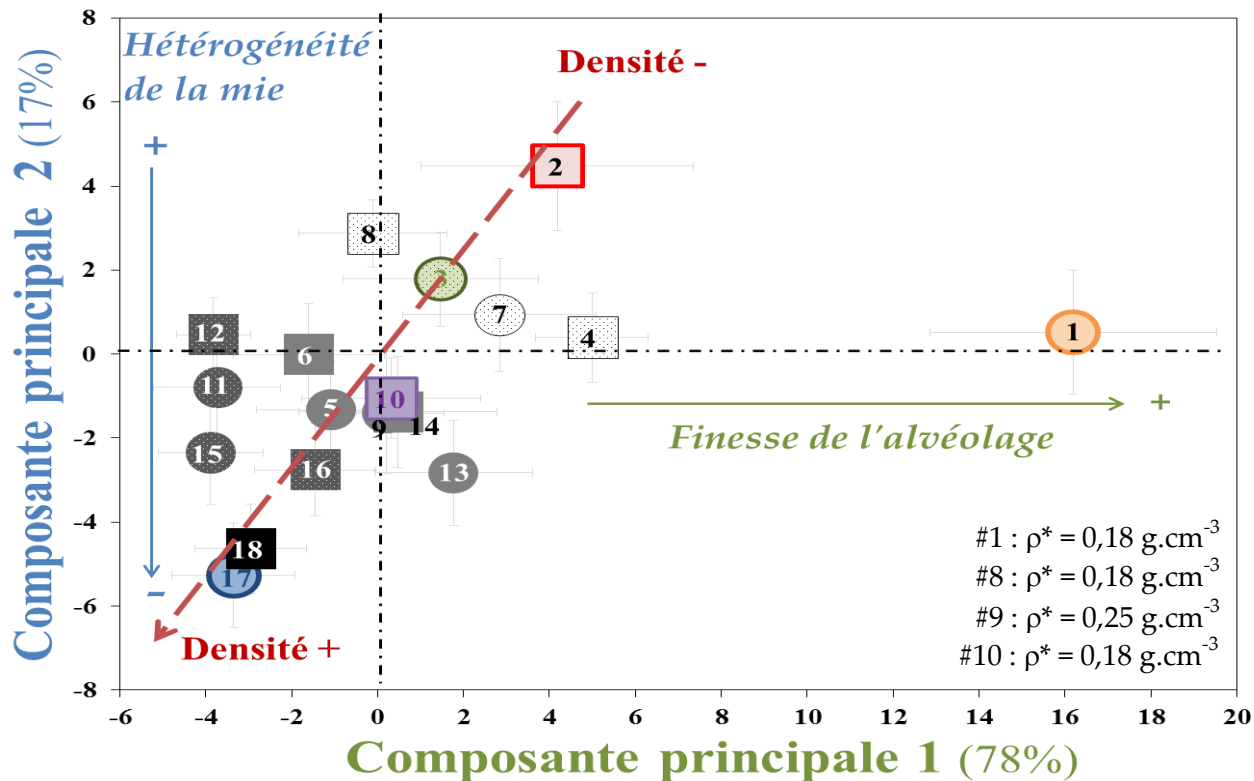
La baisse de porosité des pâtes enrichies en sons s'explique principalement par l'accroissement de viscosité et la perte de stabilité (**déstabilisation des interfaces, coalescence des alvéoles**), la densité étant définie dès la fin de fermentation.



Structure alvéolaire par analyse d'images, de pains enrichis en fibres (sons)

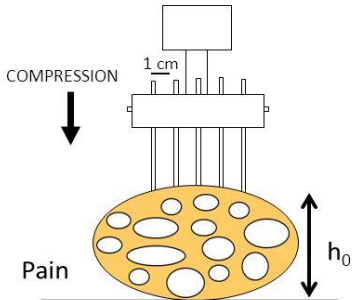
Carte de ressemblance des images de mie

(sons)

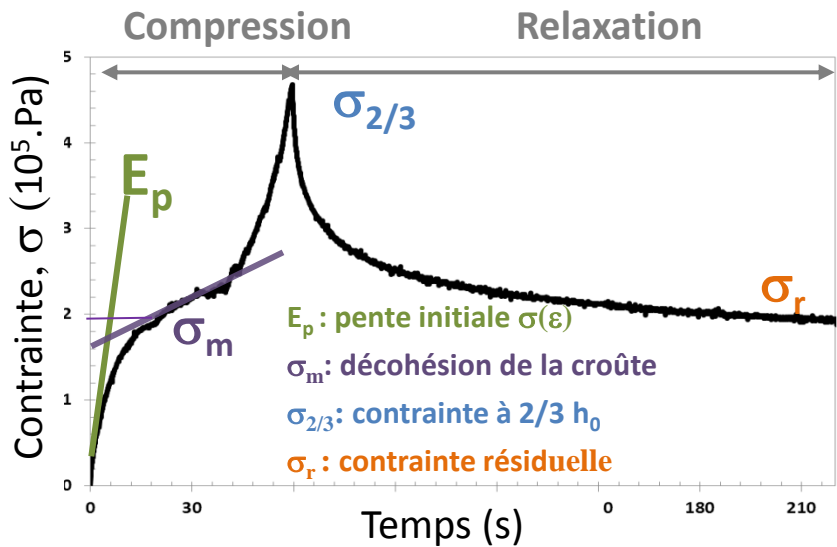


Les pains enrichis en fibres ont une structure alvéolaire plus grossière et plutôt homogène. La structure alvéolaire est essentiellement définie par la densité du pain.

Texture : Propriétés mécaniques (mie & croûte) de pains enrichis en fibres (sons)

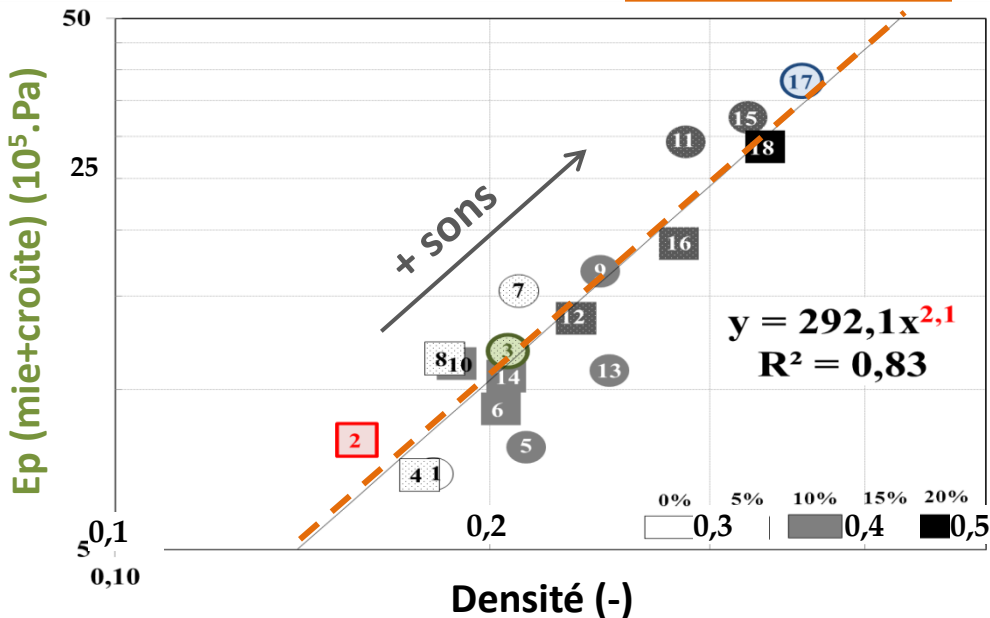


Compression/Relaxation
par multi-indentation



Modèle des
mousses solides

$$\frac{E^*}{E_s} \propto \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$



Les propriétés de texture sont gouvernées par la densité du pain: les pains enrichis en fibres ont une mie plus ferme.

Conclusion: Incorporation de fibres dans les aliments céréaliers

Effets nutritionnels > 0 mais **techniques & organoleptiques < 0**

- Les mécanismes d'actions sur la structure de l'aliment et les procédés d'élaboration peuvent être **appréhendés par la mesure des propriétés rhéologiques** (& imagerie).
- Approche analogue \forall **aliment élaboré**, mais aliments préservant la structure initiale (ex: graine entière),
- Pour une même teneur totale, les effets (négatifs) peuvent être amendés en **associant les différentes fibres** (Solubles / Insolubles, micronisées ou non)



Concentration Xylanase

Merci aux doctorants

(P. Babin, M. Ducasse, A. Shehzad,
A. Turbin-Orger, F. Le Bleis, S. Arufe)

**...ainsi que pour
votre attention**



<http://icbc2020.icc.or.at/en/>

Christchurch (NZ)



Carrefours de l'innovation
agronomique



5 novembre 2019
Espace de conférence IRIS | PARIS