



**HAL**  
open science

## Détermination du comportement rhéologique des protéagineux à l'état fondu en vue de leur transformation par extrusion

Imen Jebalia, Magdalena Kristiawan, Sofiane Guessasma, Guy G. Della Valle

### ► To cite this version:

Imen Jebalia, Magdalena Kristiawan, Sofiane Guessasma, Guy G. Della Valle. Détermination du comportement rhéologique des protéagineux à l'état fondu en vue de leur transformation par extrusion. 55ème Congrès du Groupe Français de Rhéologie (GFR), Pierre LIDON (LOF - UB), Guillaume OVARLEZ (LOF - CNRS), Emmanuelle ABISSET-CHAVANNE (I2M - ENSAM), Jean GIMENEZ (LOF - CNRS), Oct 2021, Bordeaux, France. hal-03407549

**HAL Id: hal-03407549**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03407549v1>**

Submitted on 28 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# Détermination de comportements rhéologique et mécanique de protéagineux extrudés

I. JEBALIA, M. Kristiawan, S. Guessasma, G. Della Valle



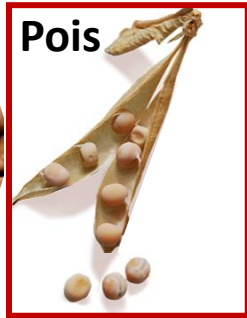
Site de la Géraudière, 44300 Nantes

55<sup>ème</sup> Congrès du GFR

Bordeaux, 26-28 octobre 2021

# Contexte: Elaboration d'aliments composites à base de protéagineux par extrusion

❑ **Protéagineux:** groupe botanique des légumineuses (20-50% protéines)



13 MT en 2018



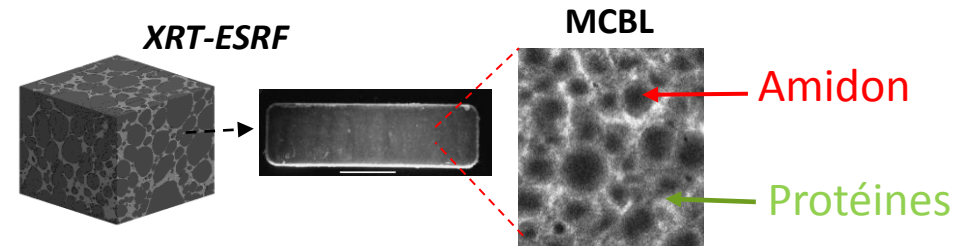
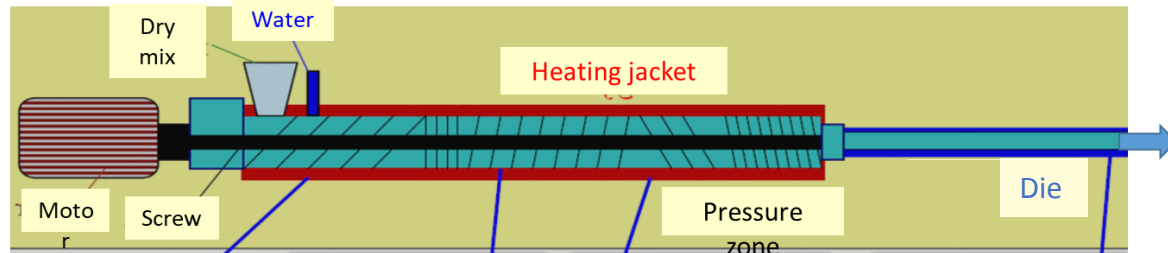
Céréales



**Aliments extrudés:**  
snacks, céréales pour petit déjeuner...



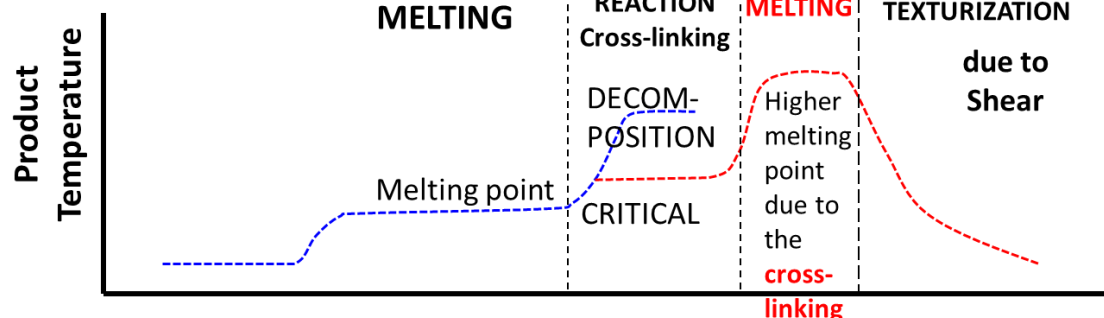
❑ **Extrusion-cuisson:** Procédé de transformation polyvalent et efficace



Amorphe,  
alvéolaire

**Matériau pariétal (MP):  
bio-composite dense**

*L'extrusion conduit à une grande diversité de structures, en raison de la réactivité des protéines.*

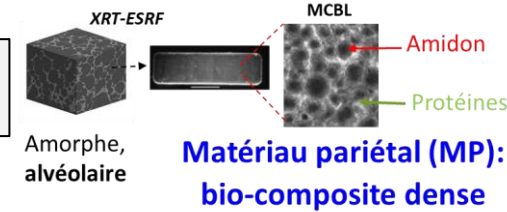


Transformation des protéines en cours d'extrusion

# Objectifs & démarche

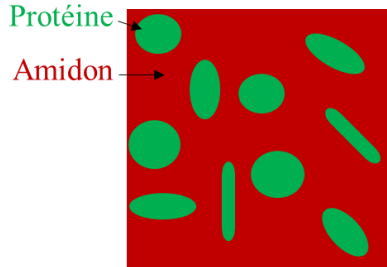
Elaborer des **composites denses** d'amidon et de protéines de pois

≠ variables d'écoulement dans l'extrudeuse (T°C, EMS, ...)  
≠ formulations

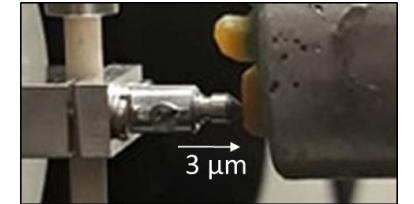
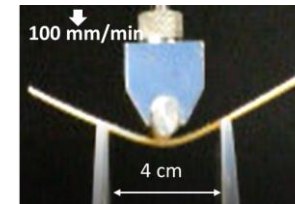


Déterminer les **lois constitutives** des composites

Morphologie



Propriétés mécaniques



Modélisation numérique (MEF)

Prendre en compte l'arrangement des phases et l'interface sur les propriétés mécaniques

# Elaboration des composites denses

## • Matières premières à base de pois

Farine FP



Amidon

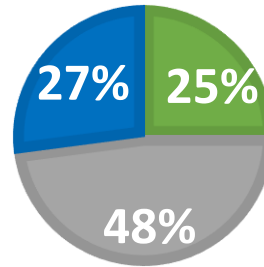


Isolats de protéines PPI

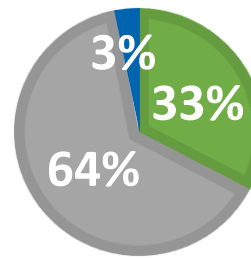


Mélanges AP

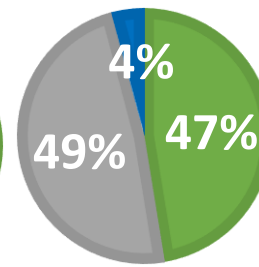
FP (A/P=2)



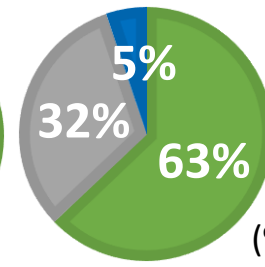
AP 2/1



AP 1/1

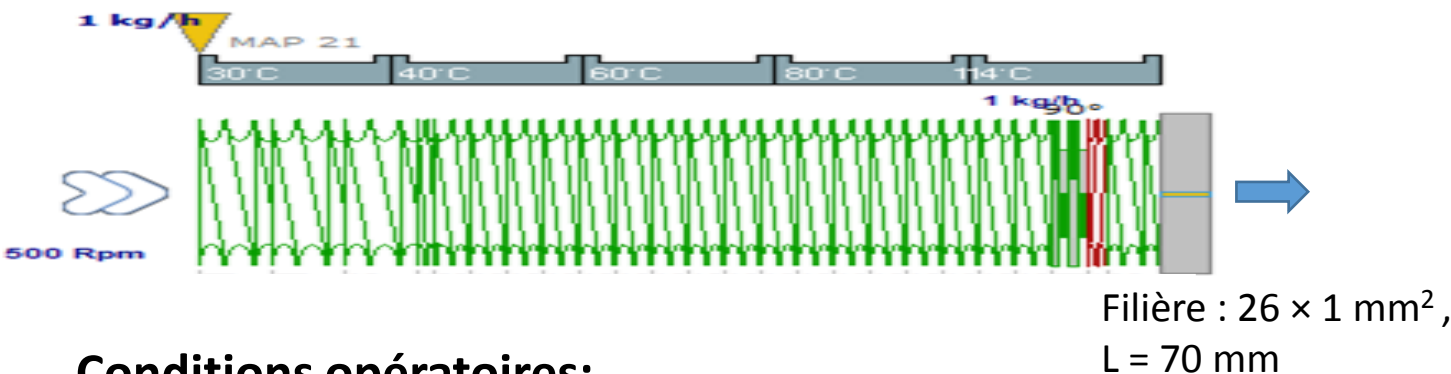


AP 1/2



(% en base sèche)  
 ■ Amidon  
 ■ Protéine  
 ■ Fibre

## • Extrusion bi-vis (Thermo Scientific™ Process 11, Ø 11mm, L/D 24,5)



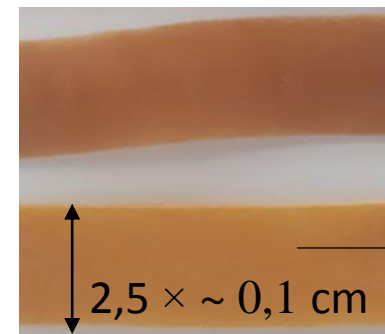
### Conditions opératoires:

25 < Teneur en eau < 35 (%),

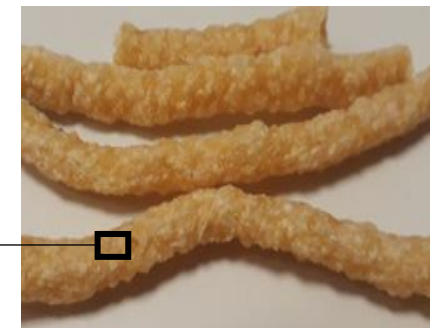
95 < Température < 165°C,

150 < EMS < 2000 kJ/kg (Energie mécanique spécifique)

Composites denses



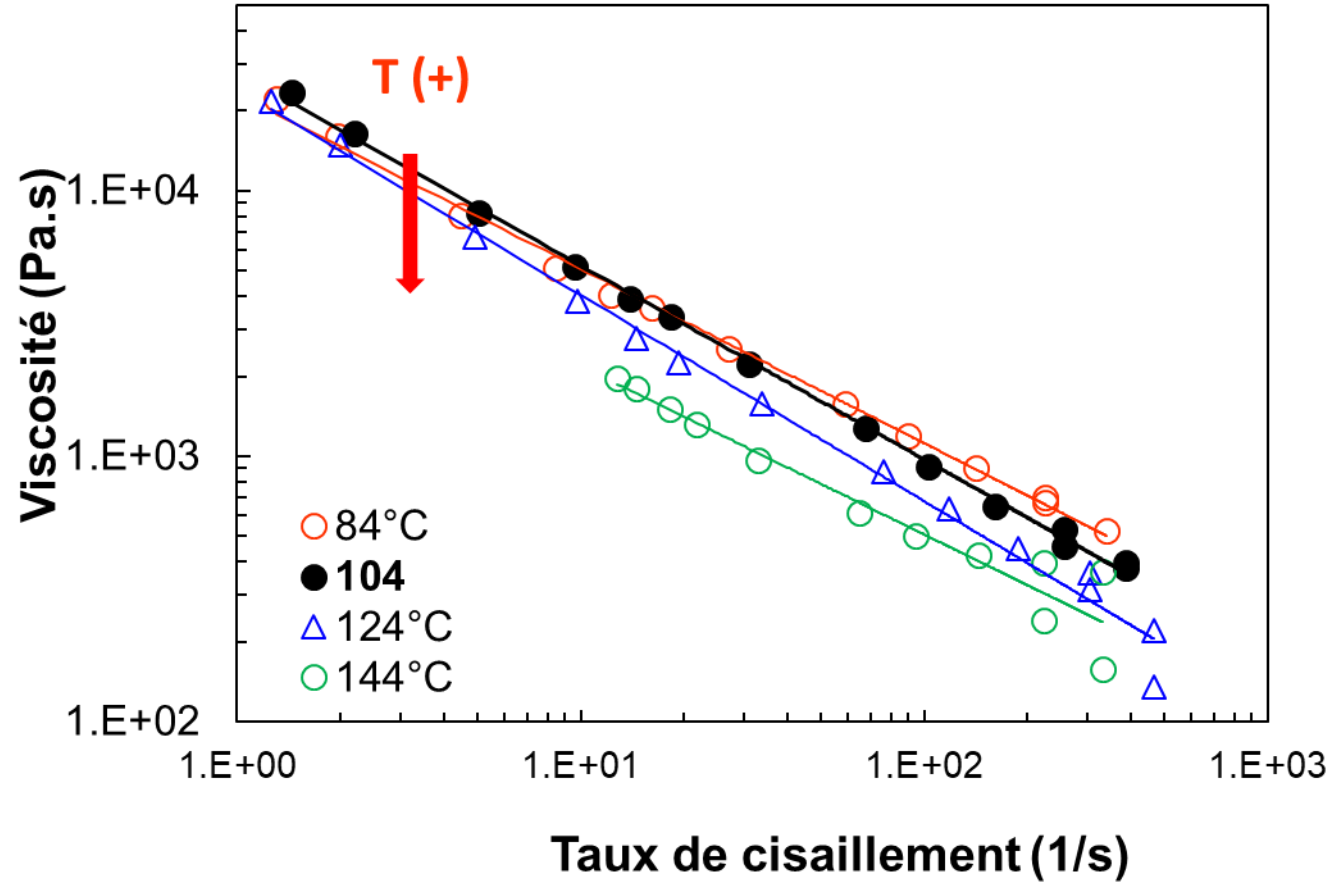
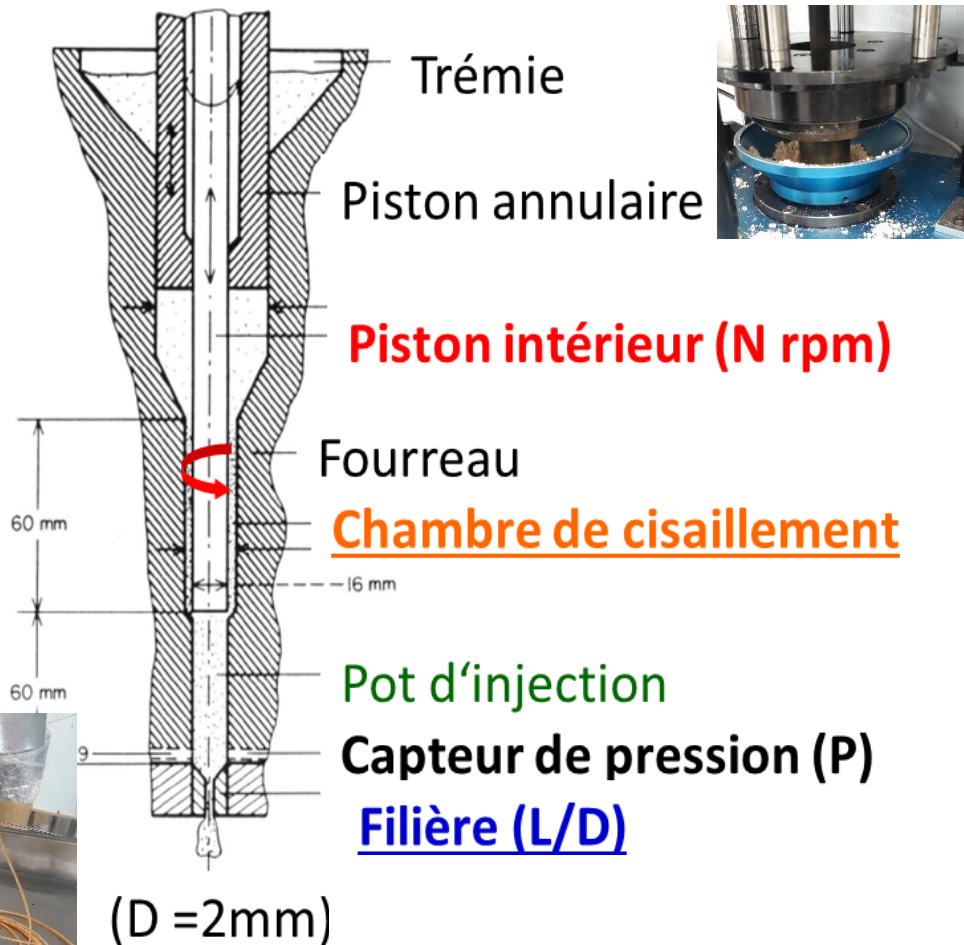
Snacks (FP)



# Evaluation de comportement rhéologique des composites (Rheoplast<sup>®</sup>)

- **Matières premières:** - Farine de pois FP (A/P=2)  
- Mélange AP 2/1
- **Rhéomètre capillaire à pré-cisaillement**

Farine de pois, 35% teneur en eau

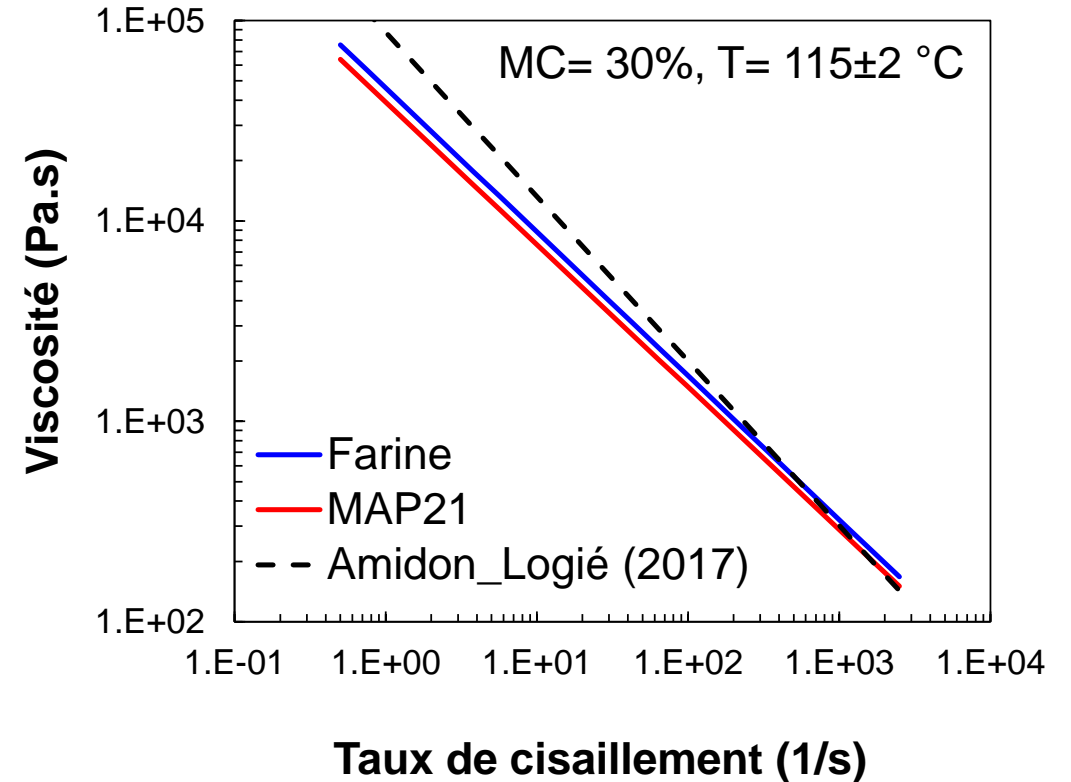
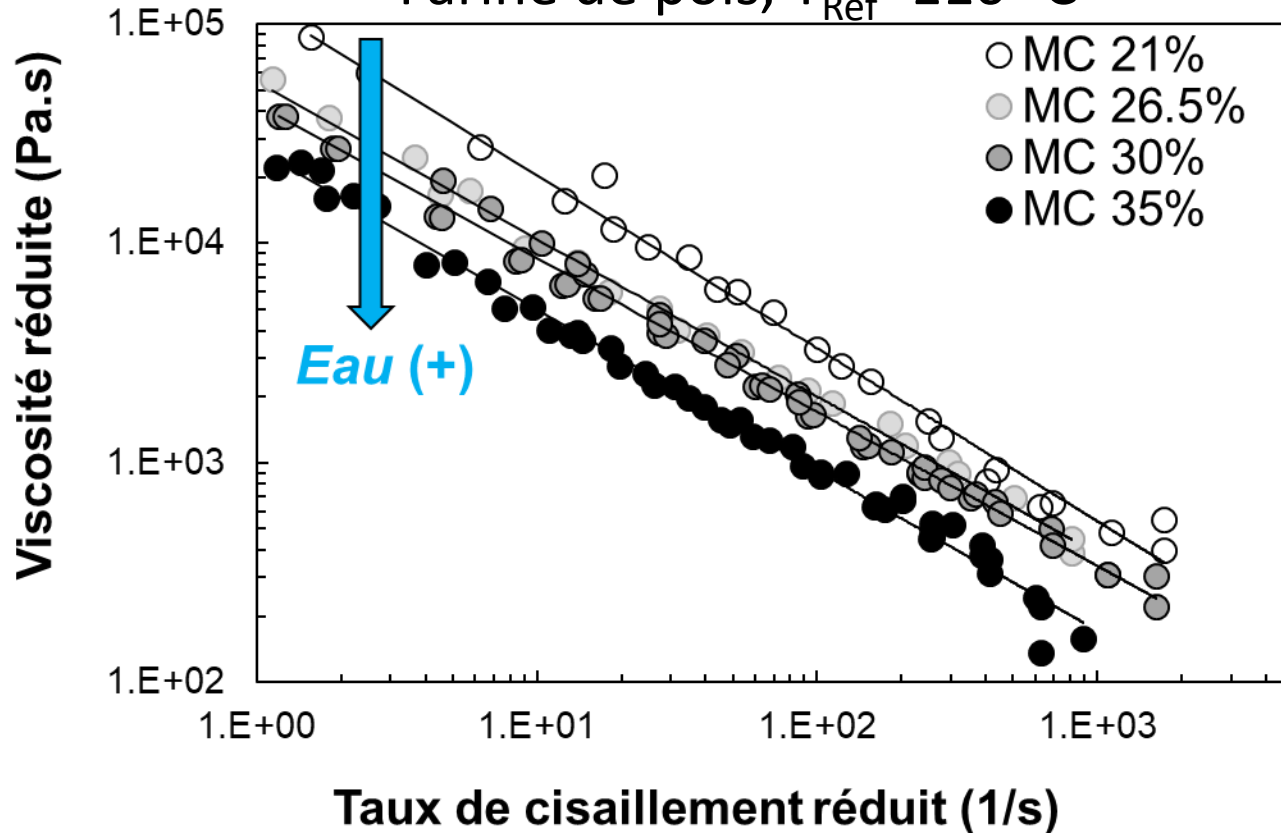


⇒ Principe de superposition temps-température

# Evaluation de comportement rhéologique des composites (Rheoplast<sup>®</sup>)

## Courbes maitresses

Farine de pois,  $T_{Ref}=110\text{ °C}$



➤ La farine de pois fondu a un comportement **rhéofluidifiant**  $\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$ , plastifié par l'eau

➤ La viscosité de la matière est gouvernée par le comportement de l'amidon

Indice d'écoulement:  $n = 0.3$  ; Consistance:  $K = K_o \text{EXP} \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) - \alpha(Eau - Eau_o) \right]$

# Simulation du procédé d'extrusion

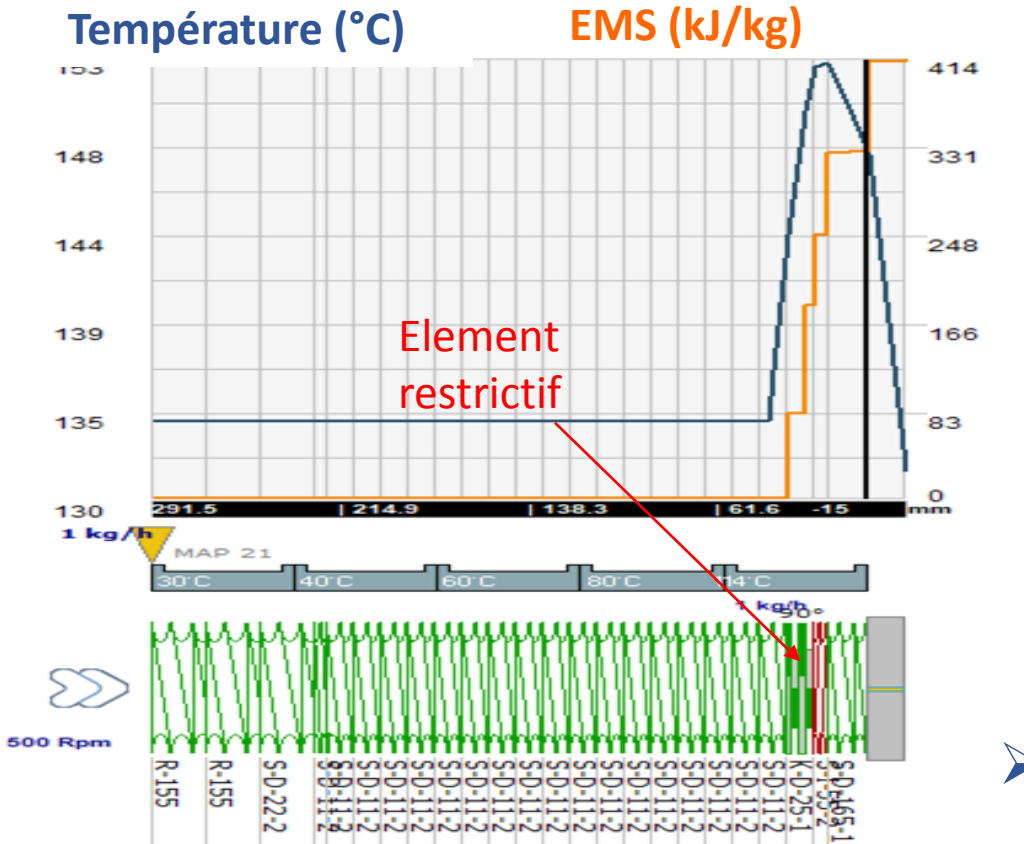
## Entrée

- Conditions d'extrusion
- Propriétés physiques et thermiques (conductivité thermique...)
- **Modèle rhéologique**

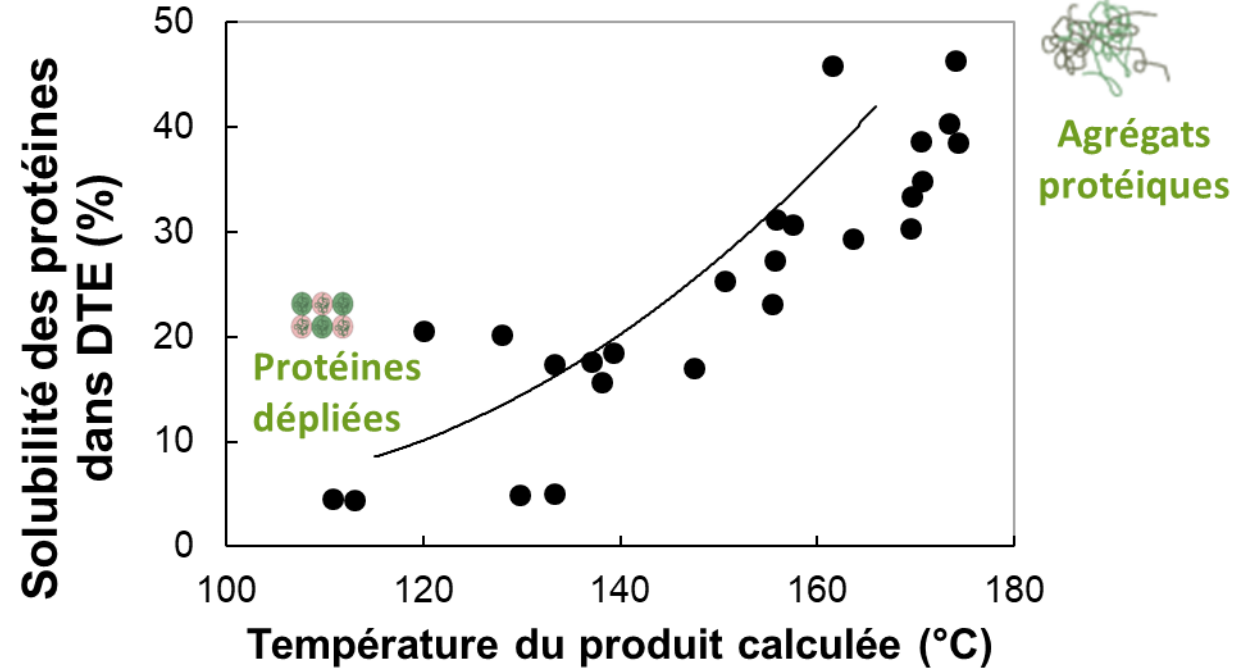


Sortie  
T, P, SME, ...

## Exemple de profils calculés des variables d'extrusion



## Agrégation des protéines



DTE: dithioerythritol → détruire les ponts disulfures

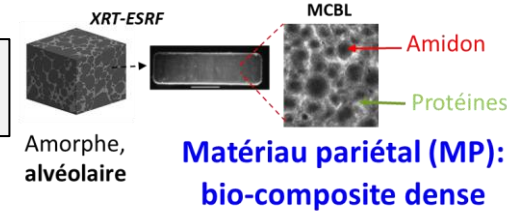
➤ *La simulation permet de prévoir la transformation du produit*



# Objectifs & démarche

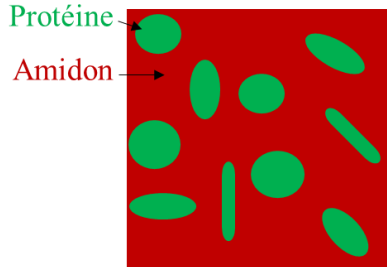
Elaborer des **composites denses** d'amidon et de protéines de pois

≠ variables d'écoulement dans l'extrudeuse (T°C, EMS, ...)  
≠ formulations

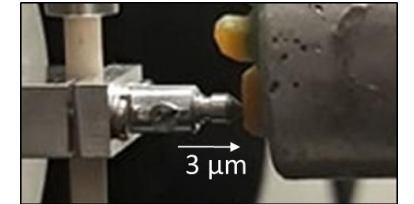
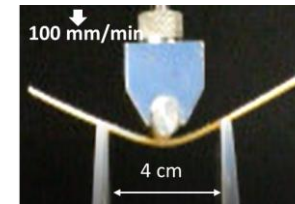


Déterminer les **lois constitutives** des composites

Morphologie



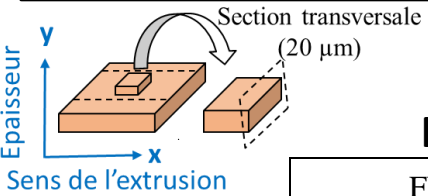
Propriétés mécaniques



Modélisation numérique (MEF)

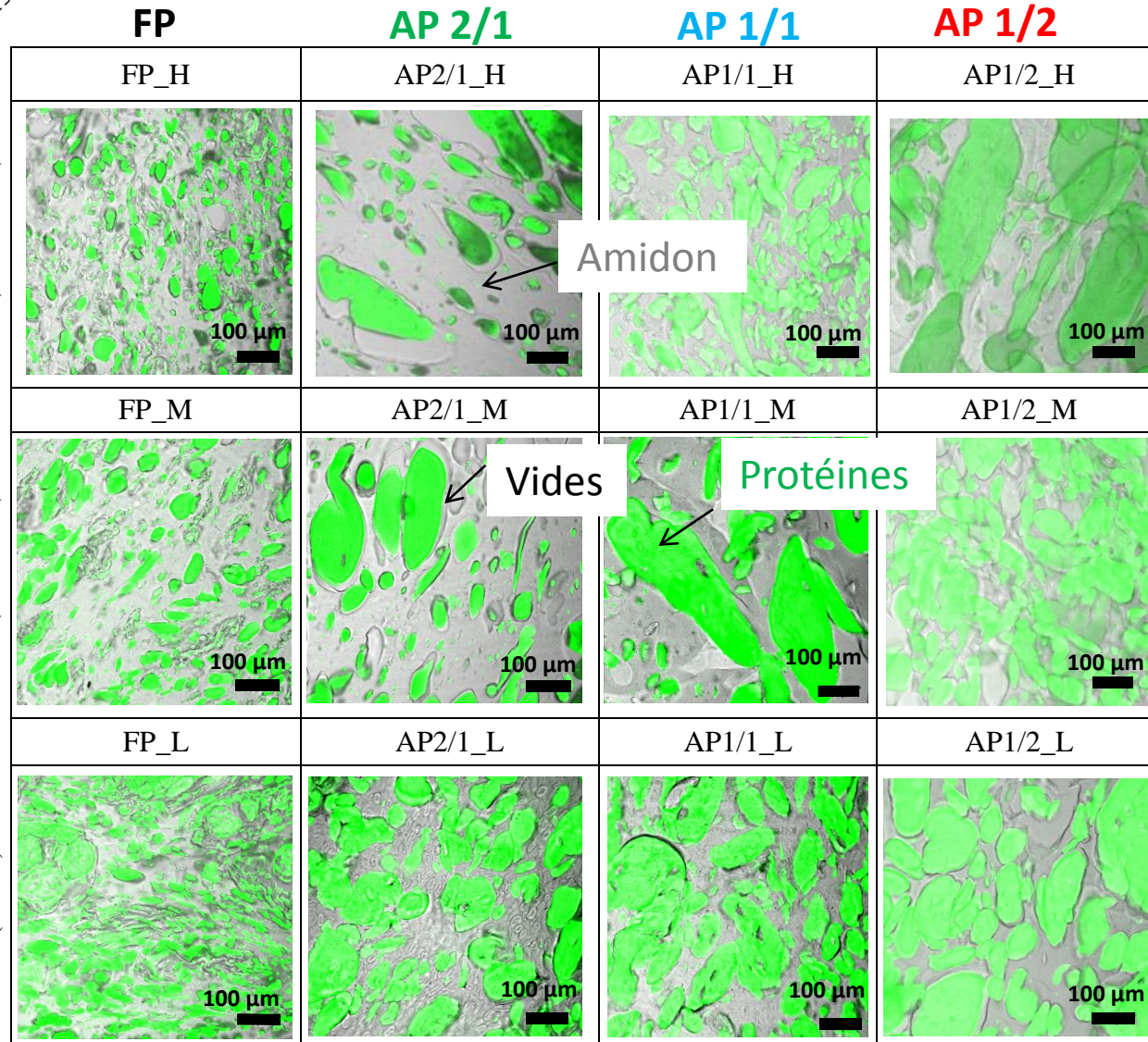
Prendre en compte l'arrangement des phases et l'interface sur les propriétés mécaniques

# Morphologie: Microscopie confocale à balayage laser (MCBL)



Energie mécanique spécifique EMS (kJ/kg)

x



24                      33                      44                      59

**Teneur en protéines (%)**

- **Morphologie composite: agrégats protéiques dispersés dans la matrice continue d'amidon amorphe.**
- Fraction volumique des particules
- **Analyse d'images**

Indice d'interface (amidon/protéines)

$$I_i = \frac{P/P_{Ref}}{\sqrt{A/A_{Ref}}}$$

**P**: Périmètre total des agrégats

**A**: surface totale des agrégats

$P_{Ref}$ : P de l'échantillon de référence

$A_{Ref}$ : A de l'échantillon de référence

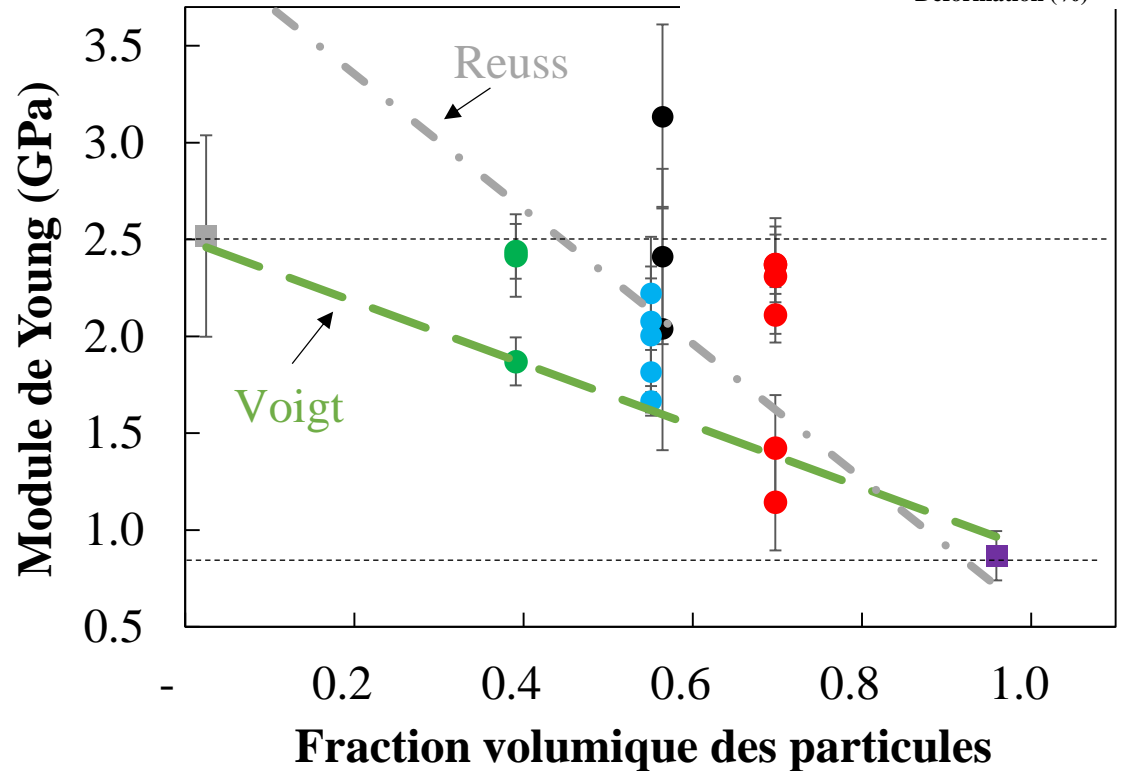
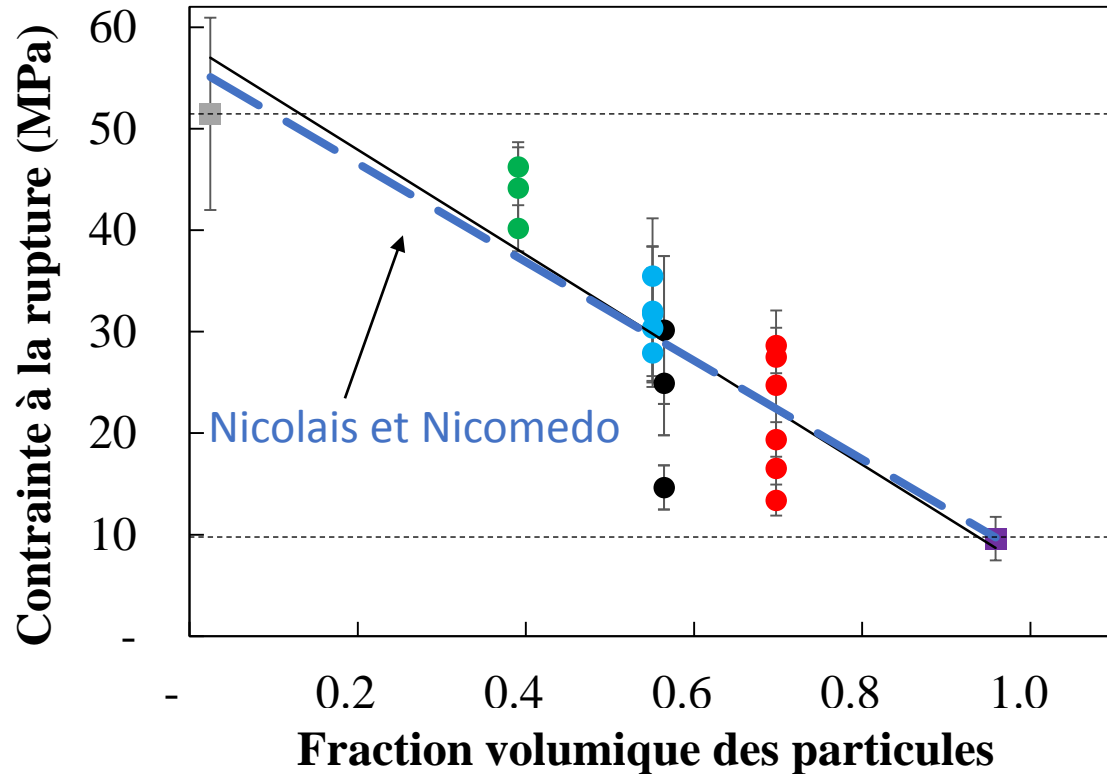
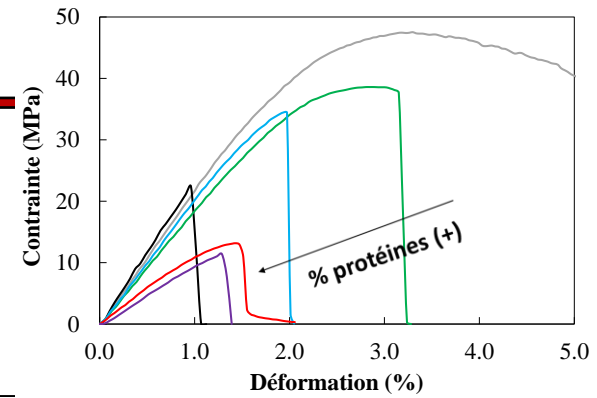
Ref: AP1/1\_L -> valeur maximale de A

# Propriétés mécaniques globales

Test de flexion 3-points (Teneur en eau = 12% b.h., 20°C)

Amidon, FP, AP 2/1, AP 1/1, AP 1/2, PPI

----- Modèles phénoménologiques des composites

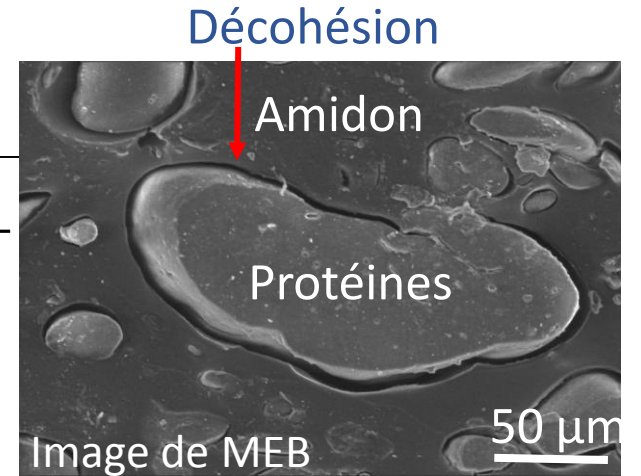
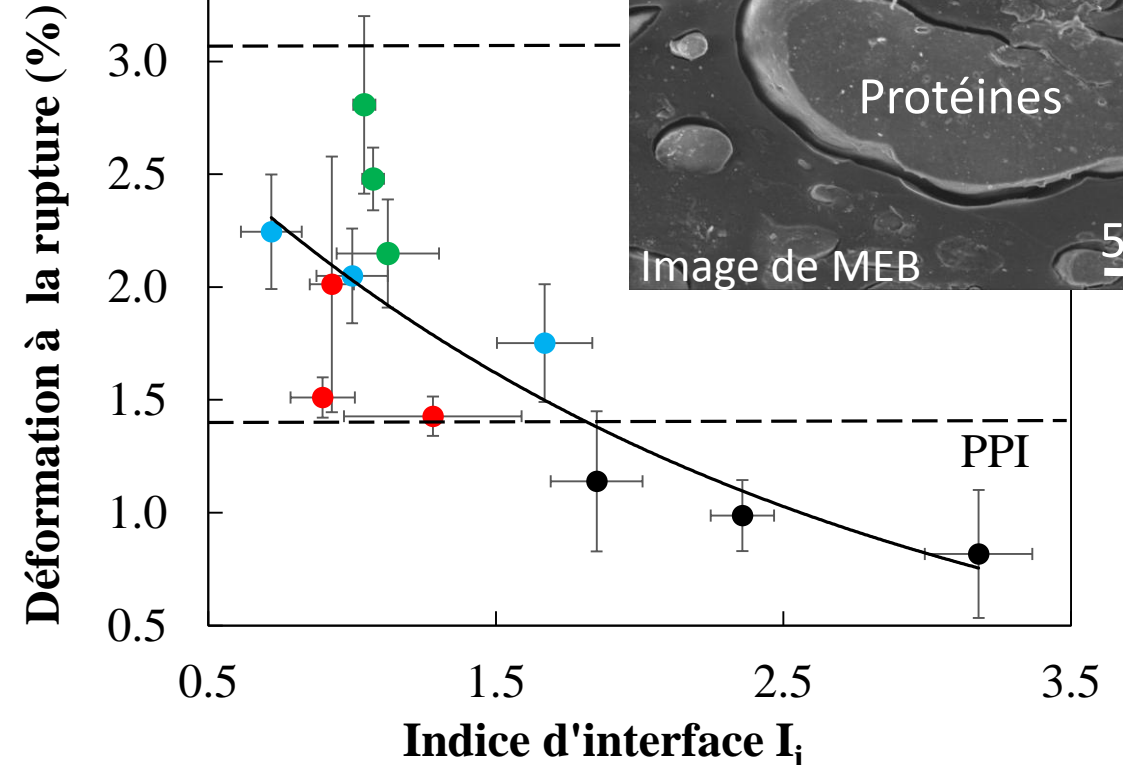
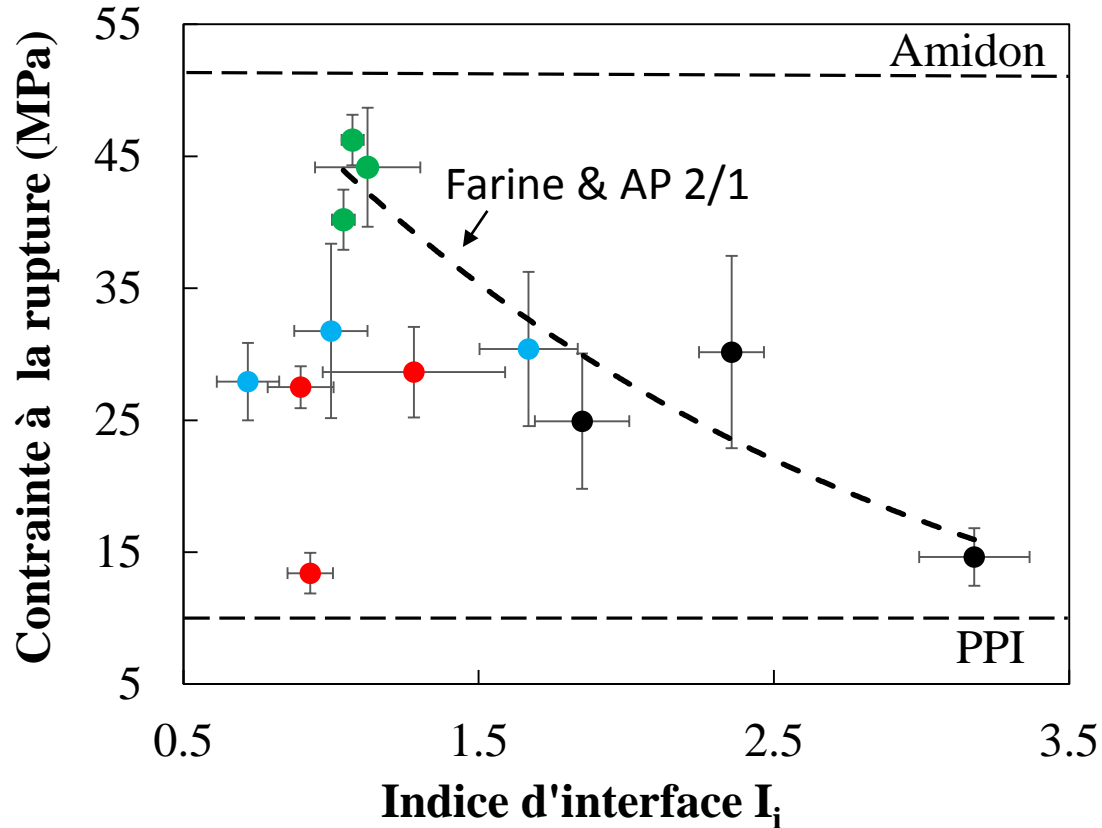


- La présence de **particules** (protéines & fibres) **diminue la résistance mécanique** des composites extrudés
- La **dispersion** des résultats par rapport aux modèles phénoménologiques peut être due aux **différences de morphologie**

# Propriétés mécaniques globales & Morphologie

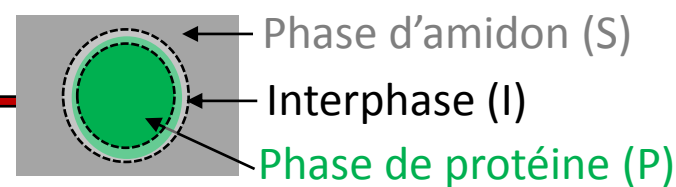
Effet de l'indice d'interface  $I_i$

FP, AP 2/1, AP 1/1, AP 1/2



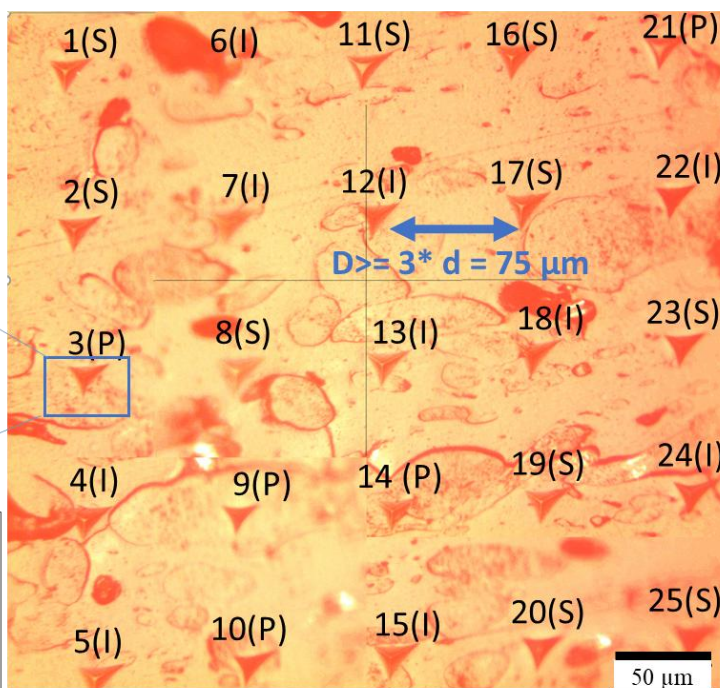
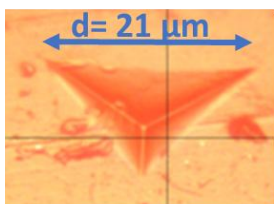
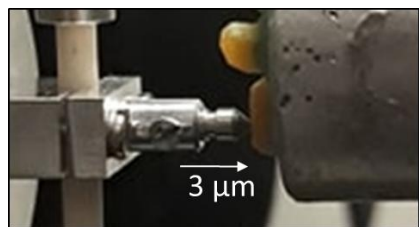
- La déformation à la rupture dépend de  $I_i$ , ce qui suggère une **décohésion** des agrégats protéiques à l'interface avec la matrice d'amidon.
- La **dispersion** peut être due à la différence des **propriétés mécaniques locales des phases et de l'interphase**.

# Propriétés mécaniques locales

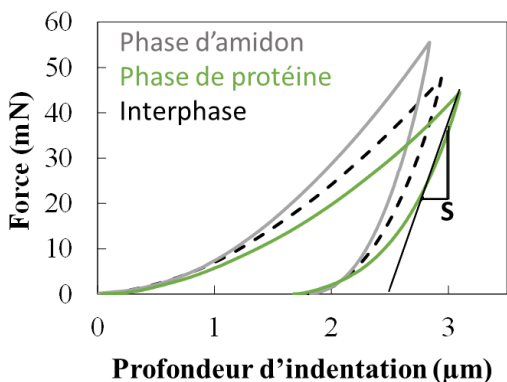


## Test de nanoindentation instrumentée

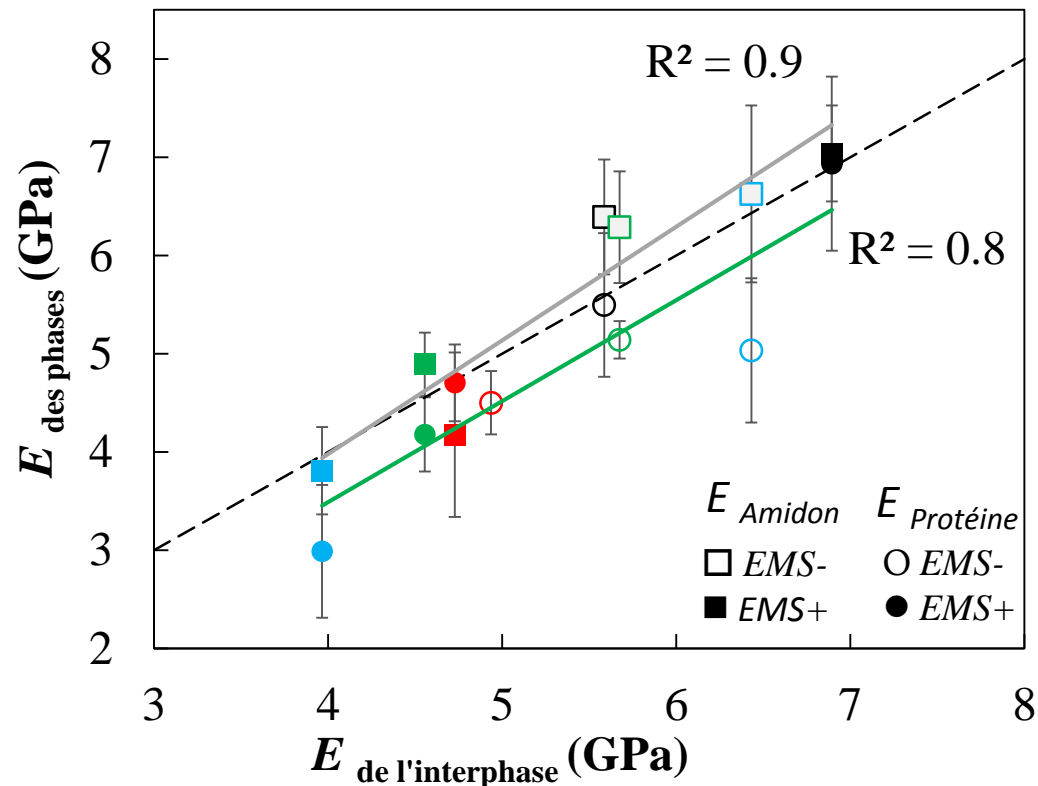
✓ Humidité relative 23% à 20°C (teneur en eau 8% b.h.)  $\neq$  12% test global



→  $\bar{E}_{\text{Amidon}}$ ,  $\bar{E}_{\text{Interphase}}$ ,  $\bar{E}_{\text{Protéine}}$   
(valeurs moyennes  $E$  des indentations)



FP, AP 2/1, AP 1/1, AP 1/2

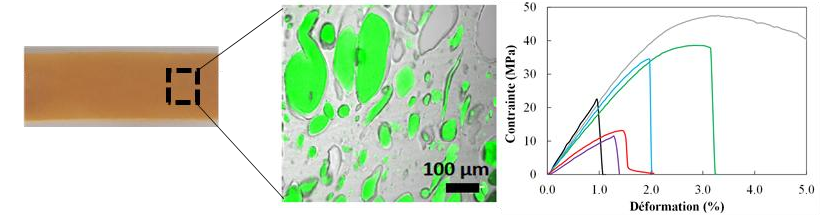


➤  $E_{\text{Protéine}} \leq E_{\text{Interphase}} \leq E_{\text{Amidon}}$

➤ Les composites présentent des propriétés mécaniques locales différentes, selon la formulation et les conditions d'élaboration.

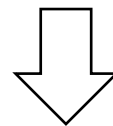
# Conclusion

❑ Différentes morphologies des composites de pois sont obtenues par la variation des conditions d'extrusion et la formulation;



❑ Les propriétés mécaniques sont gouvernées par:

- 1) La **fraction volumique des particules** (agrégats protéiques et fibres) → effet négatif sur la résistance mécanique;
- 2) La morphologie, quantifiée par un **indice d'interface** entre l'amidon et les protéines;
- 3) Les **propriétés mécaniques locales** (amidon, protéines, interphase), déterminées par nanoindentation.



Modélisation numérique (MEF)

Prendre en compte l'**arrangement des phases et l'interface** sur les propriétés mécaniques

# Perspectives: Démarche de la modélisation mécanique (MEF)

Simulation du test de flexion  
(échelle macroscopique)



Les **lois constitutives** associées au comportement des composites



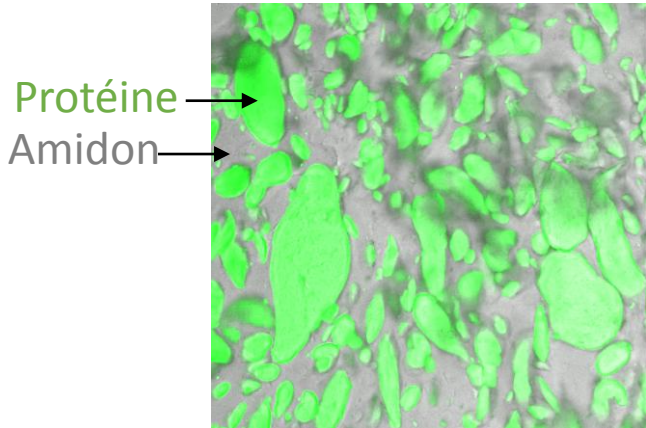
Simulation du test de nanoindentation



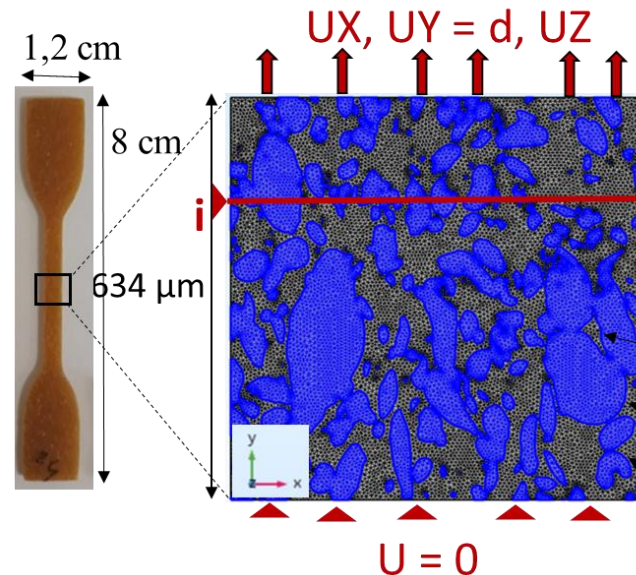
Les **paramètres élasto-plastiques locaux** des phases et **épaisseur** de l'interphase



Simuler le **test de traction** en prenant compte la **microstructure** avec les **effets d'interface**



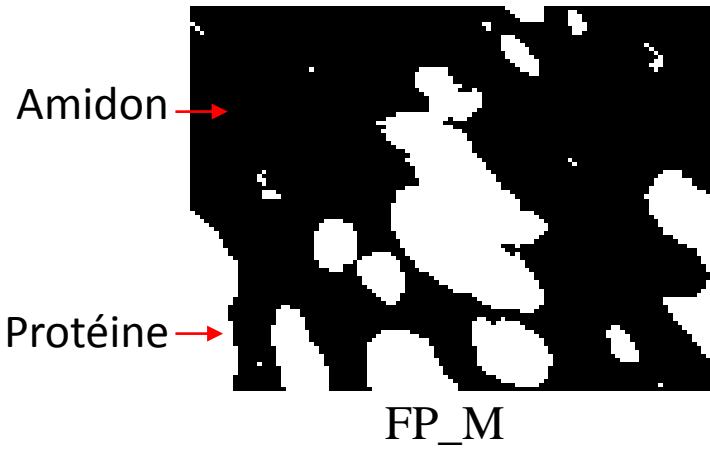
Modèle EF



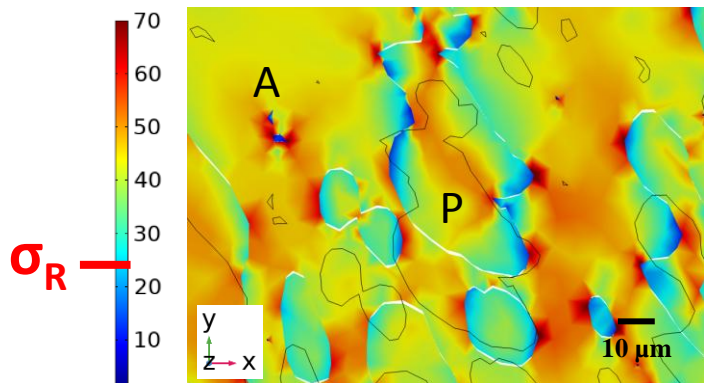
Taille d'élément =  $2.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$   
ddl =  $10^5 - 10^6$

# Perspectives: Modélisation mécanique (MEF)

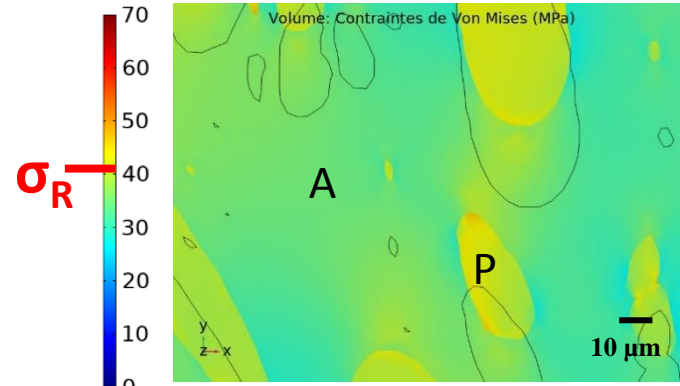
Champs de contrainte après traction



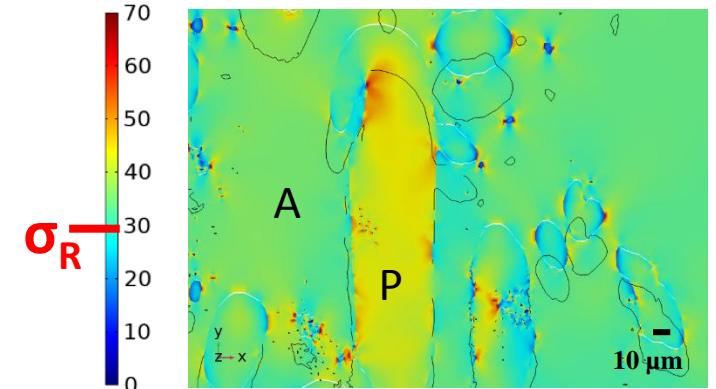
$\sigma_R$ : Contrainte à la rupture



$\frac{E_a}{E_p} > 1$ ,  $E_i = 1 \text{ GPa} \Rightarrow$  Décohésion



$\frac{E_a}{E_p} < 1$ ,  $E_i = 7 \text{ GPa} \Rightarrow$  Forte cohésion



$\frac{E_a}{E_p} < 1$ ,  $E_i = 1 \text{ GPa} \Rightarrow$  Décohésion

- Effet déterminant du module de Young de l'interphase  $E_i$  sur la localisation des contraintes ( $> \sigma_R$ )
- Appliquer la modélisation sur la structure alvéolaire des produits extrudés.



# *Merci pour votre attention*

Imperial College  
London

Maria Charalambides  
Samuel Humphry-Baker



Valérie Micard  
Maude Ducrocq



Magdalena Kristiawan  
Sofiane Guessasma  
Guy Della Valle  
Jean-Eudes Maignet  
Denis Lourdin  
Anne-Laure Reguerre  
Roselyne Desirest  
Laurent Chaunier  
Karine Cahier  
Bruno Novales  
Mathieu Bretesche