



# Barquettes agro-sourcées à base de sous-produits des industries agro-alimentaires

**Valérie Guillard**  
*MCF Université Montpellier, Membre l'IUF*

**Hélène Angellier-Coussy**  
*MCF Université Montpellier*

**Patrice Buche**  
*IR, INRA*

**Nathalie Gontard**  
*Pr., DR INRA*

Projet FP7  
**ECOBIOCAP**

*UMR IATE, Montpellier (Pl. P. Viala, F34060 )*

# Quels sont les enjeux?



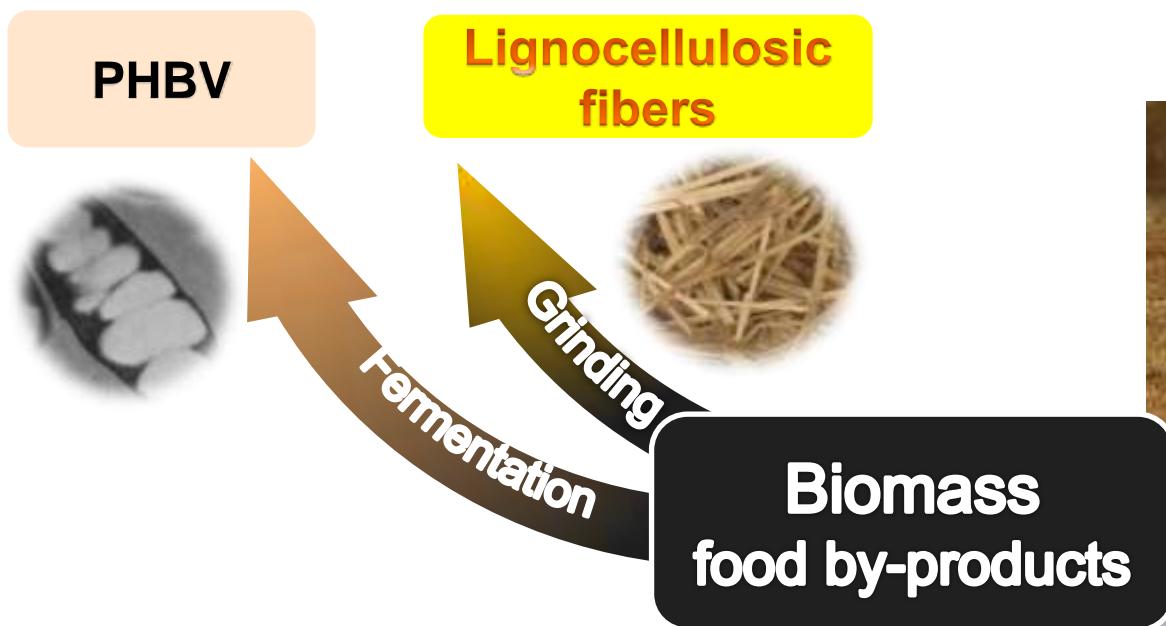
**Matières premières renouvelables & non-alimentaires + Procédés de fabrication peu couteux énergie**

Nouvelle génération d'emballage éco-efficient de part:

**Propriétés adaptées à la conservation de la qualité & sécurité de l'aliment**

**Déchets 100% biodégradable en conditions naturelles**

- Son origine
- Son design
- Sa fin de vie

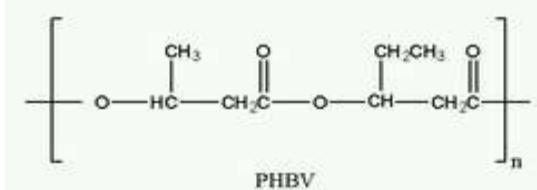


**Solid wastes  
(wheat straw)**

**Liquid effluent  
(cheese whey)**

→ Around 5€/kg

- **MATRIX = PHBV**
- Biodegradable polyester

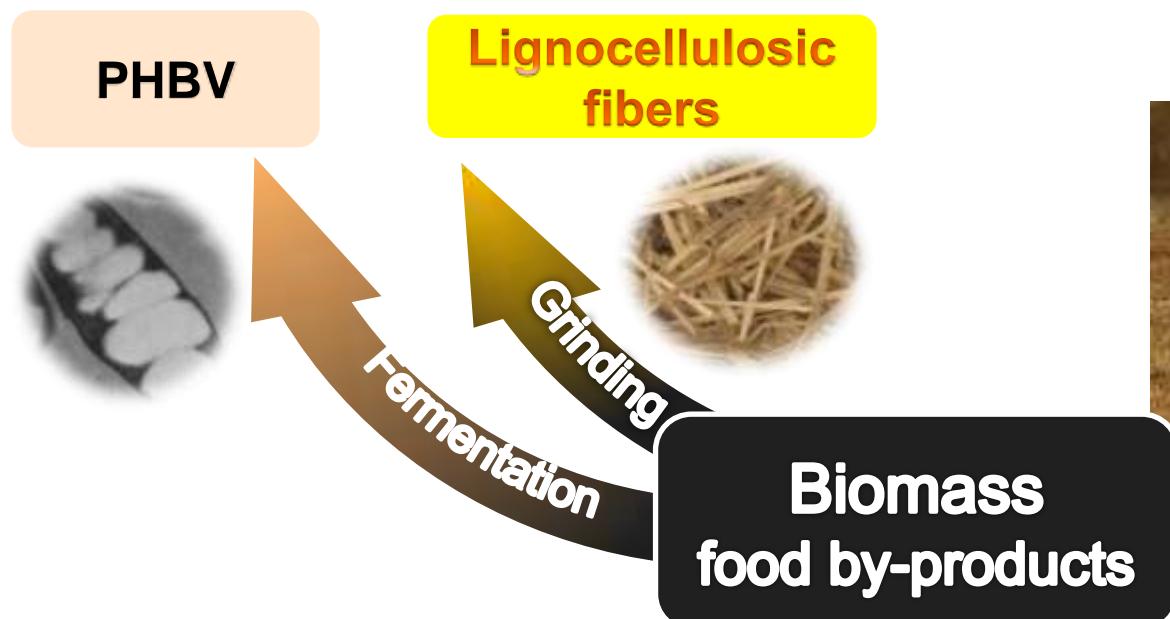


→ Around 25€/ton

- **FILLER = Wheat straw fibers**
- By-product of wheat industry



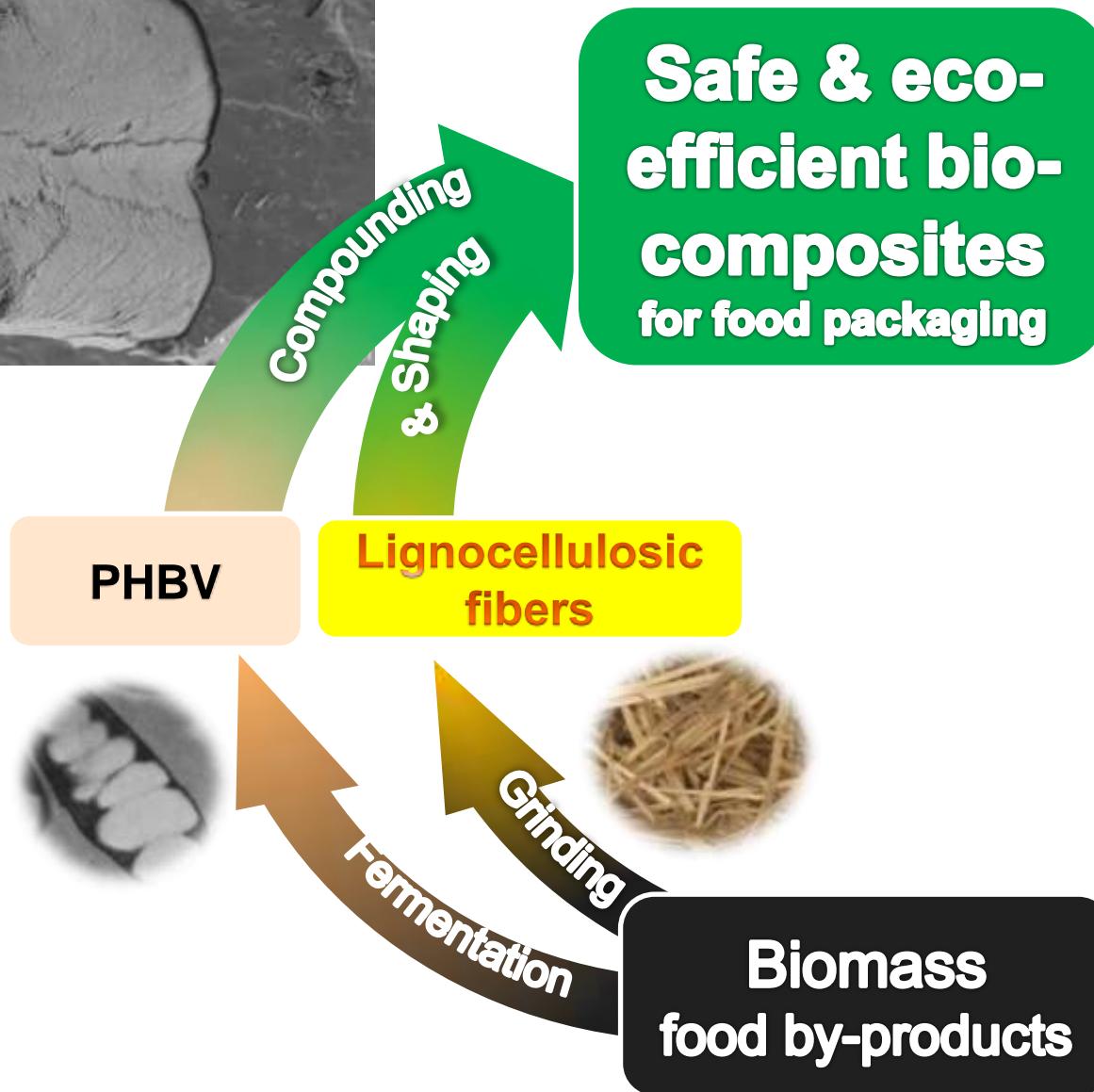
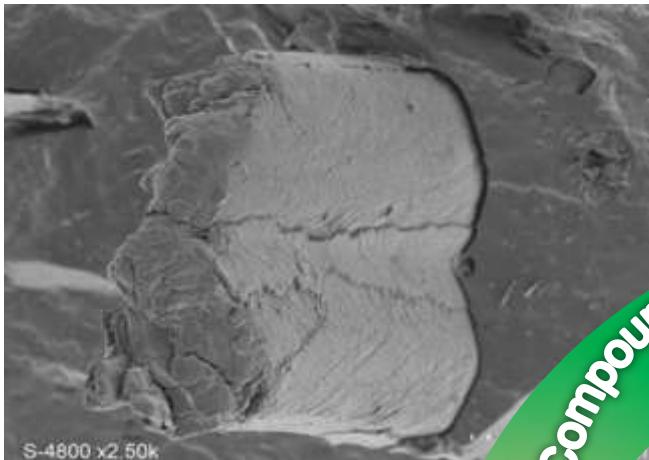
Straw fibers obtained  
by successive millings  
Size : 100-150µm



**Solid wastes  
(wheat straw)**



**Liquid effluent  
(cheese whey)**



- Compounding by extrusion



- Shaping by injection at pilot scale



**FÜRST PLAST**  
SAS



Source: Furstplast

## Safe & eco-efficient bio-composites for food packaging

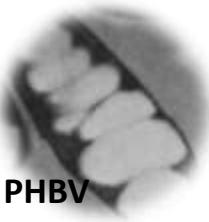


**PHBV**

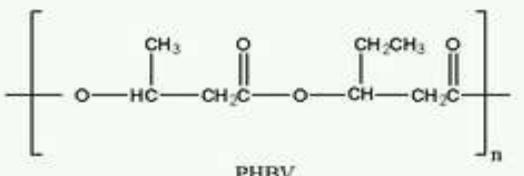
**Lignocellulosic fibers**

→ Around 25€/ton

**Food loss reduction**



- MATRIX = PHBV
- Biodegradable polyester



→ Around 5€/kg

**Biomass food by-products**

- FILLER = Wheat straw fibers
- By-product of wheat industry

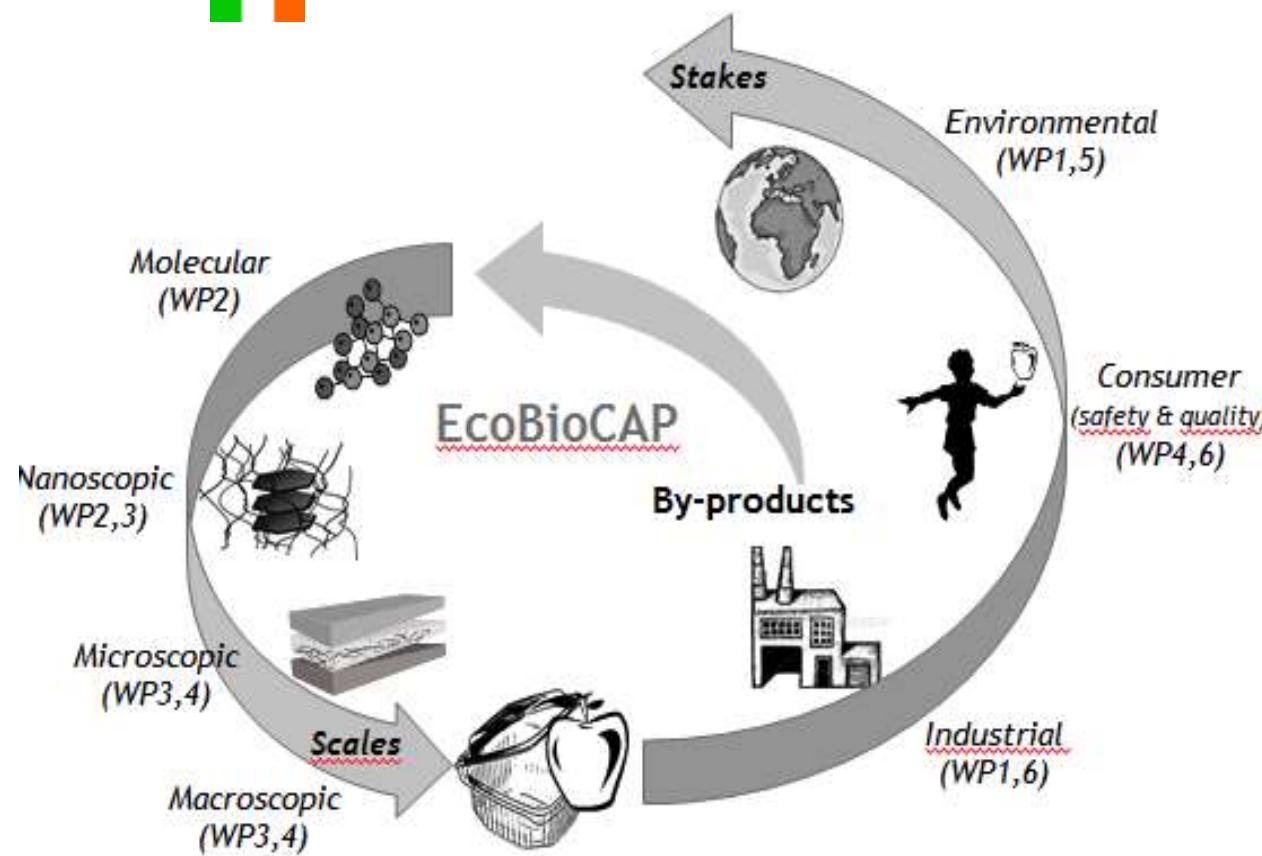
**Fermentation**  
**Grinding**



**Composting**



## Ecoefficient Biodegradable Composite Advanced Packaging

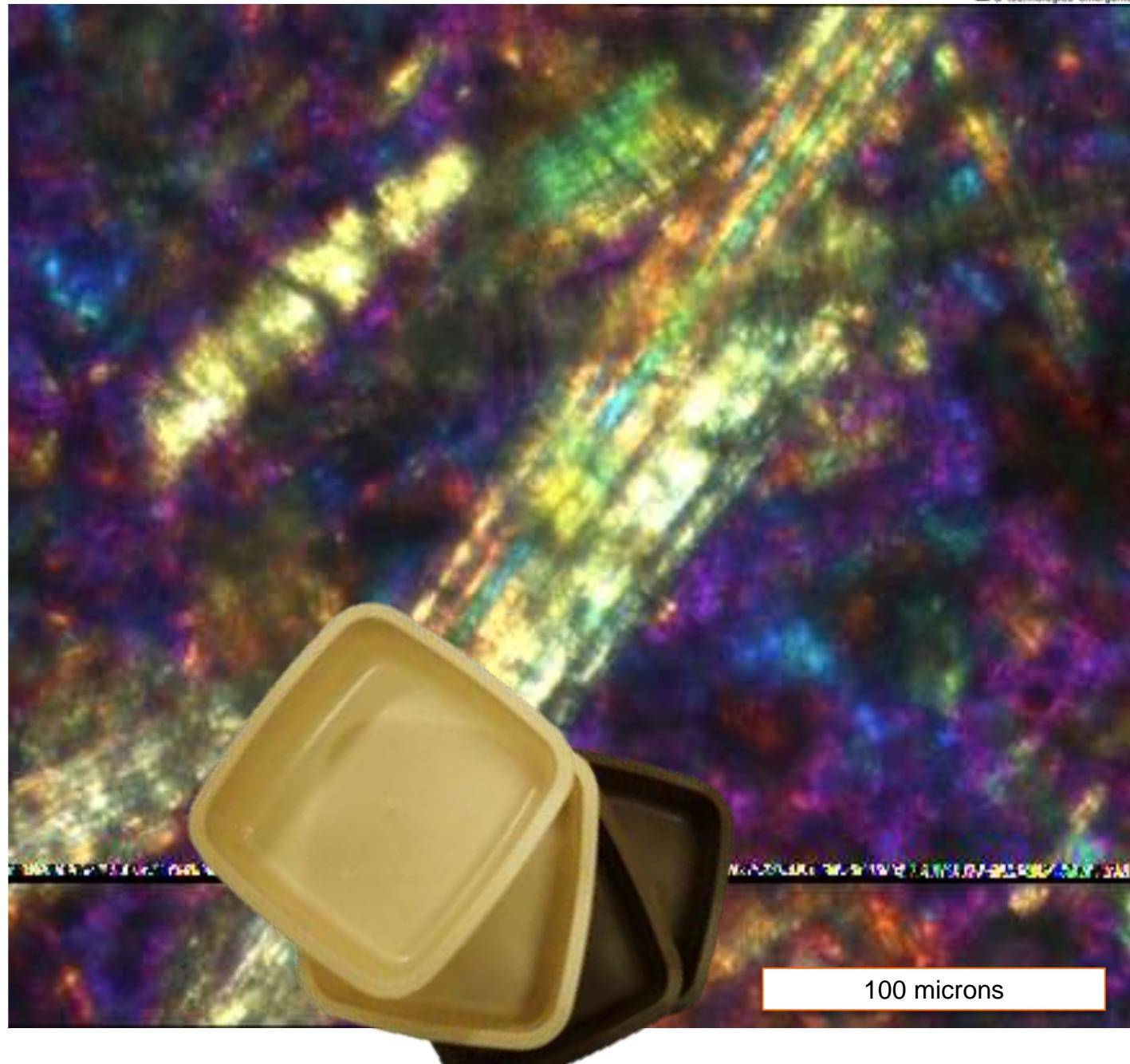


# Une approche intégrée et multi-échelle

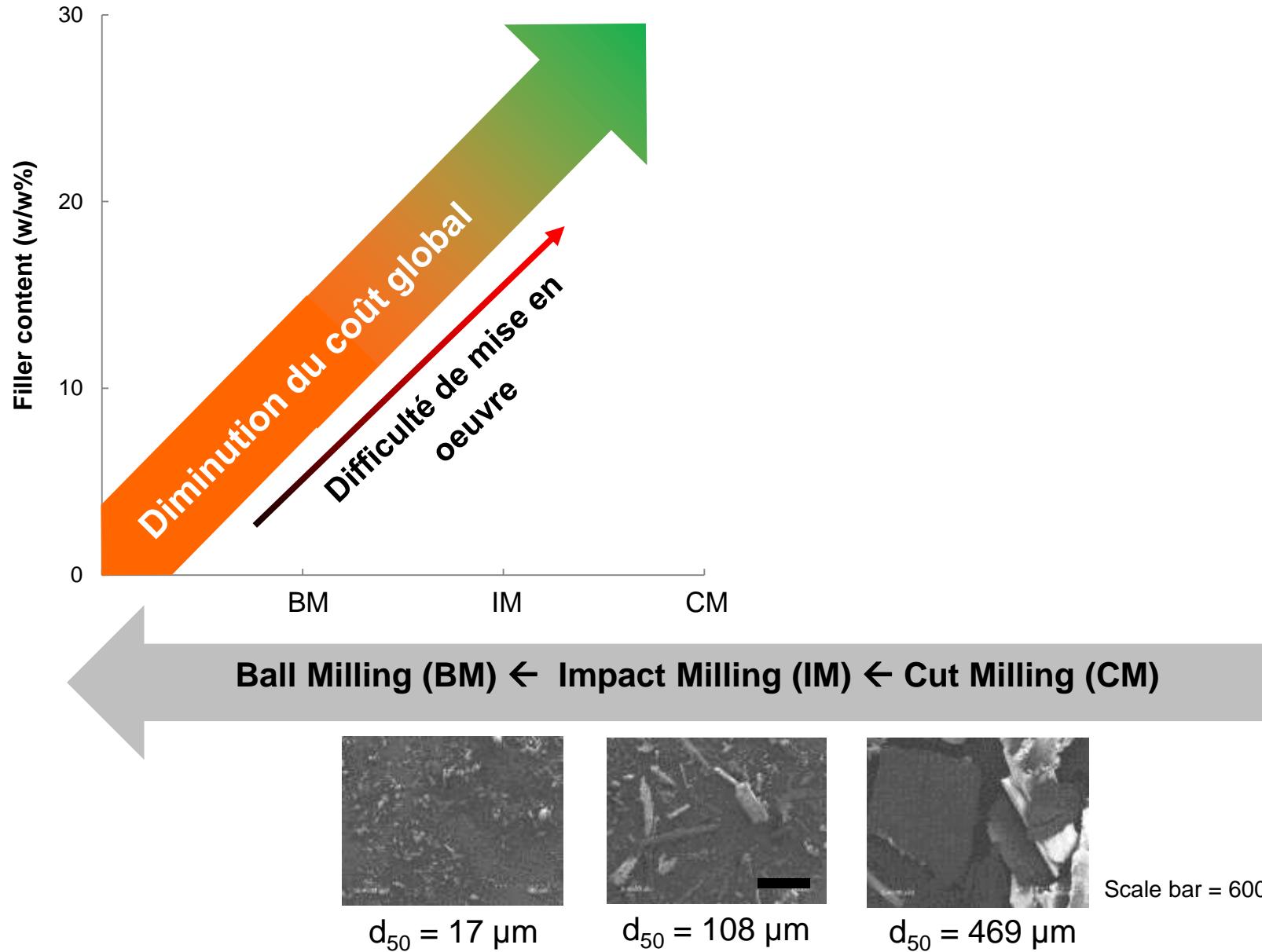
## OBJECTIFS APPLIQUES

- ✓ Matériaux 100% biodégradables
- ✓ Nouvelles fonctionnalités telles que des propriétés de transfert de masse optimisées
- ✓ Production à l'échelle industrielle
- ✓ Coût final acceptable
- ✓ stable et sûr d'un point de vue chimique et microbiologique

## OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

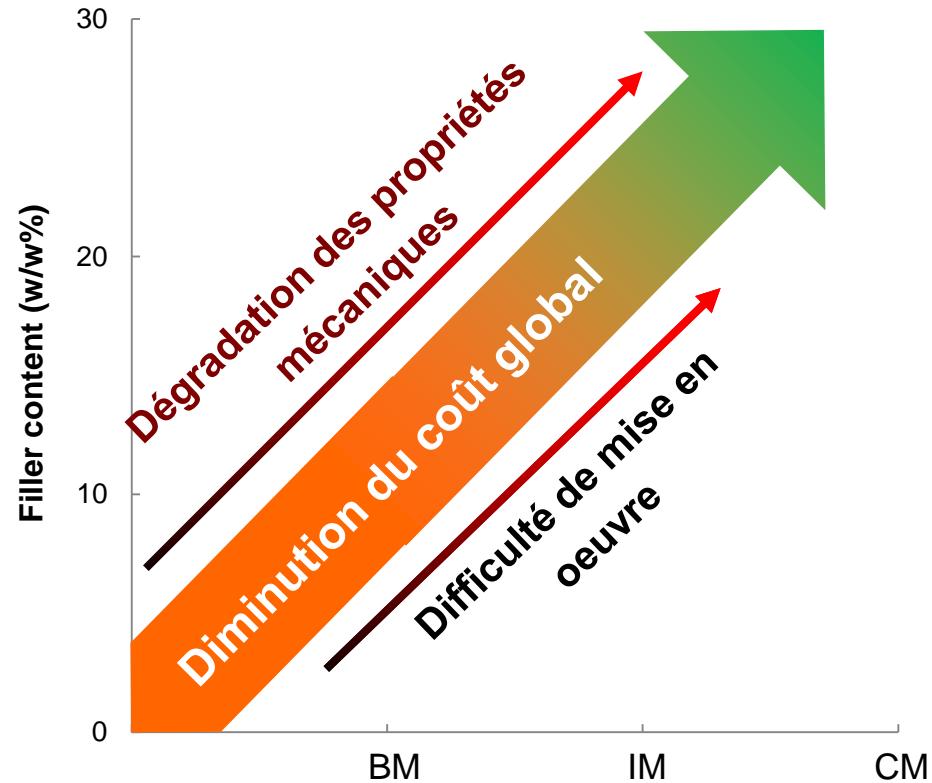


# □ Objectif appliqué: des propriétés fonctionnelles « à façon »



# Objectif appliqué: des propriétés fonctionnelles « à façon »

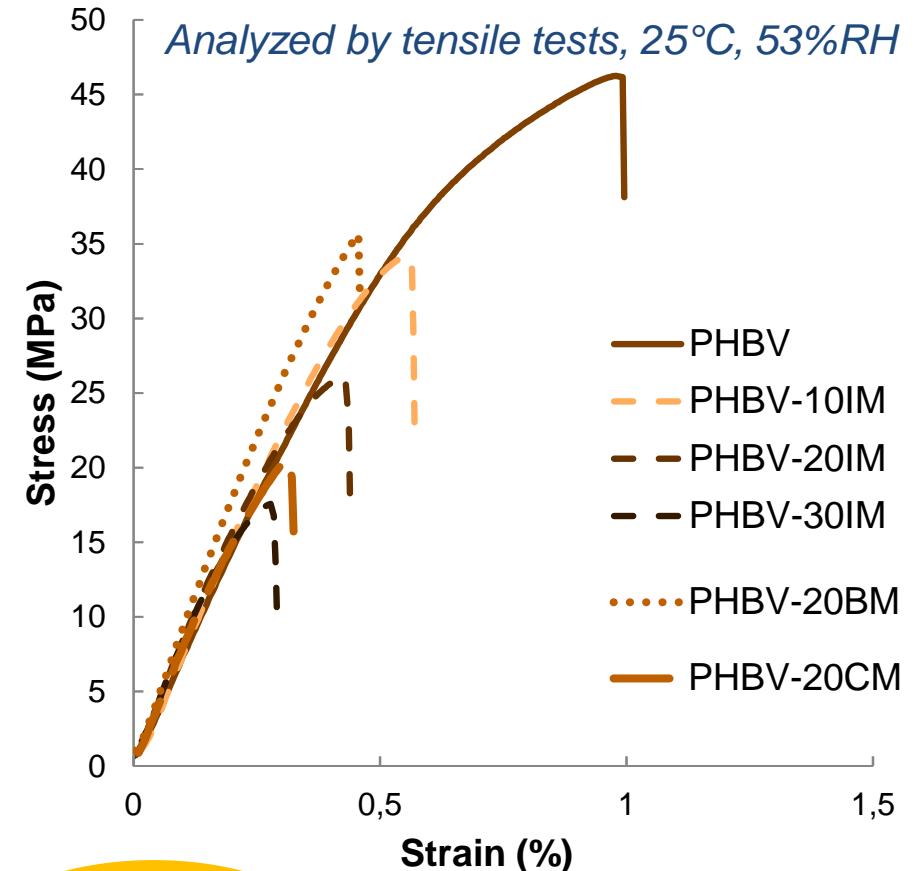
## Propriétés mécaniques



BM = ball milling = 17 µm

IM = impact milling = 108 µm

CM = cut milling = 469 µm



Target:  
 $E = 0,3 - 2 \text{ GPa}$   
 $\delta = 10 \text{ MPa}$   
 $\epsilon > 5\%$

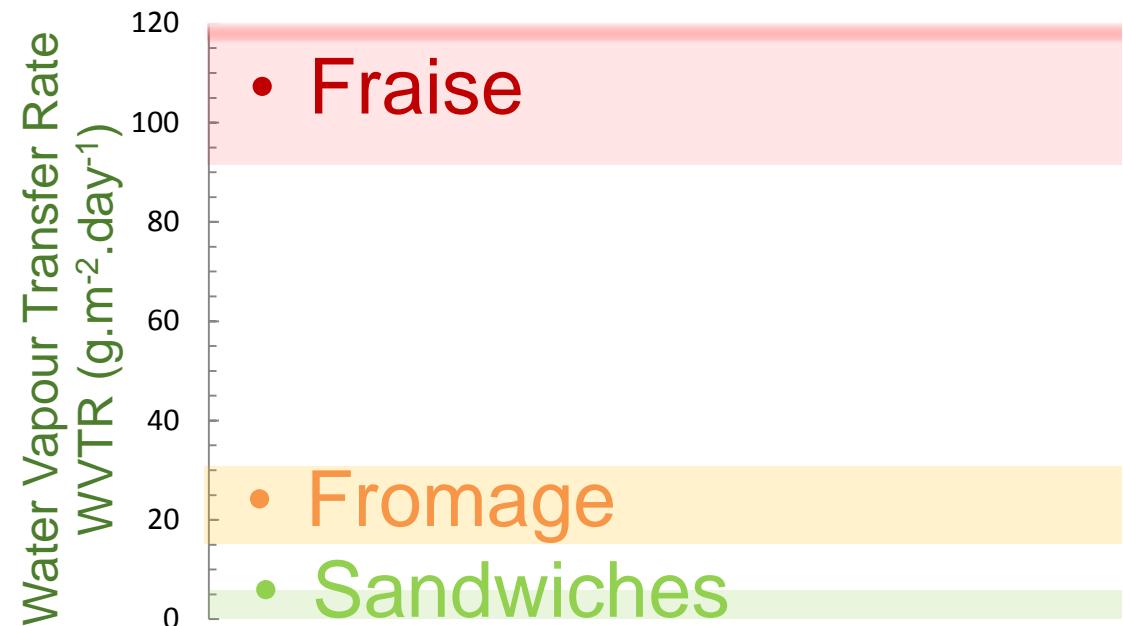
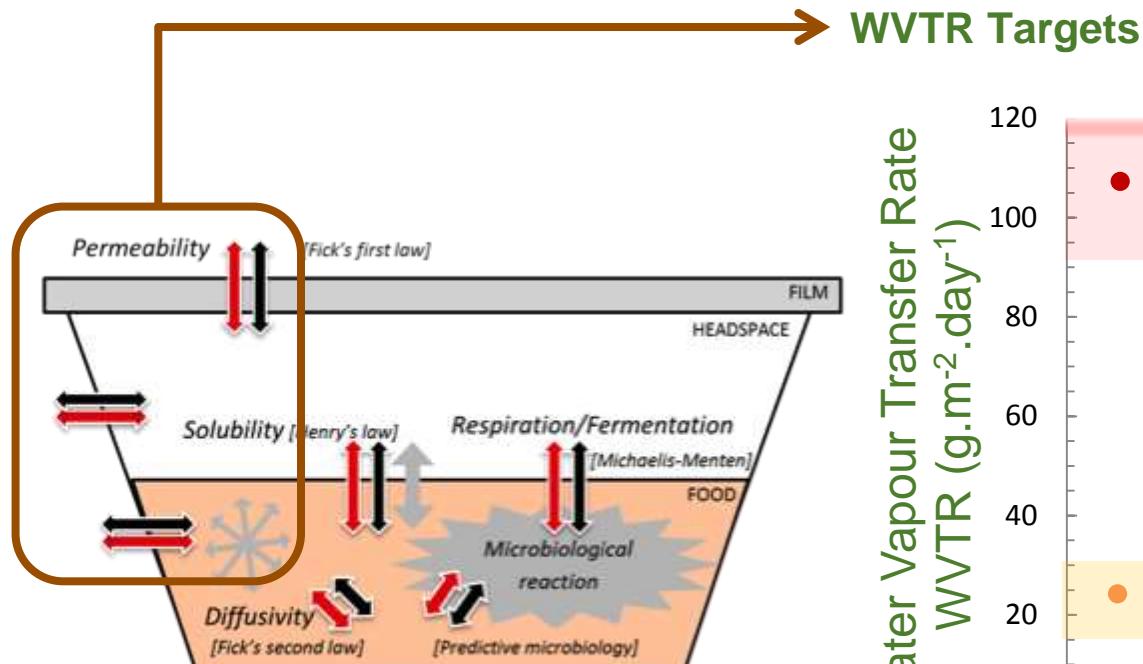
du taux de fibre  
la taille des fibres  
pas d'effet sur le module d'Young  
= dégradation des propriétés mécaniques

# □ Objectif appliqué: des propriétés fonctionnelles « à façon »

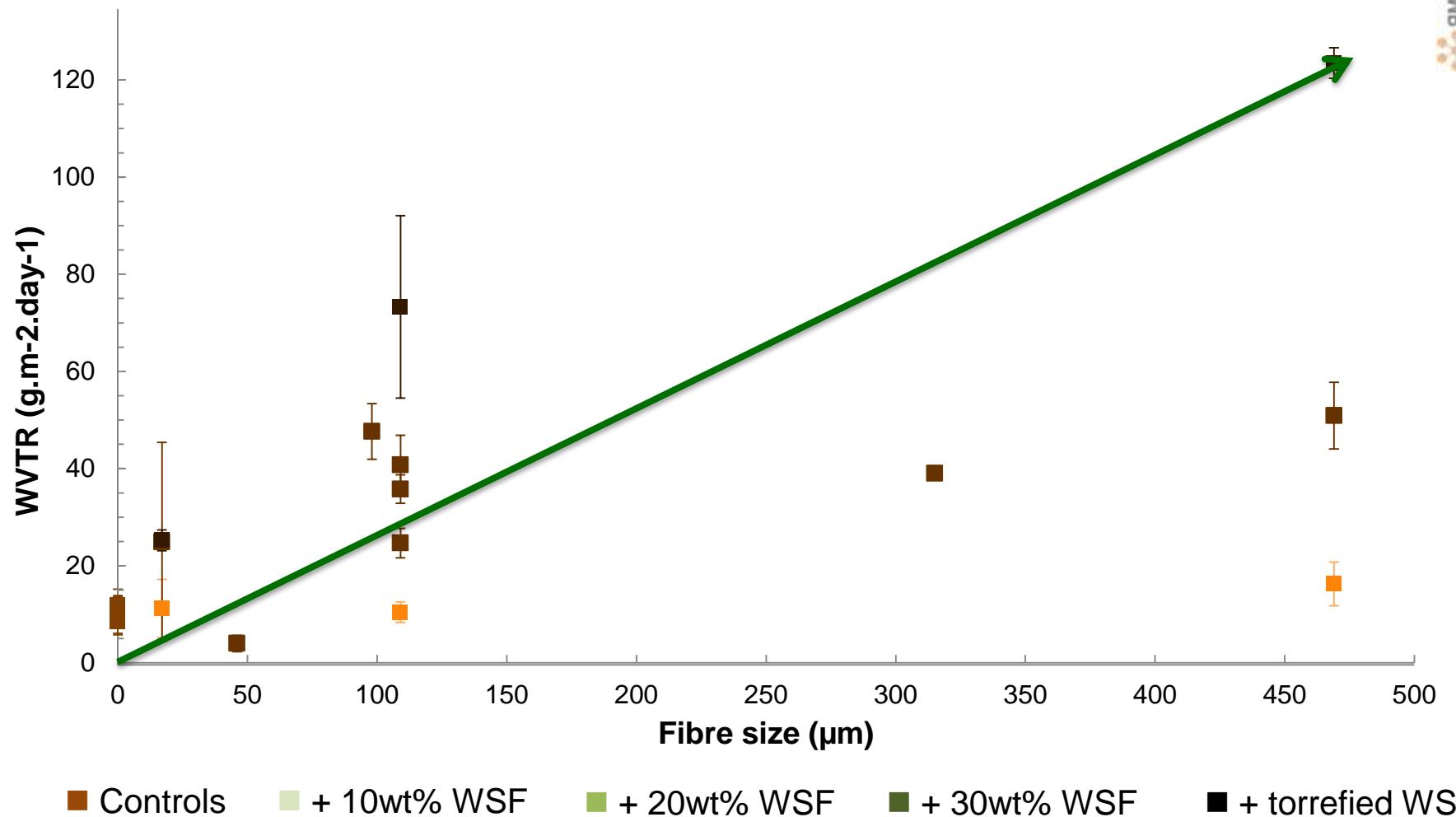
→ Propriétés mécaniques

→ Mise en œuvre

→ Propriétés de transfert de matière ?



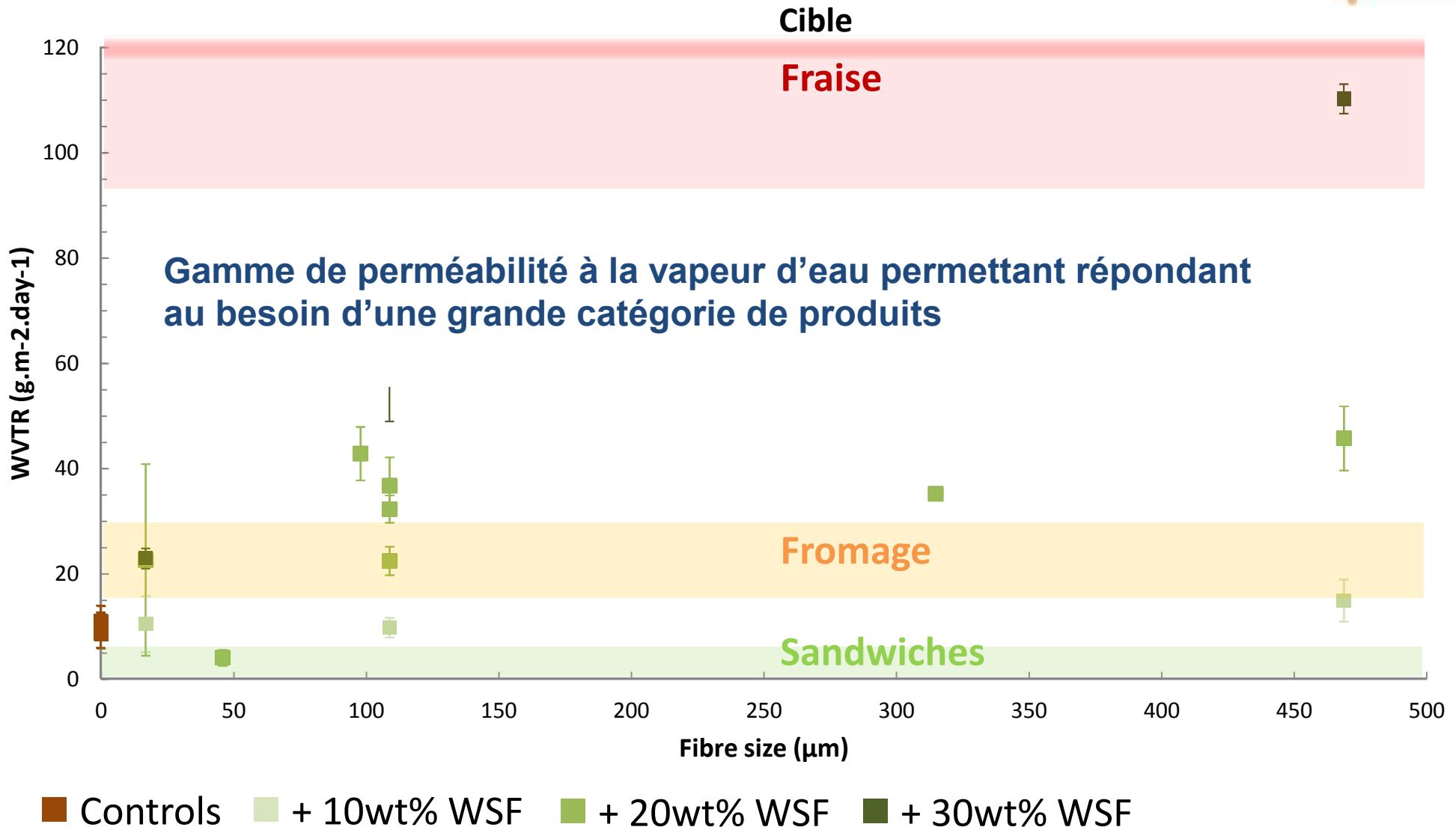
## □ Objectif appliqué: des propriétés fonctionnelles « à façon »



La perméabilité à la vapeur d'eau  
augmente en présence de fibres de paille

**Fibres = particules hydrophiles**  
= Sorption d'eau importante  
**Faible adhésion interfaciale**  
= chemin préférentiel pour la diffusion

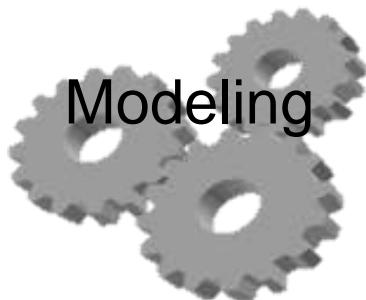
# Objectif appliqué



# Objectif appliqué

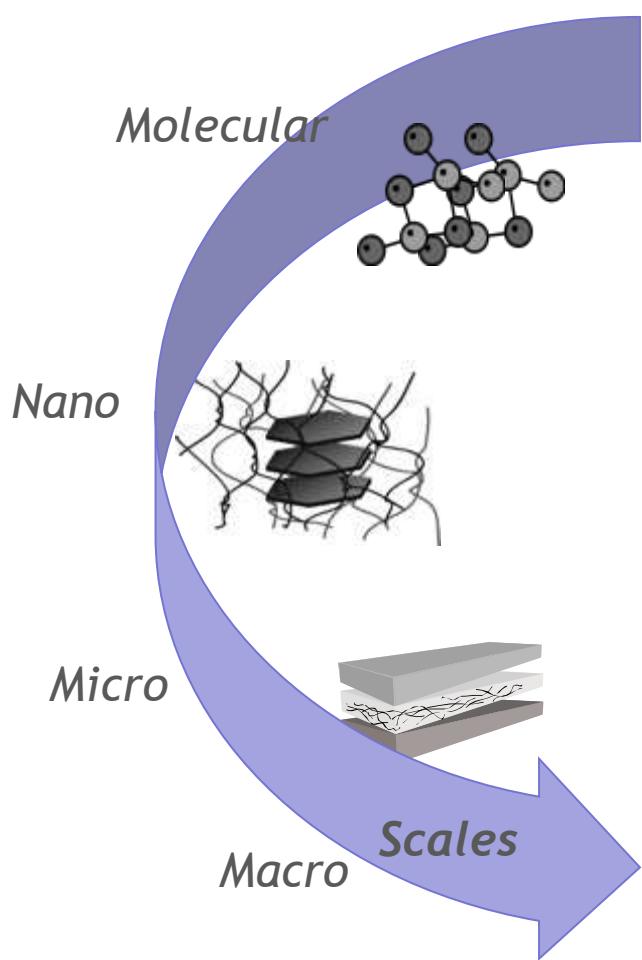


# Modélisation multi-échelles



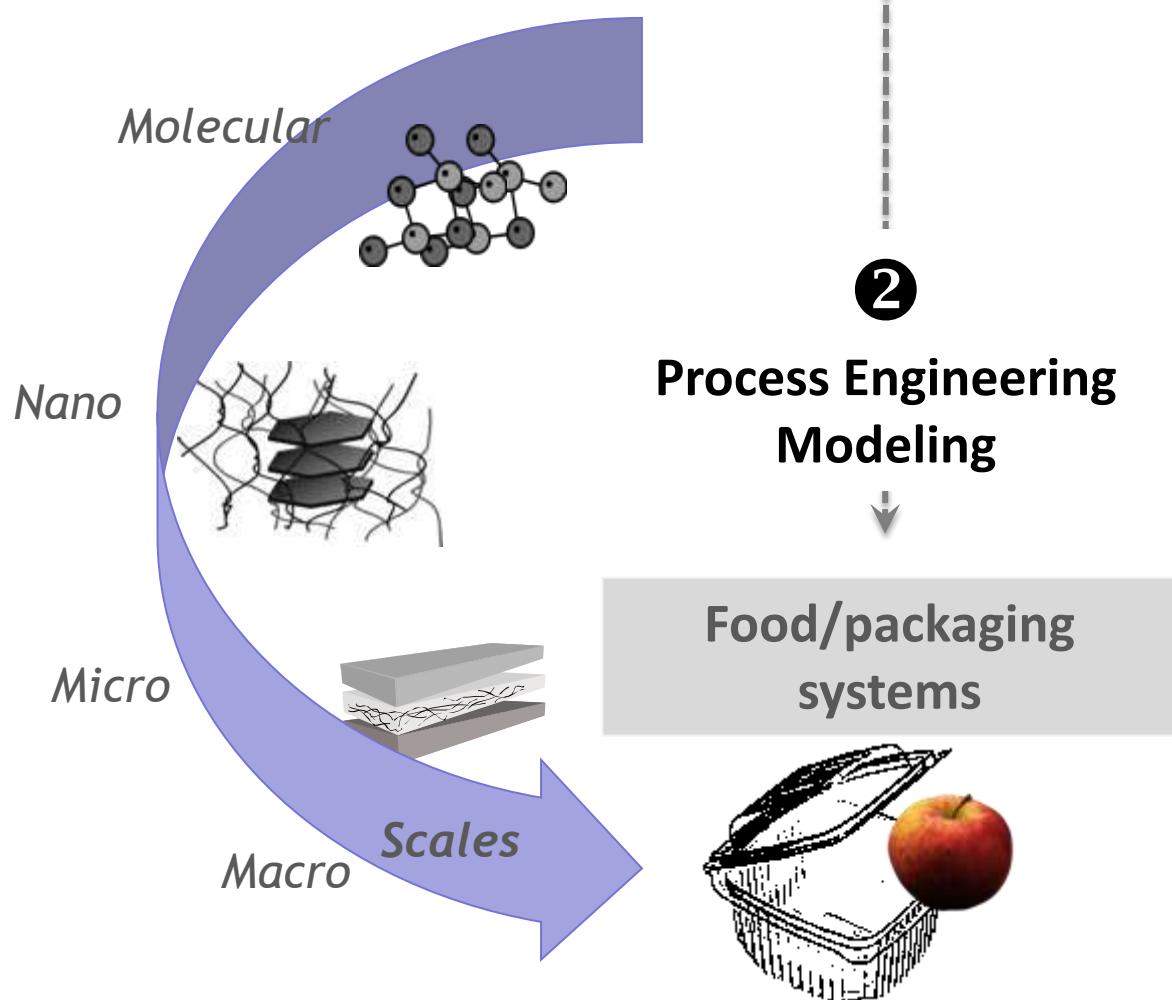
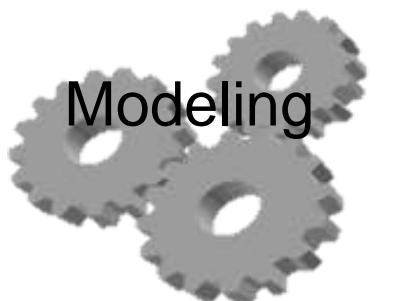
①

Material Engineering  
Modeling



**Objectif scientifique**  
**Comprendre les relations entre le procédé, la structure et les propriétés finales**

# Modélisation multi-échelles



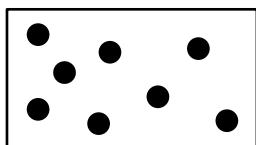
**Objectif scientifique**  
**Comprendre les relations entre le procédé, la structure et les propriétés finales**

# □ Objectif scientifique: modéliser les relations structure/transfert

## Modèles analytiques basés sur la tortuosité du milieu

### (i) Spherical particles

Isotropic spherical particles dispersed in a continuous phase



#### Maxwell

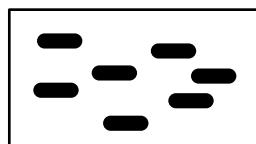
$$\frac{P}{P_0} = \frac{1-\Phi}{1+\frac{\Phi}{2}}$$

#### Bruggeman

$$\frac{P}{P_0} = (1 - \Phi)^{\left(\frac{3}{2}\right)}$$

### (ii) Cylindrical particles

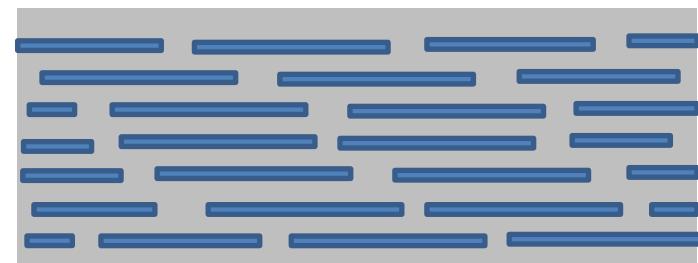
Dilute suspension of cylinder particles aligned to the surface



#### Strutt-Rayleigh

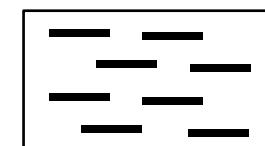
$$\frac{P}{P_0} = \frac{1-\Phi}{1+\Phi}$$

## Particules imperméables



### (iii) Platelet particles

Regular arrangement of platelet particles aligned to the surface



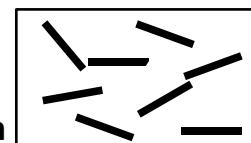
#### Nielsen

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1-\Phi}{1+\left(\frac{\alpha}{2}\right)*\Phi}$$

#### Cussler

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{\alpha^2 \Phi^2}{(1-\Phi)}\right)^{-1}$$

Random arrangement of platelet particles with random orientation



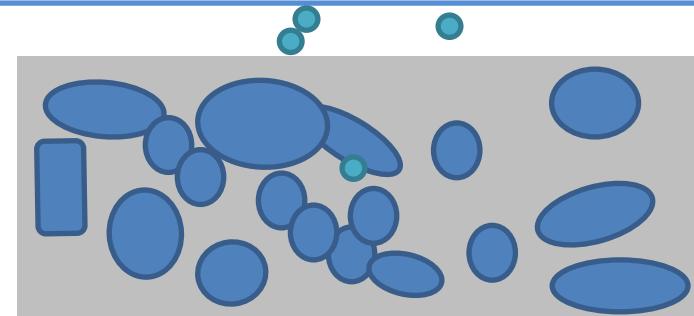
#### Bharadwaj

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1-\Phi}{1+\frac{\alpha^2}{23}(S+\frac{1}{2})\Phi}, S =$$

# □ Objectif scientifique: modéliser les relations structure/transfert

Modèles analytiques pour les milieux biphasiques

Particules perméables



Model without fitting parameters

$n$ : shape factor of the particle

$$P = P_m \left[ \frac{\mathbf{n} P_p + (1 - \mathbf{n}) P_m + (1 - \mathbf{n}) \Phi_p (P_p - P_m)}{\mathbf{n} P_p + (1 - n) P_m - \mathbf{n} \Phi_p (P_p - P_m)} \right]$$

$0 \leq n \leq 1/3$ : longest axis of the ellipsoid is directed along the diffusion direction

$n = 1/3$ : spherical particles

$1/3 \leq n \leq 1$ : shortest axis of the ellipsoids is directed along the diffusion direction

Model with fitting parameters

**Maxwell model**

$K_H$ : empirical constant

$$P = P_m \left[ 1 + \frac{3\Phi_p \beta}{(1 - \Phi_p \beta - K_H(1 - \Phi_p) \beta^2)} \right]$$

$$\beta = \frac{P_p - P_m}{P_p + 2P_m}$$

**Higushi model**

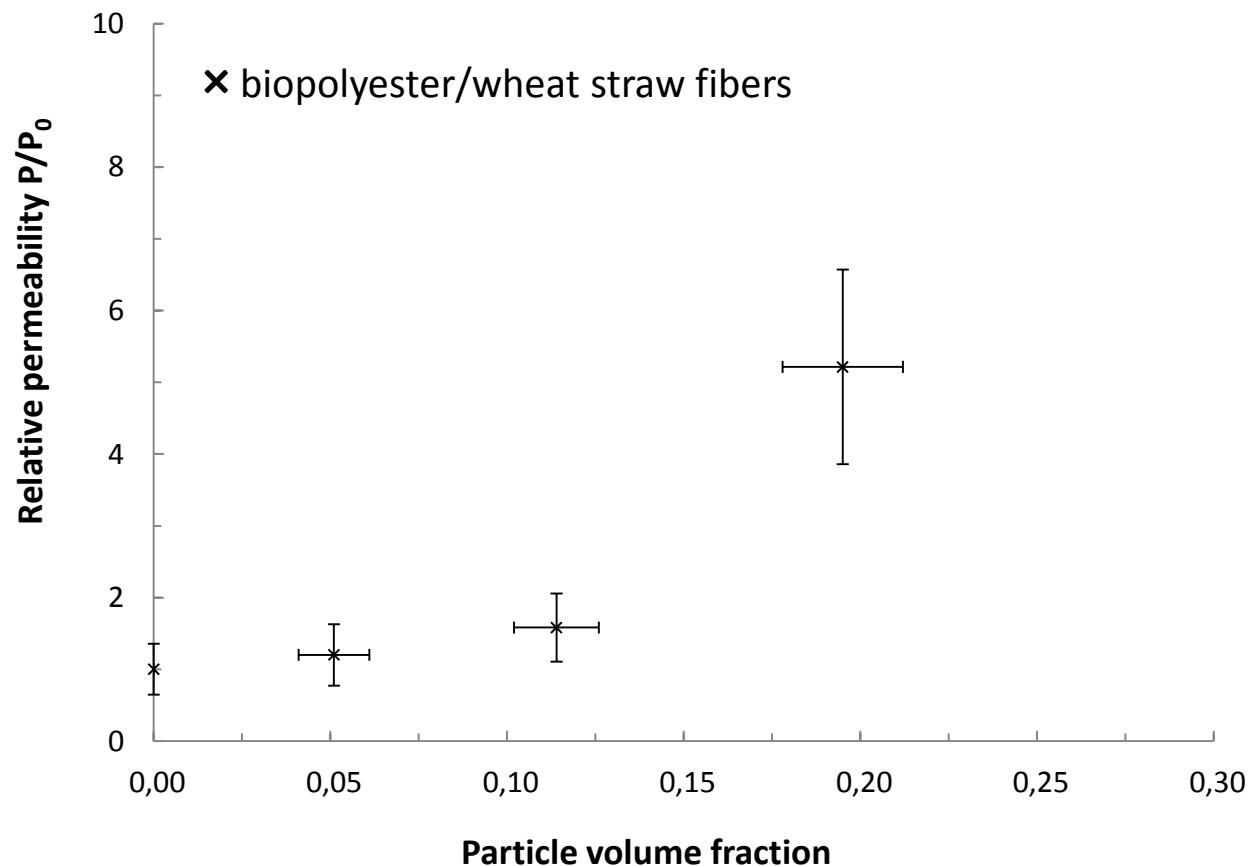
→ Suspension diluée de particules sphériques ou cylindriques

## □ Objectif scientifique: modéliser les relations structure/transfert

---

Modèles analytiques pour  
les milieux biphasiques

Particules perméables

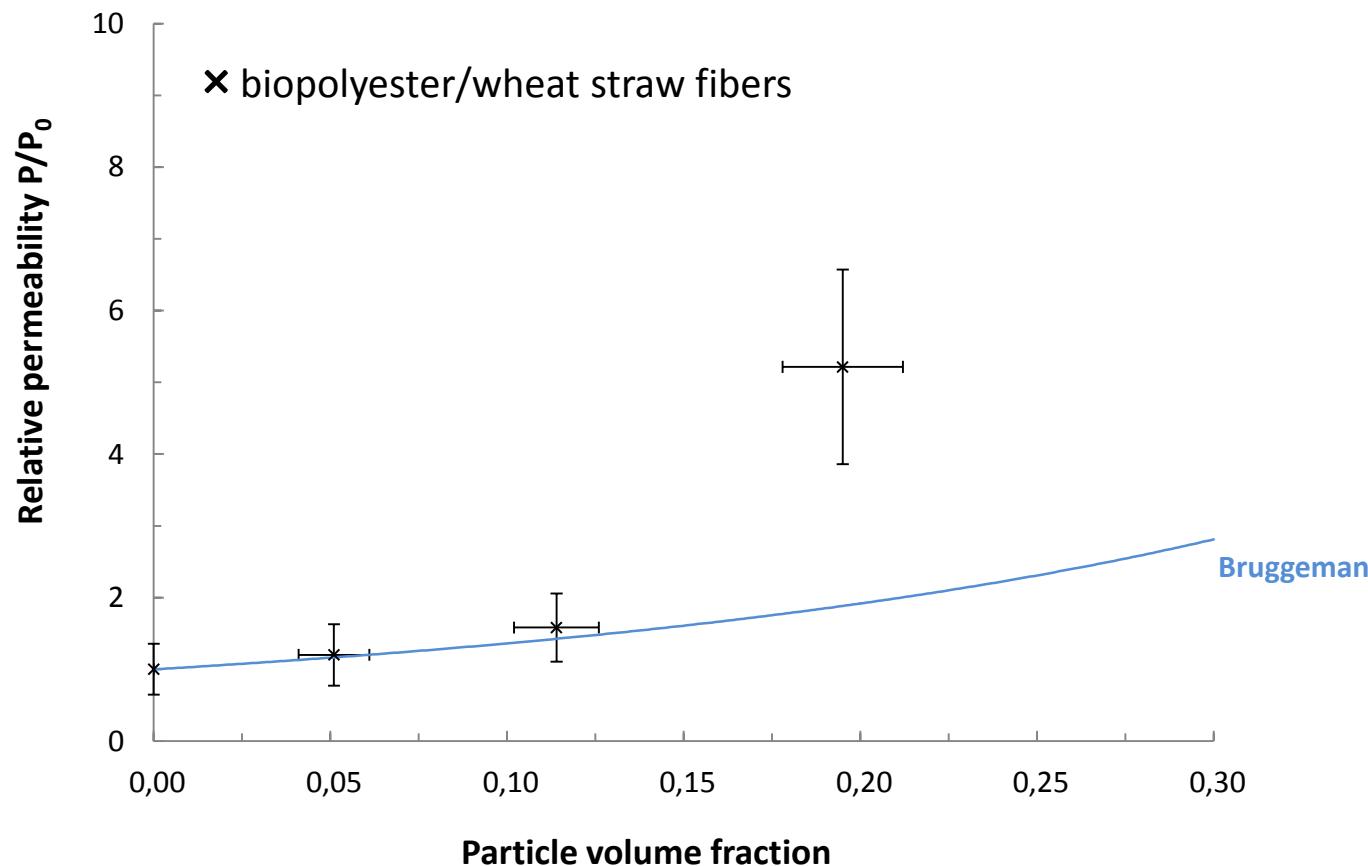


## □ Objectif scientifique: modéliser les relations structure/transfert

---

Modèles analytiques pour  
les milieux biphasiques

Particules perméables



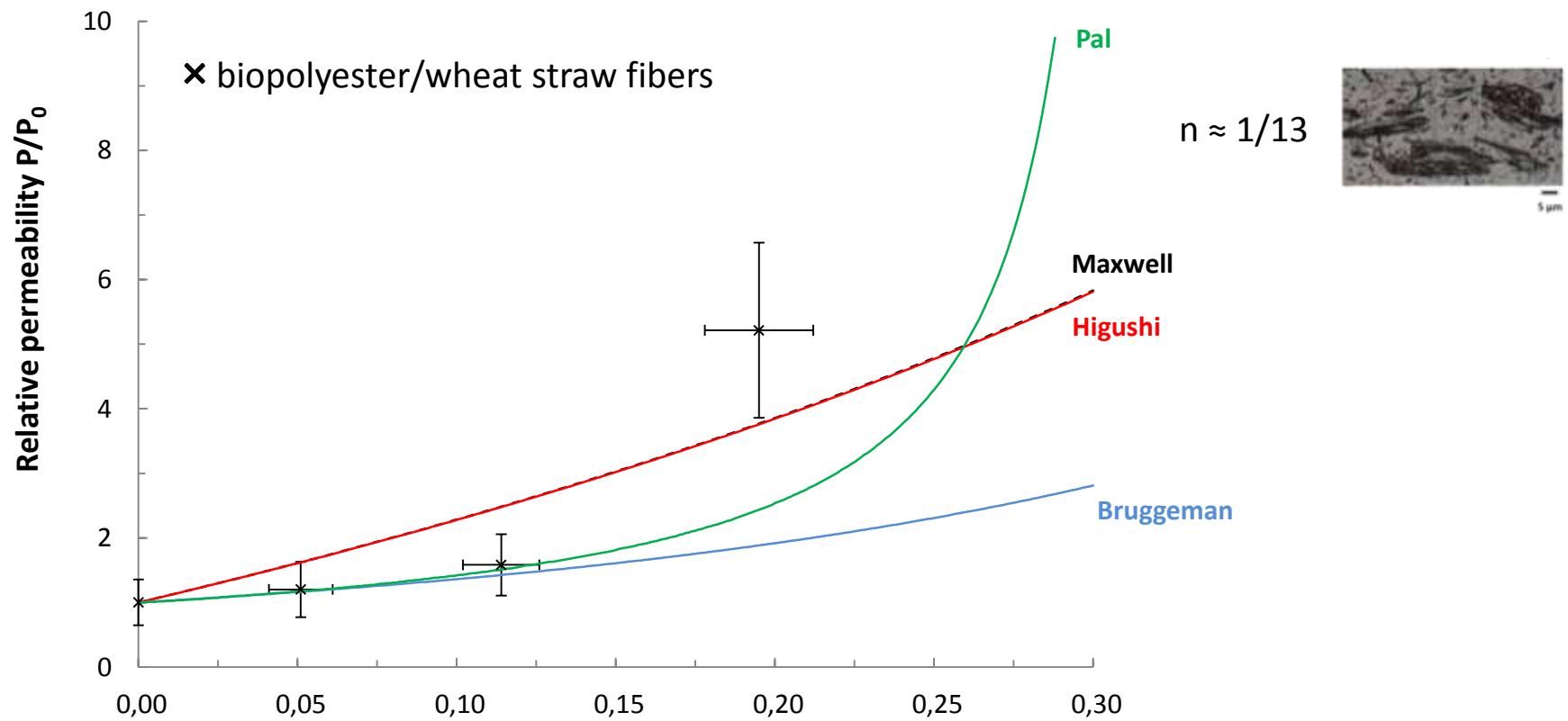
## □ Objectif scientifique: modéliser les relations structure/transfert

Modèles analytiques pour les milieux biphasiques

Particules perméables

$\approx 0.31$

(ellipsoidal particles)  $\approx 0.79$



Limites:

Particle volume fraction

- Difficile d'accéder par l'expérience aux paramètres d'entrée (perméabilité de la particule)
- Il est nécessaire d'ajuster le modèle aux données expérimentales de VWTR

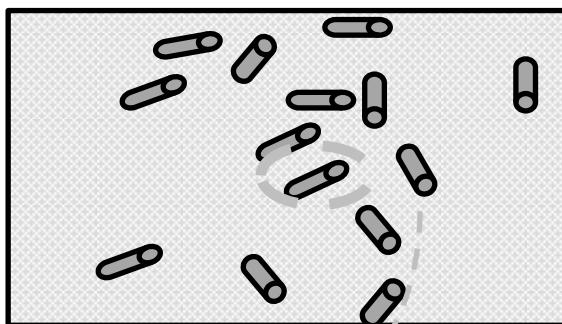
# Objectif scientifique: modélisation 2D relations structure/transfert

Optical microscopy pictures

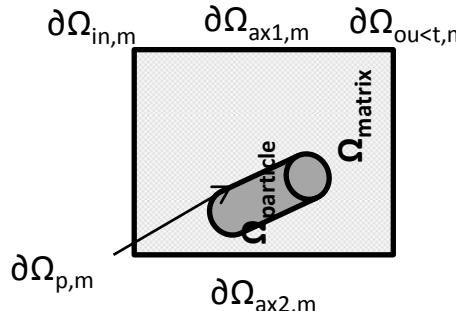


## Geometry and inputs

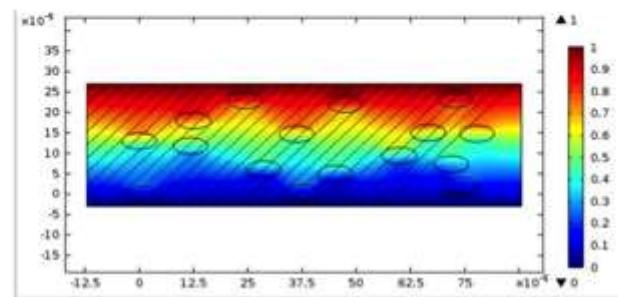
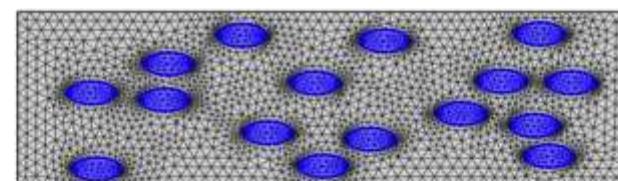
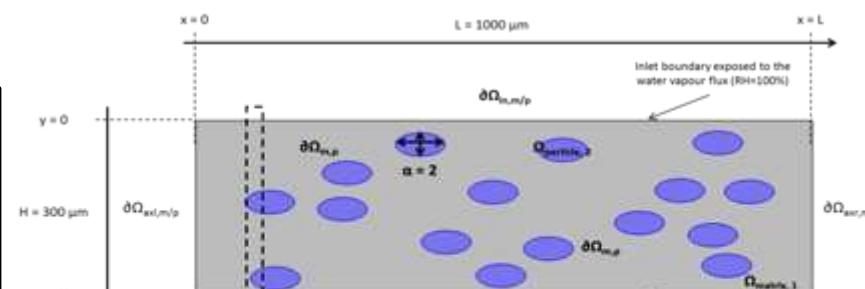
Drawing of the geometry on the software interface



Definition of the transport laws and the initial & boundary conditions

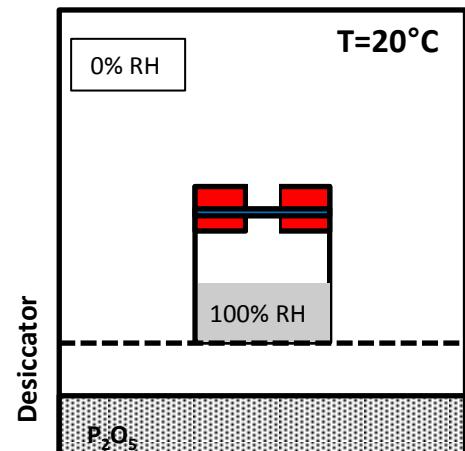


## Numerical simulation (FEM)

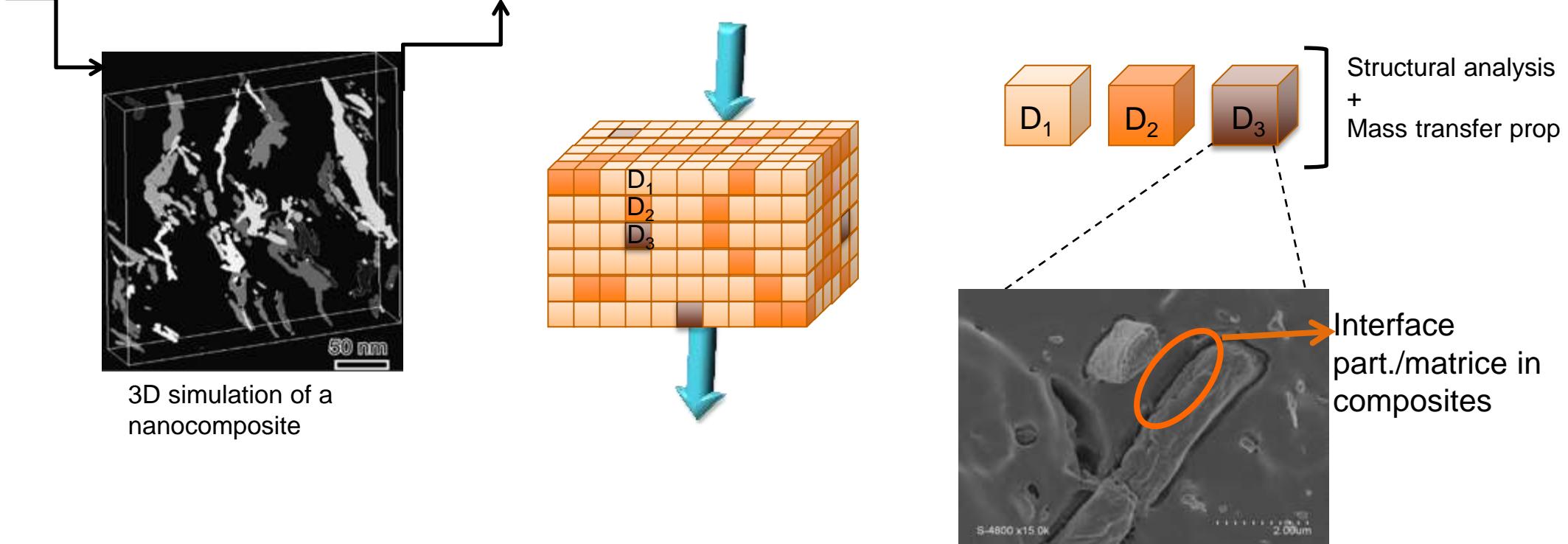
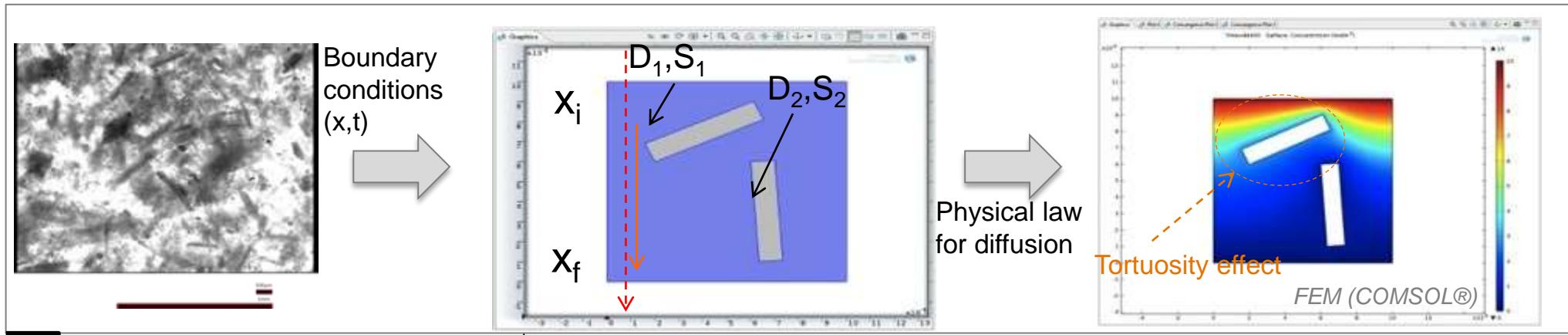


## Model validation

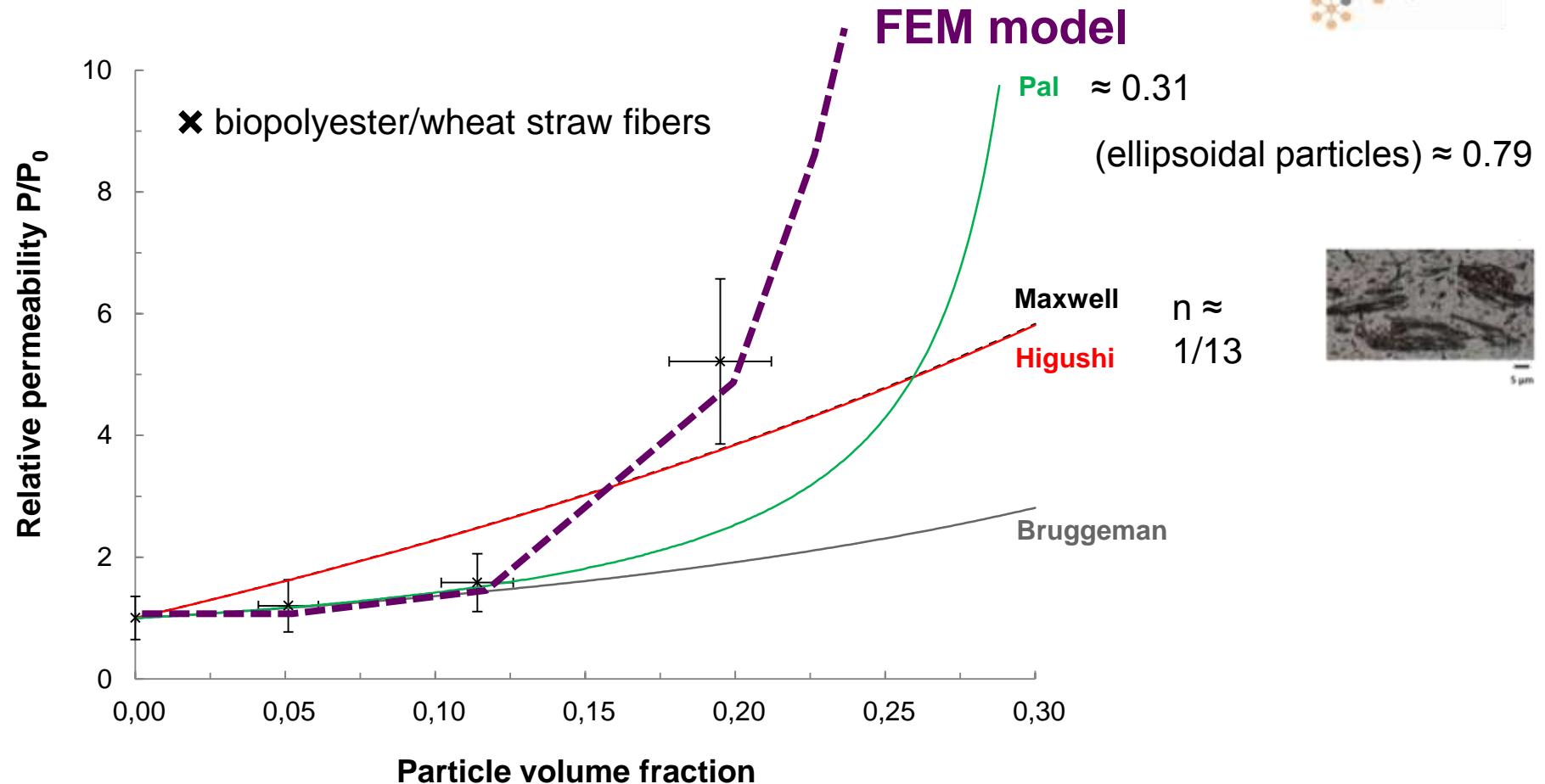
Water vapour permeability in biopolyester/wheat straw fibre particle composites



## Objectif scientifique: modélisation 2D relations structure/transfert



## Objectif scientifique: modélisation 2D relations structure/transfert



Limites:

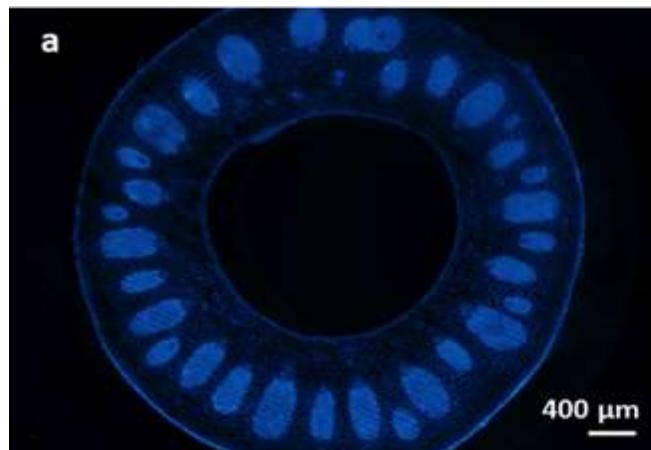
- Difficile d'accéder par l'expérience aux paramètres d'entrée
- Impact de la particule sur la structure de la matrice?
- Rôle de l'interphase ?

## □ Objectif scientifique: modélisation 2D relations structure/transfert

Difficile d'accéder par l'expérience aux paramètres d'entrée



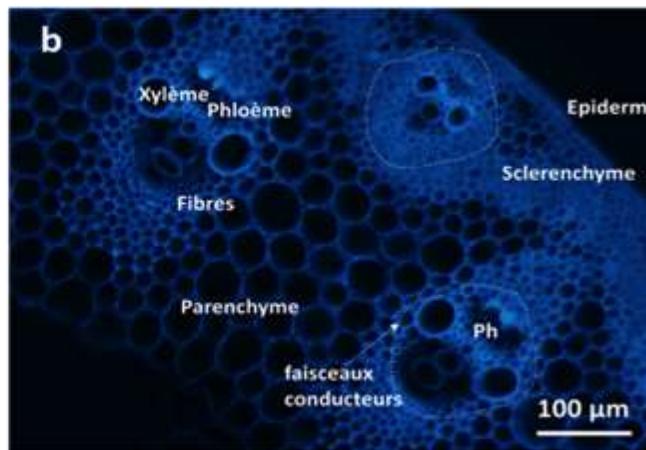
La structure de la particule de paille influence la valeur de diffusivité obtenue



**Piece of wheat straw fiber**

Presence of specific porous channel for the diffusion of water vapour

Ability to swell



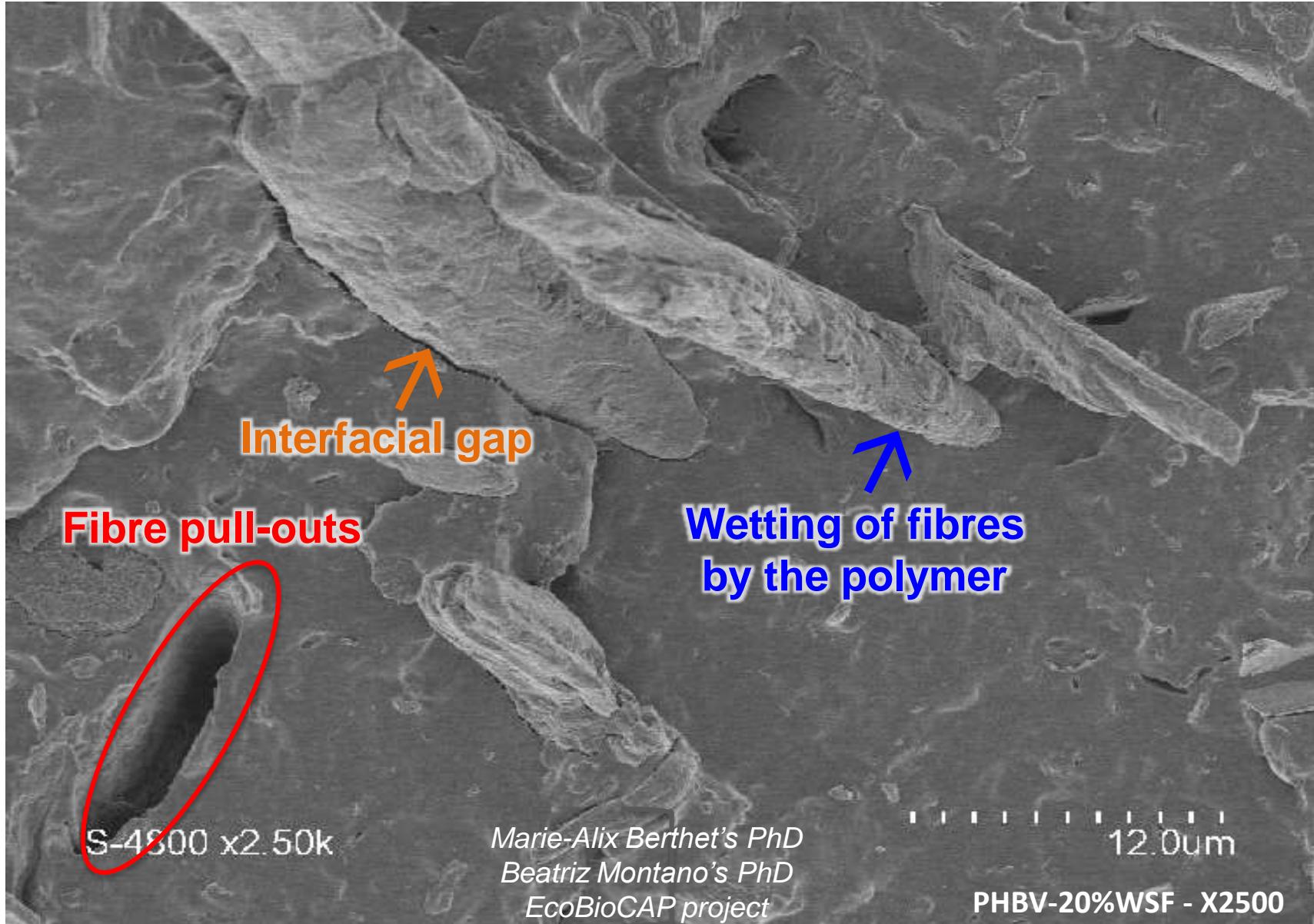
**Grinded wheat straw fibers**

More crystalline structure

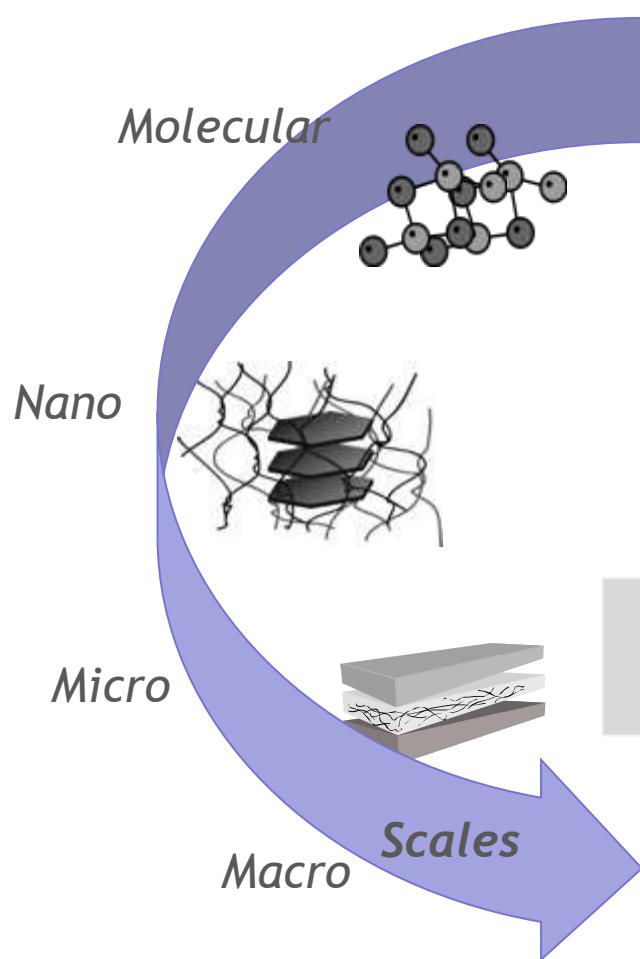
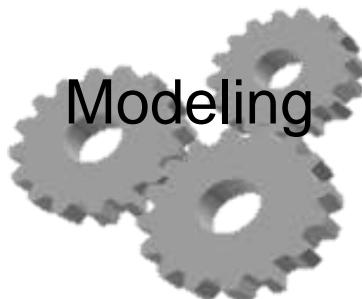
Under mechanical constraint of the polymer matrix: no ability to swell

## □ Objectif scientifique: rôle de l'interphase?

Poor interfacial interactions suspected by SEM observations



# Modélisation multi-échelles



1

**Material Engineering  
Modeling**

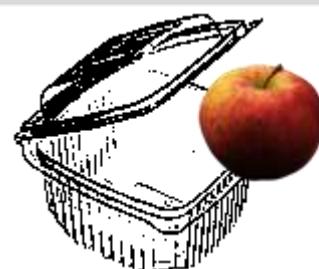
3

**Knowledge Engineering  
Modeling**

*Stakes*

2  
**Process Engineering  
Modeling**

**Food/packaging  
systems**



**Objectif scientifique**

*Environment*



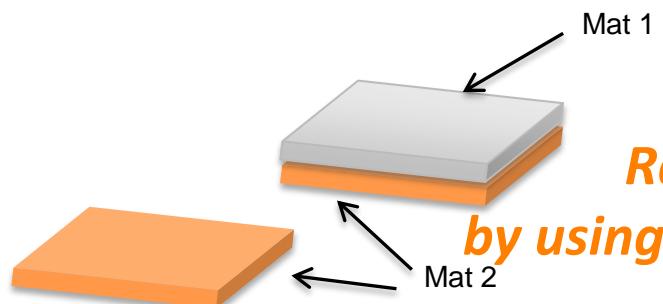
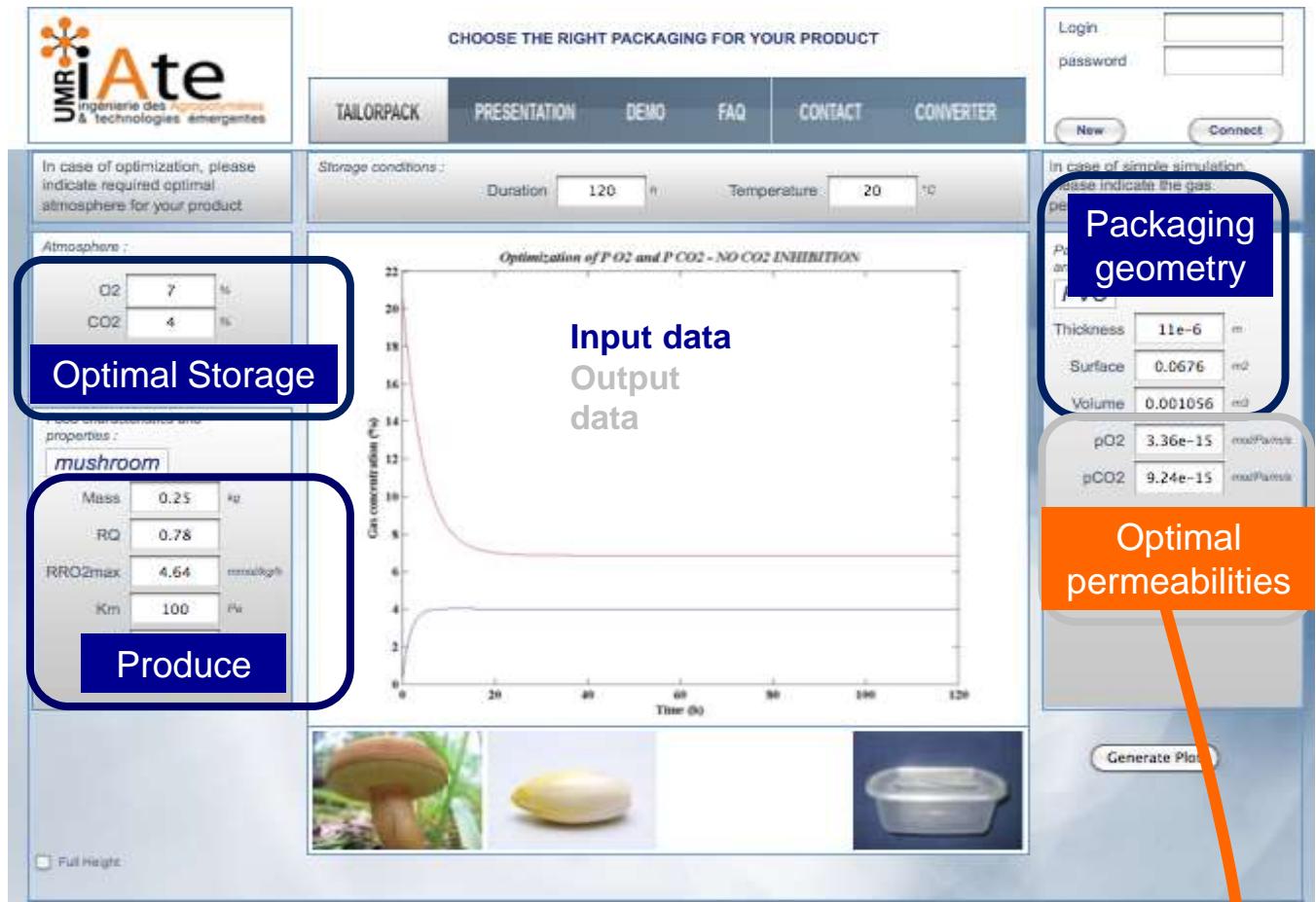
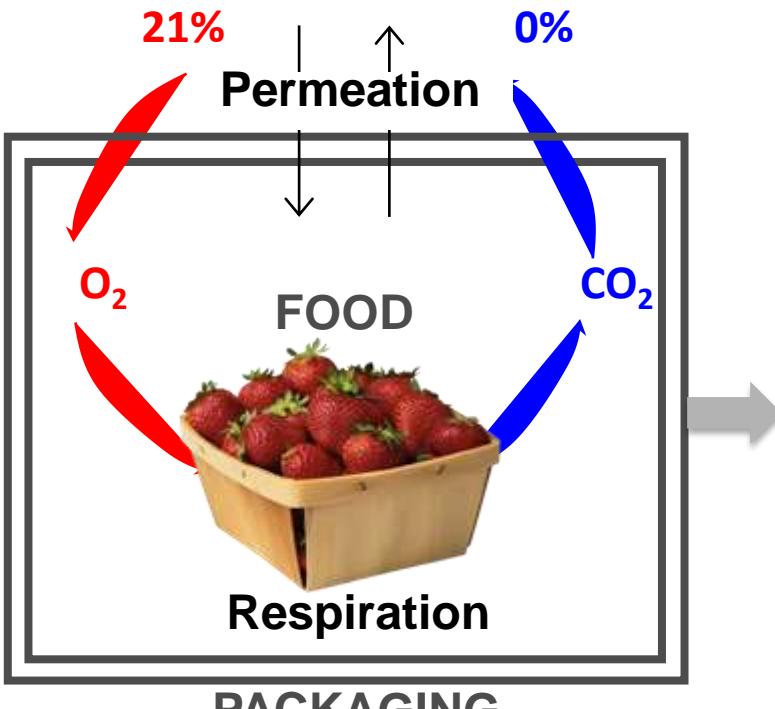
*Consumer, end-  
users*

*Industry*



# Des outils mathématiques pour identifier les propriétés de transfert cibles

Cas de l'emballage sous atmosphère modifiée des fruits et légumes



<http://plasticnet.grignon.inra.fr/lateTools/>

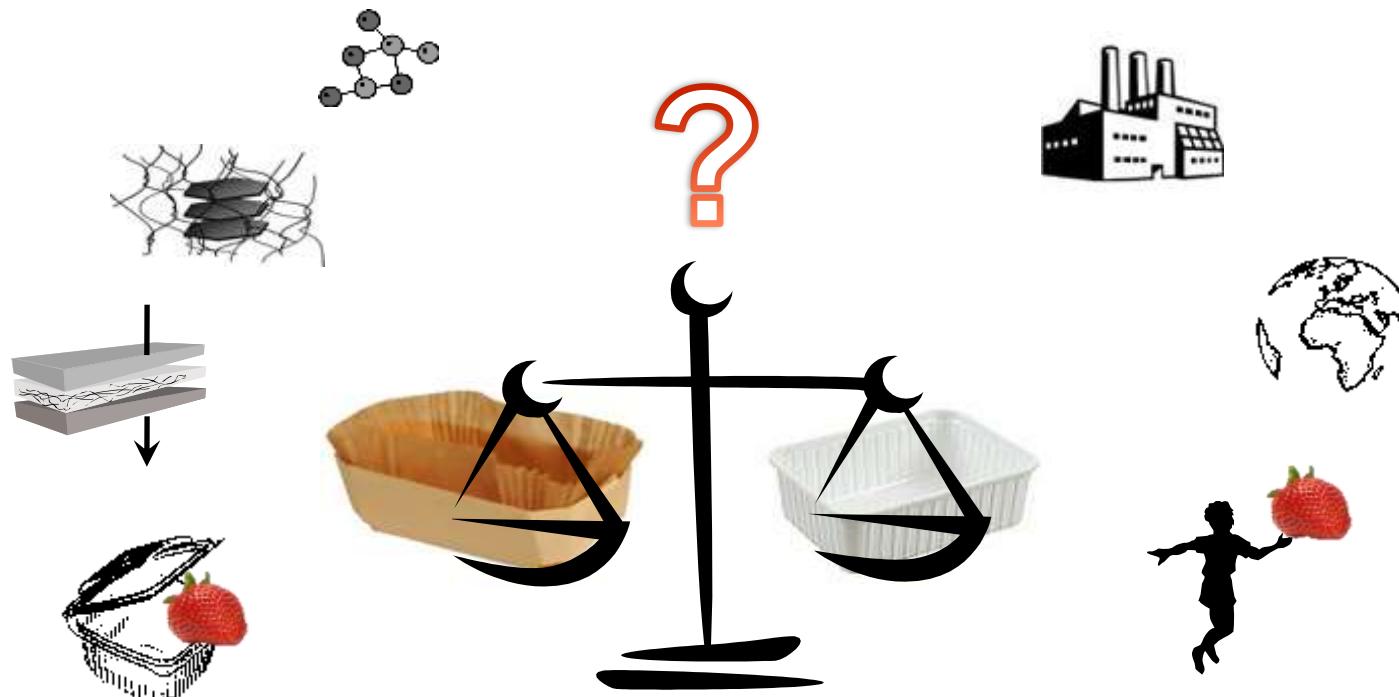
*Rational design of materials*

*by using the materials engineering model*

## Vers une prise de décision multi-critères

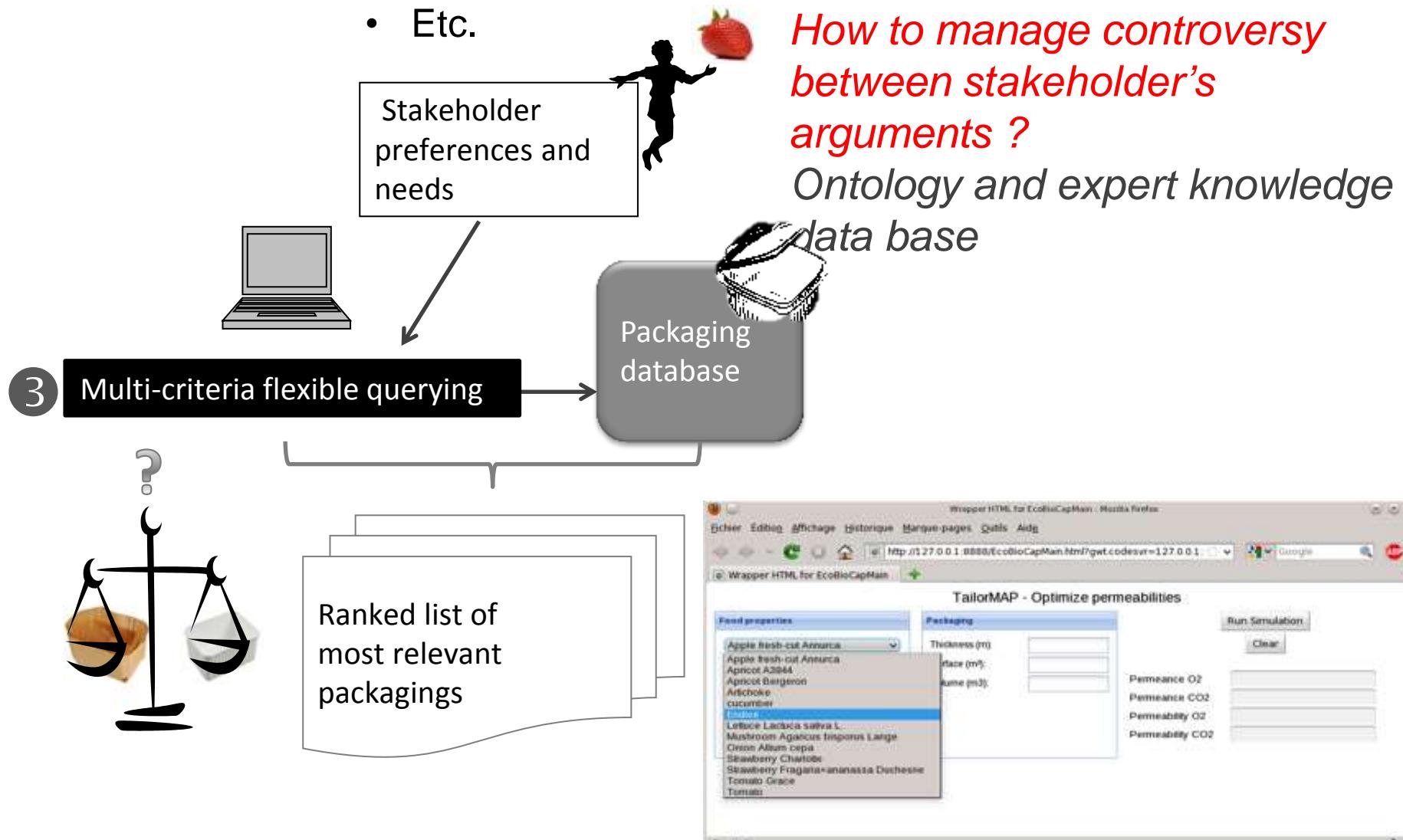
Dans le dimensionnement d'un EAM, le choix d'un emballage résulte souvent d'un compromis entre plusieurs critères:

*“Je veux un emballage avec des perméabilités aux gaz optimales pour garantir la qualité de mon produit et je souhaiterais un emballage issu de ressources renouvelables, si possible biodégradable et transparent et avec un coût pour la matière première inférieur à 3 € / kg ...”.*

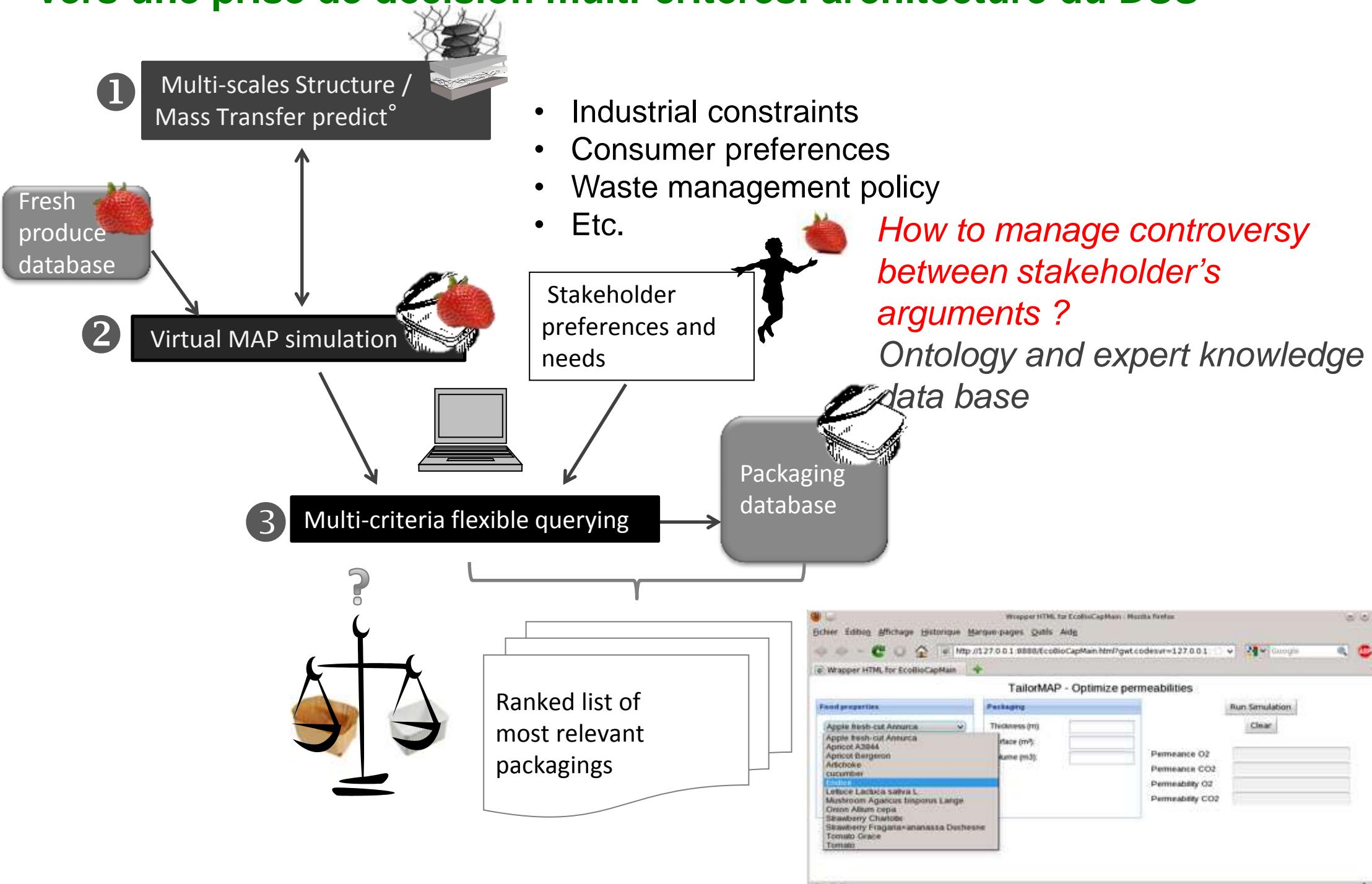


# Vers une prise de décision multi-critères: architecture du DSS

- Industrial constraints
- Consumer preferences
- Waste management policy
- Etc.



# Vers une prise de décision multi-critères: architecture du DSS





# Innovative approaches to turn agricultural waste into ecological and economic assets

H2020 2016-2020

Prof. Nathalie GONTARD coordinator  
INRA Research Director

*Research supported by the European Commission through the FP7 EcoBioCAP (2011-2015) and H2020 NoAW (2016-2020) projects.*



## QUESTIONS ?

