

La modélisation des procédés frigorifiques: un défi de maîtrise de la qualité et de la sûreté des produits alimentaires

Graciela Alvarez

UMR *Génie Industriel Alimentaire* (Cemagref/ENSIA/INAPG/INRA)

- Cemagref Unité de recherche en génie des procédés frigorifiques GPAN
 - Parc de Tourvoie BP44 92163 Antony, France
 - graciela.alvarez@cemagref.fr. Tél +33(0)1 40966017

Problème posé

- Procédé -----) Transformation ---) Qualité des produits
- Histoire-temps-température-cisaillement

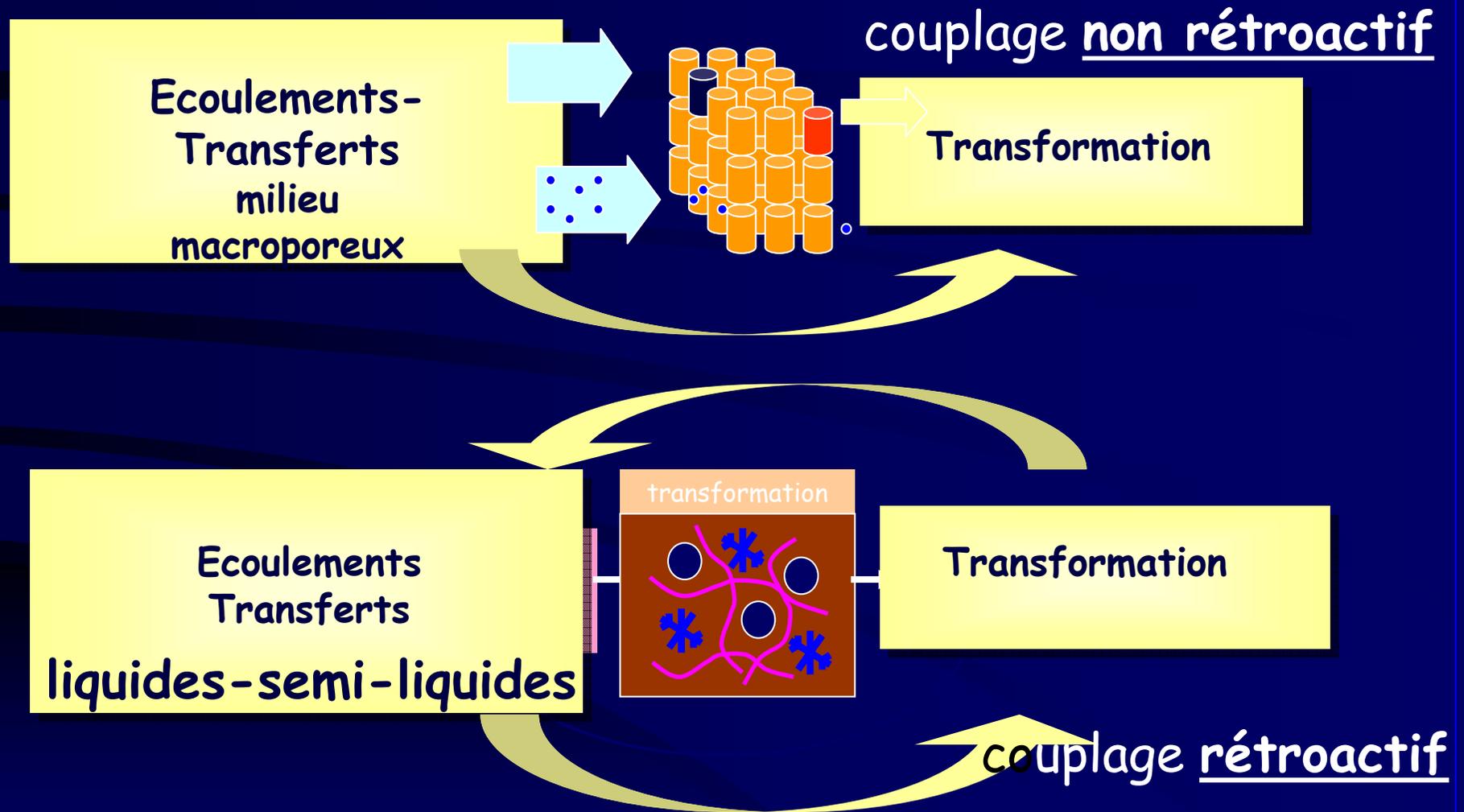
Couplage phénomènes de transport de: quantité de mouvement, d'énergie et de matière
convection ou diffusion et transformation

Produits solides
Traités par un vecteur fluide

Produits liquides

Objectif général: caractériser, prédire et interpréter des couplages entre écoulement-transferts transformation au sein des équipements industriels

Deux problèmes scientifiques et industriels



La démarche

MODELISATION

Outils de modélisation

EXPERIMENTATION
MESURE

Outils
métrologiques

Vi, Tu,
diphasique
h, viscosité

Génération d'outils,
méthodes
expérimentales et
modèles

Ecoulements

Transferts

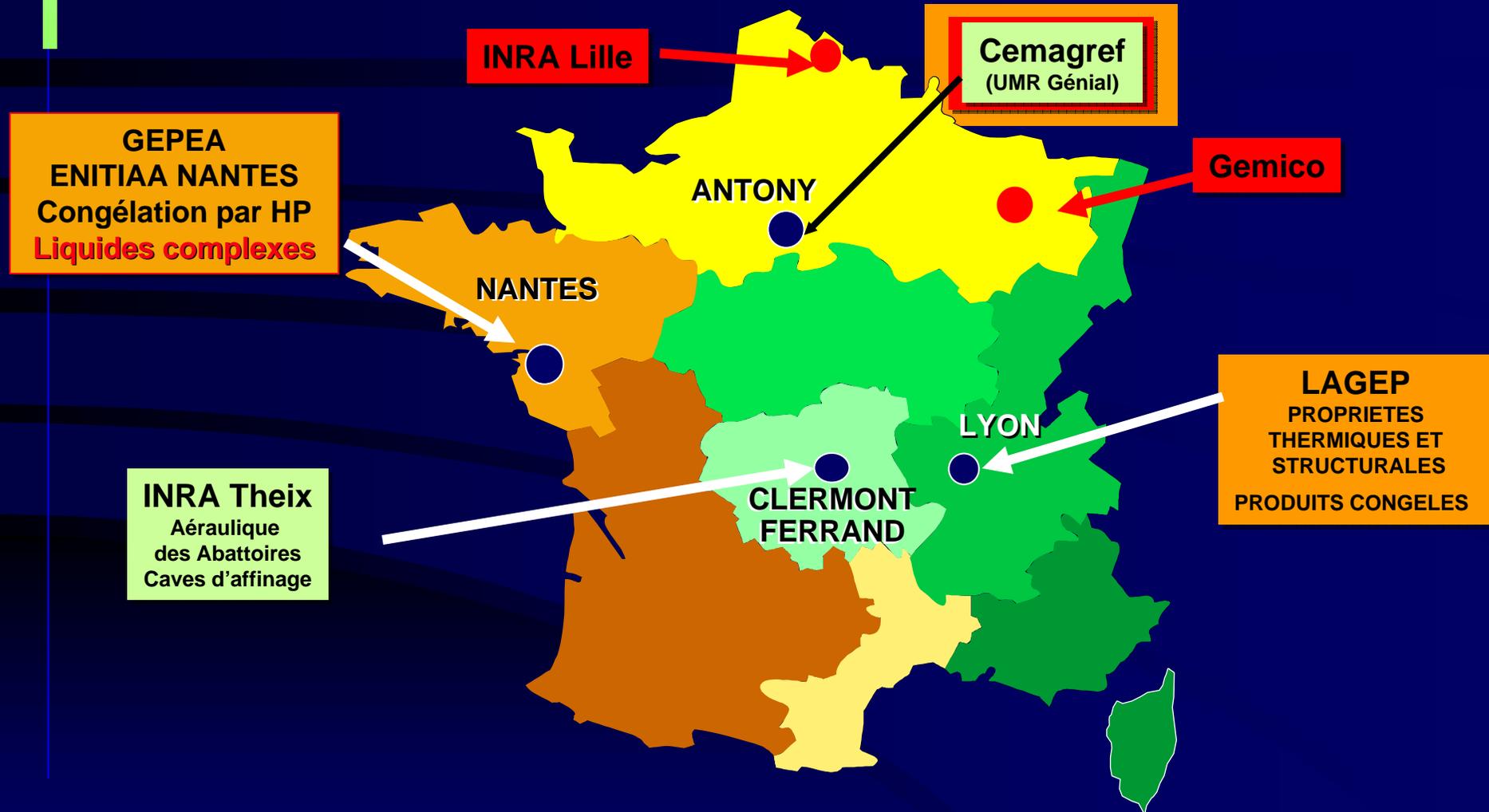
Transformation
du produit

Mise au point des
maquettes prototype
et méthodes de
mesure

Développement
des modèles
spécifiques codes
« maison »
Macroporeux

Positionnement

Couplage Écoulements et transferts et transformation dans les procédés frigorifiques, au sein de ensembles alimentaires, liquides semi-liquides complexes



Positionnement européen

Les laboratoires européens travaillant
procédés frigorifiques et dans les ensembles
alimentaires, liquides semi-liquides complexes

Wageningen
milieux poreux
approche différente

U. Bristol

Cemagref

Windhab
EHT

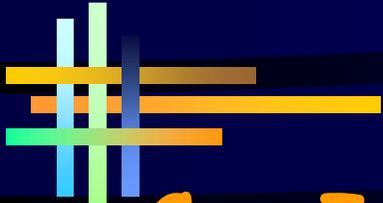
U. Leuven

CFD Chambres froides

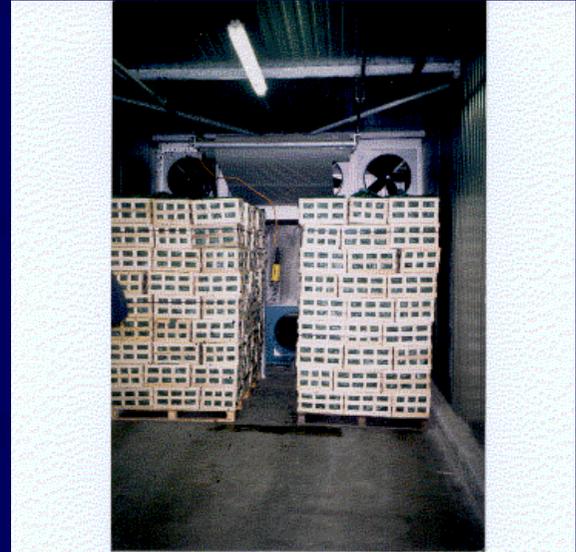
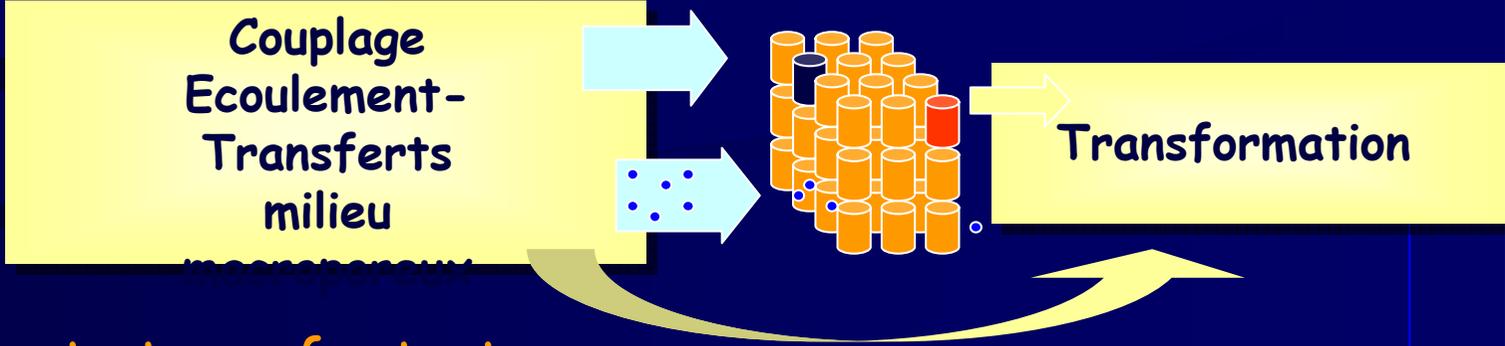


Cemagref

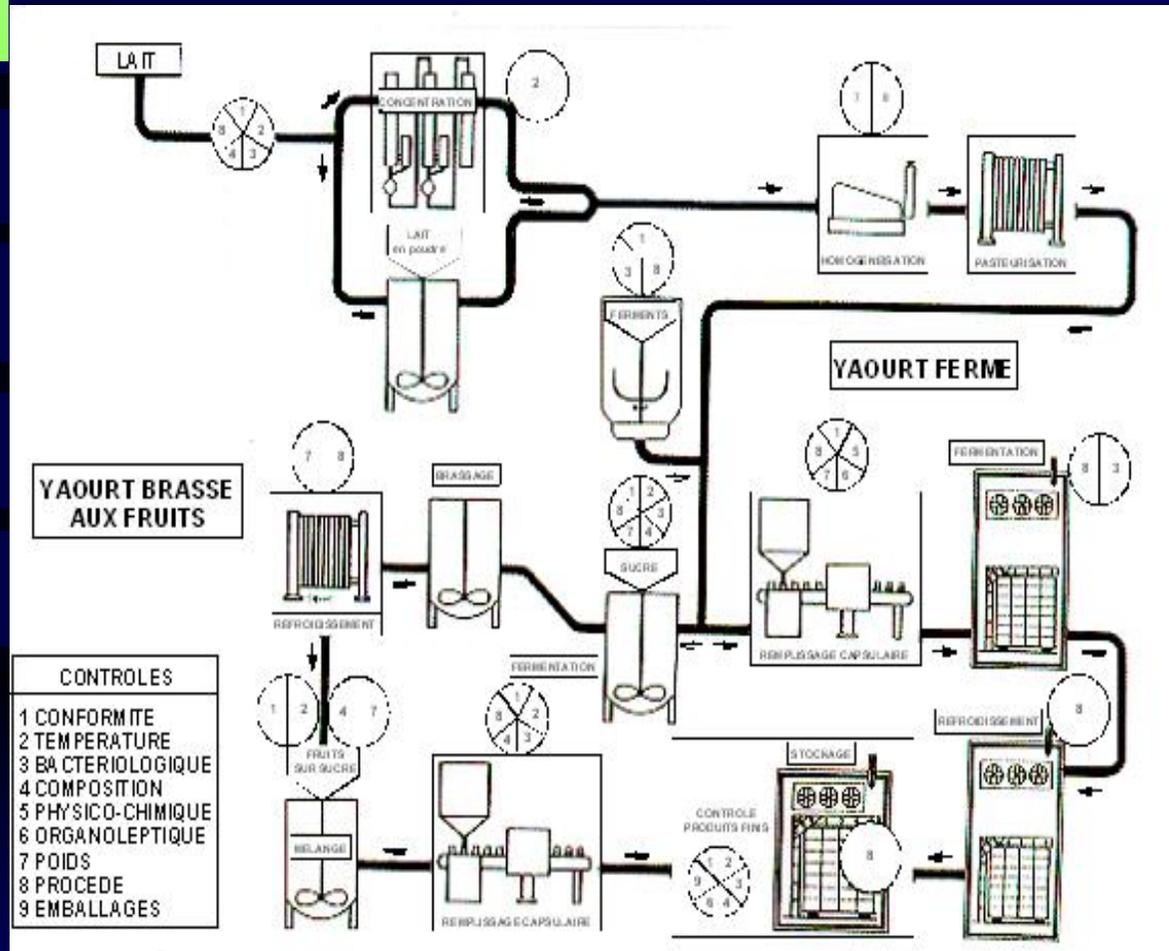




Cas I: Couplage Écoulement- transfert et transformation non-rétroactif



Un exemple: Fabrication de yaourt ferme



Standardisation

Pasteurisation

inoculation
en pot

Fermentation
en palette

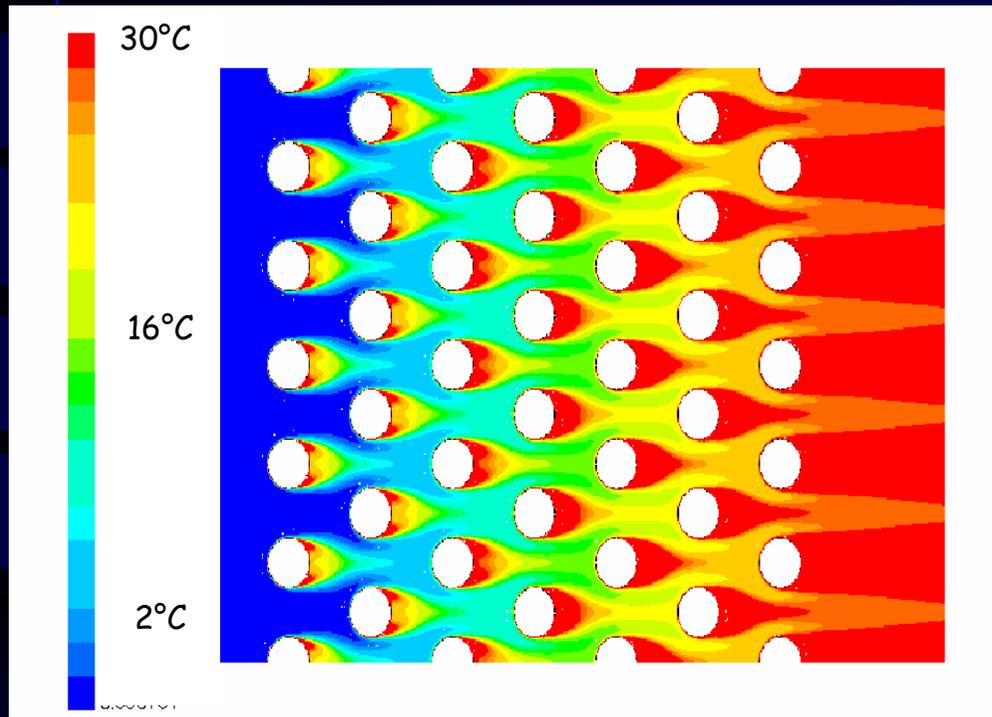
Refroidissement

Entreposage

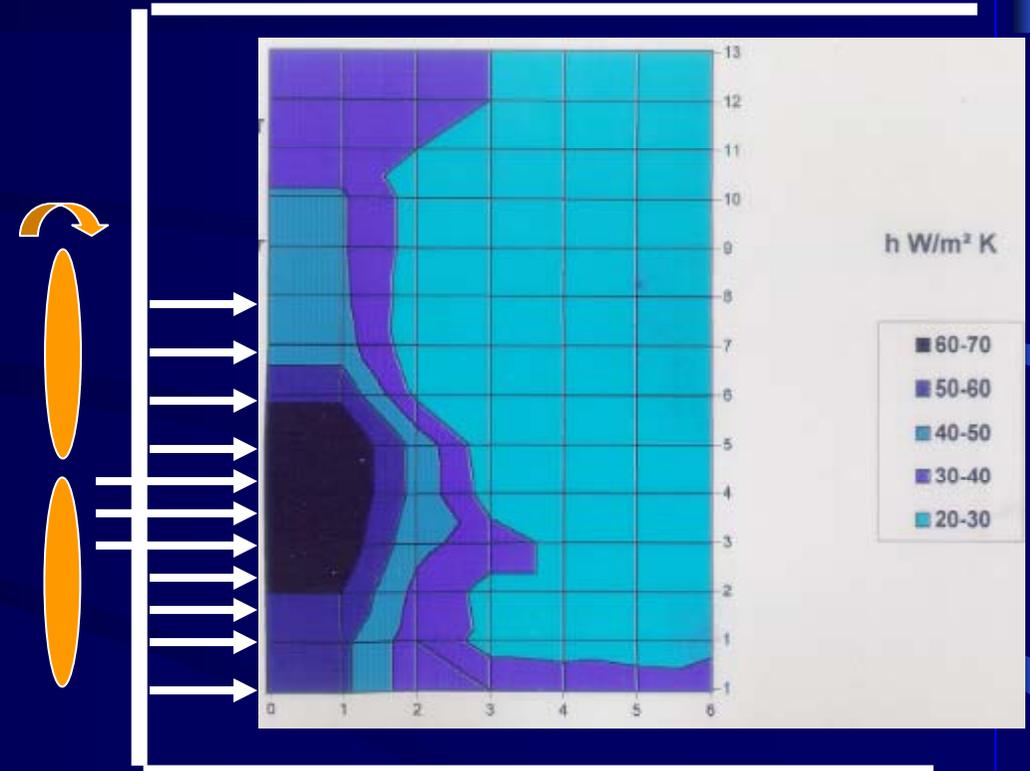
Problème: fermentation
hétérogène

pots liquides (f. incomplète)
pot trop acides (f. trop avancée)

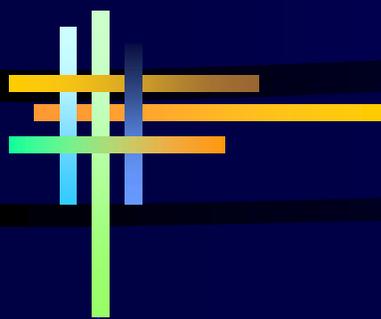
L'hétérogénéité des transferts thermiques



-Réchauffement de l'air



-Coefficient de transfert



Comment approcher le problème?

Interactions aérodynamiques et thermiques entre produits dans un ensemble alimentaire?

Quelles méthodologies expérimentales pour la caractérisation de l'intensité des transferts?

Quel est le rôle de l'emballage dans les hétérogénéités de transferts?

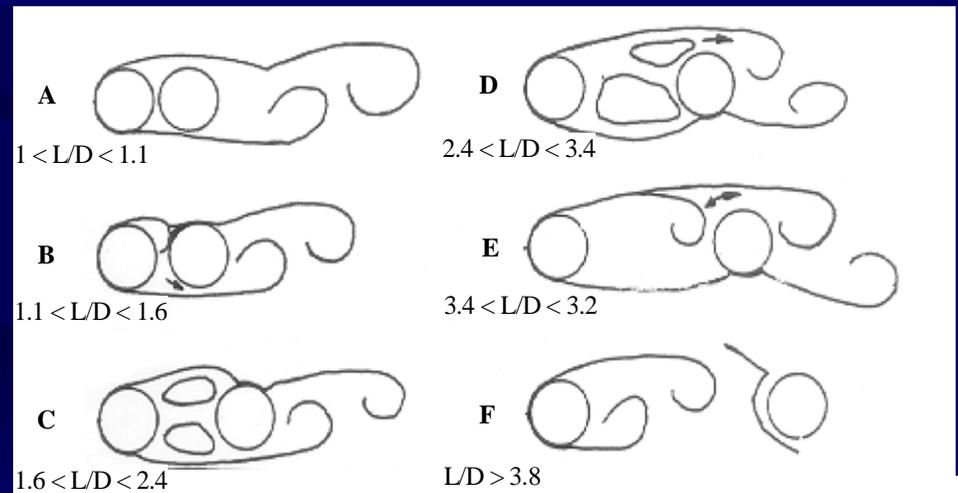
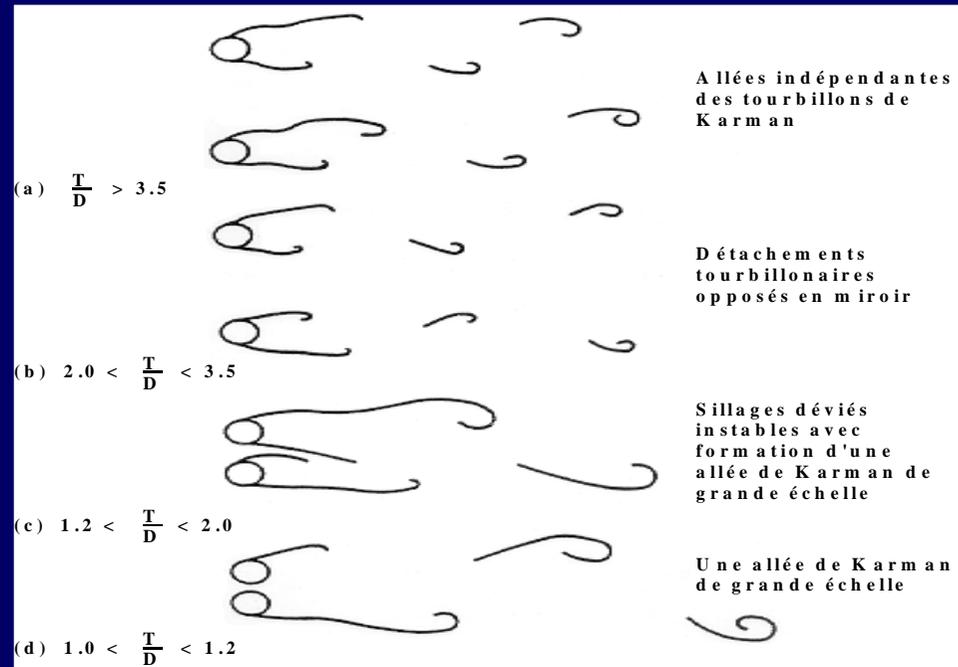
Quelle est la modélisation la plus adaptée?

Interactions aérodynamiques entre produits proches

Phénomène de blocage

Coalescence des couches limites
effet « Coanda »

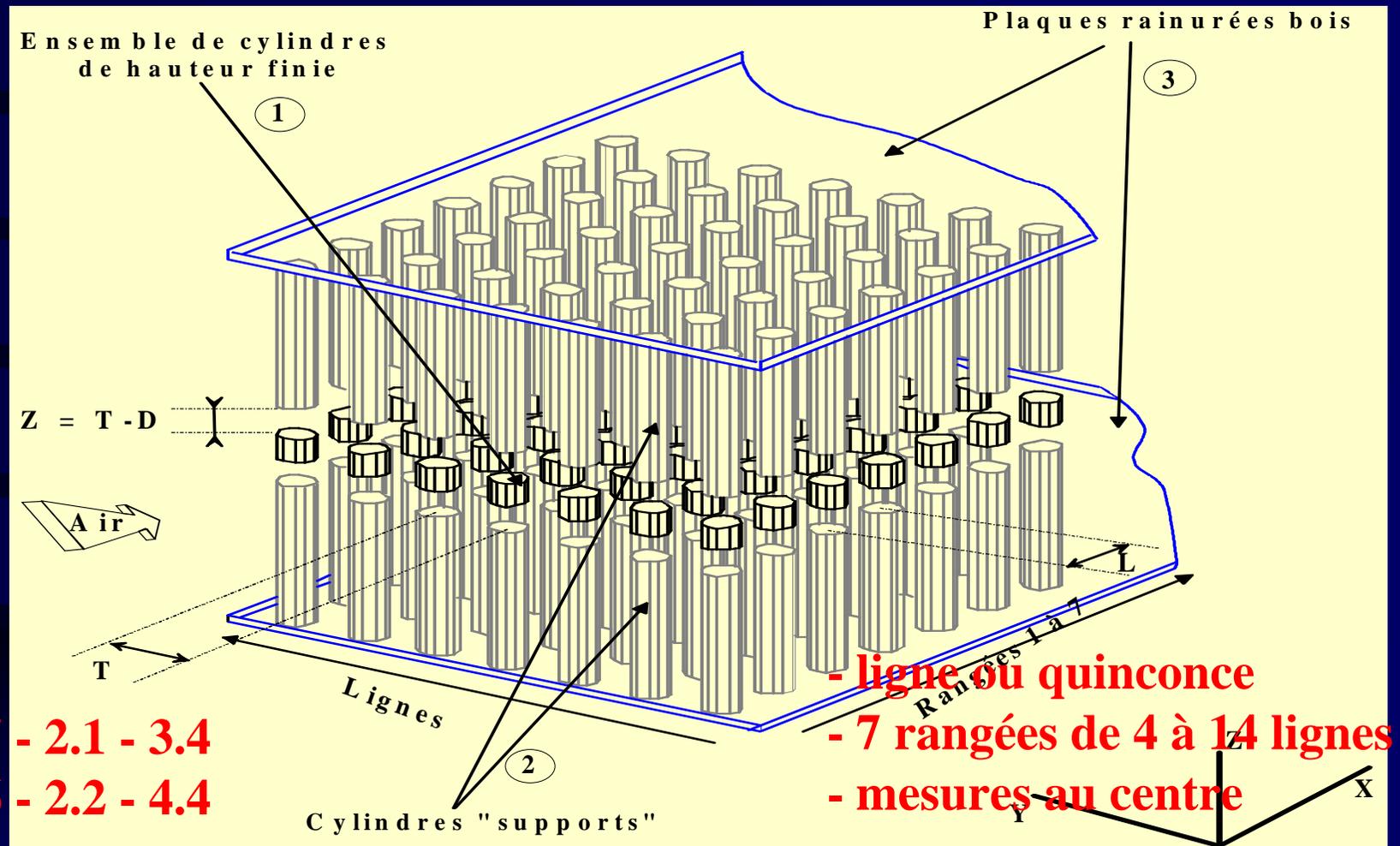
Écoulement de Sillage
fortement perturbé



(Kondjoyan A. Alvarez G. 1995) Régimes d'écoulement dans un arrangement de 2 cylindres

Quelles méthodologies expérimentales à mettre au point?

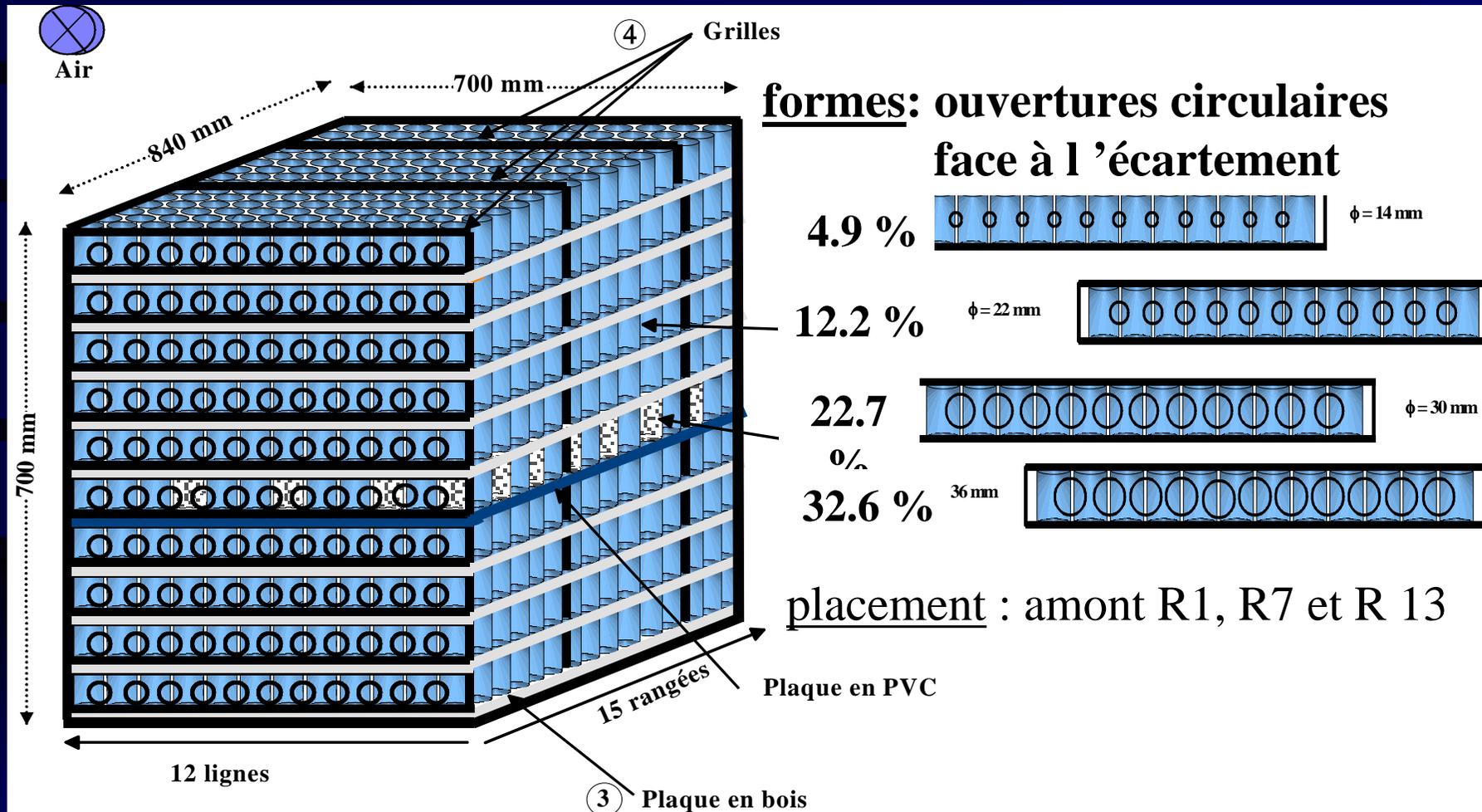
Ensemble idéal monocouche



(Carniol N, Kondjoyan A, Alvarez G. 1997)

Interaction produit-emballage

Ensemble multicouche



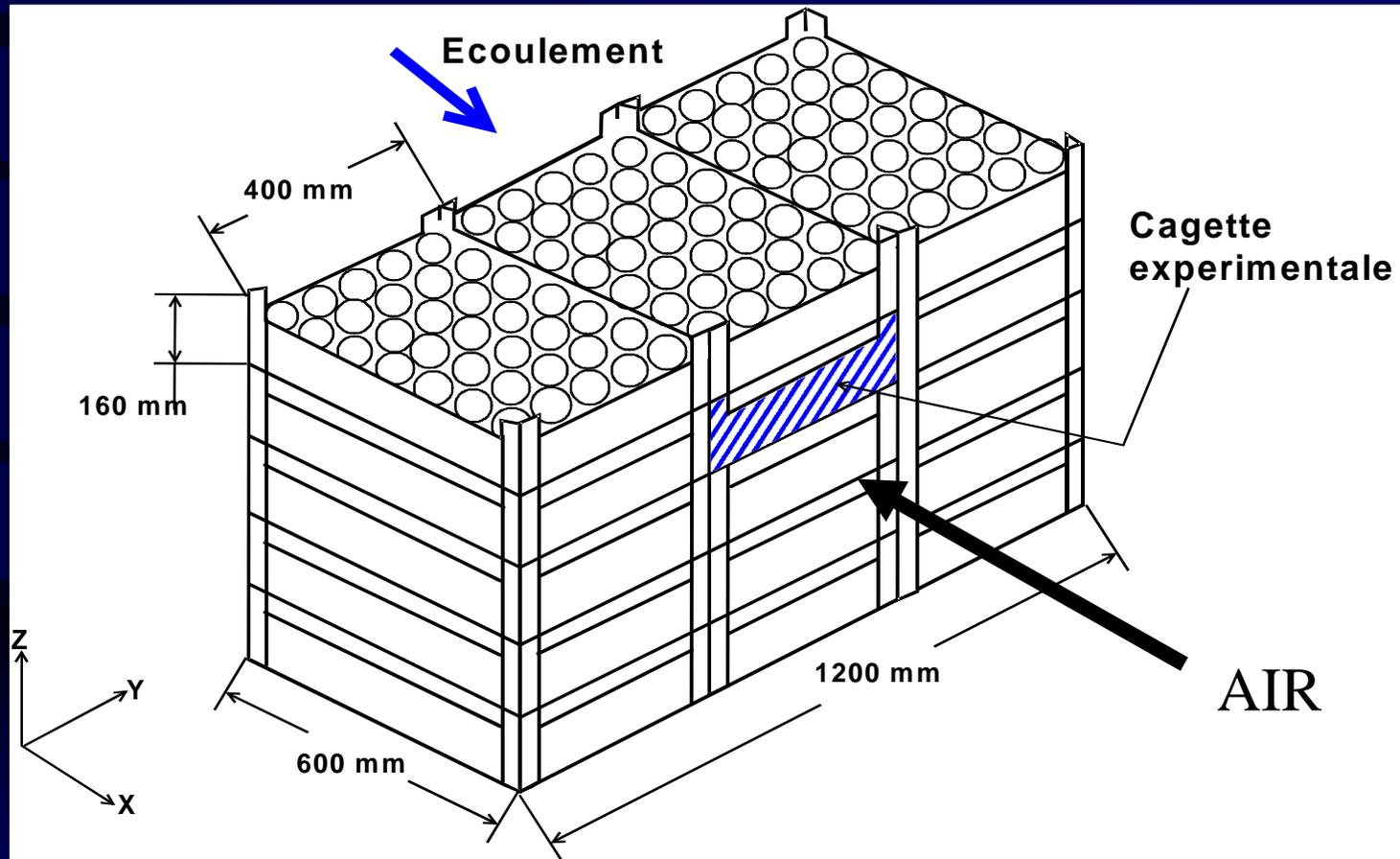
- ensemble en ligne

Carniol N. Alvarez G, Kondjoyan (1998)

- 15 rangées et 12 lignes

- mesures au centre et à la paroi

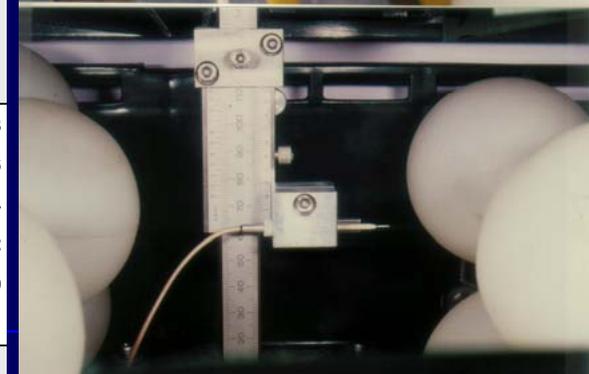
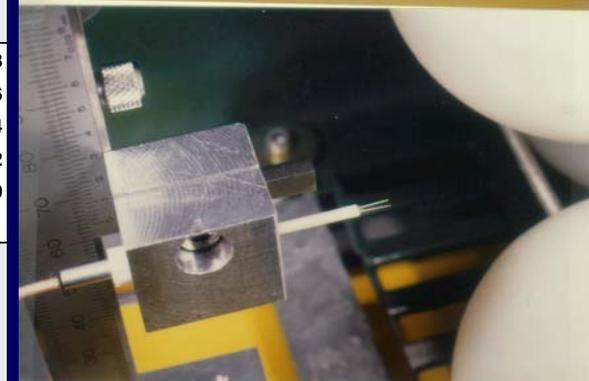
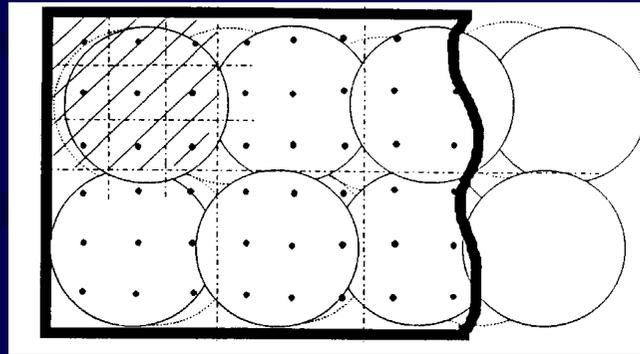
Une maquette d'une palette réelle de produits



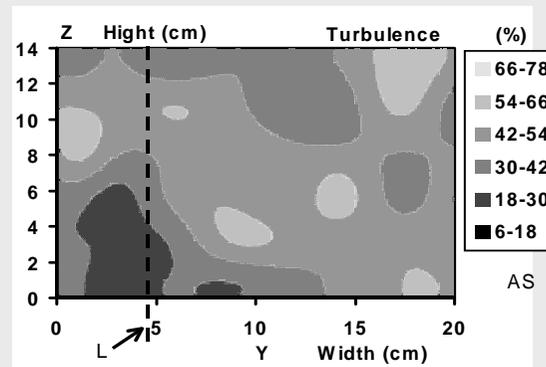
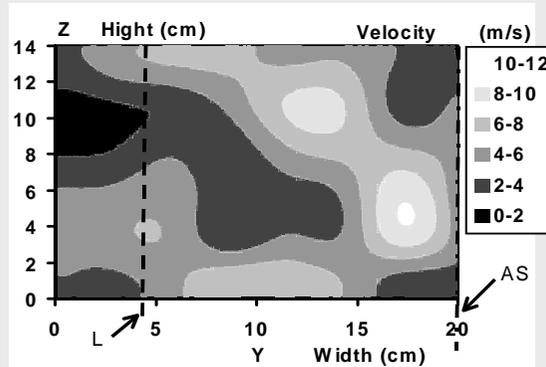
Caractérisation aérodynamique

Cartographies de vitesses et Turbulence

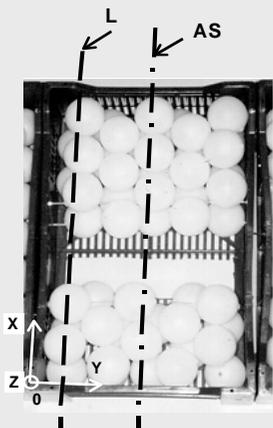
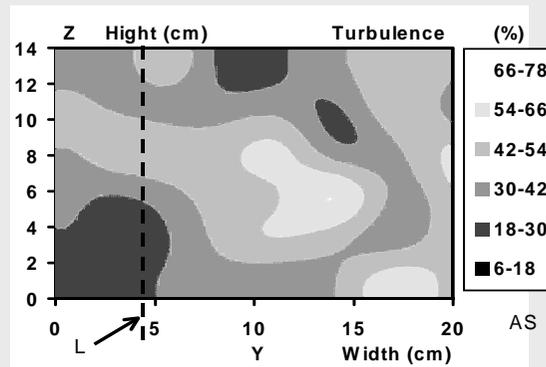
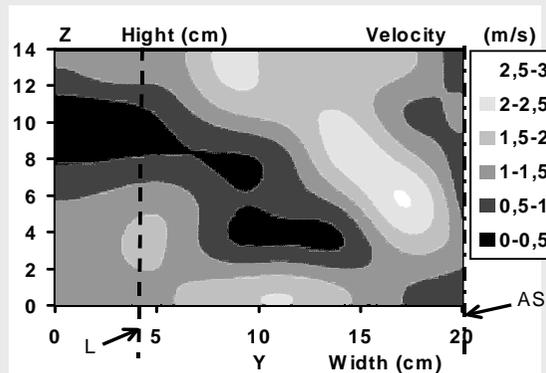
Alvarez G., Flick D. (1999a) Journal of Food Engineering, 39 pp 227-237



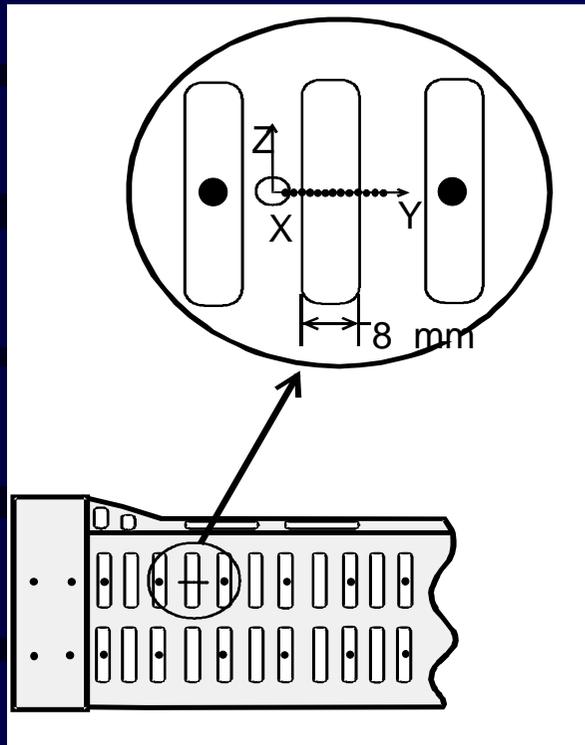
Upstream velocity 2.3 m/s



Upstream velocity 0.6 m/s

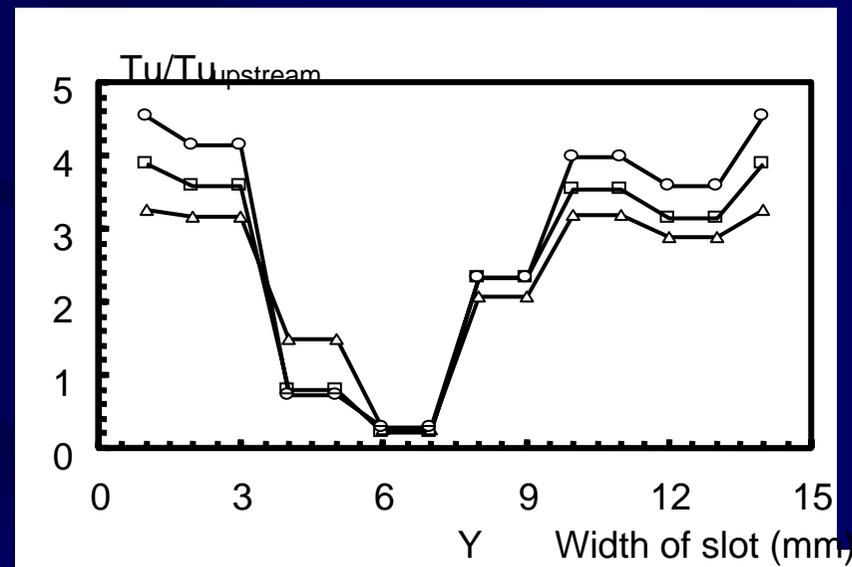
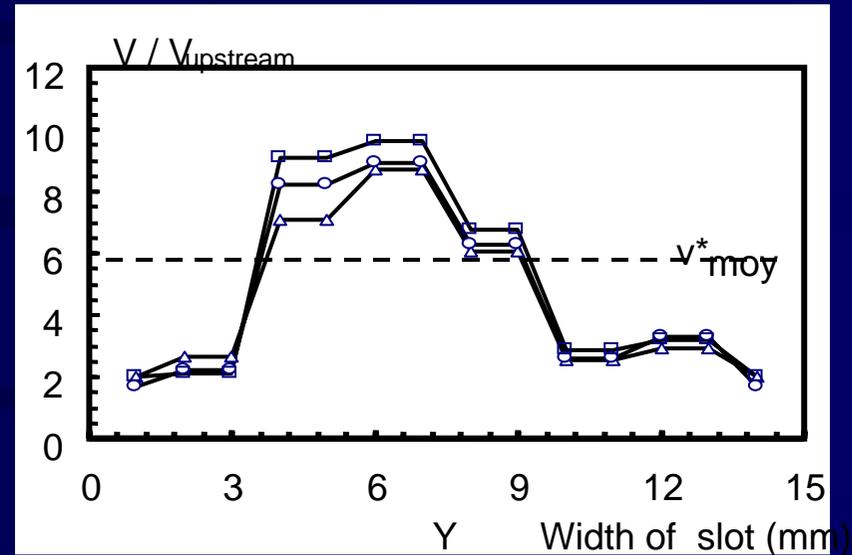


Le rôle de l'emballage dans les hétérogénéités d'écoulement



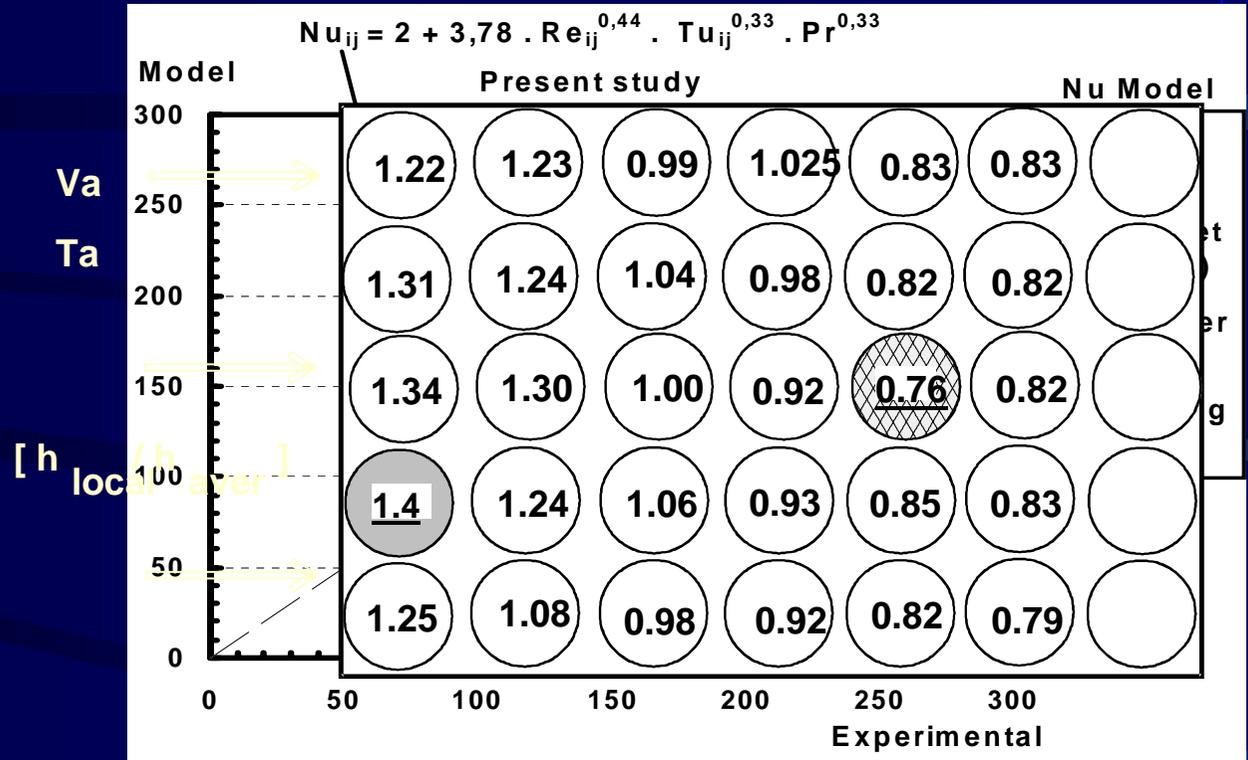
Upstream velocity and turbulence

- ▲— 2.3 m/s; 13.6%
- 1.2 m/s; 12.8%
- 0.8 m/s; 11.7%



Alvarez G., Flick D. (1999a) Journal of Food Engineering, 39 pp 227-237

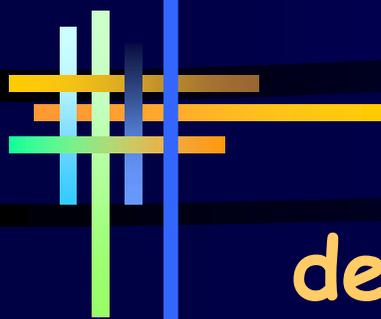
Caractérisation thermique



l'apparition de deux points critiques, le PPF et le PTC, à la vitesse et à la turbulence locales

Alvarez G., Flick D. (1999b) Journal of Food Engineering, 39 pp 239-245

Alvarez G. Trystram G. (1995) Food Control, vol.6. p.347-355



Autres géométries?

Modélisation des écoulements et des transferts milieu macroporeux

Milieu macroporeux?

Caractéristiques du MILIEU MACROPOREUX

- Dimension Caractéristique produits \approx cm
 - $d_{\text{conteneur}}/d_{\text{particule}} < 10$
- Les zones d'entrée et de sortie ne peuvent pas être négligées
- $T_{\text{air}} \neq T_{\text{surface}} \neq T_{\text{centre}}$

Écoulements turbulents et des transferts dans le milieu macroporeux

- L'écoulement turbulent est généré au sein d'un ensemble alimentaire
 - $Re \sim 3000$ (diamètre pores, vitesse interstitielle)
- La turbulence a une influence importante dans l'intensité de transferts
 - $Nu f (Re, Tu)$
- Peu des travaux dans la littérature sur le transport de l'énergie cinétique turbulente au sein du milieu poreux
 - Nakayama, Kuwahara (2000), Green (1992)
- Manque de modèles adaptés pour les milieux macroporeux

Modèle semi empirique des écoulements et des transferts en milieu macroporeux

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$

$$\vec{\nabla} p = -C_{p1} \vec{v} - C_{p2} |\vec{v}| \vec{v}$$

$$\vec{\nabla} \cdot k \vec{v} = C_{ke1} |\vec{v}|^3 - C_{ke2} k |\vec{v}|$$

⇒ éq. conservation de masse

⇒ qtté. de mouvement.

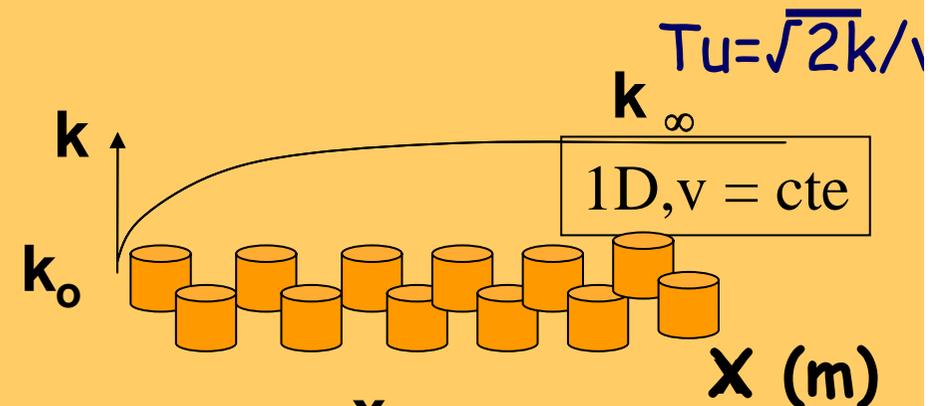
⇒ l'énergie cinétique turbulente

Énergie cinétique turbulente k

k	production	$\propto \vec{v} ^3$
	dissipatio n	$\propto k \vec{v} $

$$k_{\infty} = (C_{ke1} / C_{ke2}) v^2$$

$$Tu_{\infty} = 2(C_{ke1} / C_{ke2})$$



$$\frac{k - k_{\infty}}{k_0 - k_{\infty}} = e^{-C_{ke2} x}$$

$$\frac{h - h_{\infty}}{h_0 - h_{\infty}}$$

Exemple Modèle macroporeux

Validation
expérimentale

LABORATOIRE

Cylindres, sphères Écoulement 2D

Industrielle

Palettes de yaourt Configuration 3D

Codes

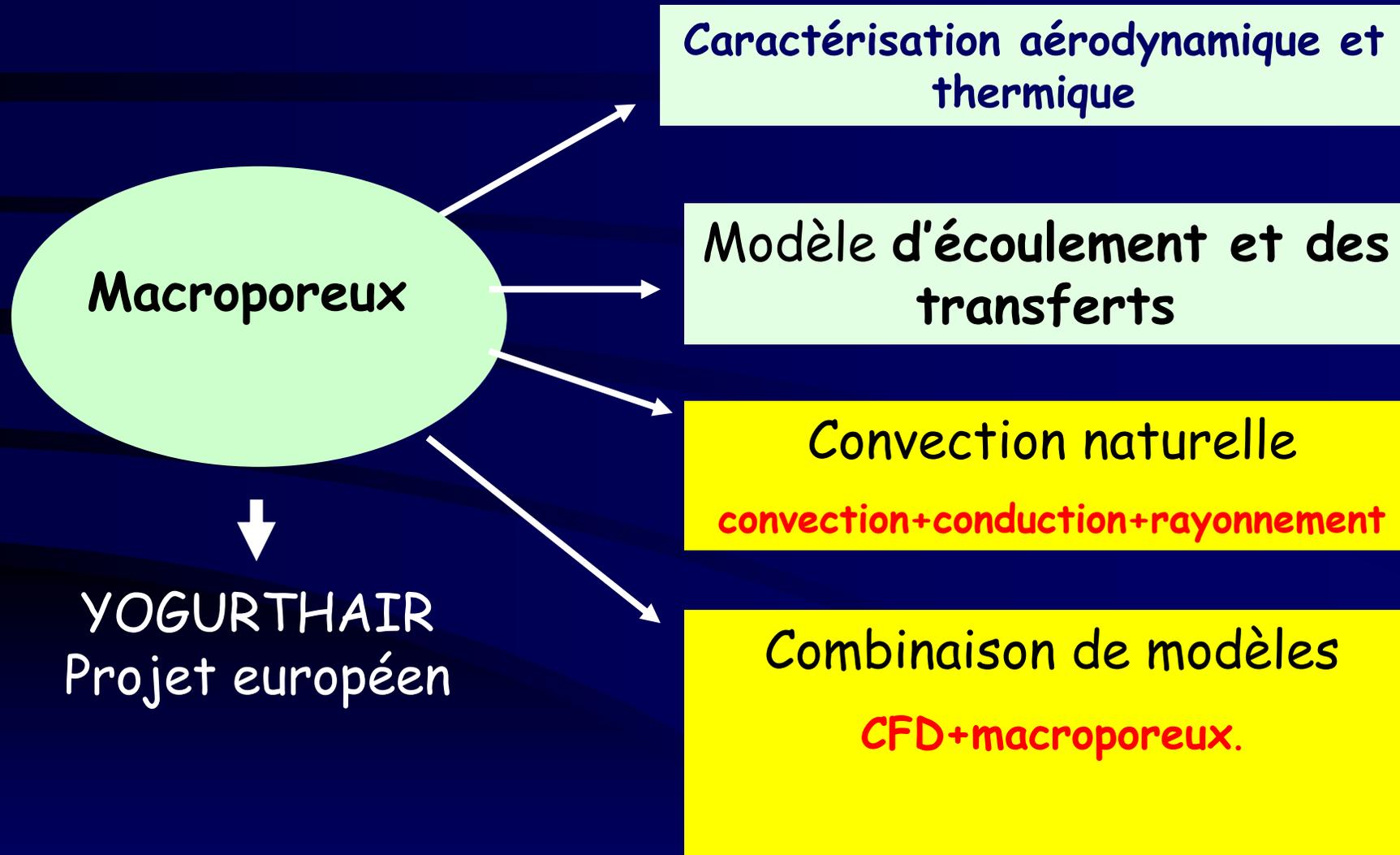
Versions « code maison »

Pascal, Fortran

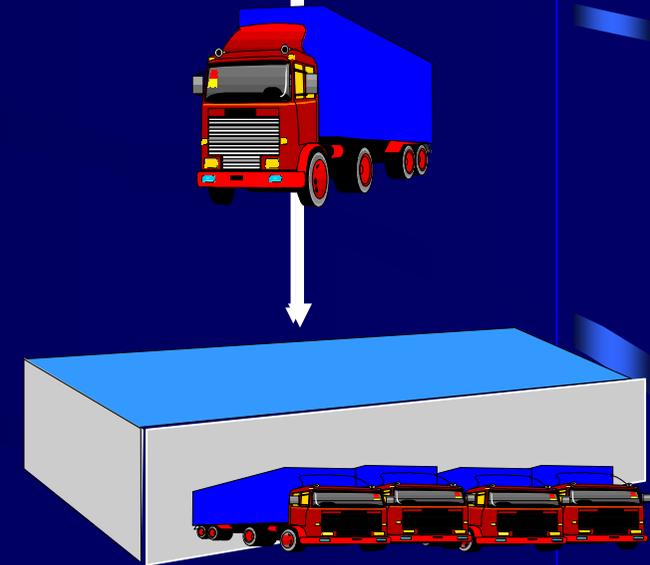
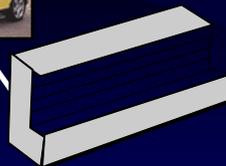
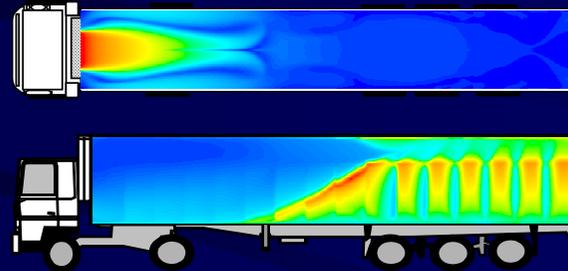
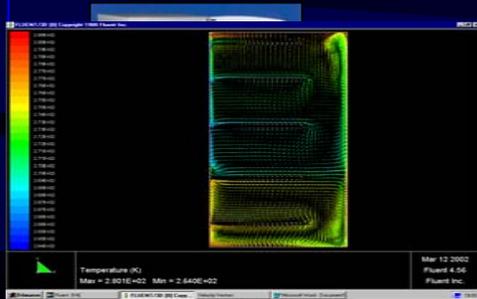
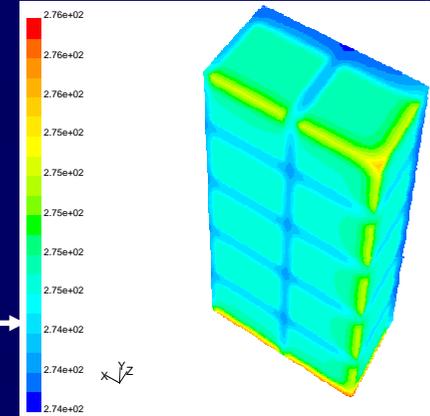
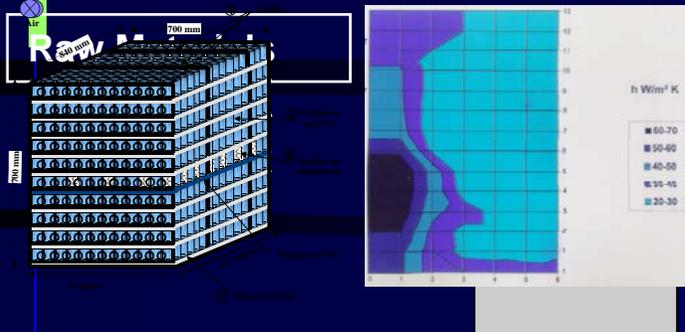
Version « industrielle » avec
interface

Conditions aux limites, emballages,
type de produit

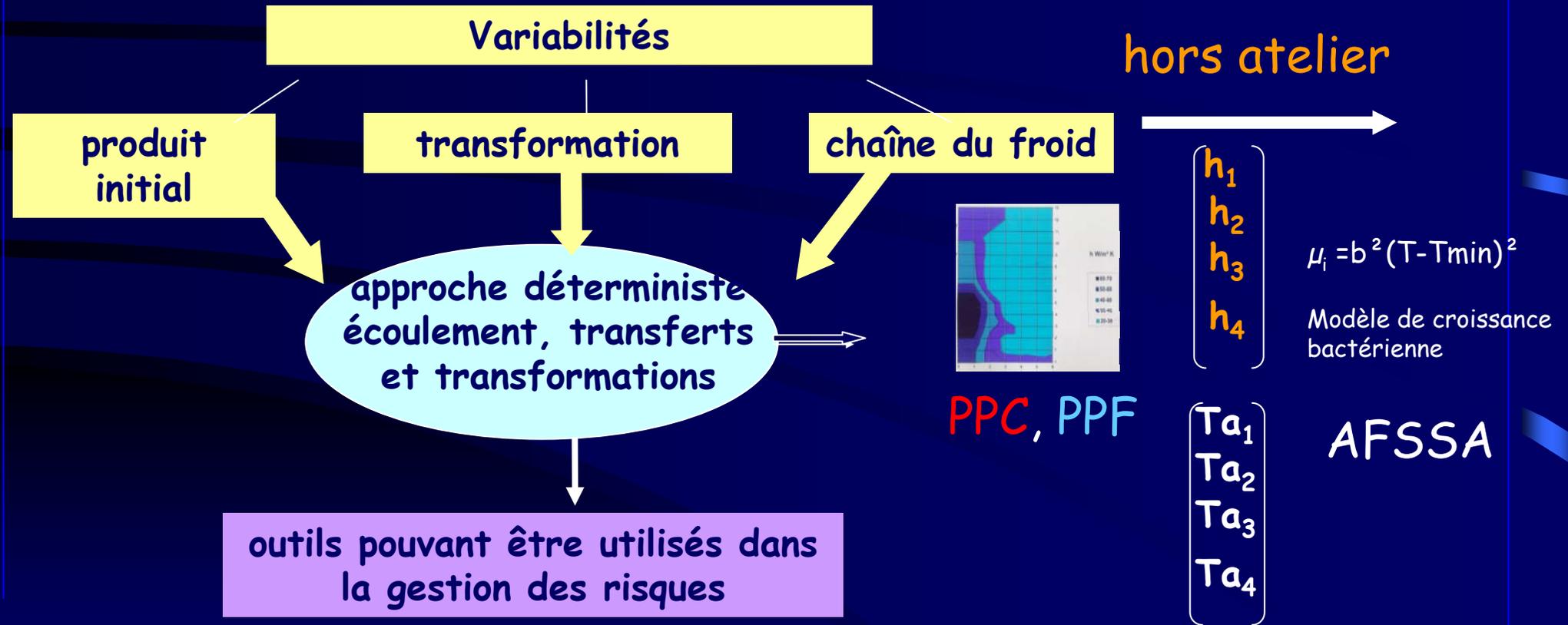
Valorisation recherches



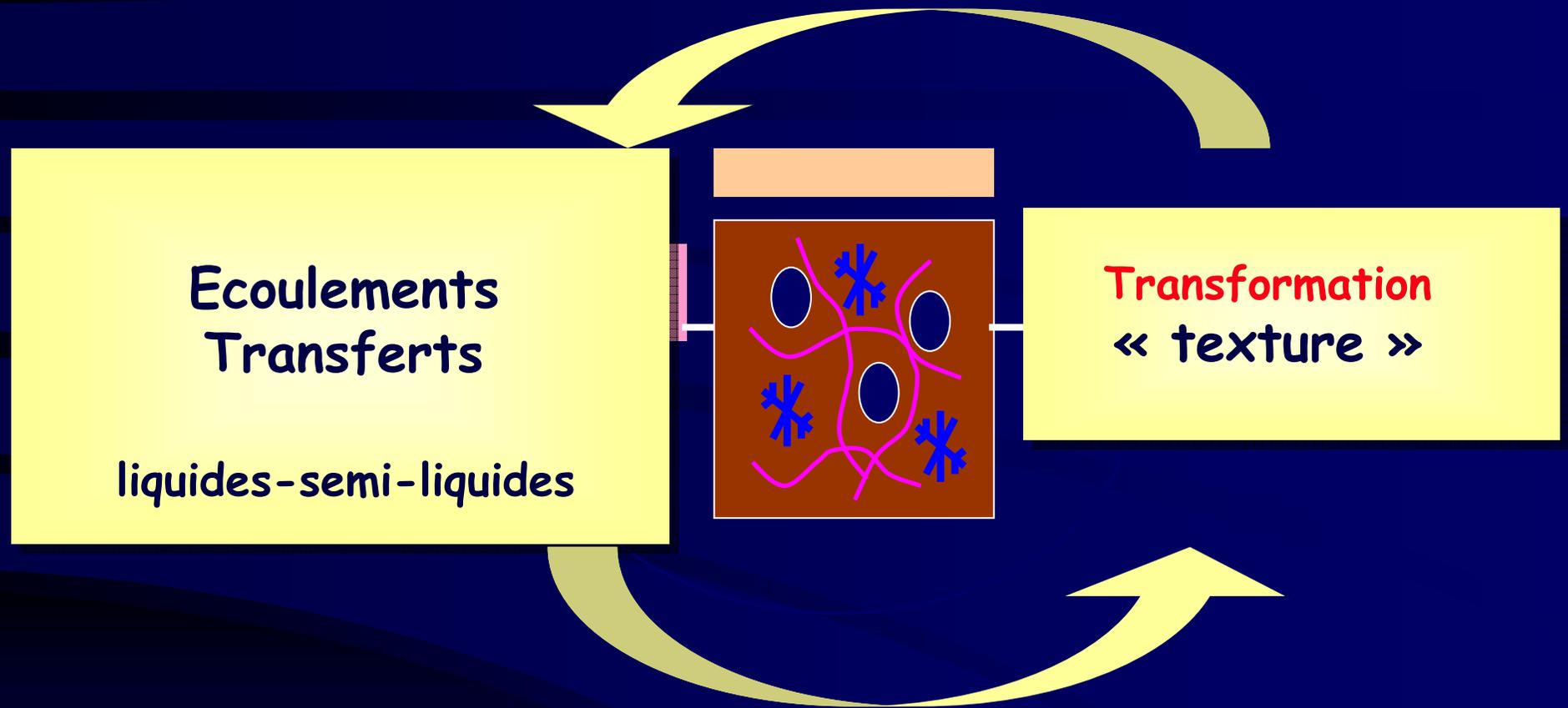
Chaque étape de la chaîne du froid est concernée



Prise en compte de la variabilité de traitements thermiques

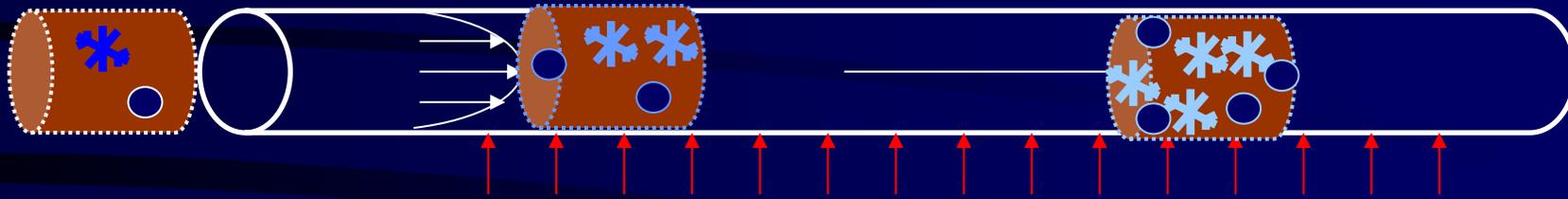


Cas II Couplage Écoulement transfert et transformation rétroactif

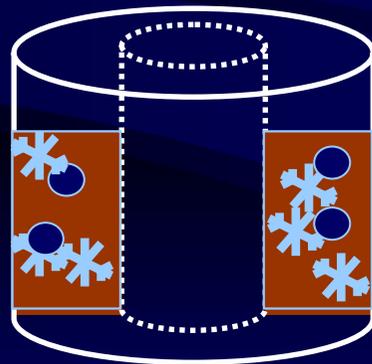


Évolution du comportement à l'écoulement de produits liquides ou pâteux lors de traitements thermiques en continu

échelle pilote



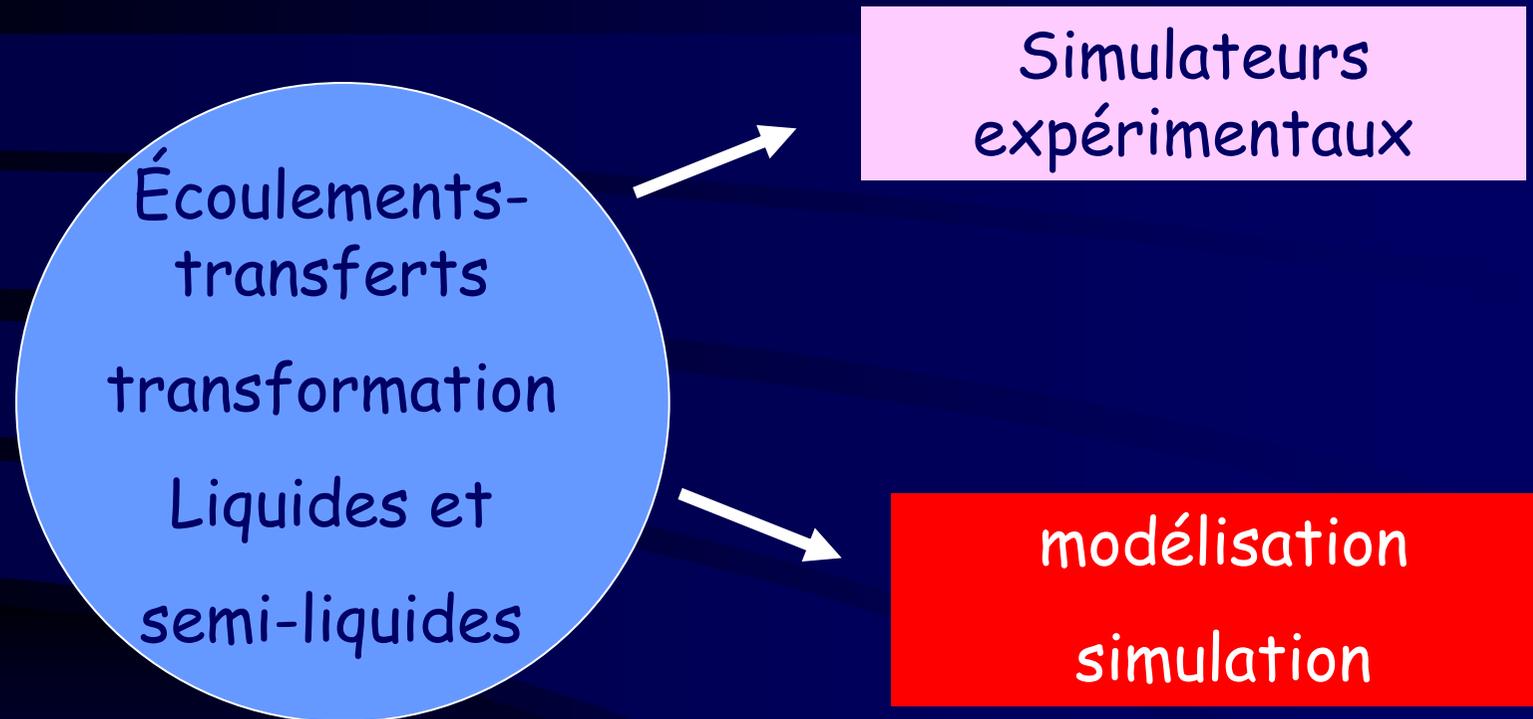
échelle laboratoire



évolution de la texture
mécanismes de transformation

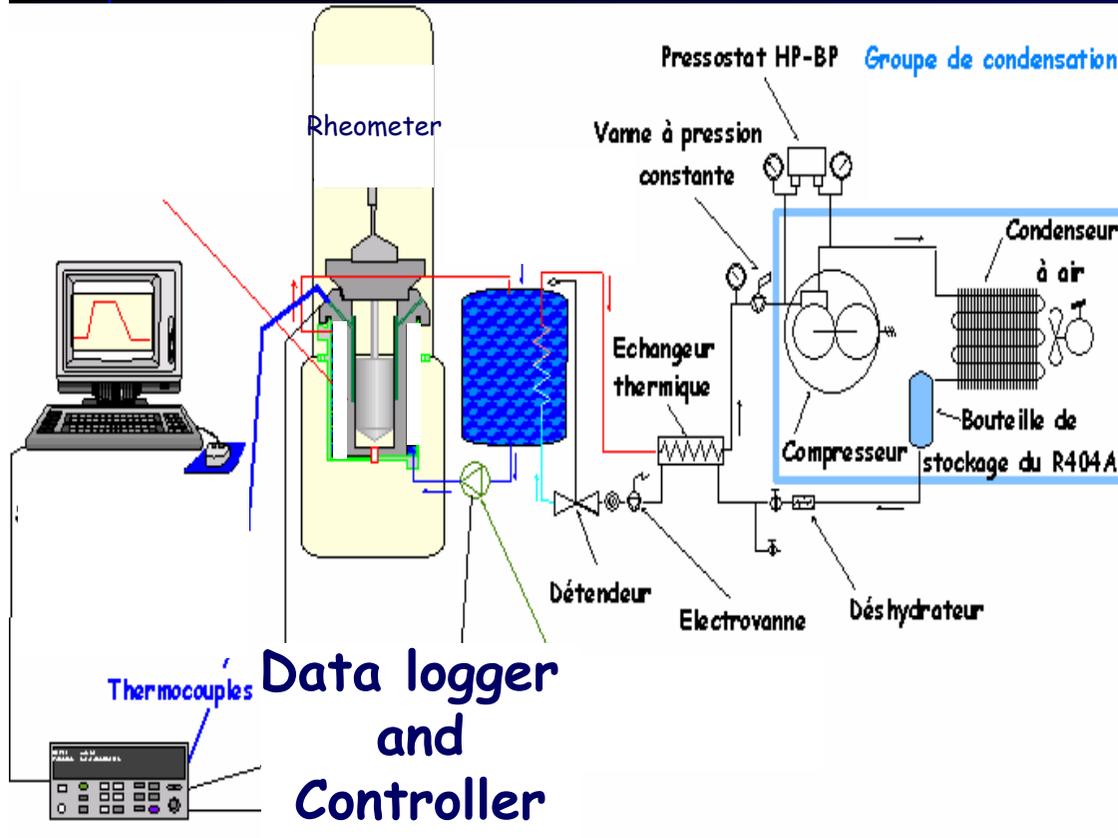
t

Démarche



Simulateur du Traitement Thermique

T~140°C P 6 bars



chauffage
 $dT/dt > 1^\circ\text{C/s}$
 $800-1200\text{ s}^{-1}$

Stérilisation
 à 130°C

$400-800\text{ s}^{-1}$

refroidissement

$0,5^\circ\text{C/s} < dT/dt < 0,8^\circ\text{C/s}$
 $300-700\text{ s}^{-1}$

Viscosity

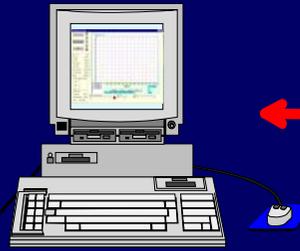


1 brevet déposé

Simulateur Expérimental Congélation sous cisaillement $T \ll 0^\circ\text{C}$ "le simulateur-racleur"

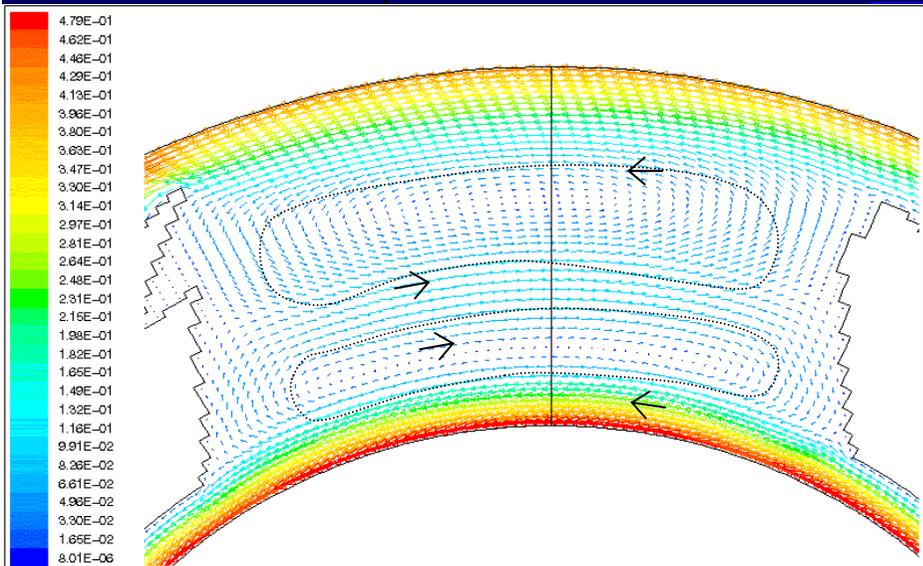
CONSIGNES

- * Vitesse de rotation du racleur
- * Type de produit
- * Cinétique de vitesse de cisaillement
- * Cinétique de température

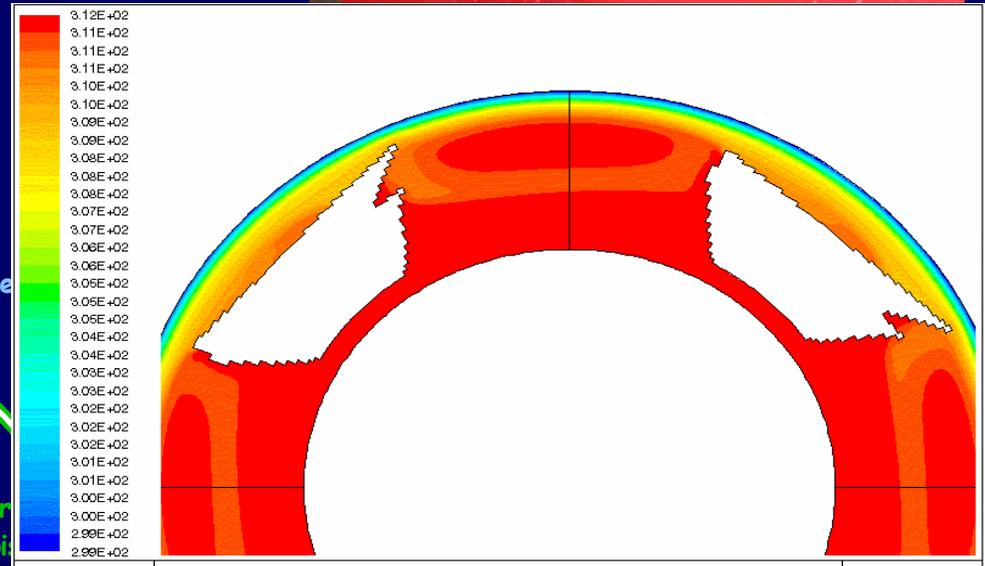
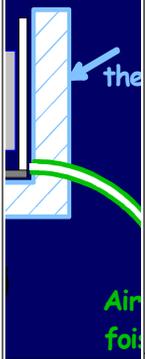


CONTROLES ET MESURES

- * Couple du rhéomètre
- * Vitesse de rotation du racleur
- * Température de la cuve
- * Température du produit
- * Débit d'air
- * Pression d'air



Velocity Vectors (M/S)
 Lmax = 4.789E-01 Lmin = 8.009E-06
 Mar 29 2002
 Fluent 4.56
 Fluent Inc.



Temperature (K)
 Lmax = 3.118E+02 Lmin = 2.990E+02 Time = 1.000E+00
 Mar 26 2002
 Fluent 4.56
 Fluent Inc.

rt des racleur
 le type



(Benhkelifa H., Alvarez G. Flick D. 2003) $\mu^{-1} \rho^{-1} NR_i^2 \left[\frac{1}{Re} \right]$

(Benhkelifa H., Alvarez G. Flick D. 2003)



Perspectives

transformations

écoulements
transferts

gélatinisation (amidon)

cristallisation
(eau : congélation, matière grasse)

foisonnement

croissance microbienne
(maintien de la chaîne du froid)

En cours

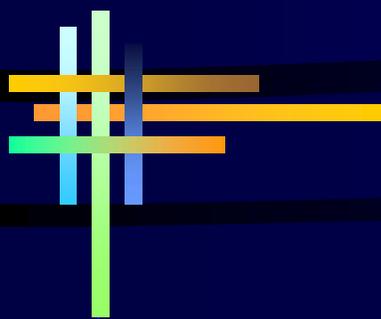
à construire



Couplage rétroactif

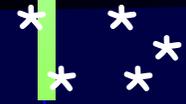


Couplage non-rétroactif



Les nouvelles questions scientifiques ...

Paramètres clés cinétique de cristallisation sous cisaillement?



Métrologie

Taille, distribution cristaux
granulométrie, microscopie, analyse d'image
Concentration en cristaux de glace

Formation de la structure
Mesures spectromètre mécanique,

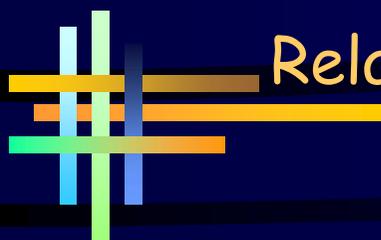
Modélisation

Phénomènes hors équilibre

- Paroi froide
- Concentration solutés

Cinétique de cristallisation

- Cinétique de refroidissement
- Vitesse de diffusion d'eau
- Vitesse de réaction



Relation entre les phénomènes de transport à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique?

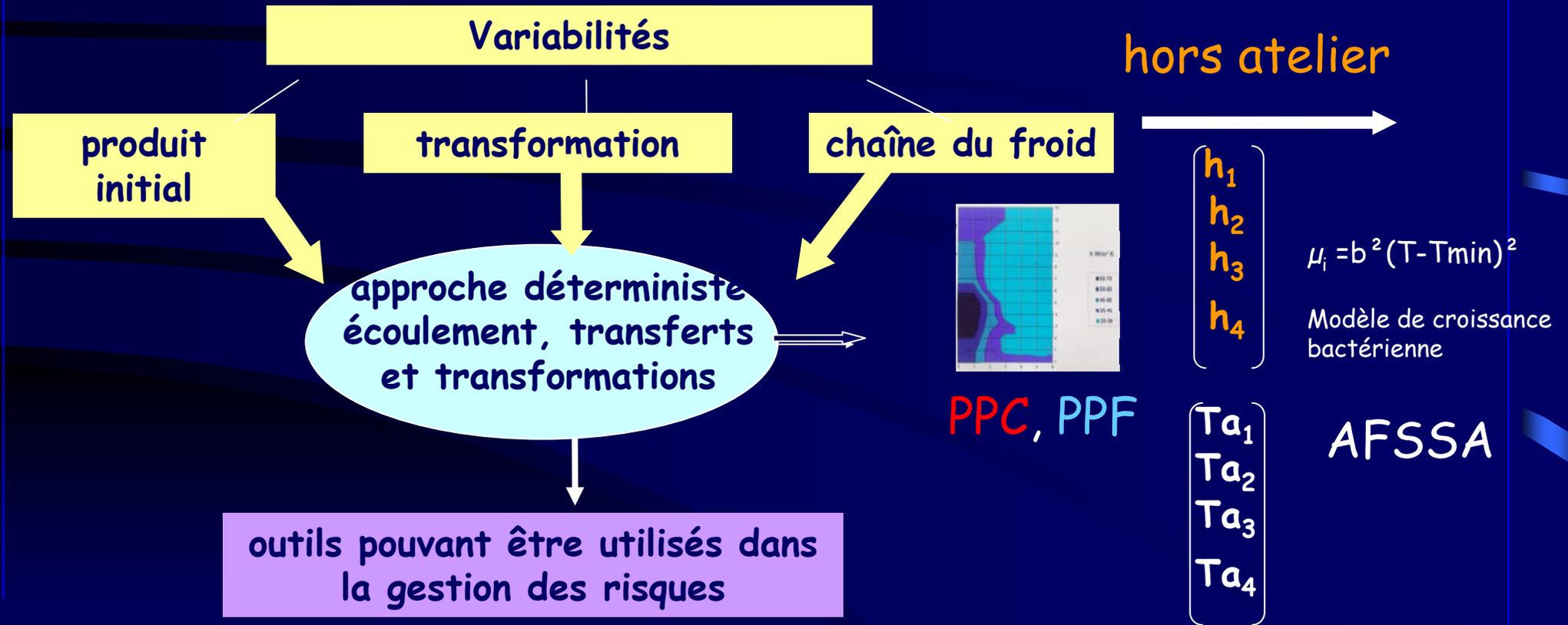
iels
e
ies

on

on?
on?

MERCI

Prise en compte de la variabilité de traitements thermiques



Quel modèle choisir?

Le plus simple?

Le plus complet CFD?

- Écoulement Turbulent

- Modèles à 2 équations

Manque de modèles adaptés pour les milieux macroporeux

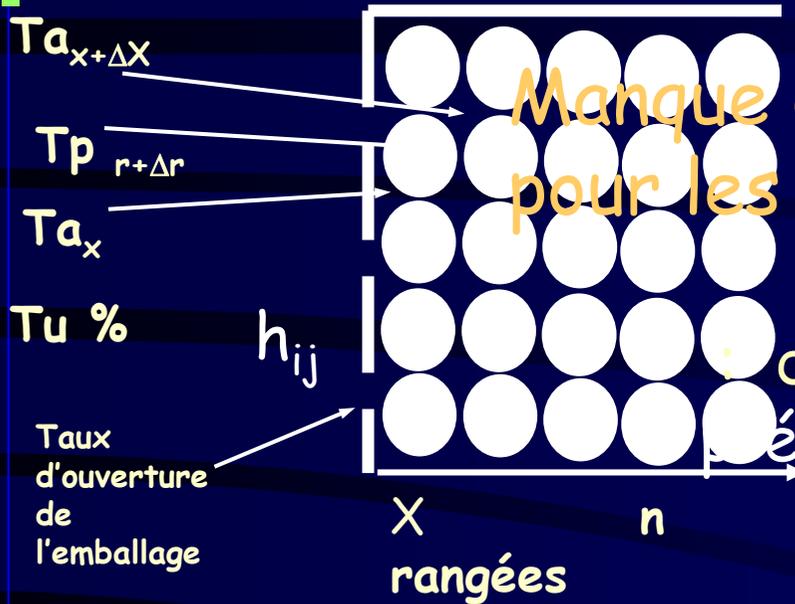
- Maillage

- dp , taux de vide, forme, chaque nouveau produit?

Prédire : V, P, T, h, m

- Modèles à « une température »? $Bi \gg 0,1$

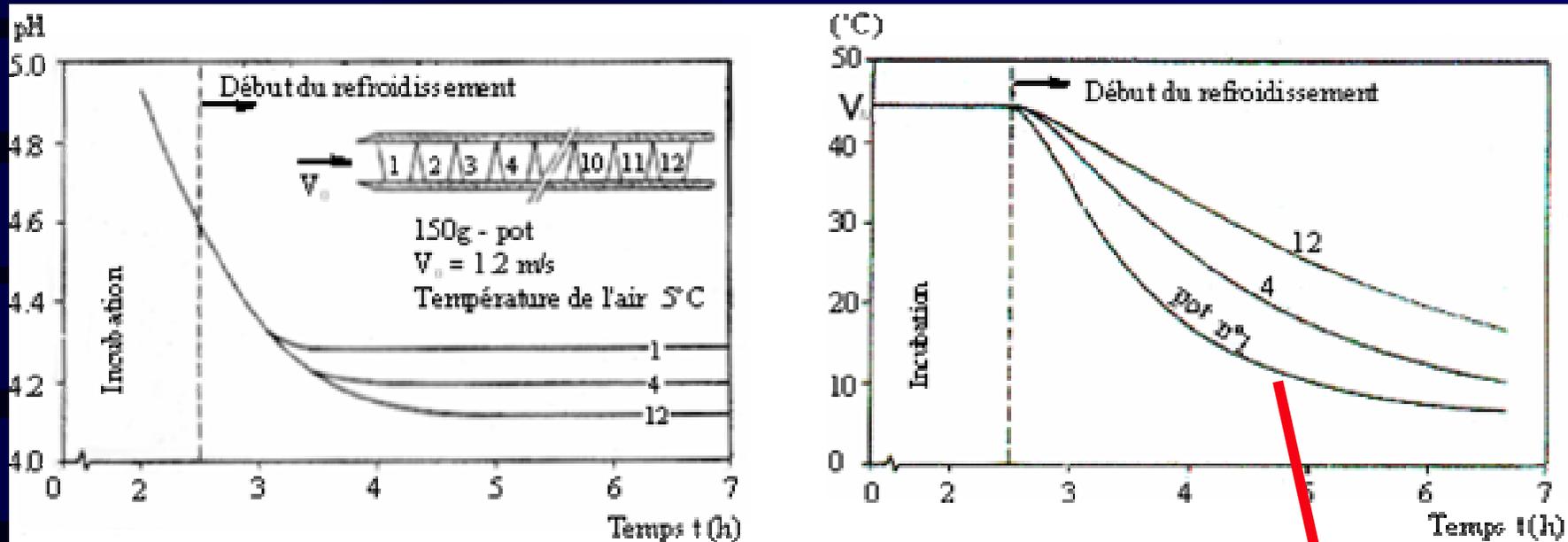
- Modèles à n températures



- Adapté à des formes simples
- Besoin d'un grand nombre d'expérimentations

Carniol (2001), Alvarez(1992)

Effet de l'hétérogénéité de refroidissement sur la transformation

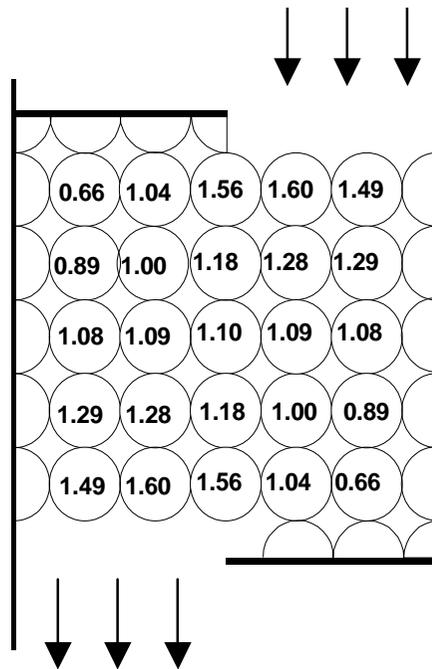


Hétérogénéité de l'évolution du pH

$$\log \text{pH}_R^* = -\frac{1}{D_T} \int_0^{t_f} 10^{\frac{T_{ref}-T}{Z}} dt = \frac{F_{a_{ij}}}{D_{T_{ref}}}$$

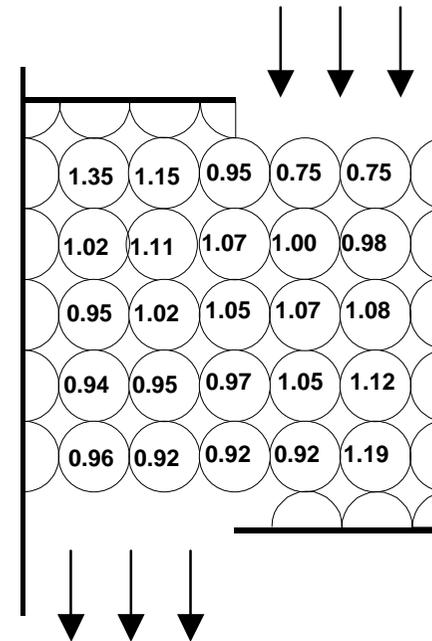
Distribution de « barèmes d'acidification »

Résultats de la simulation Vitesses et Turbulence



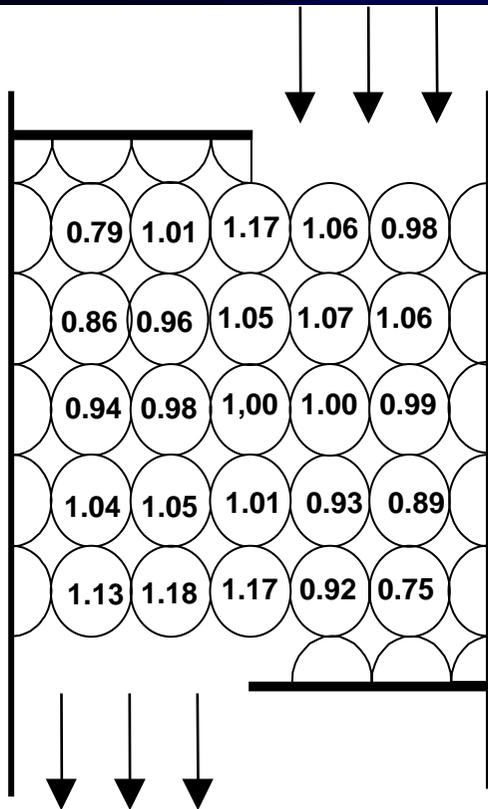
$$\frac{|\vec{V}|_{predicted}}{V_{ave}}$$

Vitesse locale normée par la
vitesse moyenne prédite



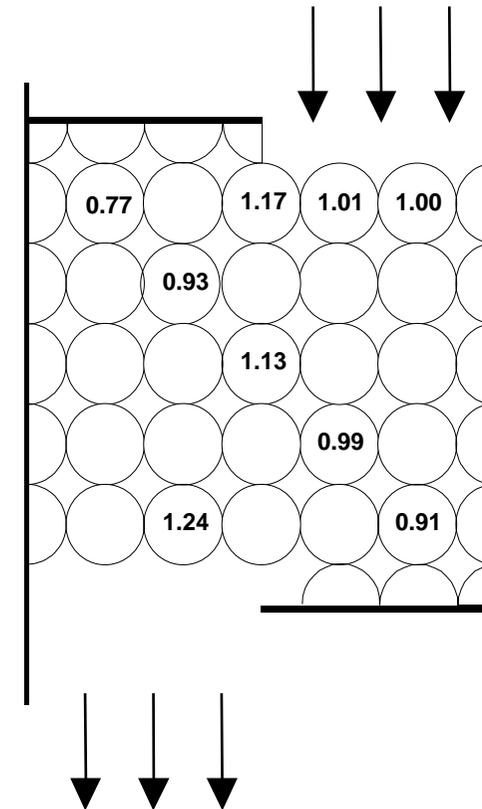
$$\frac{Tu_{predicted}}{Tu_{\infty}}$$

Turbulence locale normée par
la turbulence d'équilibre



Predicted local heat transfer coefficient divided by the average predicted value

$$\frac{h_{\text{predicted}}}{h_{\text{ave. predicted}}}$$



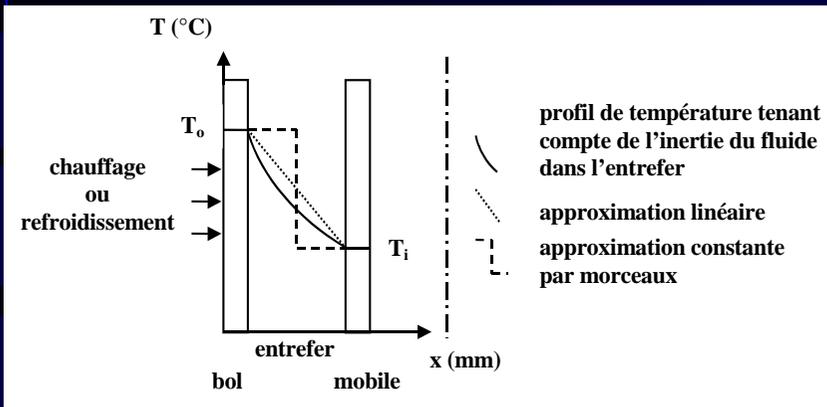
Measured local heat transfer coefficient divided by the average predicted value

$$\frac{h_{\text{measured}}}{h_{\text{ave. predicted}}}$$

Hétérogénéité thermique = hétérogénéité de transformation

Mesures rheologiques non isothermes

model thermique simple



$$\left(\frac{m_m c_{pm}}{A_m} + \frac{1}{2} \rho c_p e \right) \frac{dT_i}{dt} = \frac{(T_o - T_i)}{e / \lambda}$$

Bilan Thermique dans l'entrefer

La Réponse du système à une rampe dT/dt

$$T_o = T_1 + \frac{dT}{dt} t \Rightarrow T_i = T_1 + \frac{dT}{dt} \left((t - \tau) + \tau \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

avec un retard

$$\tau = \frac{m_m c_{pm} / A_m + \rho c_p e / 2}{\lambda / e}$$

Après un retard, T_i suit T_o avec la même vitesse dT/dt avec un retard égale à τ . La difference de temperature est égale à $(dT/dt)\tau$.

Mesures rheologiques non isothermes

Torque = f(W) +
rheological behaviour

+

Thermal model

Thermal
dependency

$$\left(\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{T - T_0}{\theta}\right) \right)$$

Temperature profile

Average « apparent viscosity » in
the gap

for newtonian fluids

$$\eta_d = \eta_0 \frac{1 + \frac{3}{2}\varphi}{\frac{1 - \exp(-\delta)}{\delta} + 3\varphi \left(\frac{1 - (\delta + 1)\exp(-\delta)}{\delta^2} \right)}$$

$$\eta_d \approx \eta_0 \frac{\delta}{1 - \exp(-\delta)} \text{ for } \varphi \ll 1$$

for non-newtonian fluids (power law)

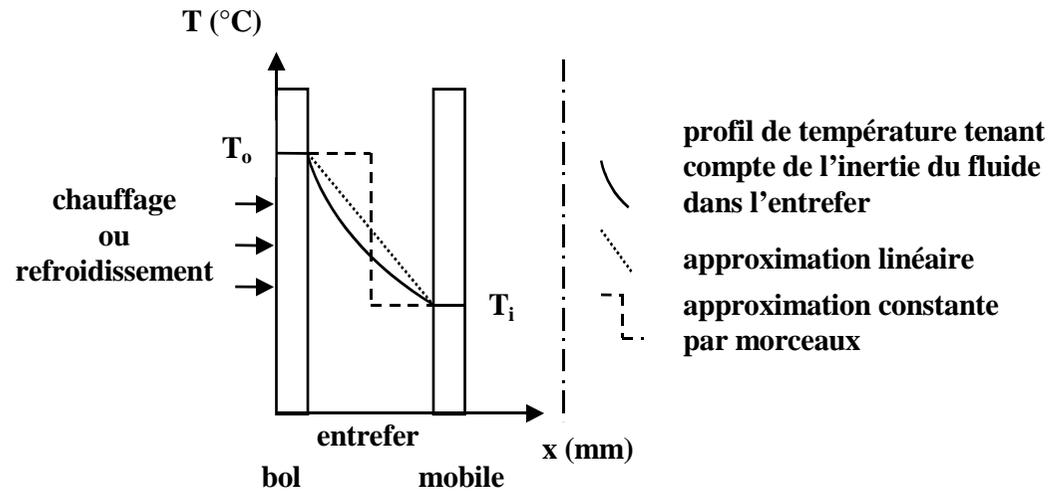
$$K_d = K_0 \left[\frac{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{n} + 1 \right) \varphi}{\frac{1 - \exp(-\delta/n)}{\delta/n} + (2/n + 1)n\varphi \left(\frac{n - (\delta + n)\exp(-\delta/n)}{\delta^2} \right)} \right]^n$$

$$K_d \approx K_0 \left[\frac{\delta/n}{1 - \exp(-\delta/n)} \right]^n \text{ for } \varphi \ll 1$$

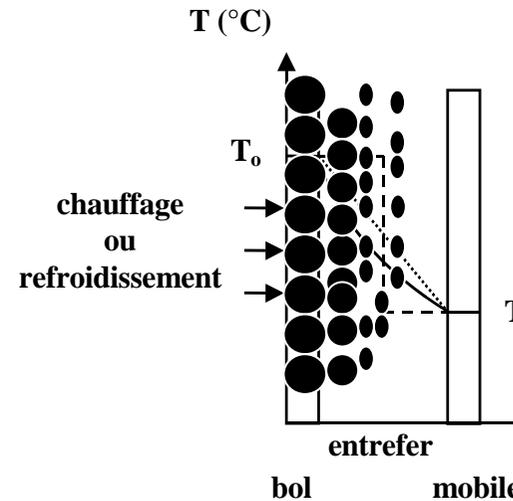
MODELISATION

Modèle Thermique

gradient Thermique
dans l'entrefer
20°C



modèle Rhéologique
« Type » cinétique
réactionnelle



Cinétiques
réactionnelles :

•w1

•w2

•w3 (=1-w1-w2) :