

Etude de la stabilité de l'écoulement
de Poiseuille de fluides viscoélastiques

Application au procédé de
coextrusion des polymères

Rudy VALETTE

Direction :

Jean-François AGASSANT

Yves DEMAY

Collaborations :

INLN : Patrice LAURE

GIREF : André FORTIN

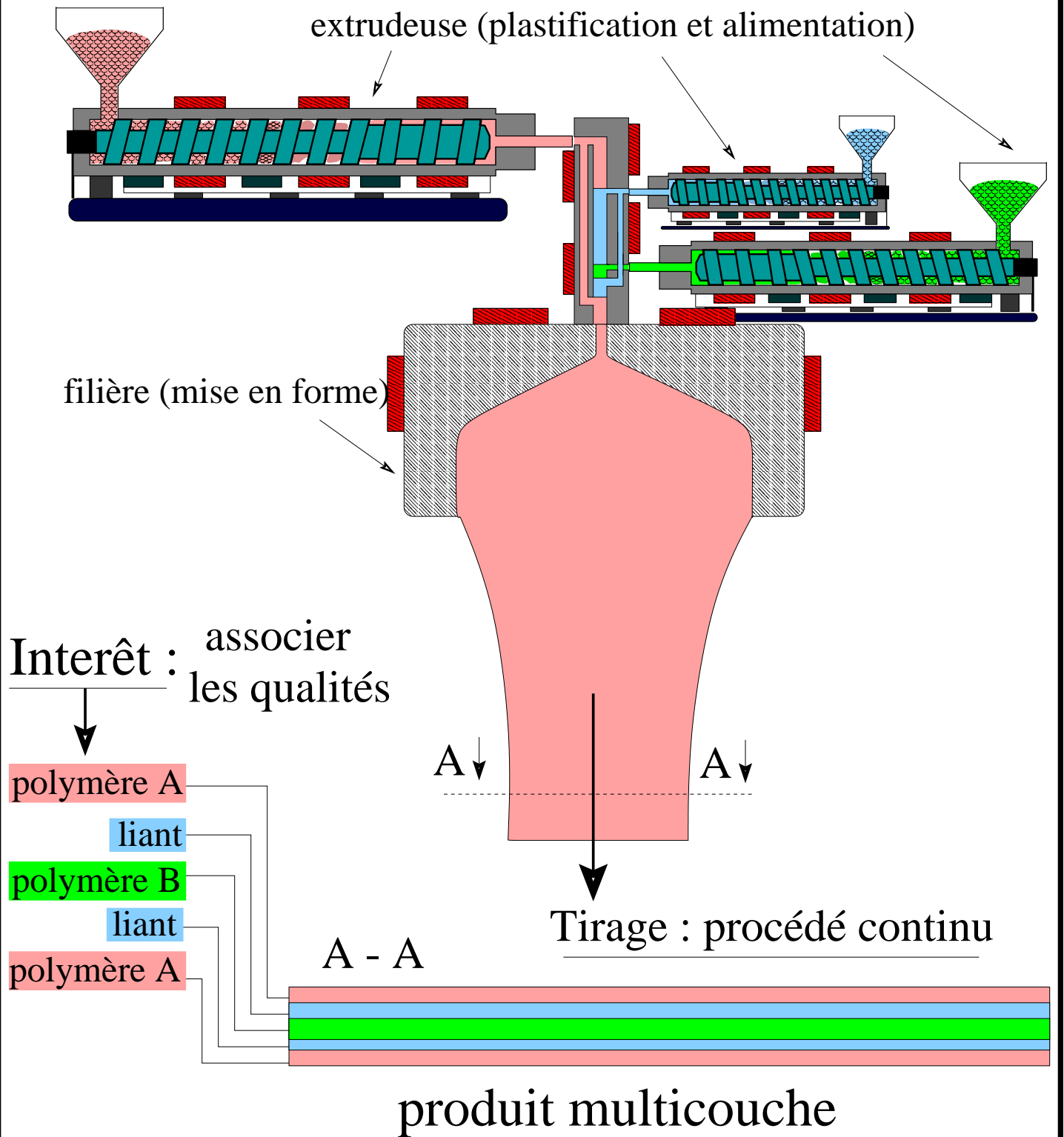
CERDATO : Daniel LEBOUVIER

Benoît ERNST

David SILAGY

Jean-Marc ANDRE

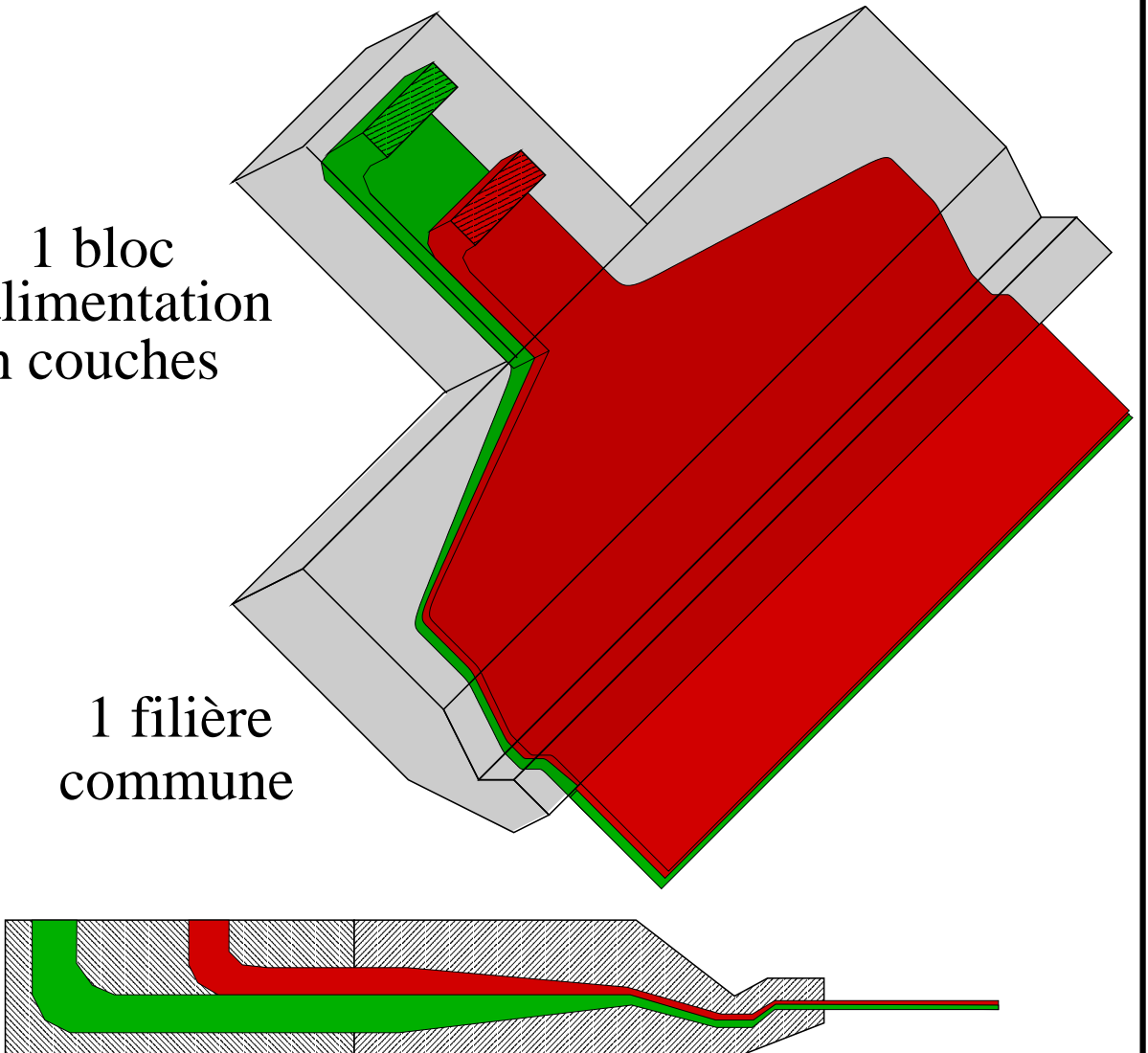
Le procédé de coextrusion



Procédé à "boîte de coextrusion"

1 bloc
d'alimentation
n couches

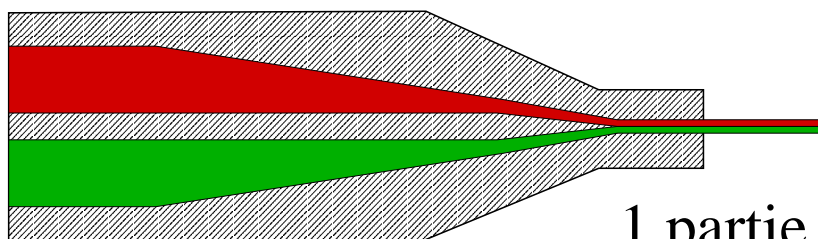
1 filière
commune



Procédé à filière multicanaux

n "filières"

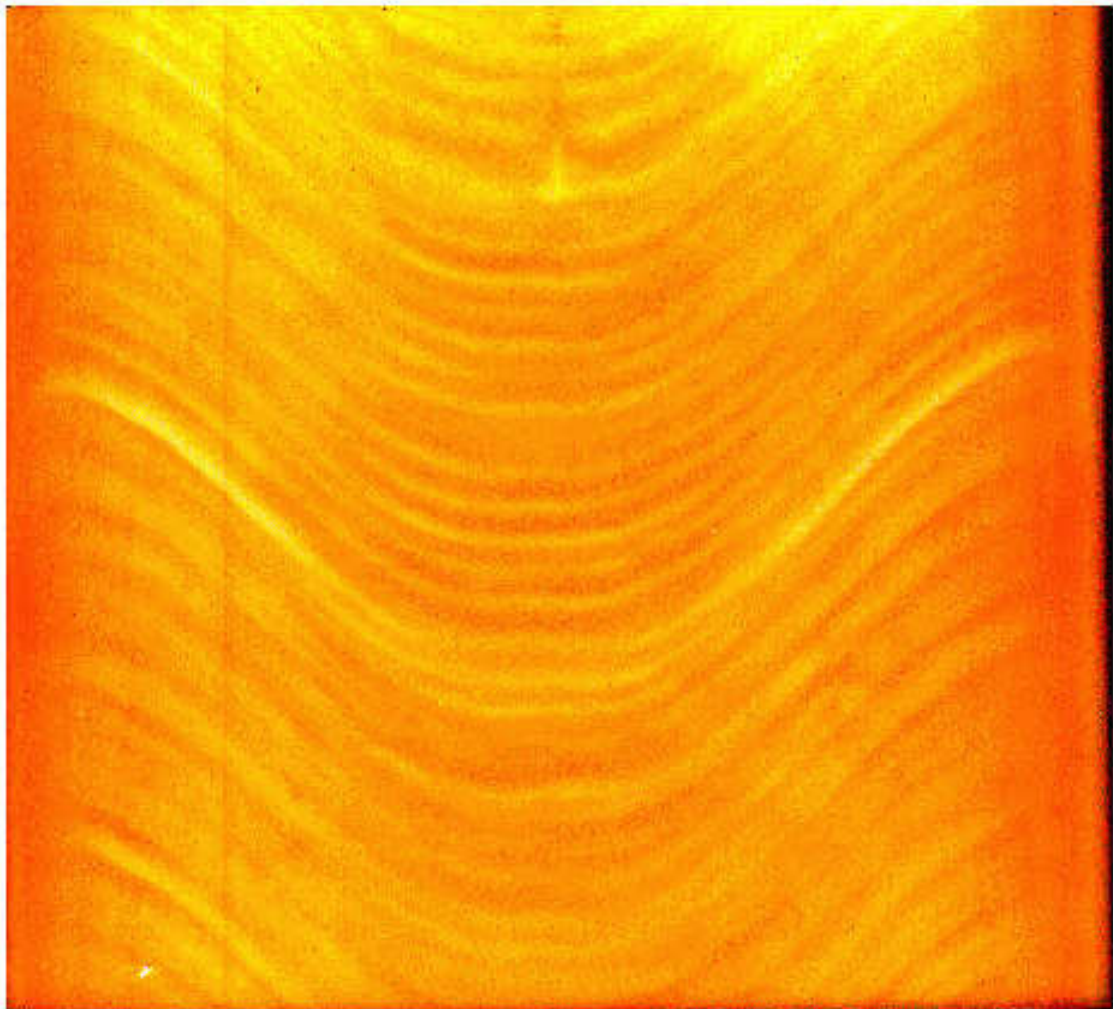
1 partie finale
commune



Les défauts observés

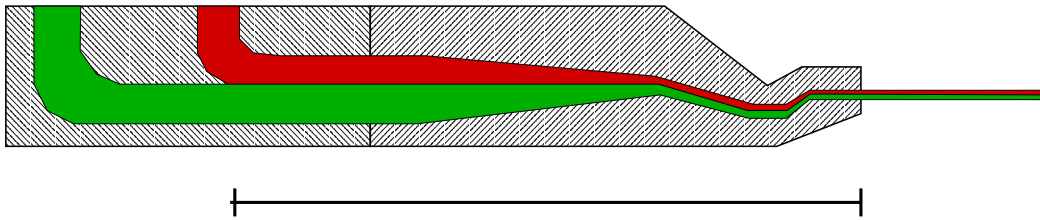
- Défauts propres à l'extrusion : $\left\{ \begin{array}{l} \text{"peau de requin"} \\ \text{oscillant} \end{array} \right.$
- Mauvaise adhésion entre les couches
- Défaut d'enrobage
- Irrégularité de l'épaisseur des couches

ex : couche rigide + liant + couche étanche

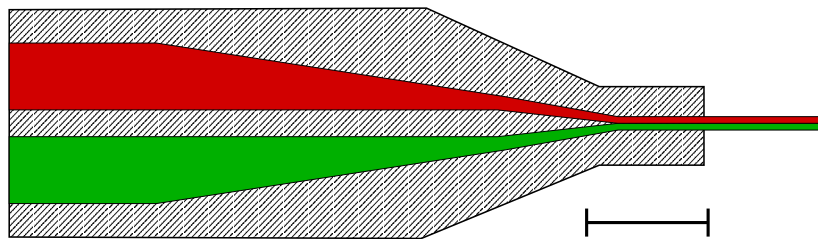


Défaut dû à l'écoulement multicouche

Procédé à "boîte de coextrusion" :



Procédé à filière multicanaux :



=> écoulement multicouche de polymères fondus
 problème d'interface en cisaillement simple

$$u = \begin{pmatrix} u_x(y) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{du}{dy} = \dot{\gamma}$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{xy} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = N_1(\dot{\gamma})$$

$$\text{Re} \ll 1$$

$$\text{We} = \frac{N_1}{2\sigma_{xy}} \sim 1$$

$T \sim 200^\circ\text{C}$, $0.2\text{mm} < e < 2\text{mm}$, $P > 30 \text{ bars}$

Approche "produit"

étude expérimentale

étude de stabilité

Simulation directe

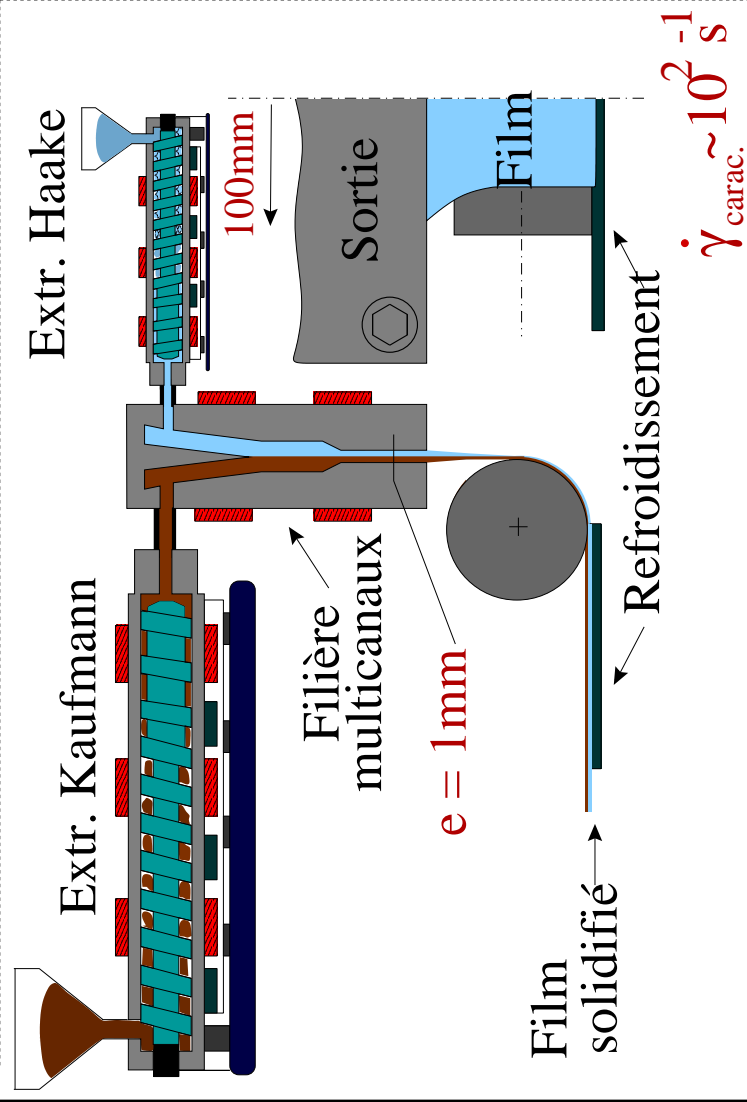
Approche "procédé"

études expérimentales

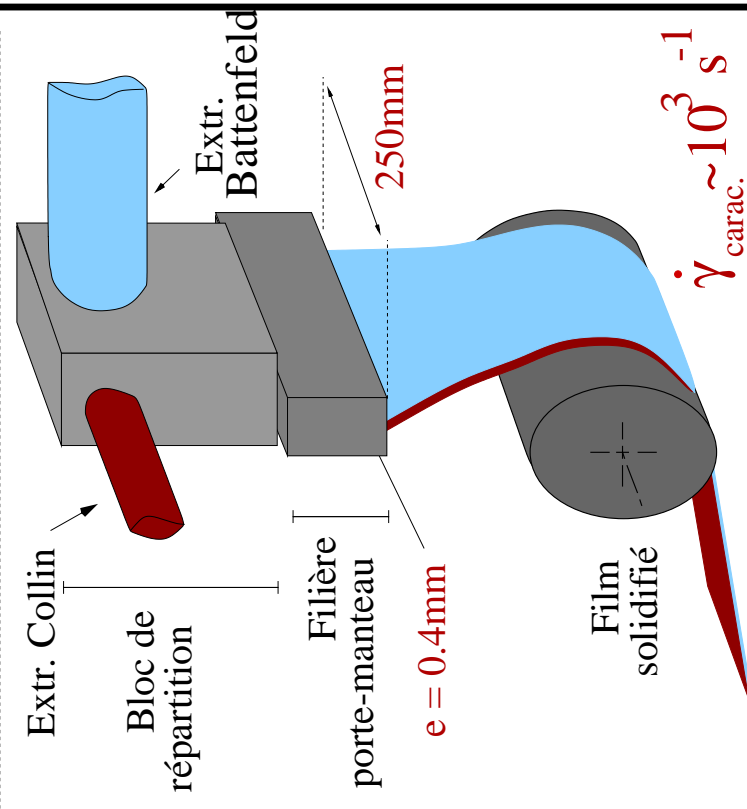
étude de stabilité

Transition stable / instable : approche "produit"

Laboratoire (Gavrus et Vergnes) :



Ligne industrielle (CERDATO) :

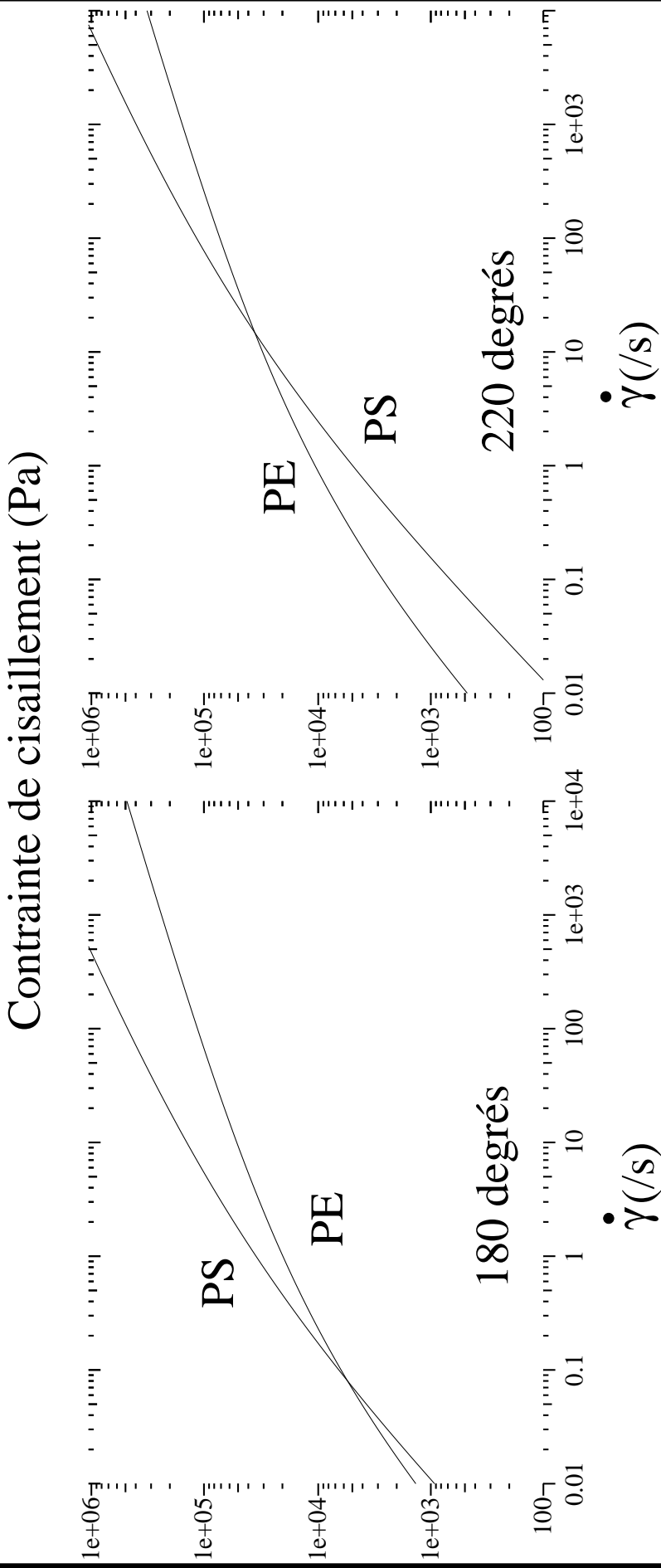


Couple PE 1003 FE 23 / PS 1240

Etude du film pour différents Q_{PE} , Q_{PS} et T

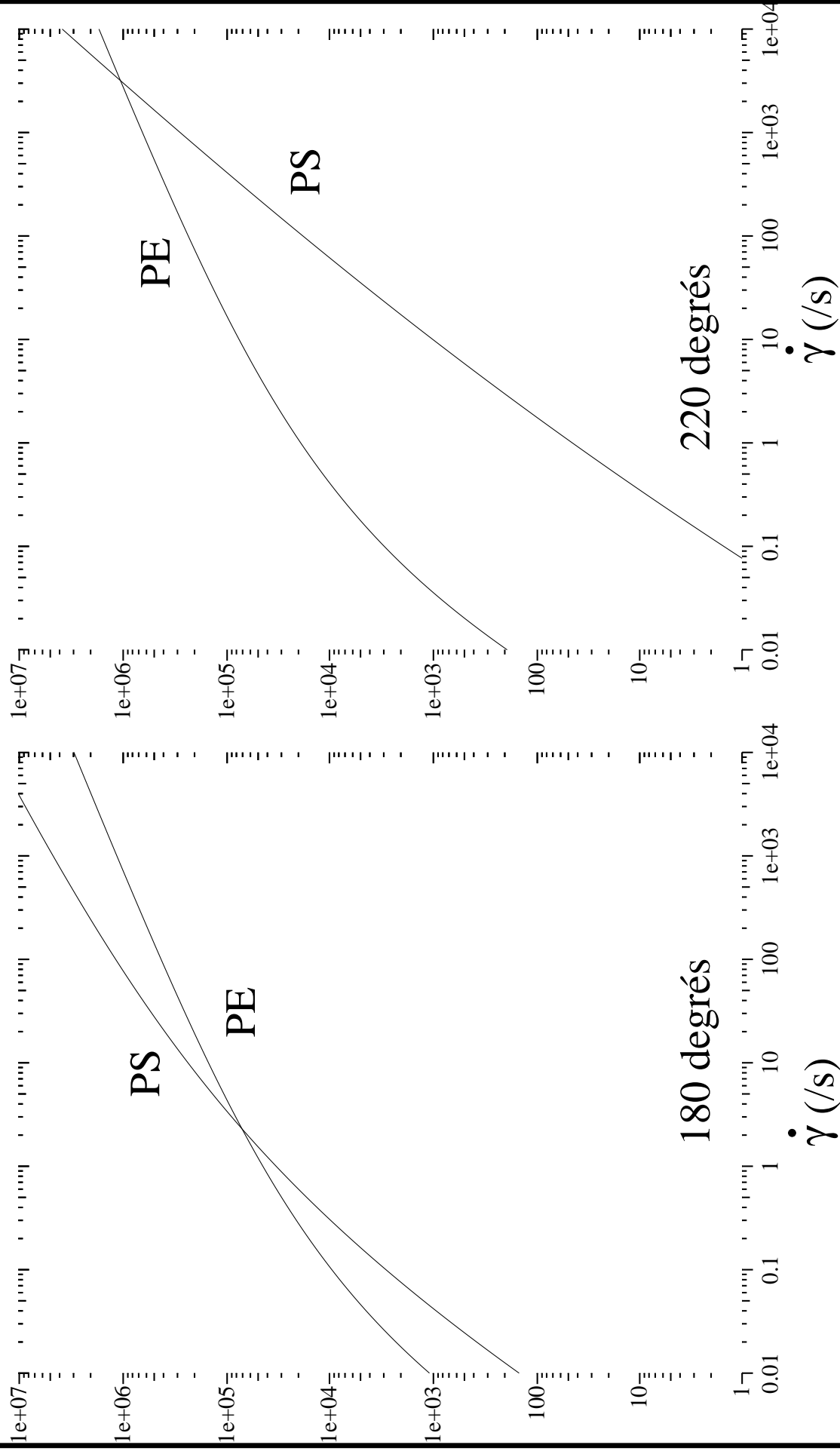
Choix des produits

Influence majeure du champ de contraintes à l'interface entre les deux produits (*Han et al., 1984*)



Choix des produits

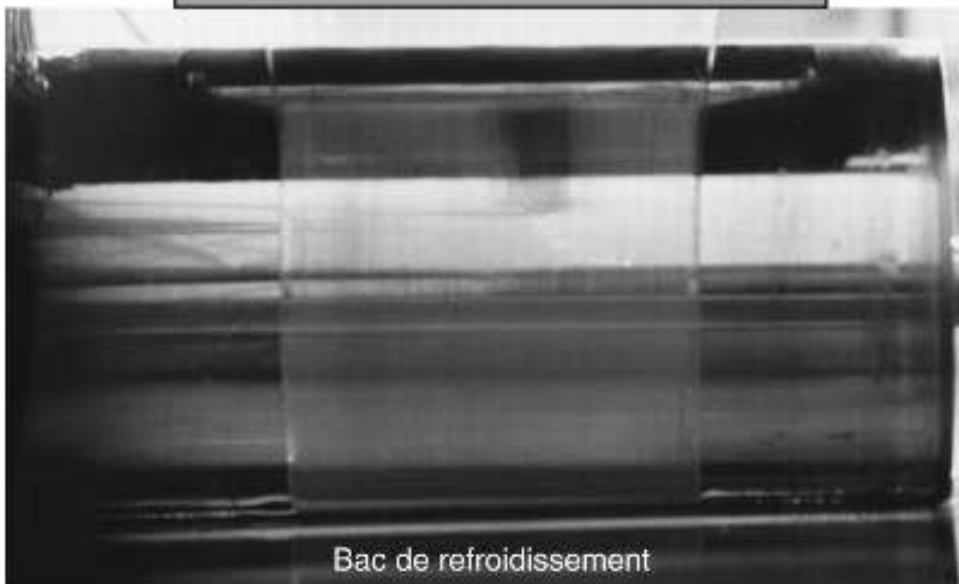
Première différence de contraintes normales (Pa)



Extrudats observés

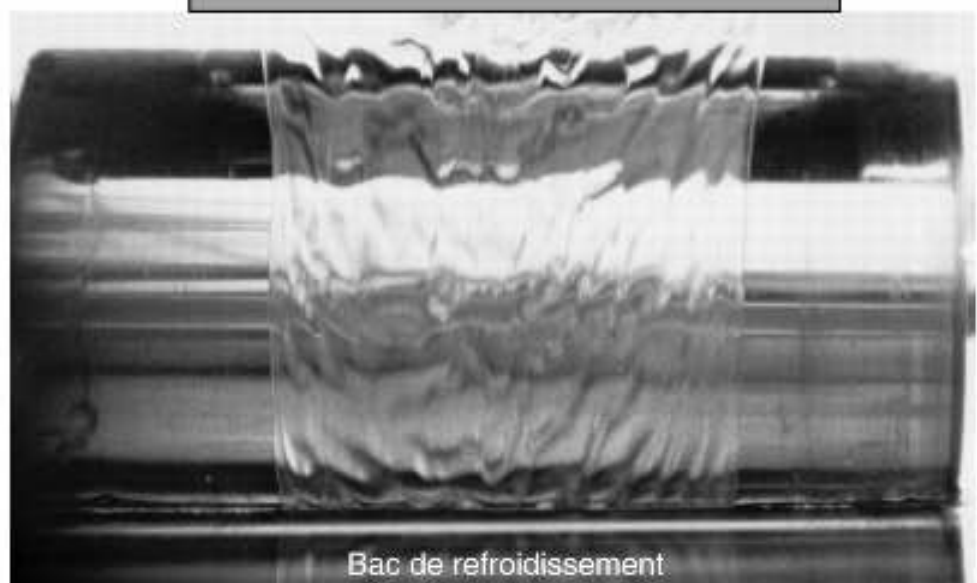
- configuration "stable" :

Sortie de filière

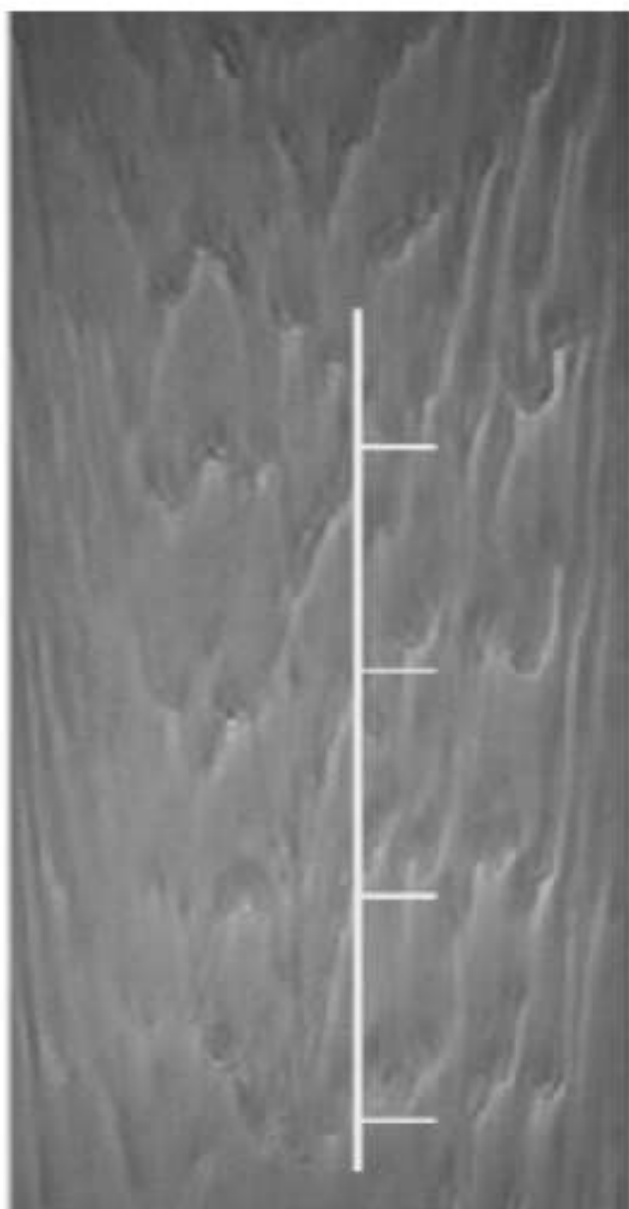


- configuration "instable" :

Sortie de filière

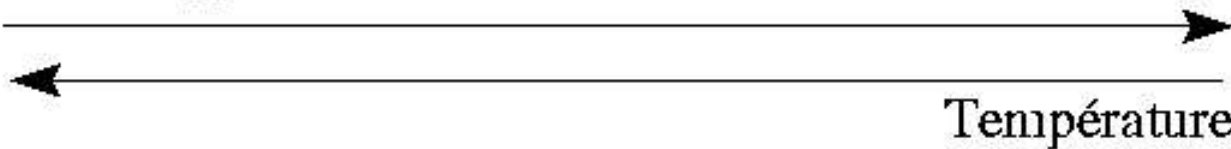


Films recueillis



périodicité spatiale
<-> fréquence d'apparition

Q_{PE} / Q_{PS}

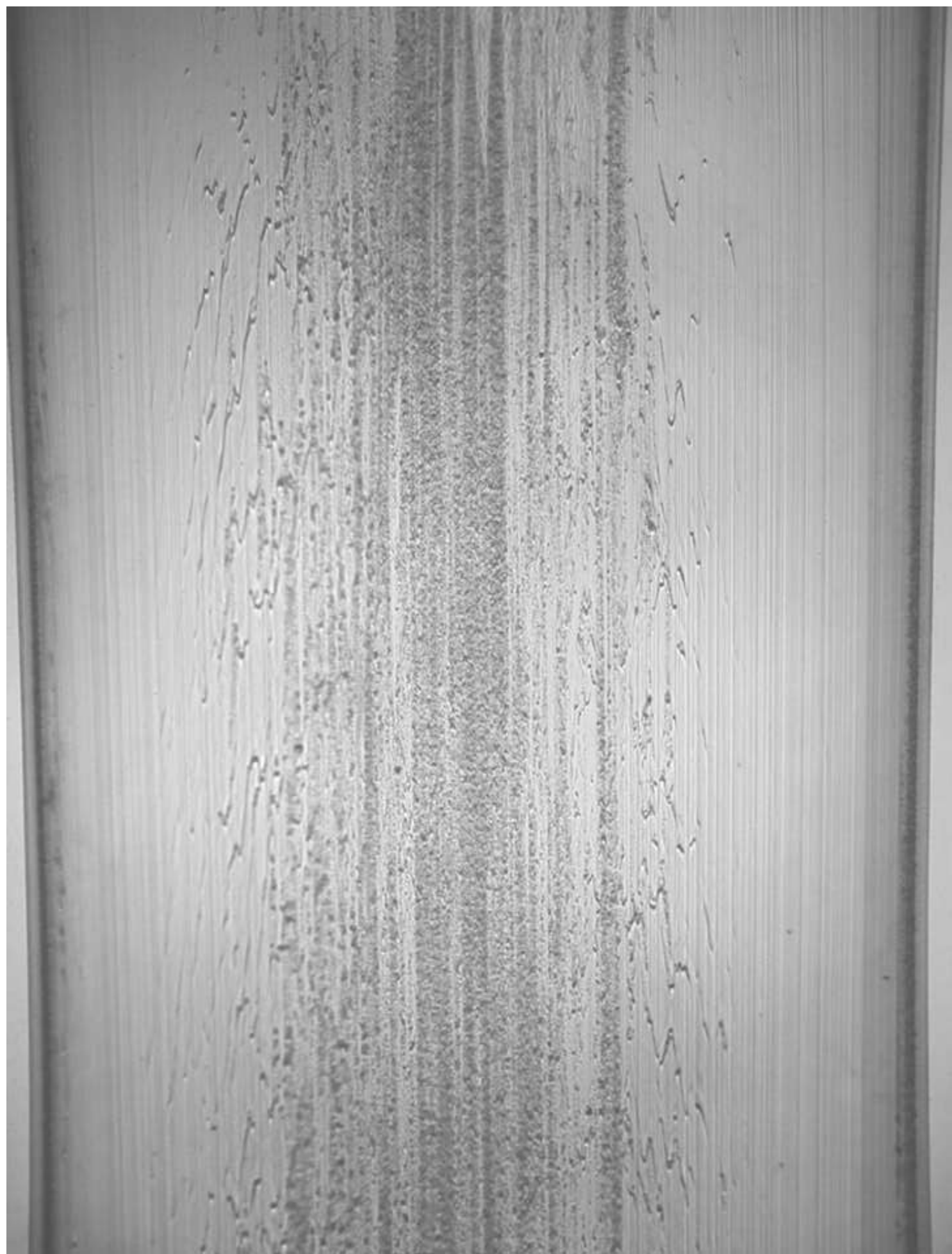












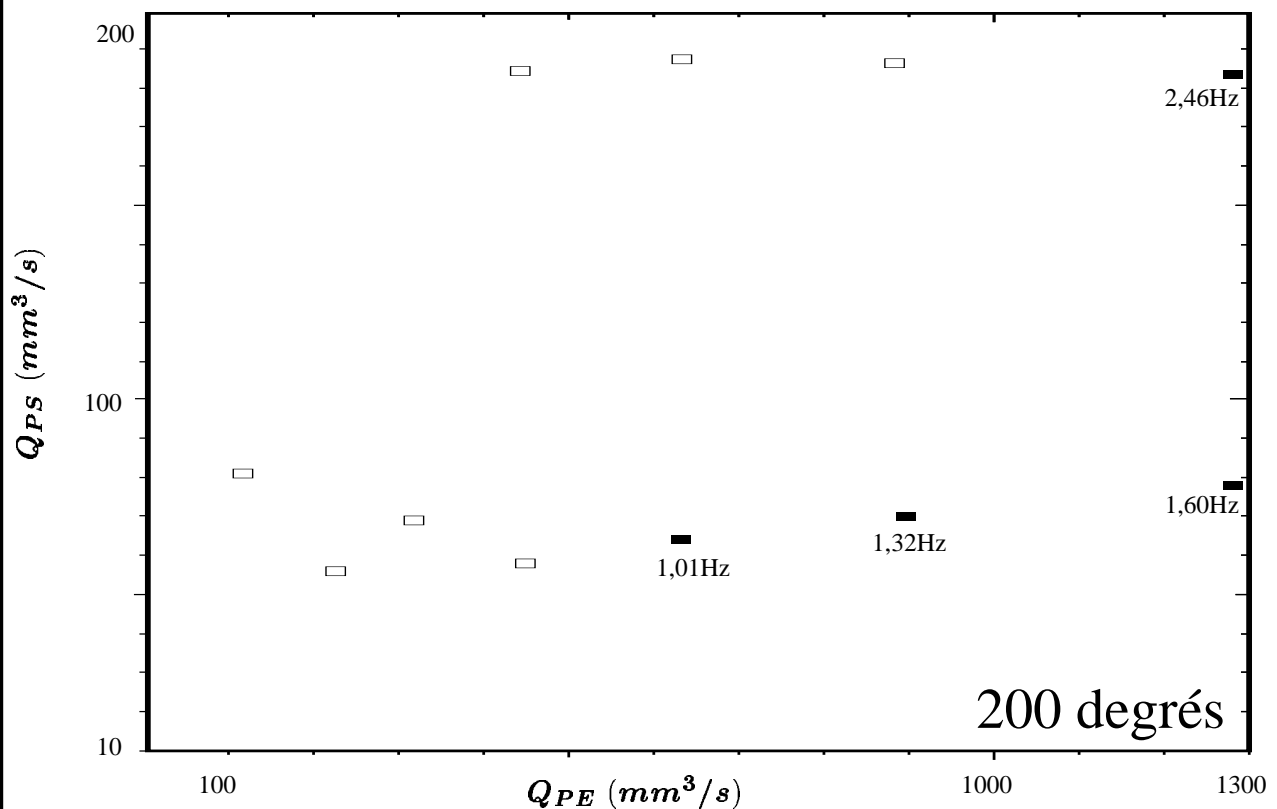
Résumé filière multicanaux

Transition stable / instable à Q_{PE} / Q_{PS} croissant

□ - configurations "stables"

■ - configurations "instables"

N(Hz) fréquence d'apparition du défaut

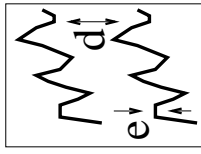


Transition déplacée vers $Q_{PE} / Q_{PS} >$ lorsque T >

Résumé filière porte-manteau



Film "stable"

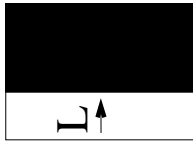


Film avec "vagues"

e = amplitude

d = période spatiale

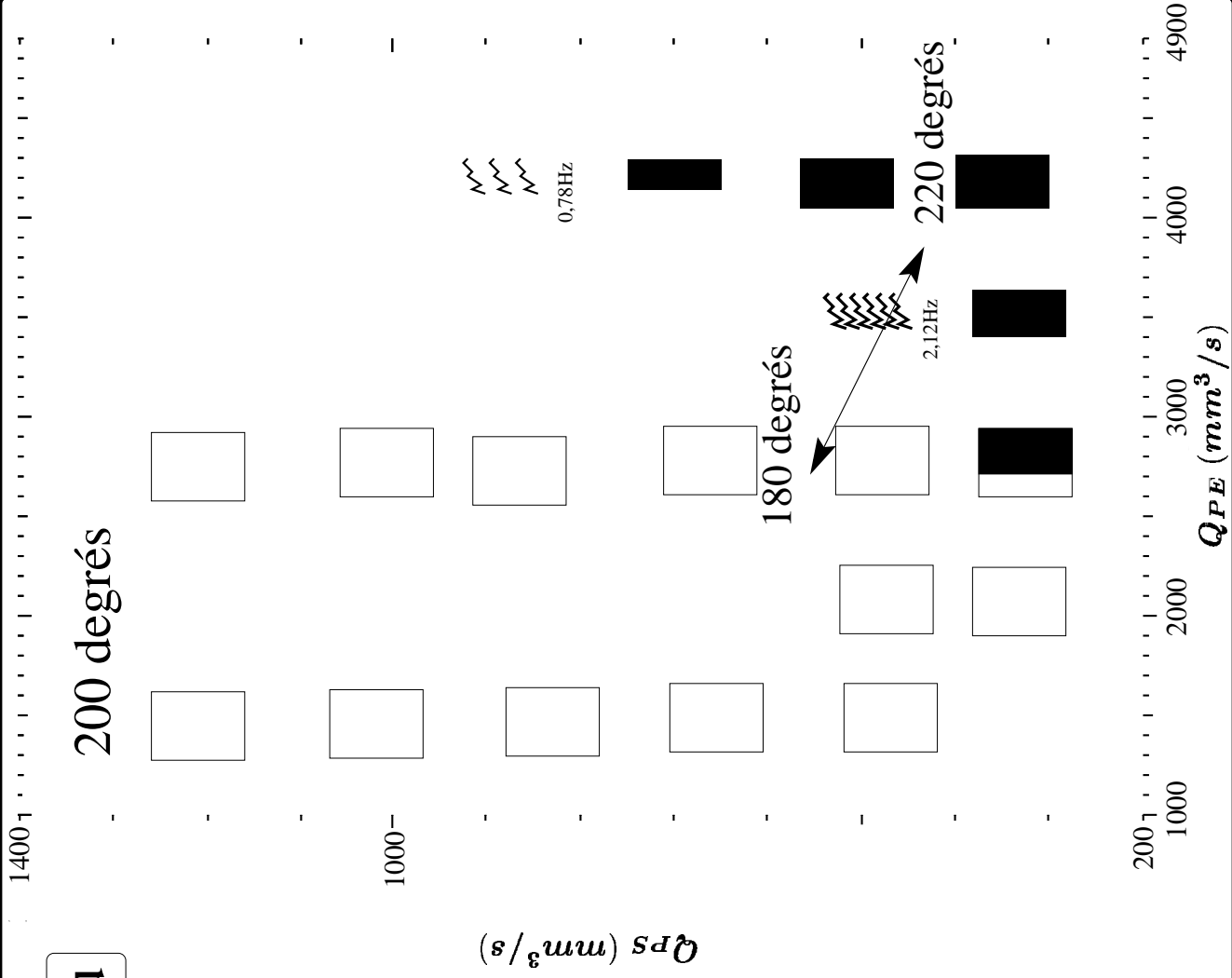
$N(\text{Hz})$ = fréquence d'apparition



Film "très instable"

L = largeur du défaut

-> même comportement



Approche "produit"

étude expérimentale

étude de stabilité

Simulation directe

Approche "procédé"

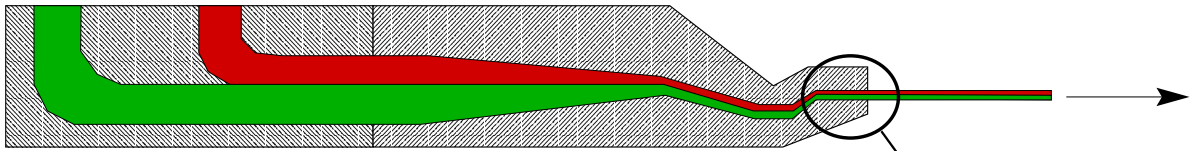
études expérimentales

étude de stabilité

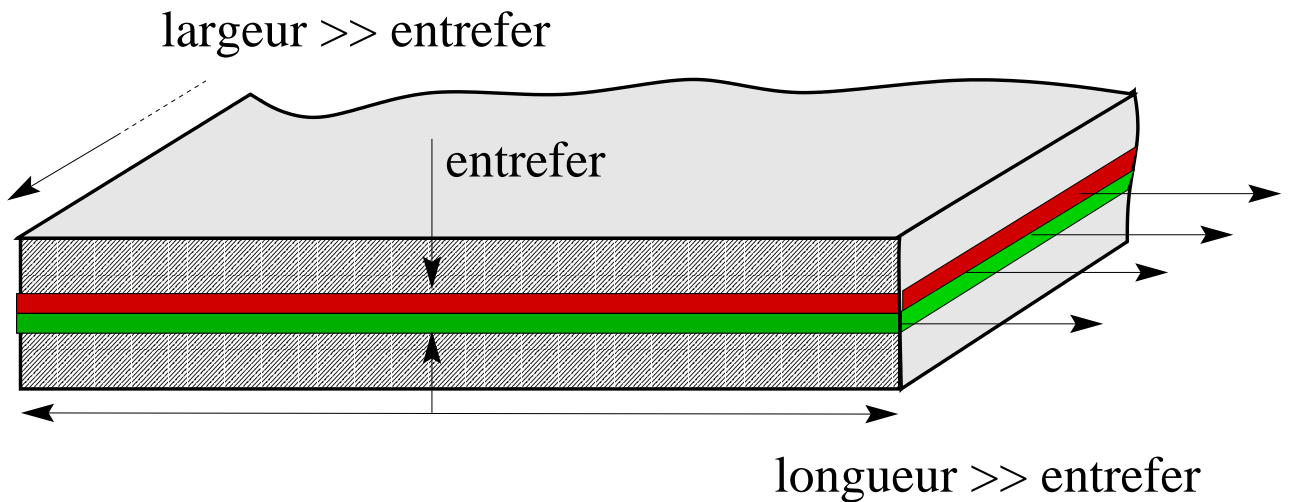
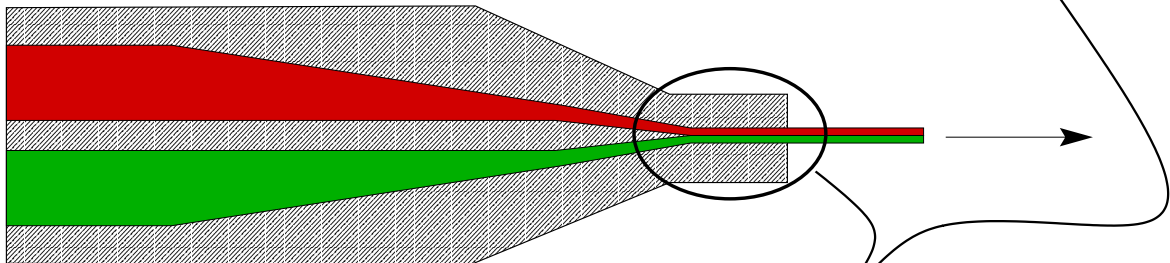
Etude de la stabilité

l'instabilité se développe dans la partie finale de la filière où l'écoulement est supposé bidimensionnel

- Procédé à "boîte de coextrusion" :



- Procédé à filière multicanaux :



Etude de la stabilité

Equations du problème :

- relation de comportement de White-Metzner :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\tau} + \lambda(\dot{\gamma}) (\partial_t \boldsymbol{\tau} + \mathbf{u} \nabla \boldsymbol{\tau} - \nabla \mathbf{u} \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^T \nabla \mathbf{u}) = 2\eta(\dot{\gamma}) \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \\ \eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 [1 + (k\dot{\gamma})^a]^{\frac{m-1}{a}} \\ \lambda(\dot{\gamma}) = \lambda_0 [1 + (l\dot{\gamma})^b]^{\frac{n-1}{b}} \end{cases}$$

- incompressibilité : $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

- relation fondamentale de la dynamique :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \rho (\partial_t \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \nabla p + \rho g \mathbf{e}_y$$

- vitesse nulle aux parois

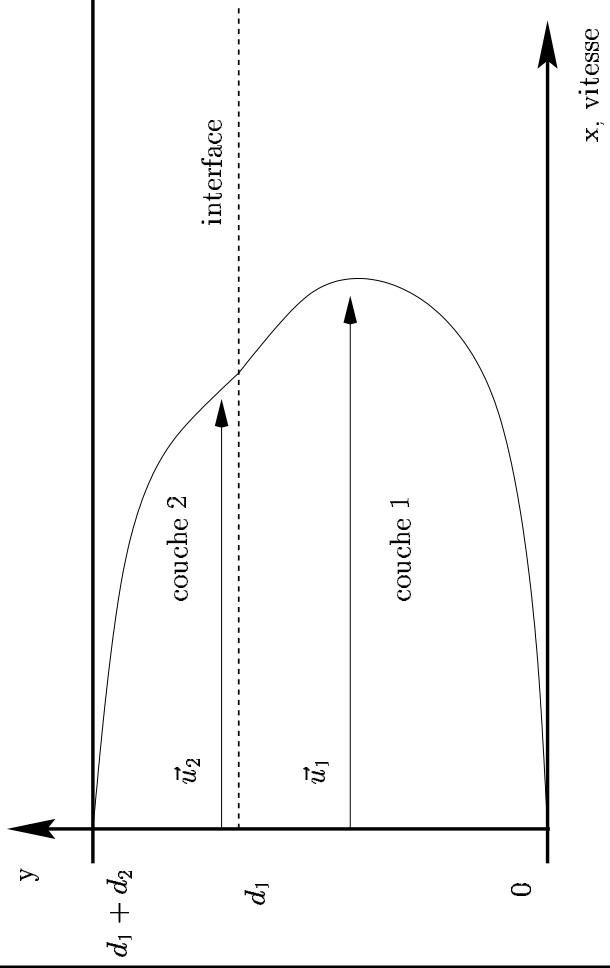
- continuité des vecteurs vitesse et contrainte à l'interface

- équation cinématique :

$$\partial_t h(x, t) + \partial_x h(x, t) u(x, h) = v(x, h)$$

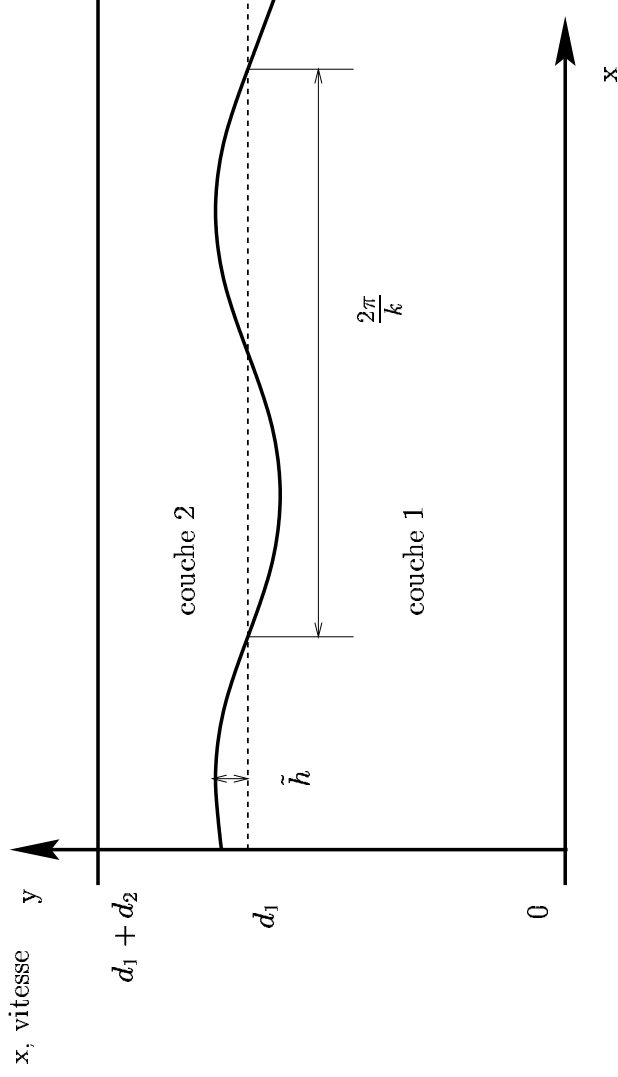
Etude de stabilité linéaire

(Yih, 1967)



Ecoulement de base :

- écoulement de Poiseuille
- stationnaire
- invariant en x



On introduit des perturbations :

- "petites"
- périodiques en x

\Rightarrow évolution temporelle de ces perturbations

Problème aux valeurs propres

Problème : $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = F(\Psi)$, avec $\Psi = (\mathbf{u}_k, \tau_k, p_k, h)$

Solution de Poiseuille : $\bar{\Psi}$, $F(\bar{\Psi}) = 0$

Perturbations : $\hat{\Psi} = \tilde{\Psi}(y) e^{i(kx - \omega t)}$

k
nombre d'onde réel

ω
pulsation complexe

ω_i
taux d'amplification

\Rightarrow problème aux valeurs propres :

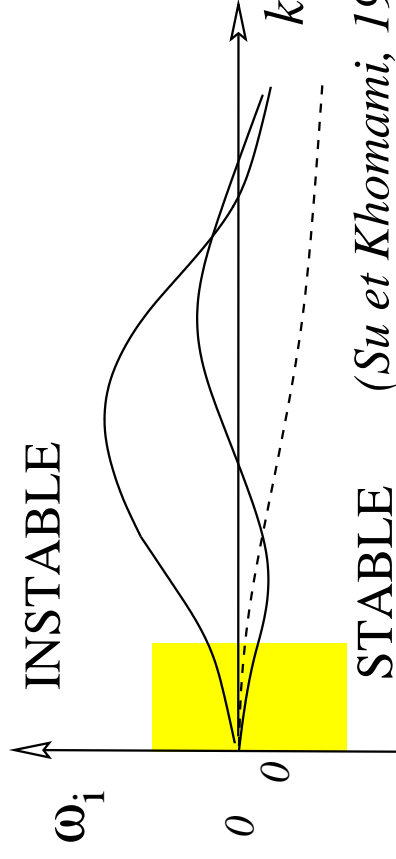
$$-i\omega \tilde{\Psi} = e^{-ikx} DF|_{\bar{\Psi}}(\tilde{\Psi} e^{ikx}) = L_k(\tilde{\Psi}) \Rightarrow \omega(k, We, Re, \dots)$$

si un $\omega_i > 0 \Rightarrow$ écoulement instable

Etude aux "grandes ondes"

Valeur propre considérée
comme "dangereuse" :

$$\omega_i(k) \Big|_{k=0} = 0$$



STABLE (Su et Khomami, 1992)
 (Laure et Scotto)

fluides Oldroyd-B

Recherche d'un outil
 simple et rapide!

- calcul coûteux

- périodicité spatiale du défaut > entrefer

=> étude de stabilité "aux grandes ondes" : loi de White-Metzner

calcul de ω_i pour $k \rightarrow 0$

=> pente de $\omega_i(k)$ en $k=0$

Choix de la loi de comportement

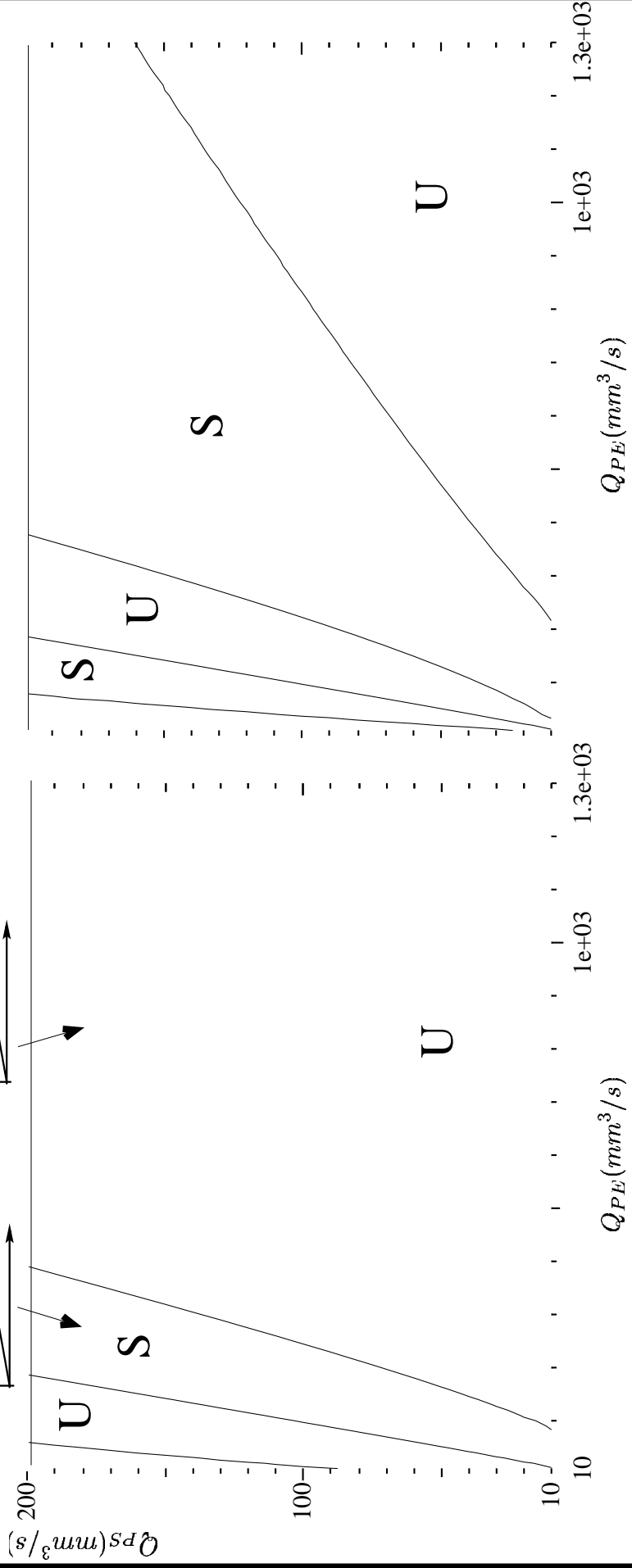
Carreau-Yasuda | ω_i | $\sim Re \sim 10^{-6}$

White-Metzner

(Charru et Fabre, 1994)

| ω_i | $\sim We \sim 1 (>> Re)$

=> critère "visqueux" contredit



Choix de la loi de comportement :

écoulement de base

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_x(y) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{du}{dy} = \dot{\gamma}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

Carreau-Yasuda

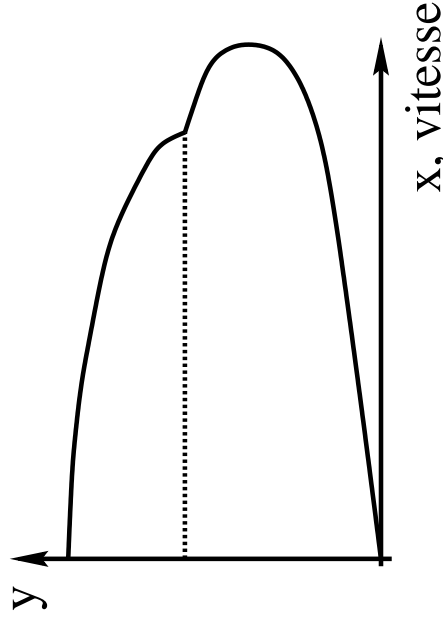
$$\sigma_{xy} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = 0$$

White-Metzner

$$\sigma_{xy} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

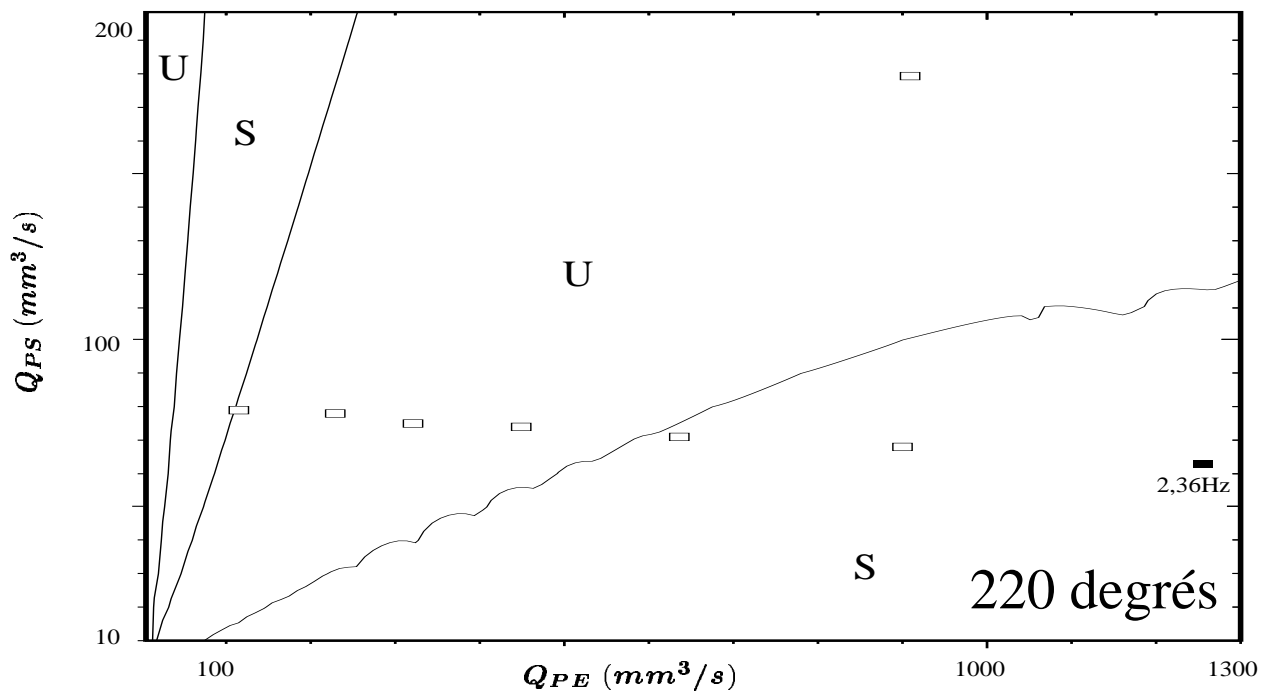
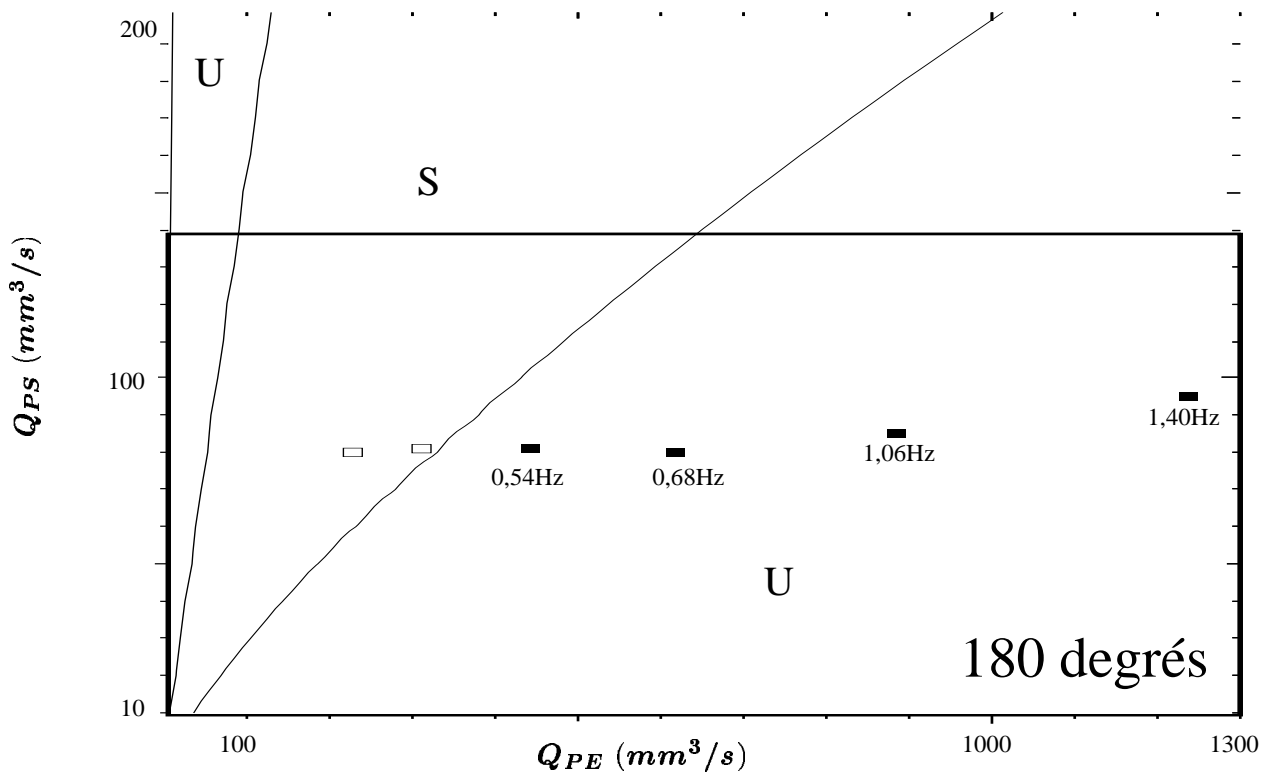
$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = 2\lambda(\dot{\gamma})\dot{\sigma}_{xy}$$



Même champ de vitesse

Comparaison aux résultats expérimentaux

Filière multicanaux :



Approche "produit"

étude expérimentale

étude de stabilité

Simulation directe

Approche "procédé"

études expérimentales

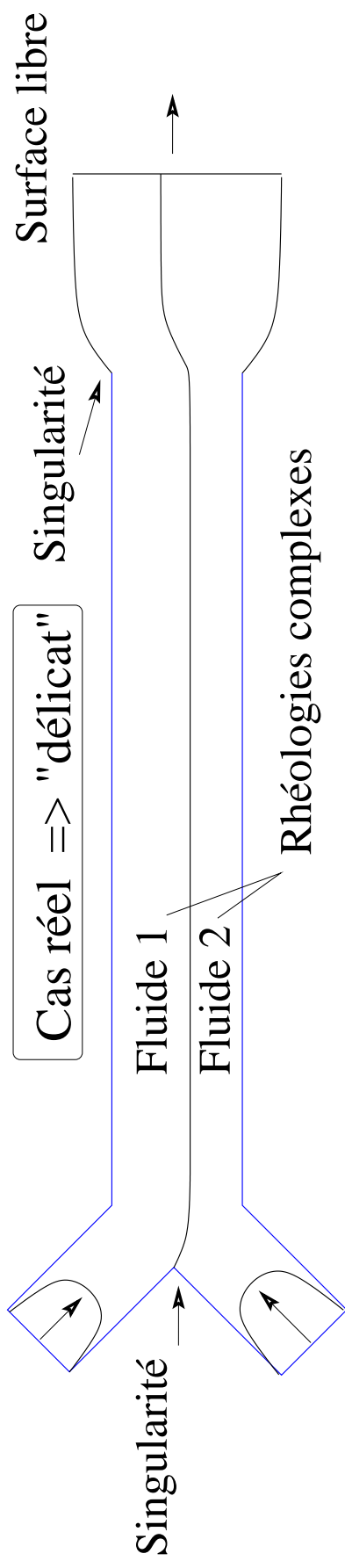
étude de stabilité

Etude par simulation directe

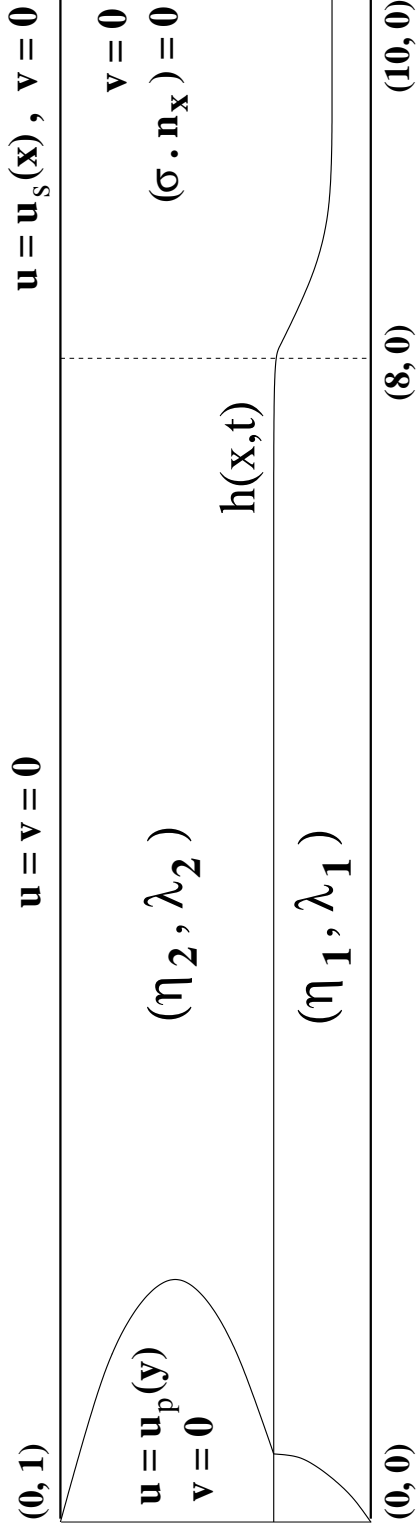
(A. Fortin)

(Laure et Fortin, 2000)

Objectif : déterminer la nature de l'instabilité



=> géométrie simplifiée, fluide de Maxwell, élasticité modérée



$(8, 0)$

$(8, 0)$

$(0, 0)$

Procédure

- calcul de l'écoulement stationnaire

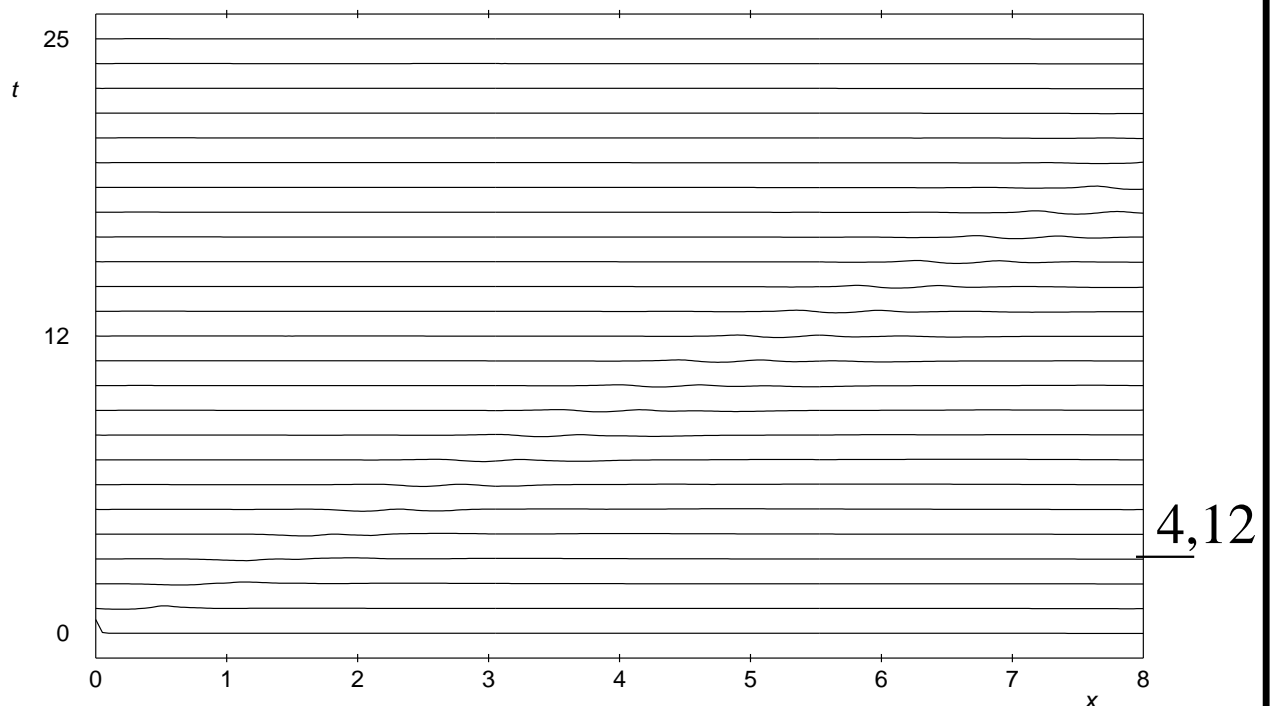
- perturbation de débit ($1,1 Q_1$)

- calcul instationnaire

q_1, q_2, η_1 et η_2 fixés

Etude pour différents We_1, We_2

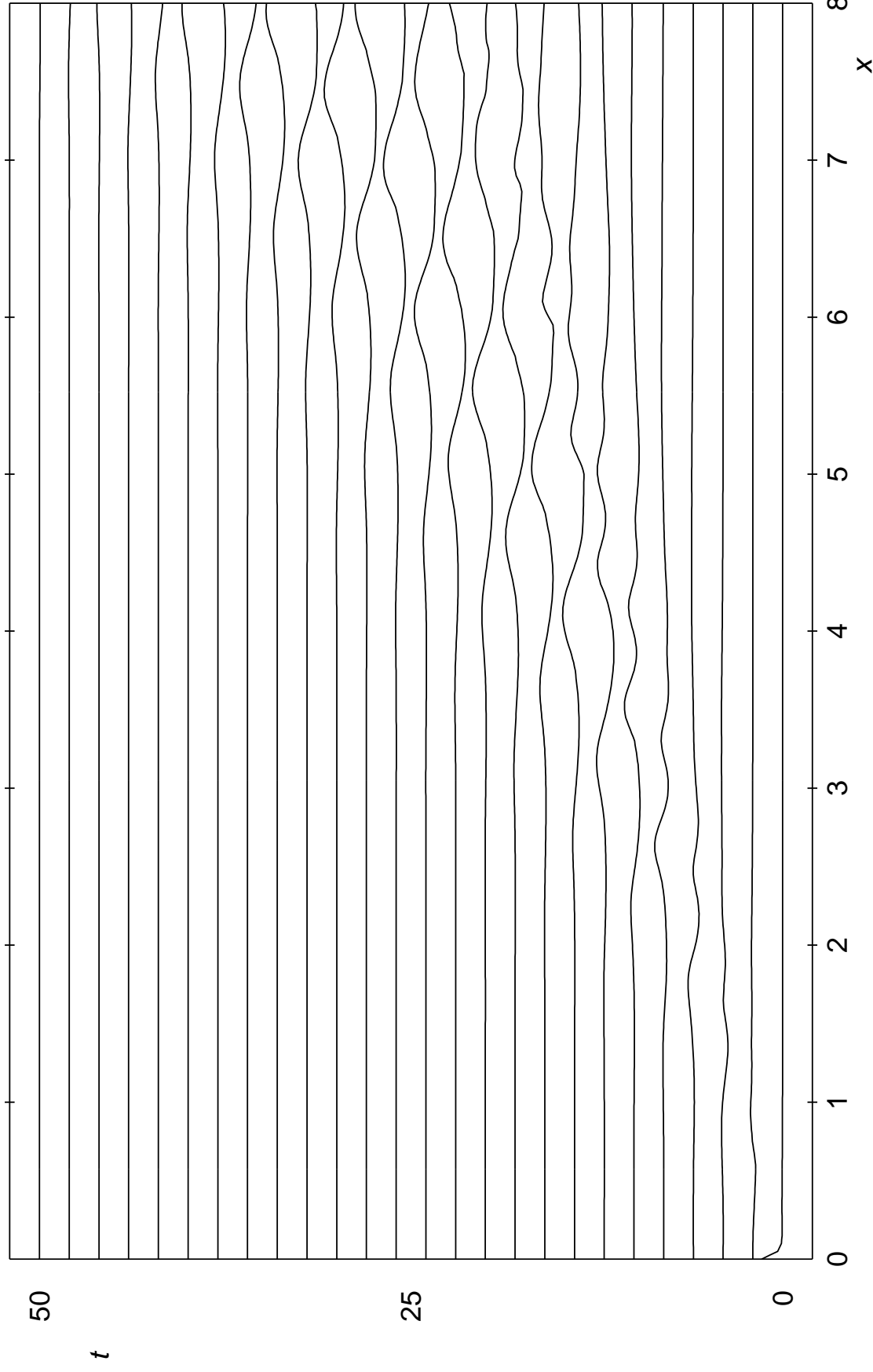
Cas "stable" : $We_1 = 0,4$ et $We_2 = 0,5$



=> perturbation transportée

Formation de paquets d'ondes

Cas "instable" : $We_1 = 0,5$ et $We_2 = 0,1$



Approche "produit"

étude expérimentale

étude de stabilité

Simulation directe

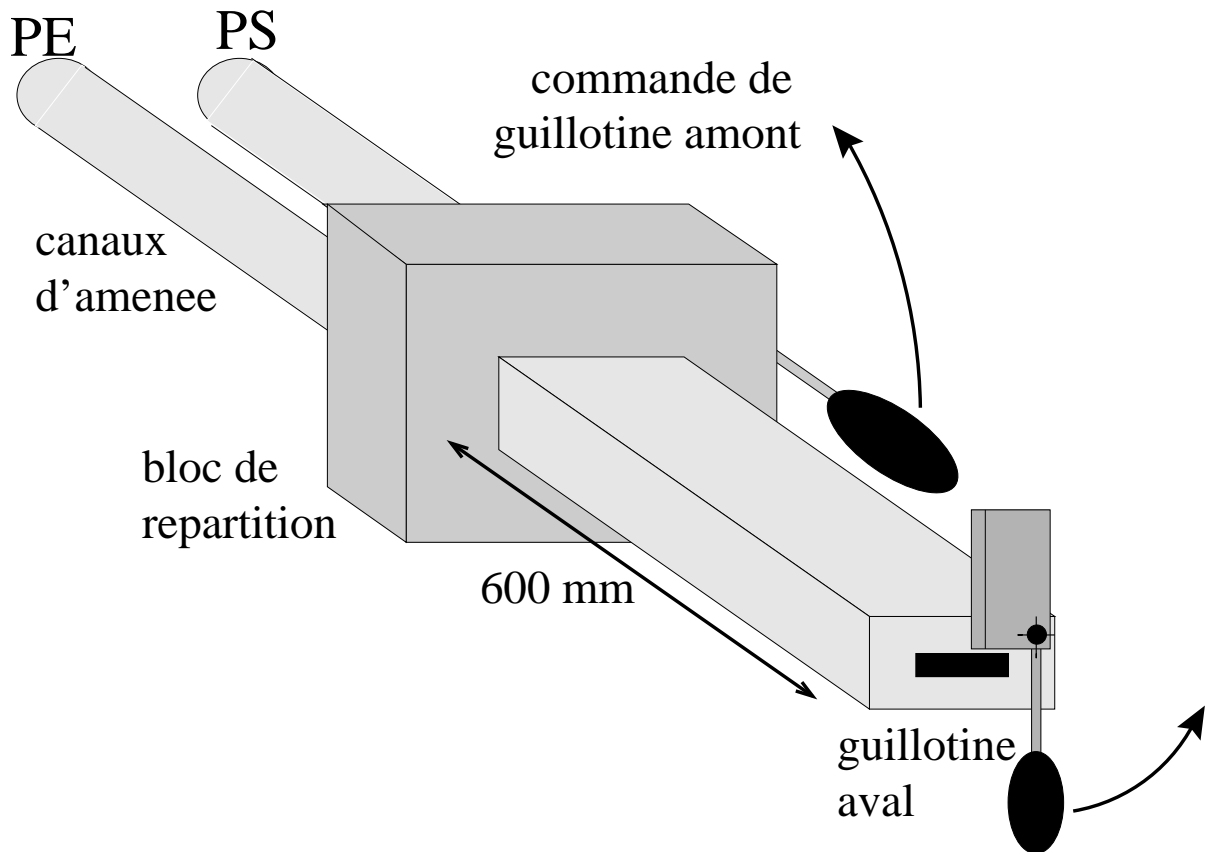
Approche "procédé"

études expérimentales

étude de stabilité

Dispositif de figeage dans la filière

CERDATO (*Mauffrey, 2000*)



- régime établi

- arrêt des extrudeuses

- fermeture des guillotines

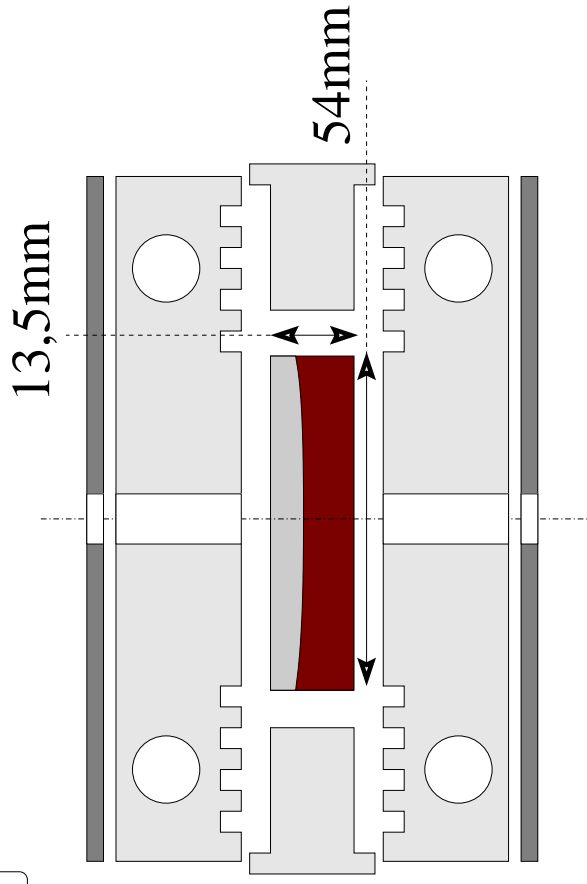
Procédure :

- refroidissement

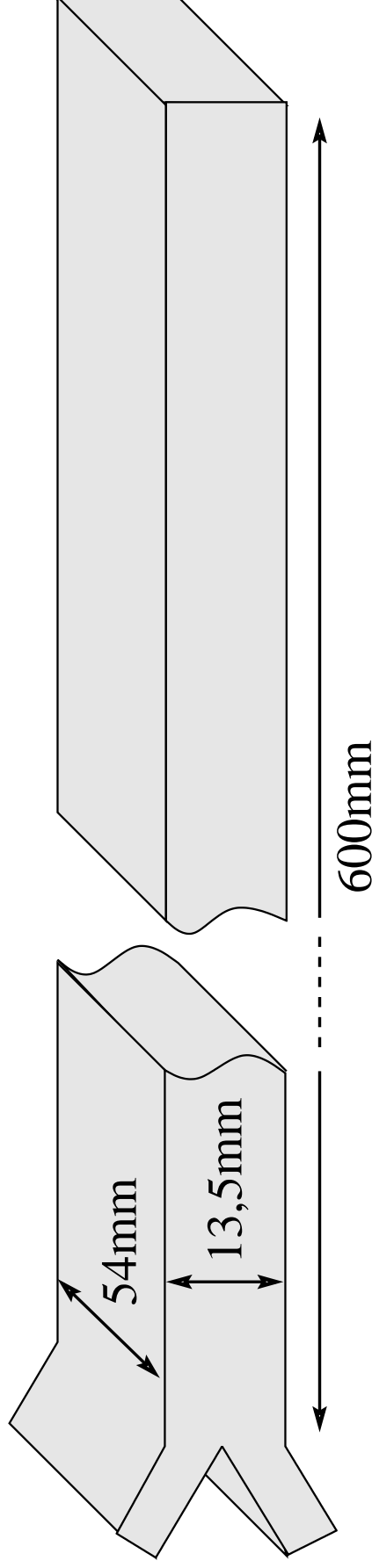
- extraction de la structure

Extraction de structure de la filière

Filière démontable

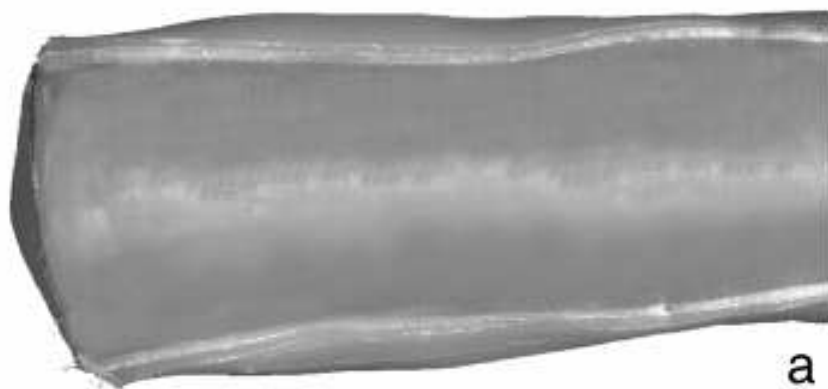


=> extraction de structure



=> analyse extérieure et coupe longitudinale

Extrudats obtenus

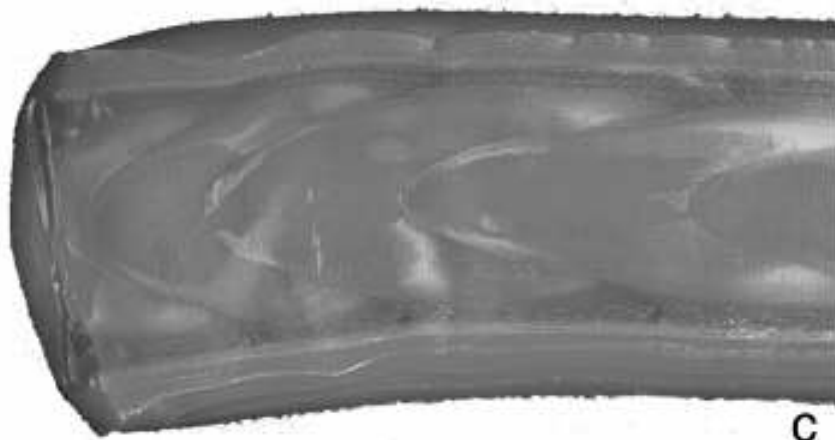


"Stable"

$$Q_{PE} / Q_{PS}$$



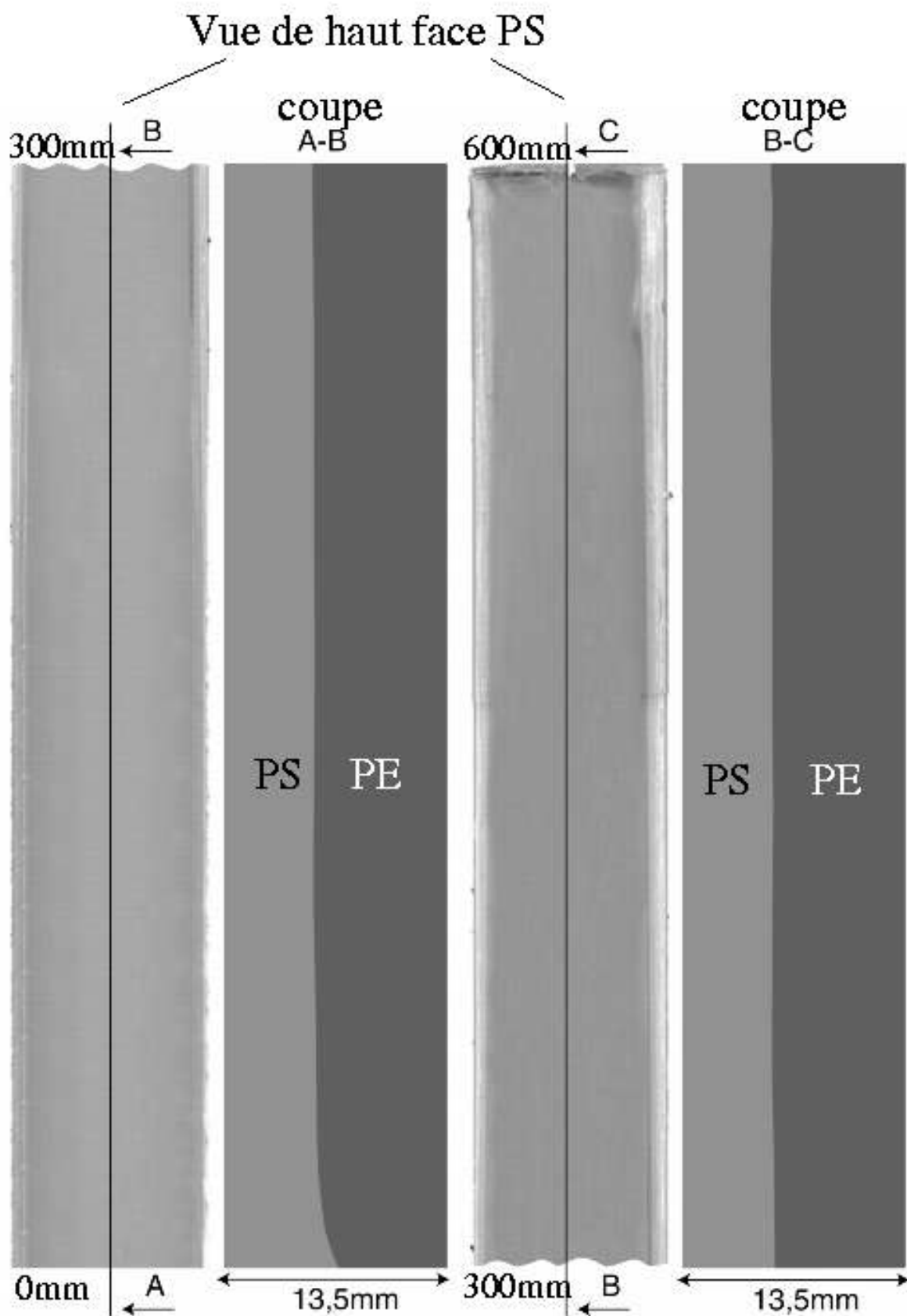
"Chevrons"



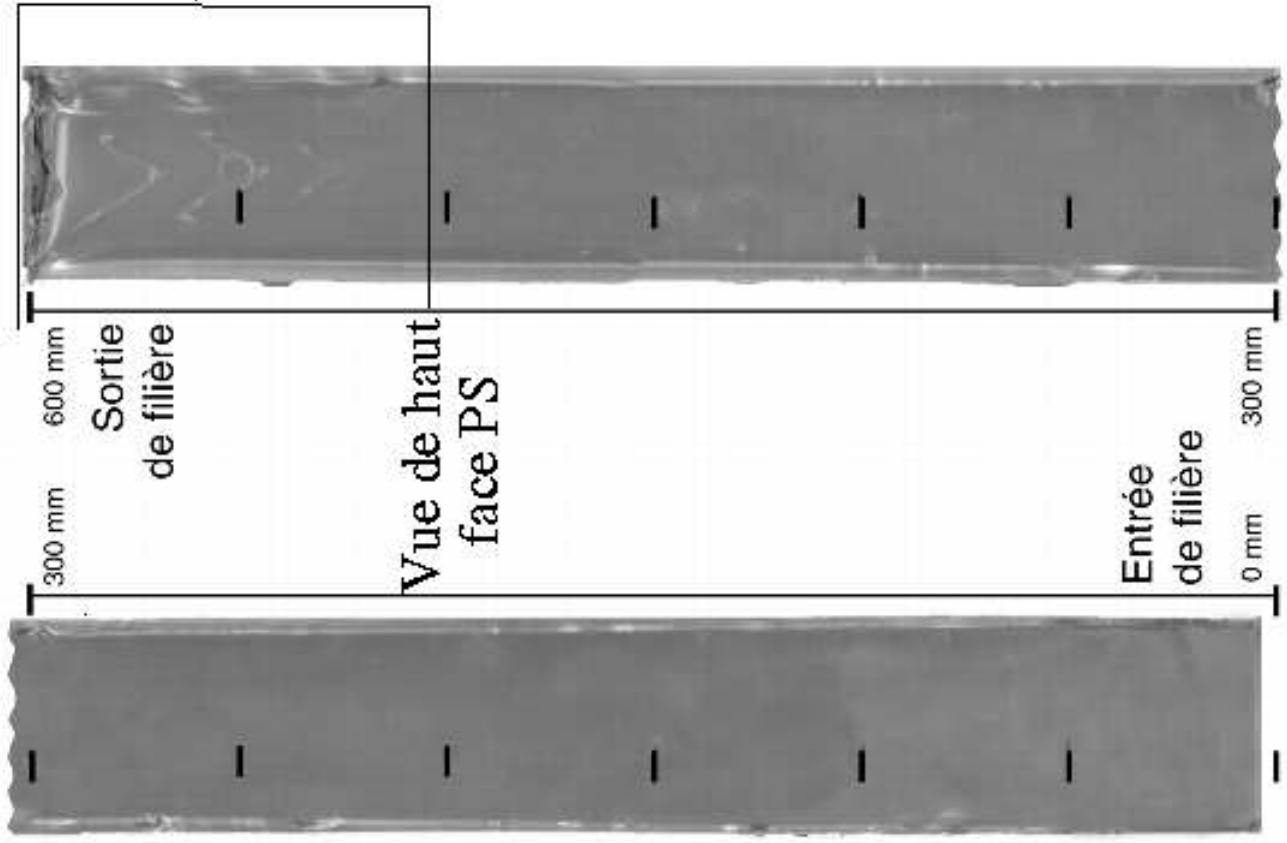
"Chevrons"



Structure : a



Structure : b



300 mm

600 mm

Sortie de filière

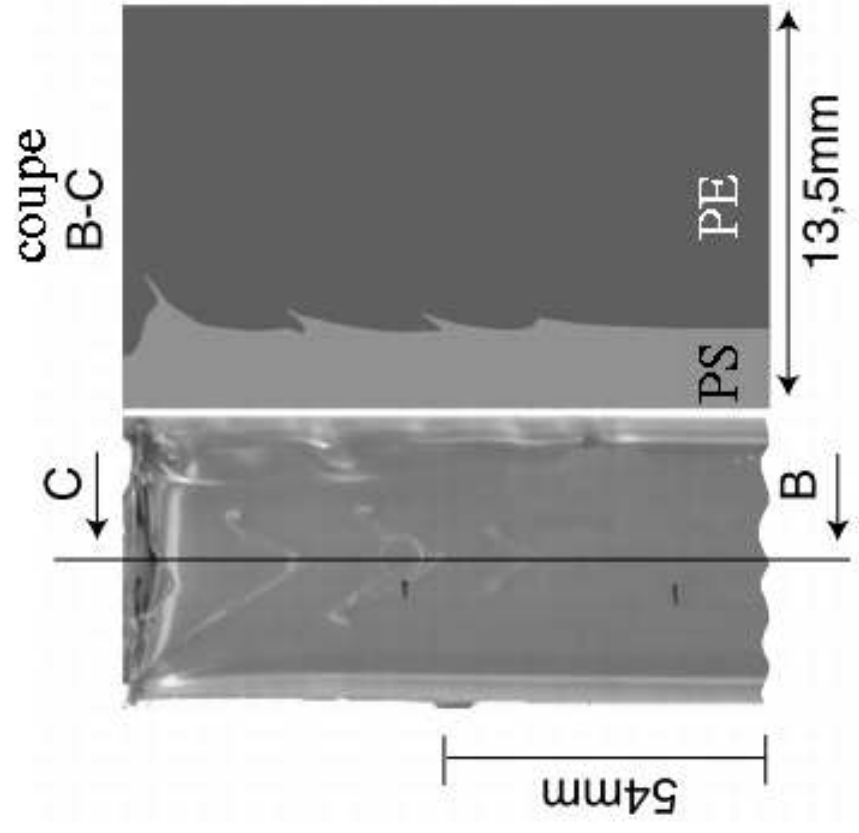
Vue de haut face PS

Entrée de filière

0 mm

300 mm

zoom



coupe B-C

C

PS

PE



13,5mm

54mm

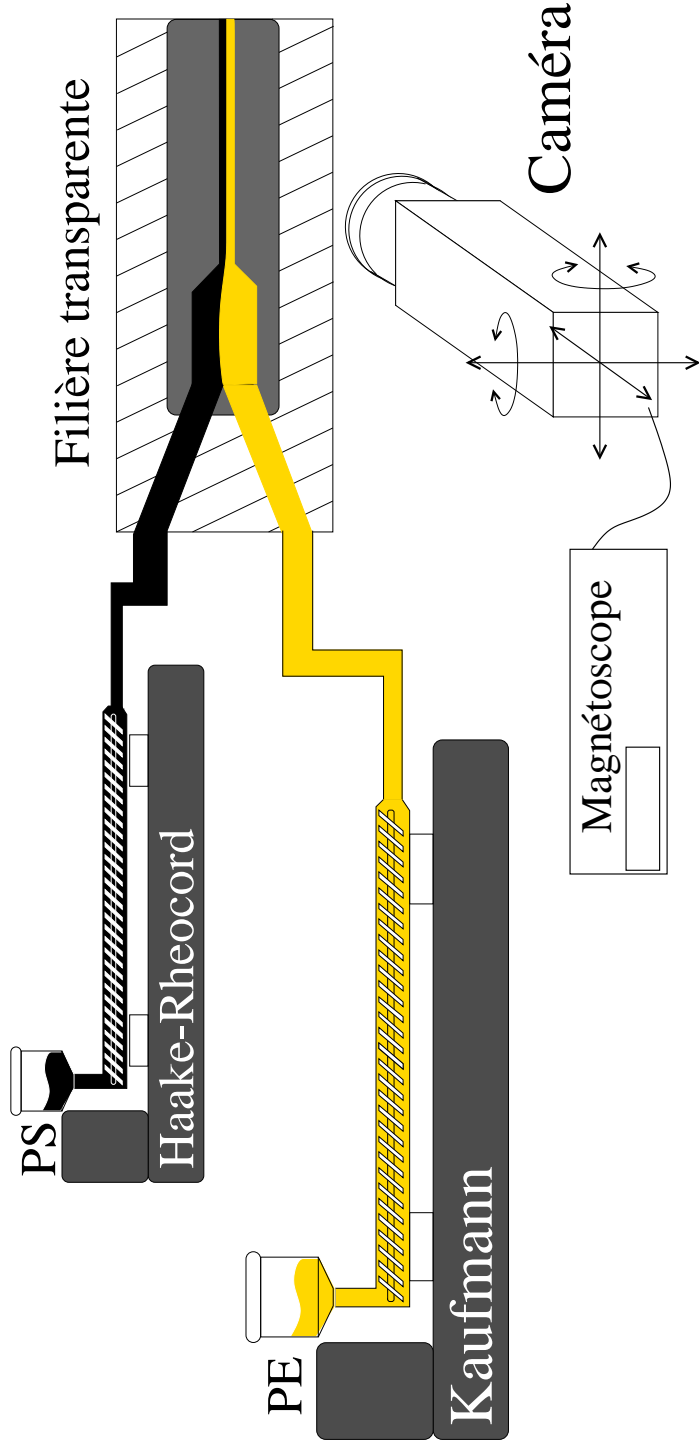
B

Structure : c



Dispositif d'observation dans la filière

(Wilson et Khomami, 1992)

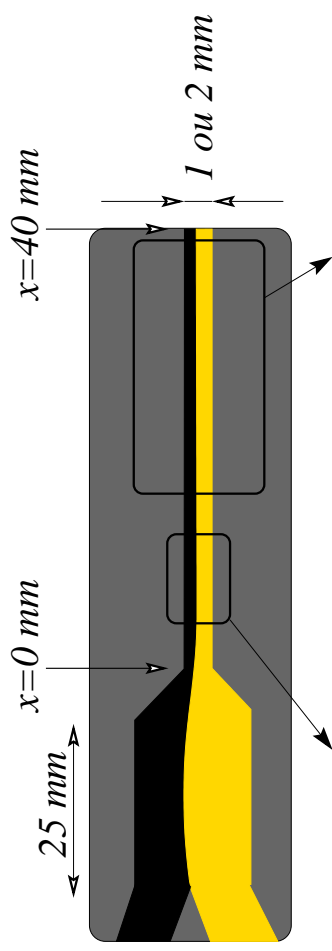
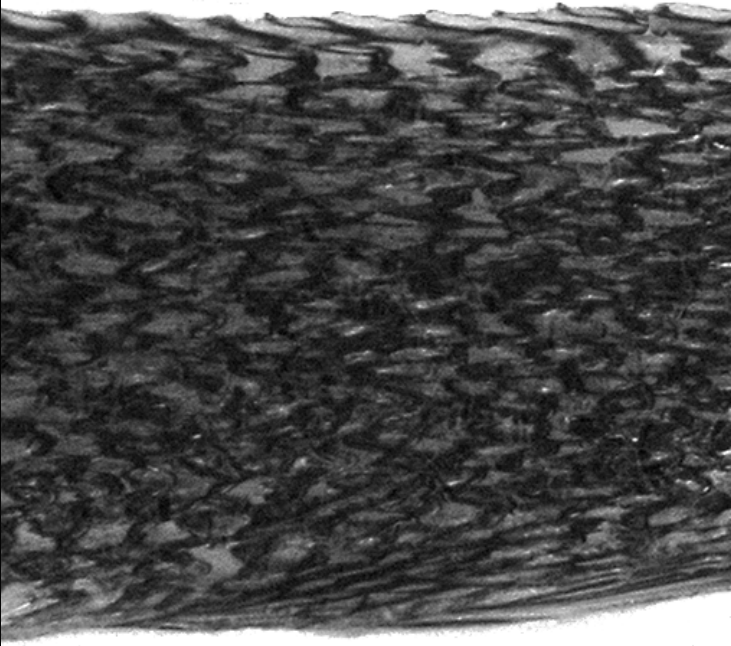


- parois laterales transparentes

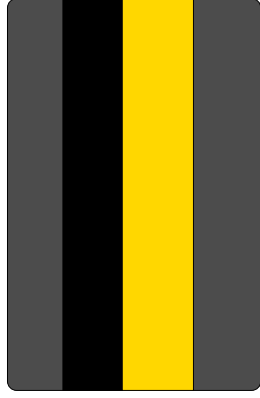
- polystyrène teint en noir

- enregistrement sur bande

Etude d'une configuration instable

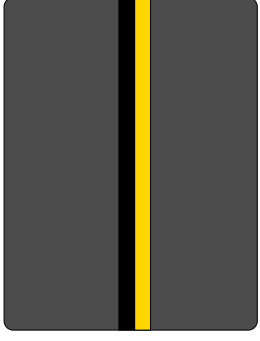


Fort grossissement



Caméra

Faible grossissement



(~demi-filrière)

(6,4mm X 4,8mm)



1 pixel \leftrightarrow 1/120 mm

Configuration instable

vue à fort grossissement

=> analyse d'image

Construction de diagrammes $h(t)$

$x = 5mm$

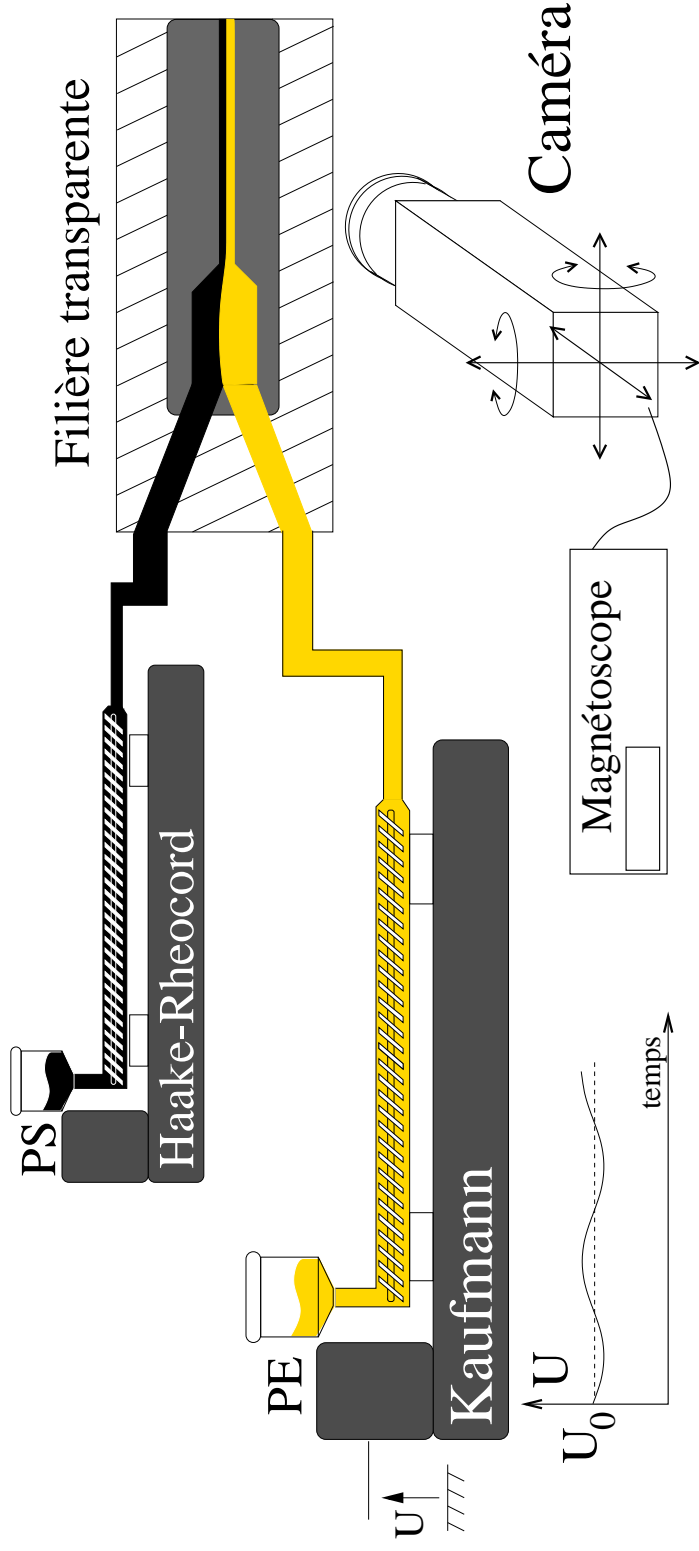


$x = 35mm$



=> pas de mesures possibles

Dispositif de perturbation de l'écoulement

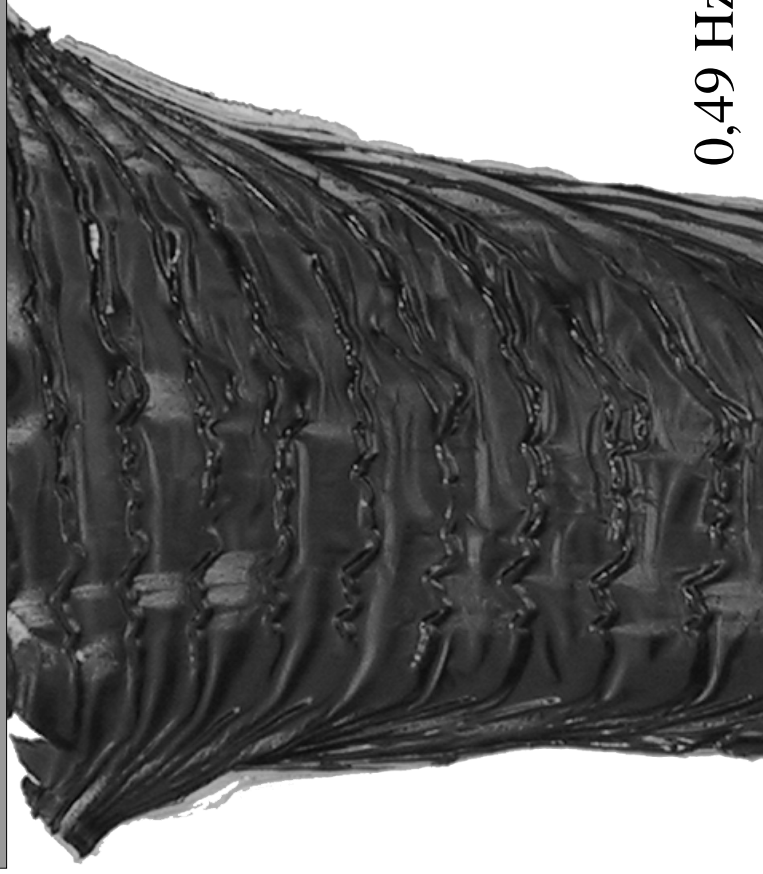


+ extrudeuse Kaufmann asservie en Ω

=> introduction d'une perturbation contrôlée

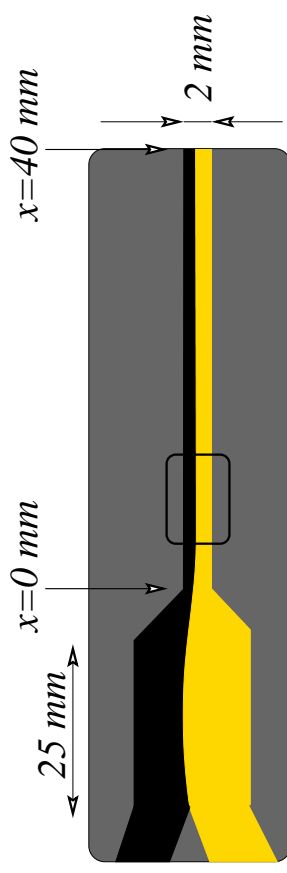
Perturbation d'une configuration "légèrement instable"

Sortie de filière

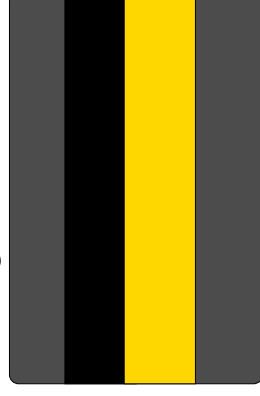


0,49 Hz

=> défaut ~ bidimensionnel



Fort grossissement



(6,4mm X 4,8mm)

Diagrammes $h(t)$



mesures possibles

- fréquence

- vitesse

- nombre d'onde

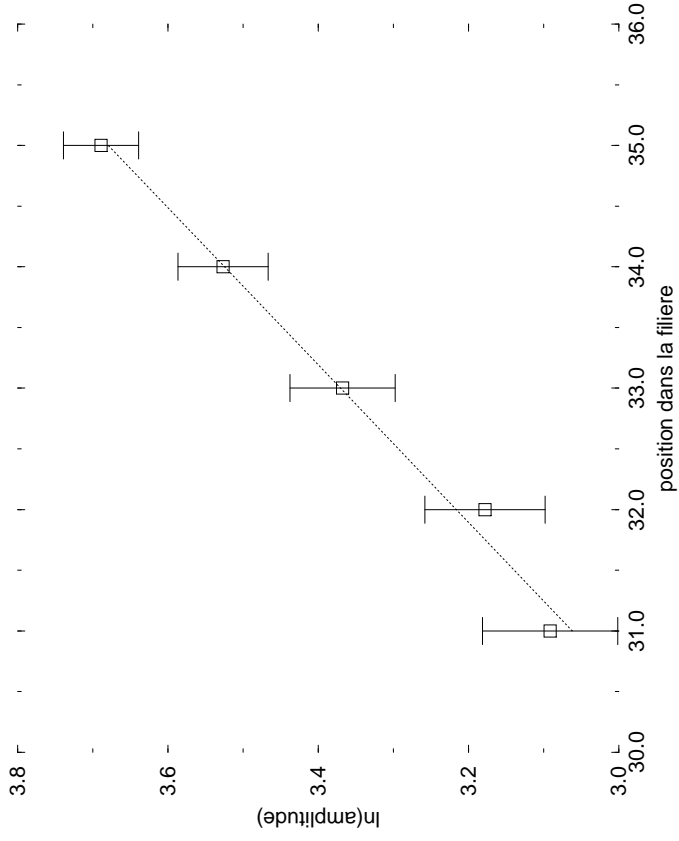
- amplification
spatiale



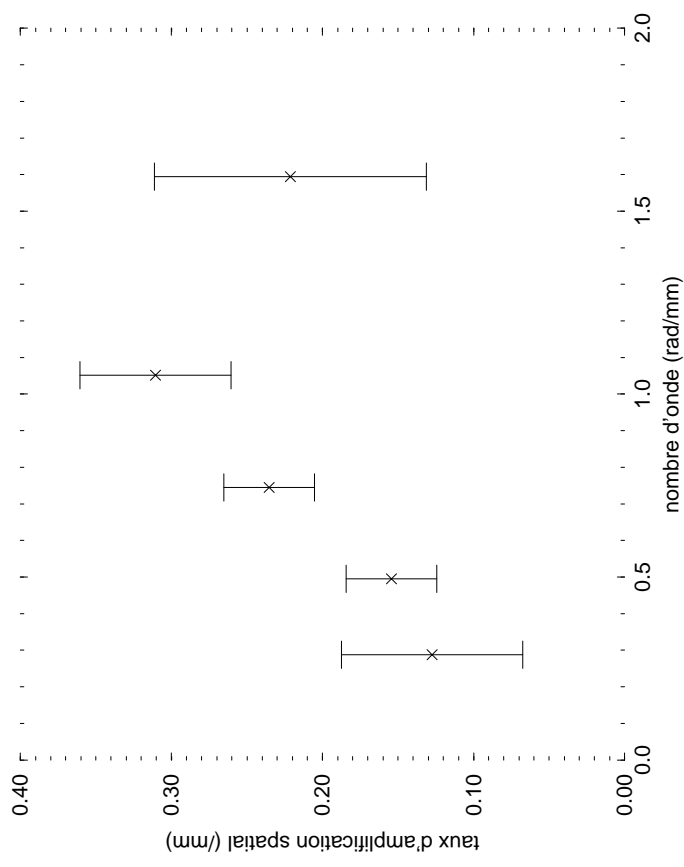
$t = 0 \text{ s}$ $t = 10 \text{ s}$

Taux d'amplification spatial

Estimation du taux
d'amplification spatial



Taux d'amplification spatial
fonction du nombre d'onde



-> mode dominant

Approche "produit"

étude expérimentale

étude de stabilité

Simulation directe

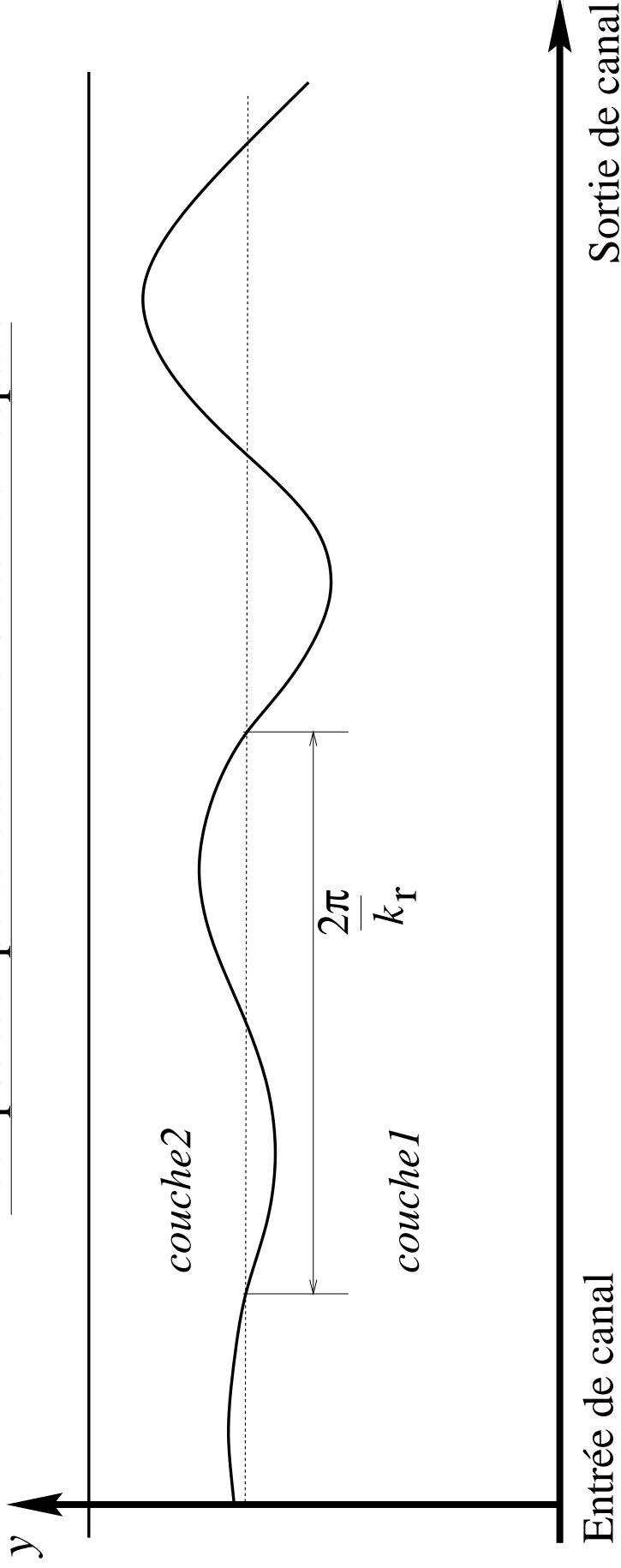
Approche "procédé"

études expérimentales

étude de stabilité

Etude de stabilité spatiale

Les "petites" perturbations croissent en espace



$$\hat{\Psi} = \tilde{\Psi}(y) e^{i(kx - \omega t)}$$

k nombre d'onde complexe

$-k_i$ taux d'amplification

ω pulsation réelle

Transformation de Gaster

Relier les problèmes spatial et temporel

Problème temporel (T) :

- calcul pour k_r fixé de :
 - $\omega_r(T)$ pulsation réelle
 - $\omega_i(T)$ taux d'amplification temporel

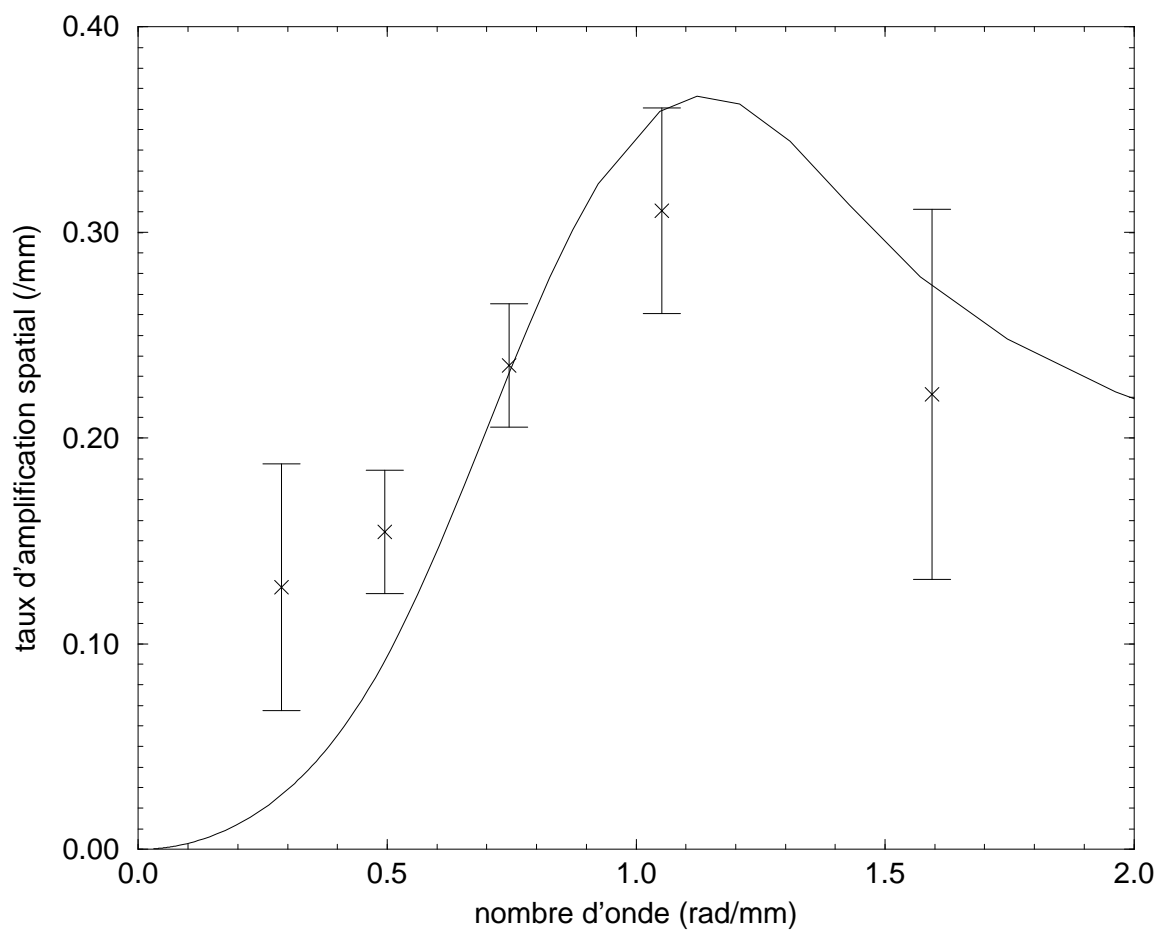
Problème spatial (S) :

- relation de Gaster :
 - $\omega_r(S) = \omega_r(T) \rightarrow$ même pulsation
 - $-k_i(S) = \omega_i(T) / \left(\frac{\partial \omega_r}{\partial k_r} \right)$

étude temporelle dans le référentiel défini par $V_g = \frac{\partial \omega_r}{\partial k_r}$

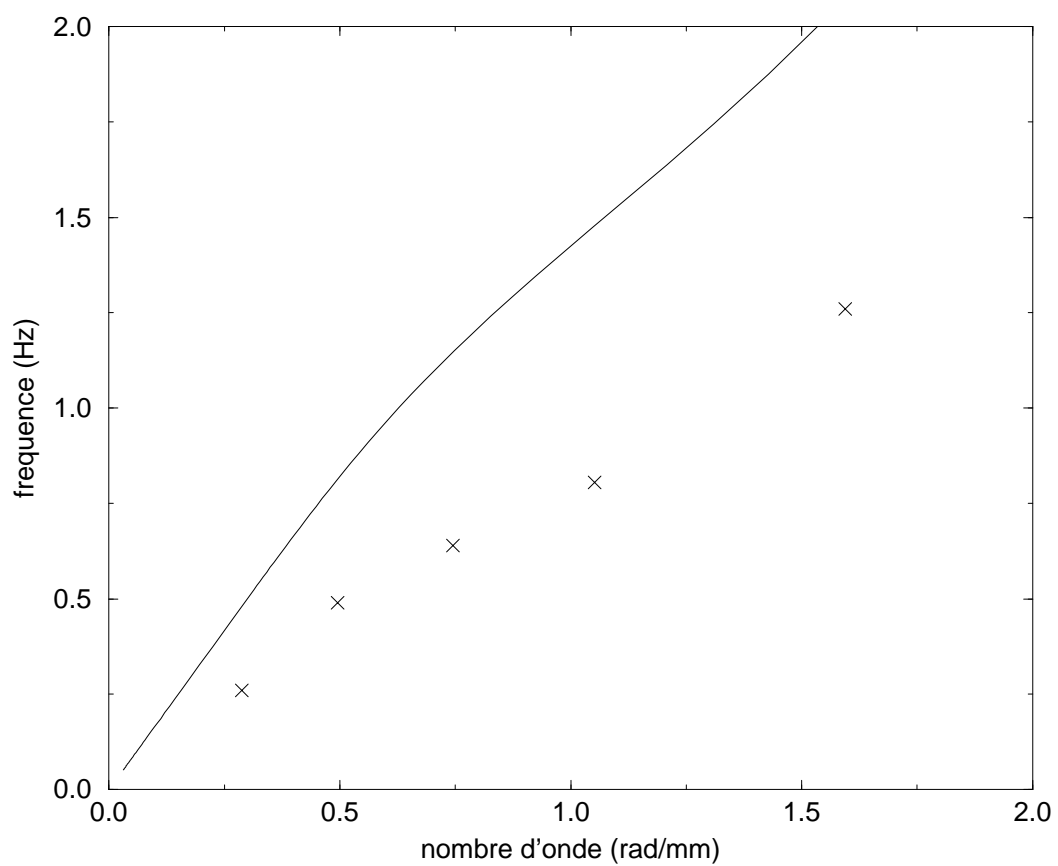
Validation de l'approche spatiale

Comparaison à l'expérience de forçage



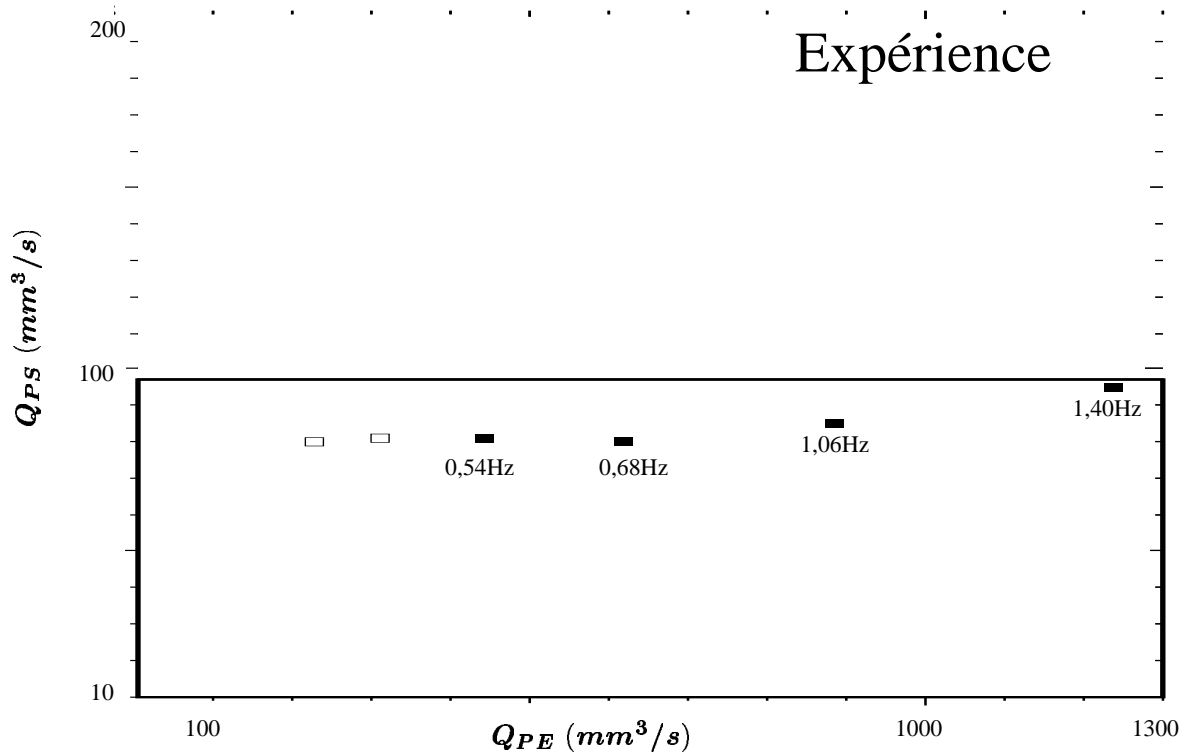
-> rend compte du taux d'amplification spatial

Limites de l'approche spatiale

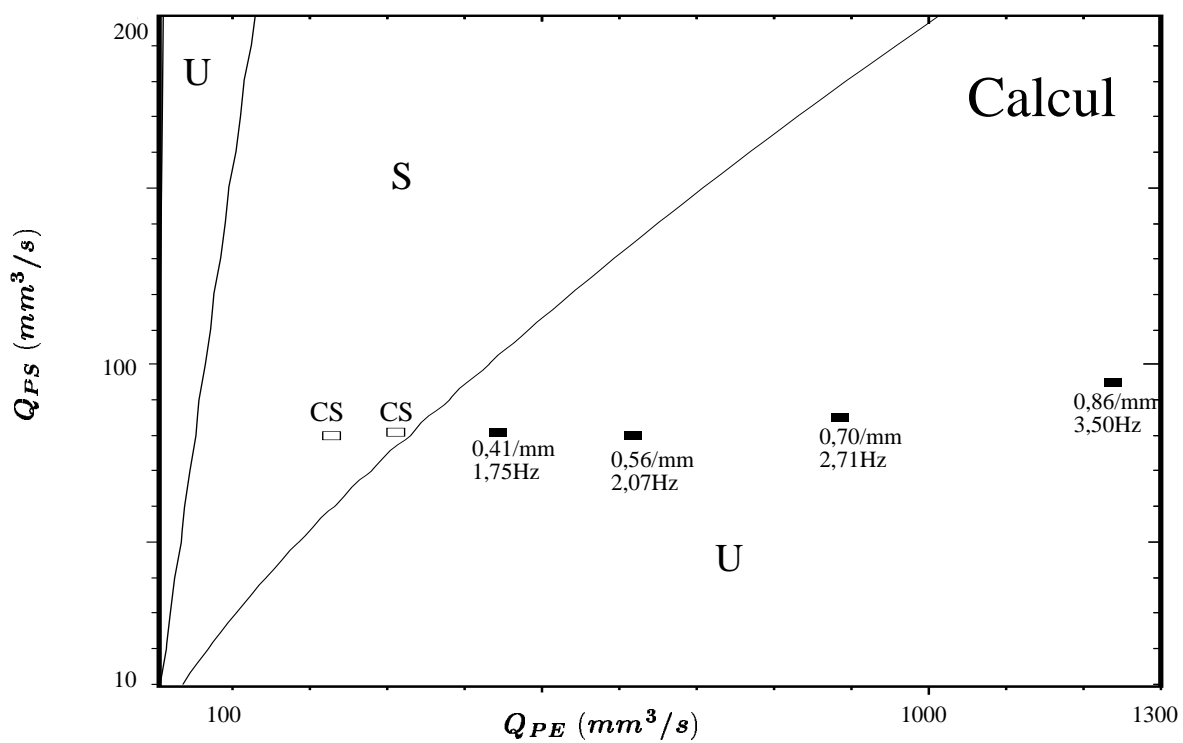


=> onde plus courte

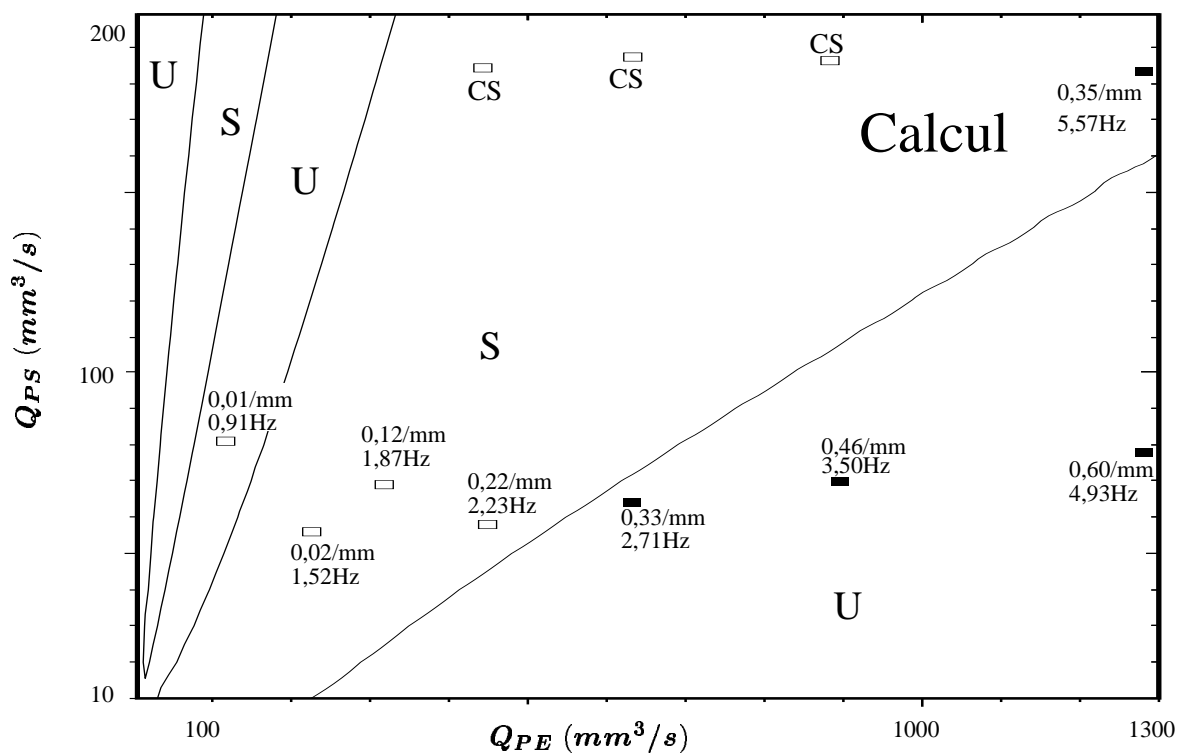
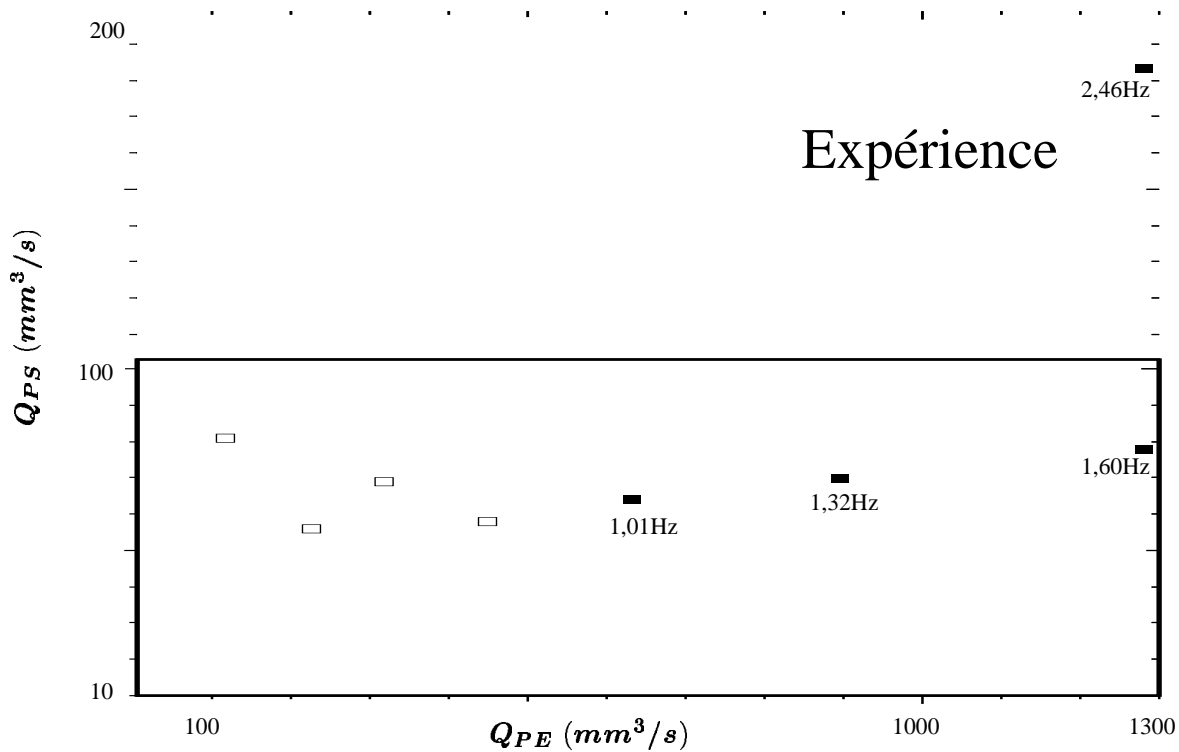
Filière multicanaux - 180 degrés



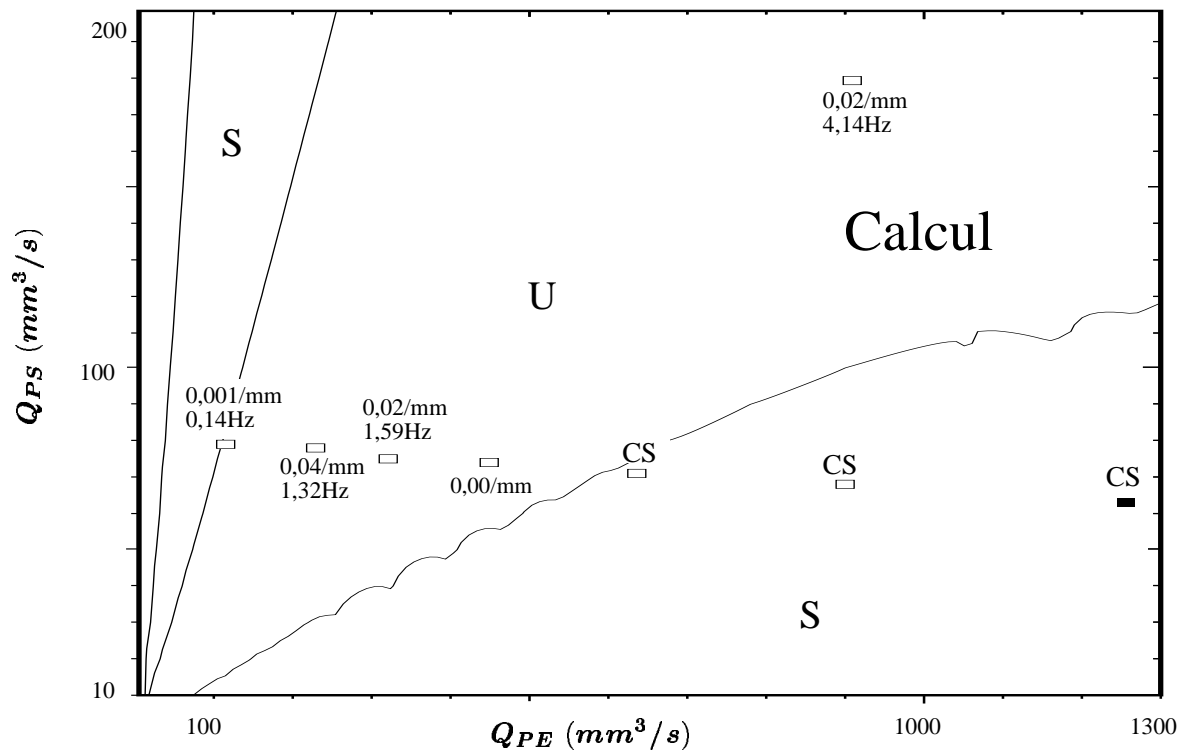
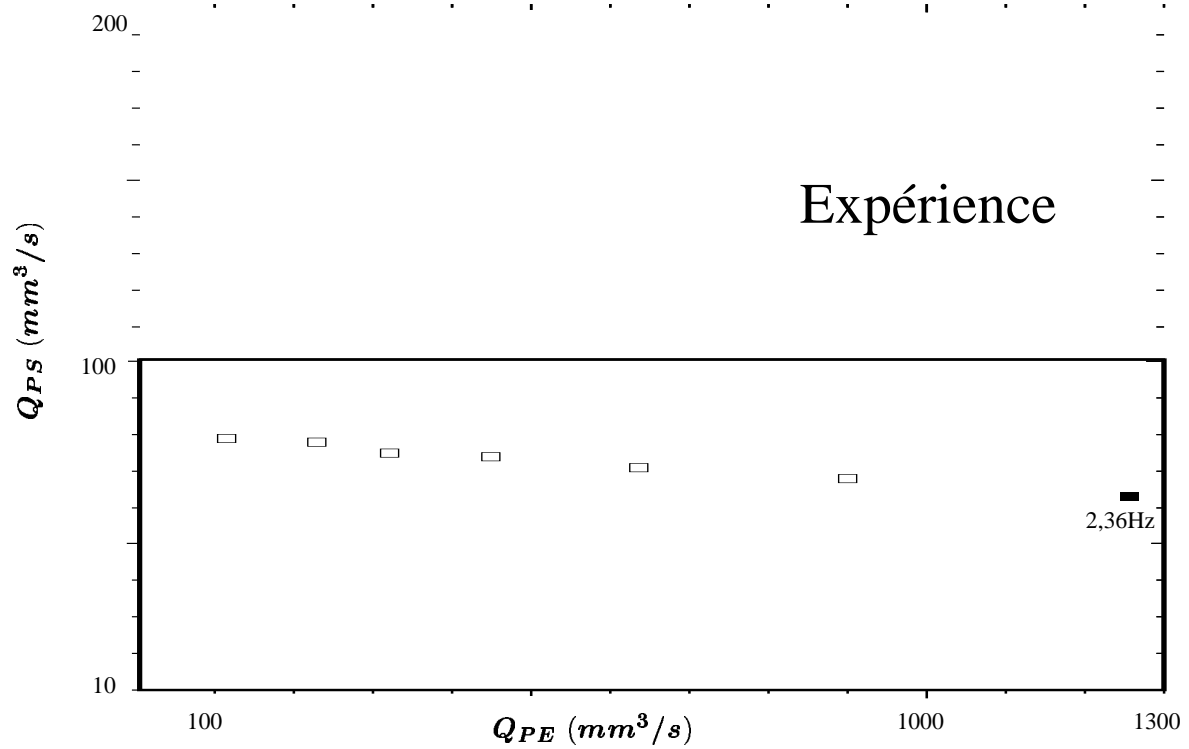
CS=stable $-k_i$ (/mm)



Filière multicanaux - 200 degrés



Filière multicanaux - 220 degrés



Conclusion

Mise en évidence de la nature convective de l'instabilité

Analyse de stabilité
-> comparaison cohérente

Rhéologies "réalistes"

Optimisation du procédé :

- longueur de filière
- propriétés rhéologiques

Perspectives

Sélection du mode instable

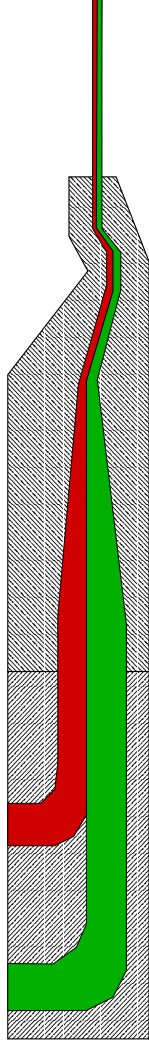
Formes complexes du défauts

chevrons

répartition

Industriel :

géométries complexes



=> n couches

Filière porte-manteau - 180 degrés

Reste des contradictions

-> hypothèse du développement en partie finale discutable

