

Réunion de la

# **COMMISSION THEMATIQUE LAMINAGE**

**22 Novembre 2013, 10h – 13h**

**Au siège de la SF2M, Maison de la Chimie  
28, rue Saint-Dominique – salle 354**

# Ordre du jour

## 1 – Bilan des actions 2013

*GT1 : Modèles*

*GT2 : Criques de laminage*

*GT3 : Surfaces*

*GT4 : Formation*

## 2 – Exposé & discussion

*Elargissement en laminage: facteurs influents, moyens de calcul, techniques de contrôle*

*P. Montmitonnet*

## 3 – Proposition d'actions 2014

*GT1 : Modèles*

*GT2 : Criques de laminage*

*GT3 : Surfaces*

*GT4 : Formation*

## 4 – Questions diverses

# 1 – Bilan des actions 2013

***GT1 : Modèles***

***GT2 : après Criques 2012, quelles suites ?***

***GT4 : Formation***

**GT3 : Surfaces**

Point sur l'organisation de OXIDE 2014, IOM3, Londres

**CALL FOR PAPERS**

for

**European Oxide Scale Conference  
2014 (OXI 2014)**

**12-13 Feb 2014 - London**

**Oxide scale formation, control and  
removal in high temperature metals  
processing**


**12 Février 2014**

**start** **12:30:00**  
**welcoming address**

**session 1 Oxidation mechanisms,  
morphology and control**

**keynote1** 13:00:00  
 paper1 13:30:00  
 paper2 13:55:00  
 paper3 14:20:00  
 paper4 14:45:00  
**session 1 end** **15:10:00**

break/exhibit duration 00:40:00

**session 2 Oxide removal and conditioning**

**keynote2** 15:50:00  
 paper5 16:20:00  
 paper6 16:45:00  
 paper7 17:10:00  
 paper8 17:35:00  
**end for 1st day** **18:00:00**

**13 Février 2014**

**start** **09:30:00**

**session 3 Oxide scale behaviour and modelling**

**keynote3** **09:30:00**  
 paper9 10:00:00  
 paper10 10:25:00  
 paper11 10:50:00  
 paper12 11:15:00  
 end 11:40:00

break/exhibit/Lunch duration 01:20:00

**start** **13:00:00**

**session 4 Oxide scale characterisation**

**keynote4** **13:00:00**  
 paper13 13:30:00  
 paper14 13:55:00  
 paper15 14:20:00  
 paper16 14:45:00  
 roundtable **15:10:00**  
**end** **15:40:00**

**GT3 : Surfaces***Point sur l'organisation de OXIDE 2014, IOM3, Londres***Papiers soumis**

N°	Author 1	Affiliation	Status	Title
1	Le Guevel	LSIE, U. La Rochelle, FR	Academia	Influence of oxide scale features on electrochemical descaling of turbines
2	Olakanmi	U. JoBurg, South Africa	Academia	Oxidation behaviour of laser-assisted cold sprayed Ti coatings
3	Melfo	Tata Steel, Netherlands	Steelmaker	In situ oxide formation on Mn-Si containing steels in the finishing HSM
4	Melfo	Tata Steel, Netherlands	Steelmaker	Decarbirizing furnace atmosphere and oxide formation on electrical steels
5	Orosz	VDEh (BFI), Germany	Res. Organism (steel)	Effect of combustion gases on scaling kinetics and sub-surface degradation
6	Sartor	VDEh (BFI), Germany	Res. Organism (steel)	Prevention of scale formation by anti-diffusion coatings in reheating
7	Zumpicchiati	CEA, FR	Res. Organism (nuclear)	FEM of Zr-based alloys oxidation
8	Gonzalez	U. Barcelona, Spain	Academia	Effect of surface oxidation on corrosion of a bulk metallic glass
9	Espinosa	CRM, Belgium	Res. Organism (steel)	Water-free descaling at high temperature
10	Saleh	TU Freiberg, Germany	Academia	Oxidation behavior of Twin Roll Cast (TRC) AZ31 magnesium alloy
11	Rowe	Cedar Metals	CONSULTANT	Anti-oxidation coatings for refractory metals
12	Przybylla	SGGT Hydraulic GmbH, GE	supplier	Potential of energy savings in descaling
13	Hinton	Siemens UK	supplier	Scale formation during Reheat and descaler practices
14	Chimoto	Kyoritsu Gokin, Japan	supplier	New high performance descaling nozzles
15	Frick	Lechler, Germany	supplier	Enhanced descaling nozzles arrangements with new measurement methods
16	André	SETARAM, FR	supplier	High-T TGA for oxidation & corrosion testing in dry / humid atmospheres
17	Badin	MINES ParisTech CEMEF	Academia	Short term oxidation of 441 / 316L SS at 1100°C under water vapor
18	Montmitonnet	MINES ParisTech CEMEF	Academia	Oxide fracture mechanism in descaling and hot rolling of steel strip

## **2 – Exposé technique**

**Elargissement en laminage:  
facteurs influents,  
moyens de calcul,  
techniques de contrôle**



## Elargissement, forme de rives, forme d'extrémités: quelles lois de comportement ?

La structure métallurgique dicte la loi de comportement qui régit l'écoulement. Dans un procédé à surfaces libres comme le laminage des produits épais, longs ou plats, l'impact sur la géométrie peut être important, or les objectifs largeur et mise au mille en extrémité sont des points majeurs. Les tensions intercages offrent parfois un moyen de contrôle et de régulation, qui suppose une mesure et un modèle pour la correction.

L'anisotropie due aux textures en tous genres est évidemment un déterminant important. Pour les produits longs, les alliages biphasés donnent des élargissements forts et mal contrôlés, liés à l'hétérogénéité de propriétés mécaniques. La température – ou son gradient superficiel - joue un rôle notable aussi pour la même raison.

Nous sommes donc en face de situations complexes. Sommes-nous condamnés à coupler la micro-échelle et celle du procédé pour en tenir compte? Ne pourrait-on pas utiliser les modèles phénoménologiques macroscopiques, plus simples, sans perdre trop de capacités prédictives ?  
A quelles conditions, avec quelles caractérisations mécaniques?

Dans un premier temps, il est proposé de faire un bilan des connaissances industrielles: position du problème et enjeux, observations et mesures, moyens de contrôle, stratégies de modélisation. Cet état des lieux serait à organiser sous forme d'une journée « privée », au sein de la CT, entre participants industriels et intervenants académiques choisis. Il sera alors décidé si, dans un second temps, il faut tenter d'organiser une rencontre plus ouverte dédiée à ce sujet, qui pourrait être sous forme d'un symposium lors d'une conférence scientifique (Esaform semblant tout indiquée).

## L'élargissement est une compétition d'écoulement

### L'écoulement latéral dépend

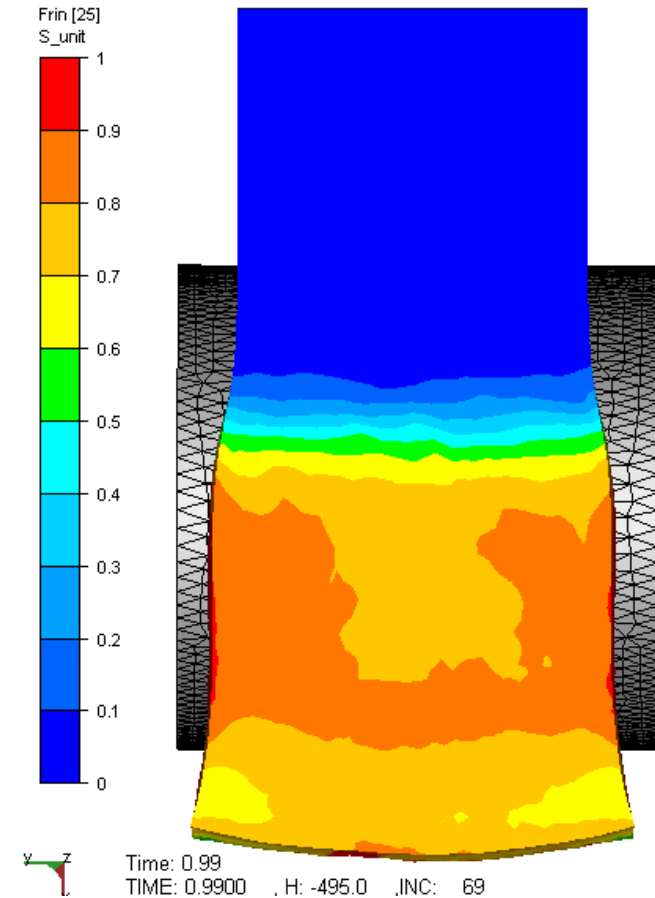
- des rapports dimensionnels ( $W / L_{\text{emprise}} / H$ )
- du frottement
- des propriétés mécaniques (anisotropie plastique)
- des champs thermiques locaux

**Produits plats :**  $W/H$ ,  $W/L$  grands  $\rightarrow$  faible % élargissement

**Produits longs:**  $W/H \approx 1$ ,  $W/L < 1$   $\rightarrow$  fort % élargissement

### Attention aux effets de couplage:

- si  $W/L \gg 1$  (plat), + de frottement  $\rightarrow$  - d'élargissement
- si  $W/L \approx 1$  (long), + de frottement  $\rightarrow$  + d'élargissement



## Effet des facteurs géométriques (produits plats, HSM)

$$Sp = \frac{\text{Ln}(w_1/w_0)}{\text{Ln}(h_0/h_1)}$$

*Proportion of thickness strain lost in lateral strain*

$$L \approx \sqrt{R \cdot h_0 \cdot r}$$

	Expressions with $w_0/L$ , $w_0/h_0$ , $r$	Expressions with $h_0/R$ , $w_0/h_0$ , $r$ (without L)
Siebel (1932)	$-0.35 \cdot \left(\frac{w_0}{L}\right)^{-1} \cdot \frac{r}{\text{Ln}(1-r)}$	$-0.35 \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{h_0}{R}\right)^{-1/2} \cdot \frac{r^{3/2}}{\text{Ln}(1-r)}$
Wusatowski (1955)	$\exp\left(-1.9872 \cdot \left(\frac{w_0}{L}\right)^{1.12} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-0.12} \cdot r^{0.56}\right)$	$\exp\left(-1.9872 \cdot \left(\frac{h_0}{R}\right)^{0.56} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)\right)$
Hill	$\frac{1}{2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{w_0}{L}\right)$	$\frac{1}{2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{w_0}{h_0} \cdot \left(\frac{h_0}{R}\right)^{1/2} \cdot r^{-1/2}\right)$
El Kalay & Sparling (1968)	$0.981 \cdot \exp\left(-1.615 \cdot \left(\frac{w_0}{L}\right)^{1.1} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-0.2} \cdot r^{0.3}\right)$	$0.981 \cdot \exp\left(-1.615 \cdot \left(\frac{h_0}{R}\right)^{0.55} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{0.9} \cdot r^{-0.25}\right)$
Helmi & Alexander (1968)	$0.95 \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-1.1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w_0}{L} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-0.971}\right)$	$0.95 \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{-1.1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{h_0}{R}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{w_0}{h_0}\right)^{0.029} \cdot r^{-1/2}\right)$

<b>Author</b>	<b><math>w_0/h_0</math></b>	<b><math>h_0/R = 0.03</math></b>	<b><math>h_0/R = 0.1</math></b>	<b><math>h_0/R = 0.3</math></b>
<b>Wusatowski</b>	1	0.757	0.578	0.363
<b>Sparling</b>	1	0.691	0.497	0.282
<b>Hill</b>	1	0.436	0.389	0.324
<b>Siebel</b>	1	0.810	0.444	0.256
<b>Alexander</b>	1	0.722	0.576	0.400
<b>Wusatowski</b>	4	0.328	0.112	0.017
<b>Sparling</b>	4	0.289	0.092	0.013
<b>Hill</b>	4	0.0289	0.184	0.088
<b>Siebel</b>	4	0.203	0.111	0.064
<b>Alexander</b>	4	0.156	0.123	0.084
<b>Wusatowski</b>	10	0.061	0.004	0.000
<b>Sparling</b>	10	0.060	0.004	0.000
<b>Hill</b>	10	0.127	0.041	0.007
<b>Siebel</b>	10	0.081	0.044	0.026
<b>Alexander</b>	10	0.056	0.044	0.030

Gare !

Expressions qualitativement correctes (elles contiennent les bons facteurs),  
mais quantitativement fausses – il suffit de voir leurs résultats très différents

## Facteurs de complexité supplémentaires

### 1 - Evolution compliquée près de l'emprise

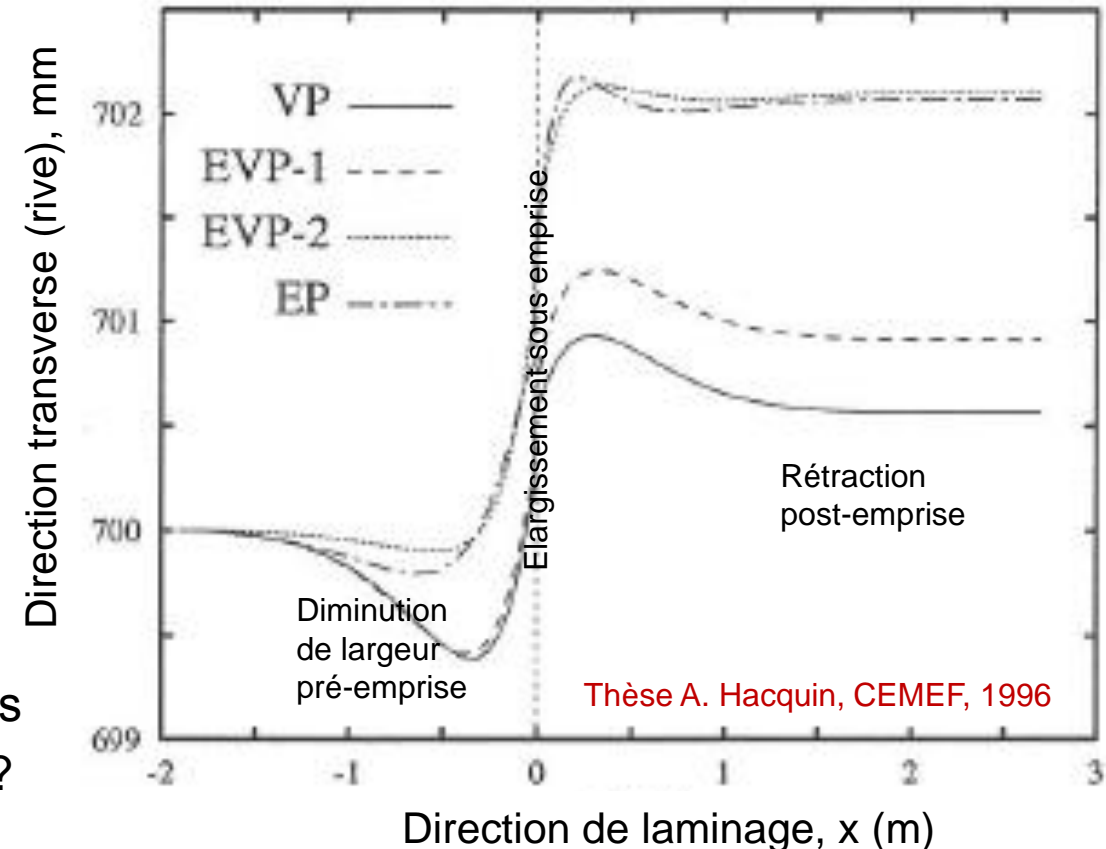
- Géométrie  $\approx$  dernière cage HSM  
 $W_0 = 1400$  mm,  $h_f = 3$  mm,  $\Phi$  600 mm
- Comportements  
 EVP-1 = EVP sans seuil  
 EVP-2 = EVP avec seuil faible
- Pas de tensions de bande

### 2 – l'écoulement latéral est très local en produits plats: interaction avec la thermique en rive ?

### 3 – Influence complexe de la déformation des cylindres: flexion globale, aplatissement près de la rive

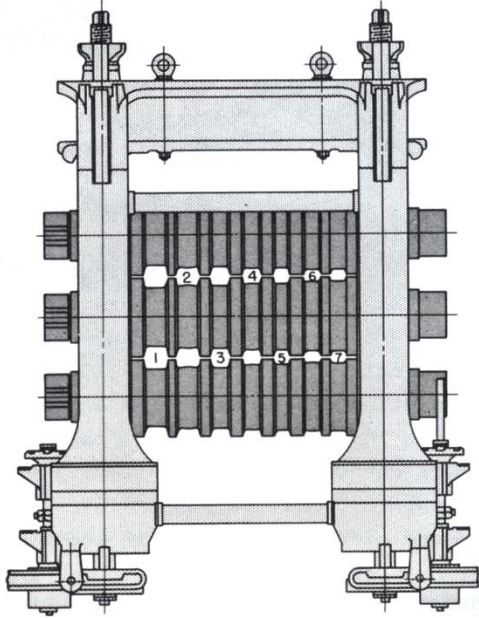
### 4 - À chaud : fluage intercage (avec ou sans tensions) $\rightarrow$ rétrécissement

### Forme de rive, vue agrandie de la sortie d'emprise



## Comment le contrôler ?

- produits longs : par des cannelures



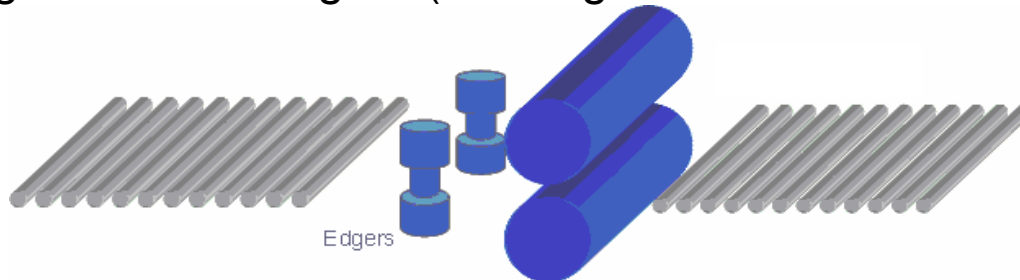
- produits longs : tension intercage (traction amont)

\* effet de mise en traction:  
écoulement longitudinal plus facile → moins d'élargissement

\* effet de fluage (à chaud)

- produits plats (acier)

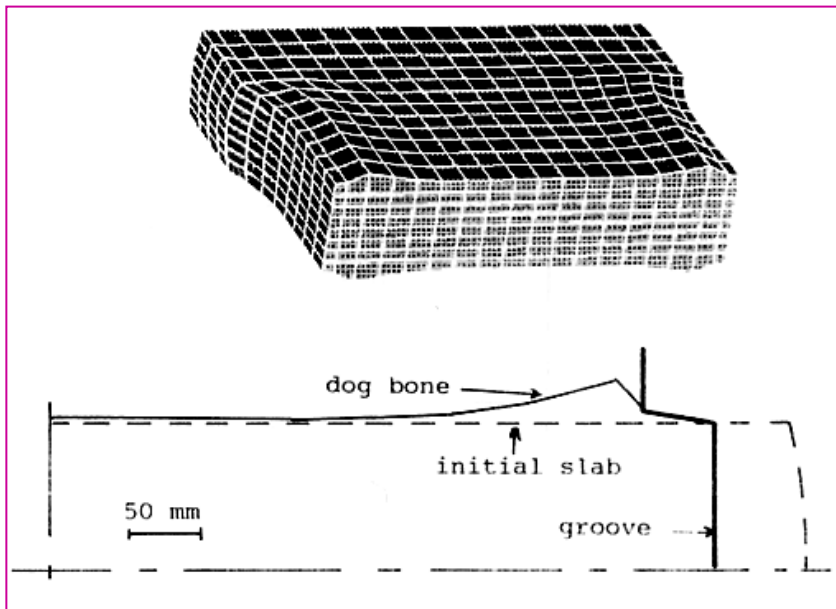
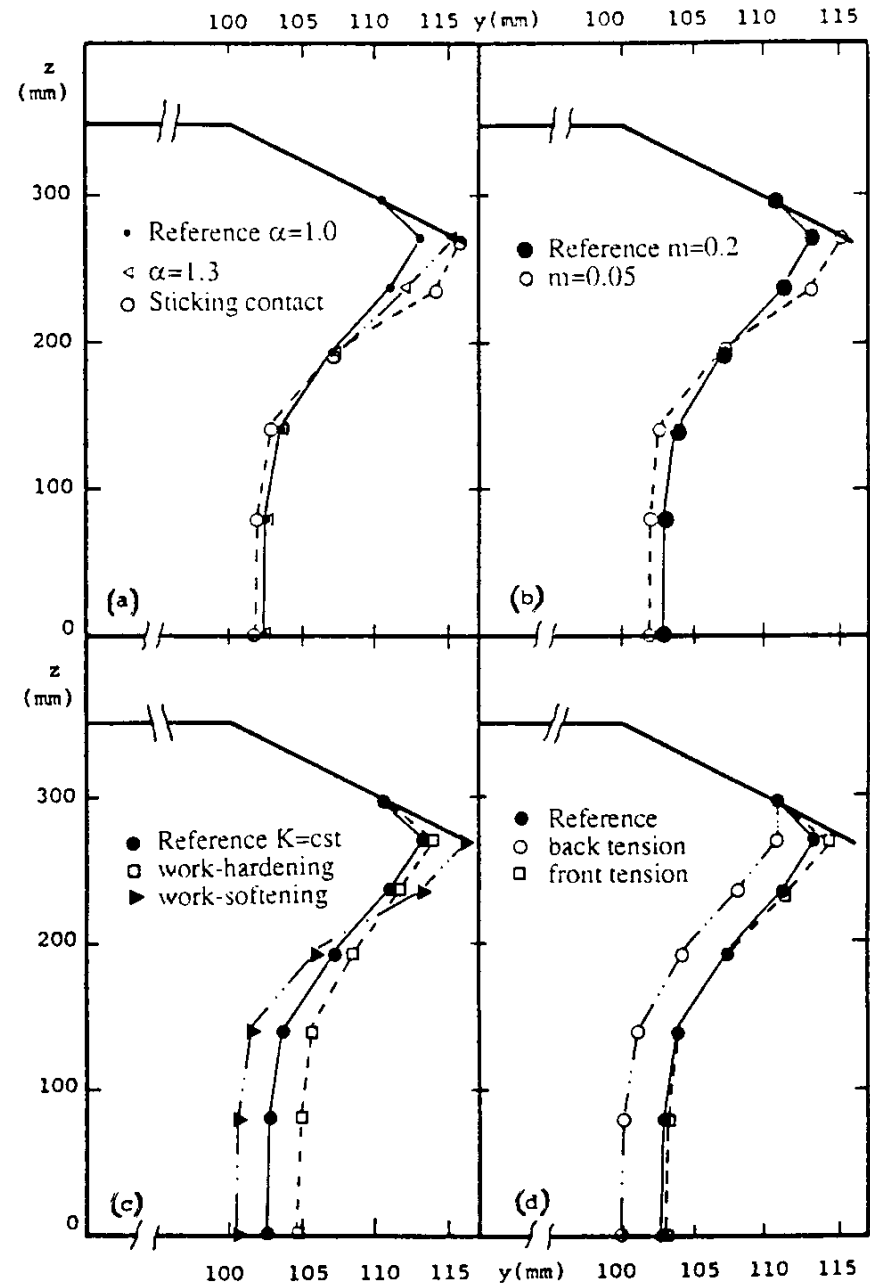
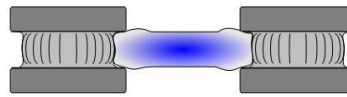
\* HSM, dégrossisseur: edgers (laminage en réduction de largeur)

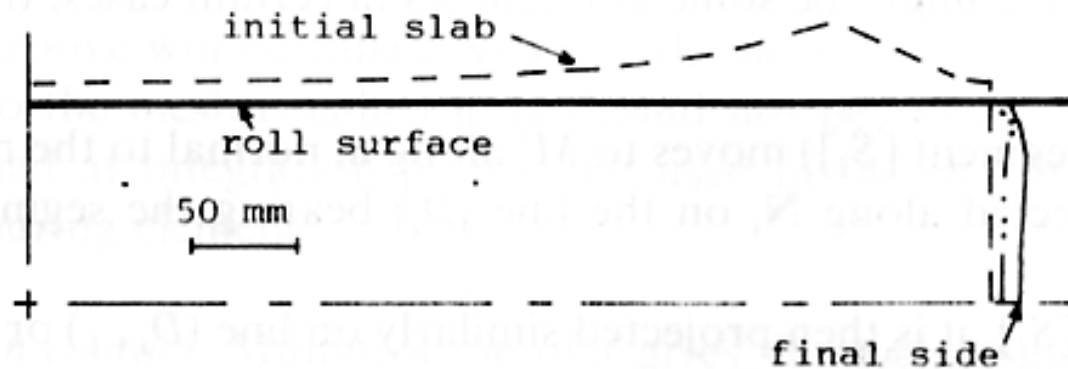
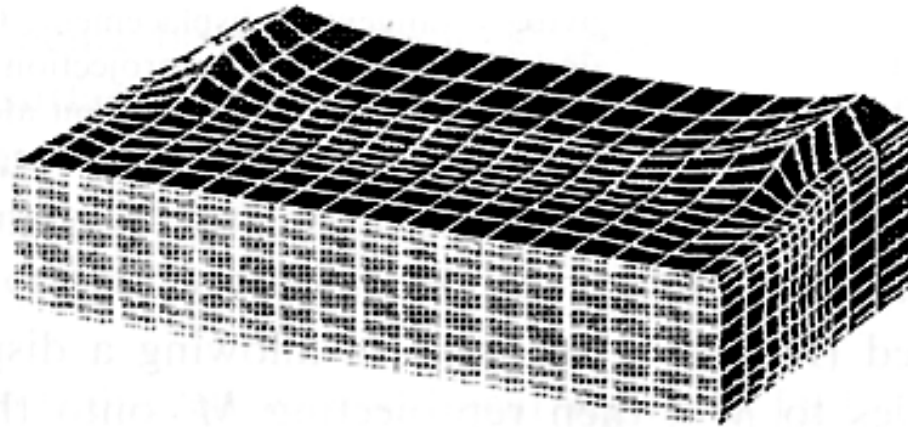
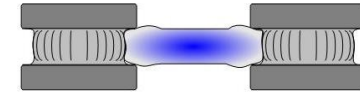


\* HSM, finisseur : rien (faible épaisseur , effet des tensions... → faible élargissement)

## Exemple de la complexité: séquence de réductions de largeur / d'épaisseur

- Elargissement = épaulement !
- $W / H$  grand  $\rightarrow$  déformation localisée près du contact
- Localisation sensible
  - (i) à la géométrie,
  - (ii) à la loi de comportement,
  - (iii) aux tensions





Conséquence:

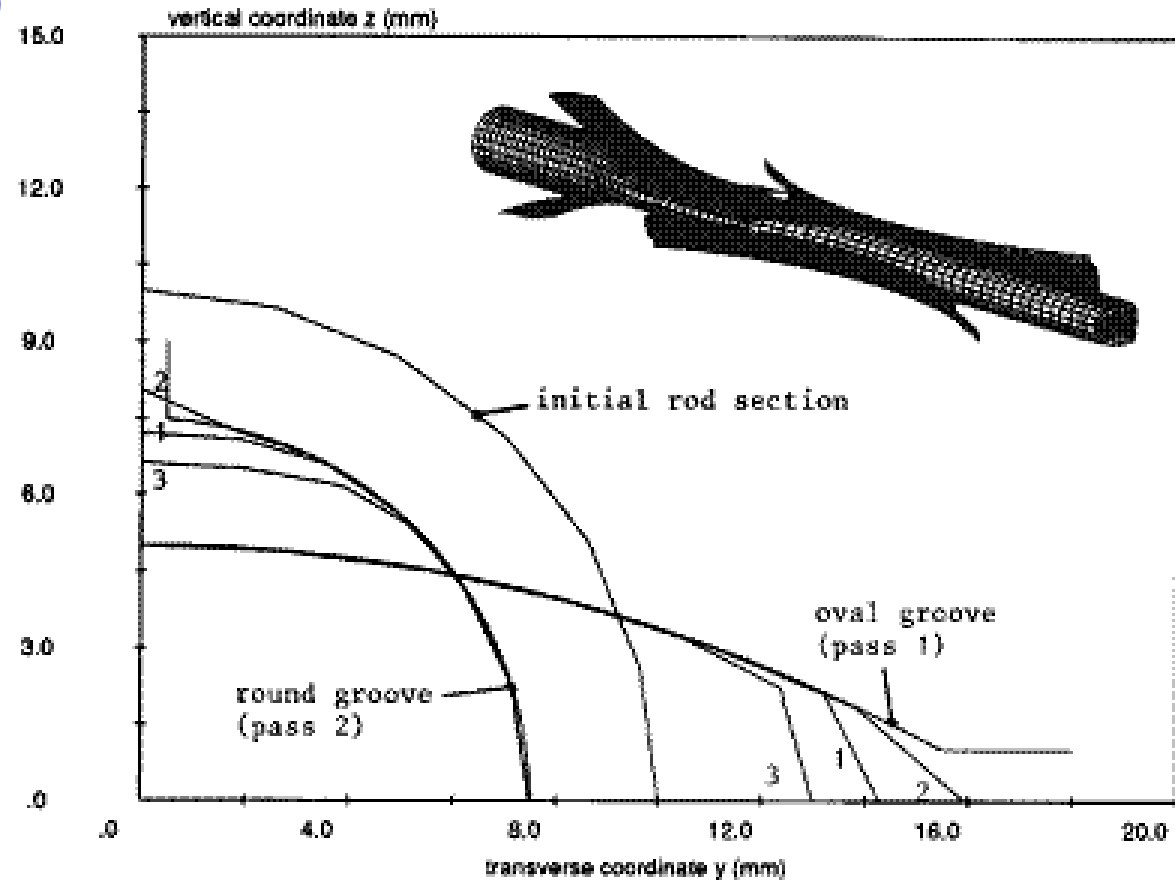
un excès de matière est présent près de la rive à la passe horizontale suivante :

réduction réelle locale accrue  $\rightarrow$  + d'élargissement, ce qui réduit l'efficacité de la réduction de largeur



## L'anisotropie (premier exemple théorique)

- l'écoulement dans la direction « molle » est toujours privilégié (énergie dissipée minimale)
- effet majeur pour les produits longs (compétition d'écoulement plus sévère)
- risque accru de sur- ou sous-remplissage



Modèle de Hill [48]  
viscoplastique

	Material 1 (isotropic)	Material 2 (Y=soft; X = hard)	Material 3 (X=soft; Y = hard)
$\sigma_{0XX}$	$200 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$220 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$180 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$
$\sigma_{0YY}$	$200 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$180 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$220 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$
$\sigma_{0ZZ}$	$200 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$200 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$	$200 \cdot \dot{\varepsilon}^{0.15}$

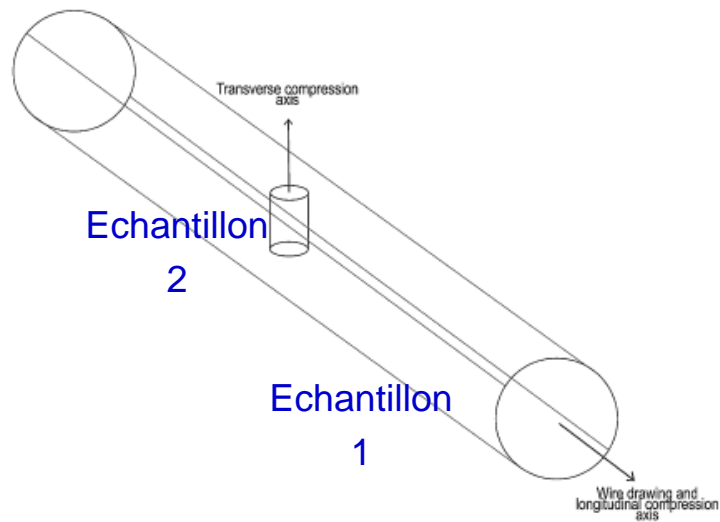
## L'anisotropie

Deuxième étude plus complète – Thèse T. Massé, CEMEF, 2010

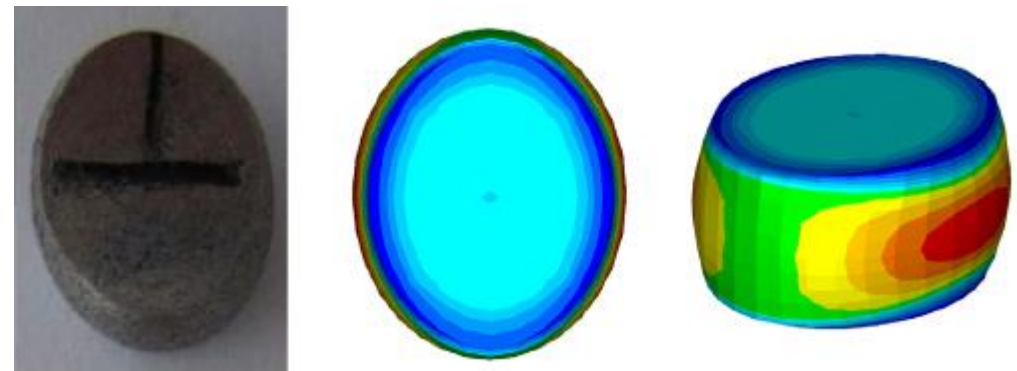
Gamme = patentage - tréfilage + laminage à froid

## Loi de comportement

1) prélèvement dans deux directions  
sur du fil (gros)

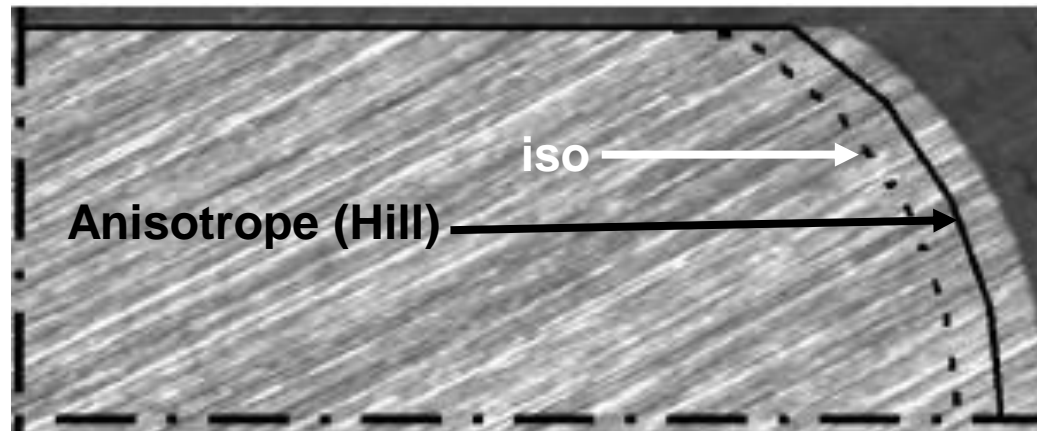


2) Compression de l'échantillon 2  
→ coefficients de Hill  $F(\bar{\epsilon})$  etc...



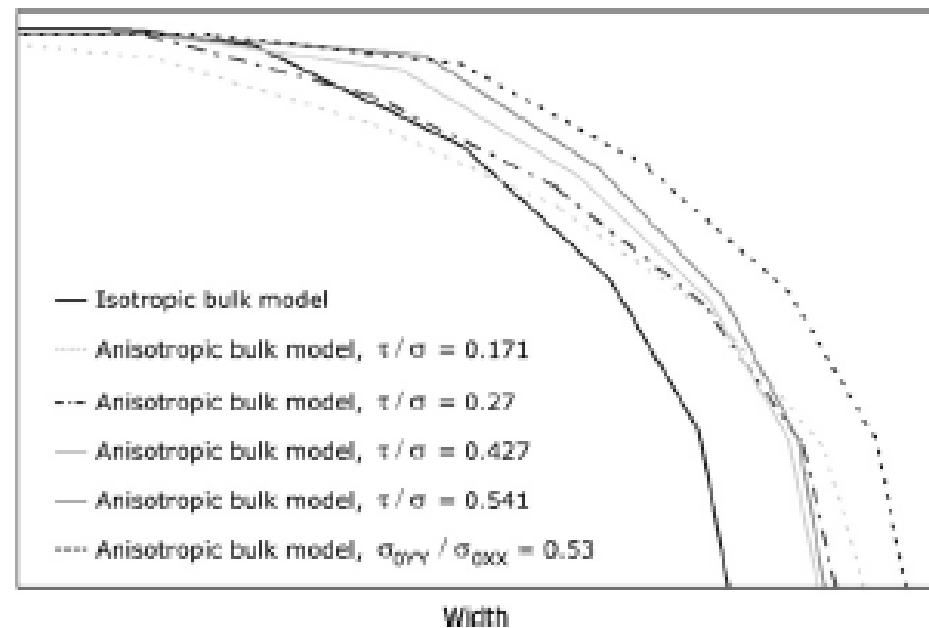
3) Recalcul pour vérification

Résultat: partiellement satisfaisant



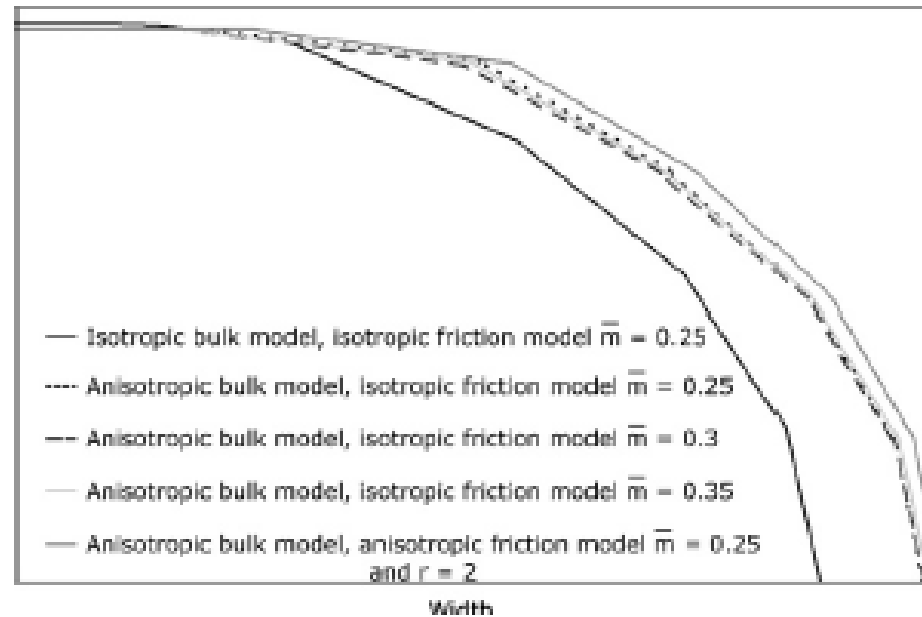
T. MASSÉ, Y. CHASTEL, L. FOURMENT,  
P. MONTMITONNET, C. BOBADILLA, N.  
PERSEM, S. FOISSEY: Impact of  
mechanical anisotropy on flat-rolled wires  
geometry. J. Mat. Proc. Tech. 211, 1  
(2011) 103-112

Etude de sensibilité aux coefficients de Hill



Effet de (L,M,N) surtout sur la forme (bombé) de la rive, de (F,G,H) sur l'élargissement moyen 19/42

## Etude de sensibilité au frottement, isotrope ou anisotrope



Sensibilité faible: on reste sans outil validé

## Causes

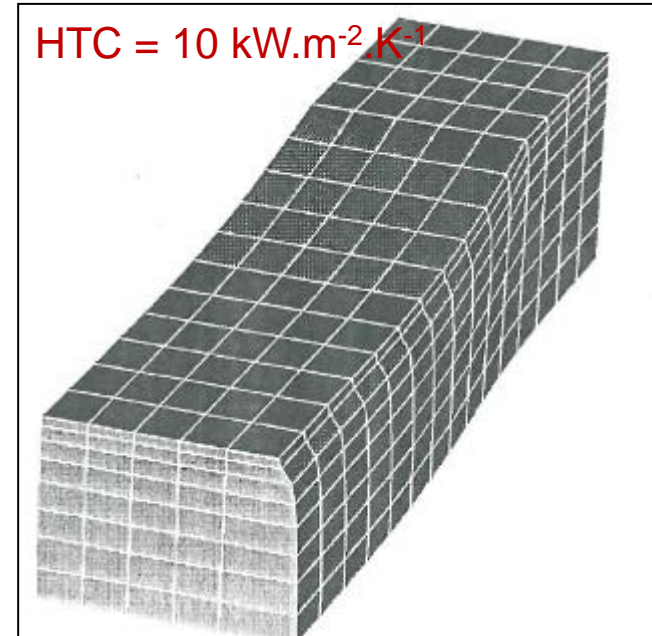
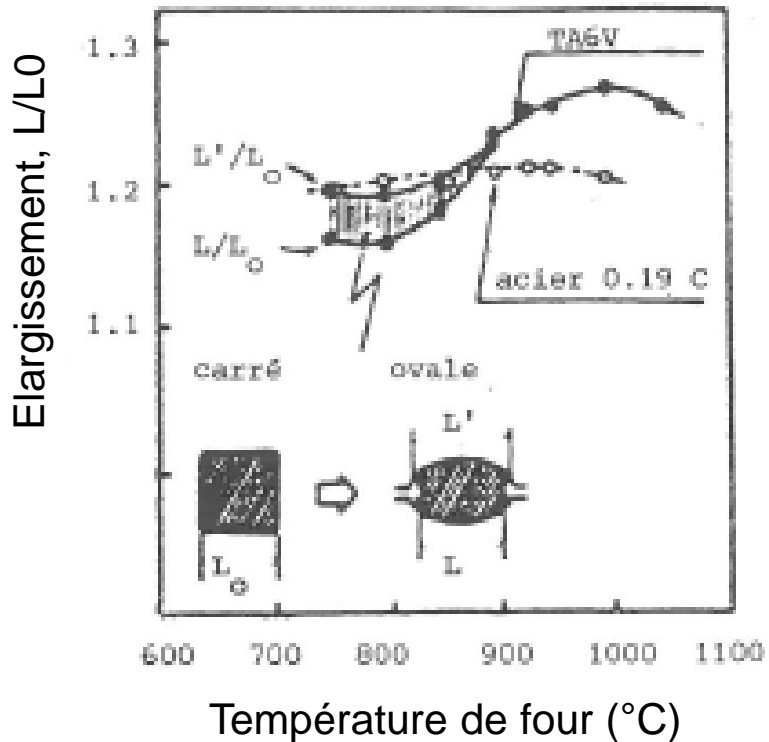
- Insuffisance de la loi de Hill: incapacité à bien représenter simultanément  $\sigma(\theta)$  et  $R(\theta)$
- Méconnaissance des tractions intercage

## Voies de progrès

- Lois de comportement anisotrope plus sophistiquées (versions 3D de Barlat et al. ?)
- Modèles micromécaniques (modèles polycristallins...)
- ???

## Pour terminer sur encore plus compliqué !

Laminage de barre en alliage Ti (CEMEF / CEZUS, 1992)



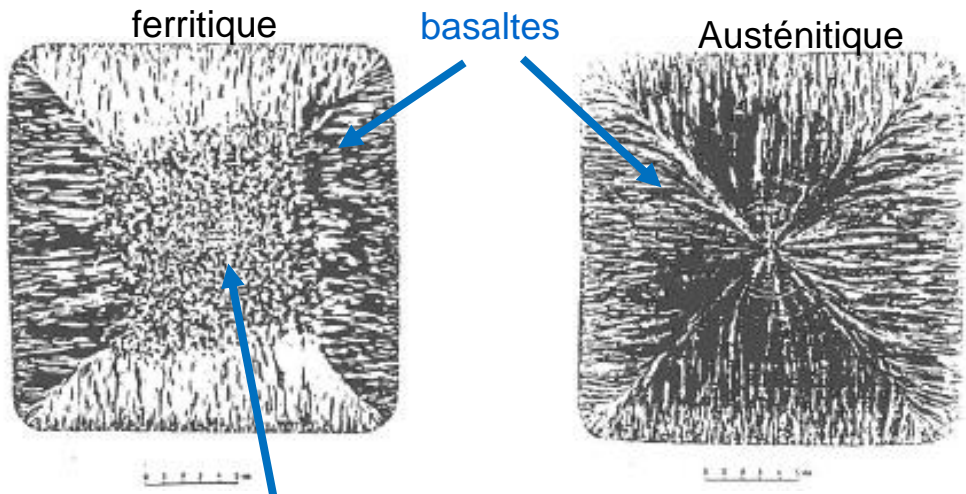
### Elargissement maximal au transus

Alliage biphasé → effet de texture topologique  
la phase dure se déforme moins que la phase molle  
et freine l'élongation → l'élargissement augmente

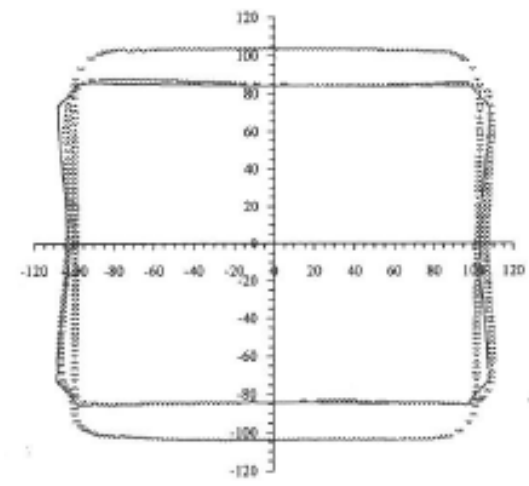
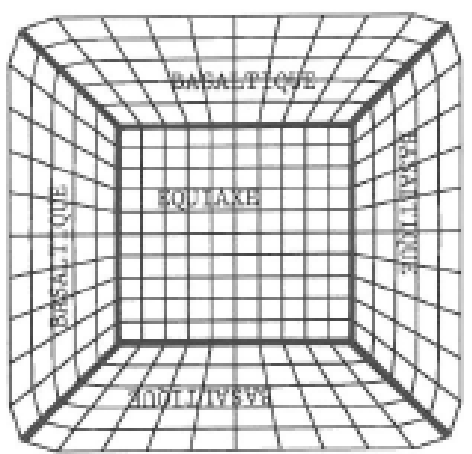
### Forme de rive

Si fort HTC, la peau se « fige », surtout si  $d\sigma/dt$  grand:  
→ Élongation freinée, élargissement accru  
→ La déformation est reportée sous la peau → diabololo

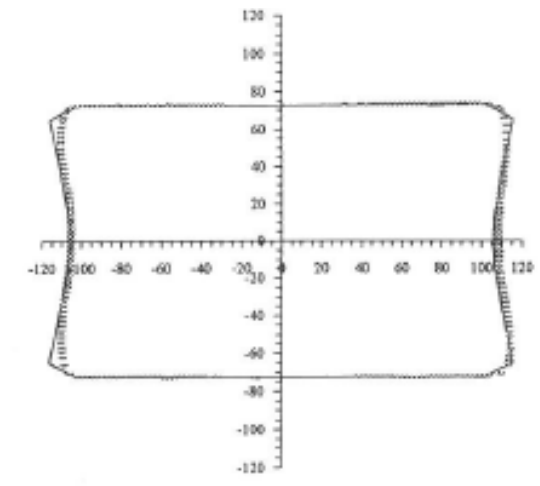
Laminage de barre inox (CEMEF / Ugine Savoie, 1992-1994)



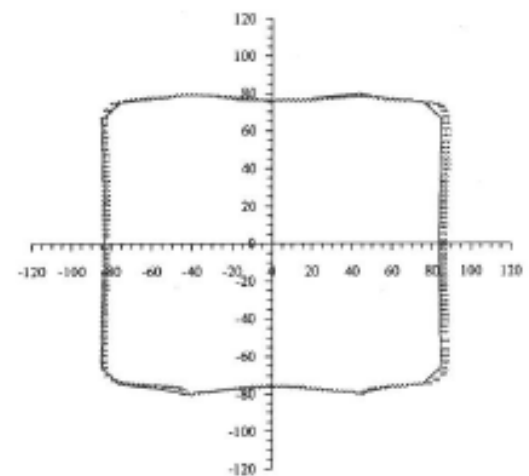
Équiaxe (brassage EM)



section initiale et première passe



deuxième passe



troisième passe

		dimensions en sortie	
		h=208	l=202
initial		Forge3 anisot.	rôel
	h=169	lmax = 215.8 lmin = 206.6	lmax = 217 lmin = 211.7
passé 1	h=146	lmax = 231.6 lmin = 211.6	lmax = 226.5 lmin = 216.5
passé 2	l=170	hmax = 159.8 hmin = 151.2	hmax = 160.2 hmin = 153.4

Combinaison d'une texture topologique et d'une texture cristallographique hétérogène

- Essais de compression: sens long des grains basaltiques = « direction molle »
- La prise en compte de l'anisotropie (5 zones) et de la topologie permet seule un bon accord sur l'élargissement

## **3 – Proposition d'actions 2014**



## Vie scientifique de la CT laminage

Pour générer une activité soutenue sans tomber dans la lourdeur d'organisation, nous proposons de soumettre chaque année un symposium aux Journées Annuelles de la SF2M, ou, éventuellement, d'autres conférences où nous serions bien introduits.

Les thèmes seraient connexes au laminage et pas forcément sur le laminoir lui-même:

- fours et traitements thermiques,
- mesures en ligne, observations en ligne, contrôle des procédés,
- quelle modélisation des matériaux pour les procédés?,
- tribologie dans les procédés de fabrication à chaud,
- etc...

De tels sujets permettent d'ouvrir à d'autres procédés ou systèmes, et de faire lien avec d'autres CT / d'autres Sociétés.

NB: pas de JA en 2014 du fait de Matériaux 2014, émanation de la FFM (Fédération Française des Matériaux, association des Sociétés matériaux françaises).

## GT1 : Modèles

### *Proposition de thèmes (symposiums JA ou journée à thème de réflexion)*

- *Interactions entre mesure en ligne et modèles*
- *Modélisation TRES multiéchelle, du « factory modelling » au « process modelling » et au « material modelling »: quel flux d'information entre les échelles ?* *Thème de réflexion suggéré par D. Farrugia lors des journées annuelles 2011, table ronde du symposium 1: **Didier peut-il compléter et suggérer un mode d'action, des intervenants...?***

## GT2 : Criques de laminage

*Quelle suite donner à la journée « criques à chaud », 31 Octobre 2012 à Paris ?*

Les exposés ont montré des types de fissuration à chaud différents, nettement alliage-dépendants. Dans certains cas, l'origine dans l'endommagement ductile peut être remise en cause:

- fissuration intergranulaire suite à ségrégations,
- fissuration aux interphases (alliages biphasés)

Pour mémoire, similitude avec des comportements analogues à froid, hors laminage:

- contraintes résiduelles et casses différées
- « cut edge cracking » à froid des AHSS (endommagement en découpe puis rupture aux interphases en emboutissage)
- traitements thermochimiques (cémentation, nitruration, carbonitruration et nitrocarburation...)

Quelle modélisation coupler au calcul de procédé dans ces cas où la rupture ductile n'est pas pertinente et où la composante microstructurale semble très forte ?

- Modèles phénoménologiques?
- Calculs multiéchelle?
- Méthode hybride?

(thème couplant GT2 et GT3, ouvrant vers MECAMAT par exemple)

## GT3 : Surfaces

*L'action prévue est OXIDE 2014, 12-13 Février (voir plus haut)*

*Autres sujets évoqués: propreté de surface, cylindres & dégradation de surface*

*- métrologie thermique in situ*

Les mesures de température, de flux thermique, de coefficient de transfert restent une difficulté forte dans les procédés et en laminage en particulier. On peut distinguer:

- des mesures à une faible distance sous la surface, avec un ou plusieurs thermocouples (flux-mètre), accompagnées de modèles inverses plus ou moins sophistiqués
- l'utilisation de thermocouples intrinsèques (le contact lui-même participe au circuit) dont on espère obtenir LA température de surface
- pyrométrie, thermographie, caméra IR...

Chacune des techniques rencontre des difficultés spécifiques (vapeurs environnant les machines pour les mesures IR, perturbation du flux de chaleur par les thermocouples eux-mêmes...).

On ressent le besoin de réunir des spécialistes de ces techniques de mesure et de les faire s'exprimer sur le contexte spécifique des laminoirs. **Il est décidé que P. Montmitonnet reprend contact avec la SFT**, via les groupes :

Métrologie et Techniques Inverses (Responsables : Yvon JARNY, Denis MAILLET)

Thermographie (Responsables Daniel BALAGEAS, Hervé PRON, Jean-Christophe BATSALE)

et des contacts personnels comme B. Bourouga ou N. Laraqi (*Thème « transferts interfaciaux »*).

## GT4 : Formation

### Quelques éléments d'une rapide discussion sur les besoins

Du côté de la formation initiale, des notions de base sur le laminage et autres procédés sont données dans un certain nombre d'Ecoles de moins en moins. Une limite supplémentaire est le caractère désincarné de ces cours, partiellement corrigé par des visites d'usines.

**Etablir le contact avec le Comité National pour la Métallurgie, depuis peu CT de la SF2M.**

Du côté de l'industrie, les besoins majeurs de formation se limitent à quelques dizaines d'embauches par an, en comptant les thèses, Cifre ou autres, lancées en lien direct entre industrie et monde académique. Cela pourrait représenter l'auditoire d'un cours annuel sur les matériaux et les procédés du laminage. De telles formations ont existé dans les grands groupes industriels et y sont encore pratiquées, par exemple chez ArcelorMittal et Constellium.

**Voir si et dans quelles conditions elles pourraient être ouvertes à d'autres entreprises, voire à des doctorants.**

Une alternative est l'organisation, par des experts académiques et industriels (insistons sur ce couplage), d'une formation annuelle sur le laminage. Sur un plan pratique, organisationnel, rappelons que la SF2M a un accord avec le CACEMI.

On rappellera aussi l'intérêt de sites d'e-learning tels que Steeluniversity.org, à titre d'exercices d'application pratique des notions enseignées.

## Evolution de la composition de la CT Laminage

### Membres industriels :

Alexis GAILLAC	(AREVA Cezus)
Christophe BOURGIN	(Ugitech CRU)
Patrick DENEUVILLE	(Constellium CRV)
Olivier LURDOS	(Eramet Aubert & Duval)
(Stéphane GOUTTEBROZE (suppléant Michel ABIKARAM)	(Siemens VAI Metals Technologies SAS)
Nicolas LEGRAND	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Catherine VERGNE	(Åkers)
Didier LAWRJANIEC	(Ascometal CREAS)
Didier FARRUGIA	(TataSteel)

### Membres Académiques :

Laurent BARRALLIER	(Mecasurf - ENSAM Aix)
Christophe DESRAYAUD	(SMS - Mines St-Etienne)
André DUBOIS	(TEMPO – Univ. Valenciennes)
Alain EHRLACHER	(Navier - ENPC)
Pierre MONTMITONNET	(CEMEF - MINES ParisTech)
Jean-Philippe PONTHOT	(LTAS – Université de Liège)
Michel POTIER-FERRY	(LEM3 - Université de Metz)
Farhad REZAI-ARIA	(ICA - Mines d'Albi)
Hamid ZAHROUNI	(LEM3 - Université de Metz)

### Remarque

1. Il faut penser à proposer un VP « industrie »
2. Un certain nombre de membres sont peu présents aux réunions. Merci à eux de signaler s'ils souhaitent maintenir leur participation.