

2A - Concevoir - Analyse Impact Procédés Matériaux

Développement d'un produit embouti

Approche couplé Matériau - PRCD (2h40)



J. Artozoul – E. Pessard



Arts Sciences et
et Technologies
Métiers

Equipe Déformation Plastique – Campus d'Angers



Julien Artozoul

Professeur agrégé de Génie Mécanique
Procédés

Julien.artozoul@ensam.eu



Etienne Pessard

Maitre de Conférence
Fatigue – Procédés

Etienne.pessard@ensam.eu



Enseignement - Recherche - Valorisation

Promesse Arts et Métiers

Arts et Métiers forme des leaders des industries responsables, **acteurs de terrain** qui créent et mettent en œuvre les innovations **technologiques** et organisationnelles impactantes, indispensables aux transitions énergétique, sociétale et environnementale



Objectif de la séquence :

Appliquer ses connaissances scientifiques à des problèmes concrets autour des procédés et des matériaux

Quantifier, modéliser, estimer

Sens du concret

Séquence GIM2 - Concevoir

A l'issue de l'UE, l'étudiant sera capable de :

- Concevoir, modéliser et optimiser un produit ou un système mécanique en intégrant ses fonctions techniques, ses contraintes géométriques, ses interactions physiques avec l'environnement et ses impacts environnementaux (méthodes d'optimisation, outils numériques de simulation, démarche d'analyse de cycle de vie ...)

Analyse Cycle de Vie
(16h)

ACV

5h20 ED

ACV_DePI

1h20 ED

4h TPf *

ACV_Rectif

1h20 ED

4h00 TPf *

Coefficient 1

Conception et
Génération Surfaces
Complexes

Partie Conception

4h00 ED *

Partie Génération

5h20 ED

4h00 TPf *

4h00 TPf *

Coefficient 1

Séquence
Simulation
Numérique des PRCD

1h20 ED

2h40 ED

12h00 TPf *

(Forge ou
Fonderie)

Coefficient 1

Impact Procédés
matériau

Axe Fonderie

4h00 ED

8h00 TPf *

Axe DePI

2h40 ED

4h00 TPf *

Coefficient 1

* Evaluations

Séquence GIM2 - Concevoir

A l'issue de l'UE, l'étudiant sera capable de :

- Concevoir, modéliser et optimiser un produit ou un système mécanique en intégrant ses fonctions techniques, ses contraintes géométriques, ses interactions physiques avec l'environnement et ses impacts environnementaux (méthodes d'optimisation, outils numériques de simulation, démarche d'analyse de cycle de vie ...)

Poids	Module	type	coeff	Remarque
1	Analyse Cycle de Vie	Test	1	
	Analyse Cycle de Vie	Note TP	0,5	Regroupe les 2 TPs
1	Génération de surfaces	Test	1	Effectué pendant dernier ED CAO
	Génération de surfaces	Livable	0,6	Evaluation travail TPs Modulation suite déroulement TPf
1	Interaction Procédé Matériau	Note TP	0,5	Regroupe 3 TPf (μ -test en début de séance + déroulement TP)
	Interaction Procédé Matériau	Test	1	
1	Simu Procédés	Test	1	Effectué pendant dernier TPs SIMU
	Simu Procédés	Livable	1	Rapport de projet + mise en données
	Simu Procédés	Note TP	1	Evaluation individuelle pendant le projet

Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

Rupture

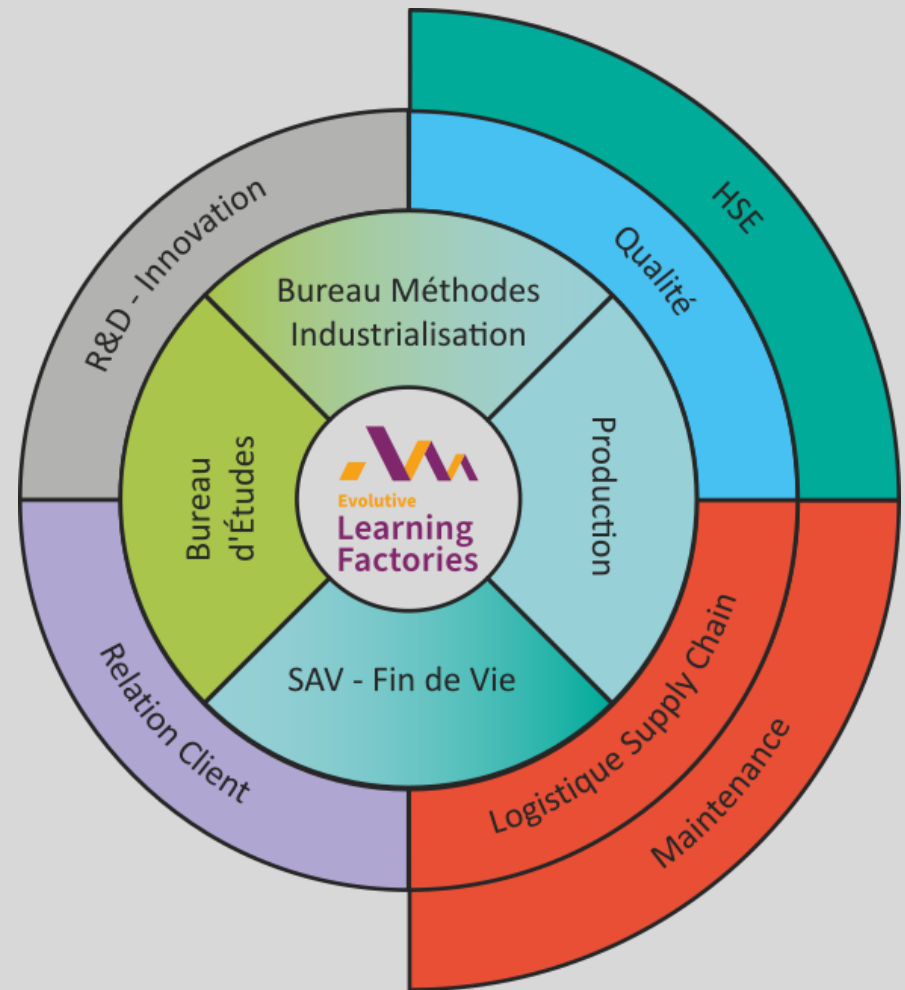
5

Ouverture



Développement d'un produit embouti

- Services de l'industrie

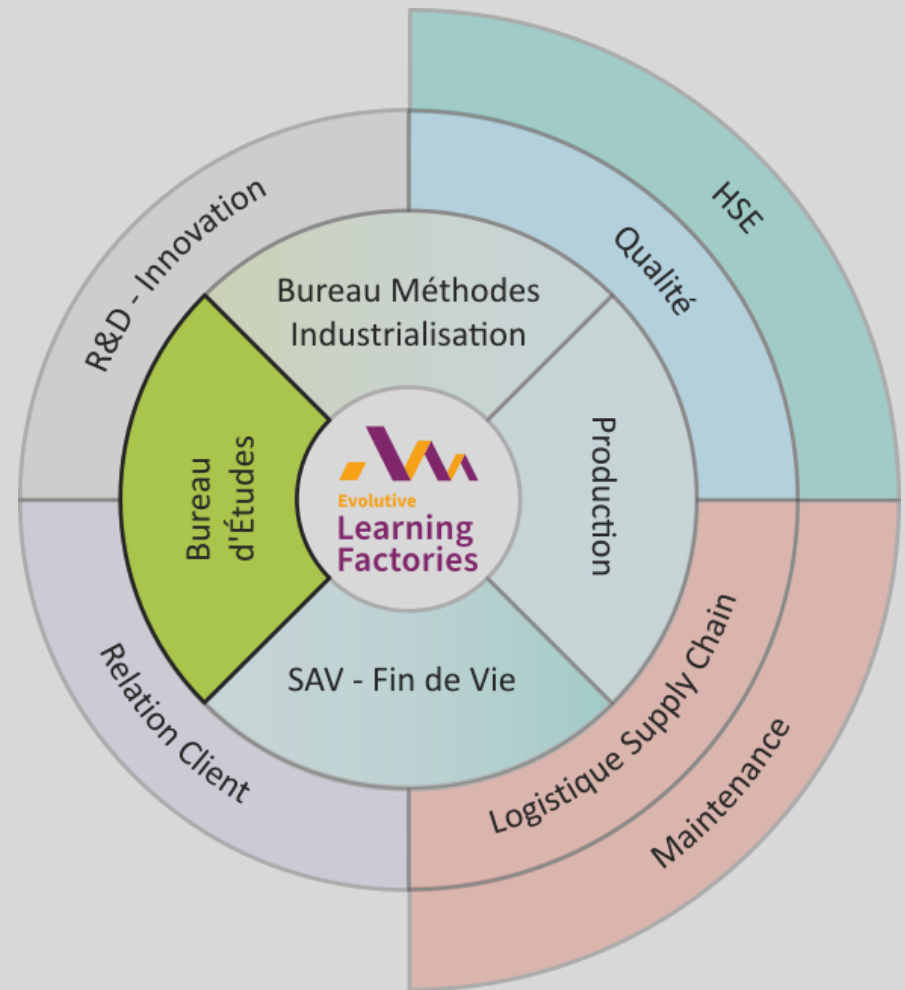


Développement d'un produit embouti

- Services de l'industrie

Relation Client-Fournisseur
Externe ou Interne

Cahier de charge



Développement d'un produit embouti

■ Cahier de charge technique

- Systèmes de mise en position (surface de référence) et encombrement

Dessin de définition

- Sollicitations mécaniques

Différents cas de chargement

- Durée de vie / Tenue en fatigue

- Réponse dynamique

Fréquences propres minimales

- Résistance à l'environnement

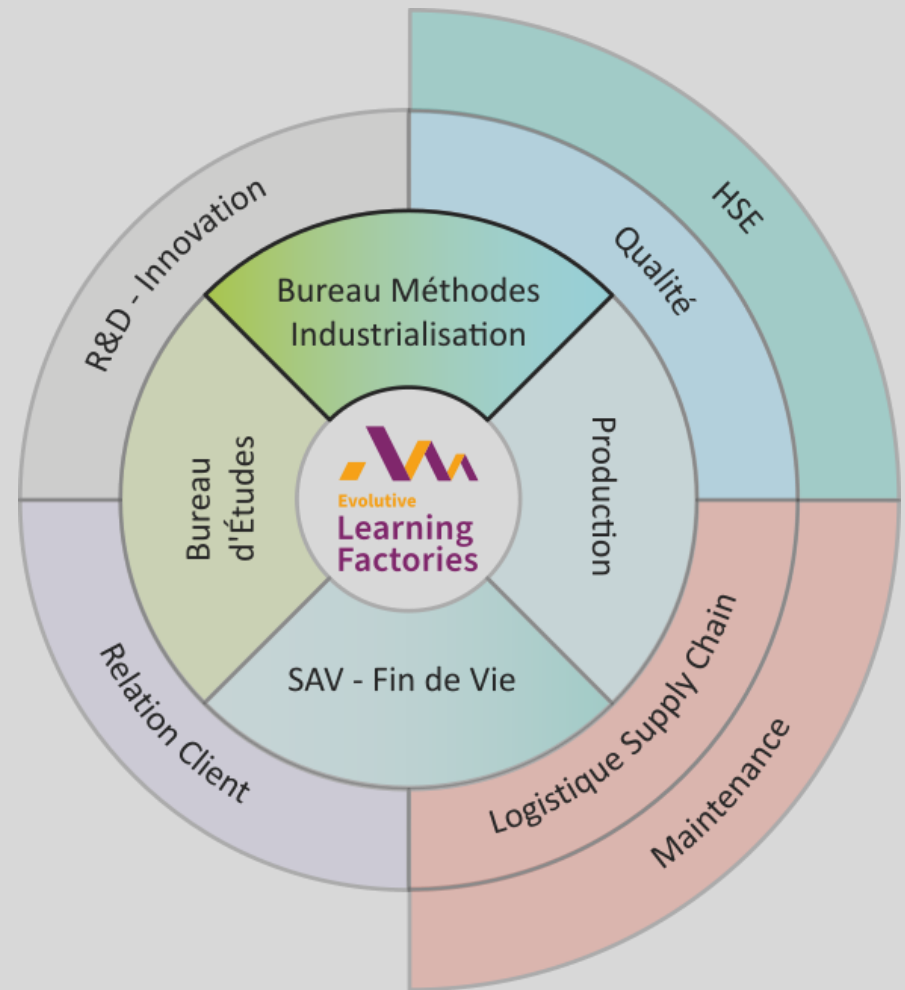
Corrosion



Développement d'un produit embouti

- Services de l'industrie

Définition Processus
de fabrication



Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

Rupture

5

Ouverture

Loi de comportement

(*EN – Constitutive Equation*)

- Une loi de comportement est une fonction mathématique qui définit la relation entre des grandeurs physique d'un matériau soumis à un stimuli dans un domaine de fonctionnement.
- On retrouve par exemple contrainte (σ) d'un matériaux en fonction de classiquement sa déformation (ε) mais aussi sa température (T), sa vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$), ...

ex. : Loi de Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (peu utile en emboutissage)

Loi de Hollomon $\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n$

Loi de comportement

(EN – Constitutive Equation)

- Un loi de comportement permet de décrire le comportement d'un matériau dans un domaine donné.

- Loi élastique (ε_e)
- Loi plastique (ε_p)
- Loi thermo-plastique (ε_p, T)
- Loi visco-plastique $(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon})$
- Loi Elasto-thermo-visco-plastique $(\varepsilon_e, T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon_p)$

Attention au domaine d'application de la loi.

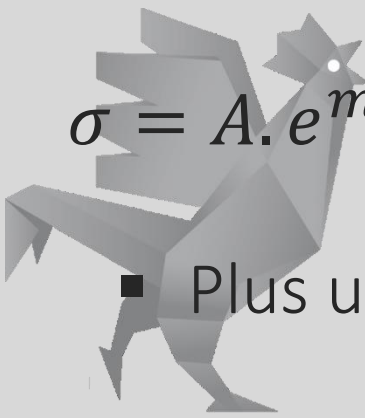
Cas d'essai d'identification

(EN – Identification)

- Pour identifier ces lois de comportement il faut réaliser des essais mécaniques et approximer les points mesurés par une fonction mathématique pour extraire les coefficients de la loi.

Cas loi complexe :

Loi de Hansel et Spittel


$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot \varepsilon^{\frac{m_4}{T}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 \cdot T} \cdot e^{m_7 \cdot \varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8 \cdot T} \cdot T^{m_9}$$

- Plus une loi est complexe, plus il faut d'essais.

Loi de comportement

(*EN – Constitutive Equation*)

Quelle loi retient-on en mise en forme?

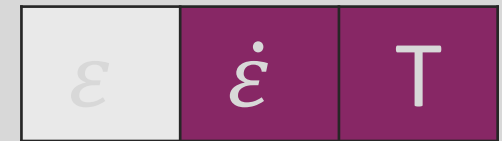


- Cas du Forgeage

Matériau métallique à chaud

Loi Hansel et Spittel simplifiée

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

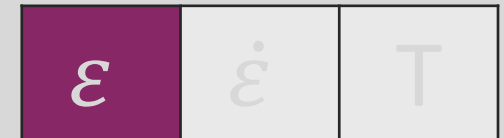


- Cas de l'emboutissage

Matériau métallique à froid

Loi de Hollomon

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n$$



Cas de l'essai de traction

(*EN – Tensile test*)

Que mesure-t-on?

Avant l'essai

Longueur initial L_0

Largeur initiale l_0

épaisseur initiale e_0

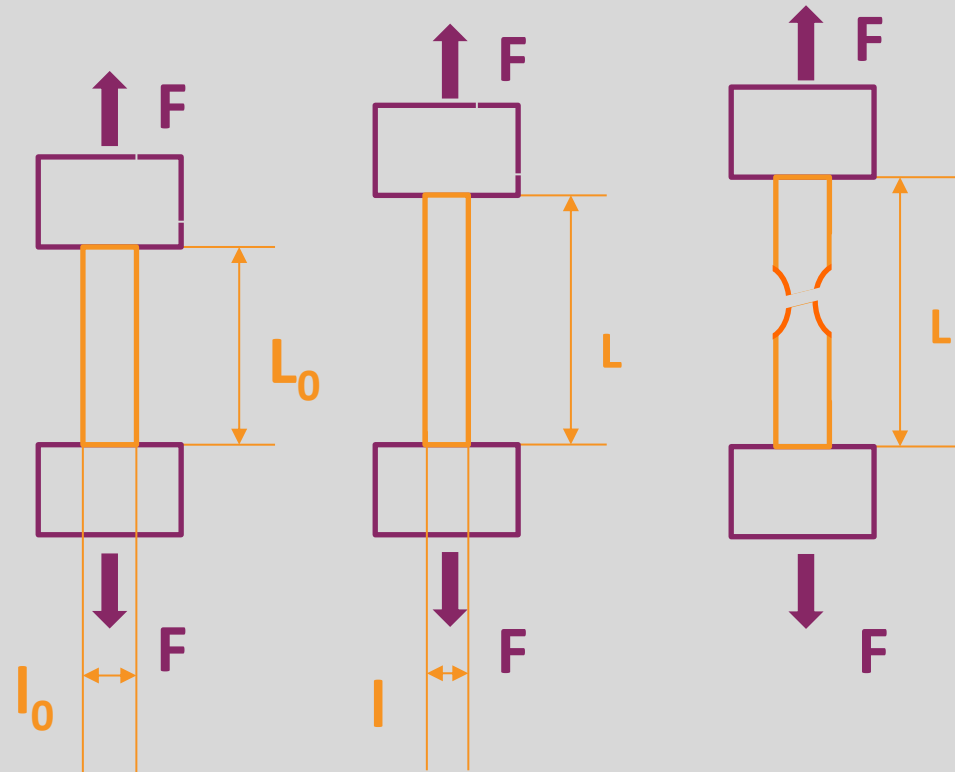
En temps réel $f(t)$

Effort (F [N])

Allongement

longitudinal L [mm]

(transversal l [mm])



Cas de l'essai de traction

(EN – Tensile test)

Comment les mesure-t-on?

Capteur d'effort

Jauge de déformation sur corps d'épreuve connus

*(corps dont on connaît parfaitement
la rigidité $\text{effort} = \text{fonction}(\text{déplacement})$)*



Capteur piézo-électrique
*(délivre une charge sous l'effet
d'un effort)*



Cas de l'essai de traction

(EN – Tensile test)

Comment les mesure-t-on?

Capteur de position

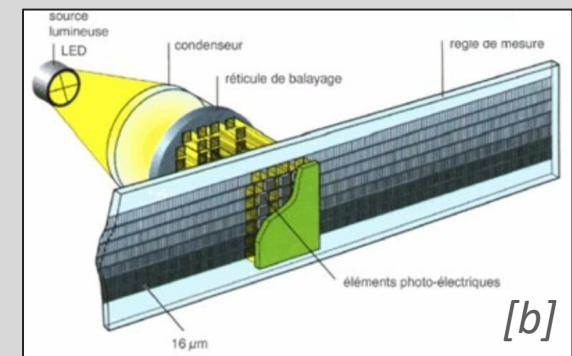
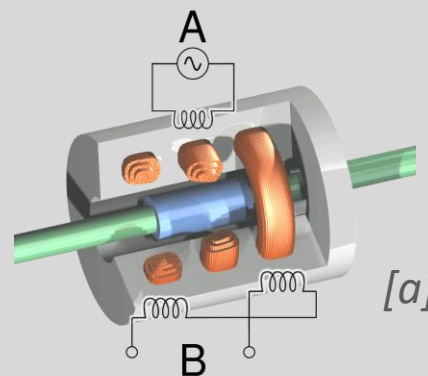
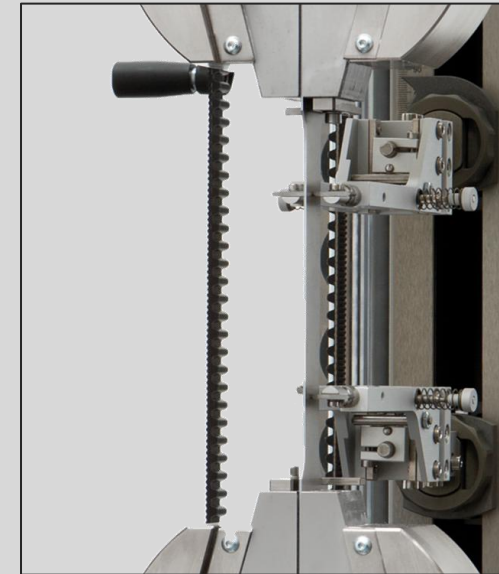
Jauge de déformation

directement sur l'éprouvette ou sur un capteur externe extensomètre (L) et/ou retractometre (I)

Capteur inductif (LVDT) [a]

Règle optique [b]

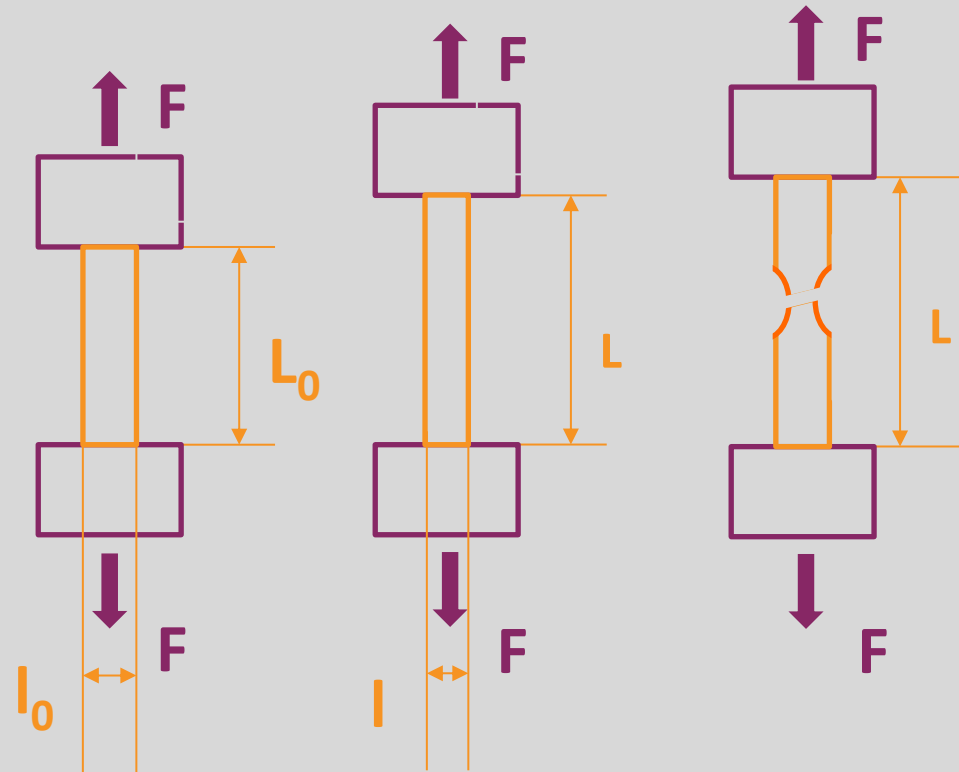
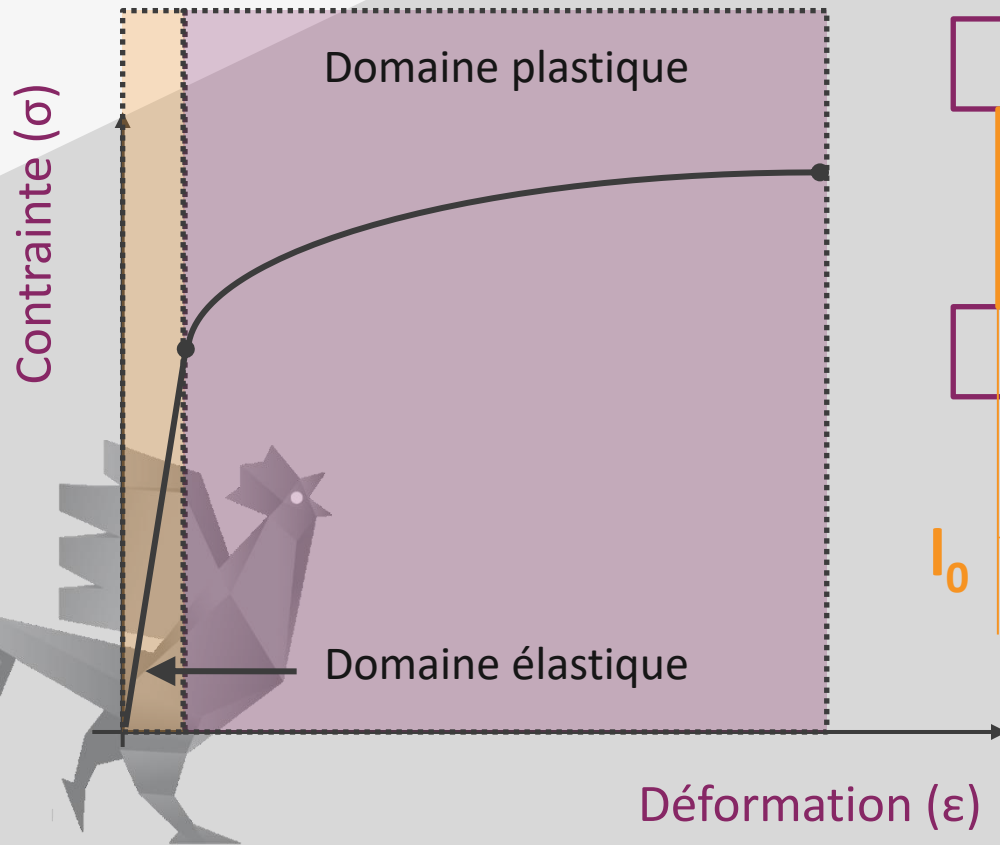
Rhéostats



Cas de l'essai de traction

(*EN – Tensile test*)

Que veut-on tracer?



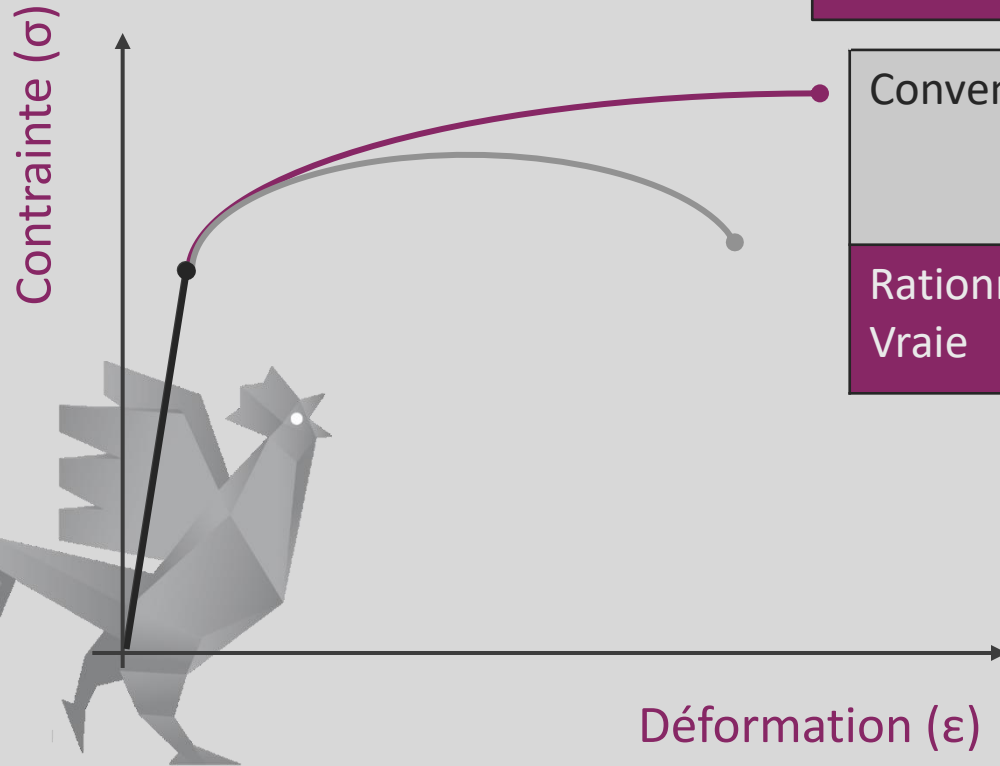
Cas de l'essai de traction

(*EN – Tensile test*)

Que veut-on tracer?

A disposition :

e_0, l_0, L_0
 $L(t), l(t)$
 $F(t)$



Conventionnelle

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Rationnelle
Vraie

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$S_0 = e_0 \cdot l_0$$

Conservation du volume

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L$$

$$S = \frac{S_0 \cdot L_0}{L}$$

1

Comportement



Arts et Métiers
Sciences et Technologies

L201

Cas de l'essai de traction

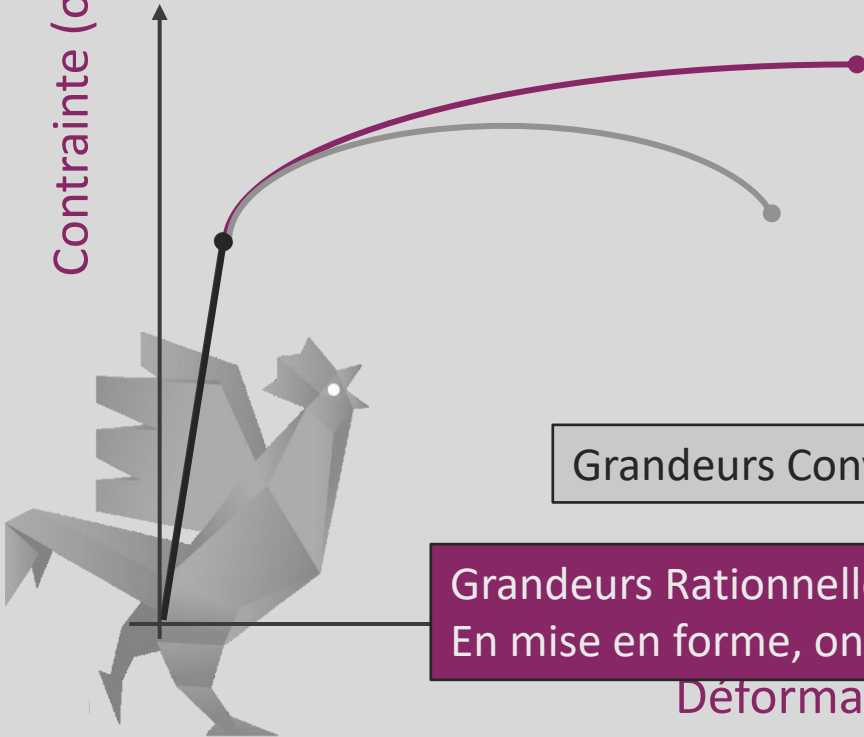
(*EN – Tensile test*)

Que veut-on tracer?

A disposition :

e_0, l_0, L_0
 $L(t), l(t)$
 $F(t)$

Contrainte (σ)



Conventionnelle

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Rationnelle
Vraie

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Grandeurs Conventionnelles : Analyse macro. R_e , R_m , $A\%$, Elasticité
Conservation du volume

Grandeurs Rationnelles : Loi de comportement, Plasticité
En mise en forme, on ne travaille qu'avec les grandeurs rationnelles

Déformation (ϵ)

L

1

Comportement



Arts et Métiers
Sciences et Technologies

L217

Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

Rupture

5

Ouverture

Tôles et Fabrication

(EN – Sheet Metal Forming)

■ Produits minces

Laminage

à chaud
ébauche

↘ Efforts
↗ Ductilité

Cylindre de Laminoir

Brames

Tôles laminées
à chaud
(~5 - 10mm)

à froid
finition

Cylindre de Laminoir

Tôles LàC

Tôles laminées
à froid
(~0,1 - 2mm)

Laminage

(EN – Hot and Cold Rolling)

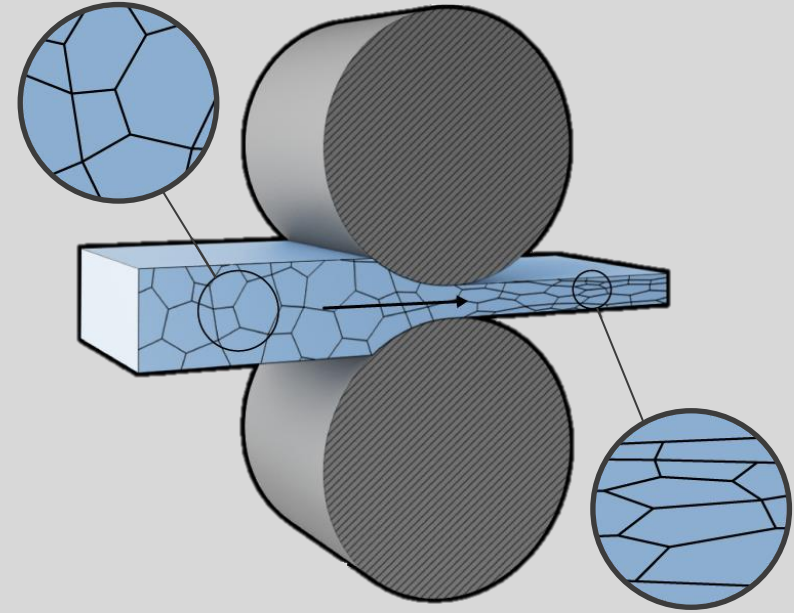
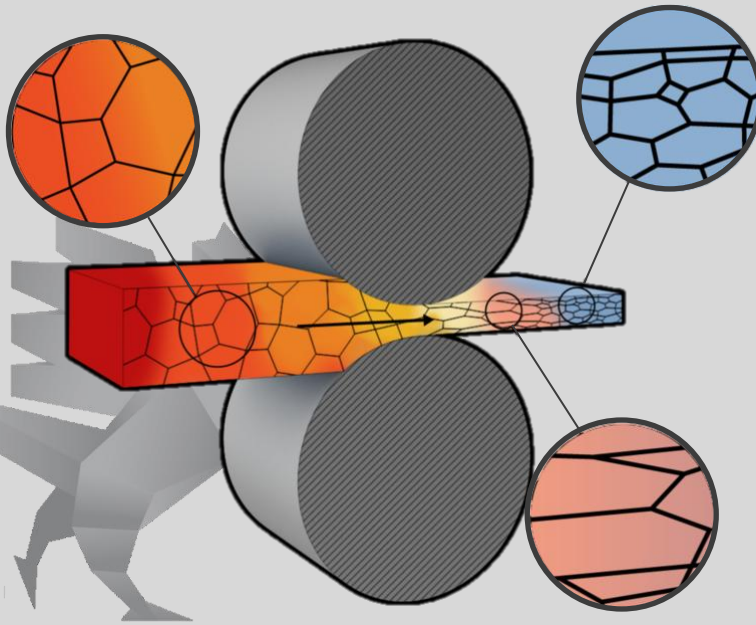
à chaud

- écouissage
 - recristallisation
- compétition*

Le rapport de section entre avant et après laminage s'appelle le **taux de corroyage**. Il caractérise l'écrouissage.

à froid

- écouissage
- anisotropie de texture*



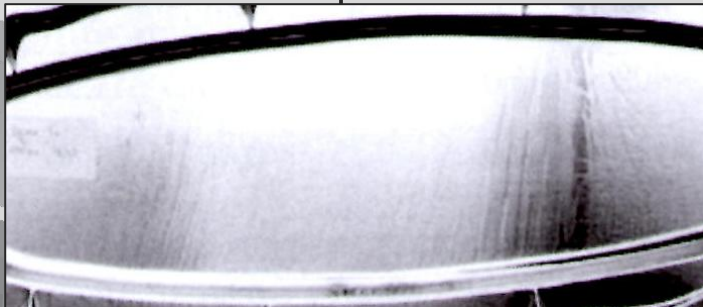
Tôles et Fabrication

(EN – Temper Rolling)

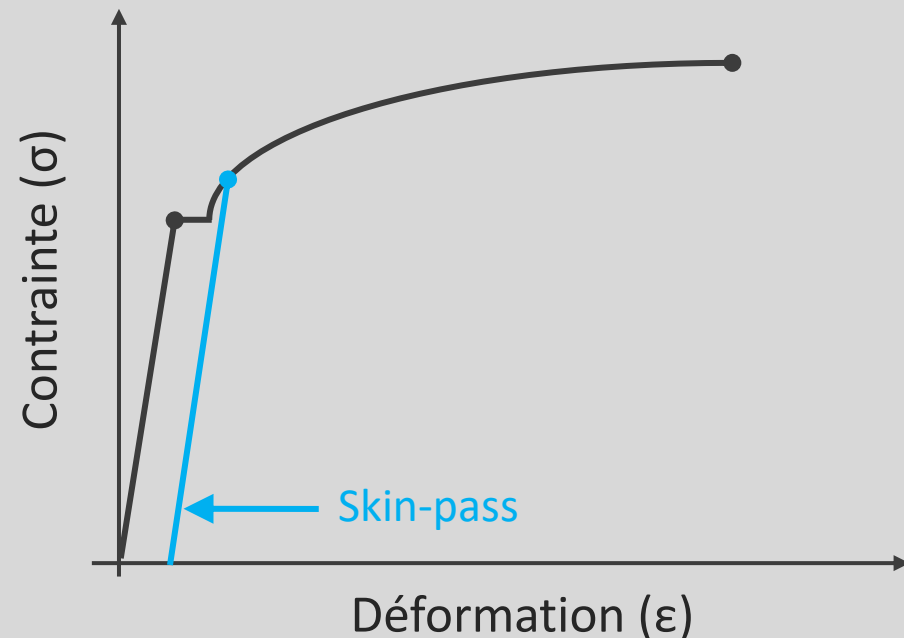
■ Skin-Pass

Pour de nombreuses tôles d'acier calmé à l'aluminium. L'opération consiste à effectuer un très léger laminage de à froid de la tôle après recuit. Cette opération permet de :

- Eliminer le palier d'élasticité
- Imposer la rugosité
- Assurer la planéité



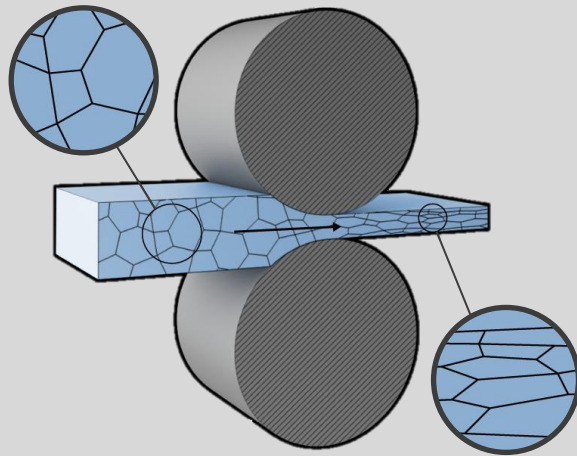
Vermiculures (stries) sur un acier sans skin-pass



Anisotropie

(EN – Anisotropy)

■ Anisotropie de comportement



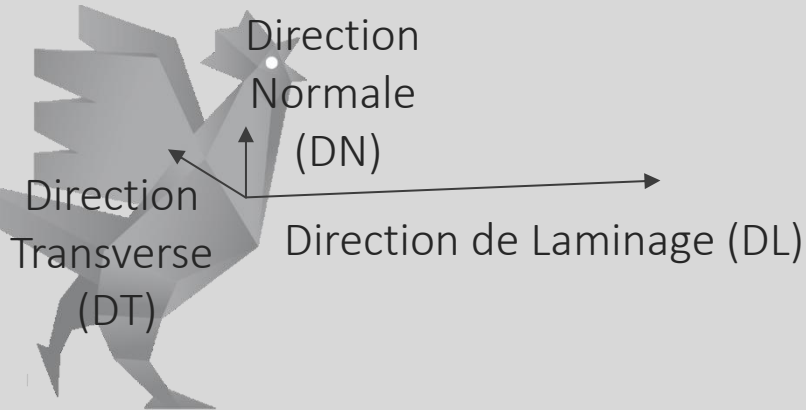
Exemple : Laminage à chaud

Brame

15m x 1m x 200mm

Bobine

600m x 1m x 5mm



$$\varepsilon_{DL} \gg 1$$

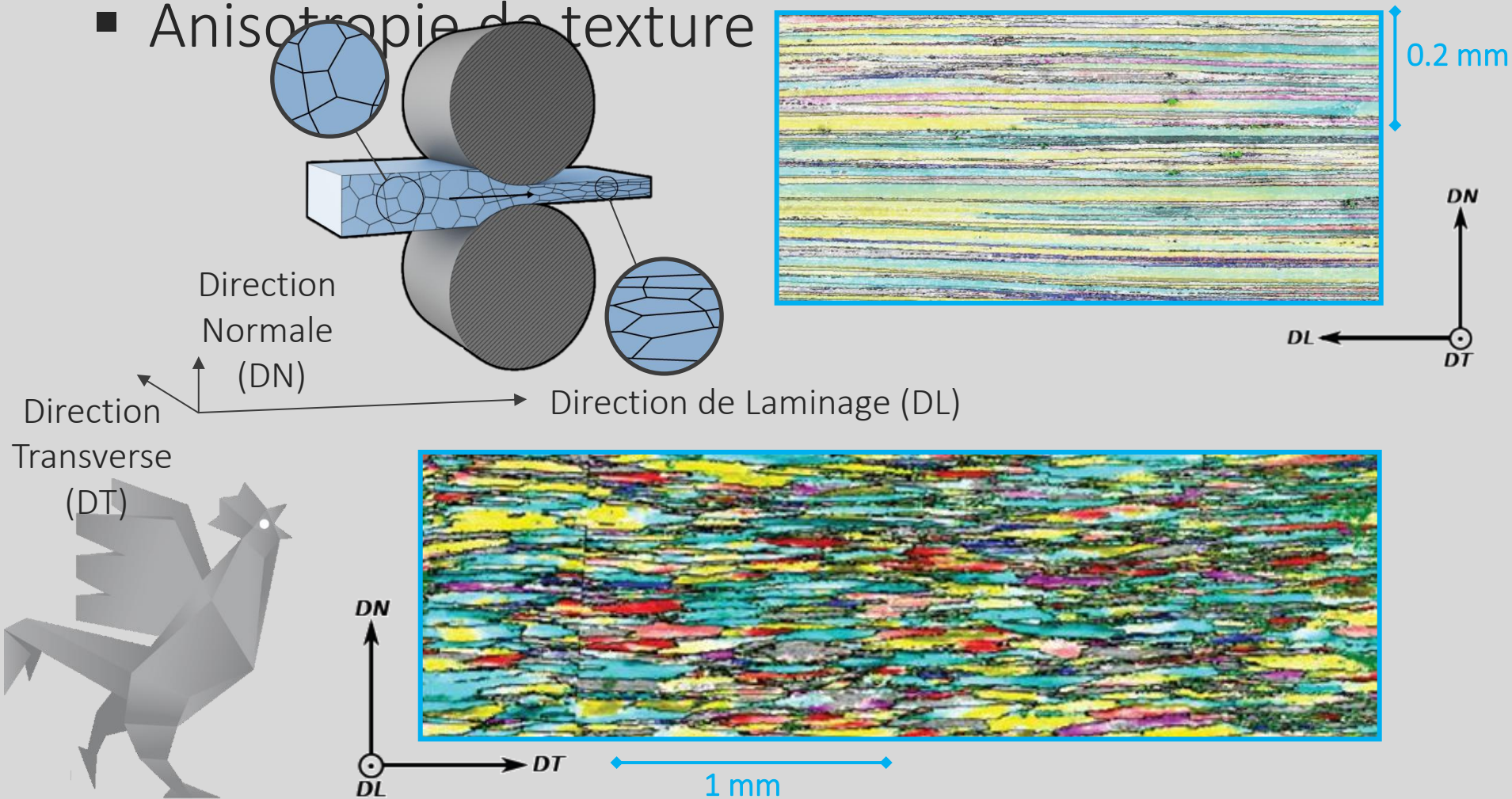
$$\varepsilon_{DT} \sim 0$$

$$\varepsilon_{DN} \ll -1$$

Anisotropie

(EN – Texture anisotropy)

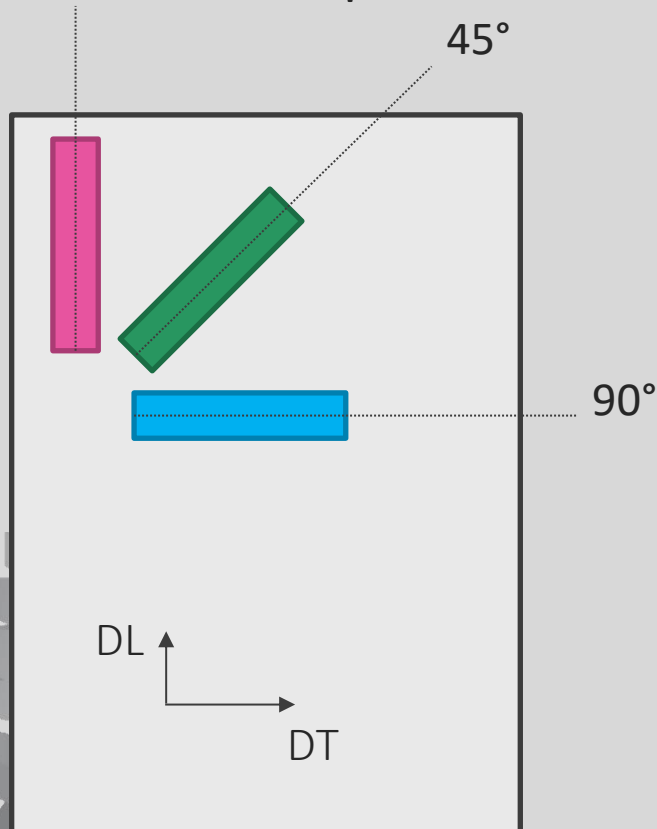
■ Anisotropie de texture



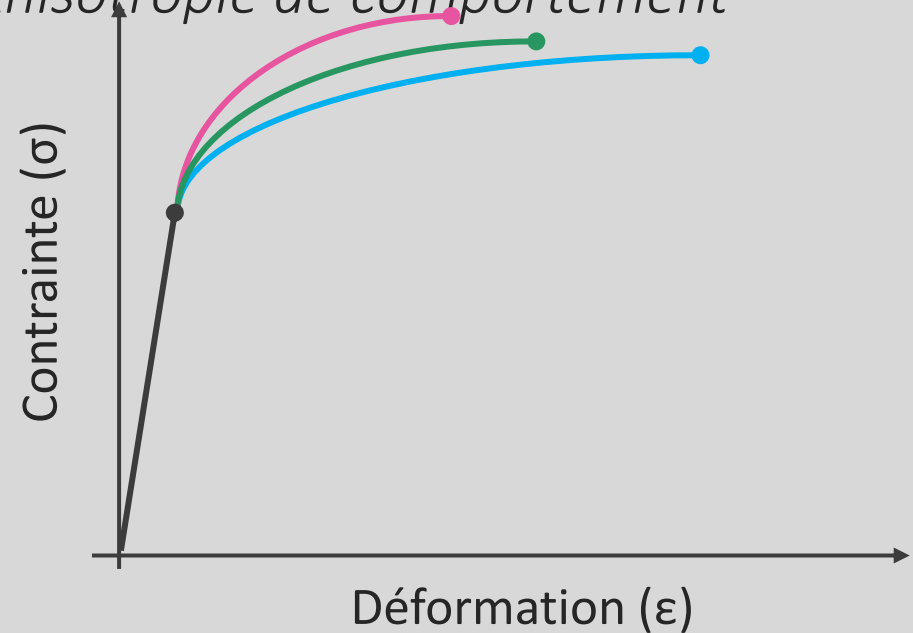
Anisotropie

(EN – Planar Anisotropy)

■ Anisotropie Planaire

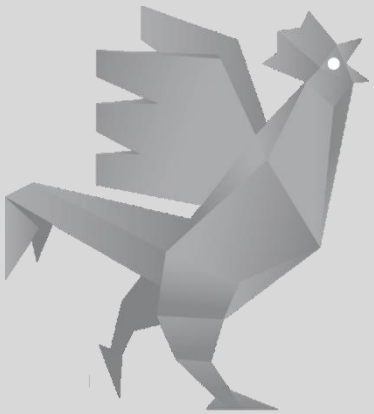


Anisotropie de comportement



Anisotropie

(EN – Planar Anisotropy)



2

Anisotropie



Arts Sciences et
Technologies
et Métiers

291

Anisotropie

(EN – Normal Anisotropy)

■ Anisotropie Normale

Coefficient d'anisotropie plastique

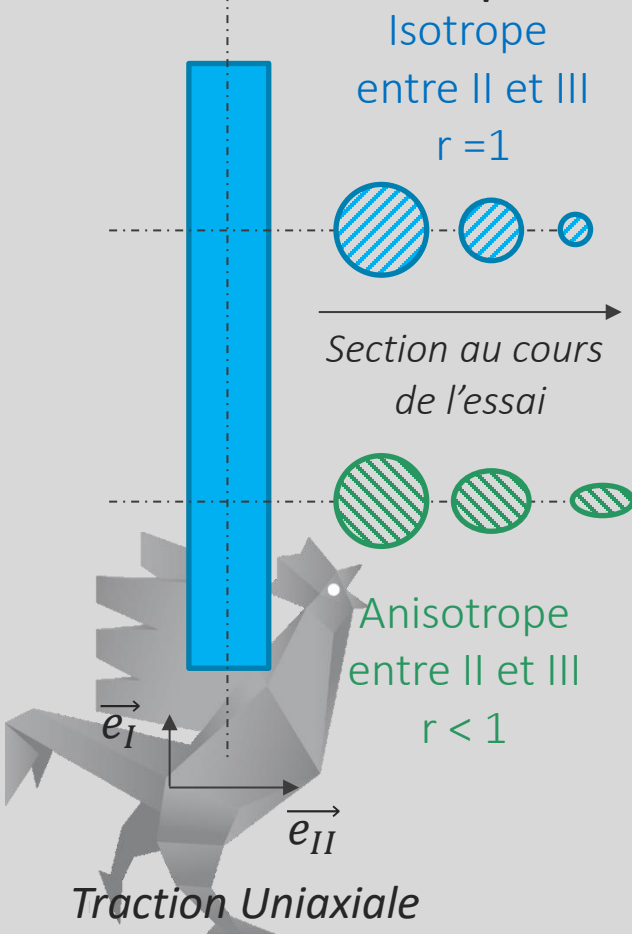
Coefficient de Lankford

$$r = \frac{\varepsilon_{II}^p}{\varepsilon_{III}^p}$$

Conservation du volume

$$\varepsilon_I^p + \varepsilon_{II}^p + \varepsilon_{III}^p = 0$$

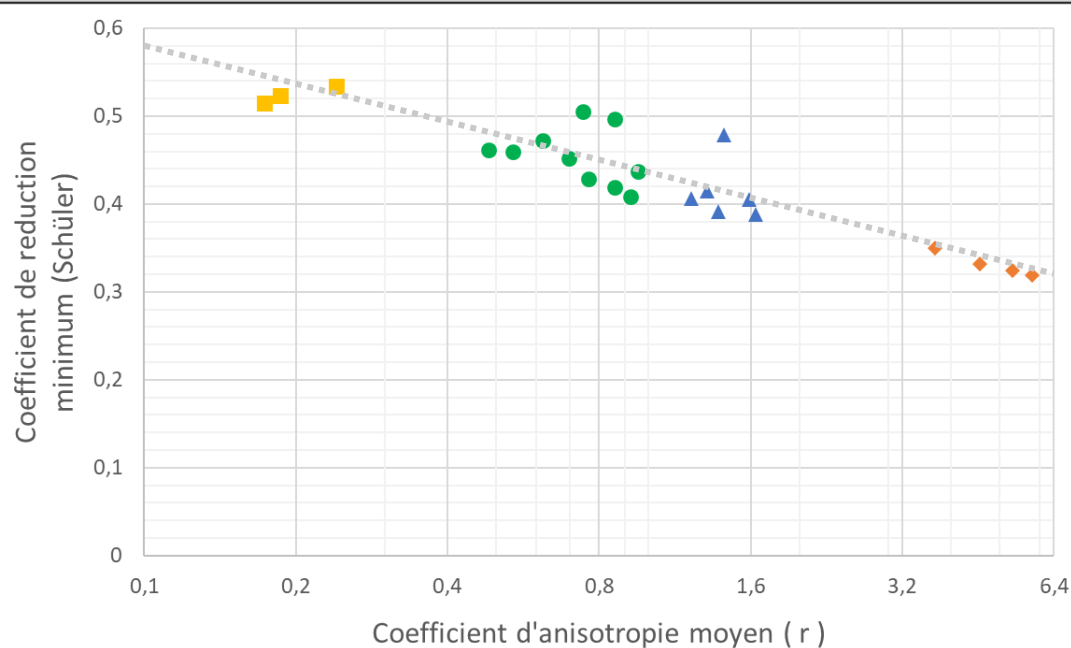
En emboutissage, on favorise une déformation dans la direction II par rapport à la direction III (amincissement).



Anisotropie

■ Anisotropie Normale & Emboutissabilité

Grand coeff. de réd. min. : Peu apte à l'emboutissage



Faible coeff. de réd. min. : Très apte à l'emboutissage

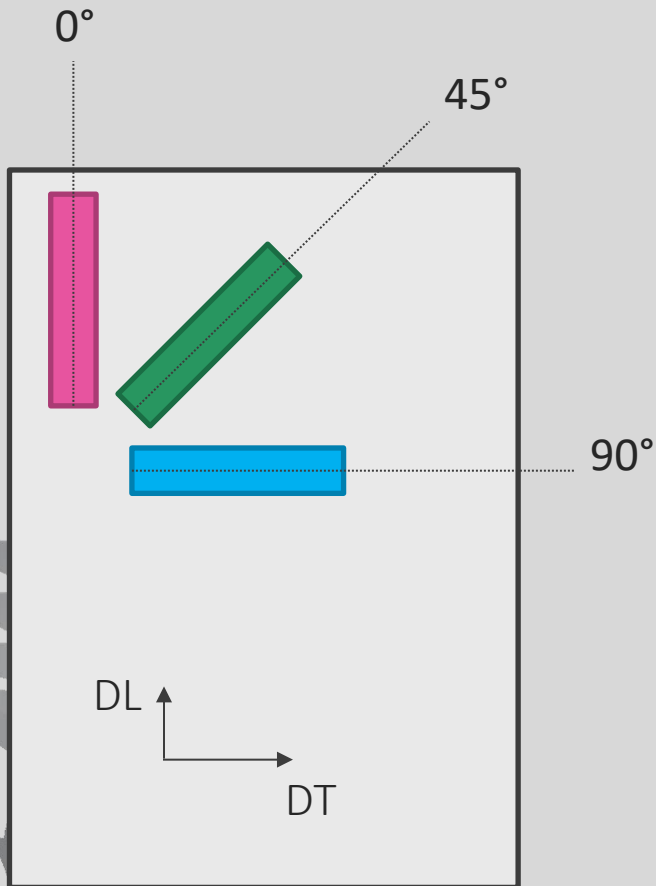
Matériau	$\bar{r}$
Alliage de Zinc	0.4 - 0.6
Acier laminé à chaud	0.8 - 1.0
Acier laminé à froid	1.0 - 1.4
Acier laminé à froid (calmé Al)	1.4 - 1.8
Acier Inoxydable	0.9 - 1.2
Acier Haute Resistance	0.9 - 1.2
Alliage Aluminium	0.6 – 0.8
Alliage Titane	3.0 – 6.0

Matériaux à haut coefficient d'anisotropie normal sont rechercher en emboutissage.

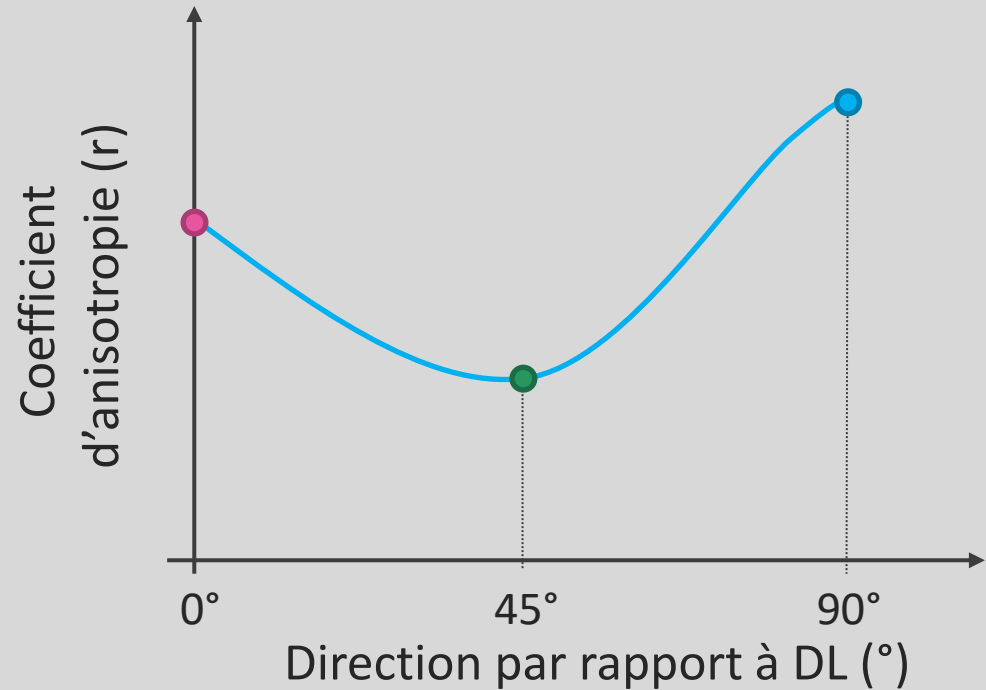
Anisotropie

(EN – Anisotropy)

■ Anisotropie



L'analyse de l'anisotropie normale dans le plan de la tôle.



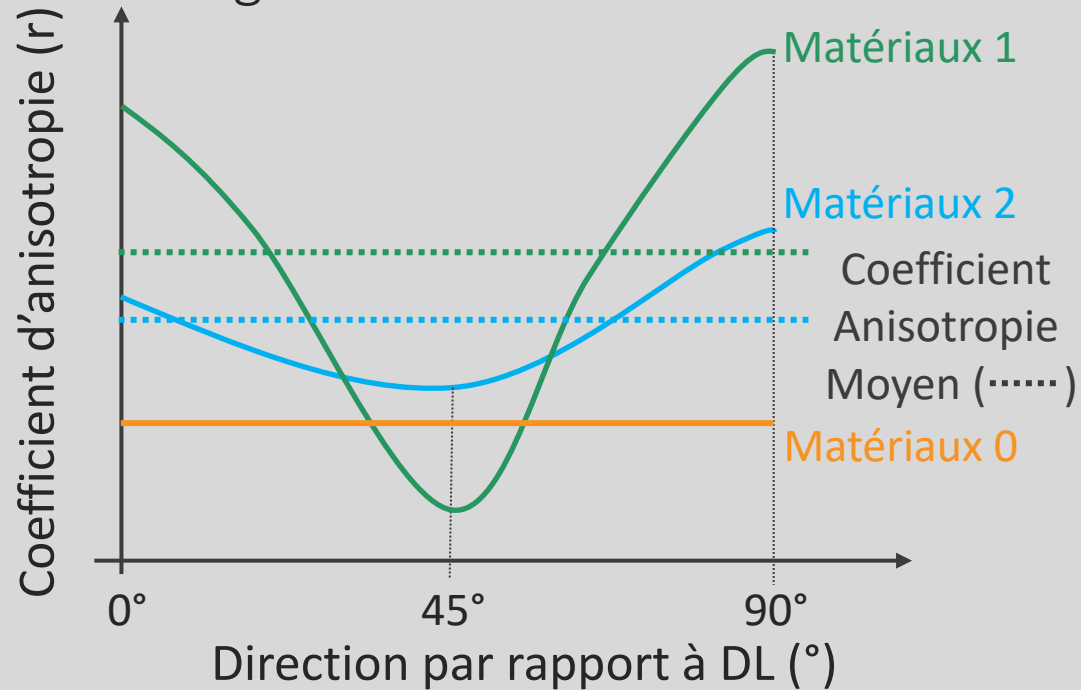
■ Cas d'Anisotropie

Pièce mise en forme en emboutissage

Historiquement

Matériaux 0

Doit-on changer?



	Mat. 0	Mat. 1	Mat. 2
E (Gpa)	210	210	210
Re (MPa)	350	600	400
Rm (MPa)	500	1000	700
A% (%)	20	9	12

■ Cas d'Anisotropie

- 2 cas :

Pièces déformées dans toutes les directions



Amélioration Re et Rm

↳ épaisseur, poids

Amélioration Emboutissabilité

dans toutes les directions

→ Matériaux 2

Pièces déformées dans 1 direction préférentielle



Amélioration Re et Rm

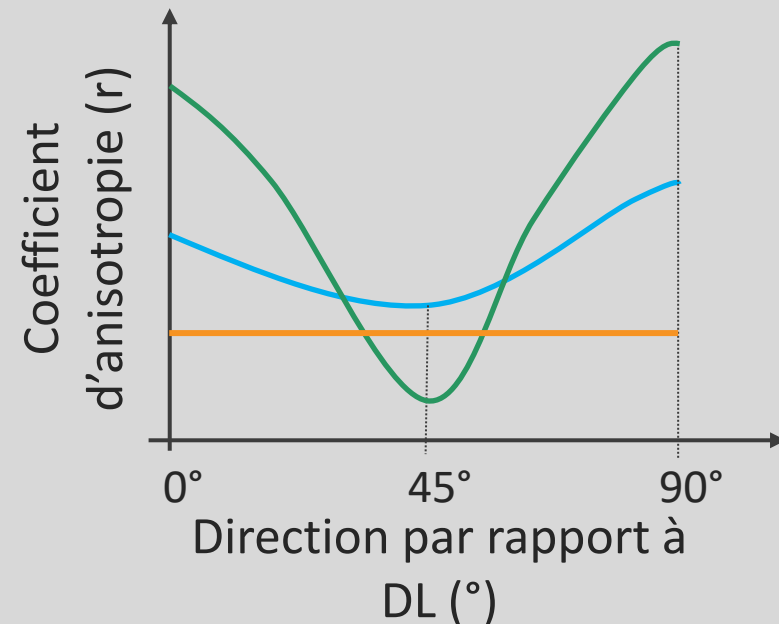
↳ épaisseur, poids

Amélioration Emboutissabilité

dans 1 direction

→ Matériaux 1

	Mat. 0	Mat. 1	Mat. 2
E (Gpa)	210	210	210
Re (MPa)	350	600	400
Rm (MPa)	500	1000	700
A% (%)	20	9	12



Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

Rupture

5

Ouverture

Mode de sollicitation

(EN – Loading case)

- Jusqu'à présent tout est comparé à la traction uniaxiale en utilisant :
 - Contrainte équivalente de Von Mises
 - Paramètres « Matériaux » : R_e , R_m , $A\%$

Il existe des modes de déformations bien différents dont:

→ Expansion

→ Retreint

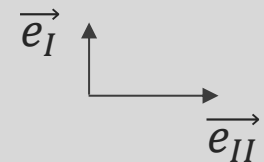
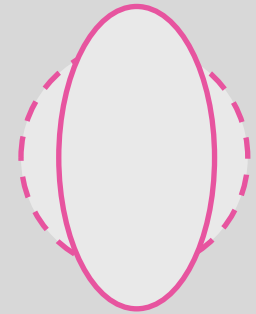
Mode de sollicitation

(*EN – Loading case*)

Retreint

- $\varepsilon_I > 0$
- $\varepsilon_{II} < 0$
- $\varepsilon_{III} ? 0$

On fonction du signe $\varepsilon_I + \varepsilon_{II}$, il y aura **augmentation** ou **diminution** de l'épaisseur.



--- Avant déformation
— Après déformation

La traction uniaxiale fait partie de cette famille ($\varepsilon_{III} < 0$)

Le foisonnement apparait lorsque ($\varepsilon_{III} > 0$)



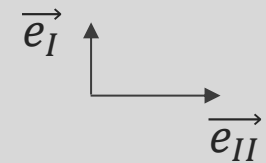
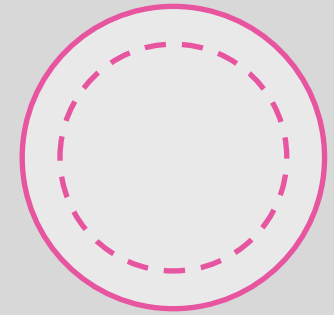
Mode de sollicitation

(*EN – Loading case*)

Expansion

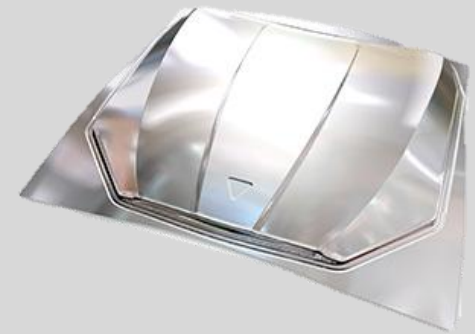
- $\varepsilon_I > 0$
- $\varepsilon_{II} > 0$
- $\varepsilon_{III} < 0$

Si $\varepsilon_I = \varepsilon_{II}$ on parle
d'expansion équilibiaxiale



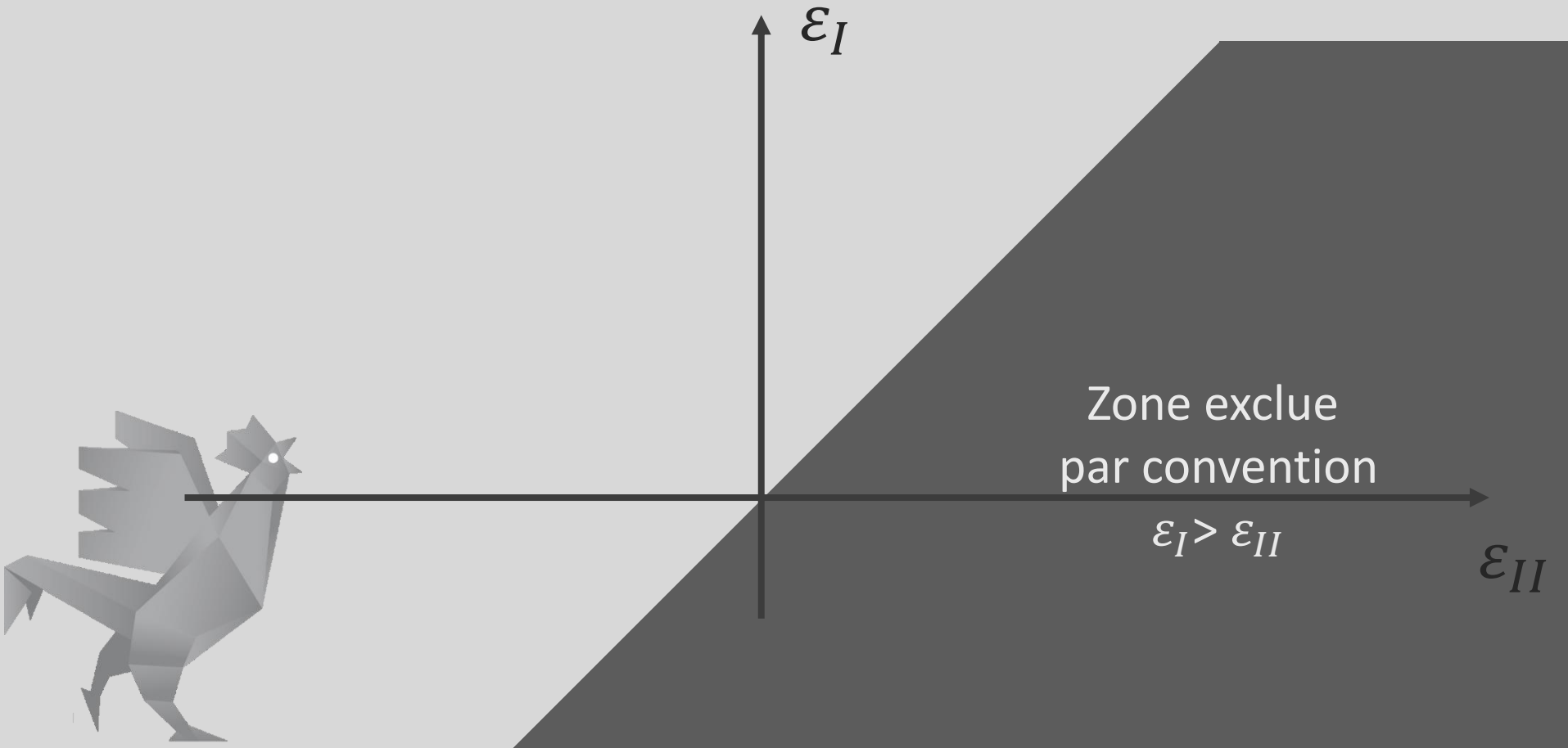
--- Avant déformation
— Après déformation

Nombreuses pièces d'aspects
sont majoritairement
en embouti en expansion



Repère des déformations principales

(EN – Major strain)



3

Mode de déformation

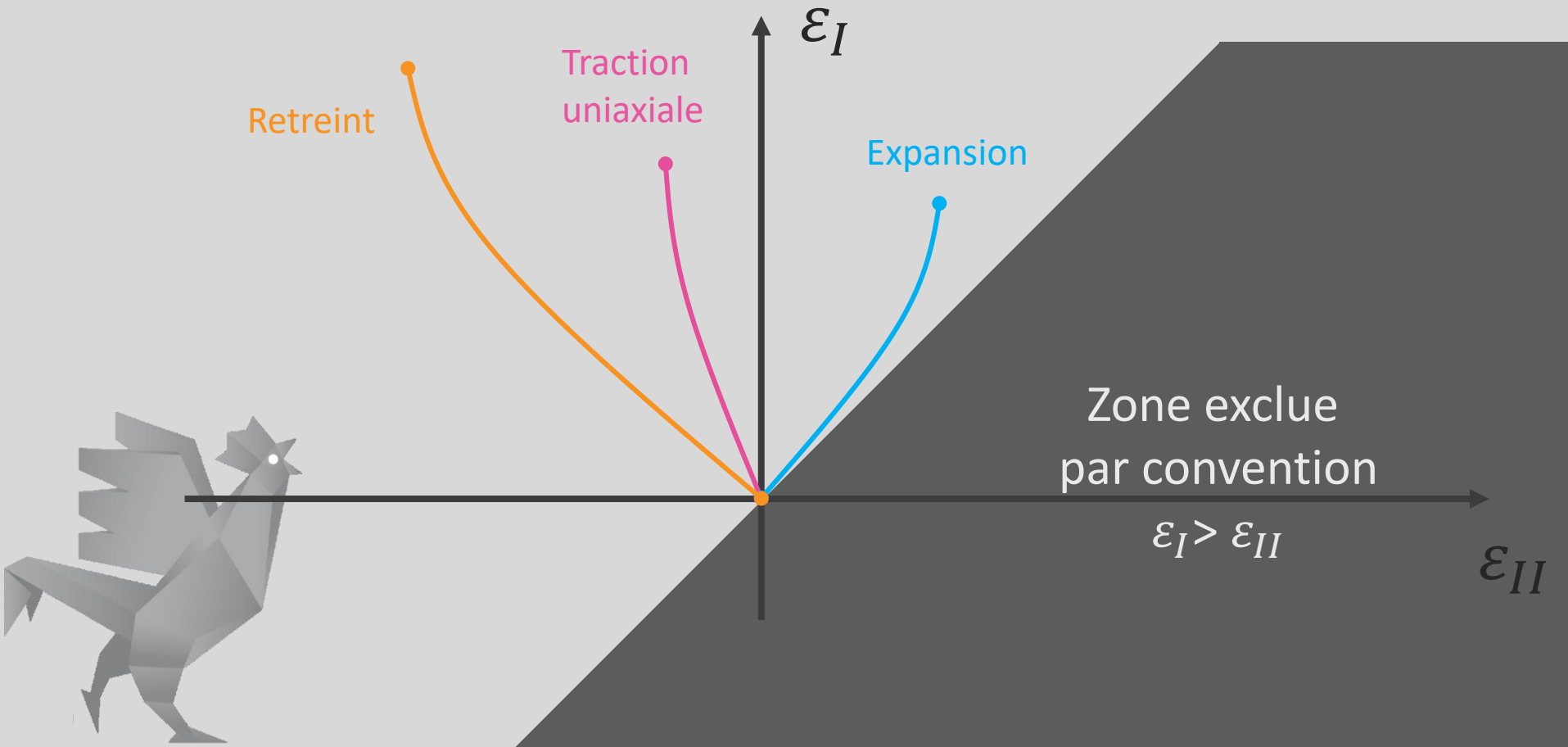


Arts et Métiers
Sciences et Technologies

L391

Repère des déformations principales

(EN – Major strain)



Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

Rupture

5

Ouverture

Prédiction de la rupture

(EN – Fracture mechanics)

■ « Modèle » de rupture en traction uni-axiale

- soit en contrainte

$$\sigma_{\text{éq}} = \sigma_{\text{max}}$$

ou

$$\tau = \tau_{\text{max}}$$



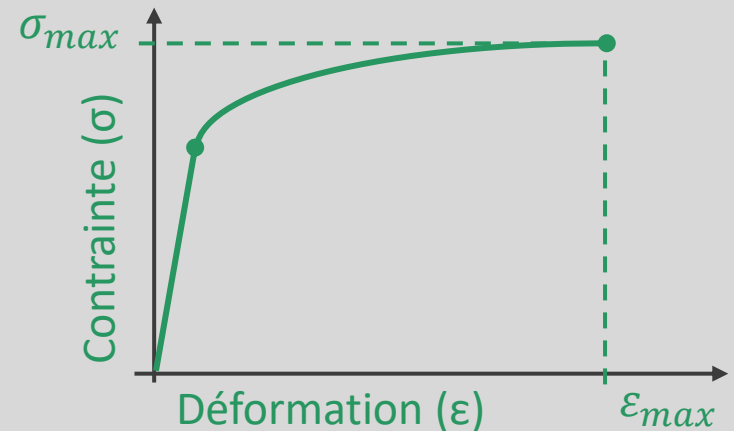
*Visualisation en traction uni-axiale : rupture à 45°
(car la contrainte de cisaillement est maximale dans cette direction)*

- soit en déformation

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}}$$

Limitations

Ne prend en compte qu'un état de charge équivalent



Prédiction de la rupture

(EN – Fracture mechanics)

Expérimentalement

◆ Rupture

Retreint

Traction
uniaxiale

Expansion

Lorsqu'on réalise des essais différents on se rend compte que la rupture dépend du mode de sollicitation

Zone exclue
par convention

$\varepsilon_I > \varepsilon_{II}$

ε_{II}



4

Rupture



Arts
et Métiers

Sciences et
Technologies

L43¹

Prédiction de la rupture

(EN – Fracture mechanics)

- Latham et Cockroft Normalisé

Très utilisé en forgeage

Permet de prendre en compte le mode de déformation Latham et Cockroft [1968]. Basé sur le principe que l'endommagement va venir des contraintes de traction maximum, on considère pour un matériau une limite C_1 :

$$C_1 = \int_0^{\epsilon_f} \frac{\text{Max}(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, 0)}{\sigma_{\text{éq}}} \cdot d\bar{\epsilon}$$



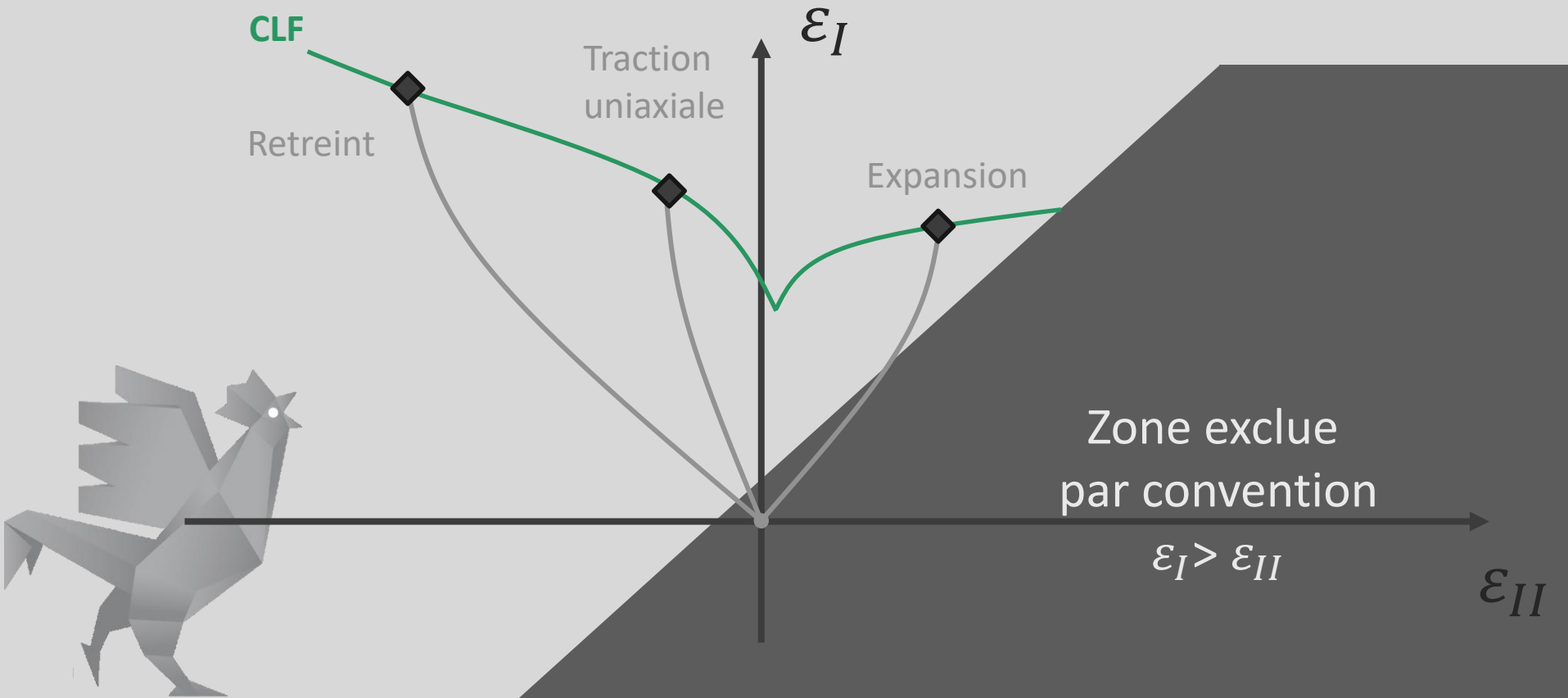
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$
 $\sigma_{\text{éq}}$
 $\bar{\epsilon}$

les contraintes principales
la contrainte équivalente au sens de Von Mises
le déformation équivalente

Courbe limite de formage - CLF

(*EN – Forming Limit Diagram - FLD*)

◆ Rupture



4

Rupture



Arts et Métiers
Sciences et Technologies

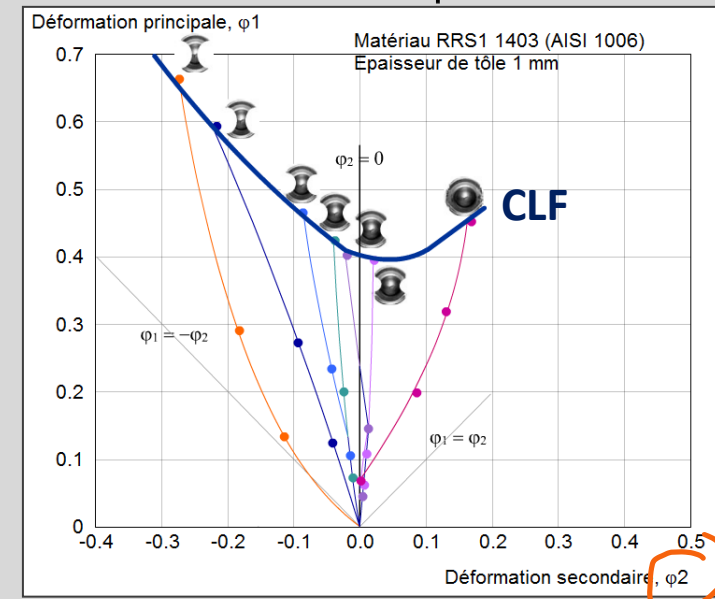
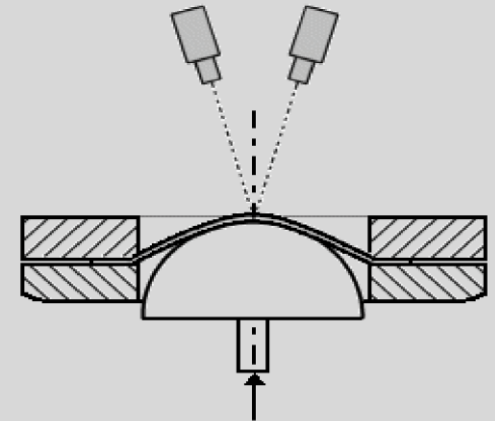
L457

Courbe limite de formage - CLF

(*EN – Forming Limit Diagram - FLD*)

Essai Nakajima

En jouant sur la forme de l'éprouvette, il est possible de modifier le trajet de déformation de l'expansion à la traction.



Prédiction de la rupture

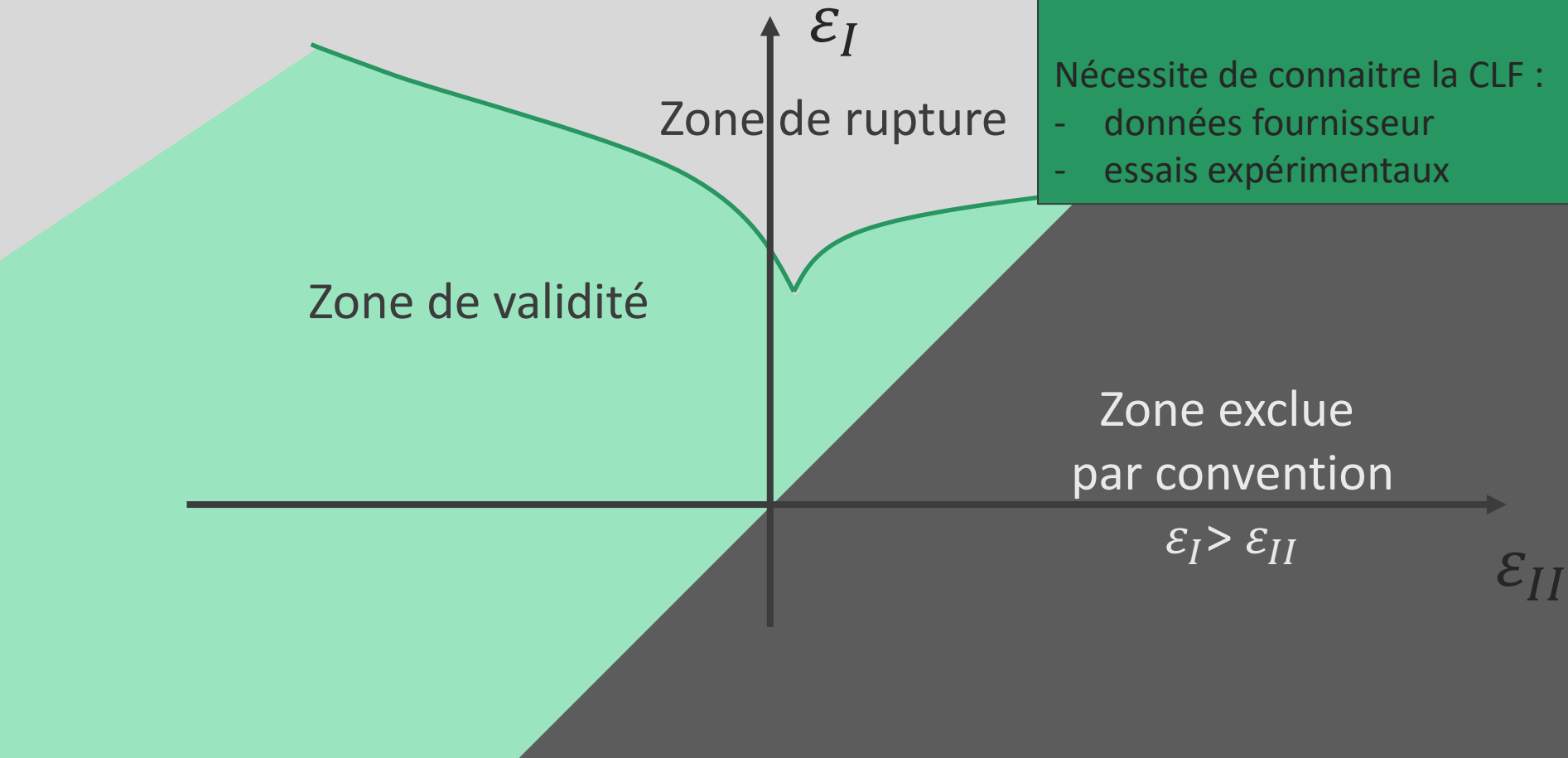
(*EN – Forming Limit Diagram - FLD*)

- Courbe limite de formage - CLF

Outil très puissant, et très usité en emboutissage.

Nécessite de connaître la CLF :

- données fournisseur
- essais expérimentaux



Plan de la présentation

1

Comportement

2

Anisotropie

3

Mode de déformation

4

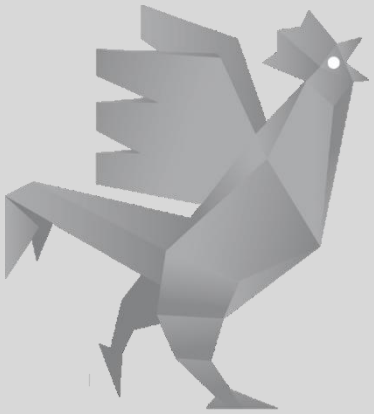
Rupture

5

Ouverture

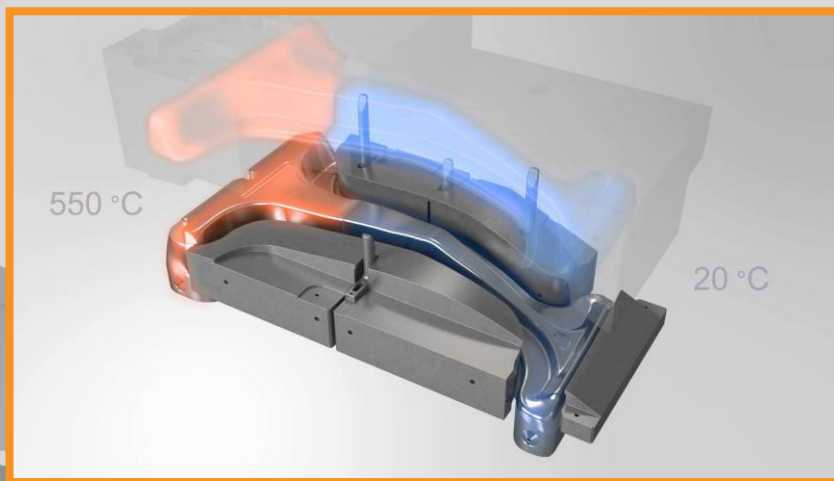
Prédiction de l'emboutissage

- Besoin et développement de nouvelles nuances
 - Plus résistante
 - Diminution des embarqués



Prédiction de l'emboutissage

- Besoin et développement de nouveaux procédés
 - Développement de Emboutissage à chaud
 - Pour emboutir matériaux plus technique
 - Pour permettre trempe sélective

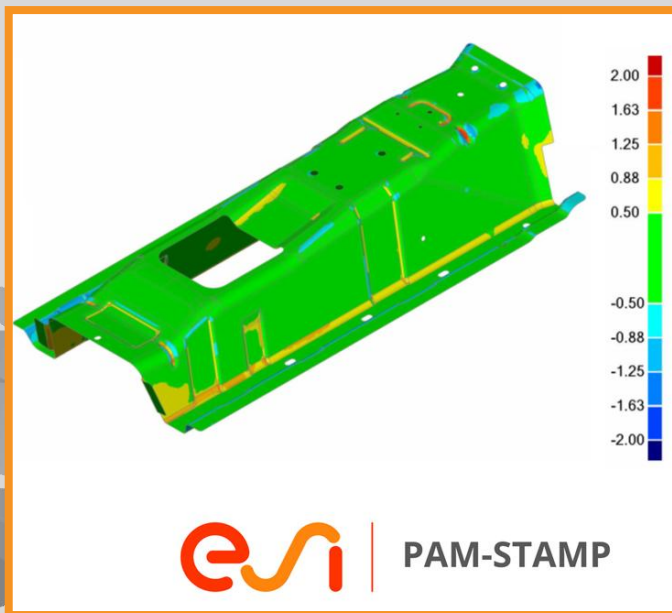


- Développement de la Superplasticité

Prédiction de l'emboutissage

- Nécessité de montée en compétences accélérée
- Inexistence des règles métiers

→ Outil moderne de simulation



Merci de votre attention.



Ressources

Livre

- L'emboutissage des aciers
Alain Col, 2010 Dunod
- Manufacturing Engineering et Technology
Serope Kalpakjan, Steven R. Schmid, 2014 Pearson

Techniques de L'ingénieur

- Essais d'aptitude à la mise en forme
Dominique François, 2006
- Emboutissage des tôles - Aspect Mécanique
Alain Col, 2011
- Emboutissage des tôles - Mode de déformation
Alain Col, 2011

Sites

- <https://www.manufacturingguide.com>
- <http://mediamef.utt.fr/>