

Formage:

Mise en œuvre des métaux par déformation

GM-3-PROFA

Équipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martinie, N. Noel,
N. Tardif

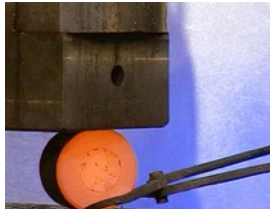
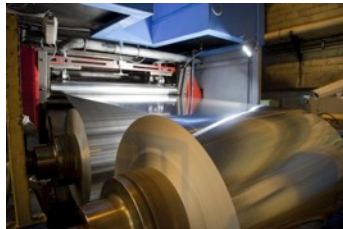
Généralités

Mise en forme par déformation plastique

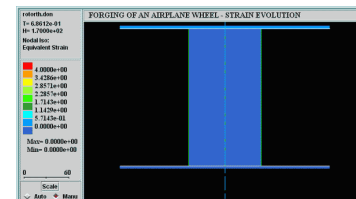
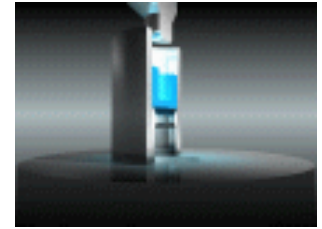
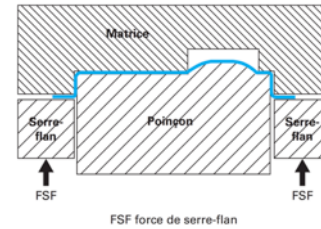
Produit



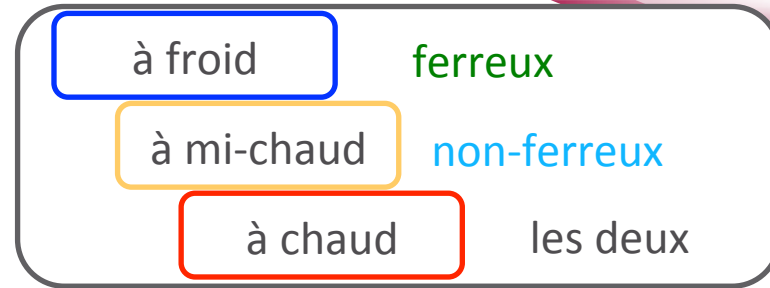
Matériau



Procédé



Produits emboutis - Marché



Métaux en feuille

Type de brut

Métaux en volume

Emboutissage

Roulage, pliage ...

Transfo° de brut

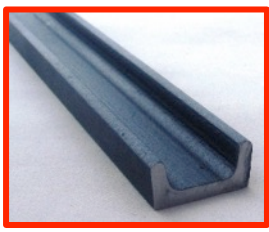
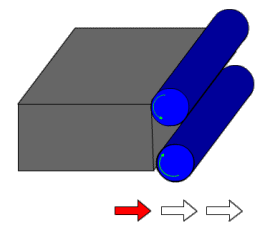
Laminage

Filage, étirage, tréfilage

Forge libre

Estampage
Matriçage

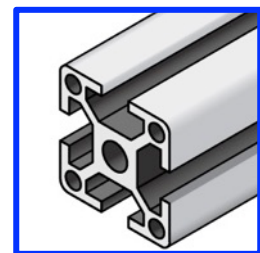
Extrusion



Laminé à chaud



Estampé



Extrudé

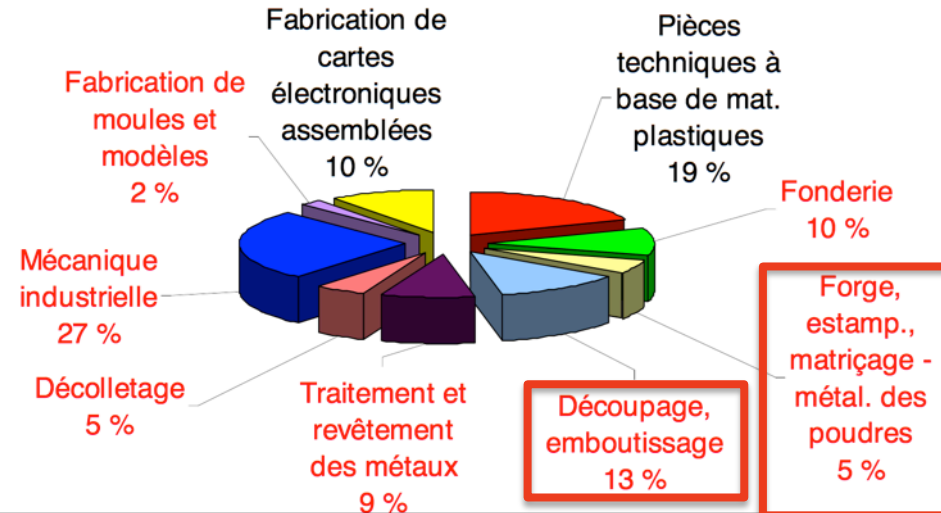


Données économiques

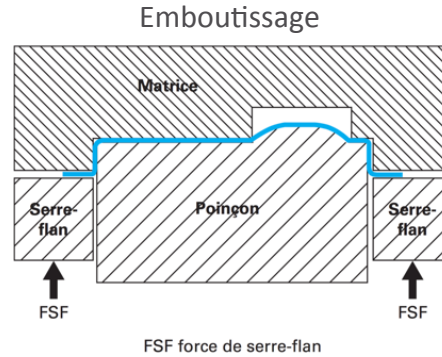
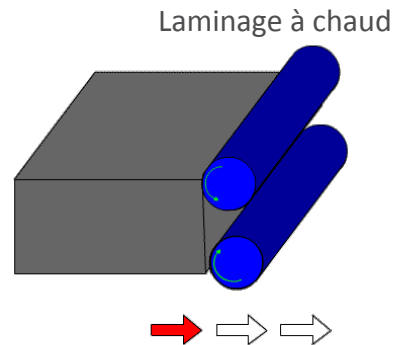
	Industrie manufacturière	Sous-traitance industrielle	Part de la sous-traitance au sein de l'industrie
Nombre d'entreprises	152 000	14 100	9 %
Effectifs à temps plein	2,2 millions	230 000	10 %
Chiffre d'affaires	690 milliards €	39 milliards €	6 %
Taux d'exportation	37 %	28 %	
Valeur ajoutée	180 milliards €	14 milliards €	8 %

Répartition de la valeur ajoutée par secteur au sein de la sous-traitance industrielle

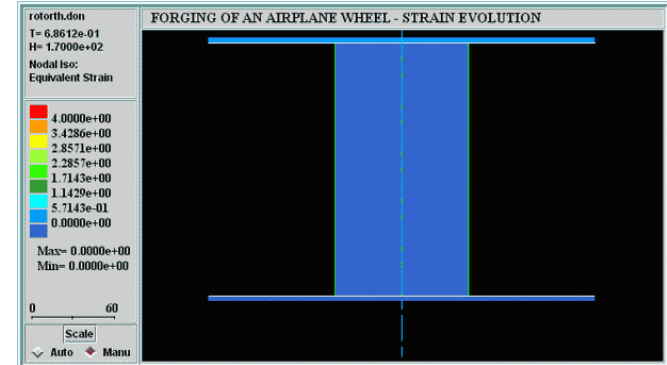
Source Insee, Esane 2010



Relation Produit-Procédé



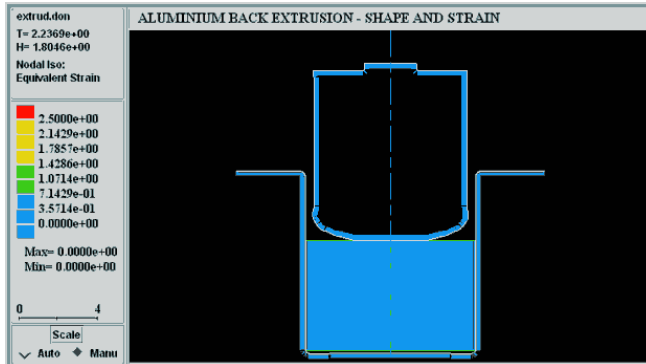
Simulation du matriçage d'un alliage d'aluminium



Outillage de forme (presque tout le temps) :

- Matrice d'estampage.
- Poinçons, filières.
- Cylindres de laminage.
- Matrice d'emboutissage.
- ...

Simulation d'une opération d'extrusion



En général, coût d'outillage important

En général, plutôt adapté aux grandes séries

Implication sur les formes réalisables

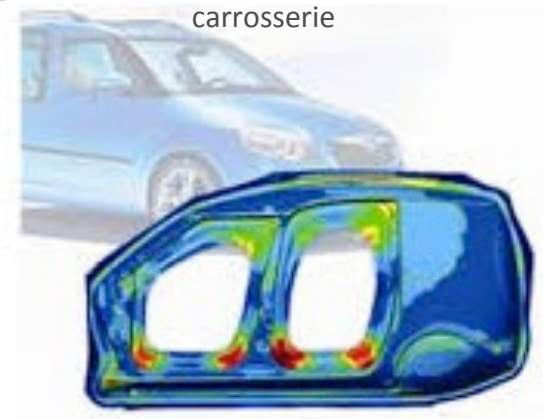
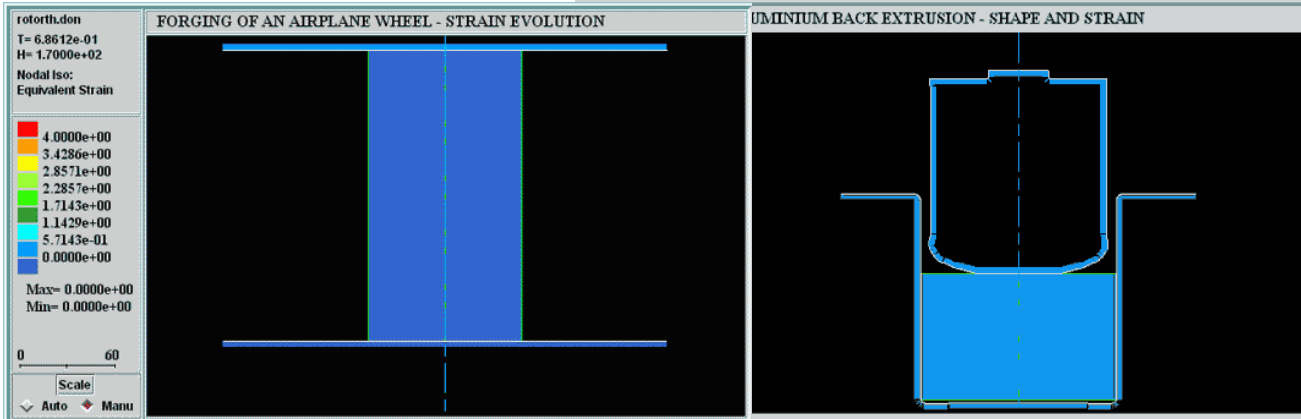
Pas de contre dépouille

Relation Matériau - Procédé

Simulation de matriçage d'un alliage d'aluminium

Simulation d'une opération d'extrusion

Simulation de l'emboutissage d'une carrosserie



Mise en forme du matériau par déformation plastique ...

... à chaud ou à froid,

... en traction, en compression, ...

... en grande transformation, à +/- grande vitesse, ...

Traitement thermomécanique du matériau de base :

...Excellent compromis entre résistance, élasticité, rupture, fatigue, corrosion, résilience

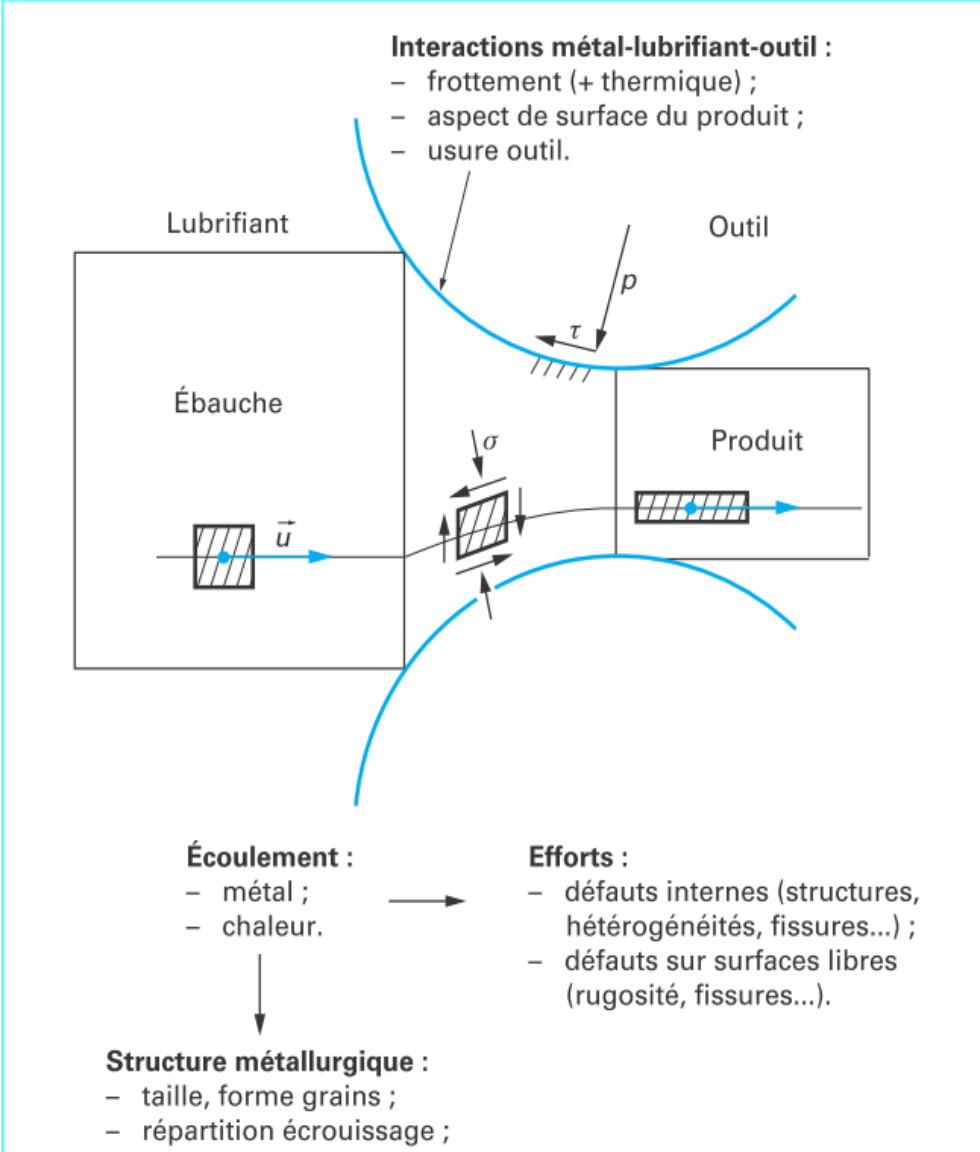
...Gain sur le rapport tenue mécanique / masse de la pièce

...Création de texture (anisotropie)

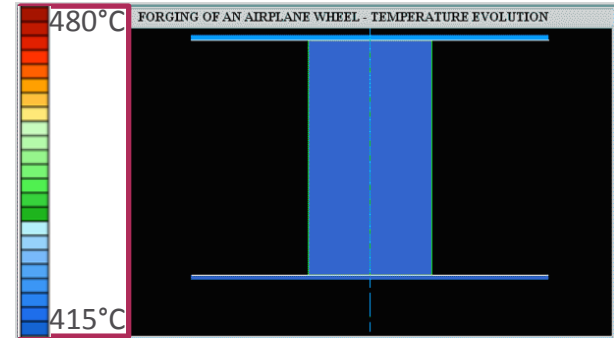
...Existence de contraintes résiduelles



Relation Matériau - Procédé



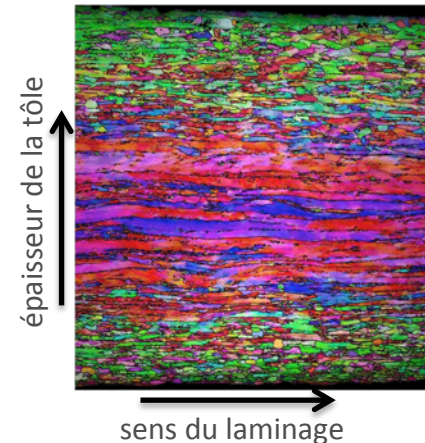
Matriçage d'un alliage d'aluminium cartographie de température



Coupe macrographique de pièces issues d'estampage : Fibrage

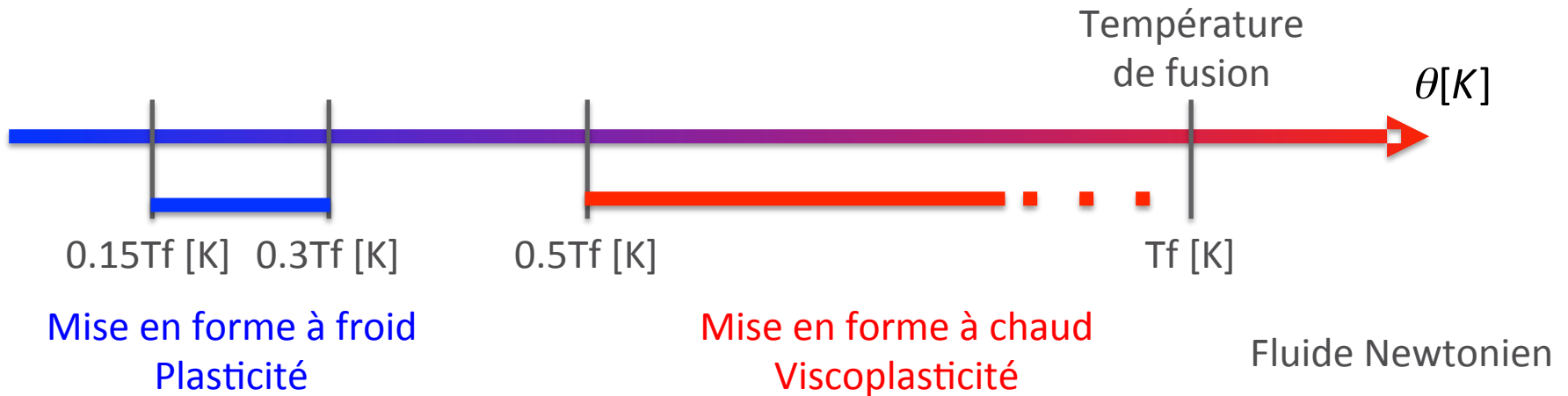


texture d'un acier ferritique laminé à chaud



Quelques notions de (Visco)plasticité

Effet de la température

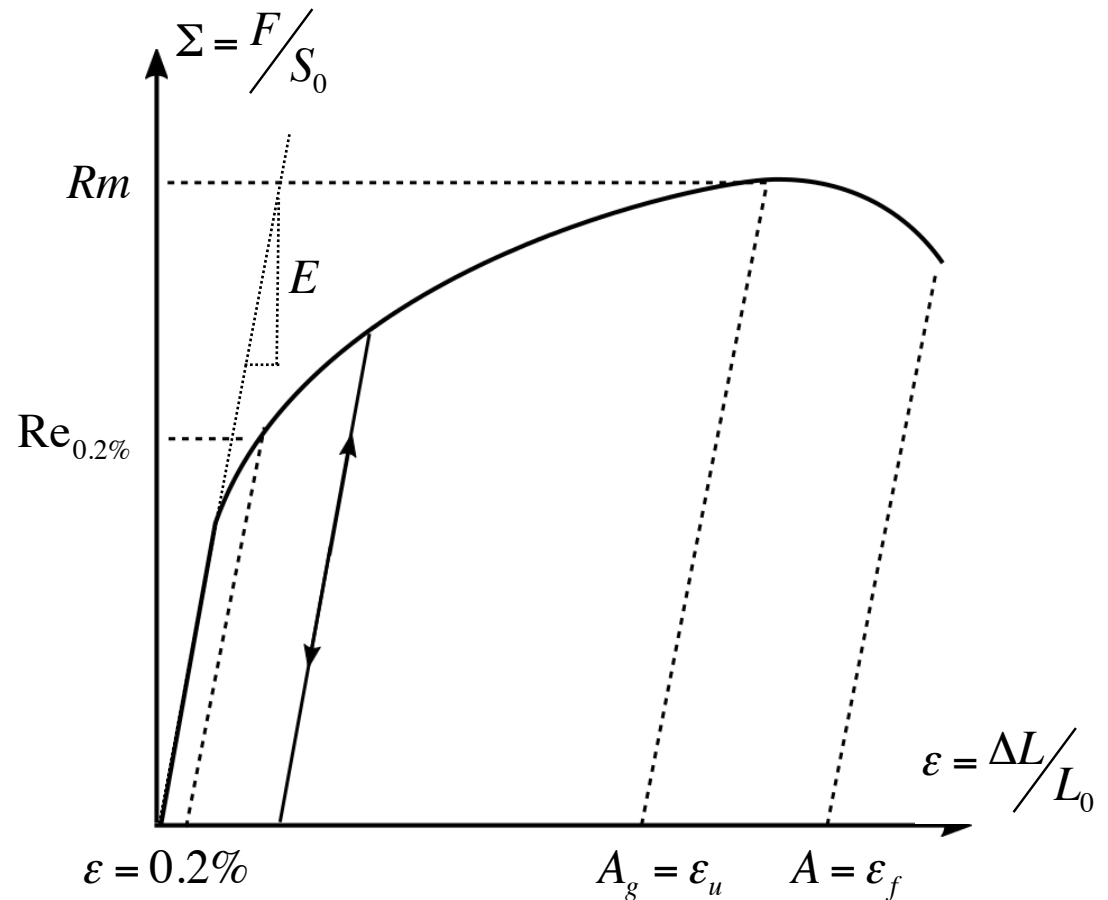
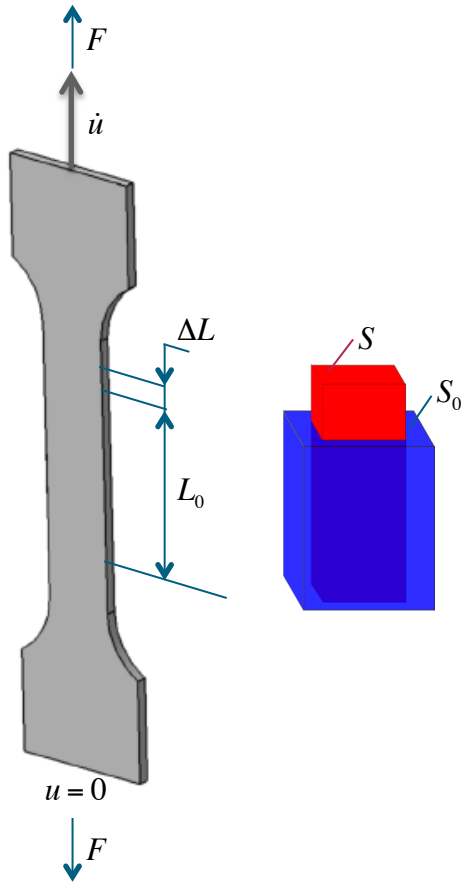


Matériau	$0.15T_f$ [K]	$0.3T_f$ [K]	$0.5T_f$ [K]	T_f
Acier C45	-25°C	220°C	550°C	1370°C
Al 2xxx	-140°C	0°C	180°C	635°C
Bronze	-100°C	70°C	300°C	870°C
TA6V	15°C	300°C	690°C	1650°C

Plasticité des métaux à froid



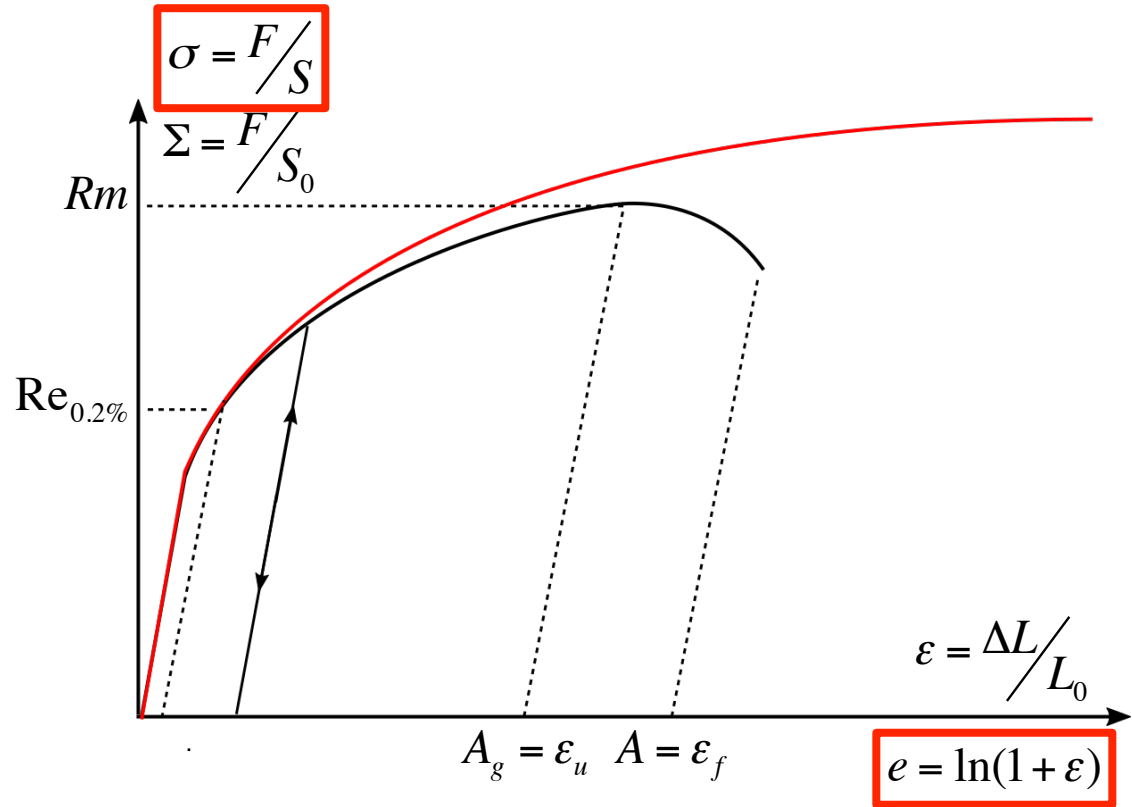
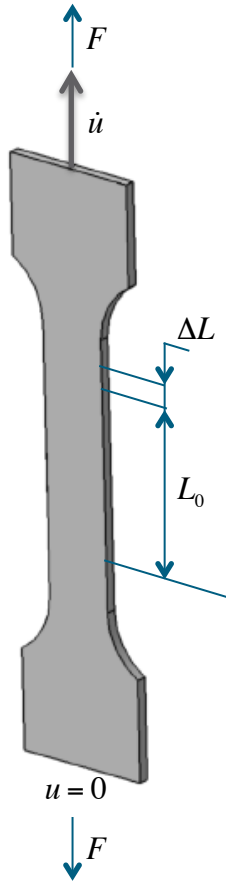
- Essai de traction uniaxial : Mesures Conventionnelles



Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Mesures vraies

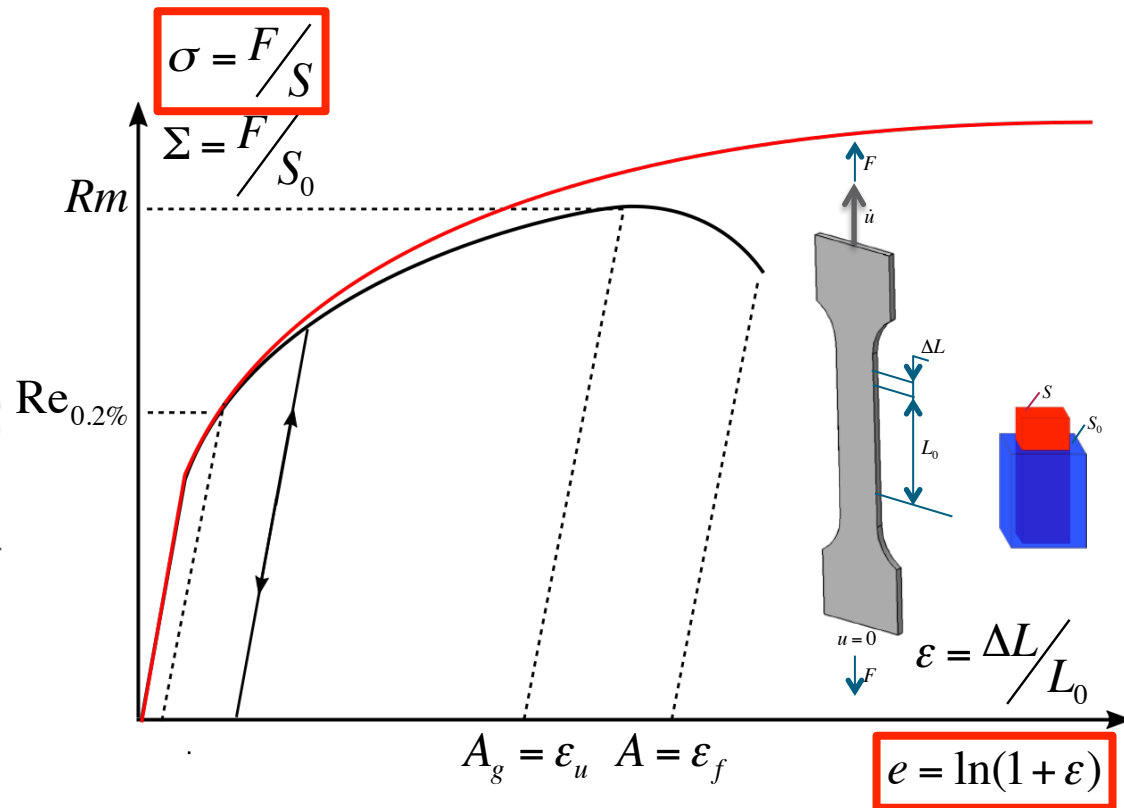
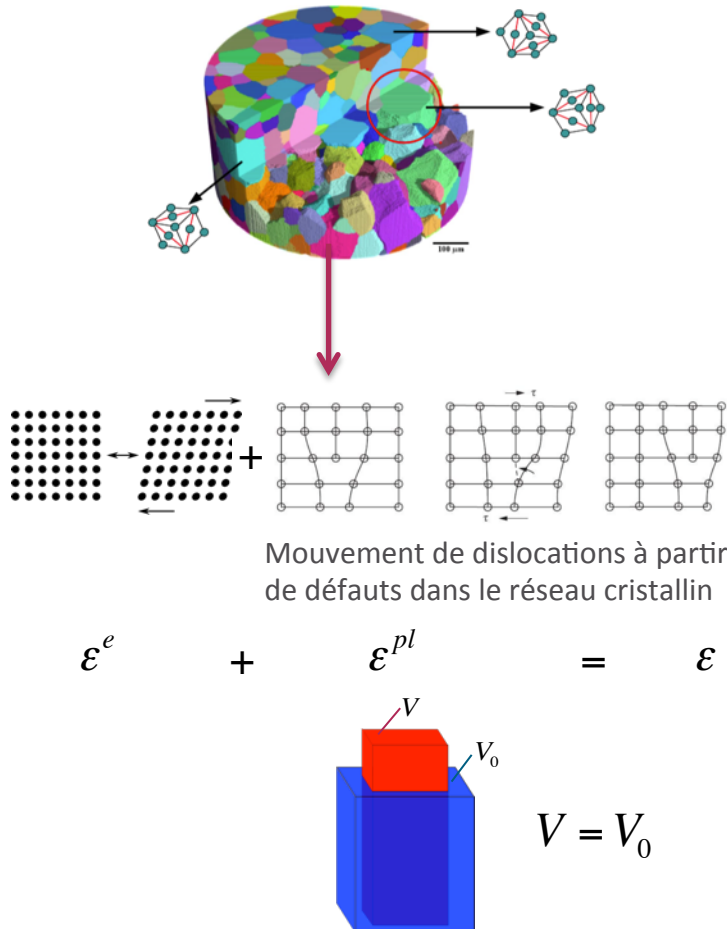


Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Déformation plastique

Métaux = Poly cristaux

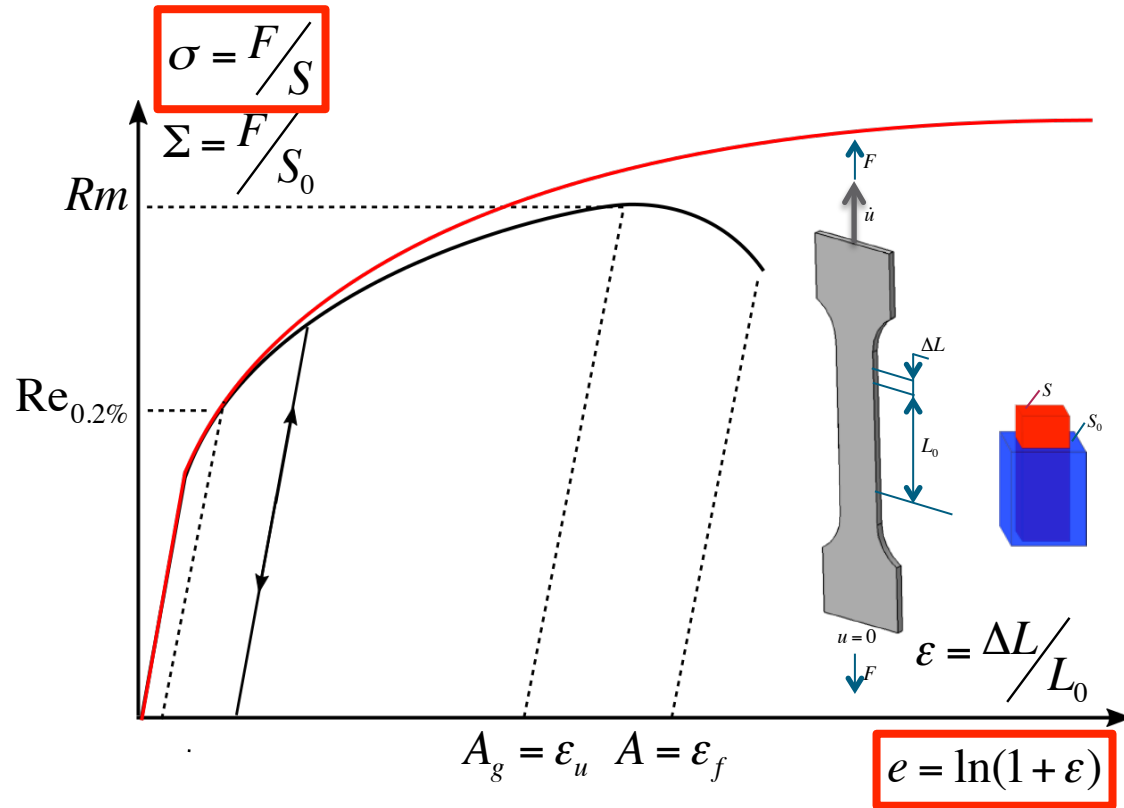
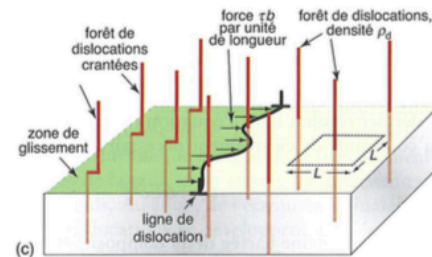
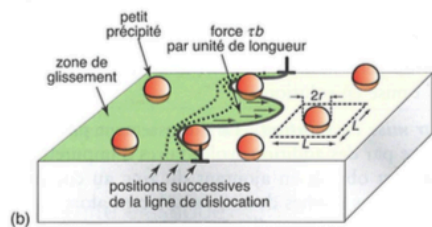
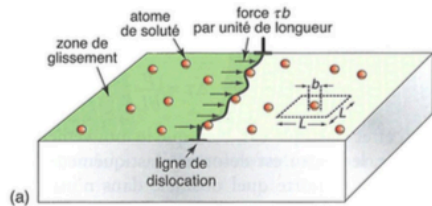


Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Consolidation (ie écoulement)

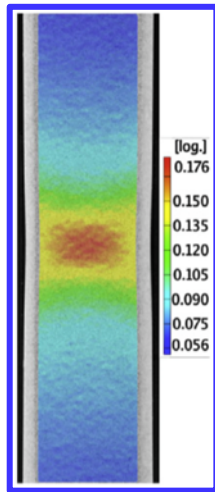
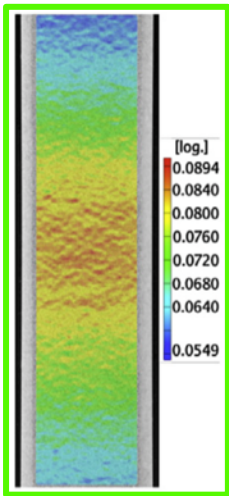
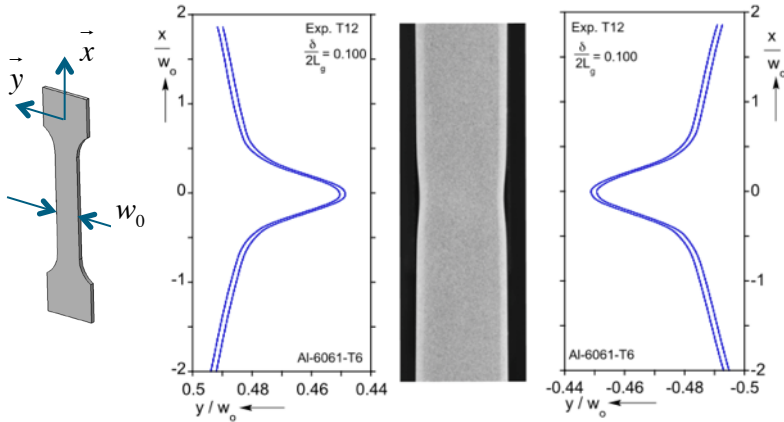
$$d\sigma / de^{pl} > 0$$



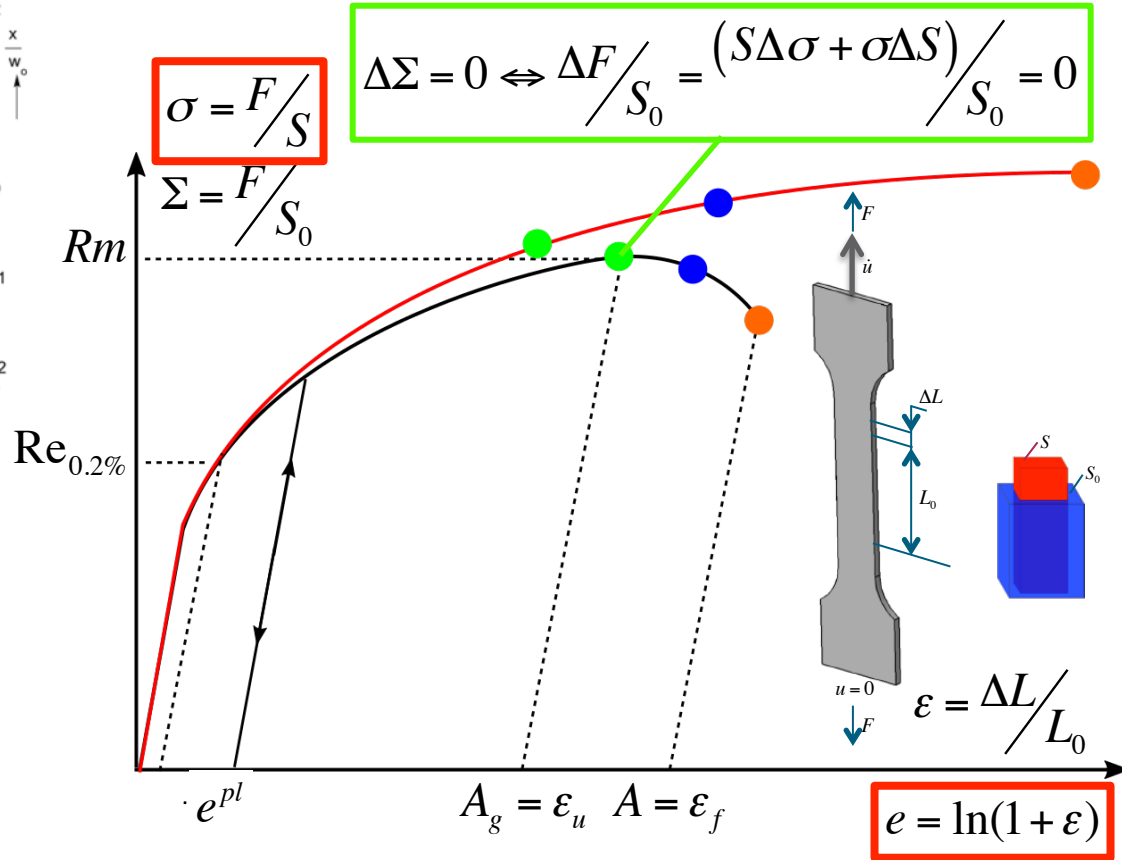
Plasticité des métaux à froid



Essai de traction uniaxial : Striction diffuse



Instabilité de la structure \rightarrow Localisation des déformations

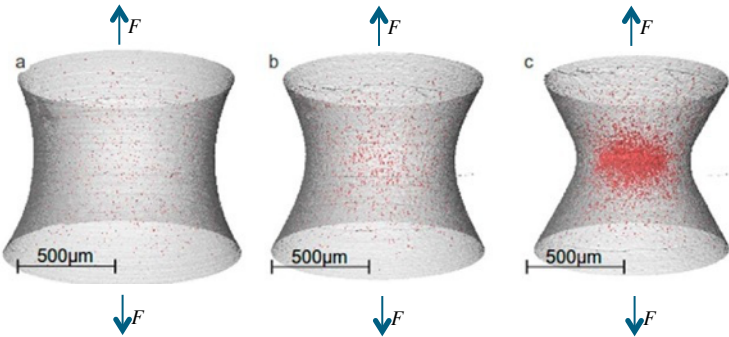
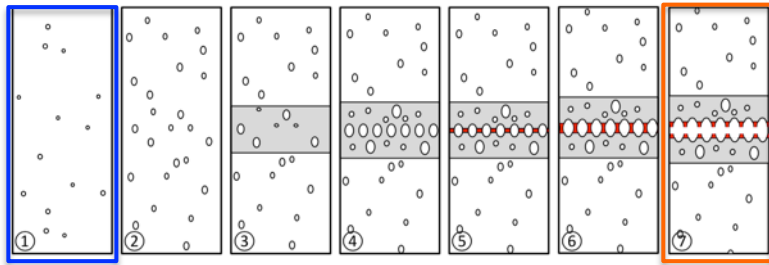


Plasticité des métaux à froid

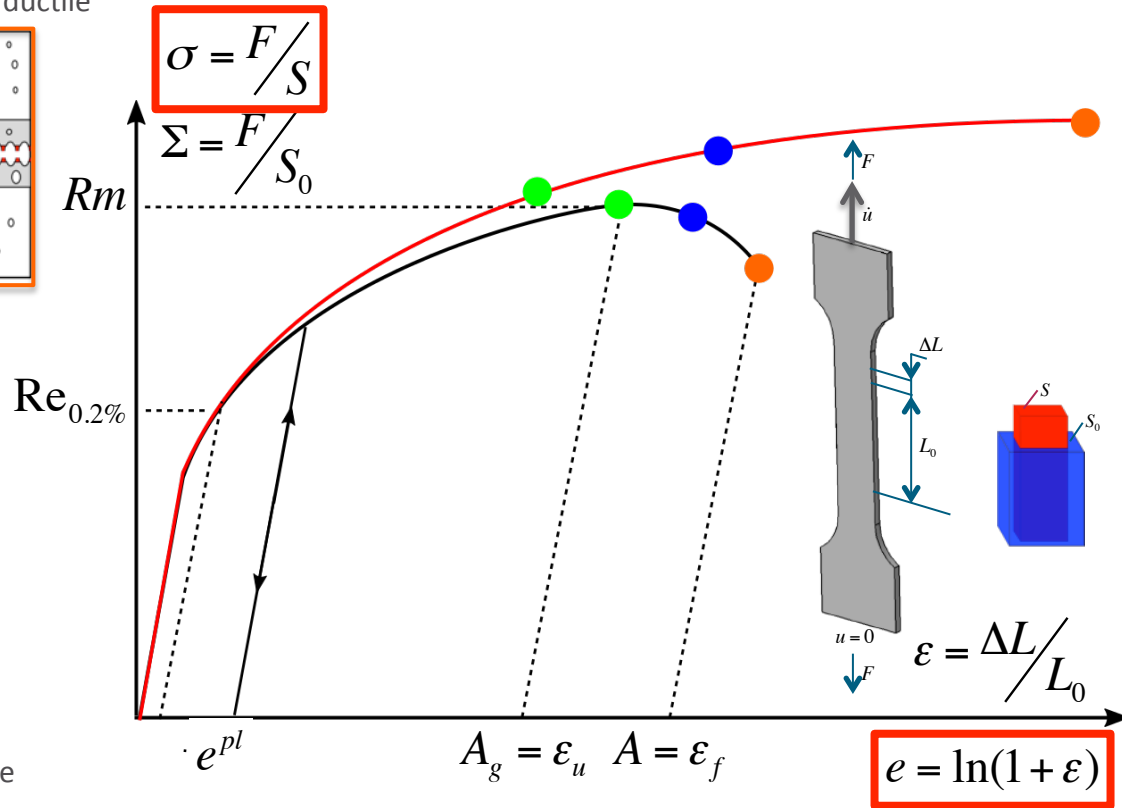


- Essai de traction uniaxial : Striction localisée jusqu'à rupture

Localisation interne des déformations + Endommagement ductile



Localisation interne des déformations / nucléation, croissance et coalescence de vides (rouge) jusqu'à rupture sur éprouvette cylindrique. Mesure par tomographie au rayon X.



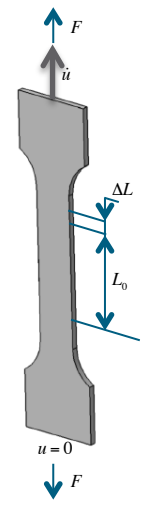
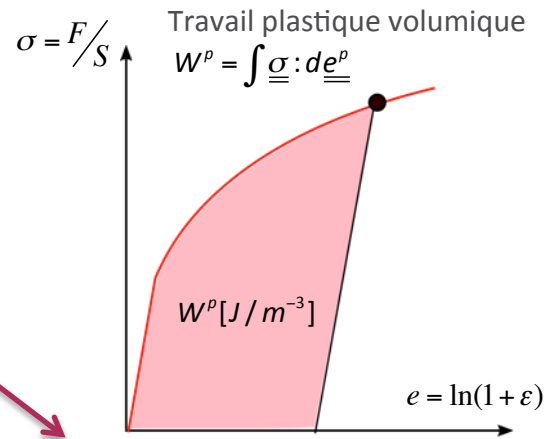
Plasticité des métaux à froid



• Critère de plasticité et chargement multiaxial

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} 0 & \tau \\ \tau & 0 \end{pmatrix}$$


$$\sigma_{eq} = f(\underline{\underline{\sigma}}) / W^p = \text{constante?}$$

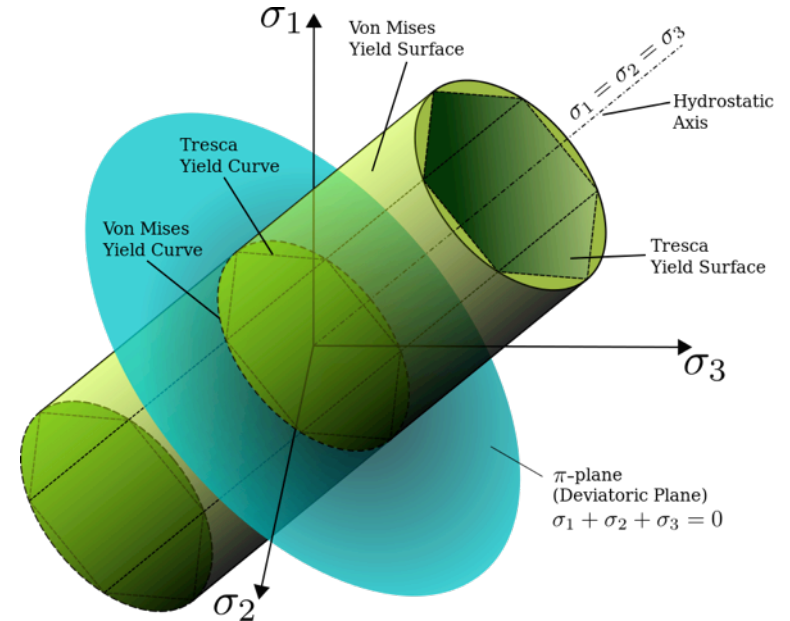
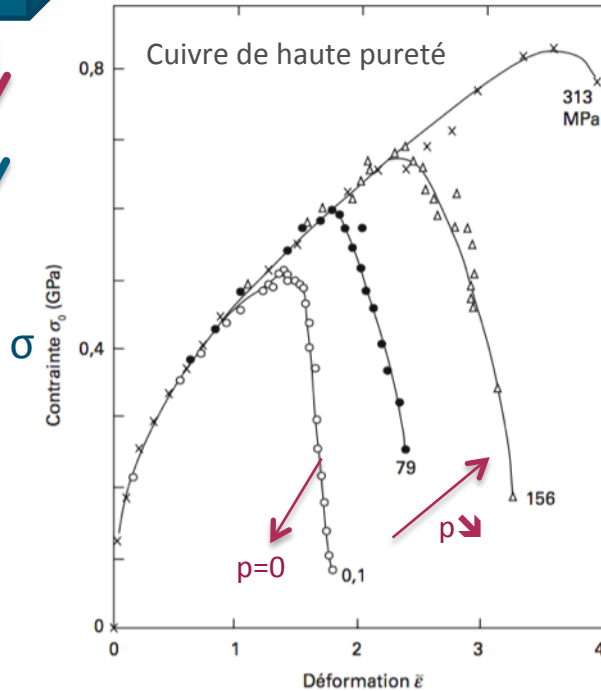
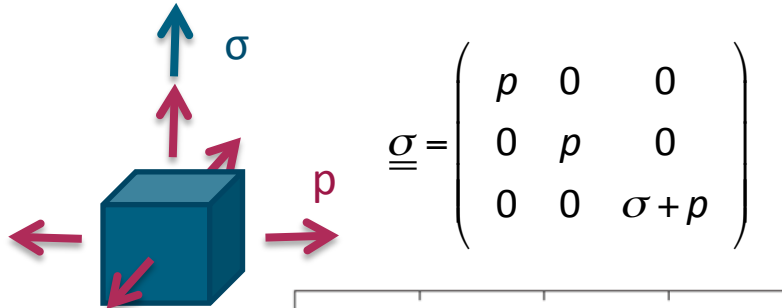
=

Surface de charge
ie critère de plasticité
ie surface seuil

Plasticité des métaux à froid



• Critère de plasticité et chargement multiaxial



La surface de charge est insensible à la pression hydrostatique

$$\sigma_{eq} = f(\underline{\underline{\sigma}}^D)$$

$$\underline{\underline{\sigma}}^D = \underline{\underline{\sigma}} - 1/3 \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{1}}$$

$\underline{\underline{\sigma}}^D$: déviateur des contraintes

$p_H = 1/3 \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{1}}$: pression hydrostatique

Plasticité des métaux à froid



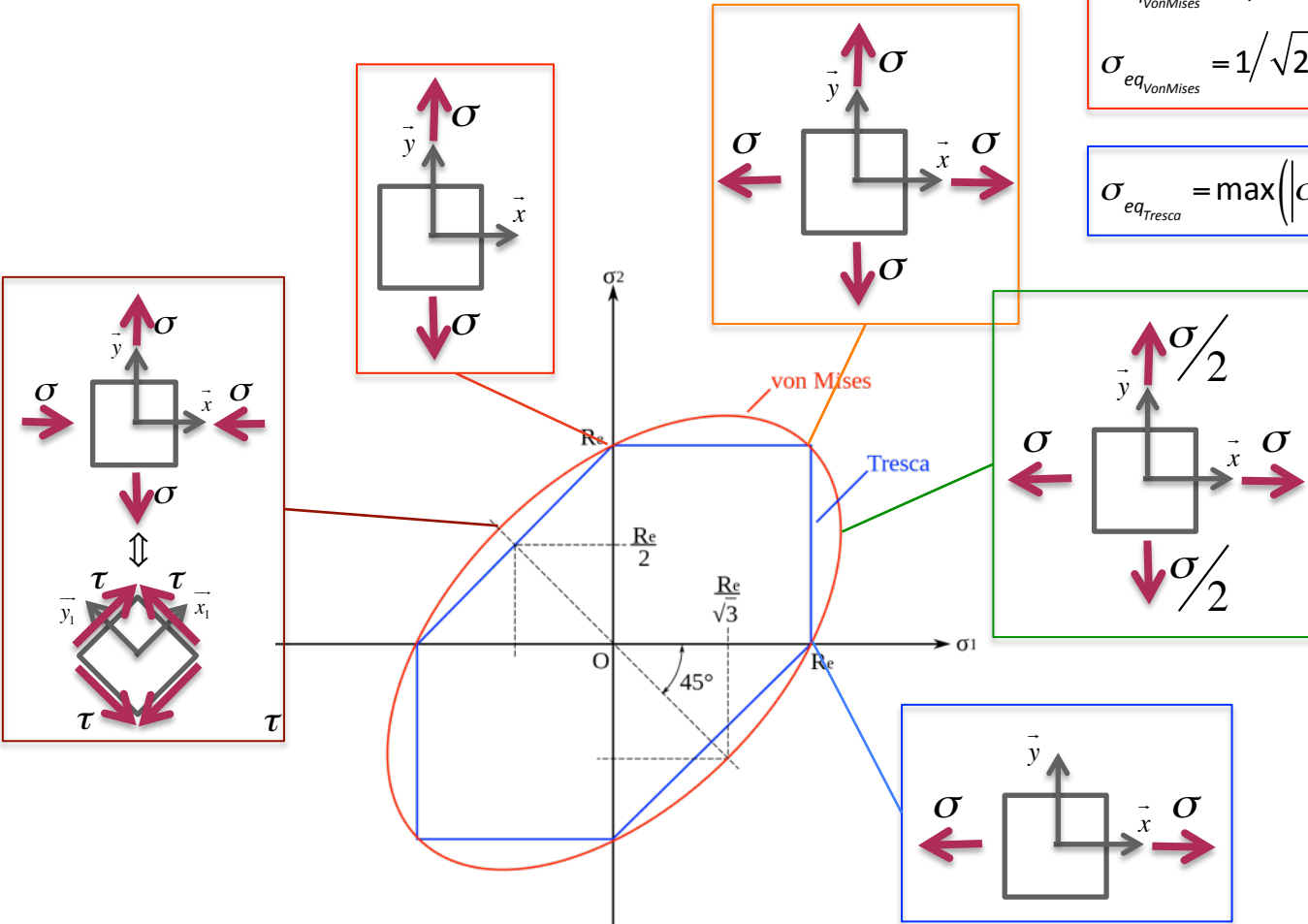
- Critère de plasticité et chargement multiaxial

$$\sigma_{eq_{vonMises}} = \sqrt{3/2 \underline{\underline{\sigma}}^D : \underline{\underline{\sigma}}^D}$$

$$\sigma_{eq_{vonMises}} = 1/\sqrt{2} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2}$$

$$\sigma_{eq_{Tresca}} = \max(|\sigma_I - \sigma_{II}|, |\sigma_{II} - \sigma_{III}|, |\sigma_{III} - \sigma_I|)$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_I & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{II} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \end{pmatrix}$$



Plasticité des métaux à froid

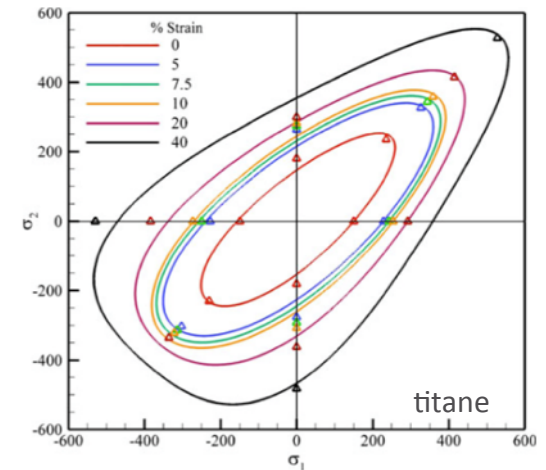
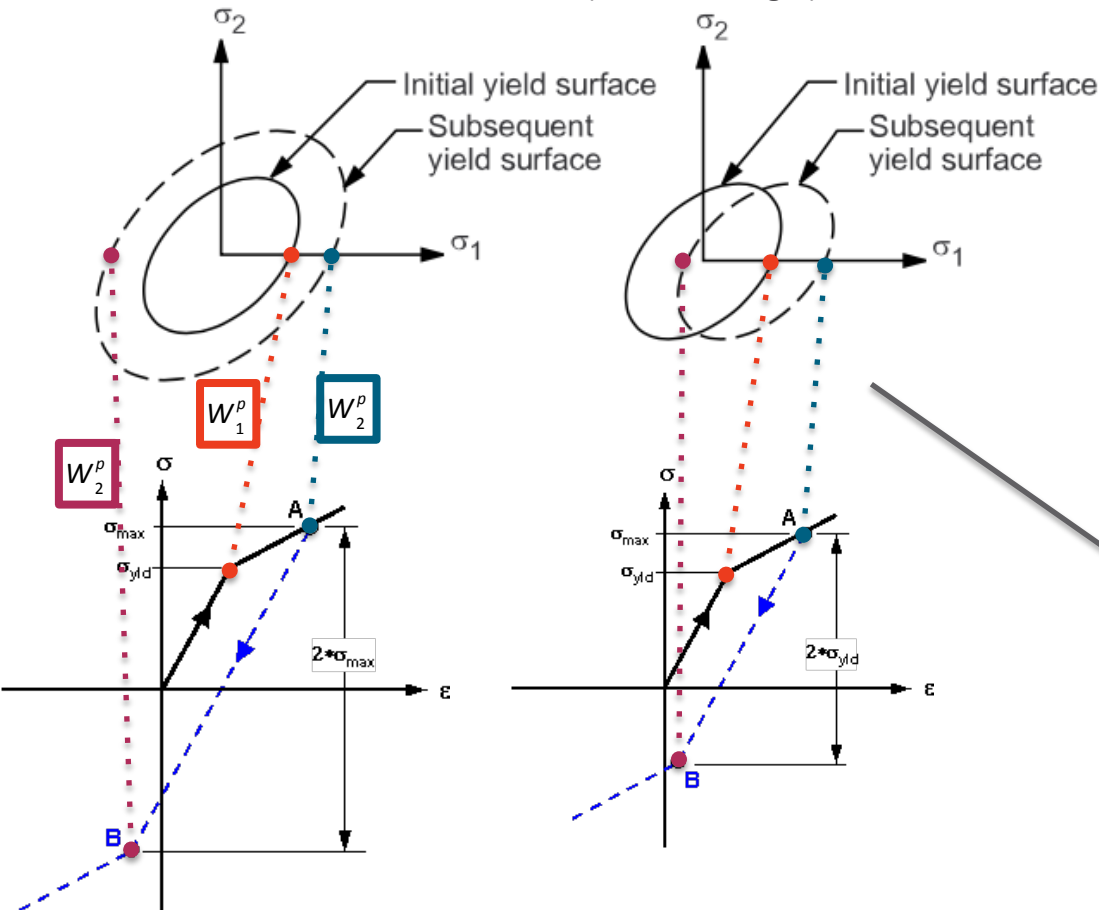


- Critère de plasticité et chargement multiaxial : Influence de l'écroutissage sur la surface de charge

Ecrouissage isotrope

Ecrouissage cinématique (effet Baushinger)

Déformation de la surface de charge induit par le travail plastique

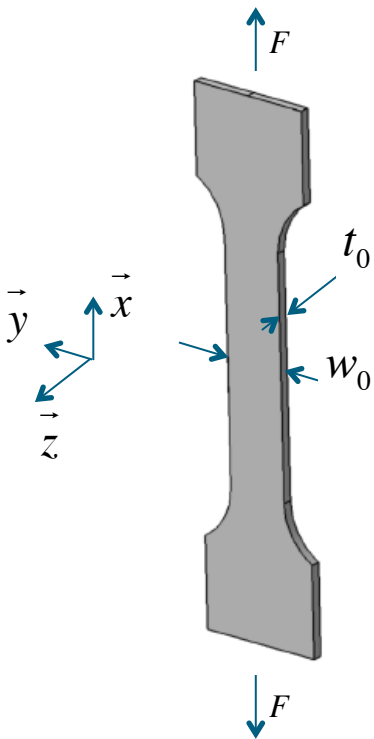


Passage d'un matériau isotrope à un matériau anisotrope lors de l'écroutissage.

Plasticité des métaux à froid



- Anisotropie : Coefficient de Lankford**
Exemple des tôles laminées



$$r = \frac{d\varepsilon_y^{pl}}{d\varepsilon_z^{pl}}$$

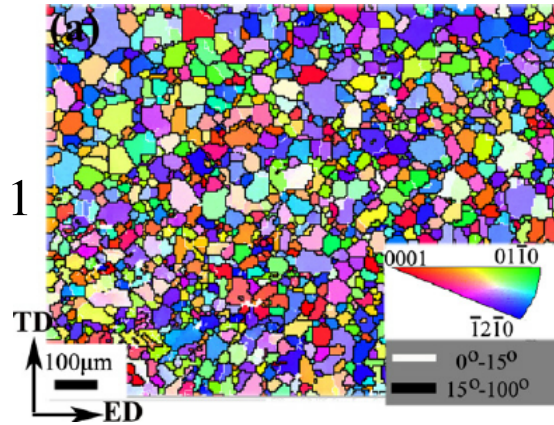
$$r = 1$$

$$r > 1$$

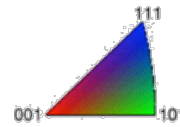
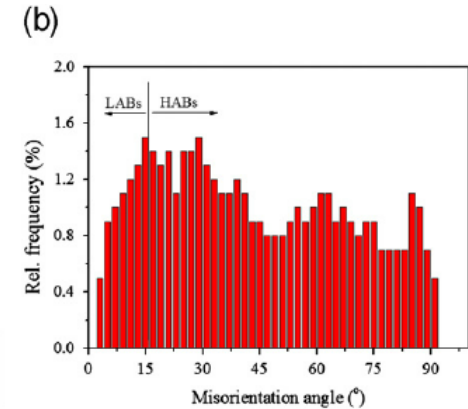
$$\varepsilon_y = \frac{\Delta w}{w_0}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t}{t_0}$$

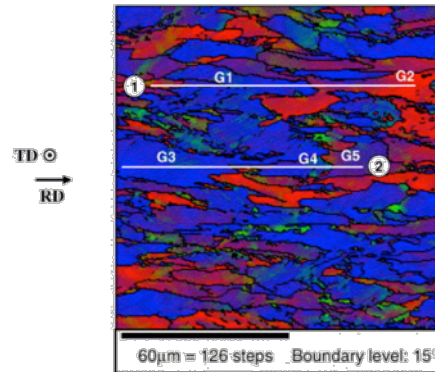
Texture EBSD : Matériau isotrope



RD : Rolling Direction
TD : Transverse direction
ED : Thickness direction

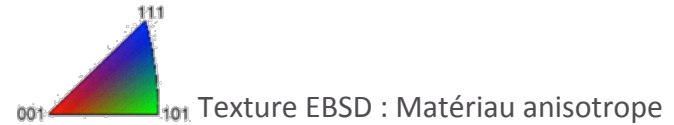


Texture EBSD : Matériau anisotrope



Les tôles ont tendance à se déformer plus facilement dans la largeur que dans l'épaisseur du fait de l'état métallurgique issu du laminage à froid (grains déformés, orientations cristallographiques préférentielles).

Plasticité des métaux à froid



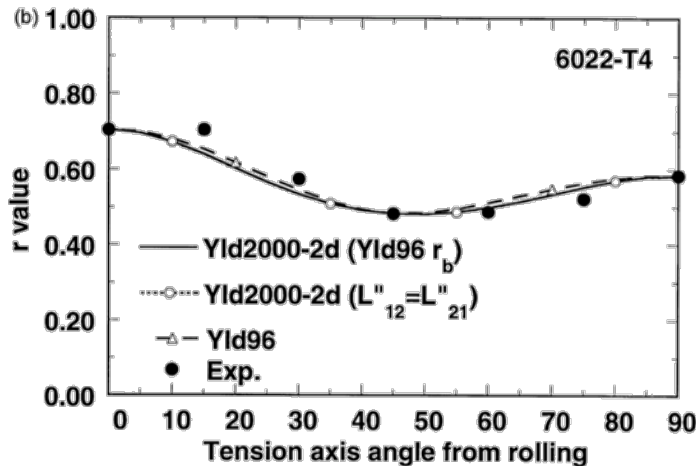
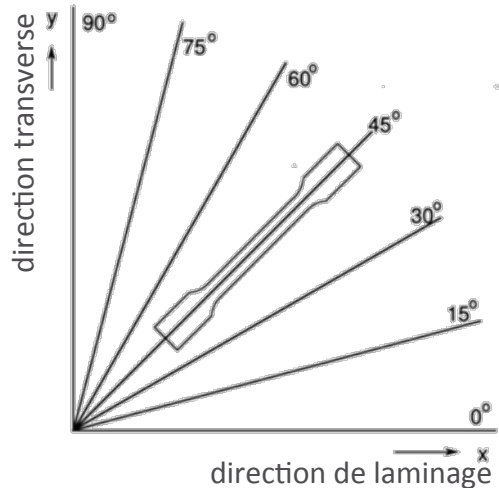
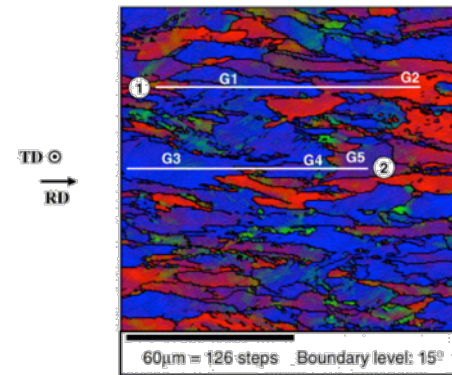
- **Anisotropie moyenne et planaire**
Exemple des tôles laminées

Anisotropie moyenne :

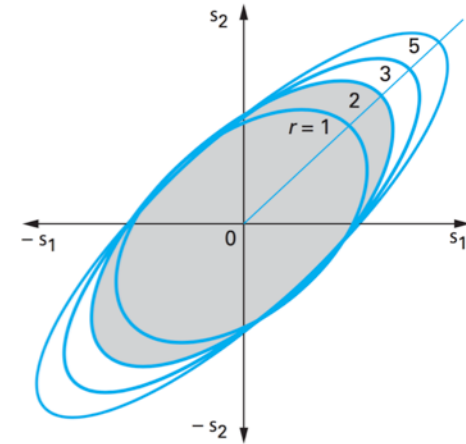
$$r_{moy} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$$

Anisotropie planaire :

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$



exemple de critère anisotrope simple utilisé pour les tôles en acier

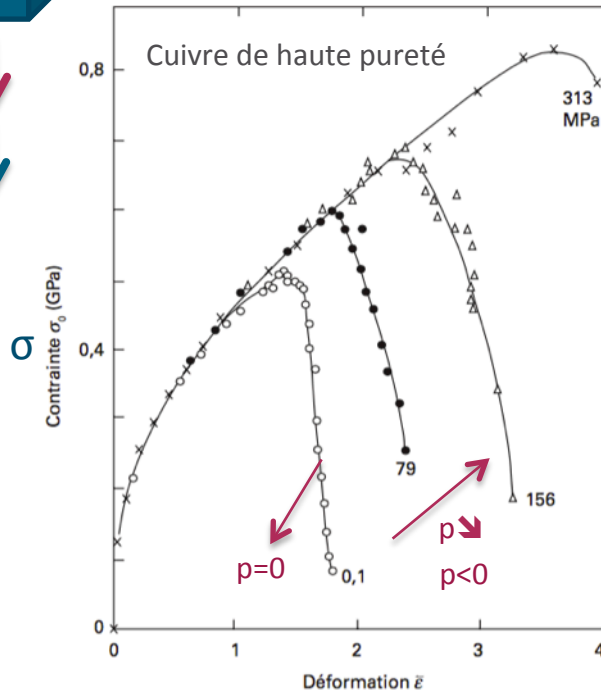
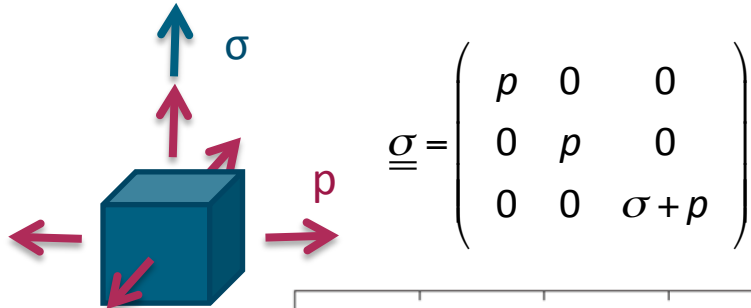


© critère de Hill 1948

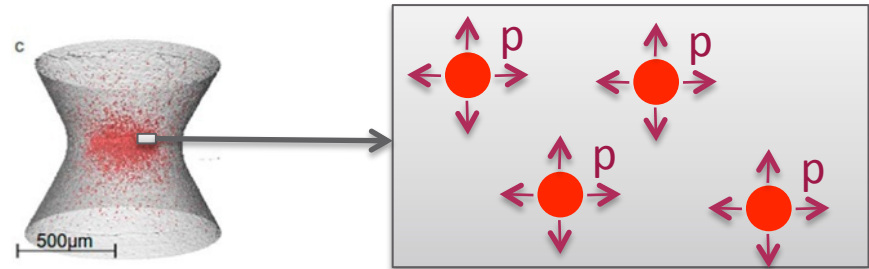
Plasticité des métaux à froid



- Chargement multiaxial, endommagement



Plus la pression hydrostatique comprime le matériau plus la rupture est retardée (endommagement ductile retardé).



La croissance de **cavités** est dépendante au premier ordre de la pression hydrostatique.

Rq : Les fortes déformations permises lors de certains procédés de mise en forme des métaux telle que le matriçage est lié au confinement entre matrices qui permet de diminuer la pression hydrostatique.

Plasticité des métaux à froid

- ϵ_{pl} : Déformation permanente à volume constant
- Propriétés intrinsèques du matériau obtenues à partir d'un essai de traction :
 - Limite d'élasticité R_e
 - Limite à rupture R_m
 - Elongation uniformément réparti A_g
- Propriétés dépendantes de la géométrie de l'éprouvette obtenues à partir d'un essai de traction :
 - Elongation à rupture $A\%$ (nécessité d'une normalisation pour comparaison)
- La façon dont une structure plastifie et localise les déformations dépend de sa géométrie et du chargement appliqué (traction/compression uniaxiale, plane, biaxiale...).
 - Plus le chargement est confiné (pression hydrostatique négative), plus la rupture est retardée
- Une forte déformation plastique peut modifier la texture du matériau. Les propriétés physiques du matériau peuvent ainsi devenir anisotropes (dépendantes de la direction de chargement).

Plasticité des métaux à chaud

- Que se passe t'il à chaud?



Mise en forme à froid

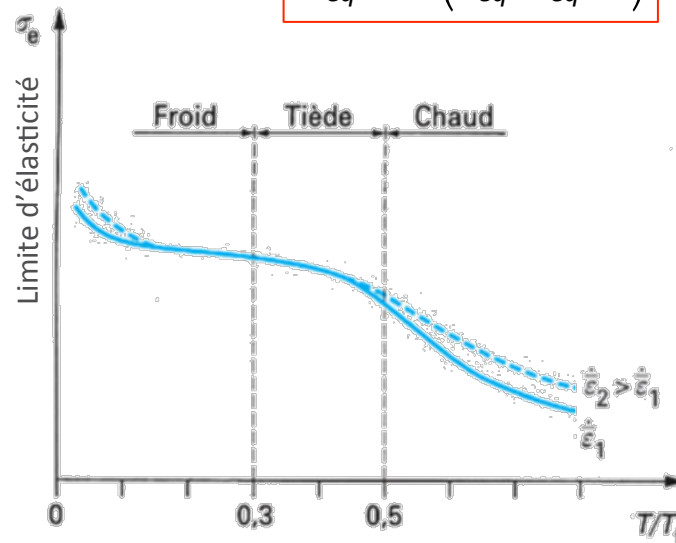
Plasticité

$$\sigma_{eq} = f(\varepsilon_{eq})$$

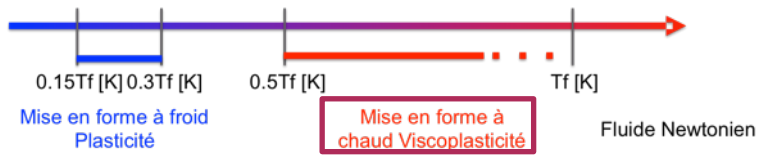
Mise en forme à chaud

Viscoplasticité

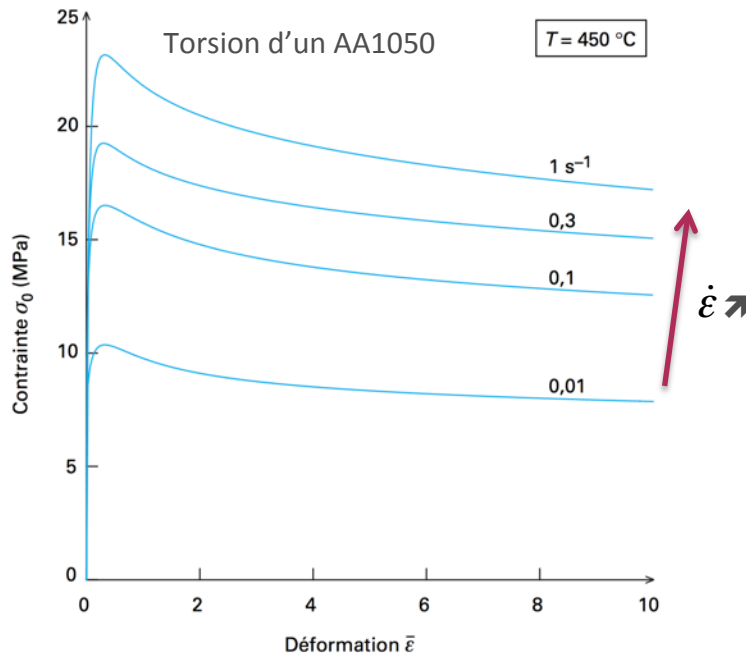
$$\sigma_{eq} = f(\varepsilon_{eq}, \dot{\varepsilon}_{eq}, \theta)$$



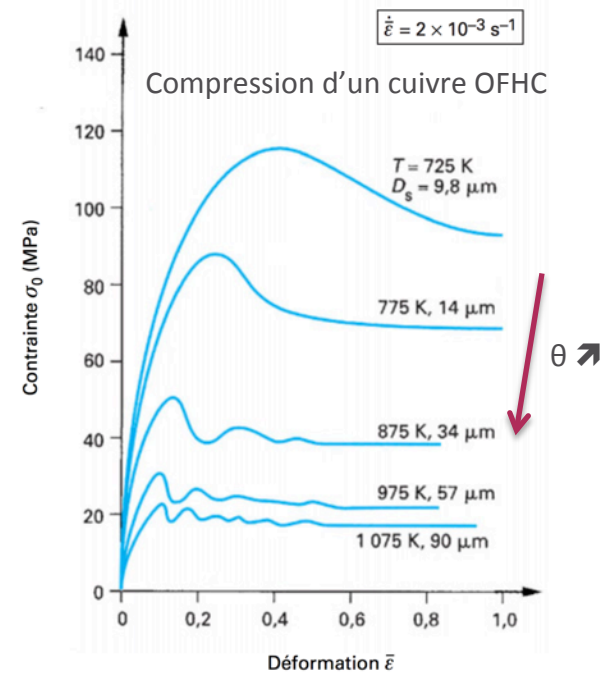
Plasticité des métaux à chaud



Comportement à chaud

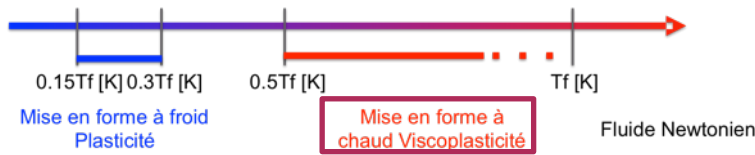


Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques

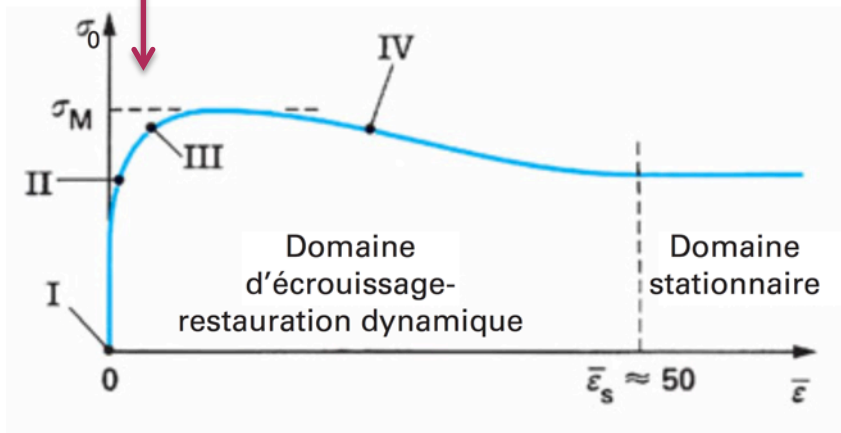
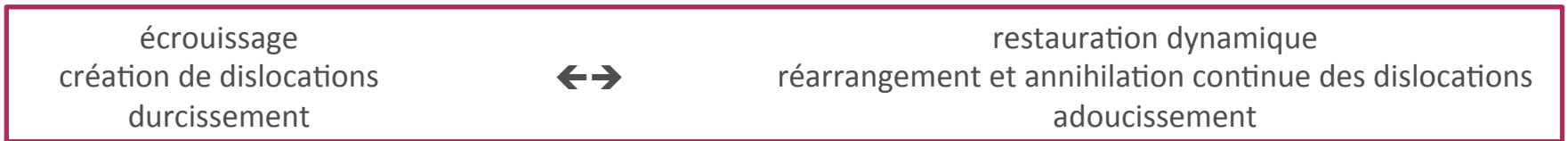


Matériaux à faible énergie de défaut d'empilement
Cuivre, laitons, fer γ , aciers austénitiques

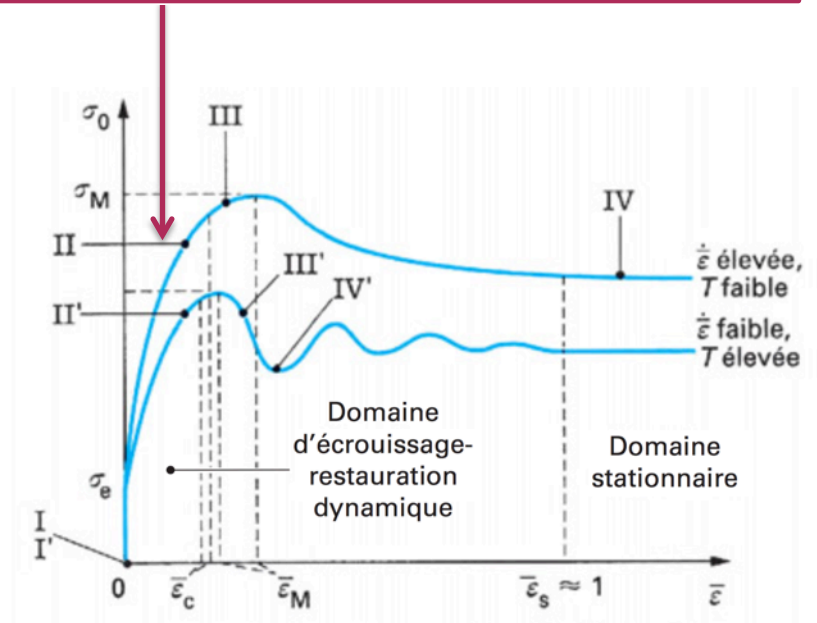
Plasticité des métaux à chaud



- Comportement à chaud : déformation faible jusqu'à R_m

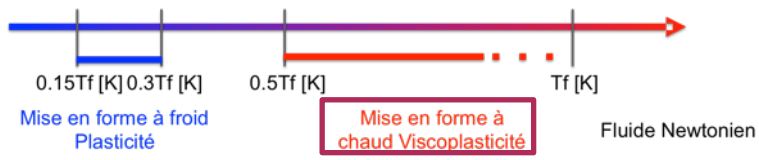


Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques

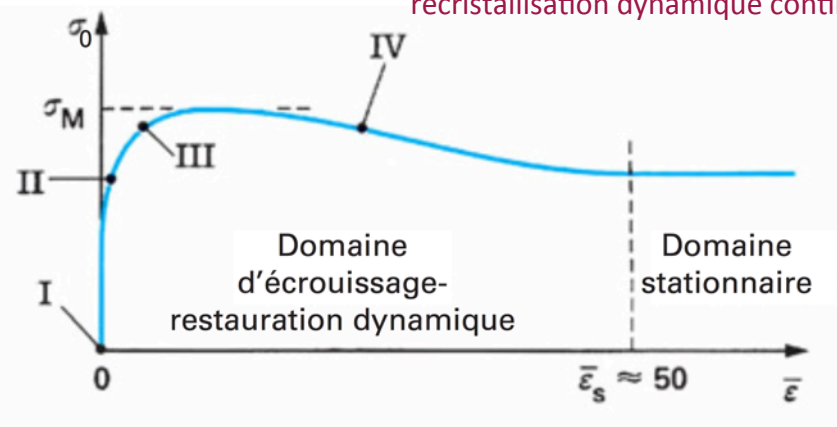
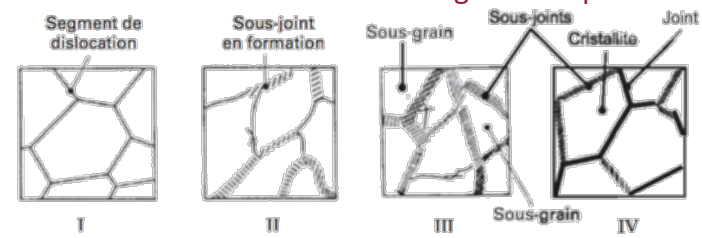
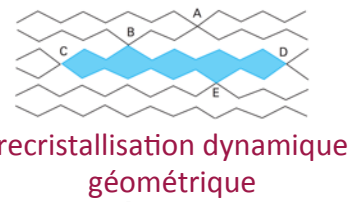


Matériaux à faible énergie de défaut d'empilement
Cuivre, laitons, fer γ , aciers austénitiques

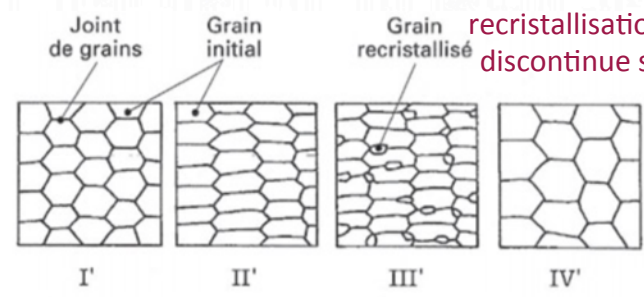
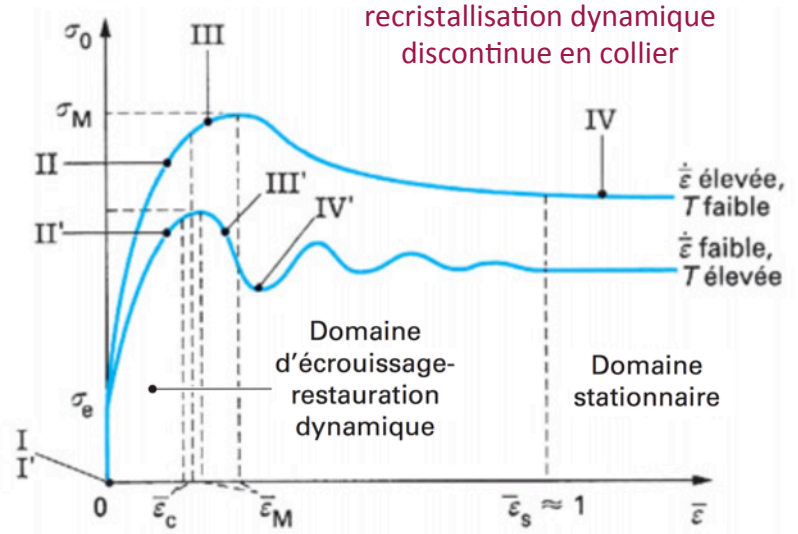
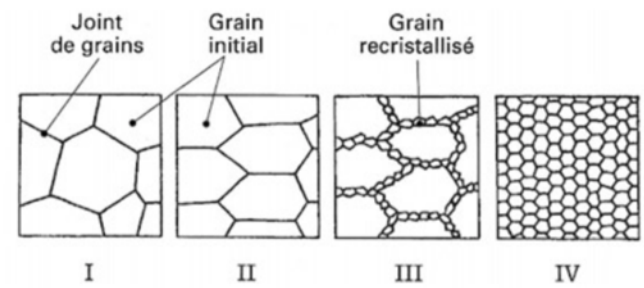
Plasticité des métaux à chaud



Comportement à chaud : forte déformation



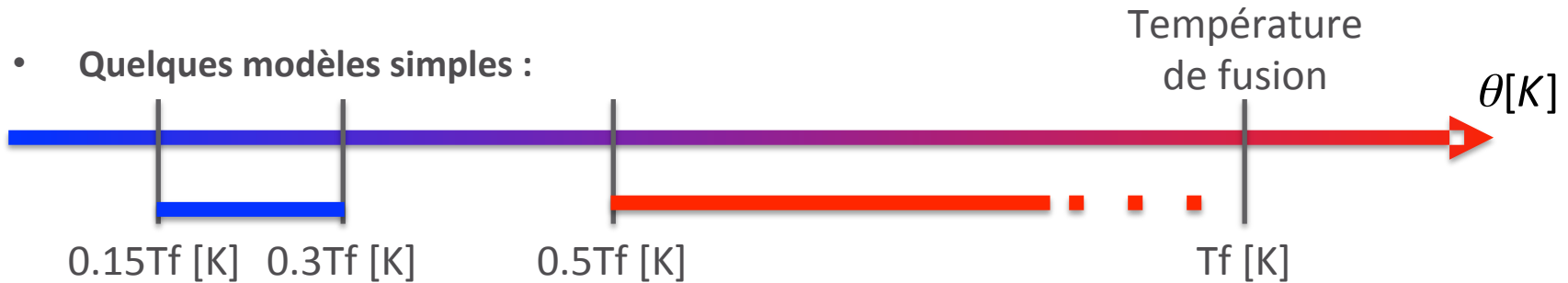
Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques



Matériaux à faible énergie de défaut d'empilement
Cuivre, laitons, fer γ , aciers austénitiques

Plasticité des métaux à chaud

- Quelques modèles simples :



Mise en forme à froid
Plasticité

$$\sigma_{eq} = f(\varepsilon_{eq})$$

Swift :

$$\sigma_{eq} = k(\varepsilon_0 + \varepsilon_{eq})^n$$

Mise en forme à chaud
Viscoplasticité

$$\sigma_{eq} = f(\varepsilon_{eq}, \dot{\varepsilon}_{eq}, \theta)$$

Norton Hoff généralisé \rightarrow Norton Hoff

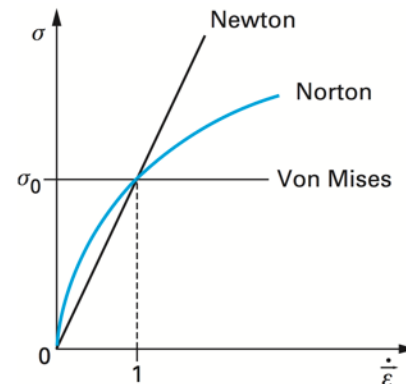
$$\sigma_{eq} = \sigma_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon_{eq})^n \dot{\varepsilon}_{eq}^m e^{-\beta(\theta - \theta_0)} \rightarrow \sigma_{eq} = \sigma_1 \dot{\varepsilon}_{eq}^m$$

Fluide Newtonien

$$\sigma_{eq} = f(\dot{\varepsilon}_{eq})$$

Newton :

$$\sigma_{eq} = K \dot{\varepsilon}_{eq}$$



n : coefficient d'écrouissage ($n < 1$, \searrow avec θ)

m : indice de viscosité ($m < 1$, \nearrow avec θ)

β : coefficient de thermodépendance

Plasticité des métaux à chaud

- Le comportement à chaud est sensible à la déformation, à la vitesse de déformation ainsi qu'à la température.
- La sensibilité à la vitesse de déformation augmente avec la température.
- La sensibilité à la déformation (écrouissage), diminue avec la température.
- Le chargement induit un traitement thermomécanique responsable de l'évolution de la microstructure du matériau en même temps que sa mise en forme (texture, morphologie des grains...)
 - Le phénomène de recristallisation permet d'augmenter fortement la ductilité.
- Il est possible de maîtriser le traitement thermomécanique lors de la mise en forme (montée en température, mise en forme, refroidissement, éventuel traitement thermique) afin d'optimiser les caractéristiques physiques de la pièce obtenue.

Conséquences sur les procédés de mise en forme par déformation plastique

- **Procédés de mise en forme à chaud :**

Valeur faible de contrainte d'écoulement (diminution des dépenses énergétiques / Modification de section)



Restauration continue de la ductilité (meilleure formabilité)

Traitement thermomécanique (remodelage de la microstructure)



Qualité dimensionnelle

état de surface (métallurgique et géométrique)

- **Procédés de mise en forme à froid**

état de surface



tolérances dimensionnelles

Augmentation des propriétés mécaniques (écrouissage)



Nécessité d'ajouter des traitement de recuit entre séquence de mise en forme

Maîtrise de la lubrification

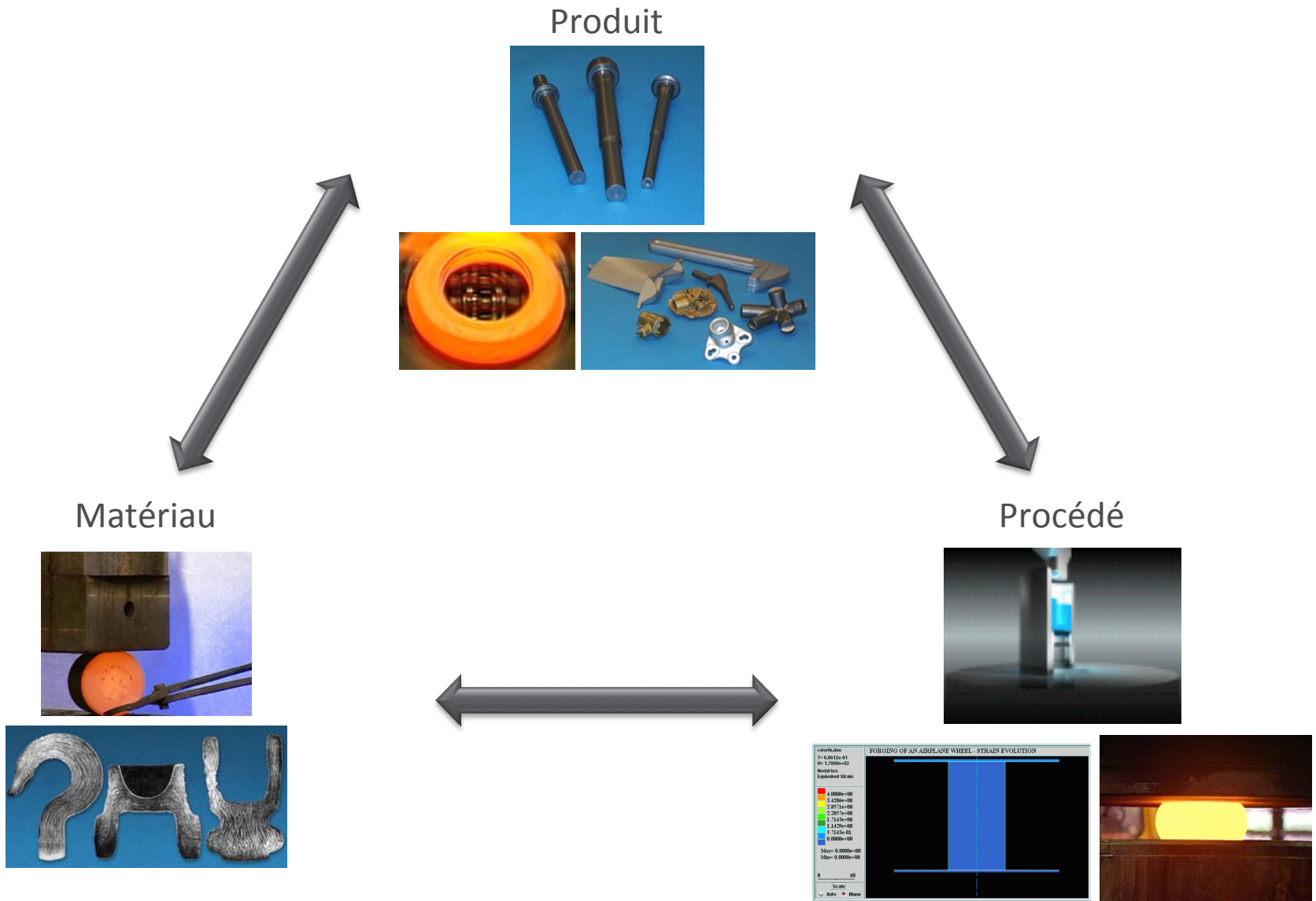
INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

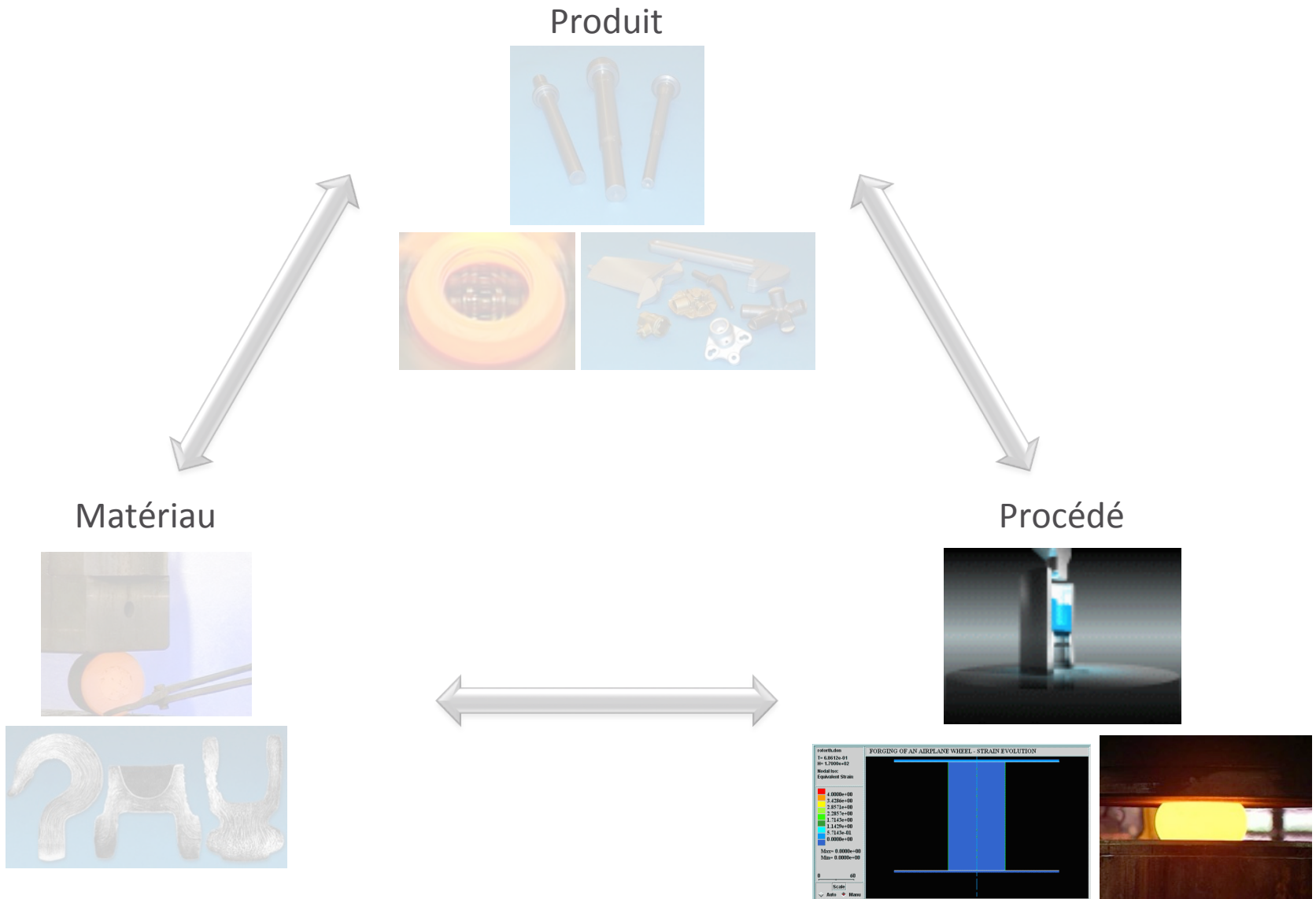
Mise en forme des métaux en volume

Focus sur forge libre - estampage/matriçage - extrusion

Mise en forme par déformation plastique



Mise en forme par déformation plastique



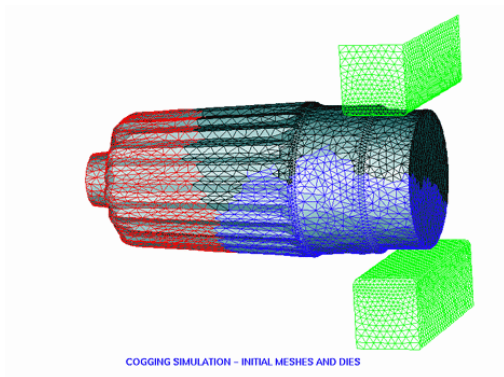
Procédés - Principes généraux

Compression d'un métal entre des outillages au moyen d'un engin qui fournit l'énergie

Forge libre

Réalisation d'une pièce par une succession d'opérations élémentaires à l'aide d'outillages simples et peu coûteux.

$$\theta [K] > \theta_{\text{recristallisation}}$$



Estampage / matriçage

Réalisation d'une pièce par une succession d'opérations à l'aide d'outillages spécifiques.

$$\theta [K] > \theta_{\text{recristallisation}}$$



Extrusion

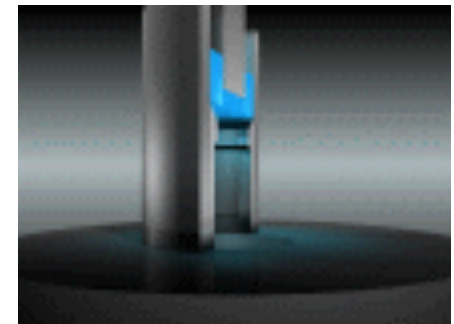
Réalisation d'une pièce par une succession d'opérations visant à obliger un lopin enfermé dans un container et comprimé par un poinçon à passer totalement ou partiellement dans une filière.

à froid :

$$0,15\theta_{\text{fusion}} < \theta [K] < 0,3\theta_{\text{fusion}}$$

à mi-chaud :

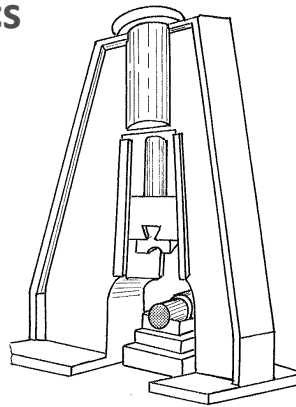
$$0,5\theta_{\text{fusion}} < \theta [K] < \theta_{\text{recristallisation}}$$



Procédés - Machines

Travail par chocs Marteau- Pilon

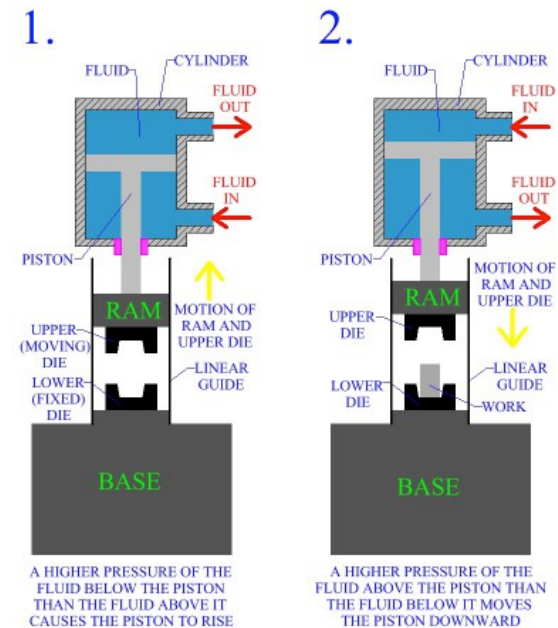
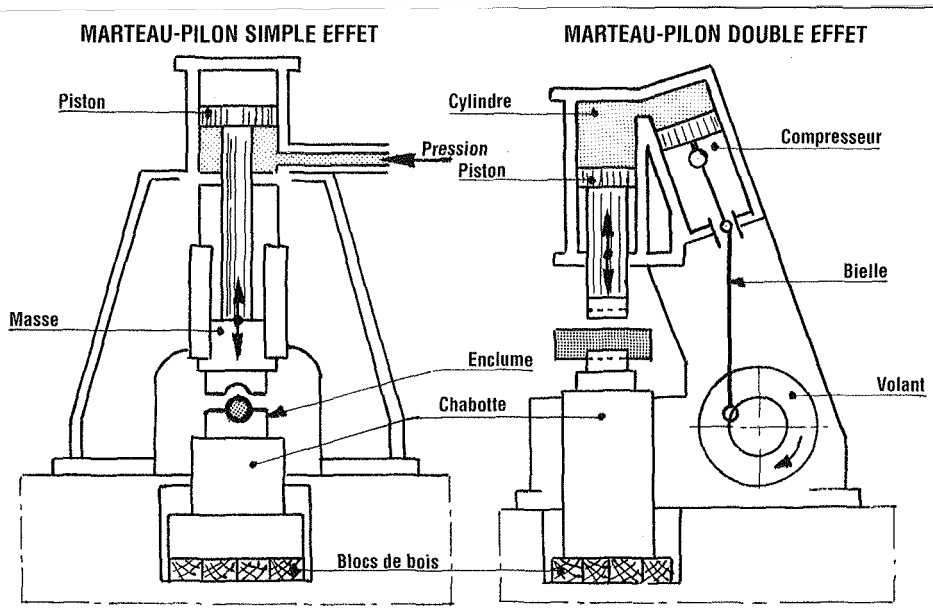
V impact > 1m/s
300kJ (max 800kJ)
Cadence faible :
<1 coups / min



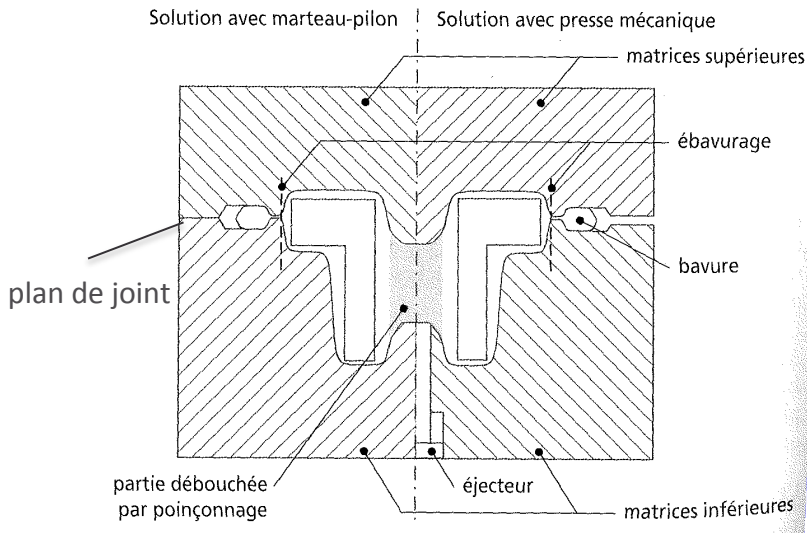
Travail par pression Presse

Mécanique ou hydraulique
V impact < 1m/s
1,5-5tonnes

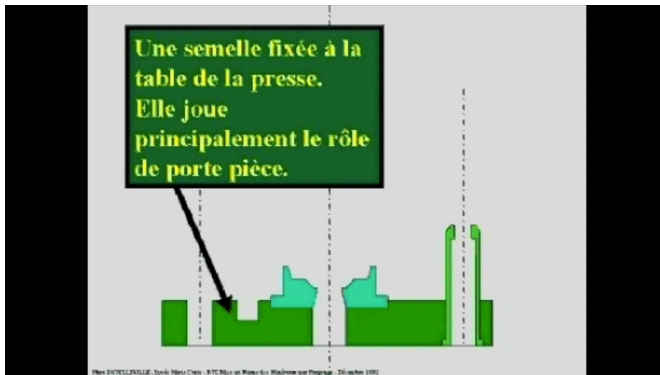
Cadence élevée :
mécanique : 20-70 coups/min
Hydraulique : 5-25 coups/min mais course importante



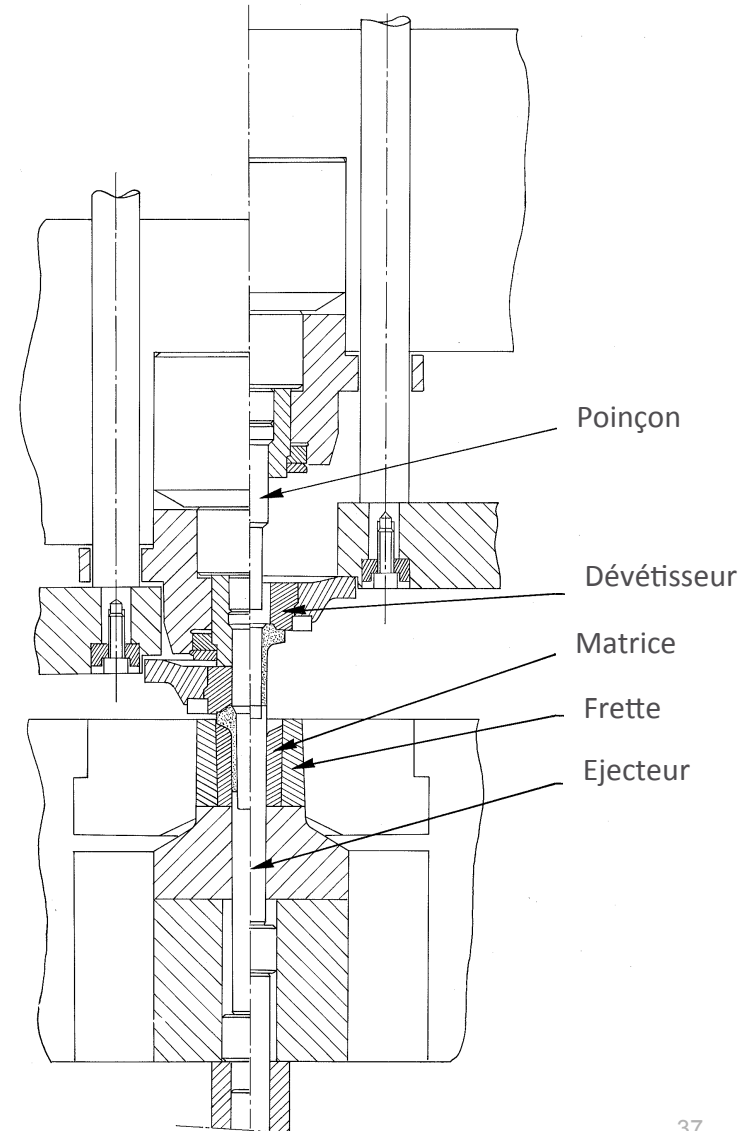
Estampage / matriçage



Ebavurage

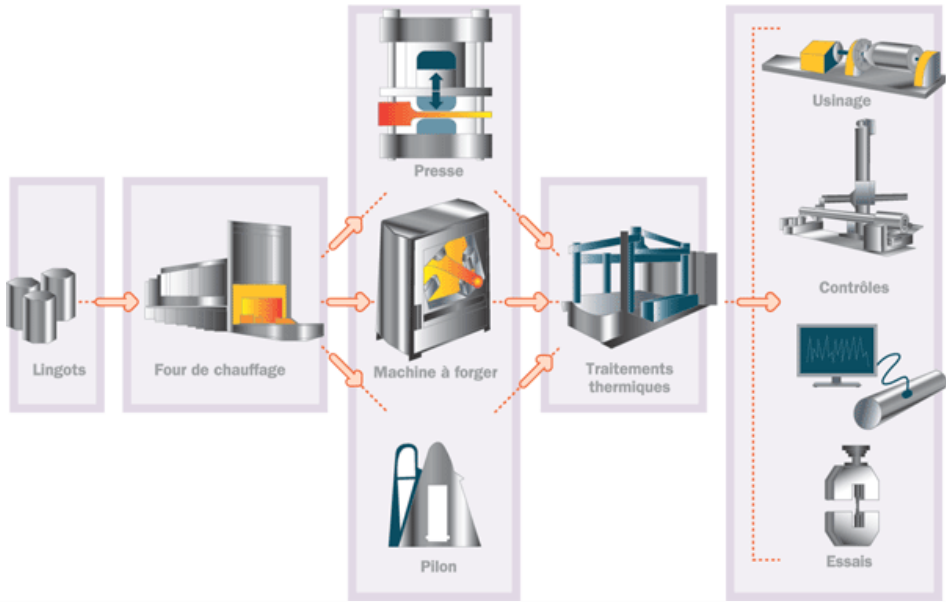


Extrusion

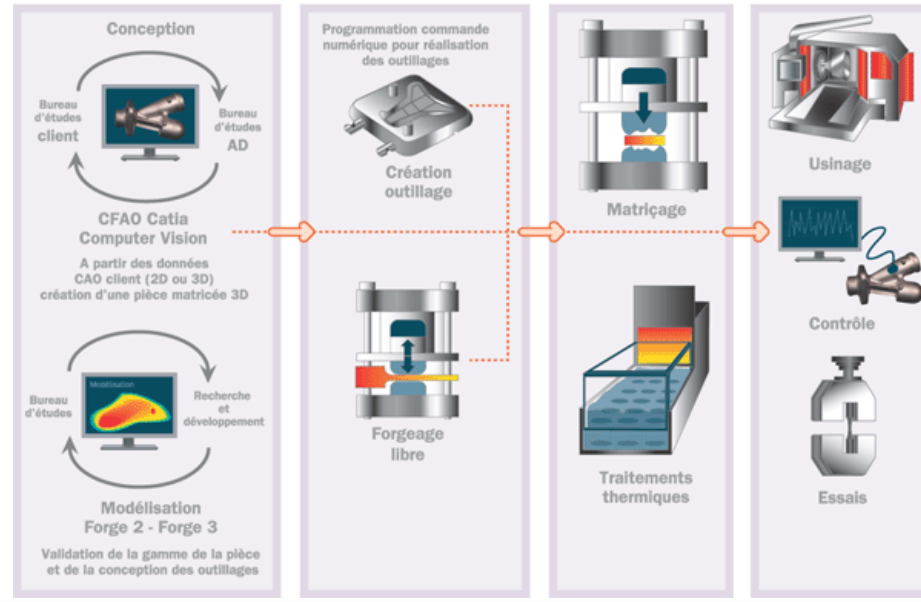


Procédés - Gamme macroscopique

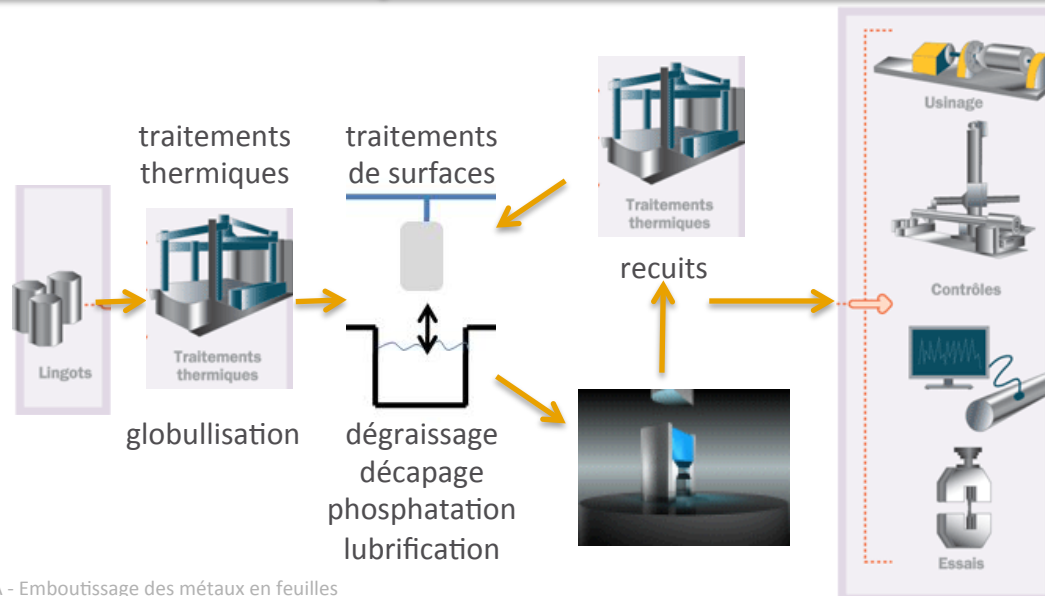
Forge libre



Estampage/matriçage



Extrusion



Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

- Forges libres



Étirage



Poinçonnage



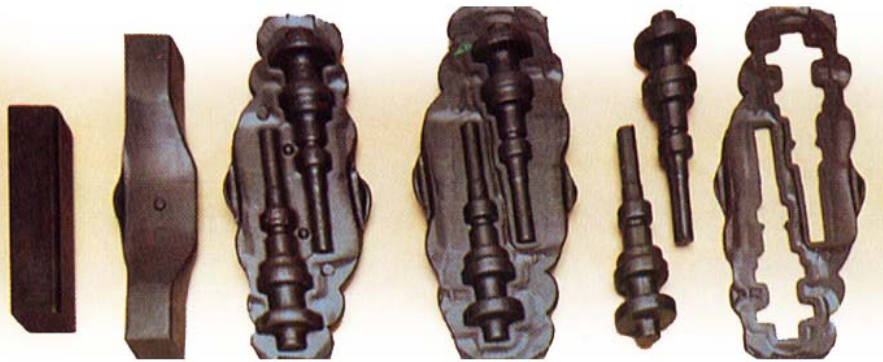
Planage



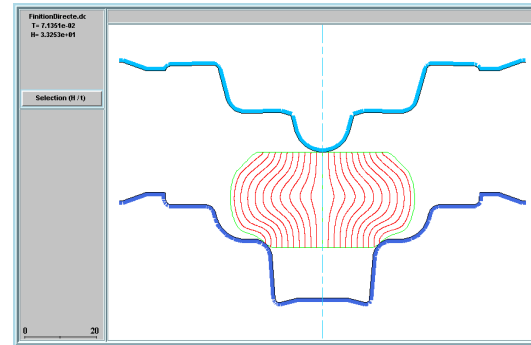
bigornage

Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

- Estampage / Matriçage



Finition directe = défaut



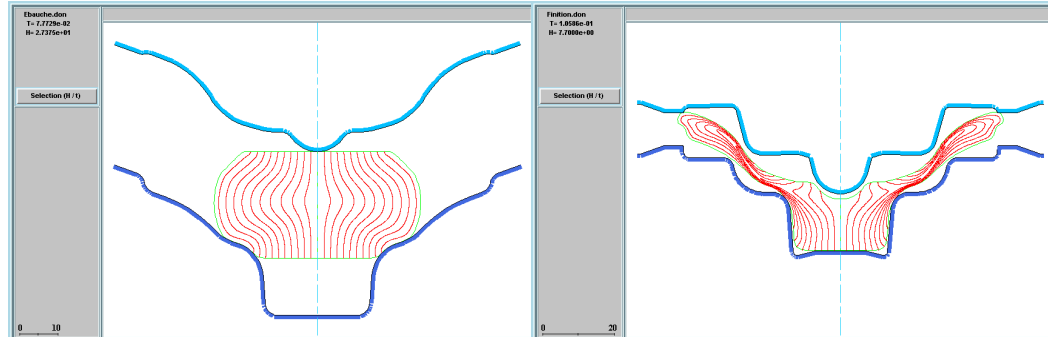
débitage lopin par cisailage ou sciage au strict volume souhaité (pièce + bavures)

opérations d'estampage

ébavurage

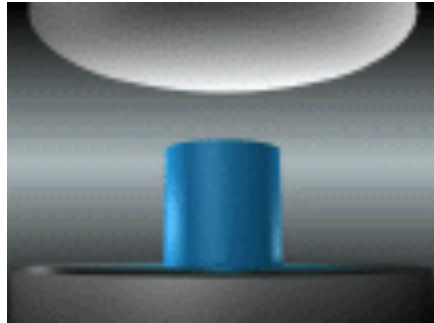
ébauche intermédiaire

finition

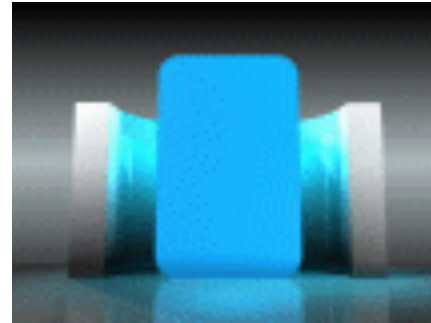


Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

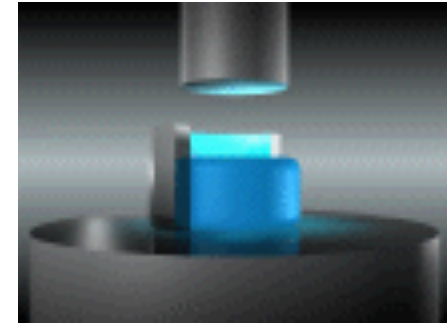
- Extrusion



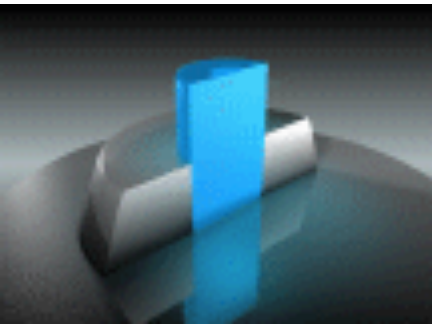
Ecrasage



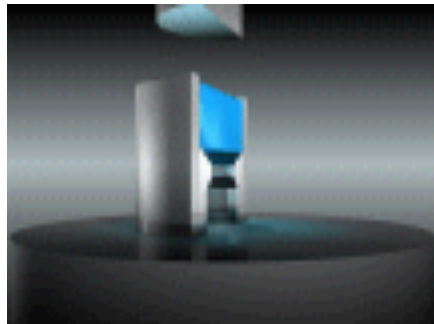
Préformage



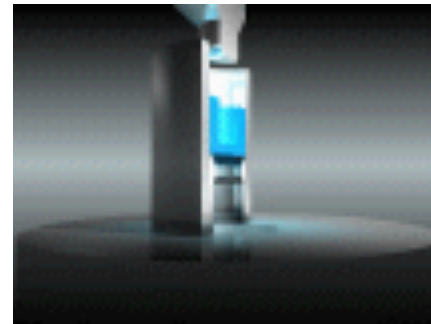
Poinçonnage



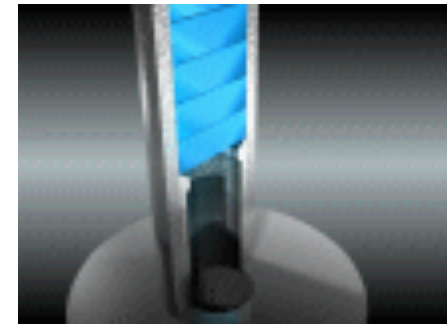
Refoulage



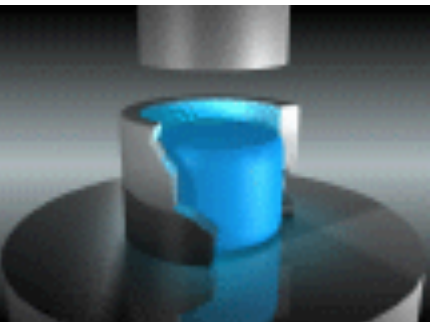
Filage direct



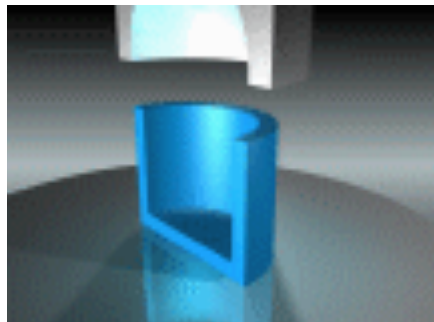
Filage direct creux



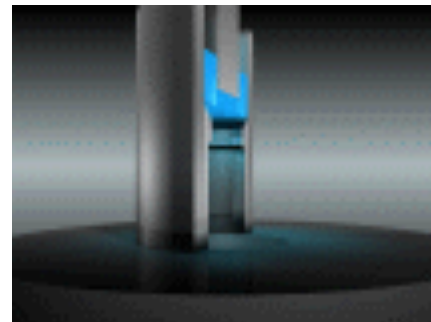
Filage direct en enfilade



Filage latéral



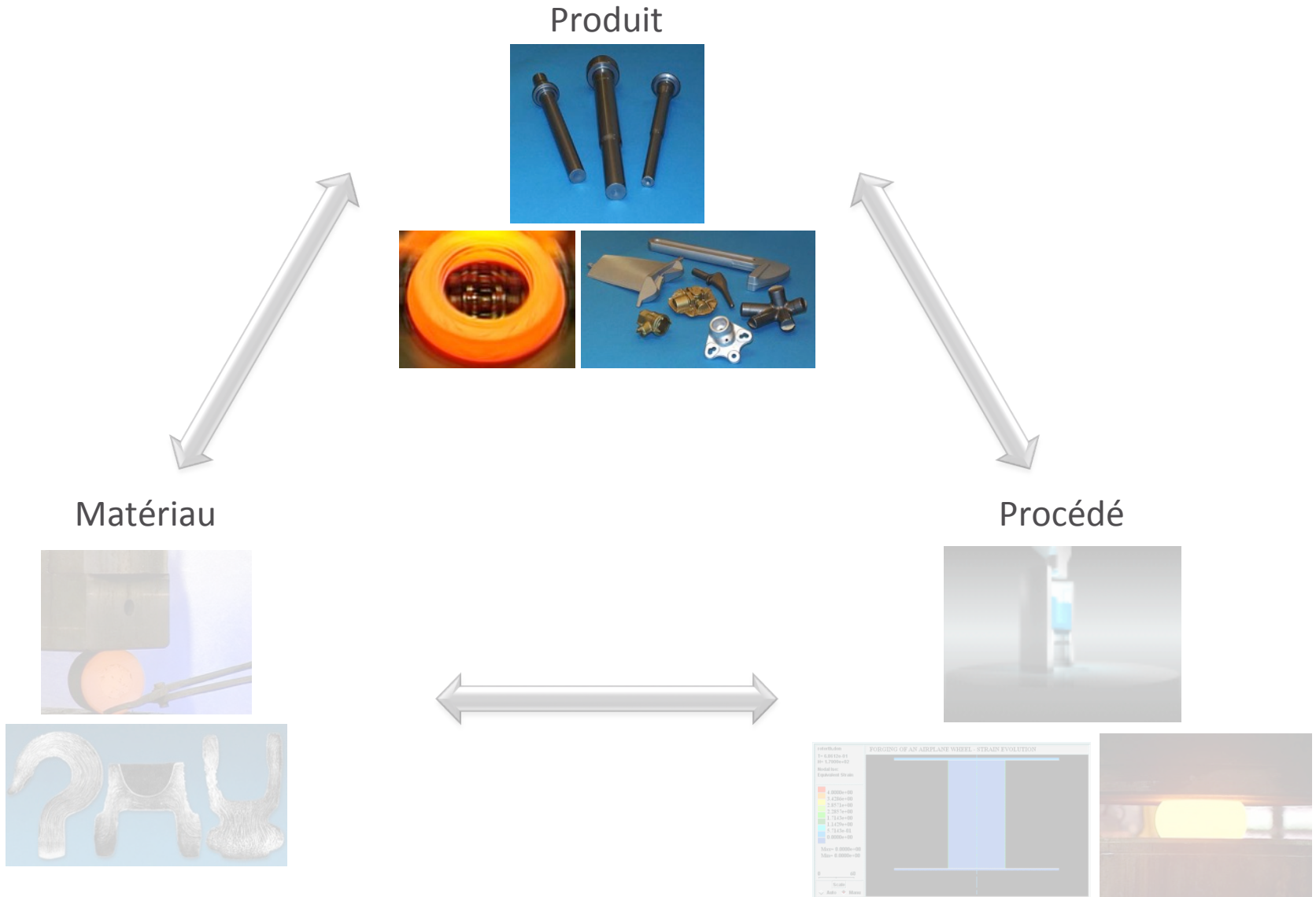
Ogivation



Etirage

Filage inverse ...

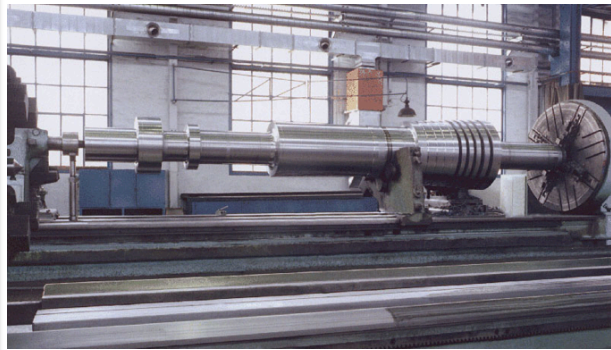
Mise en forme par déformation plastique



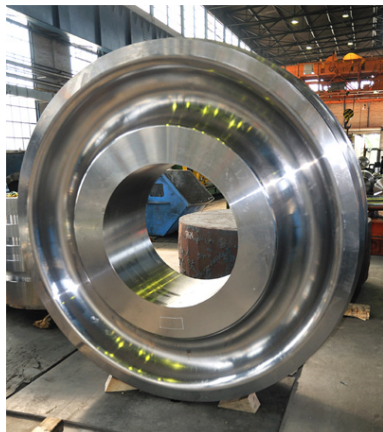
Produits

Forge libre

Pièces de structure, formes simples



arbre turbine



Disque pour roue hydraulique

Estampage / matriçage

Pièces de structure, formes plus complexes

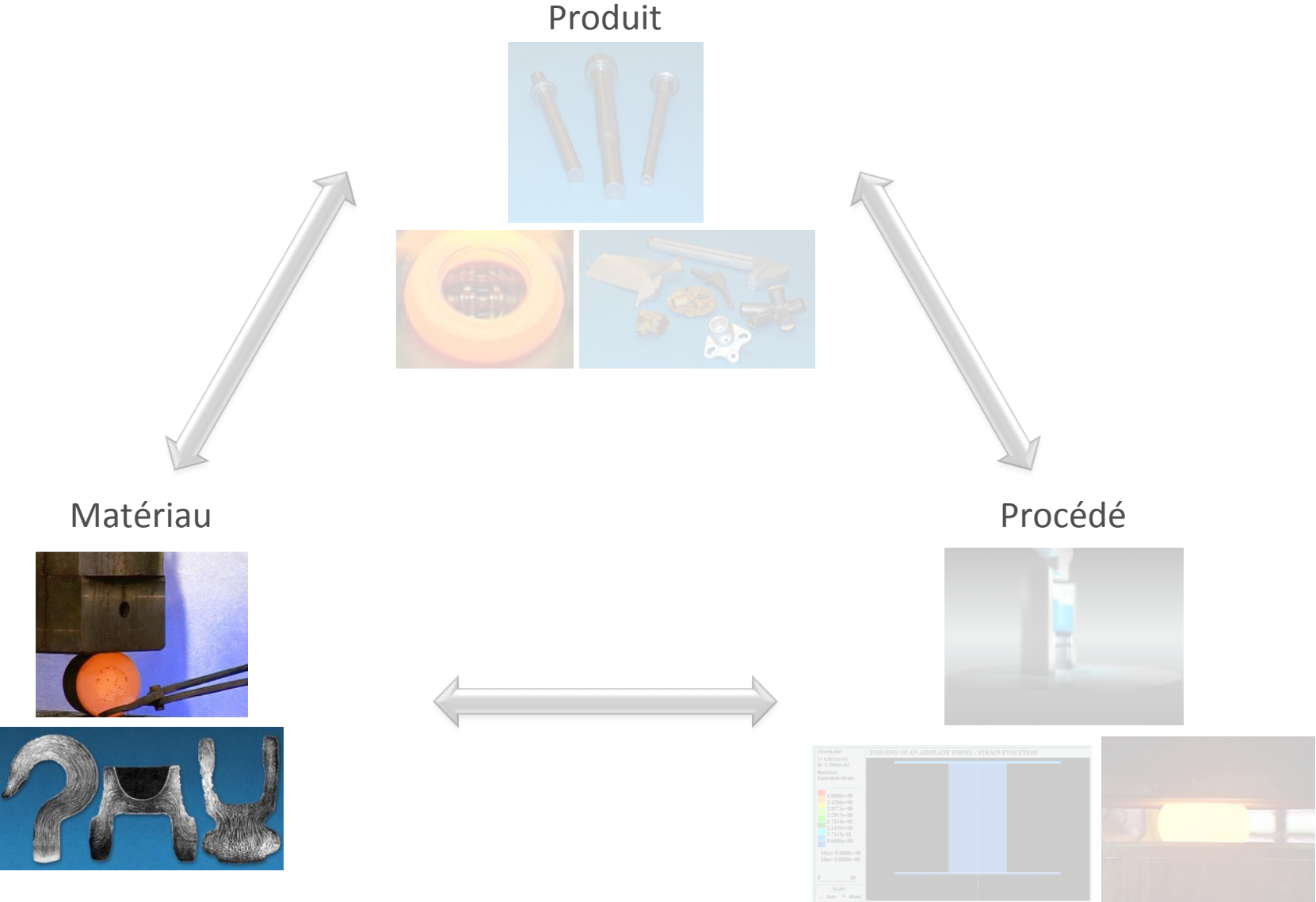


Extrusion

arbres plus ou moins complexes



Mise en forme par déformation plastique



Matériaux - Lopins

Forge libre / estampage

Aciers d'usage générales :

E335, E355...

Aciers au carbone :

<C45

Aciers alliés :

25CrMo4, 42CrMo4, 30CrNiMo8...

Aciers de cémentation :

16MnCr5, 18NiCr5-4,

20NiCrMo2-2...

Aciers à roulement :

100Cr6

Aciers à outils :

X160CrMoV12, X38CrMoV5-1 ...

Forge libre / matriçage

Principaux Alliages d'aluminium :

(nombreuses applications y compris pièces de structures)

-à durcissement par écrouissage :

4032, 5754, 5086

-à durcissement structural :

2011, 2014, 2017A, 2618A, 2024, 6061, 6082, 7020, 7075

Principaux alliages de titane :

(Pièces de structure,

compresseurs de réacteurs (à chaud)...))

TA6V, TA6ZD, TA5E, Ti 10-2-3...

Principaux alliages de cuivre :

-Laitons (robinetterie):

CuZn39Pb2, CuZn39Pb0.8, ...

Extrusion

Aciers au carbone :

< C45

Aciers faiblement alliés :

au bore, chrome, manganèse, molybdène, nickel

Principaux alliages de cuivre :

-cuvres (faiblement alliés), laitons, bronzes, cupro-aluminium, cupro-nickel

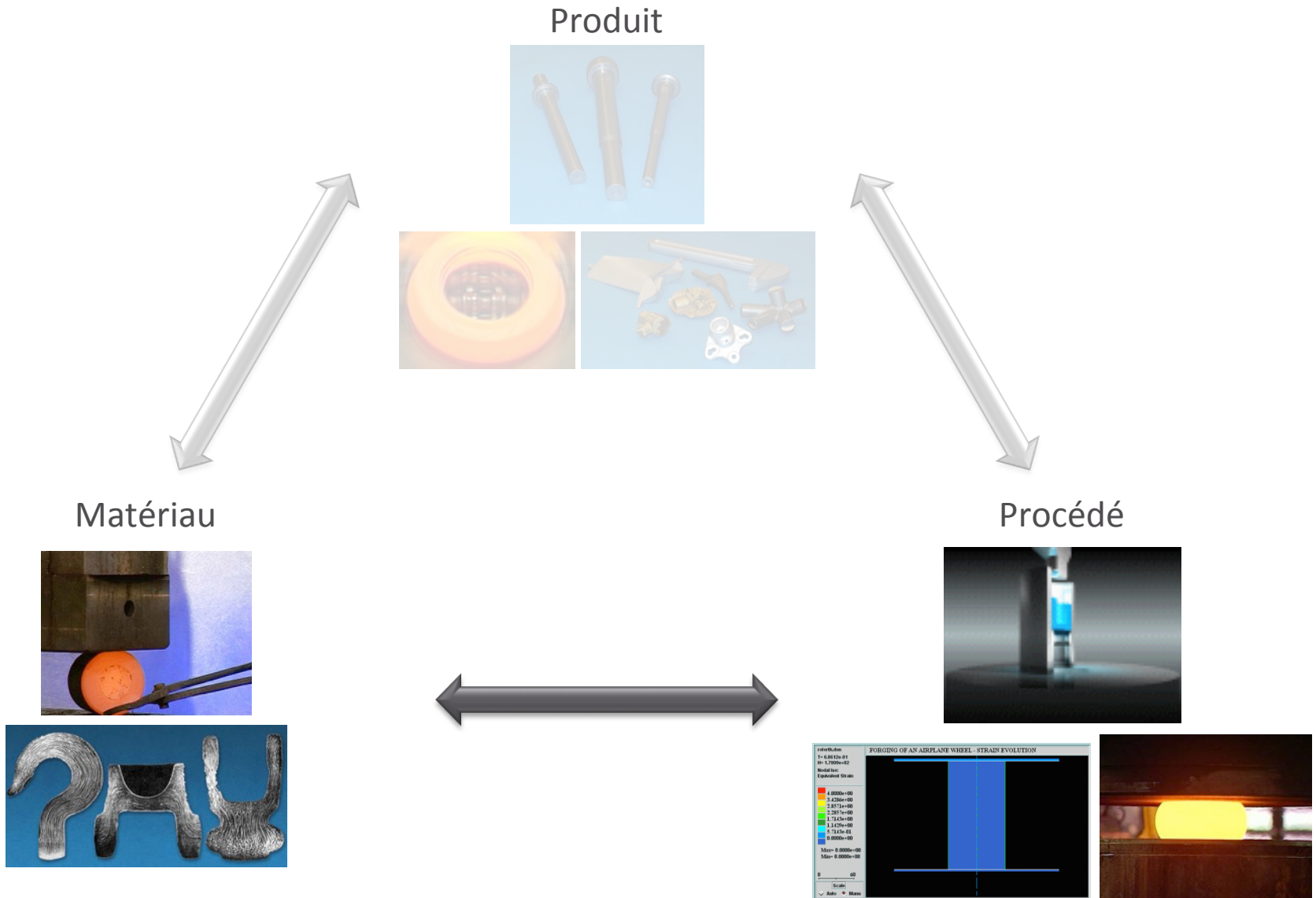
Principaux Alliages d'aluminium :

-à durcissement par écrouissage : 1200, 1100, 5005, 5052...

-à durcissement structural :

2014, 2017A, 2030, 2024, 6061, 6082, 7005A, 7075...

Mise en forme par déformation plastique

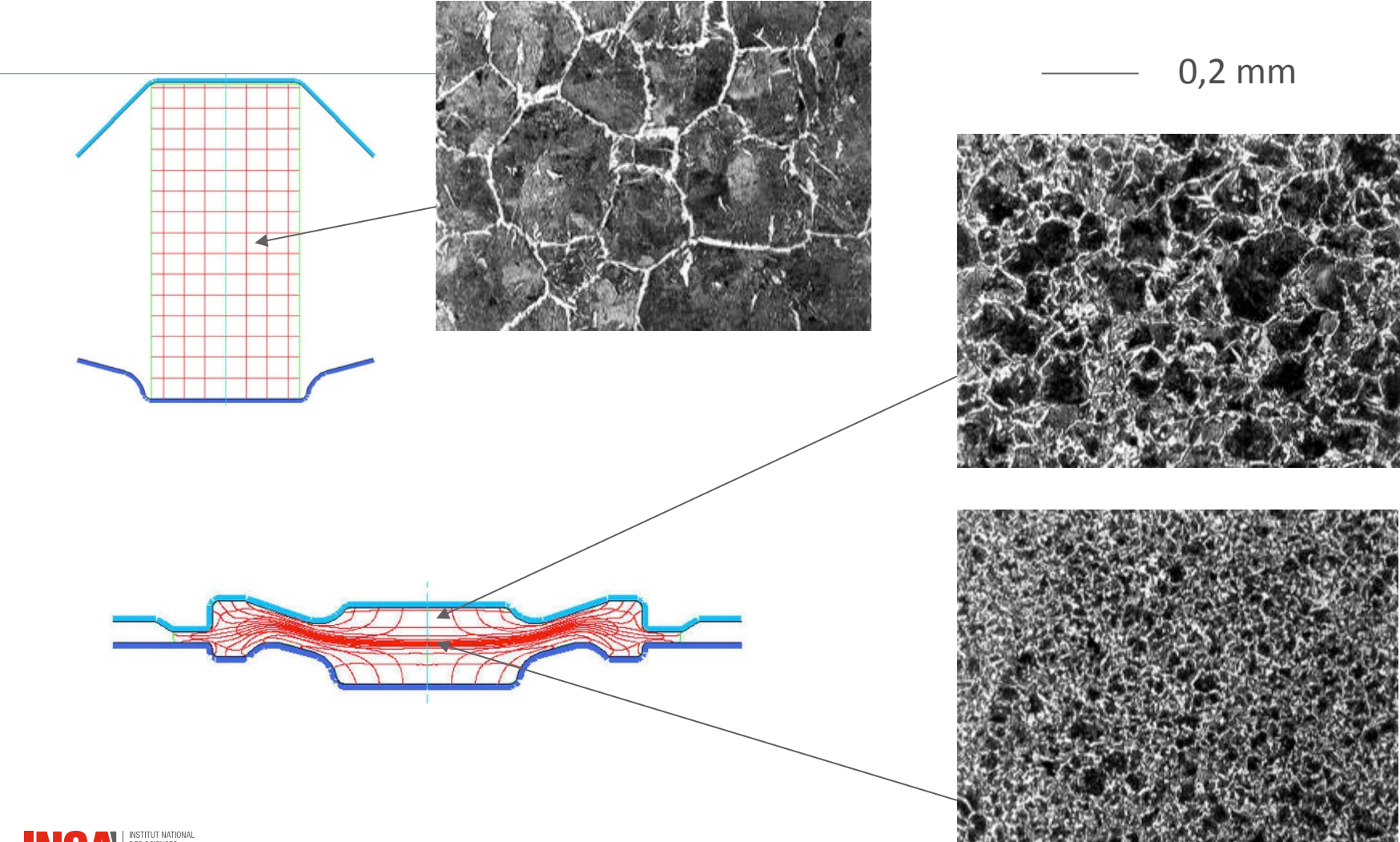


Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

<u>Pratique classique</u> : dissociation dans l'espace et dans le temps des fonctions de mise en forme et de traitement thermique	Forgeage		Traitements classiques dans la masse
<u>Tendance actuelle</u> : association forgeage - traitements thermiques	Forgeage	Traitements thermiques directs sur chaleur résiduelle d'estampage	
<u>Evolution à moyen terme</u> : fusion forgeage - traitements thermomécaniques	Forgeage Traitements thermomécaniques		

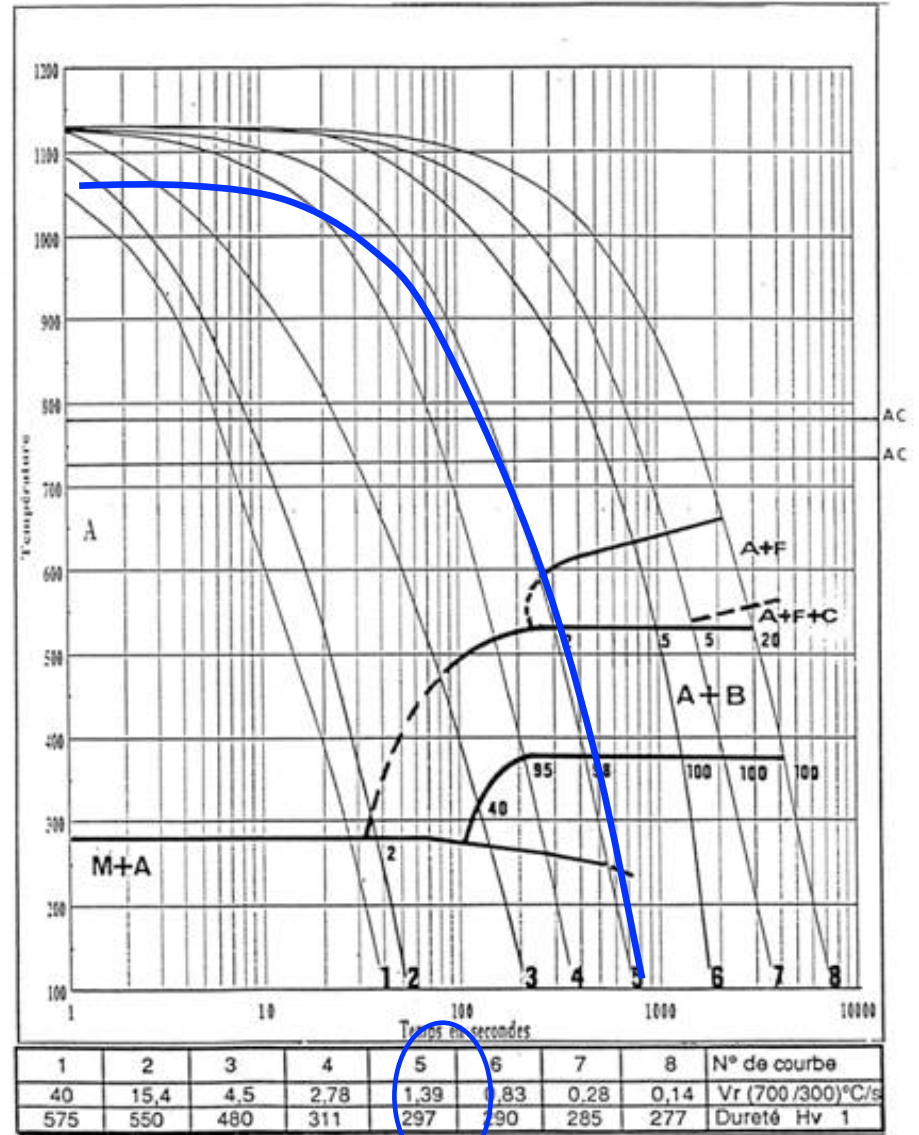
Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

Recristallisation

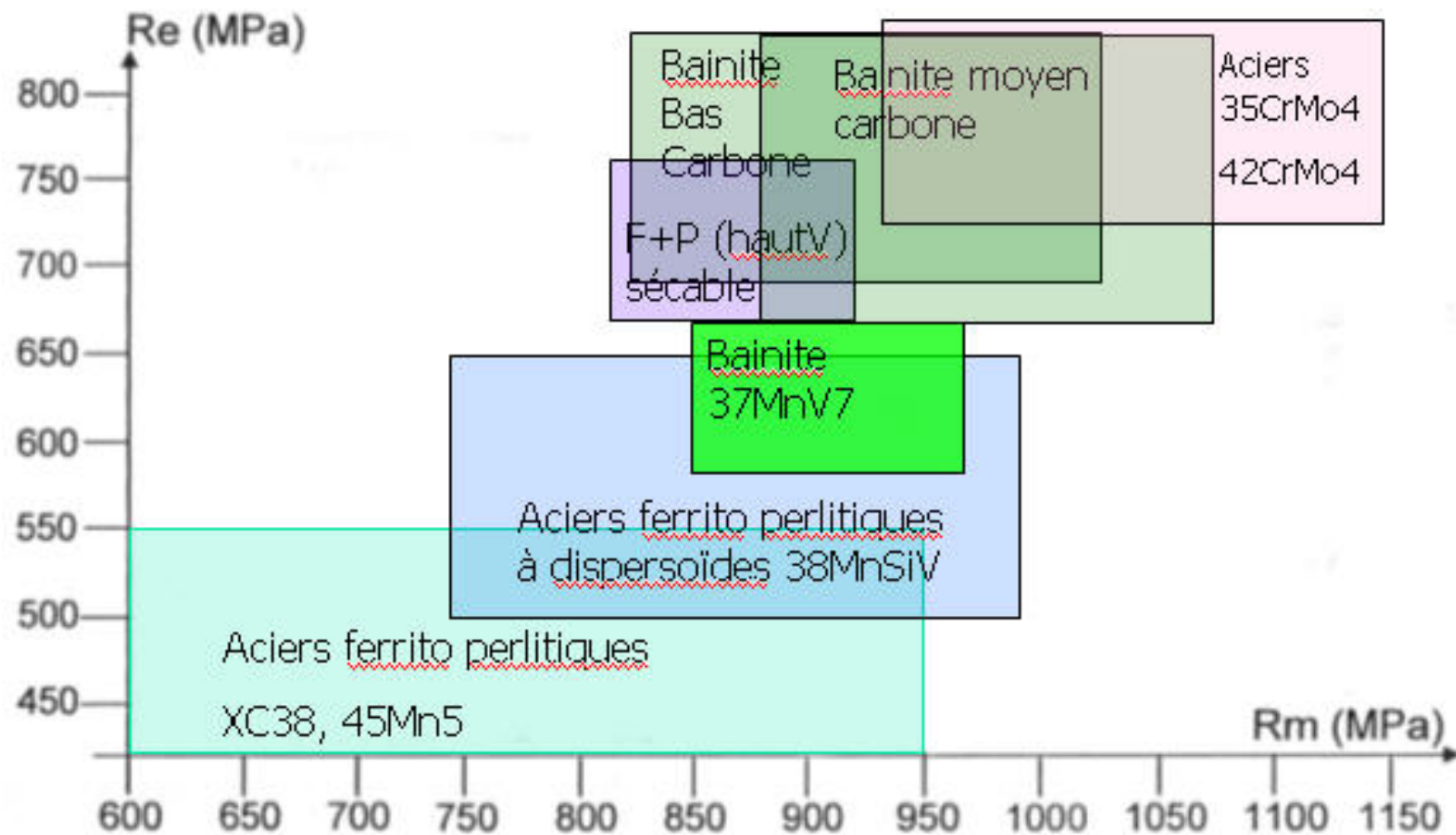


Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

Obtention d'une structure bainitique sur un acier 35MnV7 par refroidissement contrôlé après estampage



Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud



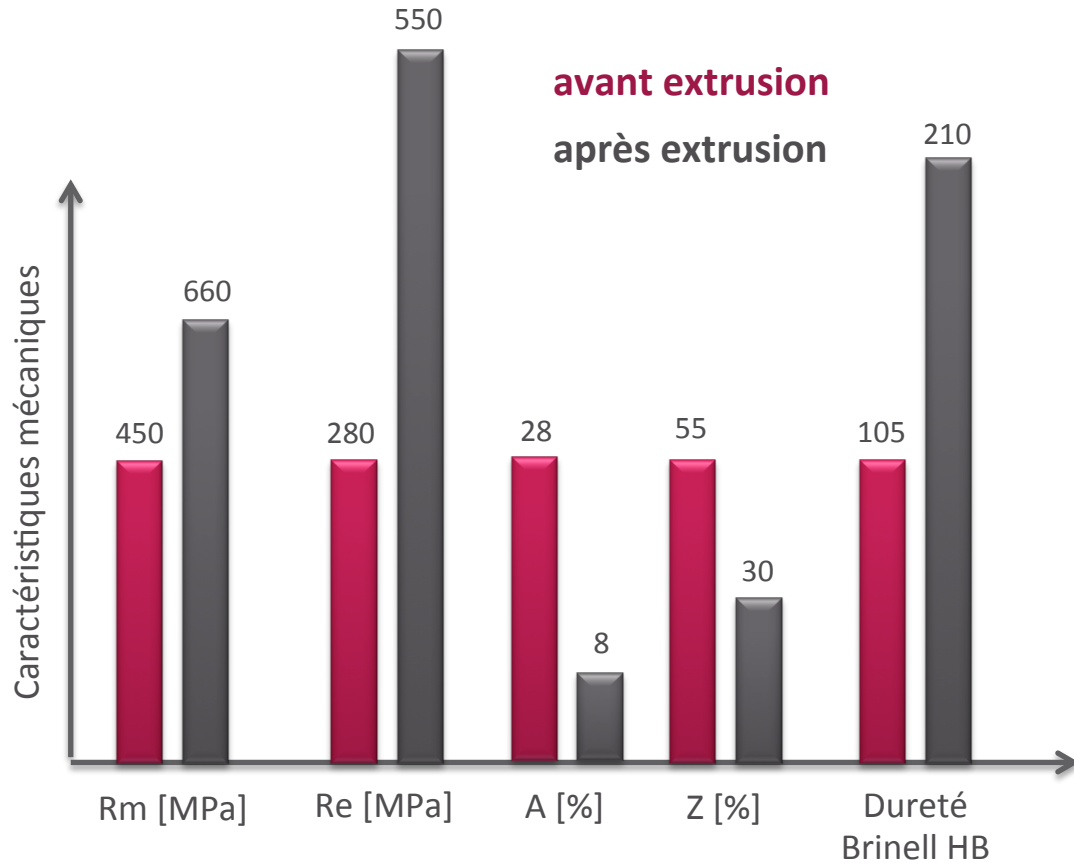
Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

Fibrage : Anisotropie → Meilleure résistance dans le sens du fibrage

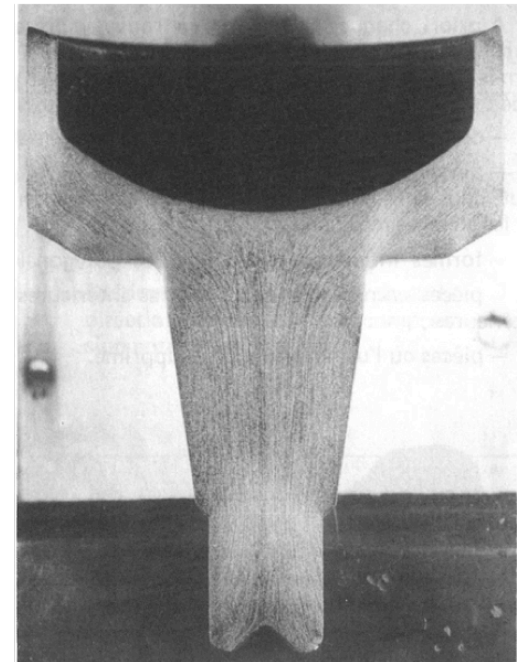


Relation Procédé - Matériaux - Extrusion

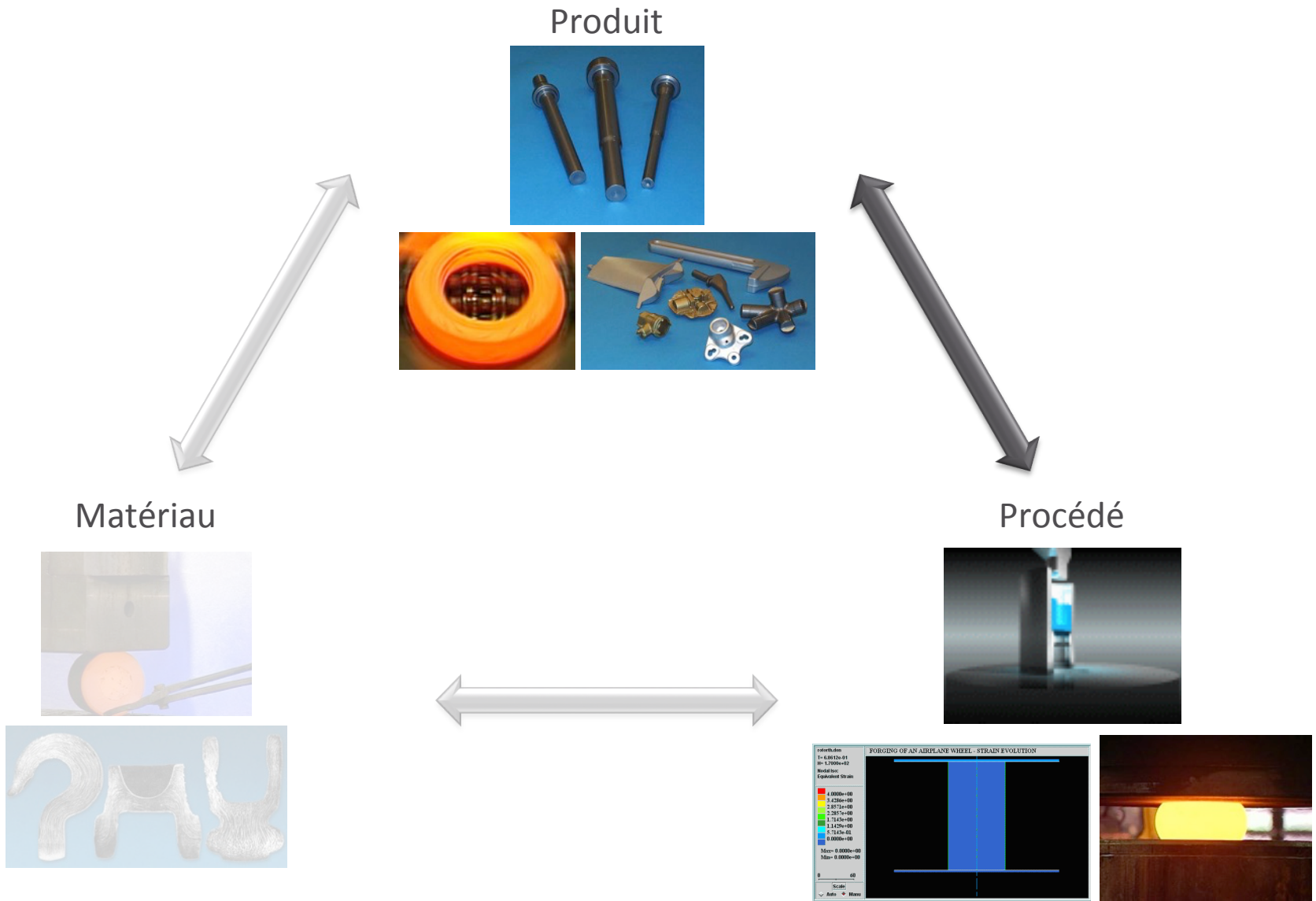
Effet de l'érouissage sur un acier C18:



Fibrage:



Mise en forme par déformation plastique



Relation produit - procédé :

	Forge libre	Estampage	Matriçage	Extrusion
Formes réalisables	Simplees	Complexes	Complexes	principalement axisymétrique
T°	À chaud			À froid / Mi-chaud
Poids	1 kg à 200 T	Quelques grammes à 3 T		50 g à 15 kg
Série	1 à 50 pièces	50 pièces à xy millions /mois		50 000 à 1000 p/ mois
Tolérances	5 mm	1 à 2 mm Calibrage à froid : 0.3 à 0.4 mm		Ø : 0.1 à 0.05 mm L : 0.5 mm
Etat de surface				Ra : 0.4 - 6.3 µm

Coût d'outillages ↗

Main d'œuvre
très qualifiée

Main d'œuvre peu qualifiée

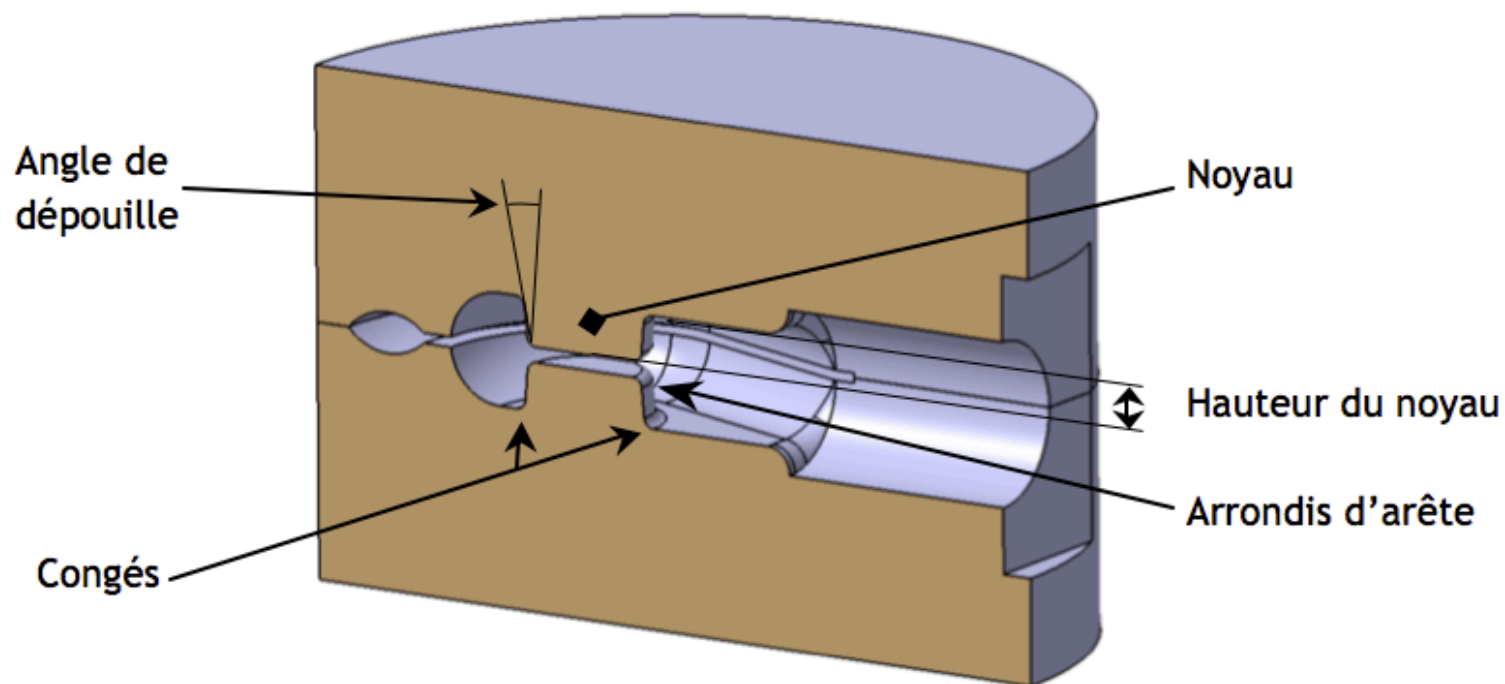
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Ecoulement de la pièce**
Congés, arrondis, épaisseurs des parois, Variations de sections, emplacement de surplus de bavure
- **Usure des outils**
Congés, Conicité
- **Extraction de la pièce des matrices**
Dépouilles, choix du plan de joint
- **Symétrie des efforts lors de la mise en forme**
Symétries des pièces, choix du plan de joint
- **Direction du chargement en service**
Choix du plan de joint, direction du fibrage
- **Reprises d'usinage**
Choix du plan de joint, fibrage
- **Déformations des outillages et Défauts de guidage des machines**
tolérances, choix du plan de joint

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Quelques définitions

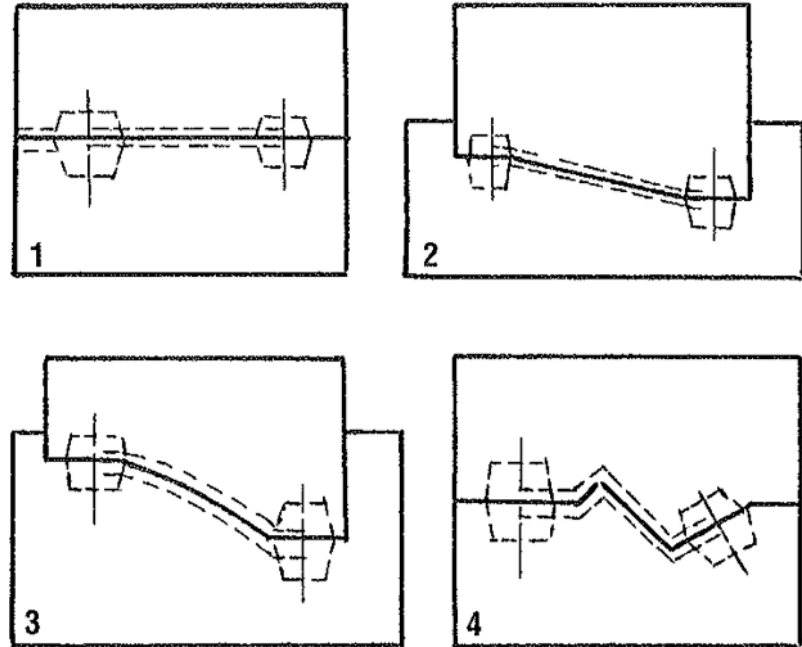


Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Choix du plan de joint : Symétrie des efforts lors de la mise en forme

1. **Plan de joint horizontal et plan**
2. Plan de joint avec talon
3. Plan de joint courbe avec talon
4. Plan de joint basculé



Privilégier type 1, pour ne pas engendrer d'efforts horizontaux qui joueraient sur le guidage de la machine et finalement sur l'excentration matrices supérieure/inférieure et sur le coût des outillages.

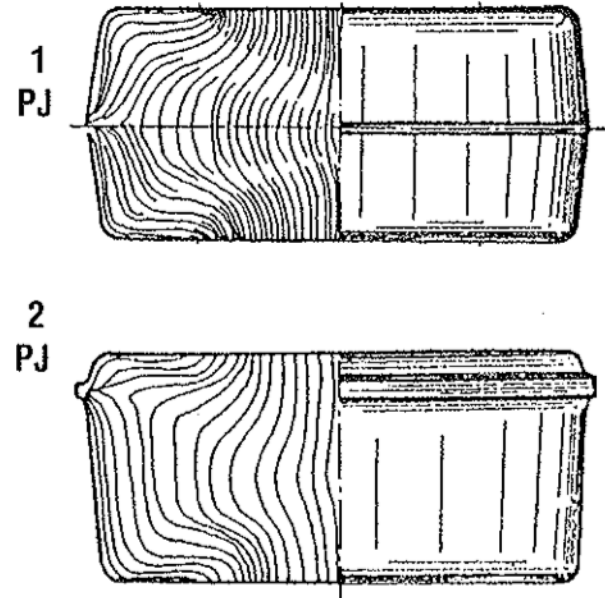
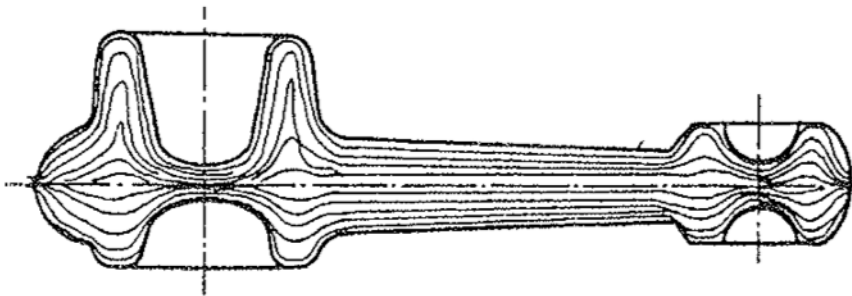
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

 - Choix du plan de joint & Orientation du fibrage

La position du plan de joint influe sur le fibrage. Il peut être nécessaire de privilégier un plan de joint déporté (2) par rapport à un plan de joint symétrique (1) afin de garantir une orientation du fibrage dans le sens du chargement en service

Orientation du fibrage dans la direction des efforts en service

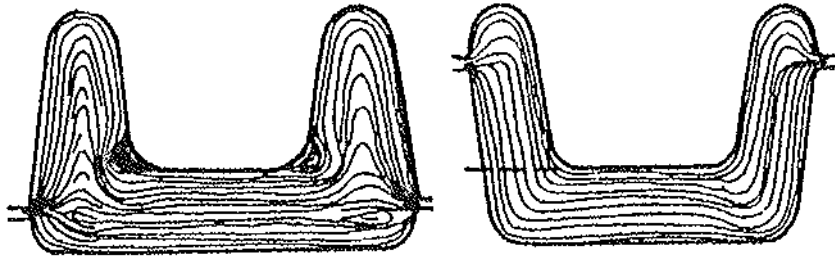


Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

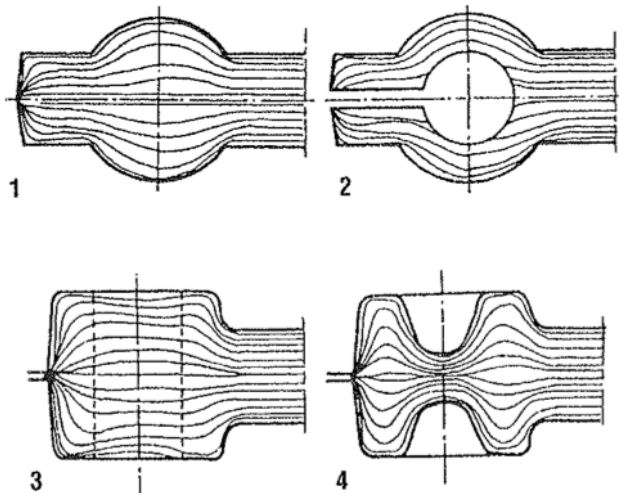
Choix du plan de joint & Orientation du fibrage :

Pièces avec nervures



Les fibres regroupées au plan de joint peuvent induire une amorce de rupture. Il est possible de déporter le plan de joint pour modifier l'emplacement de cette zone de rupture éventuelle en l'éloignant des points d'application des efforts.

Prise en compte des usinages futurs : Bossages cylindriques

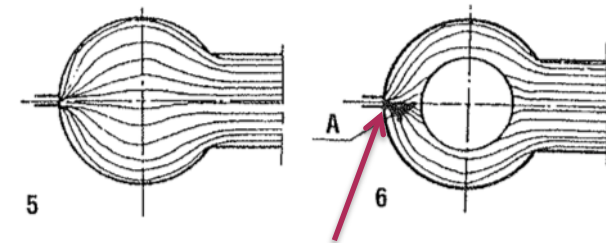


1→2 : Plan de joint dans l'axe, usinage par perçage et sciage suivant l'axe. OK

3 : Perçage et alésage perpendiculaire au plan de joint. OK

4 : Le choix du plan de joint permet un perçage préformé

5→6 : Le plan de joint dans la zone d'usinage entraîne une concentration des fibres qui, après usinage, entraînera une faiblesse de la pièce.



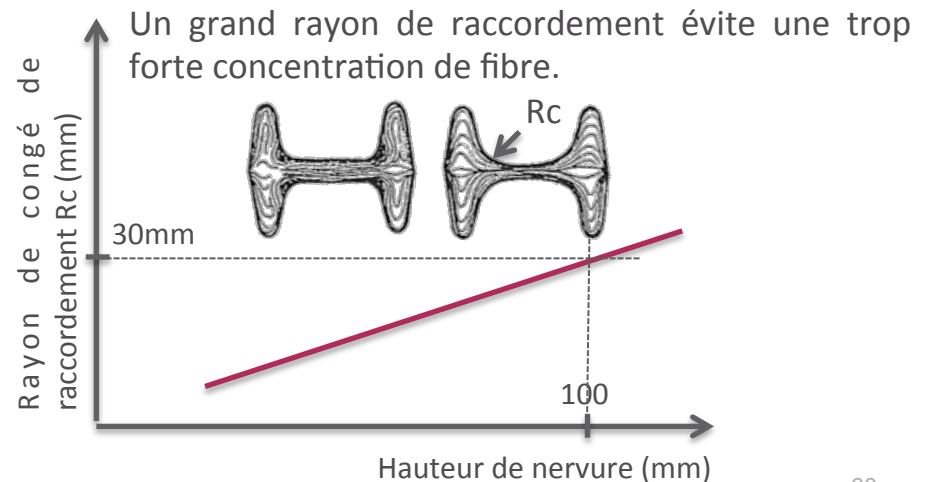
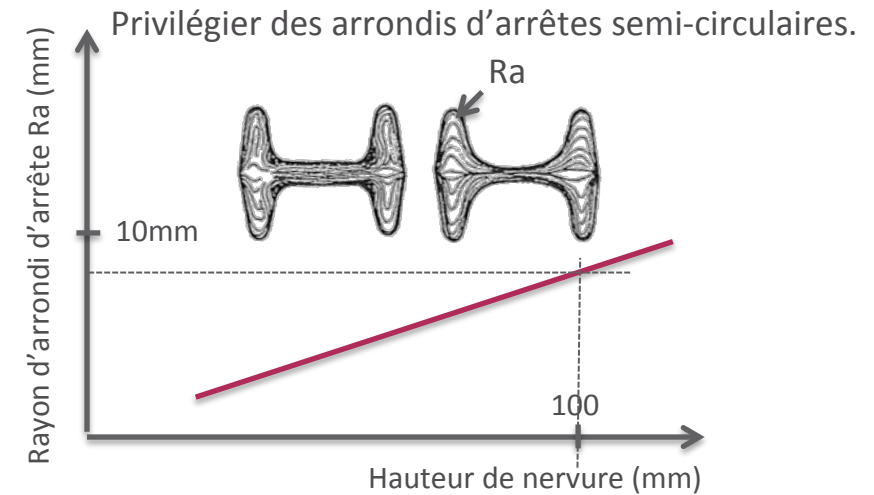
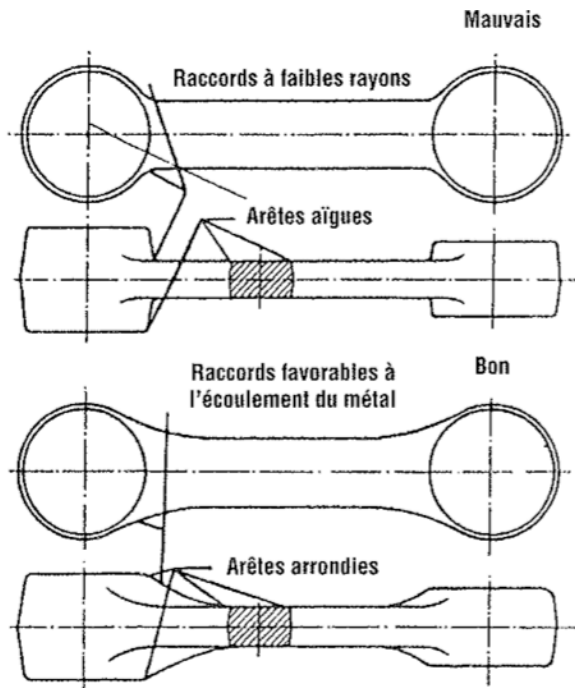
Risque de rupture

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Arrondis et congés d'arrêtes favorisent l'écoulement de la matière et limitent l'usure des outils

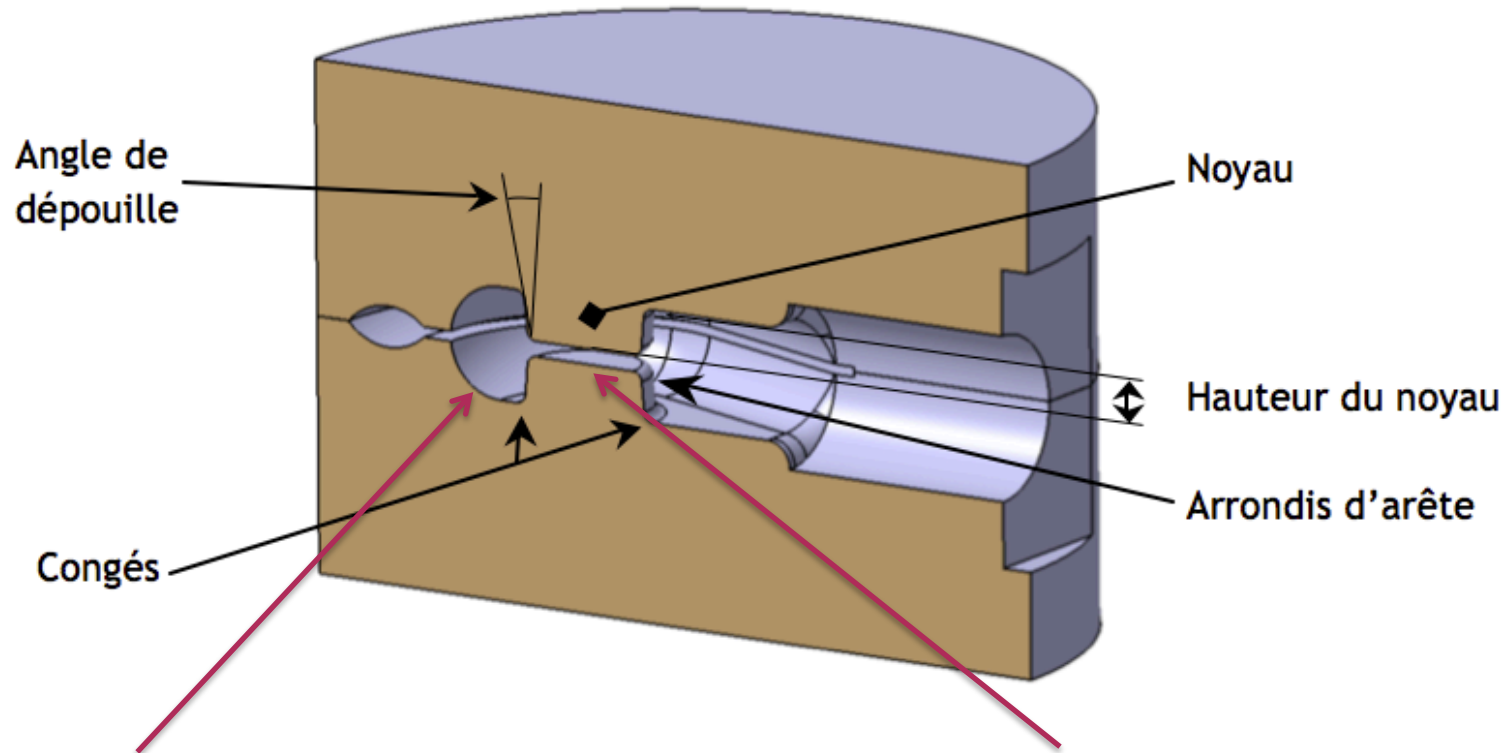
De manière général, mettre en place des variations de section les plus progressives possibles.



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Arrondis et congés d'arrêtes favorisent l'écoulement de la matière et limitent l'usure des outils



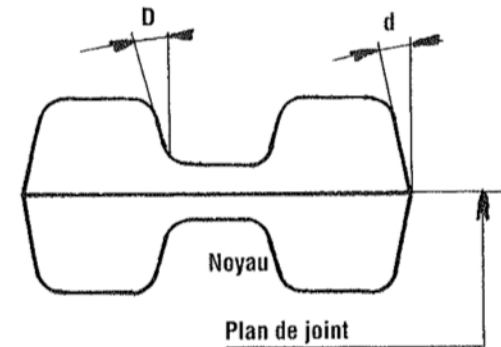
La nervure doit être d'autant moins haute et fine que l'épaisseur de **toile** est fine et large

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Matriçage-Estampage**

Dépouilles : garantissent l'extraction des outils.

Dépouilles intérieures plus importantes pour éviter un serrage trop important du noyau lors du refroidissement.



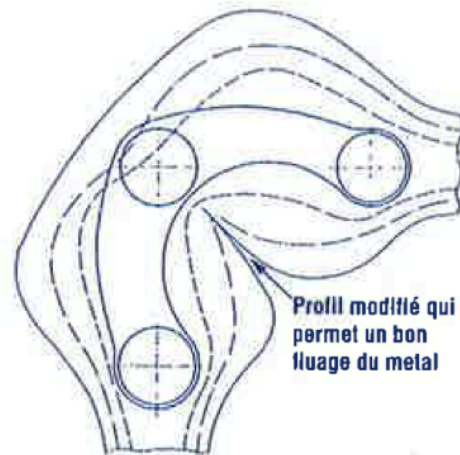
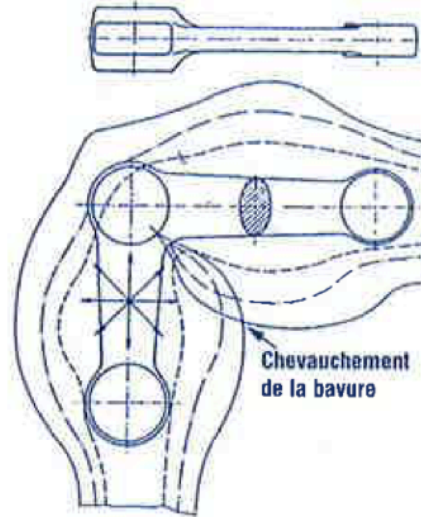
d = dépouille extérieure
D = dépouille intérieure

Valeurs des dépouilles – Recommandées en fonction des machines.						
Machine	« D » Dépouille intérieure			« d » Dépouille extérieure		
	Pente	Angle	Domaine	Pente	Angle	Domaine
Marteau-Pilon	16 %	9°	valeur normale	16 %	9°	Nervures de fortes hauteurs
	10 %	6°	Noyaux de faibles hauteurs	10 %	6°	Valeur normale
Presses à forger verticales	5 %	3°	Éjecteur	5 %	3°	Pièces de révolution de faible hauteur
	10 %	6°	Valeur normale	10 %	6°	Pièces de révolution de faible hauteur
	16 %	9°	Creux profonds	10 %	6°	Valeur normale
Presses à forger horizontales	5 %	3°	En fonction de la profondeur du trou borgne ou débouchant	5 %	3°	Poinçons coulisseau principal
	à	à		2 %	1°	Valeur normale
	2 %	1°		0 %	0°	Poinçons coulisseaux secondaires

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

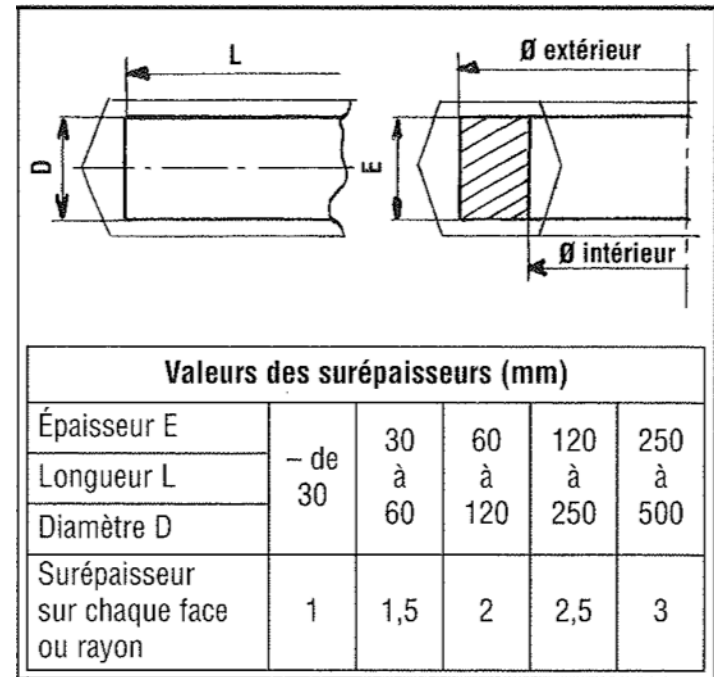
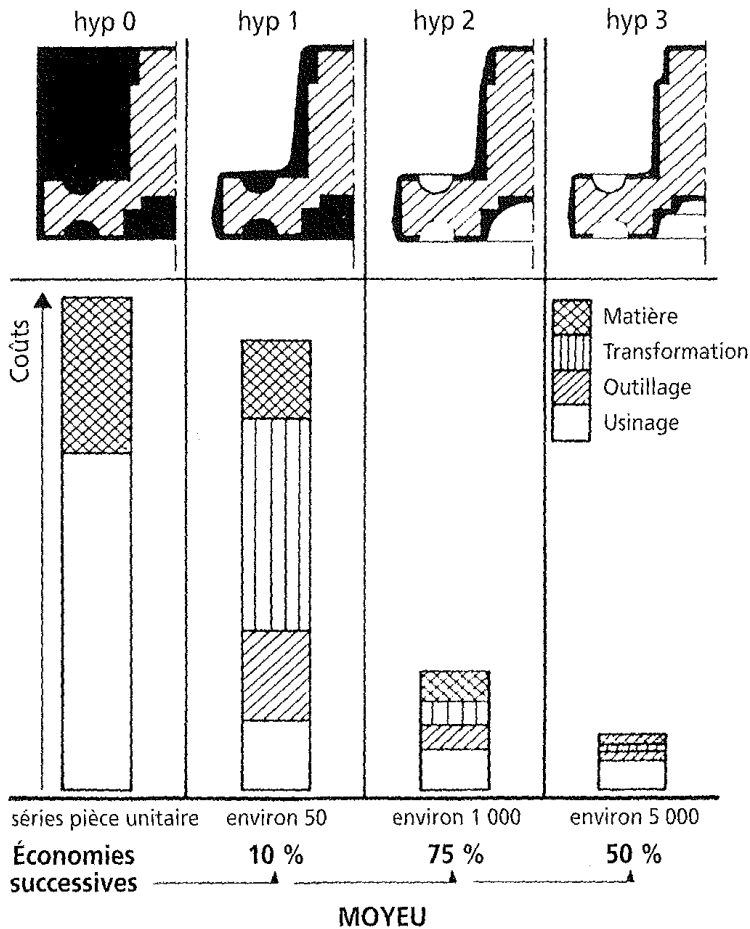
Gestion des bavures



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Surépaisseurs d'usinage fonction de la série et de la géométrie de la pièce.



Relation produit - procédé : Règles de tracé

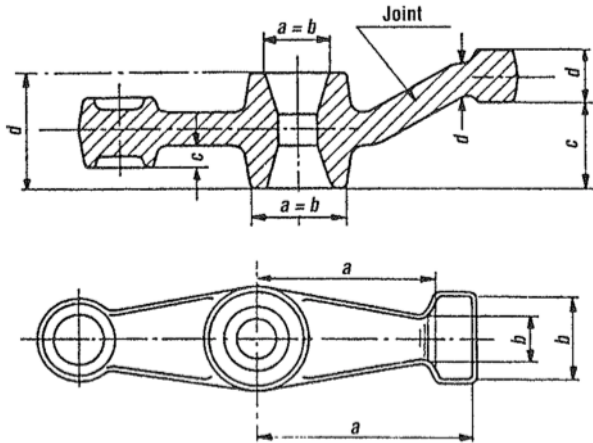
- **Matriçage-Estampage**

Tolérances. Elles tiennent compte de toutes les variations, y compris celles dues à l'usure des gravures et du retrait des pièces.

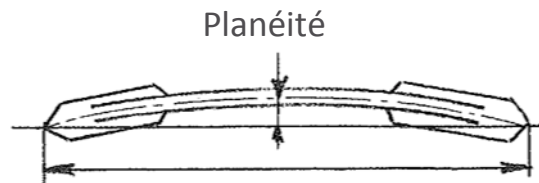
Elles dépendent :

- de la masse de la pièce forgée (retrait)
- de la forme du plan de joint (excentration des matrices)
- de la matière mise en forme (% C pour les aciers par exemple)
- de la forme (facteur de forme $S = \text{Masse de la pièce} / \text{Masse du solide enveloppe}$)

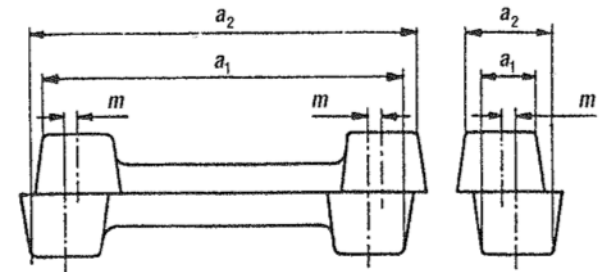
Elles sont >1 mm et peuvent dépasser 10mm pour les pièces les plus complexes (Voir Memotech)



a = Cotes de longueur
b = Cotes de largeur
c = Cotes d'épaisseur par rapport aux joint
d = Cotes d'épaisseur totale



Déport et saillie résiduelle



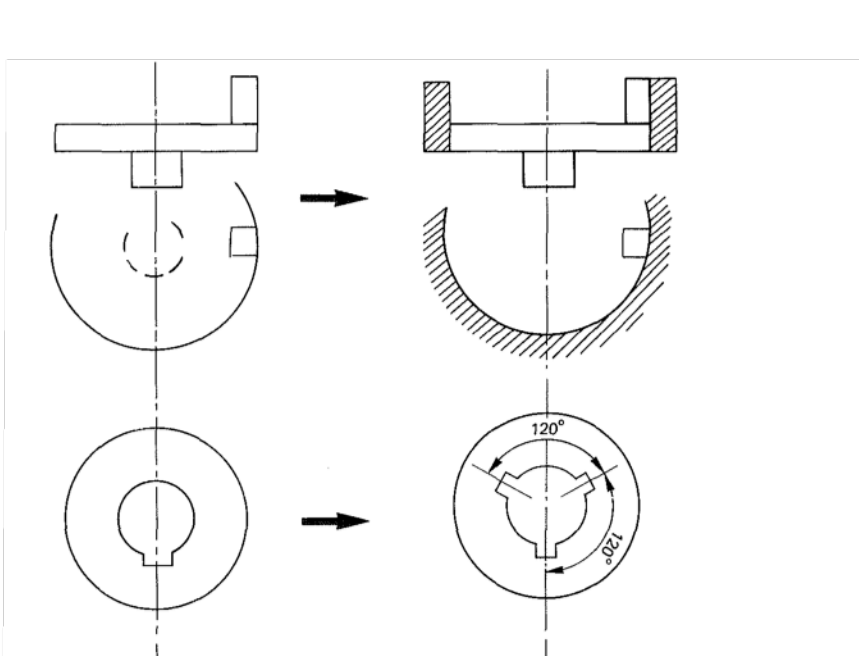
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Extrusion**

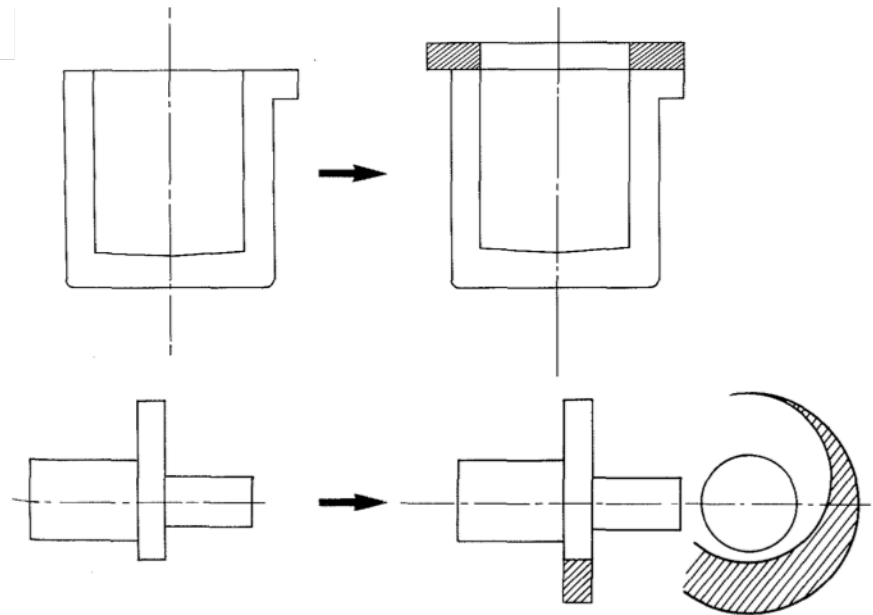
Ejection de l'outillage : pas de contre dépouille (lors d'une opération)

Symétries des efforts lors de l'extrusion : Symétries et axes de symétries sur la pièce

Forme à réaliser Forme extrudable la plus proche



Forme à réaliser Forme extrudable la plus proche

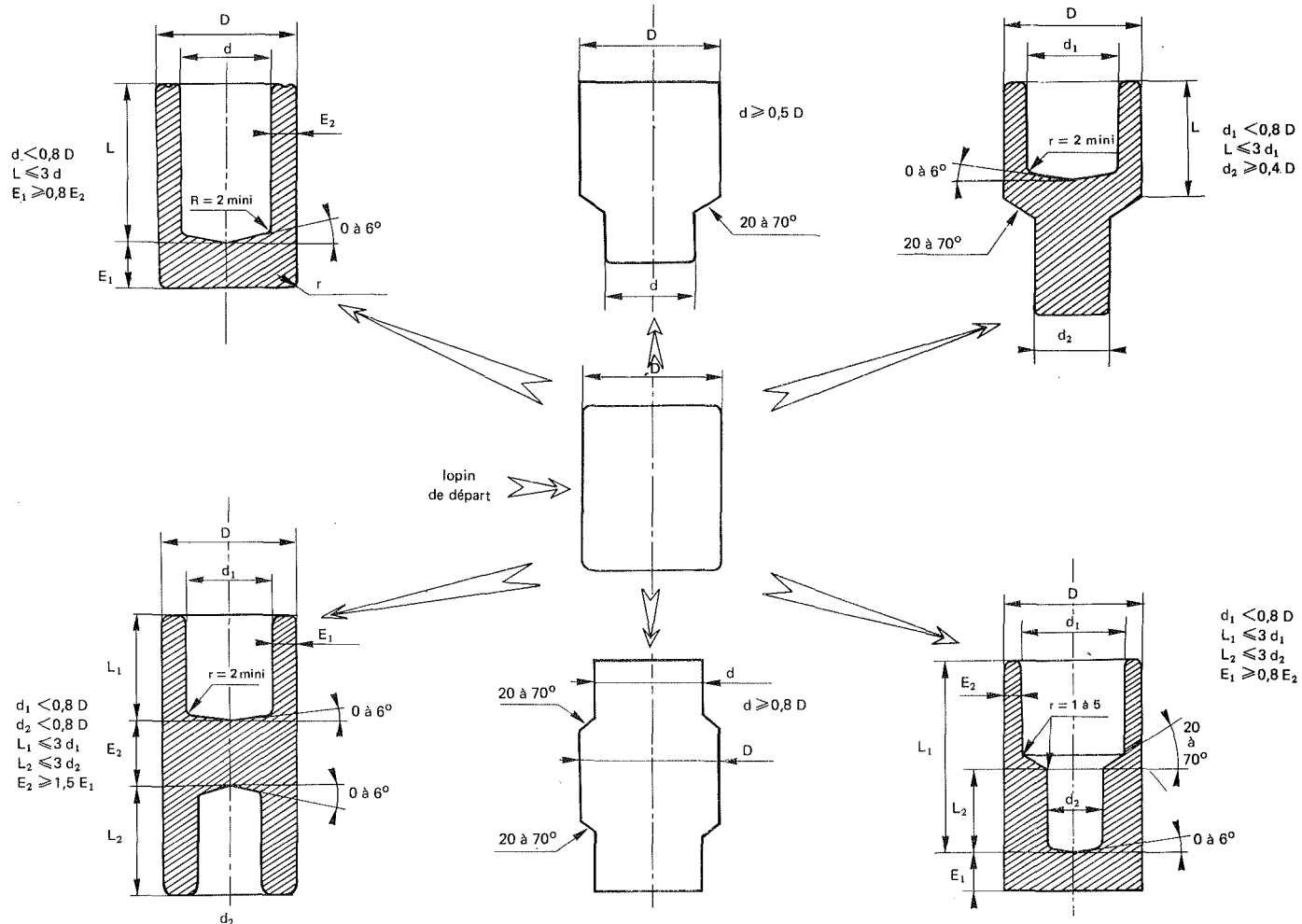


Les zones hachurées sont à enlever par usinage.

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

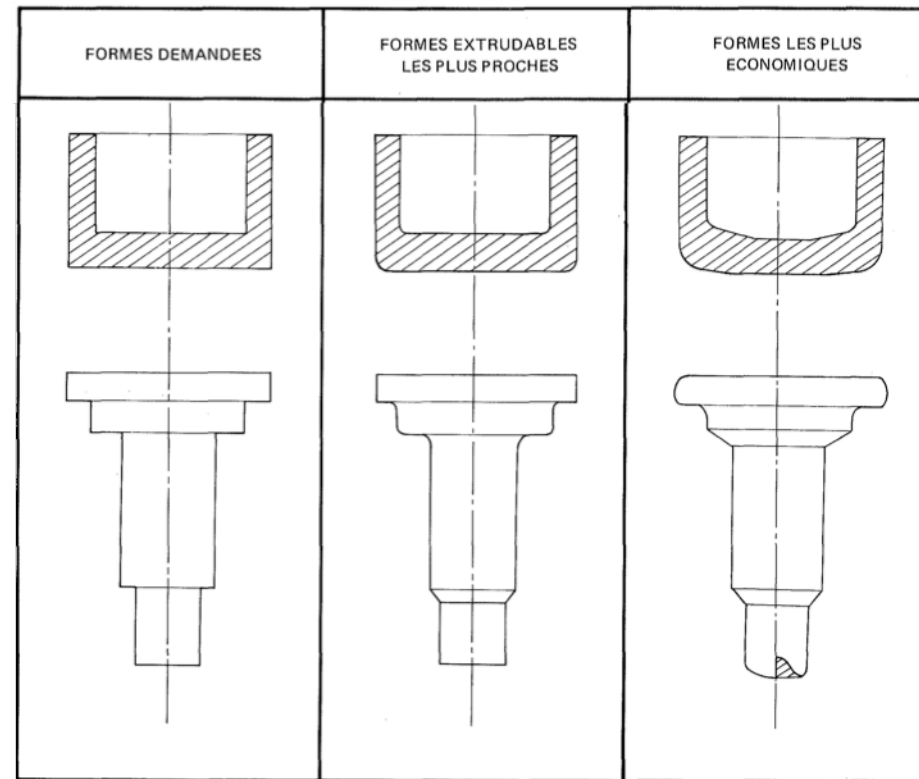
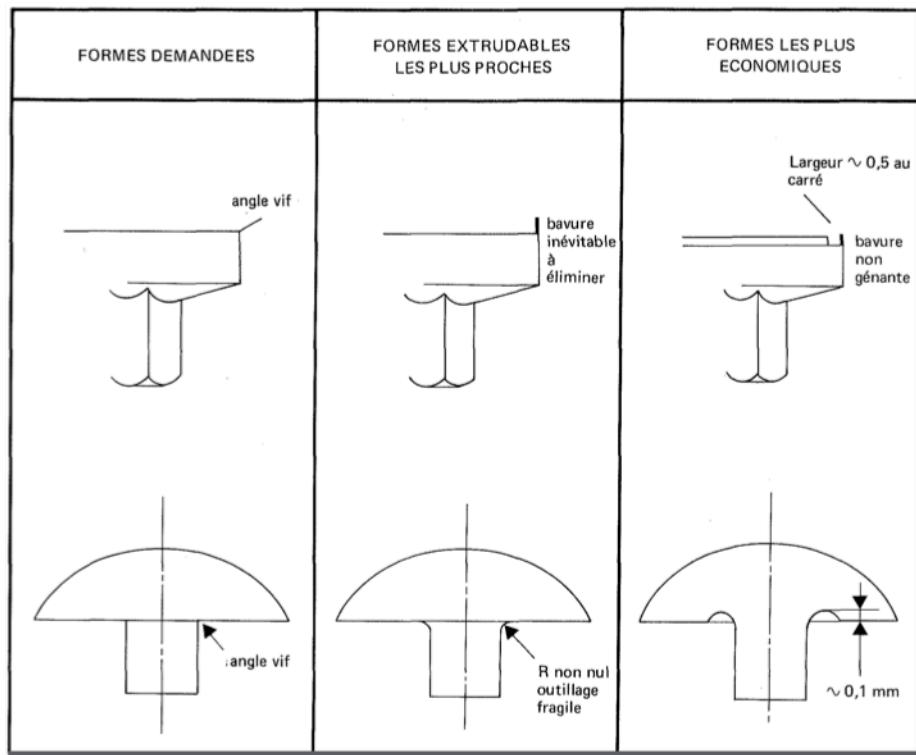
Écoulement du métal : Variations d'épaisseur de parois de section (problème de formation de criques)



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

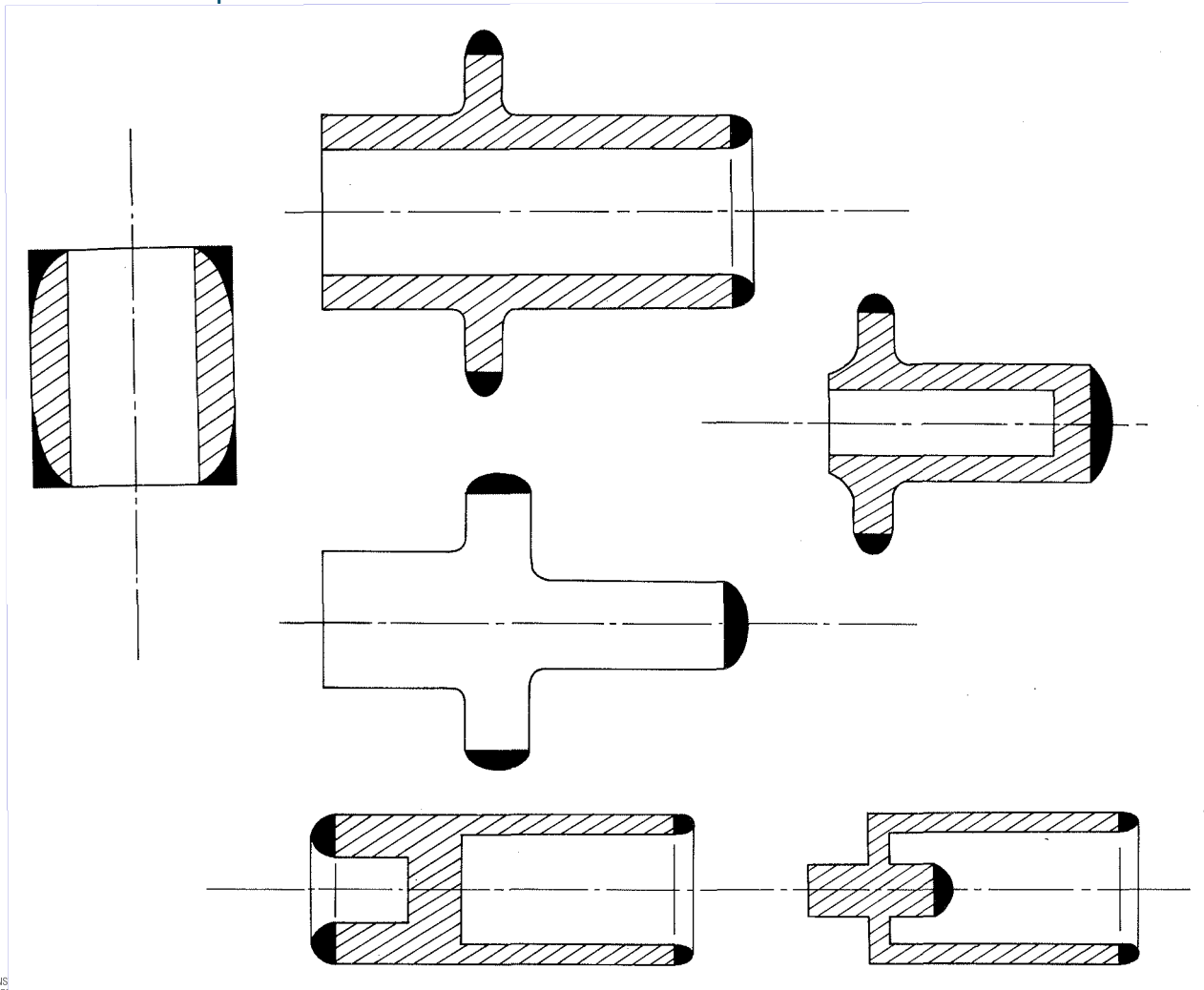
Gestion des bavures et de l'usure des outils



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Extrusion**

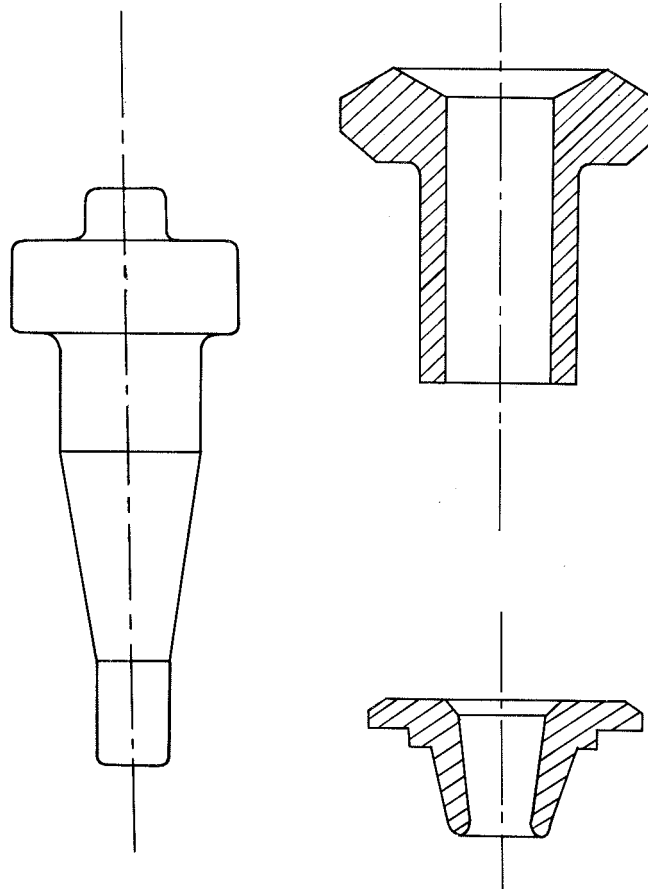
Emplacement des surplus de matière



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Extrusion**

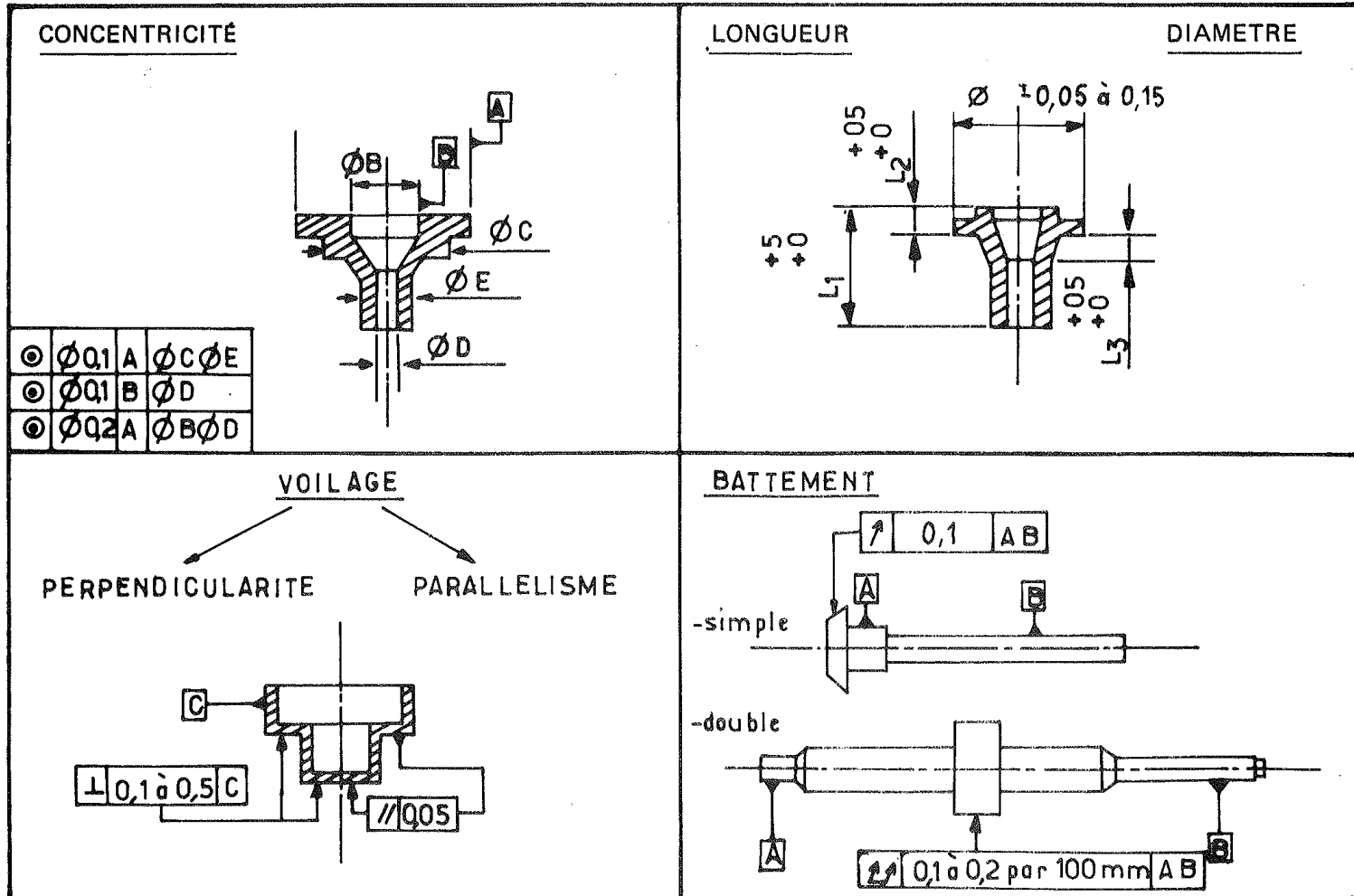
Conicités <5%, surtout extérieures sont difficiles à obtenir mais réalisable



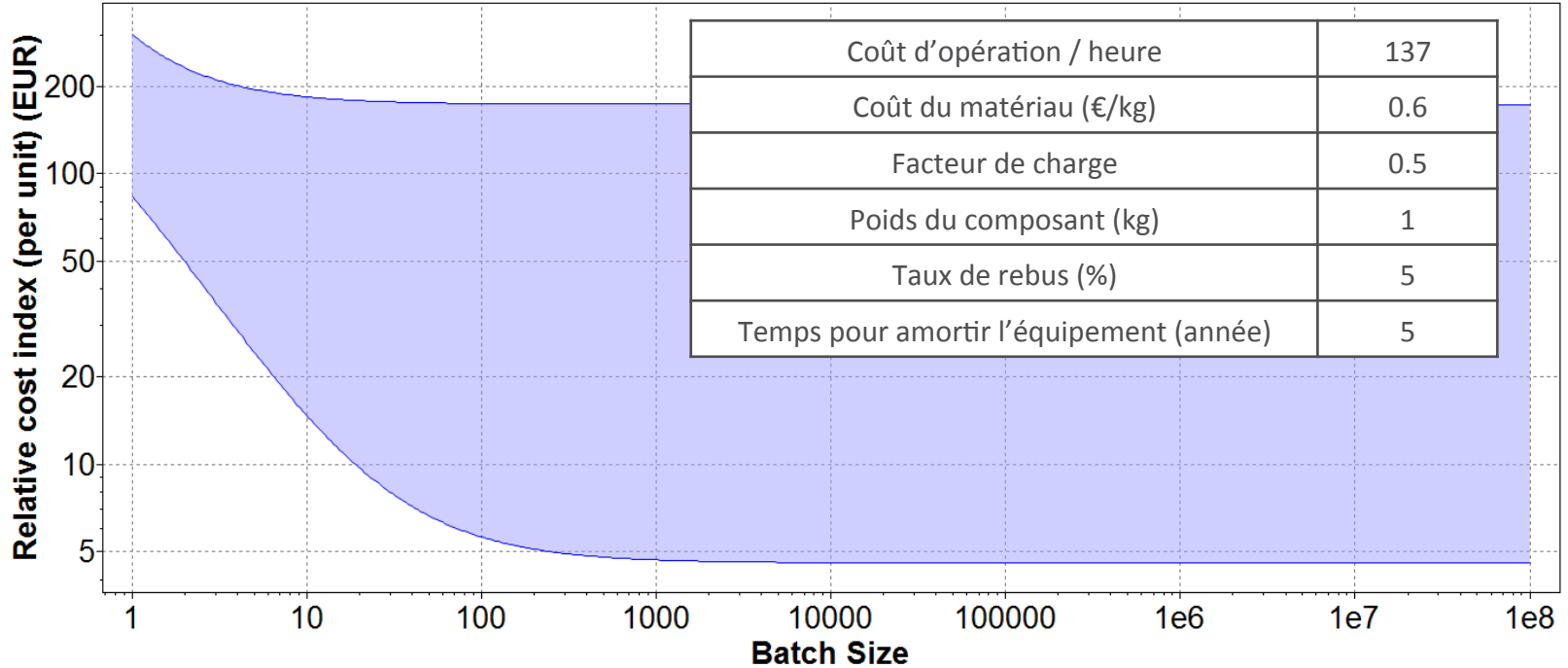
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

Tolérancement (rigidité des outillages, guidage poinçon/filière)

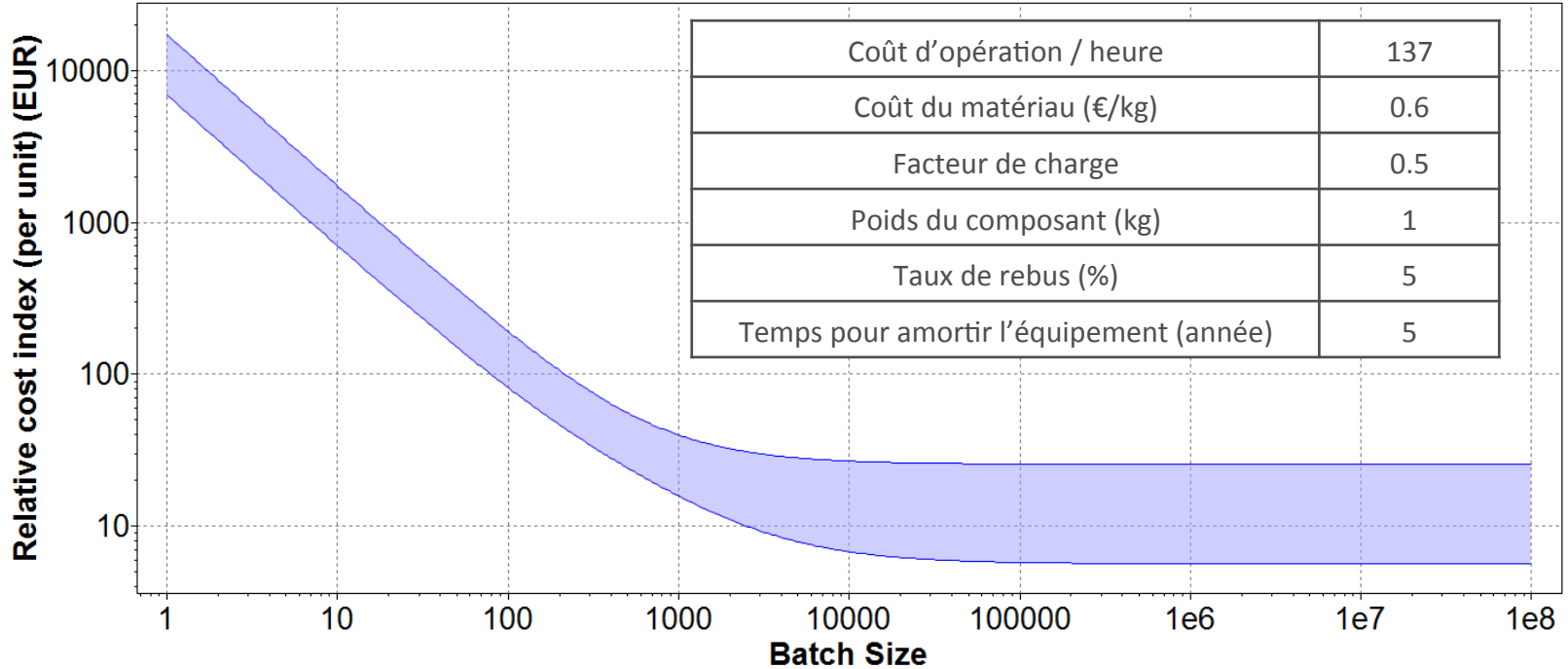


Données économiques : Forge libre



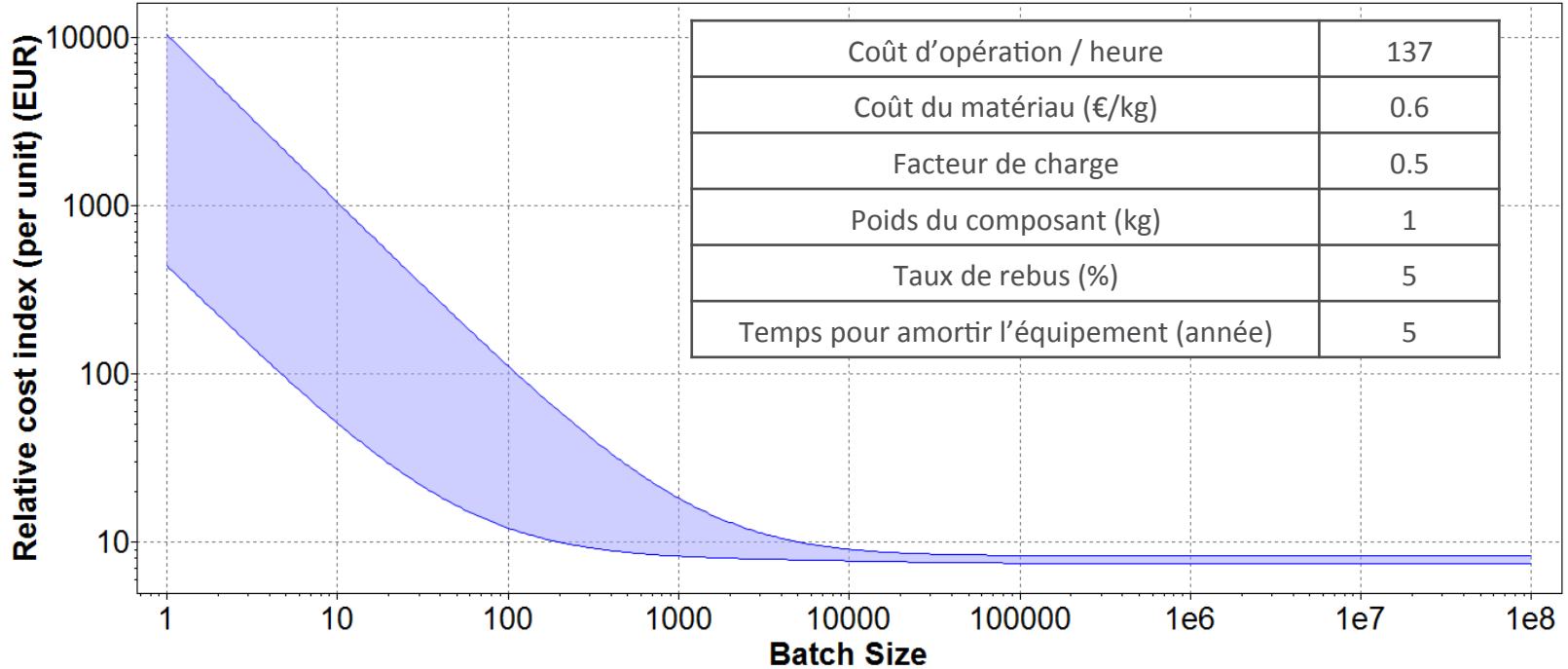
Coût de l'équipement (€)	$3E^5 - 9E^5$
Fraction de matériau utilisée	0.4 - 0.9
Cadence (pièce/heure)	1 - 50
Coût de l'outillage (€)	35 - 200
Durée de vie de l'outillage (pièce)	$1E^3 - 1E^4$

Données économiques : Estampage - Matriçage



Coût de l'équipement (€)	$3E^5 - 9E^5$
Fraction de matériau utilisée	0.4 - 0.6
Cadence (pièce/heure)	10 - 300
Coût de l'outillage (€)	$7E^3 - 2E^4$
Durée de vie de l'outillage (pièce)	$1E^3 - 5E^6$

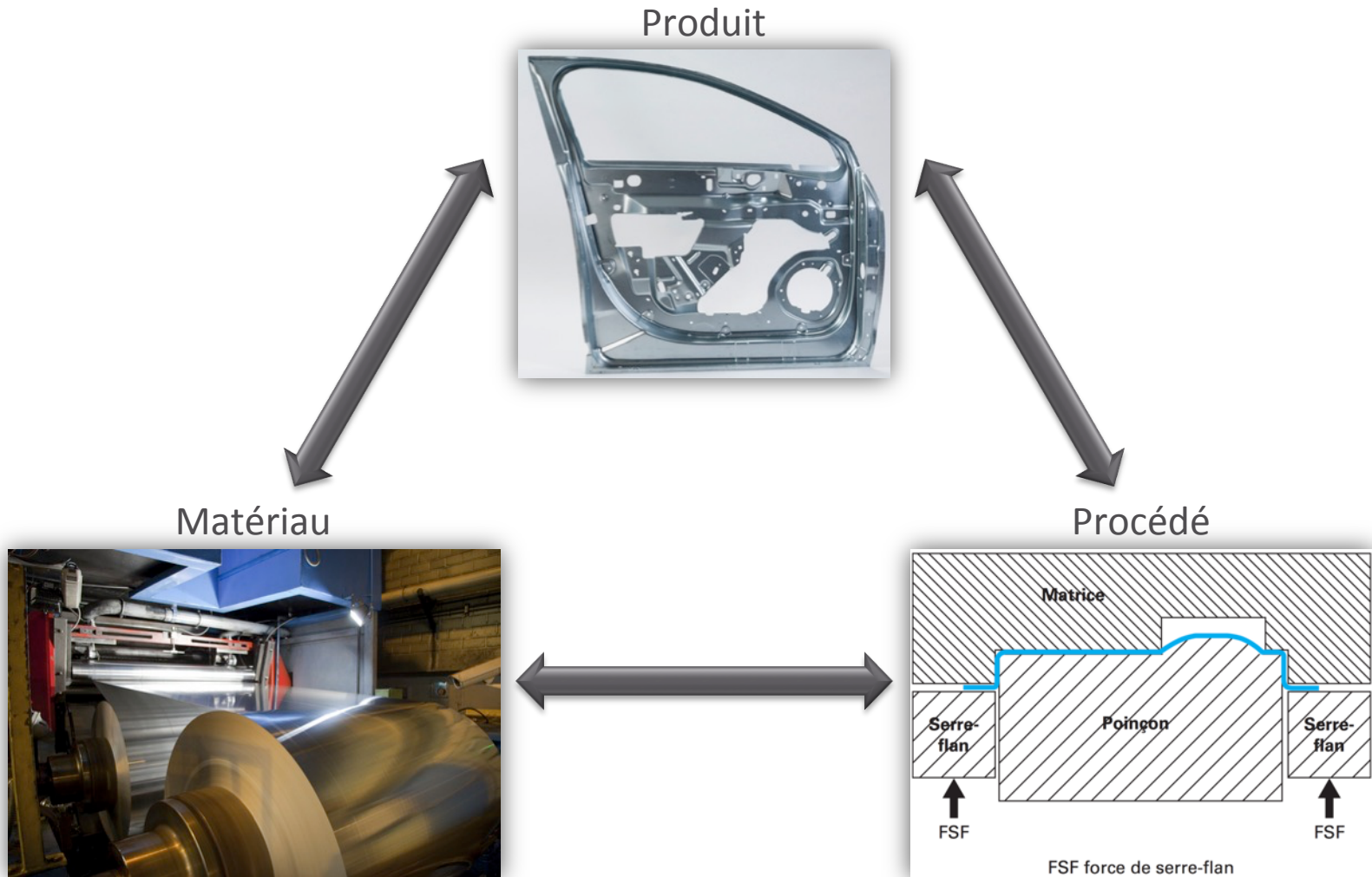
Données économiques : Extrusion



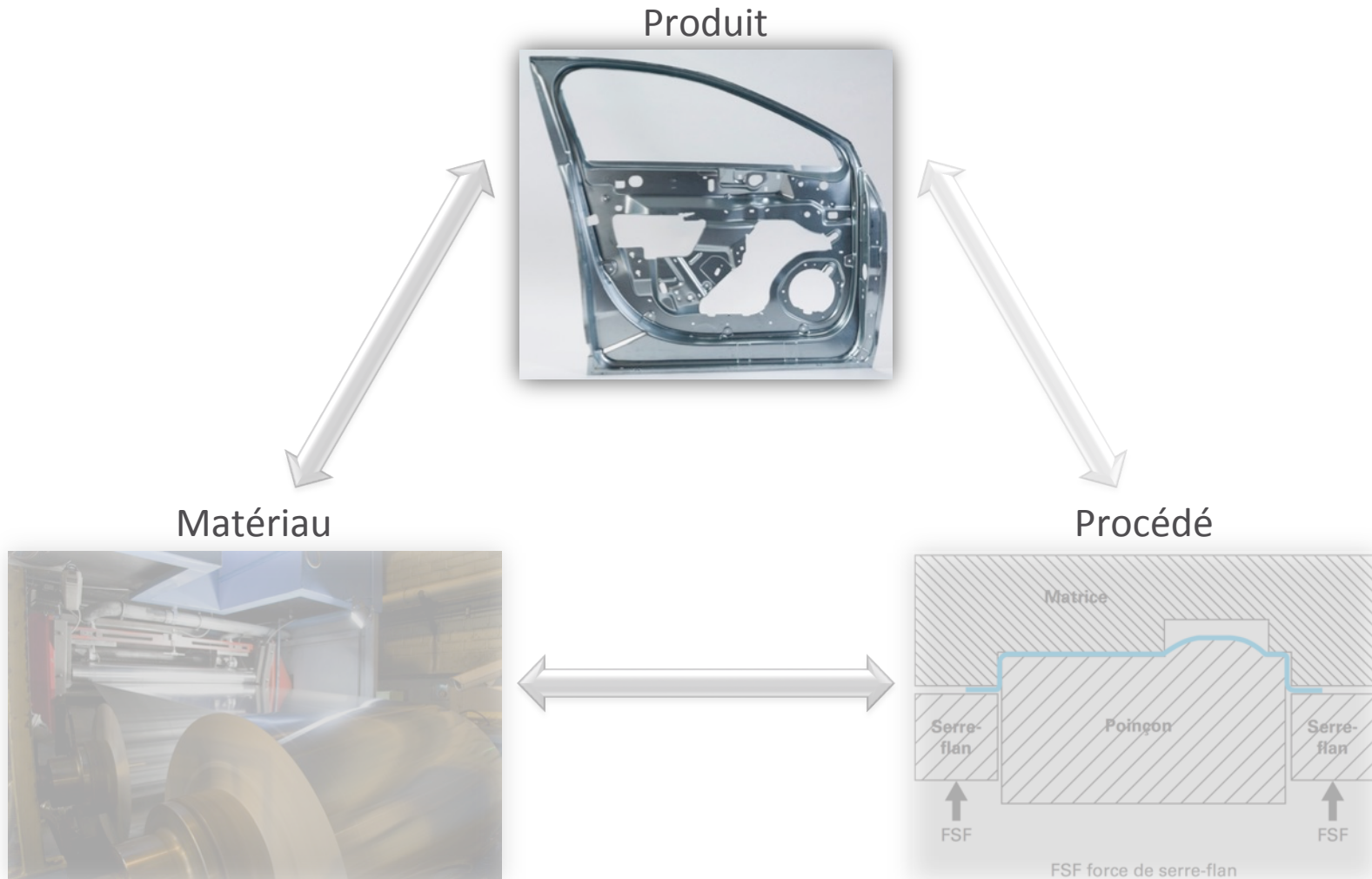
Coût de l'équipement (€)	2E5 - 1E6
Fraction de matériau utilisée	0.9 - 1.0
Cadence (pièce/heure)	1E3 - 1E4
Coût de l'outillage (€)	5E2 - 1E4
Durée de vie de l'outillage (pièce)	1E5 - 1E6

Emboutissage des métaux en feuilles

Emboutissage des métaux en feuilles



Emboutissage des métaux en feuilles



Produits emboutis - Marché



Mobilier métallique
Electro-ménager



Carrosserie automobile

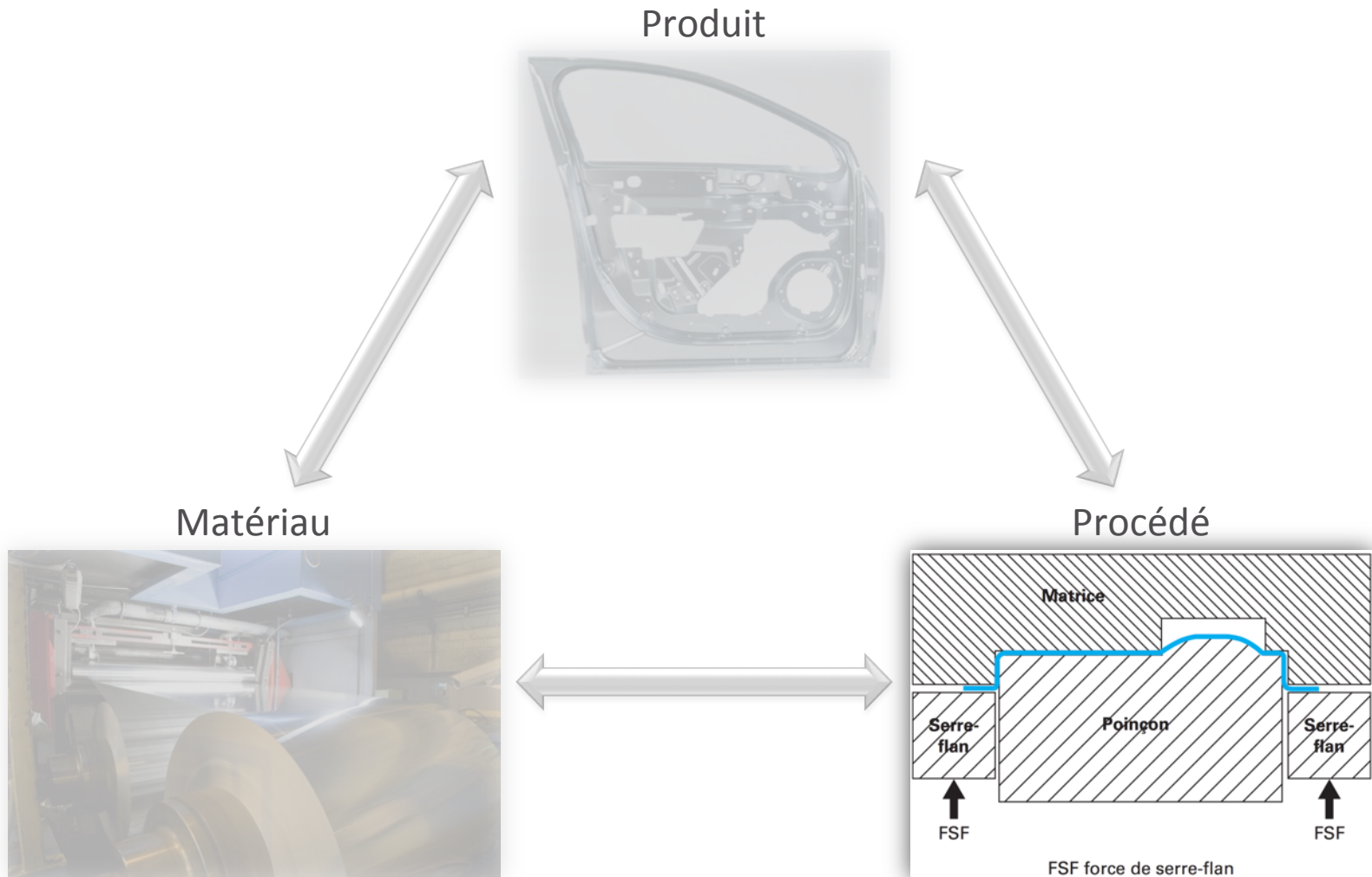


Emballage métallique

...

Pièces surfaciques de forme complexe non développable embouties à partir de tôles

Emboutissage des métaux en feuilles



Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

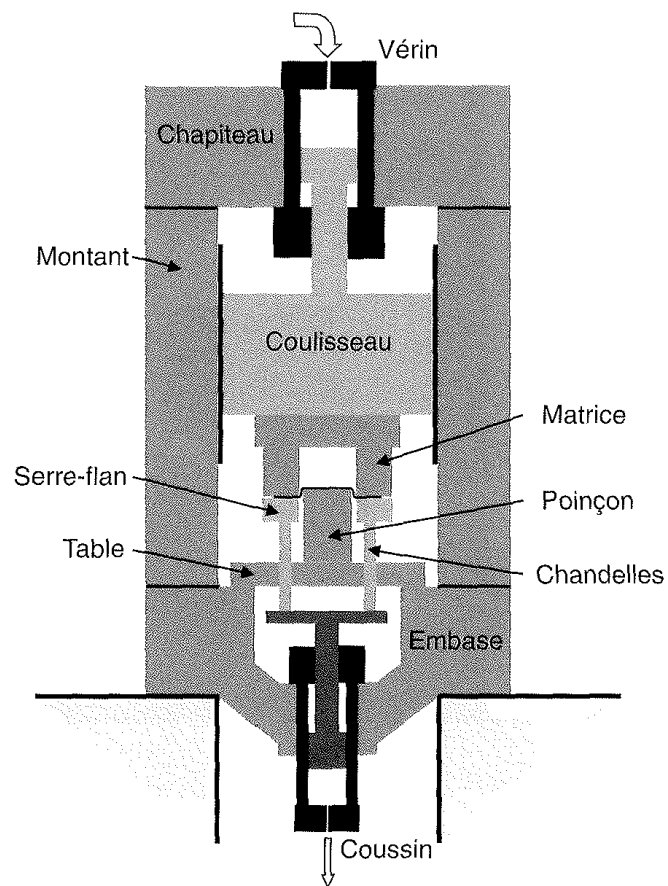
Presses Mécaniques

Presses Hydrauliques

Servopresses

Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse simple-effet hydraulique

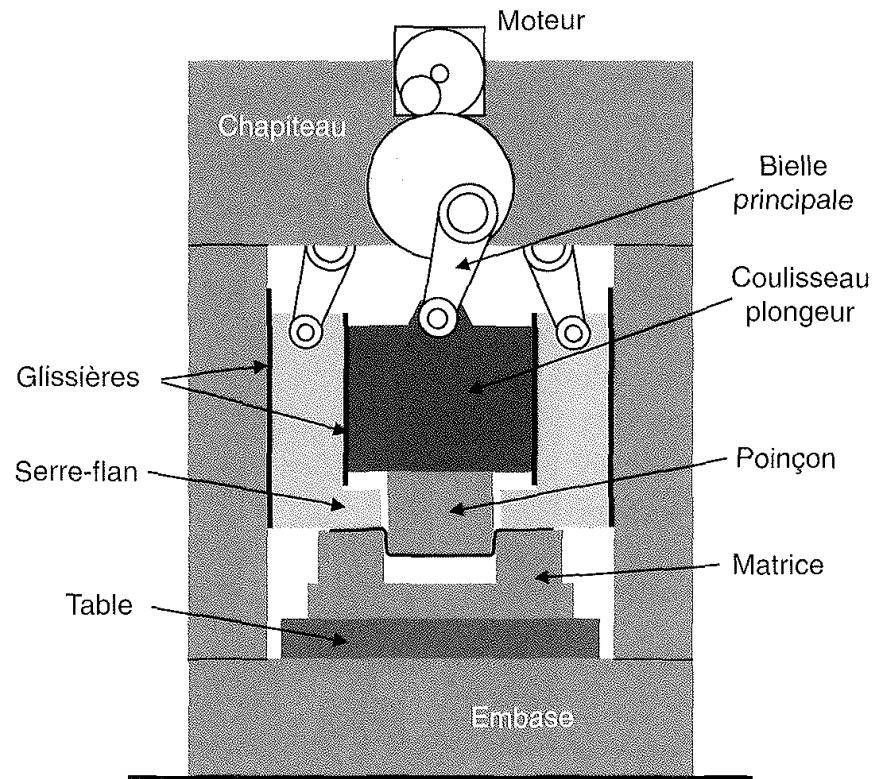
Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

Presses Mécaniques
Presses Hydrauliques
Servopresses

Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse double-effet mécanique

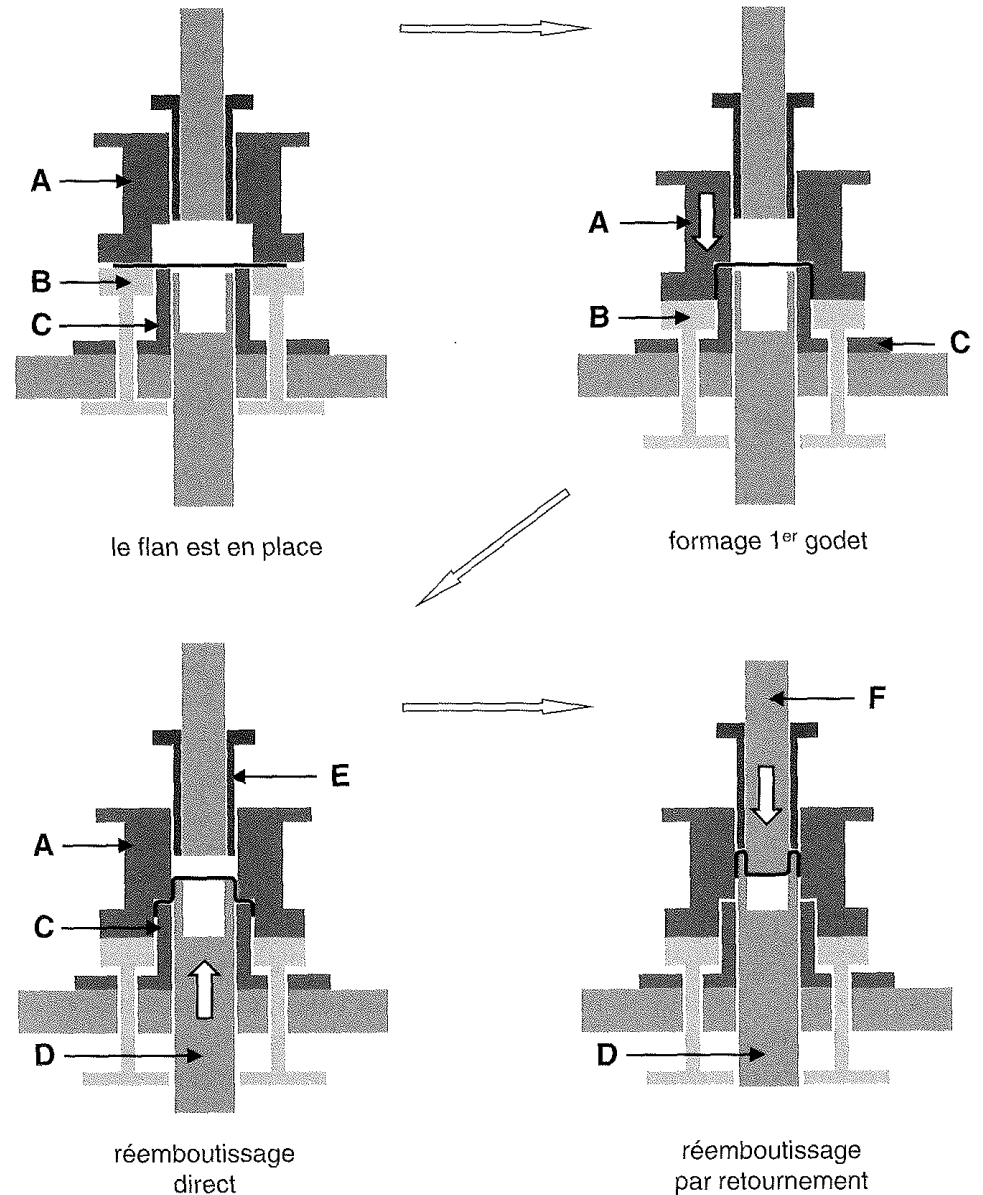
Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

Presses Mécaniques
Presses Hydrauliques
Servopresses

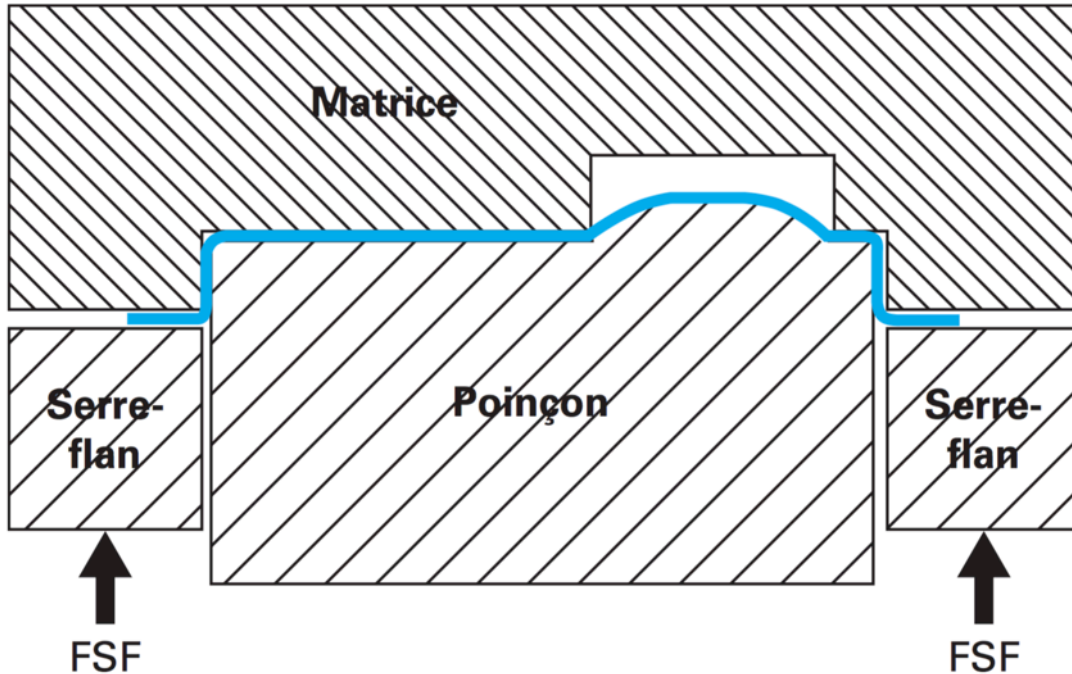
Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse triple-effet hydraulique

Procédé - Outillage



FSF force de serre-flan

Matrice :

épouse à peu près la forme extérieure de la pièce à réaliser

Poinçon :

a la forme intérieure de la pièce. Il pousse dans la matrice une tôle de contour adapté qu'on appelle **flan**.

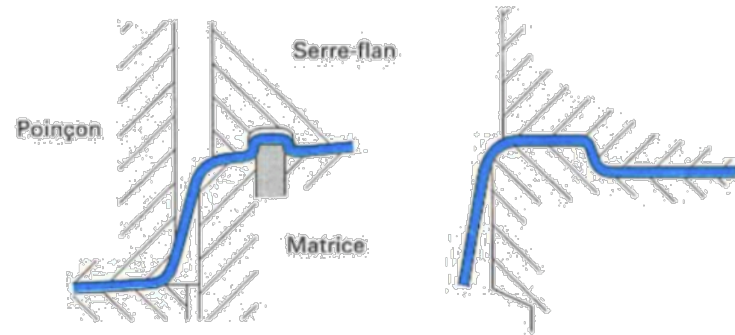
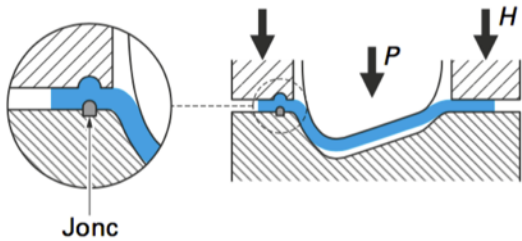
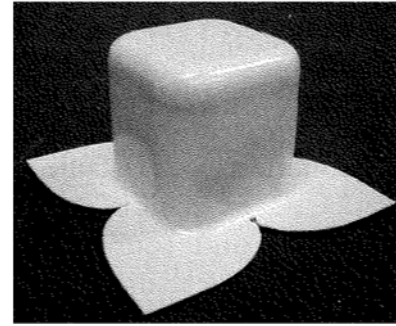
Serre-flan :

appuie le flan sur l'extérieur de la matrice pour éviter la formation de plis et réguler l'avalement du métal dans l'outil

Procédé - Accessoires d'outillage

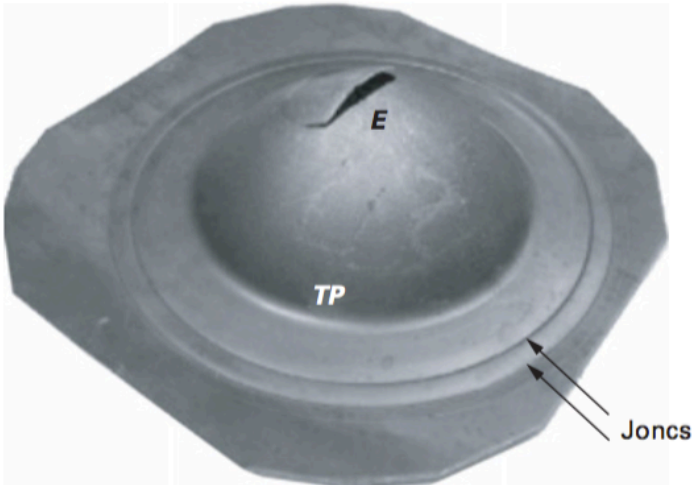
Dispositif de freinage de l'avalement :

- Homogénéiser l'avalement de matière
- réduire le manque de tension de la pièce si celle-ci est relativement plate
- réduire l'apparition de voilage



a) jonc

b) gradin

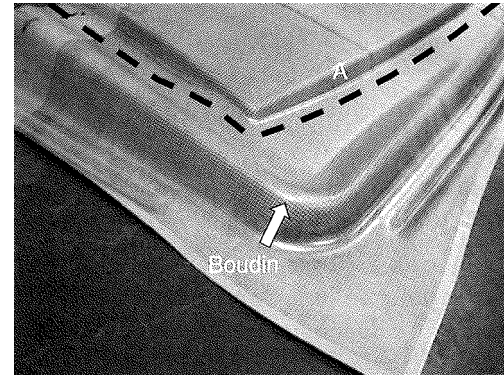


c) redan

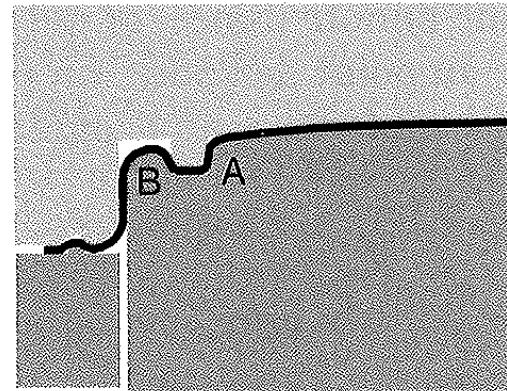
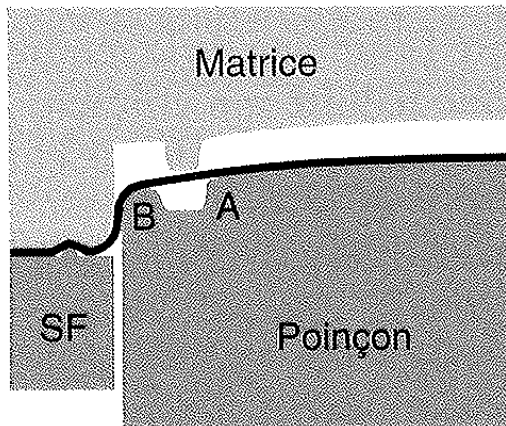
Procédé - Accessoires d'outillage

Dispositif de freinage de l'avalement :

- Homogénéiser l'avalement de matière
- réduire le manque de tension de la pièce si celle-ci est relativement plate
- réduire l'apparition de voilage

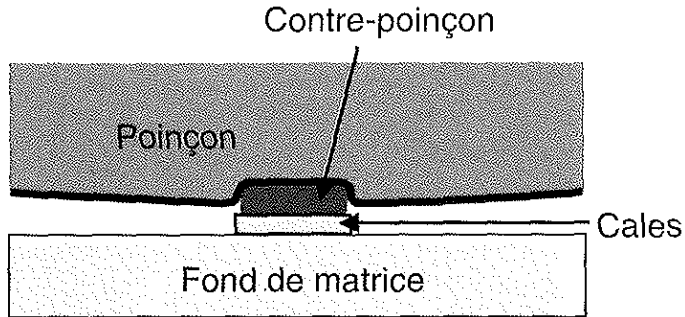


Formage avec boudin

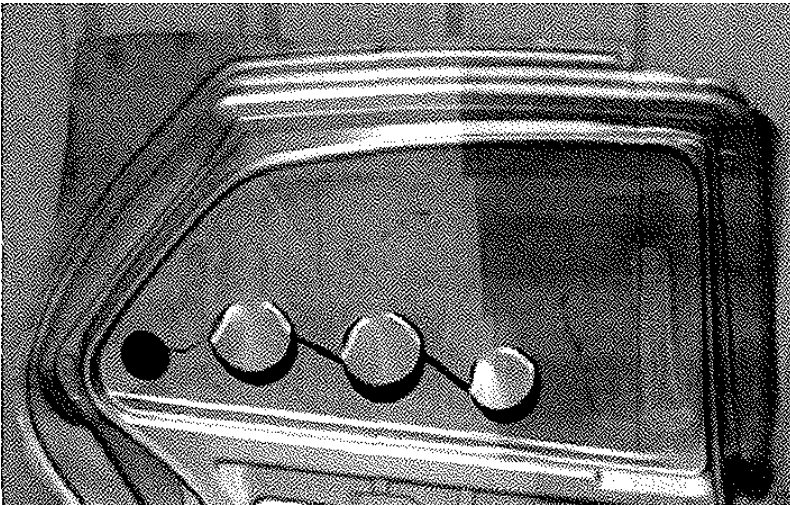


Procédé - Accessoires d'outillage

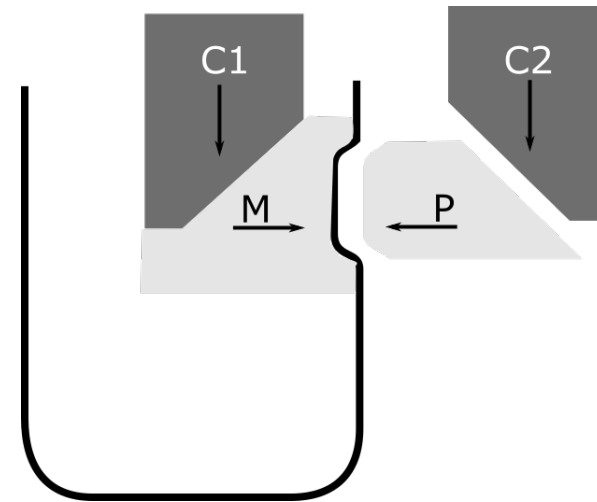
Contre-embouti



Lame de crevage



Cames

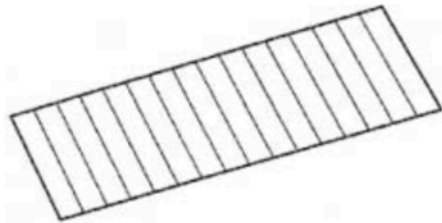


Presseurs : Lorsqu'il est nécessaire de tenir fermement le métal sur le nez du poinçon au moment de l'attaque. pièces de formes opposées à celle du poinçon, pressées par des ressorts.

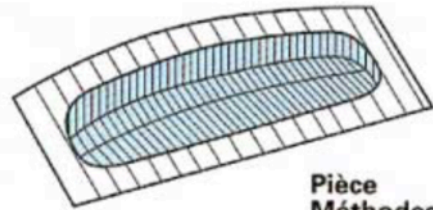
Drageoirs : butées de centrages

Ejecteurs : nécessaires dans certains cas à causes des contraintes résiduelles qui peuvent tendre dans certains cas à fermer l'embouti sur l'outil.

Procédé - Intégration de l'emboutissage dans une gamme de fabrication

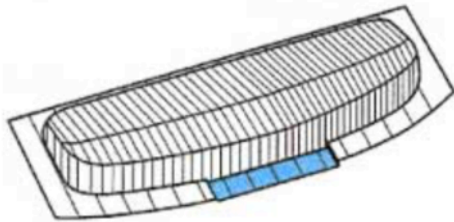


Phase 1 : cisailier flan



Pièce Méthodes

Phase 2 : emboutir



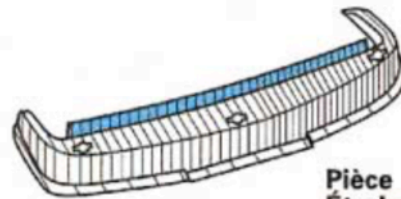
Phase 3 : frapper calibrer



Phase 4 : détourer poinçonner



Phase 5 : détourer échancrer



Pièce Études

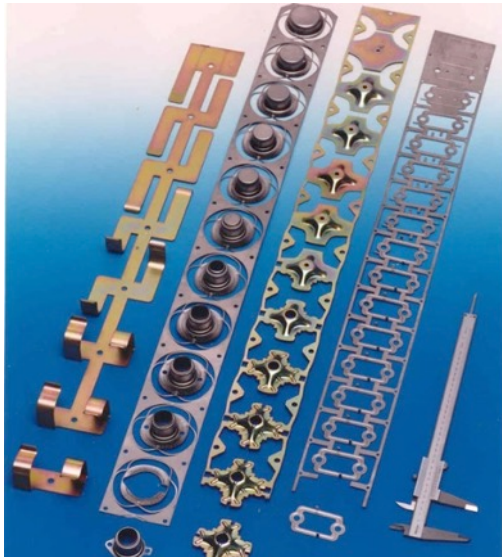
Phase 6 : relever bord

- Découpage de flan** ou **cisailage**
- Calibrage** : permet de marquer certains détails fins et de réduire la dispersion géométrique
- Détourage** : consiste à séparer la partie utile de la pièce des parties annexes qui lui ont été ajoutées pour en permettre le formage
- Tombage de bord** ou **relevage de bord** : ont pour objet de réorienter des zones périphériques qui ont été embouties dans le prolongement des surfaces principales de la pièce
- le **poinçonnage** et le **relevé de collet** : permettent respectivement de réaliser des trous et d'en relever le bord

Procédé - Intégration de l'emboutissage dans une gamme de fabrication

Petites pièces :

- presse à poinçons multiples**, également appelée **presse transfert**, sur laquelle sont montés tous les outils de la gamme, les transferts s'effectuant d'un poste à l'autre par un jeu de barres équipées de pinces ou de ventouses
- presse à suivre** équipée d'outils progressifs, dans lesquels le squelette de la bande de découpe porte la pièce d'une opération à l'autre avant d'être éliminé.



Grandes pièces :

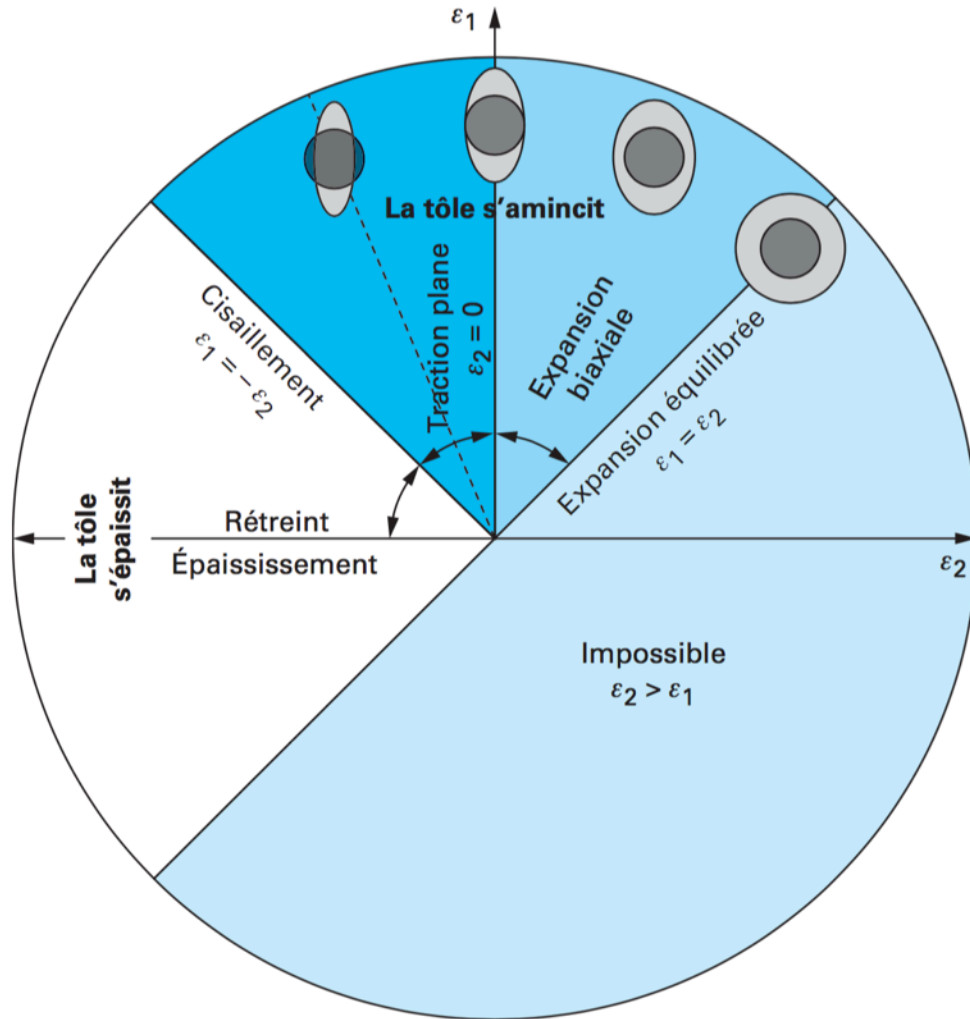
l'emboutissage s'effectue le plus souvent sur presse double effet monoposte, les opérations de parachèvement étant réalisées sur des presses simple effet alignées avec la première ; c'est le cas pour l'ensemble des *pièces de robe* (c'est-à-dire pièces extérieures de carrosserie) nécessitant 3 à 5 presses de parachèvement. Les presses en ligne qui concourent à la réalisation d'une pièce constituent un ensemble habituellement désigné par l'expression **ligne d'emboutissage**

Procédé - Trajet de déformation

Base principale des déformations :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{1} & \\ & \bar{2} \end{pmatrix}$$

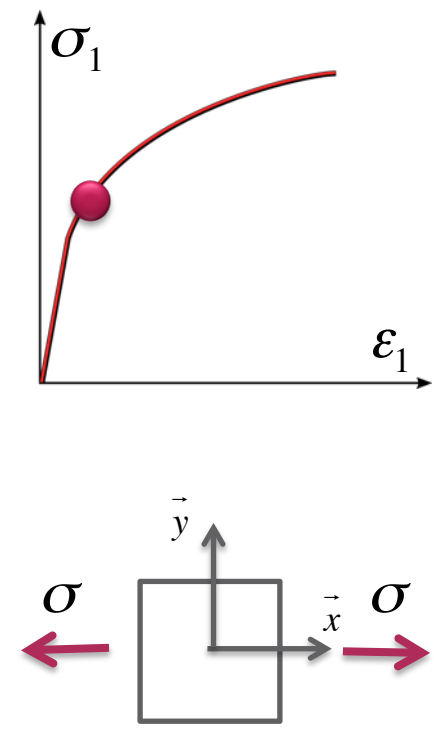
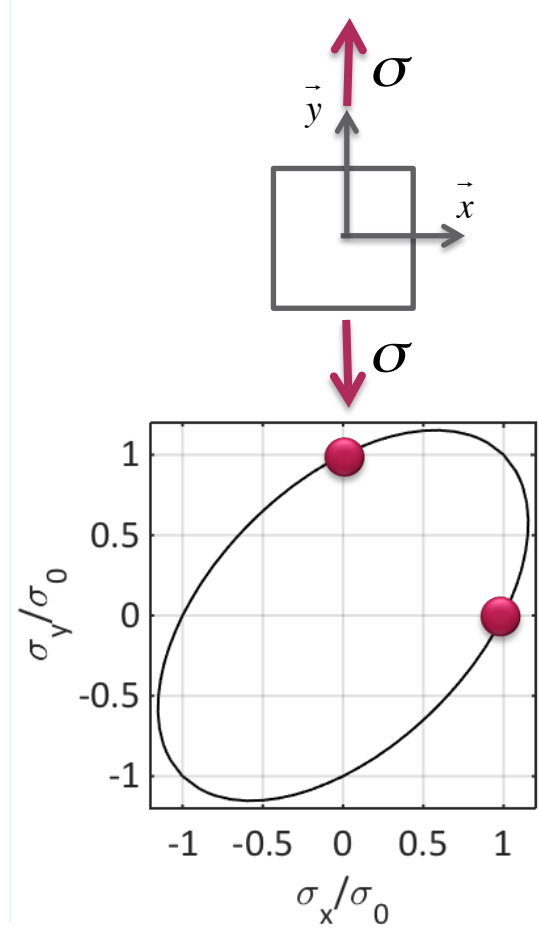
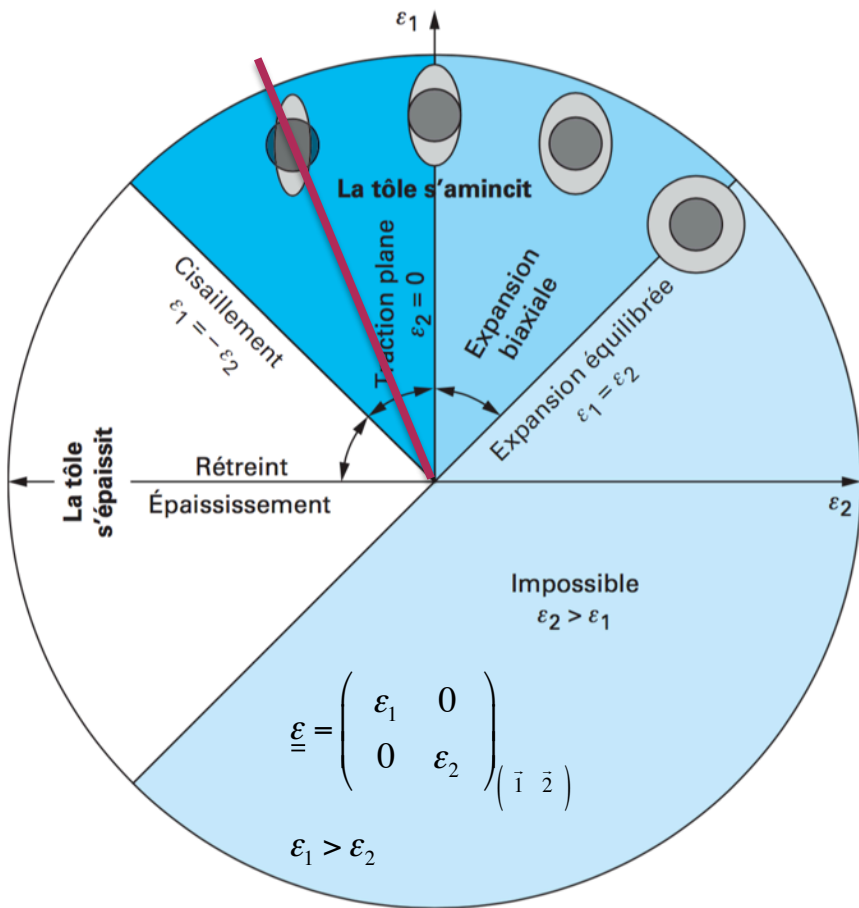
$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



GM-3-PROFA - Em

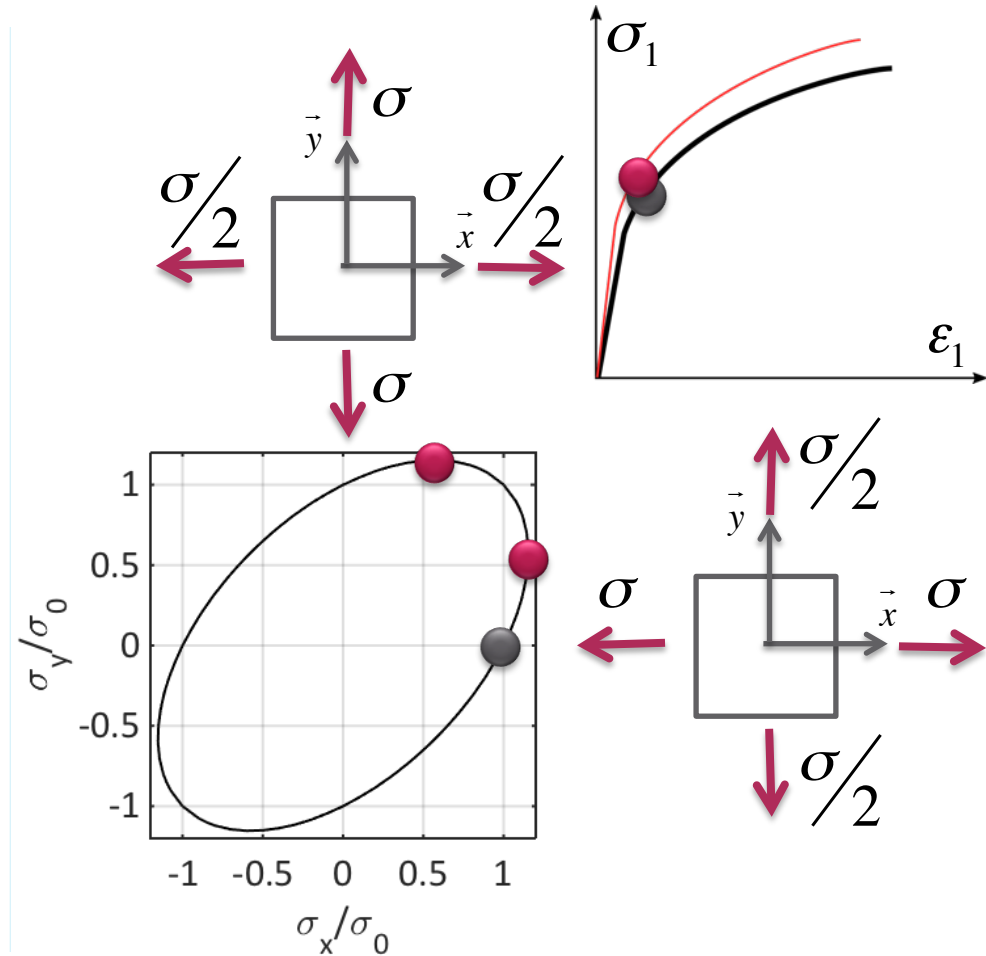
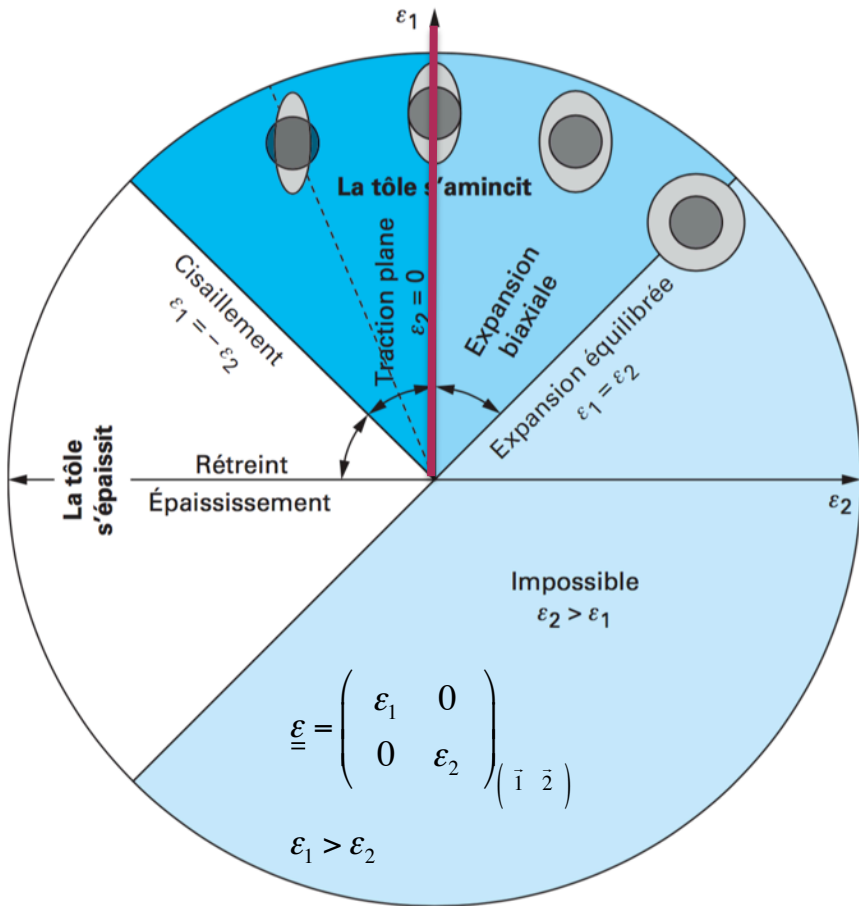
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

- Chargement multiaxial : Surface de charge (cas d'un matériau isotrope)



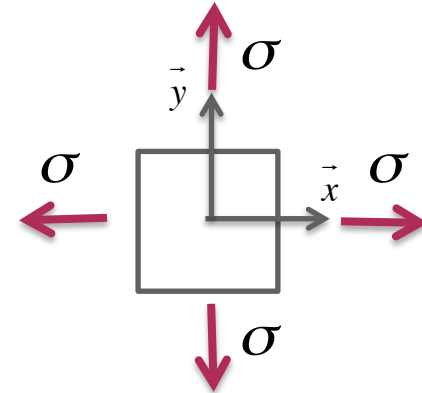
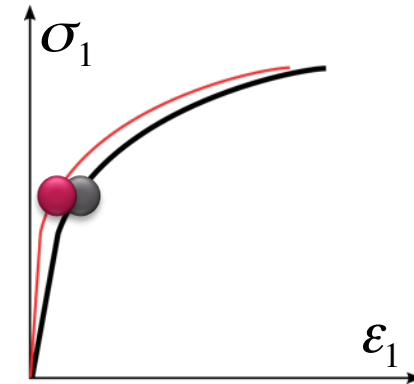
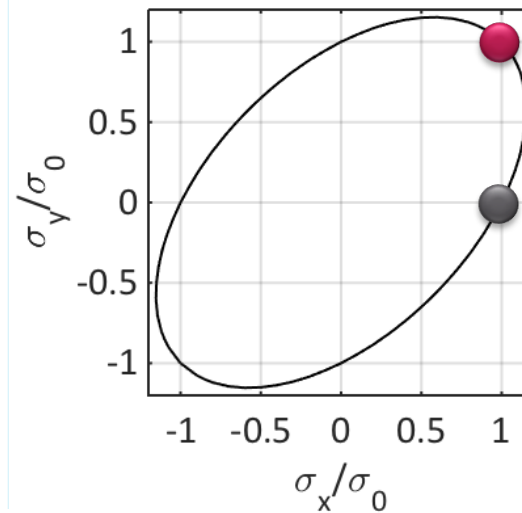
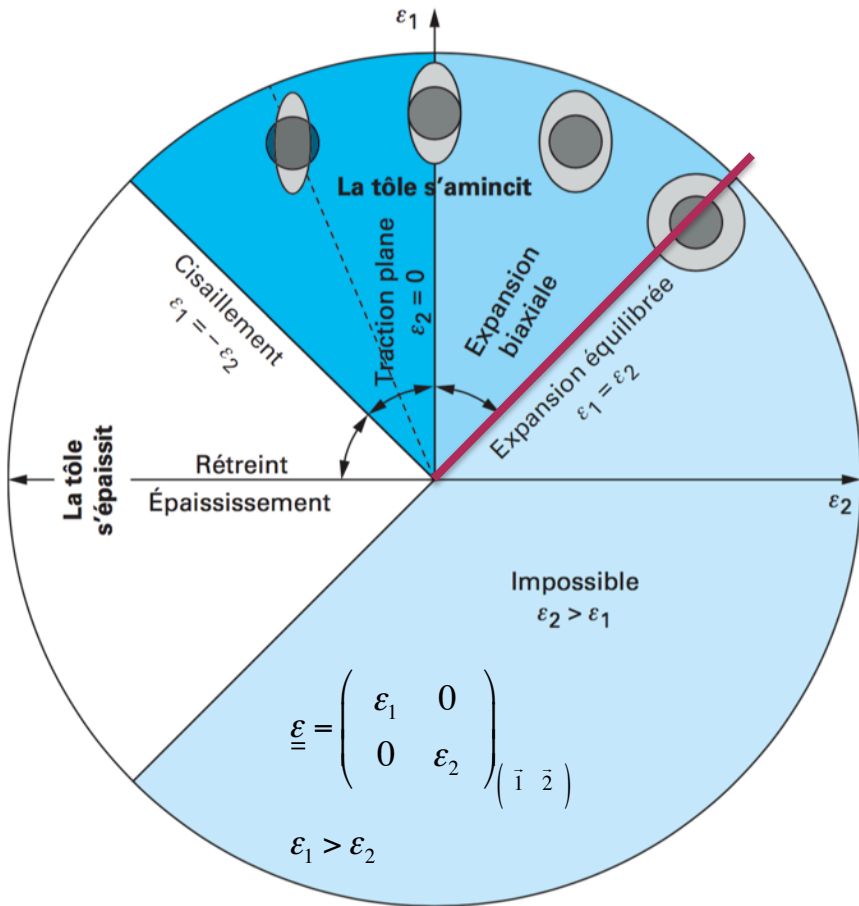
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

- Chargement multiaxial : Surface de charge (cas d'un matériau isotrope)



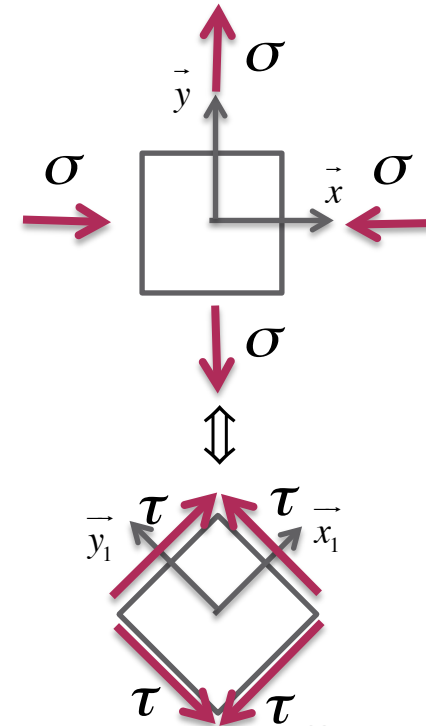
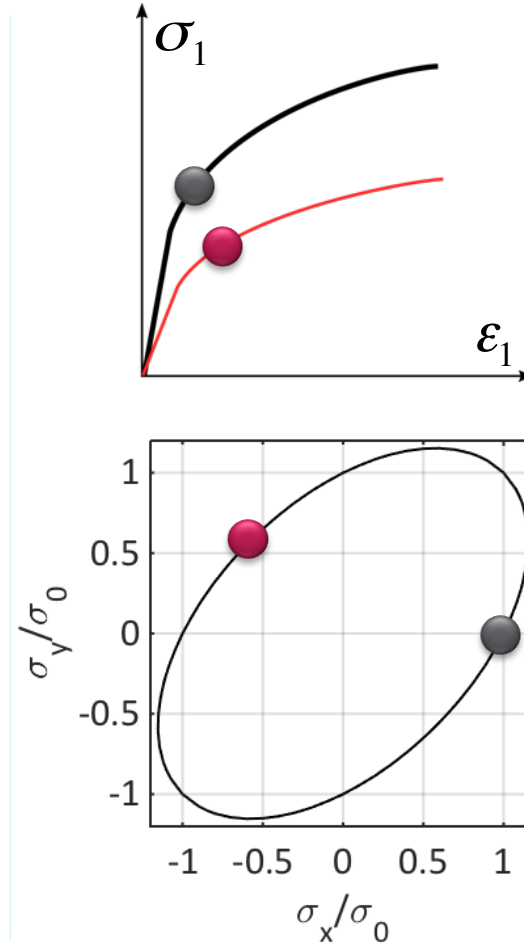
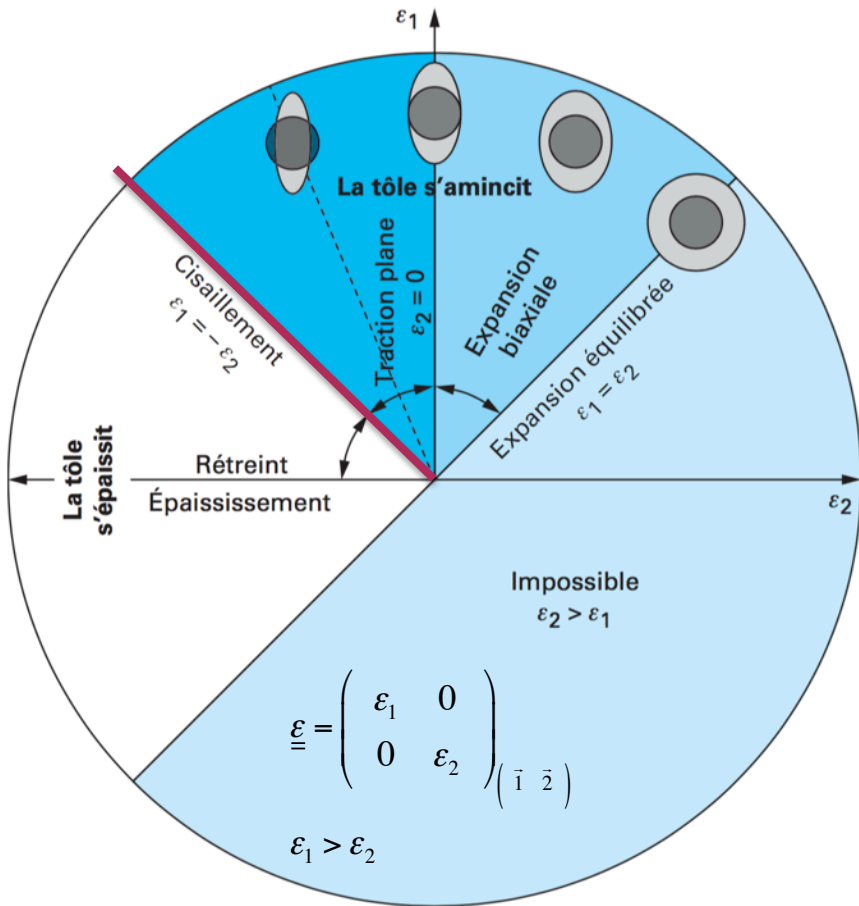
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

- Chargement multiaxial : Surface de charge (cas d'un matériau isotrope)



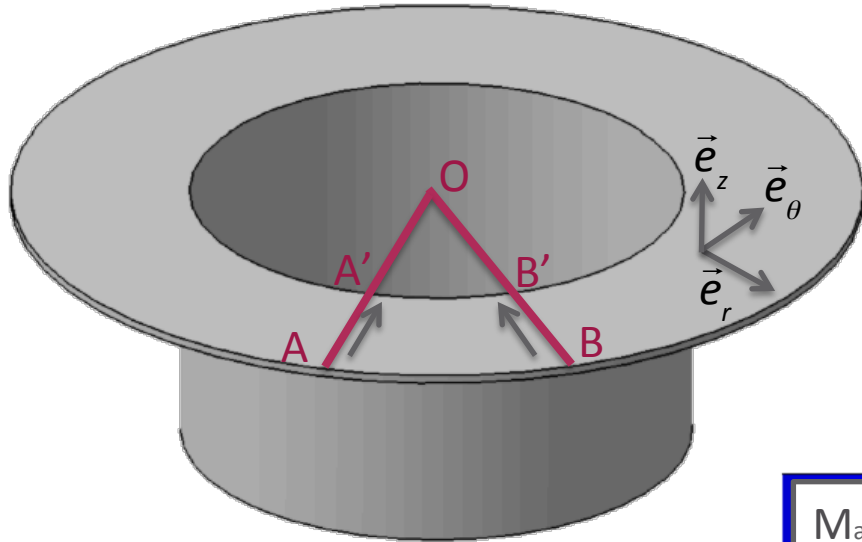
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

- Chargement multiaxial : Surface de charge (cas d'un matériau isotrope)

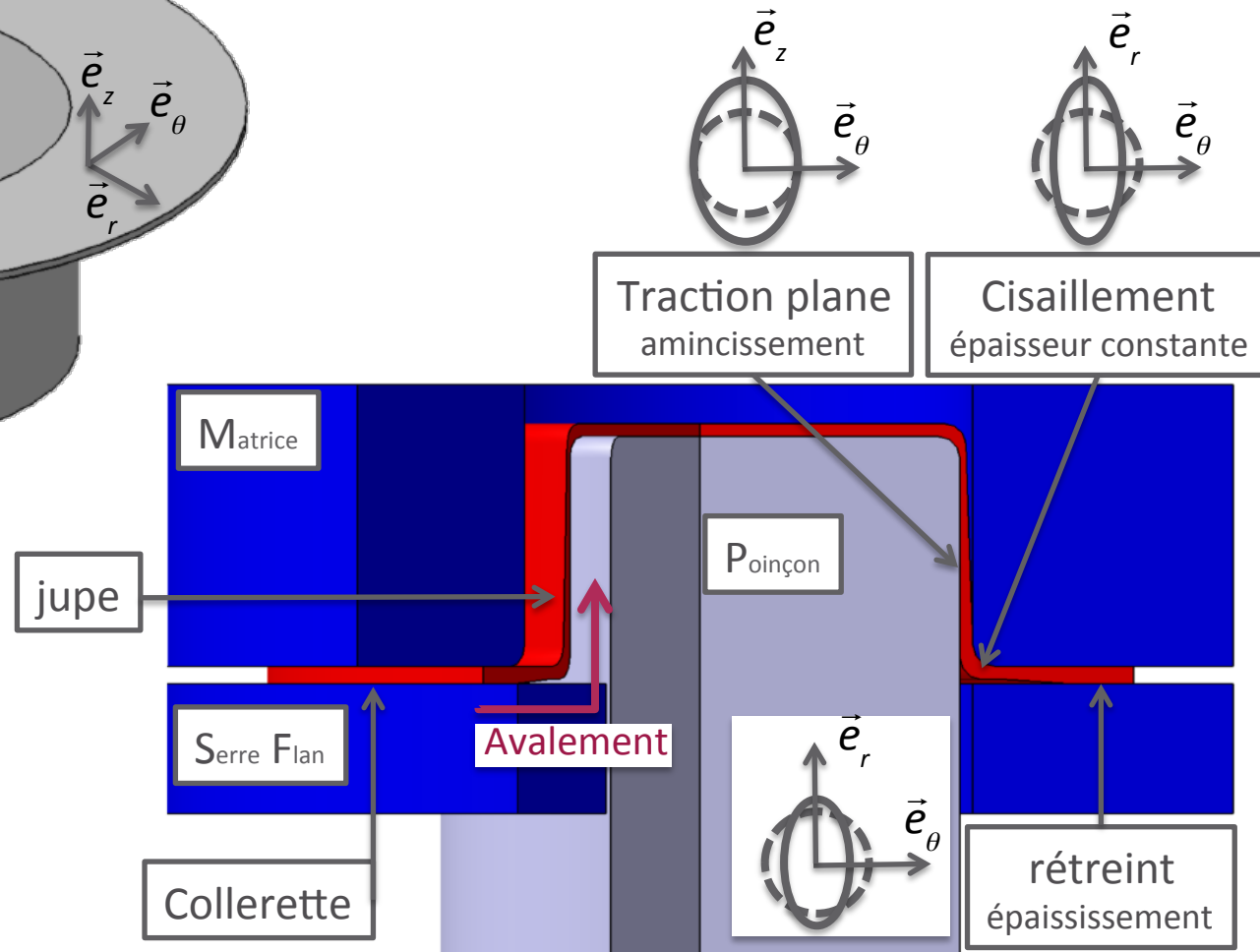


Trajet de déformation : Le rétreint

Cas du godet

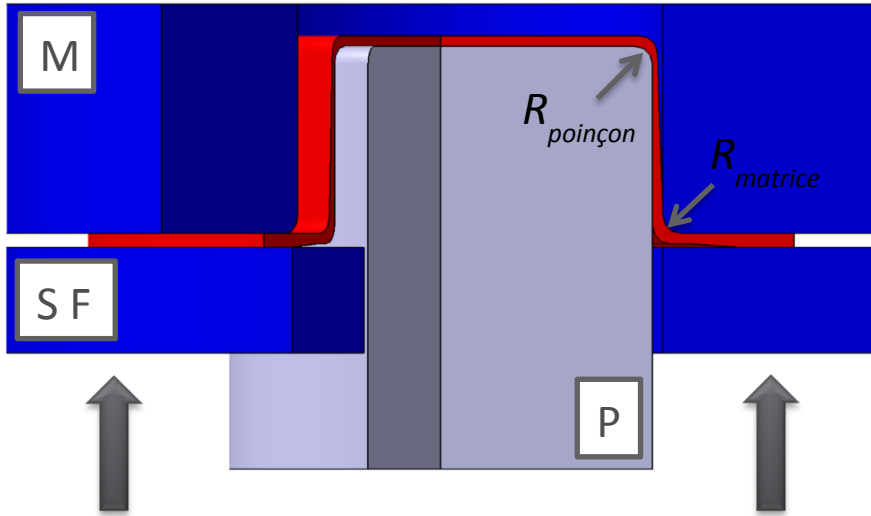


$$A'B' < AB \Rightarrow \sigma_\theta < 0$$

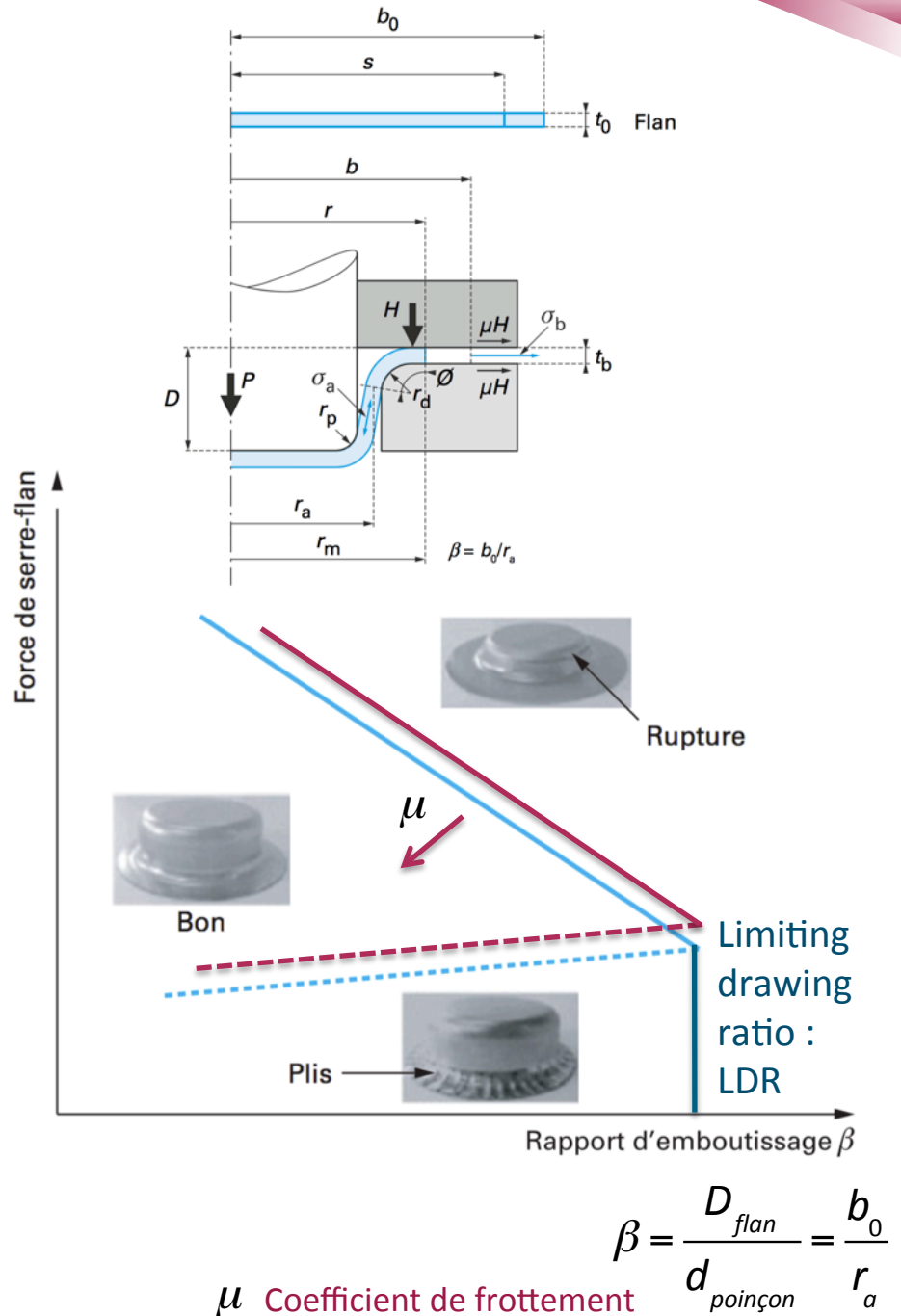
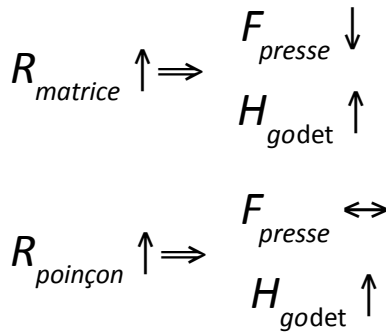


Critère d'emboutissabilité en rétreint

Cas du godet

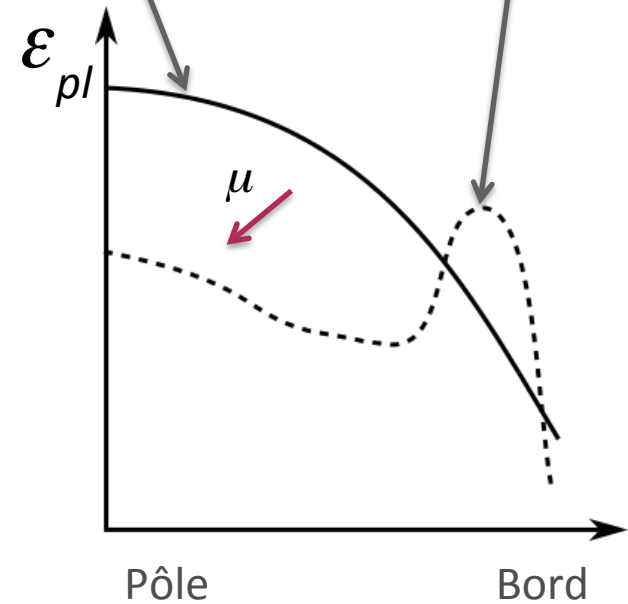
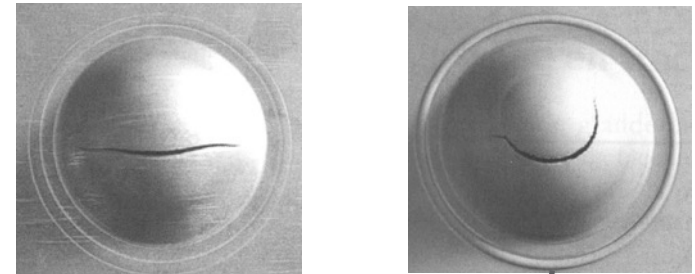
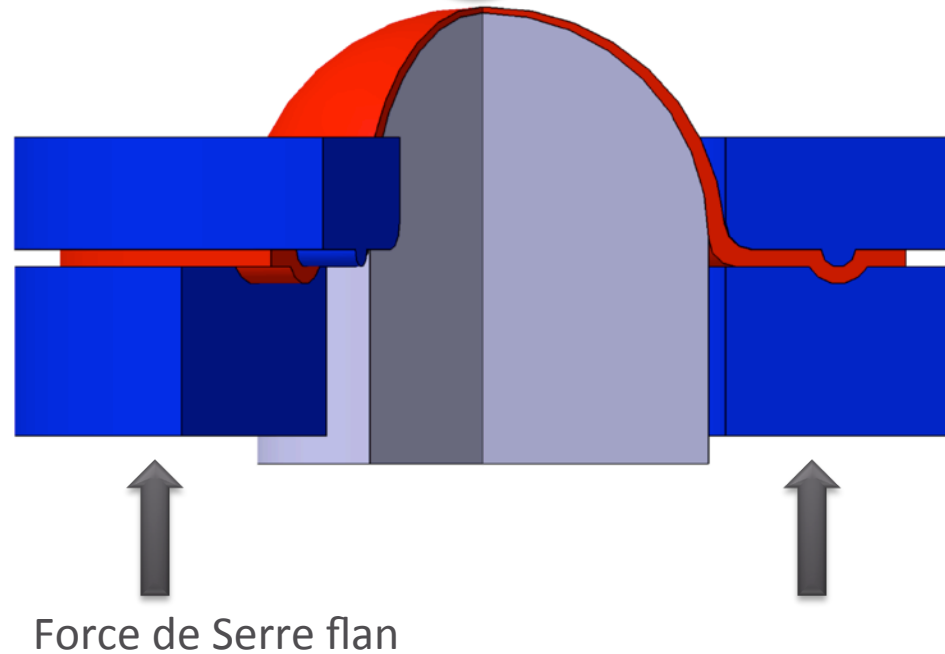
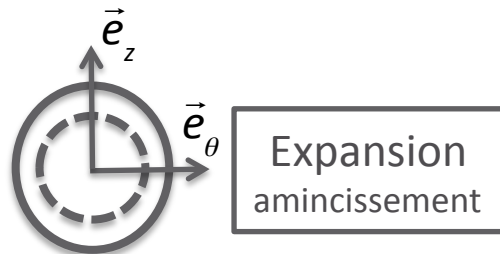


Force de Serre flan



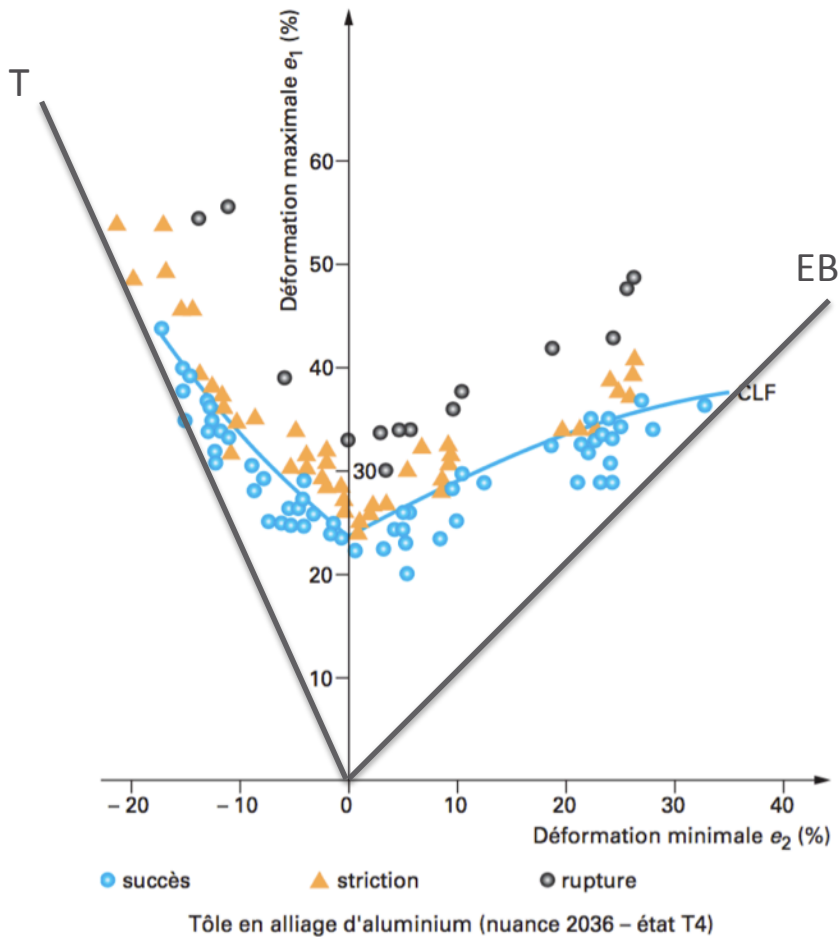
Trajet de déformation : L'expansion

Emboutissage sur poinçon hémisphérique



μ Coefficient de frottement /
hétérogénéité de la lubrification

Critère d'emboutissabilité : Courbe limite de formage



Expansion équilibiaxiale EB



Traction uniaxiale T

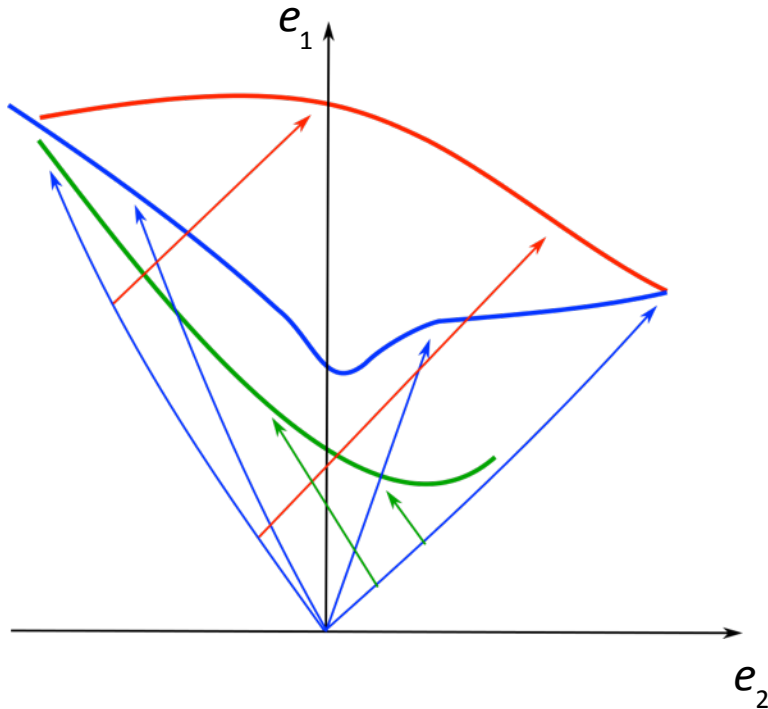
Méthode Nakajima

Courbe Limite de Formage : Apparition d'une striction localisée lors d'une sollicitation d'expansion radiale et monotone

Critère d'emboutissabilité : Courbe limite de formage

Limites d'utilisation :

Chemin de déformation non radial :

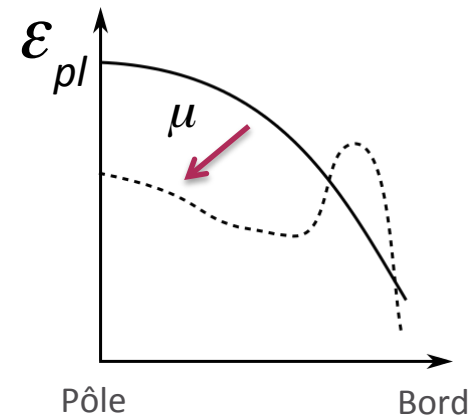


- Vieillessement du matériau (palier en début de domaine plastique)
- Découpe des bords des flans
- Répartition des déformations
- Variabilité des résultats ...

Courbure forte (pliage par exemple, influence du gradient de déformation) :

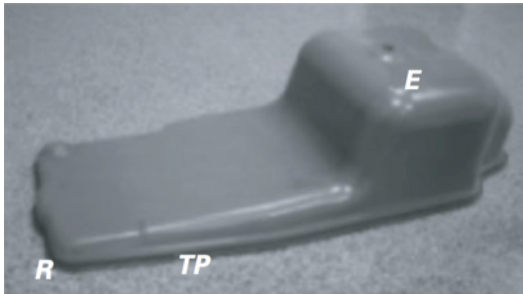


Lubrification : représentativité des essais de laboratoire

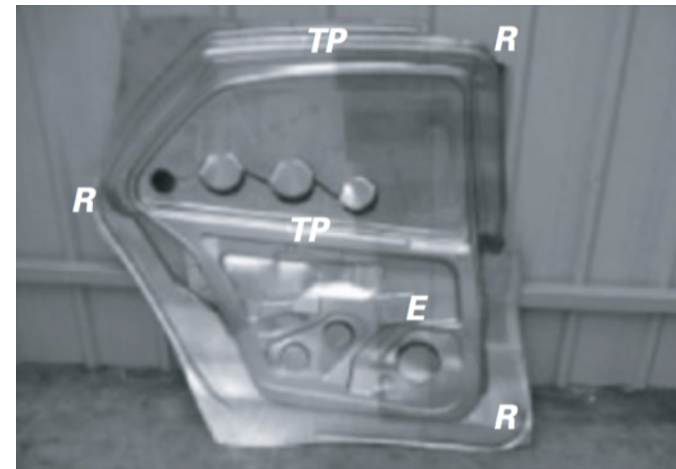


Trajet de déformation : Emboutis plus complexes

R : rétreint / TP : Traction plane / E : Expansion



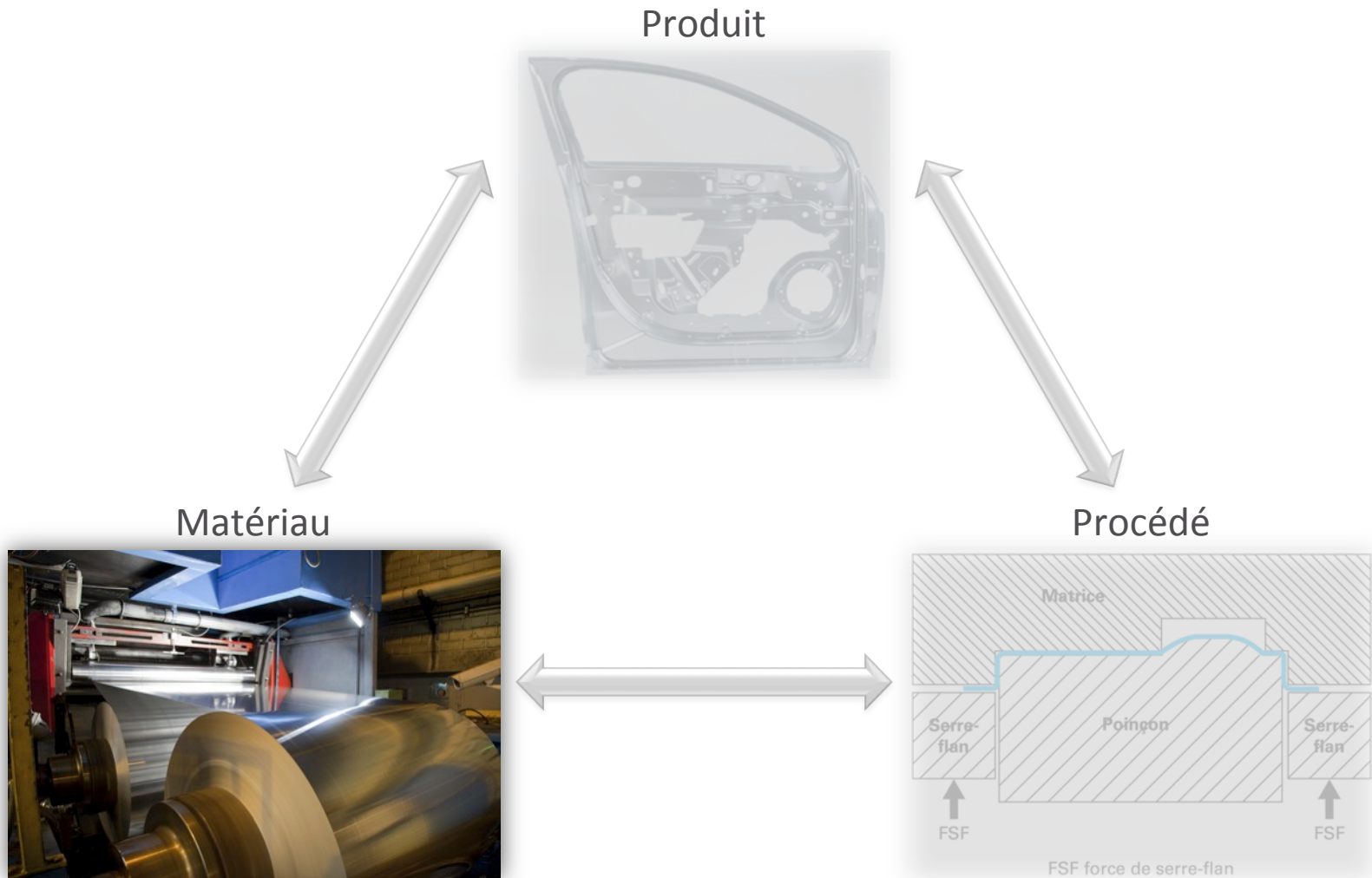
Carter d'huile pour poids lourds



Caisson de porte d'automobile

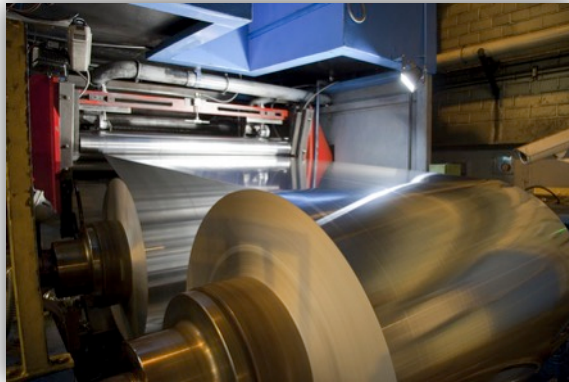
- Toute pièce emboutie présente au moins 2 modes principaux différents
- La plupart des pièces embouties présentent tous les modes de déformation
- La même zone d'une pièce peut subir successivement plusieurs modes de déformation

Emboutissage des métaux en feuilles



Matériau

Tôles issues de laminage



Matériau de base

Procédé

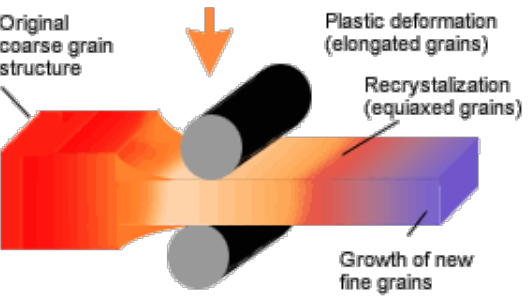
Traitement thermique

Rugosité

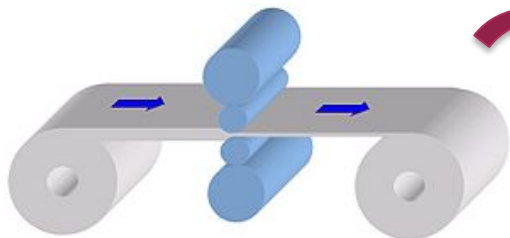
Lubrification

Exemple de l'obtention de tôle en acier

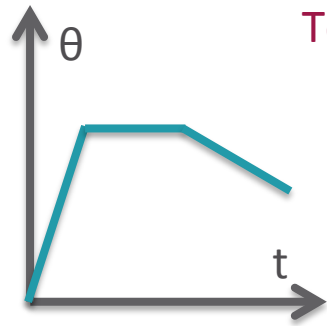
Laminage à chaud



Laminage à froid



Recuit continu



Parachèvement de surface :
Lubrification (solide,
liquide, chimie de surface)

Galvanisation
Galvannealed
Base Alu
Etain et chrome
...

Tôle à chaud

Tôle revêtue

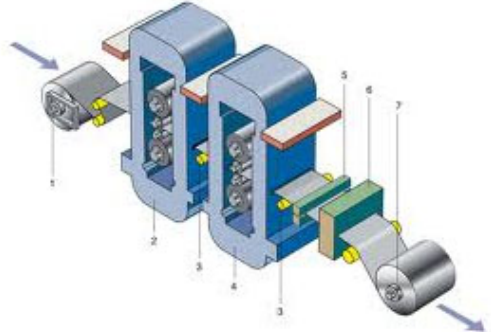
Tôle revêtue

Tôle à froid

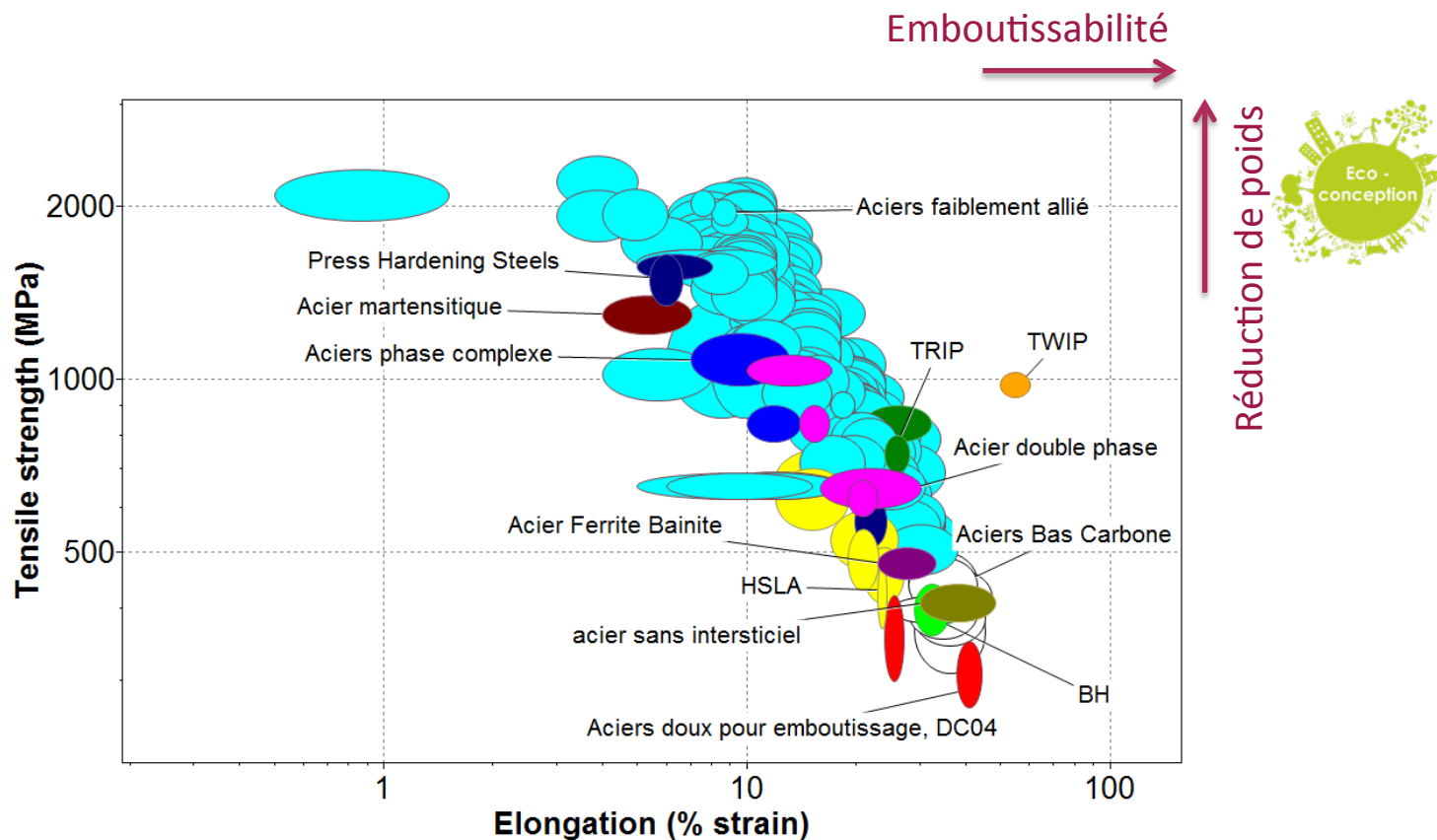
Base Alu
Etain et chrome
...

skin pass

Parachèvement de surface :
Lubrification (solide,
liquide, chimie de surface)



Aciers au carbone



Tôle à chaud (épaisseur 1.2 à 10mm)

Acier doux pour emboutissage (DD) -> formage facile pliage, roulage

Acier à haute limite d'élasticité (HSLA) -> pièce de structure, automobile

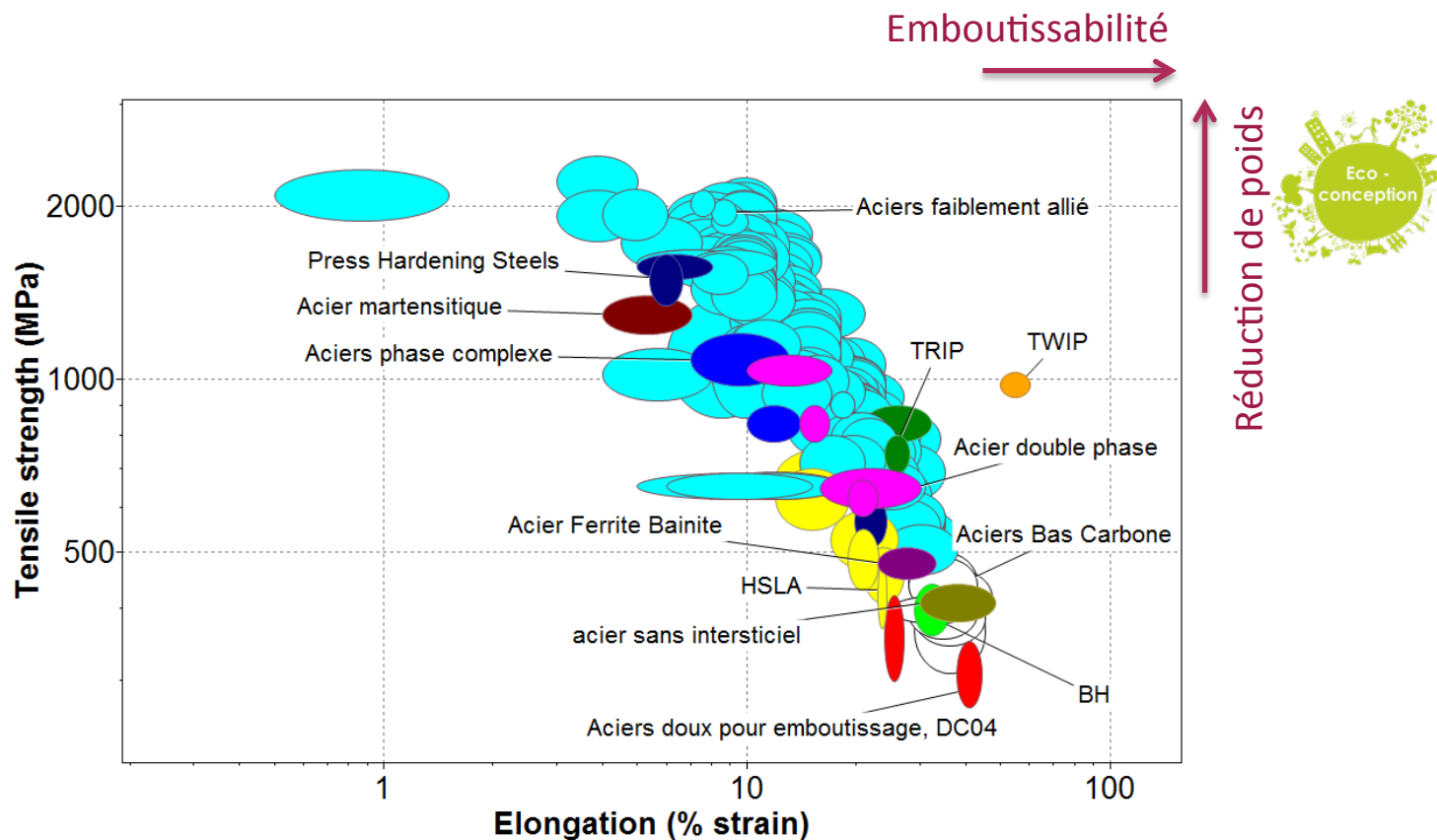
Acier Double Phase (DP) -> renfort automobile (bonne tenue en fatigue)

Acier Ferrite Bainite (F) -> pièces avec trou en expansion : ex renfort de pieds milieu

Acier Phase complexe (C) -> Embouti peu profonds : ex bras de suspension

Acier Martensitique (M) -> Formabilité limitée

Aciers au carbone



Tôle à froid : (épaisseur 0.35 à 3mm)

Acier doux pour formage à froid (DC)->Bonne emboutissabilité, pièces générales (électroménager, mobilier métallique, carrosserie automobile)

Acier à haute limite d'élasticité (HSLA)

Acier Bake Hardening (B) -> formabilité meilleure que HSLA, durcissement lors de la cuisson de la peinture, ex pièces extérieures de carrosserie

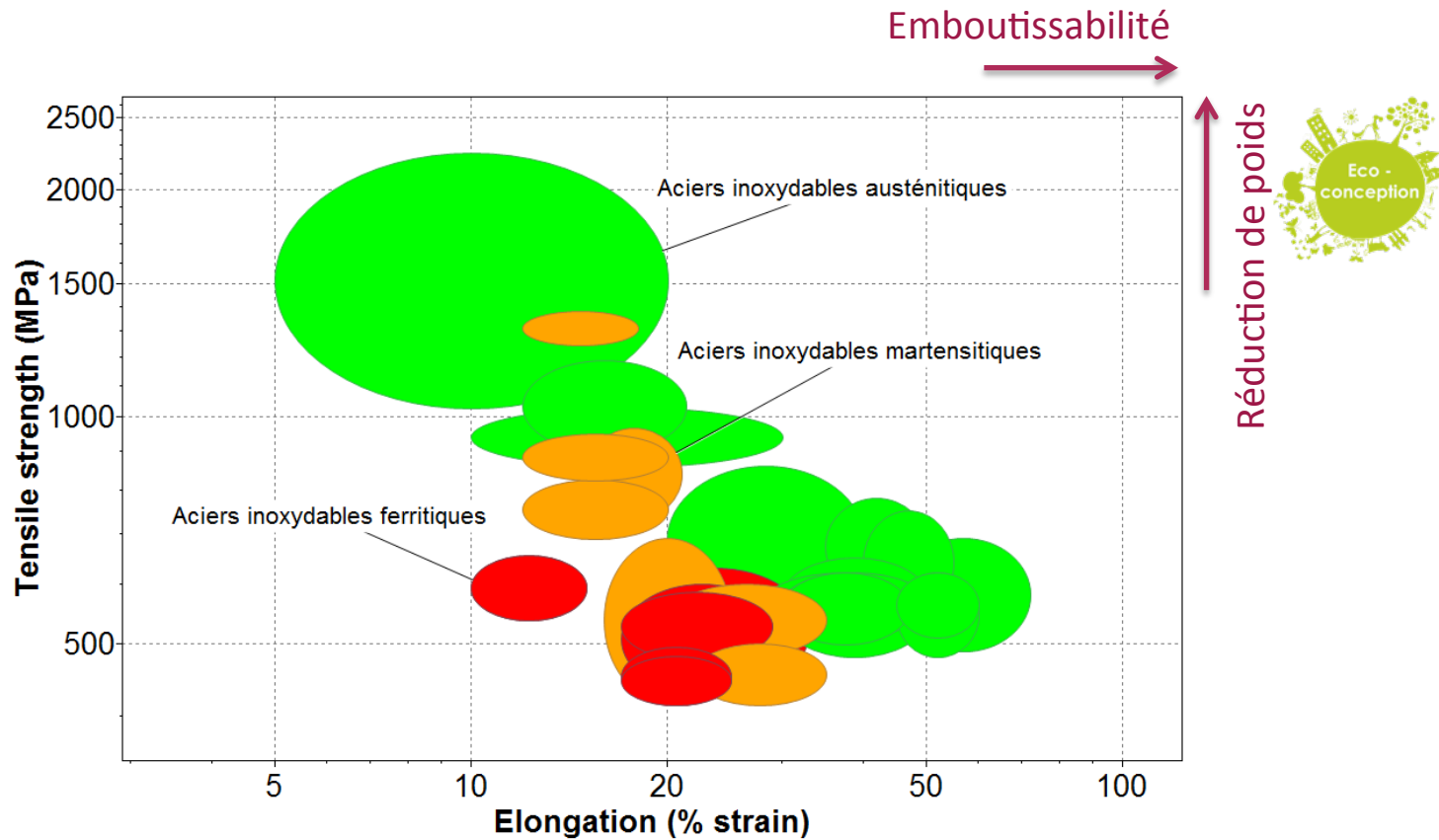
Acier Double phase (X) -renforts de pare-chocs, longerons avant

Acier Transformation Induced Plasticity (TRIP) -> Pièces de structures automobiles (fatigue, résistance au chocs), structure de siège, longeron...

Acier phase complexe (C) -> Pièces de structure peu déformées lors de l'emboutissage

Acier Twinning Induced plasticity (TWIP)

Aciers inoxydables



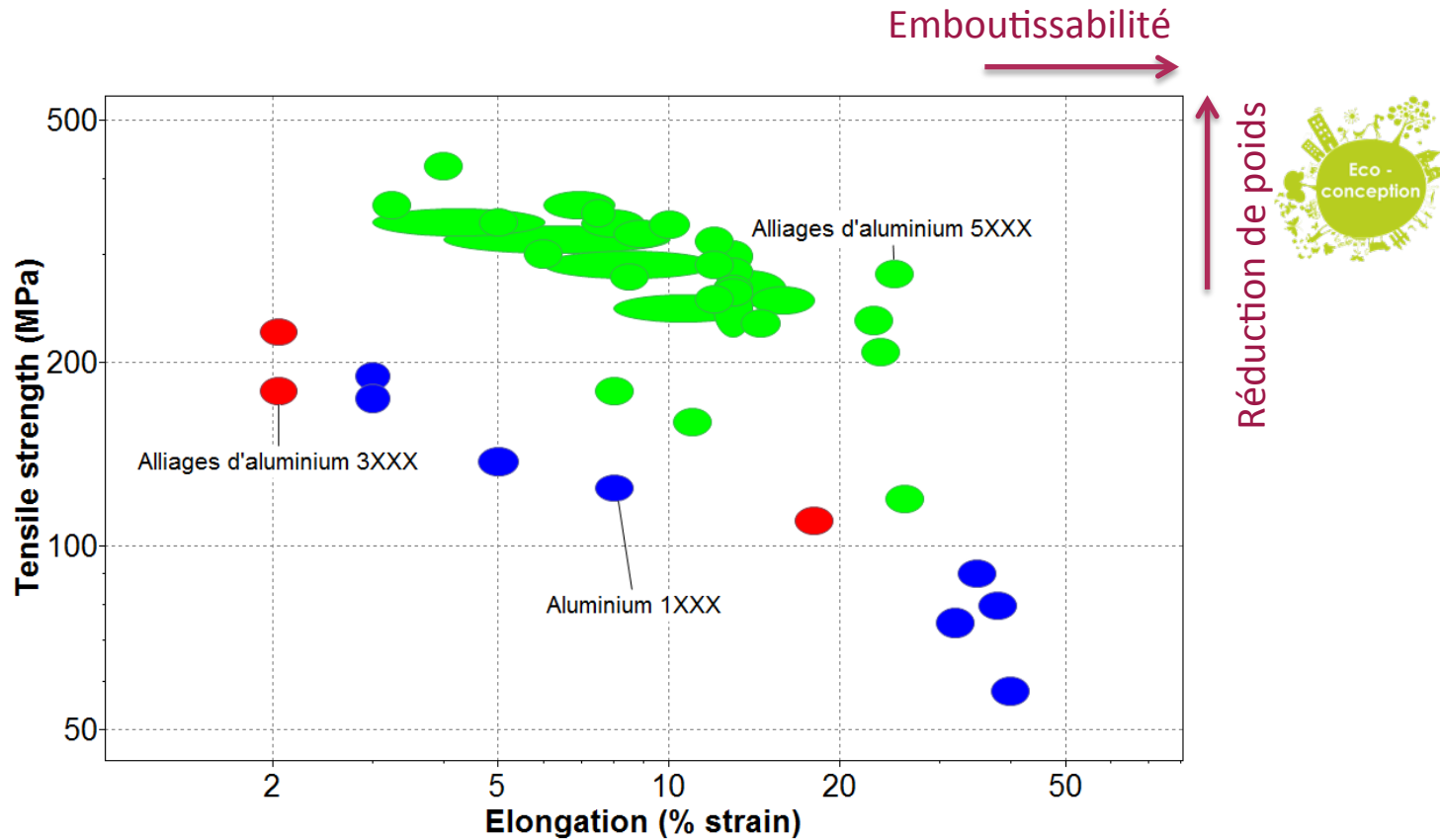
Aciers inoxydables matensitiques -> grande dureté donc peu ductile, peu embouti

Aciers ferritiques -> articles ménagers, électro-ménagers, éviers...

Aciers Austénitiques -> éviers profonds, matériel sanitaire, matériel de cuisson

Attention : Tendance au grippage (Lubrification et température d'emboutissage à maîtriser).

Alliages d'aluminium



Aluminium pur (1XXX)-> formabilité limitée, ustensiles culinaires

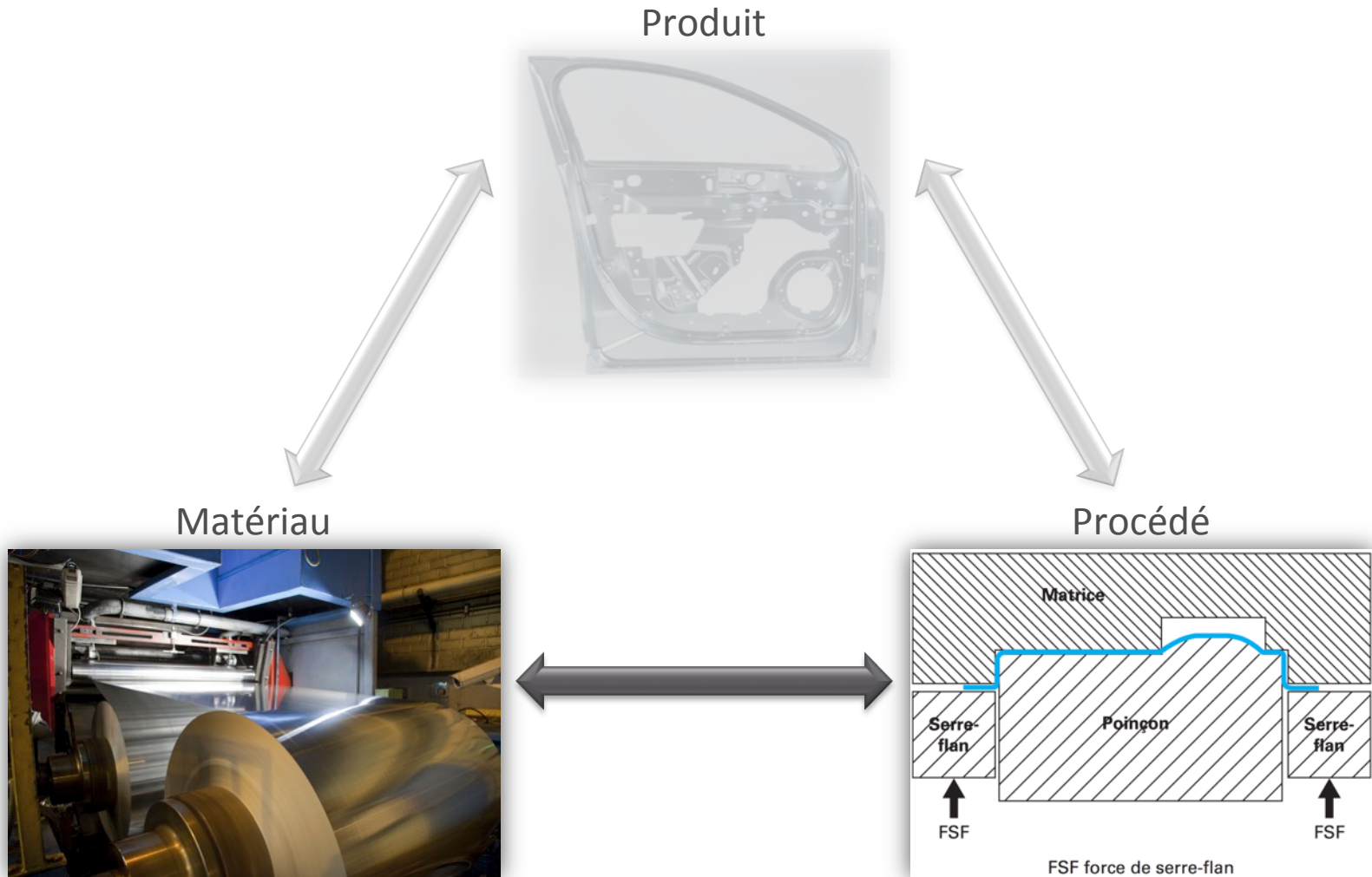
Alliages non durcissants (3XXX)-> formabilité limitée, ustensiles culinaires

Alliages non durcissants (5XXX)--> meilleure formabilité, caisson de portes automobiles, éléments de structure

Alliages d'aluminium pour emballage (3XXX, 5XXX)->capsules de bouteille, boîtes de boisson, plats jetables.

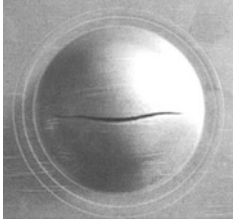
Attention : Tendance au grippage (Lubrification et température d'emboutissage à maîtriser).

Emboutissabilité

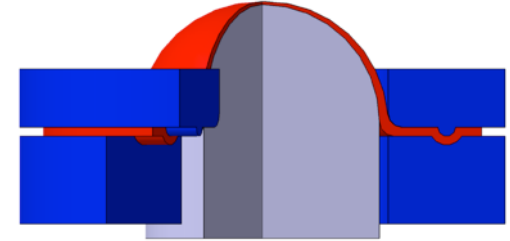


Caractéristiques d'emboutissabilité en expansion des tôles

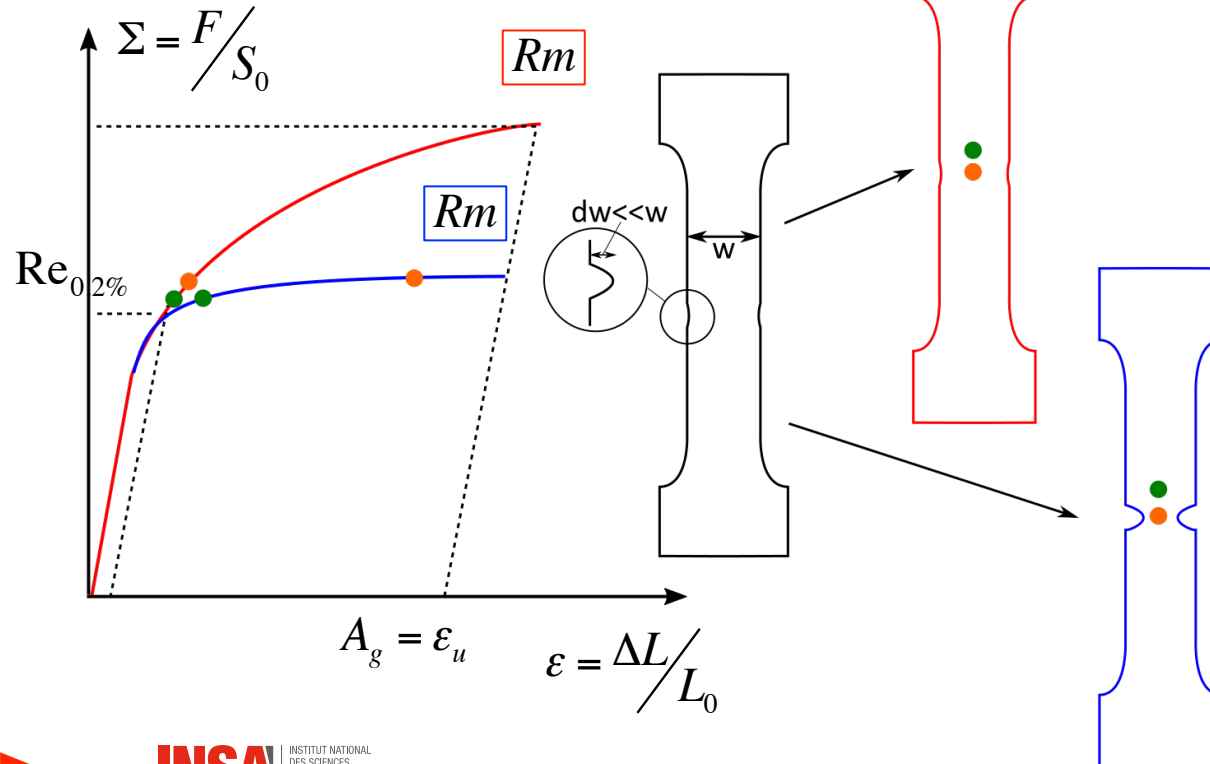
Risque de striction ↘
(rupture ductile)



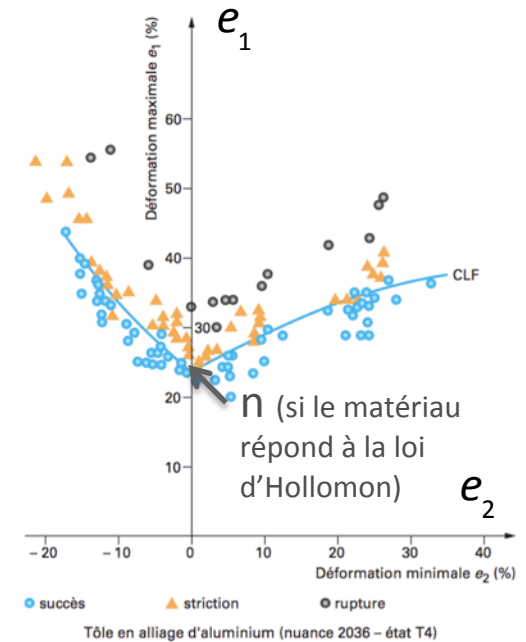
si $\frac{R_e}{R_m}$ ↘ ou n ↗
 A_g ↗



Effet de R_e/R_m sur la striction en traction



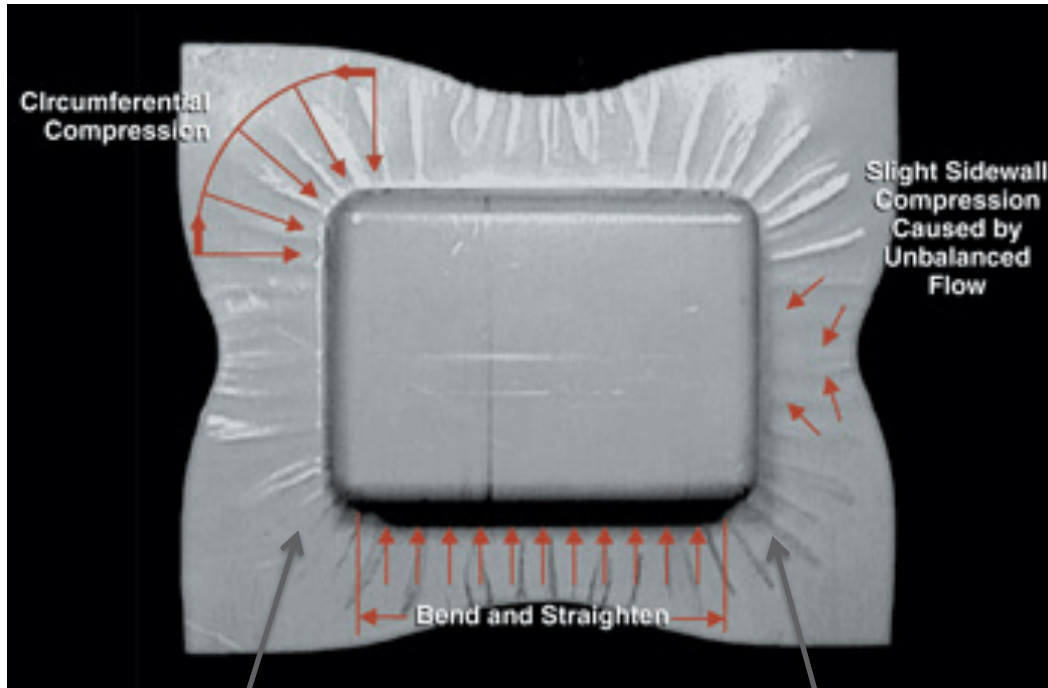
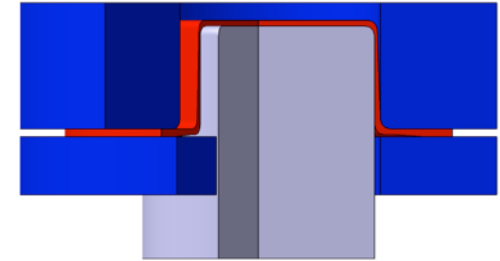
Effet de la consolidation n sur la CLF



$$\sigma = k \epsilon_{pl}^n$$

Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

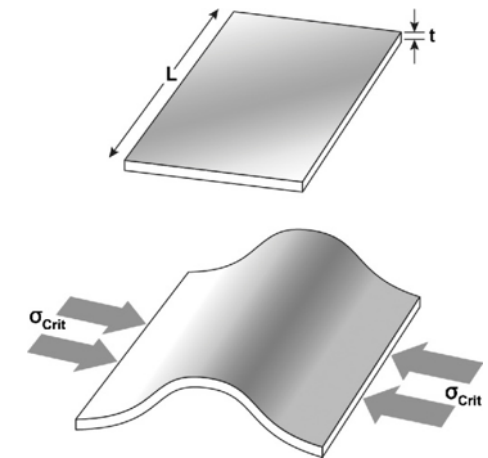
Apparition de plissement ↘ si l'épaisseur t ↗



Plissement

Flèche inversement proportionnelle au cube de l'épaisseur

Flambage de tôle mince

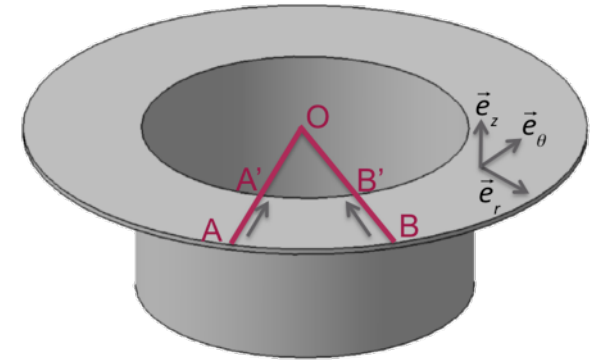


$$\sigma_{crit} = \alpha t^3$$

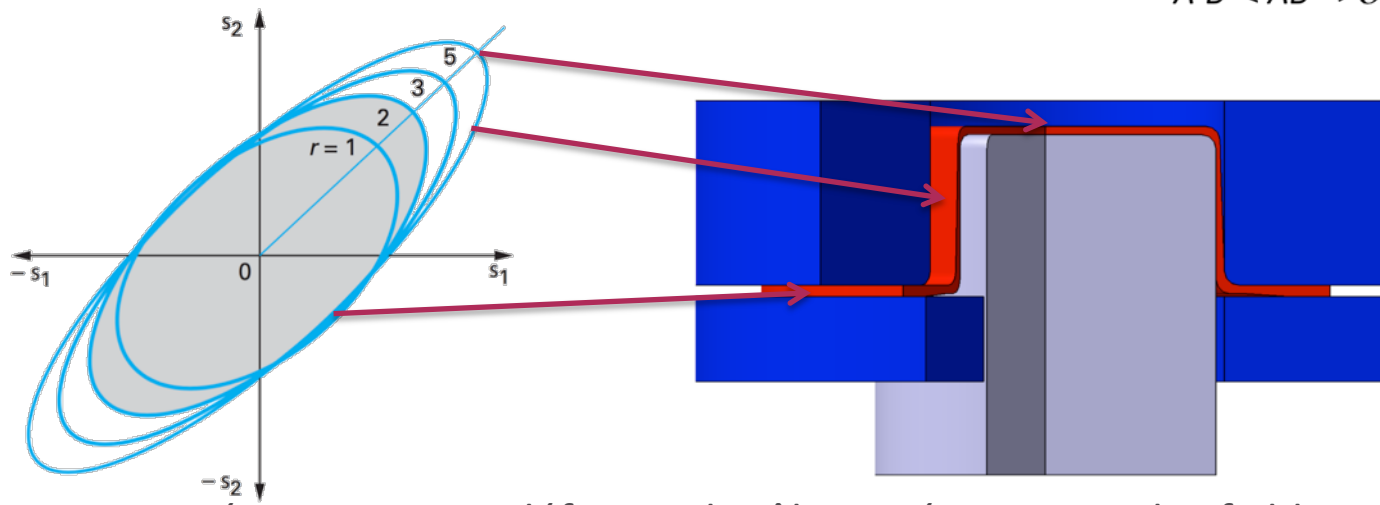
Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

Apparition de plissement ↘ si $r_{\text{moyen}} \nearrow$ et si $Re \searrow$

Le coefficient d'anisotropie r_{moyen} rend compte de la tendance du métal, au cours d'un essai de traction, à se déformer plutôt en largeur qu'en épaisseur. le mode de déformation appelé rétreint impose précisément une diminution de largeur (circonférentielle) sous traction pour que le métal pénètre dans la matrice.

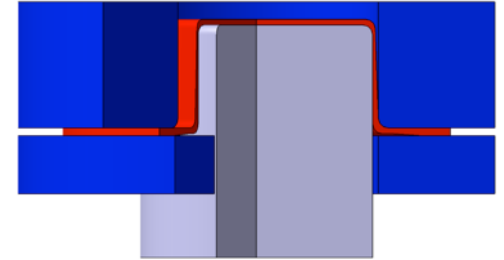


$$A'B' < AB \Rightarrow \sigma_\theta < 0$$

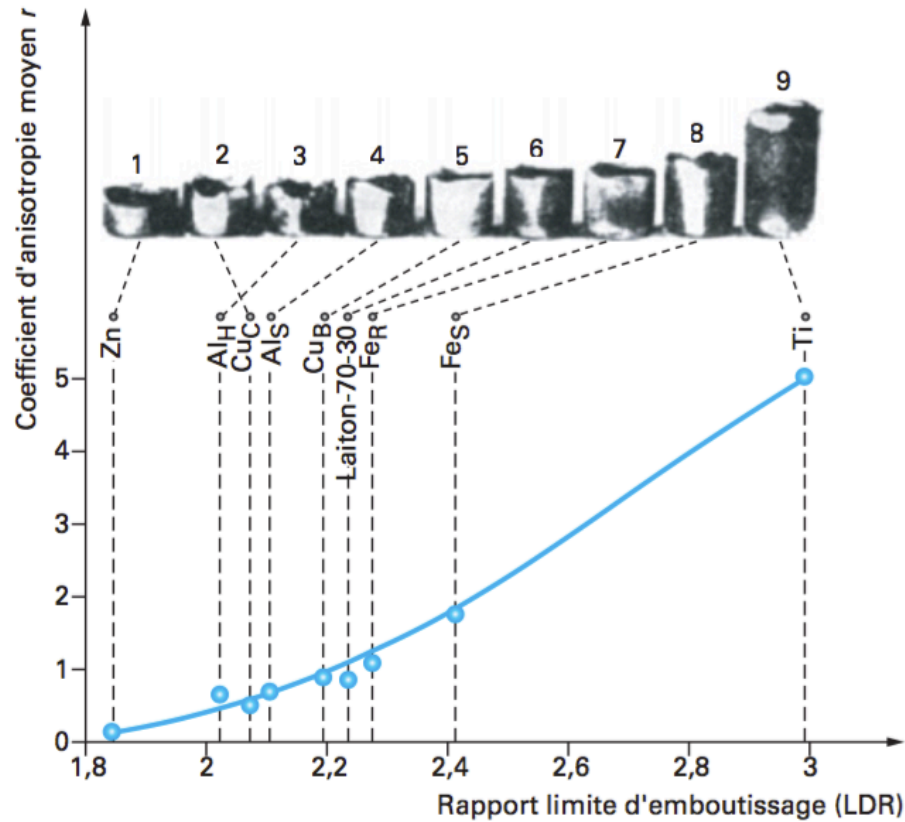


La contrainte nécessaire pour déformer la tôle en rétreint est plus faible comparativement aux autres modes de déformation quand r_{moy} augmente

Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles



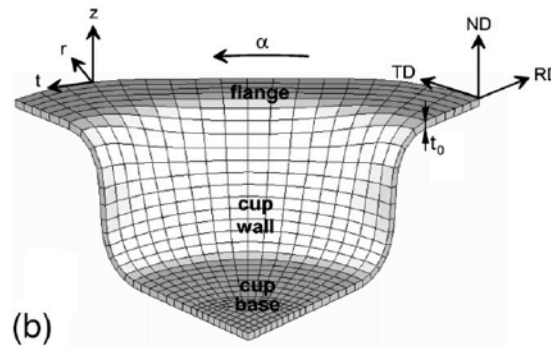
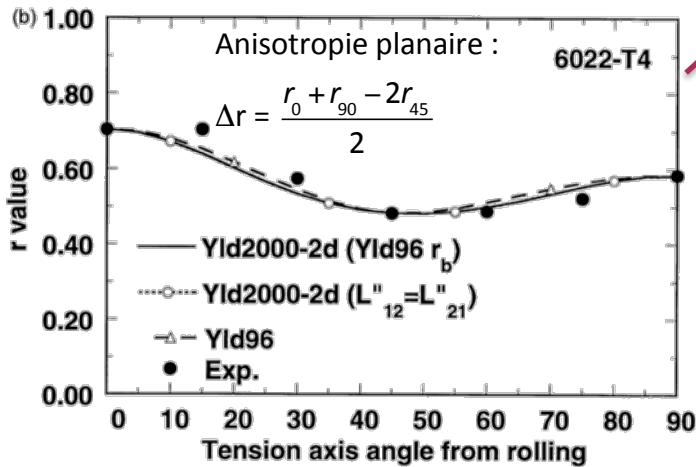
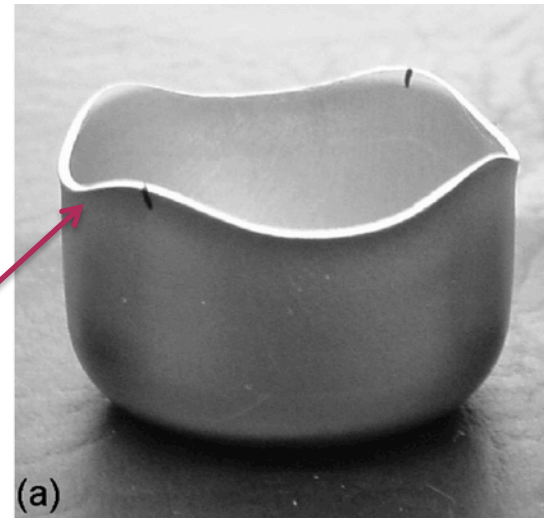
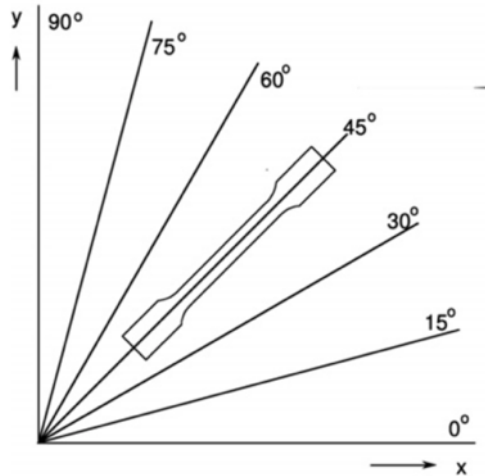
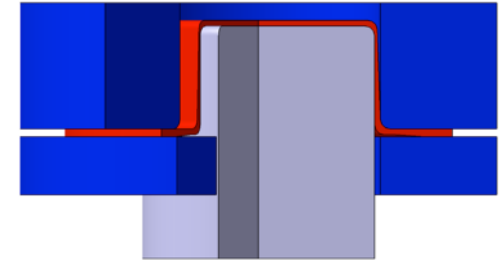
Apparition de plissement ↘ si $r_{\text{moyen}} \nearrow$ et si $Re \searrow$



Al_H aluminium écroui
 Al_S aluminium recuit
 Cu_B, Cu_C deux qualité de cuivre
 Fe_R acier effervescent
 Fe_S acier calmé à l'aluminium

Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

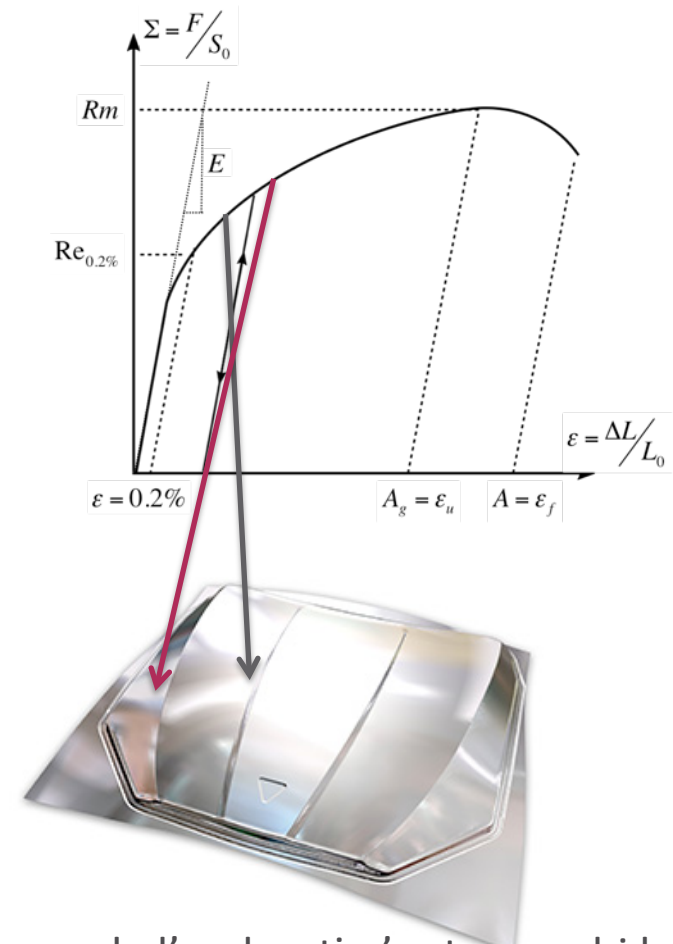
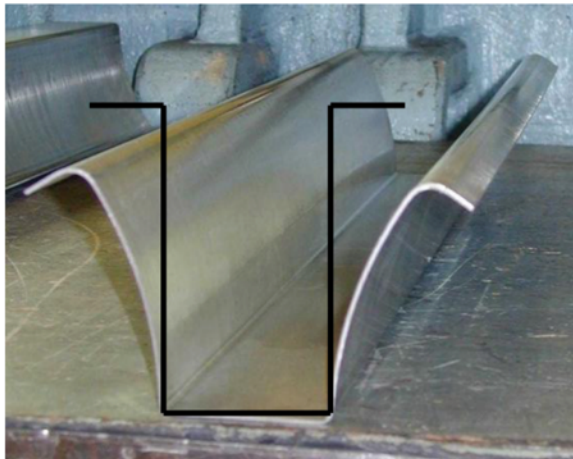
Apparition de cornes d'emboutissage ➡ si $\Delta r \downarrow$



Caractéristiques d'emboutissabilité : Retour élastique et retour élastique différentiel (voilage de panneaux peu profond)

Retour élastique ↘ si l'épaisseur t ↗ et si Re ↘

Ce problème s'accroît avec l'utilisation de nuances à hautes caractéristiques mécaniques qui sont choisies pour réduire le poids des structures.



Si plusieurs zones de l'embouti n'ont pas subi le même taux de déformation lors de l'emboutissage. Lorsque l'on relâche l'effort d'emboutissage, le rééquilibrage des contraintes peut induire des zones comprimées qui ont tendance à voiler.

Caractéristiques d'emboutissabilité : Défauts de surface

Peau d'orange :

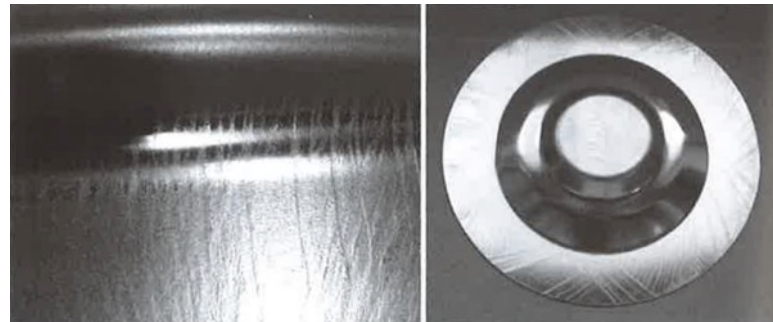
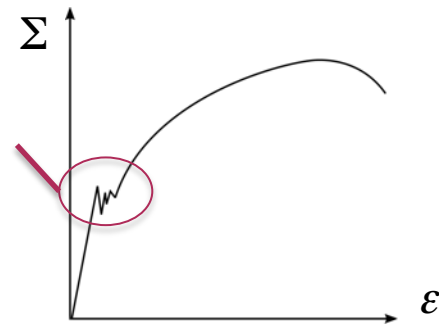
Induit par la présence d'une **taille de grain excessive** (50-80 μ m), induit par une mauvaise gestion du cycle thermomécanique lors de l'élaboration de la tôle



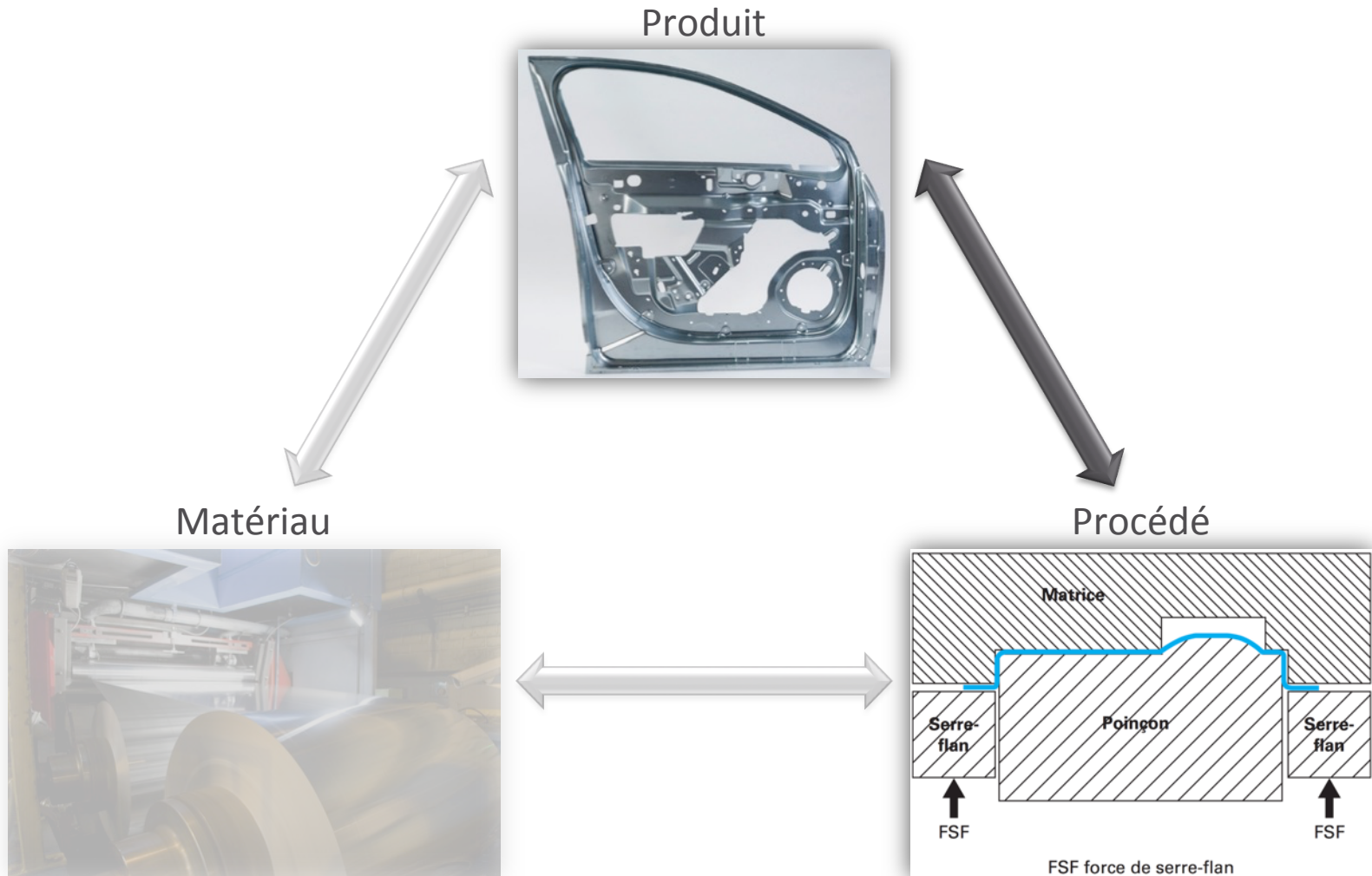
Vermiculaire :

induit par un **vieillissement de la tôle** (petits atomes de carbone ou d'azote en solution dans le réseau cristallin). Elle favorise une localisation de la déformation sous forme de bandes (bandes de Lüders dans un essai de traction). La solution est de faire une phase de skin-pass pour écrouir le matériau.

Palier du à un vieillissement

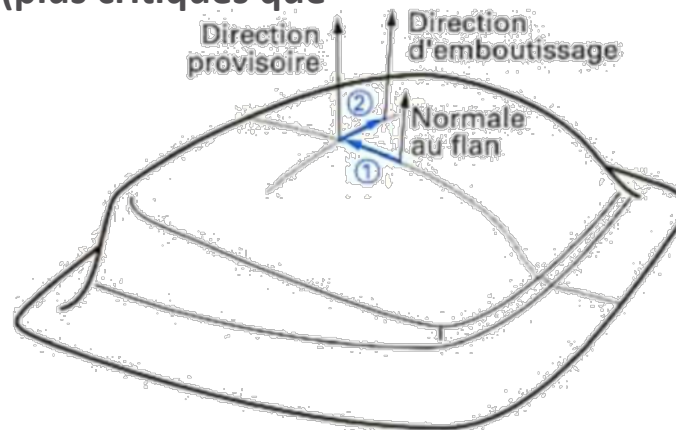


Relation produit - procédé

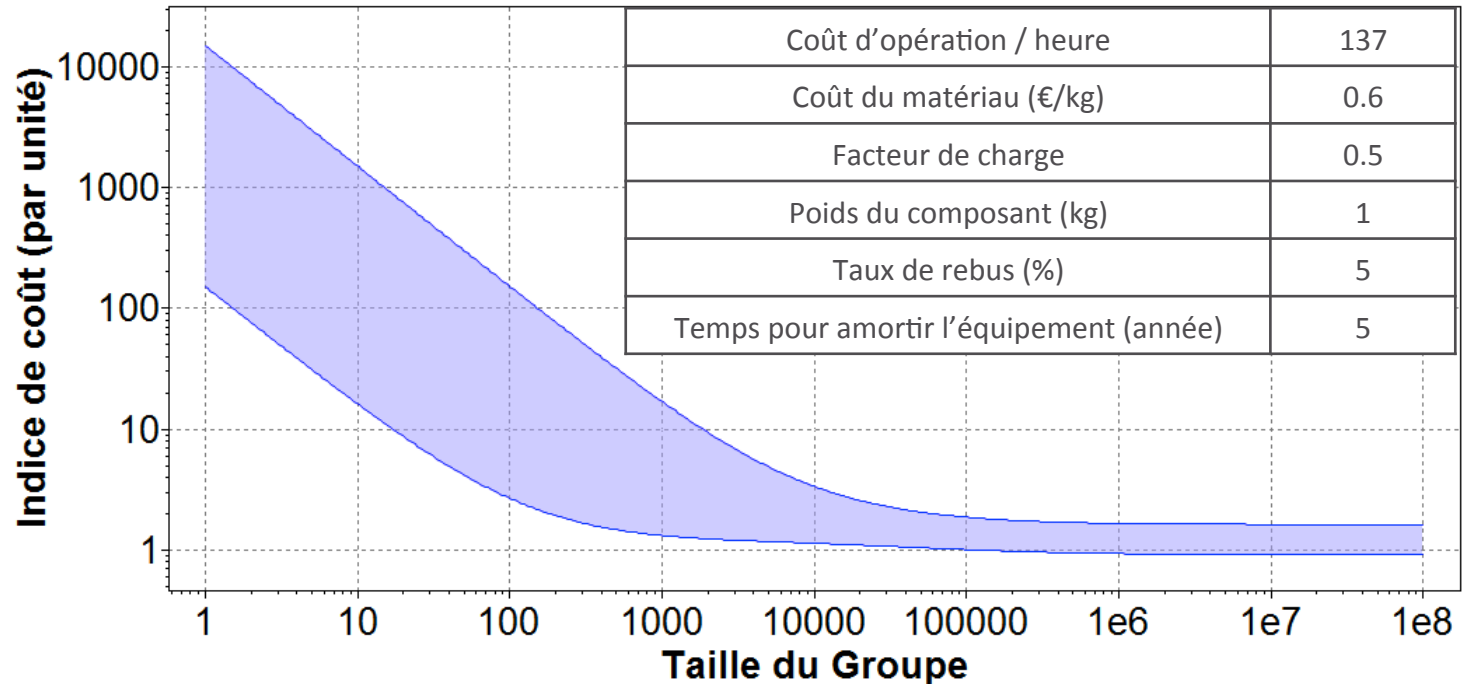


Influence du procédé sur les formes réalisables

- La forme doit permettre le balancement de la pièce, c'est à dire la détermination d'une direction d'emboutissage qui permette l'accessibilité du poinçon.
 - Les Contre-dépouilles nécessitent la mise en place de cames dans l'outillage et sont donc à éviter dans la mesure du possible.
- Eviter les dépouilles pour les pièces profondes, la forme conique accentue les problèmes de plissement (plus critiques que l'évacuation de l'outil).
- Epaisseur de section : 0.2-5mm
- Etat de surface : 0.5 - 12.5 μm (très lisse)
- Qualité dimensionnelle :
 - La forme de l'embouti n'a jamais exactement la forme de l'outil du fait du retour élastique.
 - Les tolérances angulaires admissibles sont de l'ordre du demi degré
 - Les tolérances dimensionnelles sont de l'ordre de 0.1-0.8mm



Données économiques :



Coût de l'équipement (€)	$9E^4 - 9E^5$
Fraction de matériau utilisée	0.7 - 0.8
Cadence (pièce/heure)	200 - 5000
Coût de l'outillage (€)	$1E^4 - 5E^5$
Durée de vie de l'outillage (pièce)	$10^4 - 10^6$

Sources bibliographiques

- **Techniques de l'ingénieur**
B7540v1, BM7510v2, BM7511v2, BM7518v1, BM7520v1, BM7535v1, M700v1, M705v1, M709v1
- **Emboutissage des aciers, Alain Col, DUNOD, édition 2010**
- **L'extrusion, ADETIEF - Technique**
- **Fabrication par usinage, J.P. Cordebois et Coll, DUNOD, 2003**
- **MEMOTECH Procédés de mise en forme des matériaux, C. Corbet, Casteilla, édition 2005**
- **Les marchés de la sous-traitance : Les secteurs de la sous-traitance industrielle, DGCIS, 2012**
- http://www.forgefonderie.org/IMG/ppt/diaporama_forge.ppt
- **Logiciel CES4**
- <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/6928/6928-le-matricage-ens.pdf>
- http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/le-matricage-regles-de-trace

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/DS/DD/FR>
- http://www.brossette.fr/baignoires/x3visu_dig_nvc3_517214R4
- [http://www.mesmateriaux.com/achat-materiaux/evier-inox-18-10-a-poser-120x60cm-2-cuves-1-egouttoir-cuves-embouties-\(franke\)_3682.html#.WCOJZmXCmQs](http://www.mesmateriaux.com/achat-materiaux/evier-inox-18-10-a-poser-120x60cm-2-cuves-1-egouttoir-cuves-embouties-(franke)_3682.html#.WCOJZmXCmQs)
- http://media.maginea.com/m2/products/00/01/20/02/M20001200201_2.jpg
- <http://image.made-in-china.com/2f0j10wjOTMTgfsfSbQ/-Malaxeur-de-farine-m-langeur-industriel-de-la-.jpg>
- http://www.ad-auto.fr/uploads/1/image/Carroserie_1.jpg
- http://www.sudrhoneenvironnement.org/var/plain/storage/images/media/images/emballages_metal_07_compo/4119-1-fre-FR/emballages_metal_07_compo.jpg
- <https://www.isere.fr/PublishingImages/ENVIRONNEMENT/Canette.jpg>
- <http://sydney.edu.au/engineering/civil/research/case/projects/materials.shtml>
- https://www.researchgate.net/publication/257339390_Effect_of_Li_addition_on_the_mechanical_behavior_and_texture_of_the_as-extruded_AZ31_magnesium_alloy/figures?lo=1
- http://medias.larousse.fr/archives/img/grande-encyclopedie/full/emboutissage_002.jpg
- <http://www.mecanium.fr>
- <http://www.serrurerie-brestoise.fr/wp-content/uploads/2014/01/Photo-plier.jpg>
- https://www.researchgate.net/profile/Olaf_Engler/publication/232401498/figure/fig1/AS:304663275556877@1449648793833/fig-1-a-Typical-appearance-of-a-deep-drawn-cup-with-ears-under-0-and-90.png
- <http://theadviser.com/fr/>

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- http://resources.scia.net/fr/factsheets/analysis/analyzer_plasticanalysisofsurfacemembers.htm
- http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/07/tmp1113_thumb.jpg
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f2/Critere_tresca_von_mises.svg/990px-Critere_tresca_von_mises.svg.png
- https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_thry/graphics/gthy4-28.svg
- http://download.autodesk.com/us/algor/userguides/mergedProjects/setting_up_the_analysis/Nonlinear/Materials/iso-hardening-uniaxial.gif
- http://download.autodesk.com/us/algor/userguides/mergedProjects/setting_up_the_analysis/Nonlinear/Materials/kine-hardening-uniaxial.gif
- Kuwabara, T., & Sugawara, F. (2013). Multiaxial tube expansion test method for measurement of sheet metal deformation behavior under biaxial tension for a large strain range. *International Journal of Plasticity*, 45, 103-118.
- <http://www.union-des-forgerons.fr/>
- http://imfou.actioncom.fr/dbIMAGE/sbs/hd/l_1425566344310.JPG
- <http://www.unitechengineeringindia.com/images/userFiles/products/open-die-forging4.jpg>
- https://static.wixstatic.com/media/234a7e_6c34a7f86876afb9db0b3a8636765358.jpg_srz_979_734_85_22_0.50_1.20_0.00_jpg_srz
- <http://www.stahl-groeditz.de/fr/technologie/forge-libre.html>
- <http://www.transvalor.com/fr/cmsspages/matricage.36.html>
- <http://img.tradeindia.com/fp/1/874/789.jpg>
- <http://cdt71.media.tourinsoft.eu/upload/marteau-pilon-01.JPG>

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <http://www.aubertduval.fr/uploads/pics/process-matricage-02.gif>
- <http://www.frantzelectrolyse.com/index.php/documentation-technique/fiche-technique-cataphorese.html>
- Nicolas Tardif and Stelios Kyriakides, “Determination of Anisotropy and Material Hardening for Aluminum Sheet Metal,” *International Journal of Solids and Structures* 49, no. 25 (2012): 3496–3506.
- Dirk Mohr and Stephane J Marcadet, “Micromechanically-Motivated Phenomenological Hosford–Coulomb Model for Predicting Ductile Fracture Initiation at Low Stress Triaxialities,” *International Journal of Solids and Structures* 67 (2015): 40–55.
- F Barlat et al., “Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets—part 1: Theory,” *International Journal of Plasticity* 19, no. 9 (2003): 1297–1319.
- Shi-Hoon Choi and Young-Sool Jin, “Evaluation of Stored Energy in Cold-Rolled Steels from EBSD Data,” *Materials Science and Engineering: A* 371, no. 1 (2004): 149–59.