

Département Génie Mécanique

GM(CIP)-3-PROFA

Procédés de fabrication et mise en forme pour la conception

Thibaut Chaise, Thomas Elguedj,
François Girardin, Nicolas Tardif.

Version 2019

Sommaire

- I. Introduction
- II. Procédés de fonderie
- III. Mise en œuvre des métaux par déformation
- IV. Découpe par jet d'eau
- V. Fabrication additive
- VI. Usinage par outil coupant
- VII. Électroérosion
- VIII. Usinage électrochimique
- IX. Procédés laser
- X. Assemblages
- XI. Parachèvement de surface

Introduction

Objectifs – relation PPM - généralités

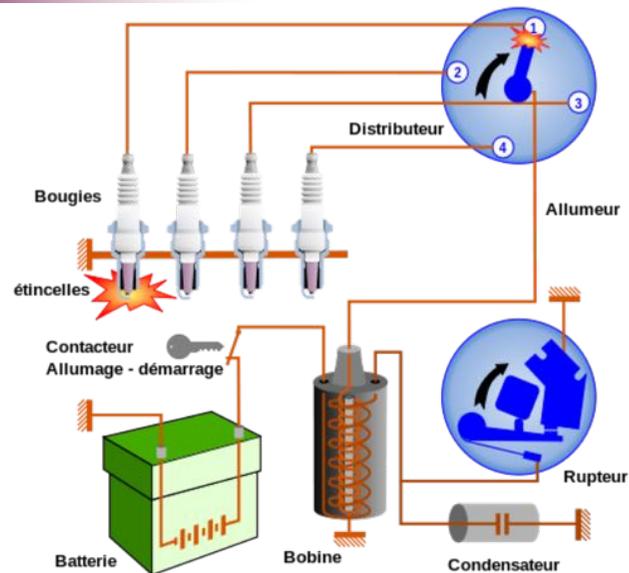
Objectif général de l'EC

- Donner des éléments de référence et de compréhension de différents procédés, pour intégrer des exigences de production lors de la conception du produit :
 - Relation Matériau – Produit
 - Relation Produit – Procédé
 - Relation Matériau – Procédé

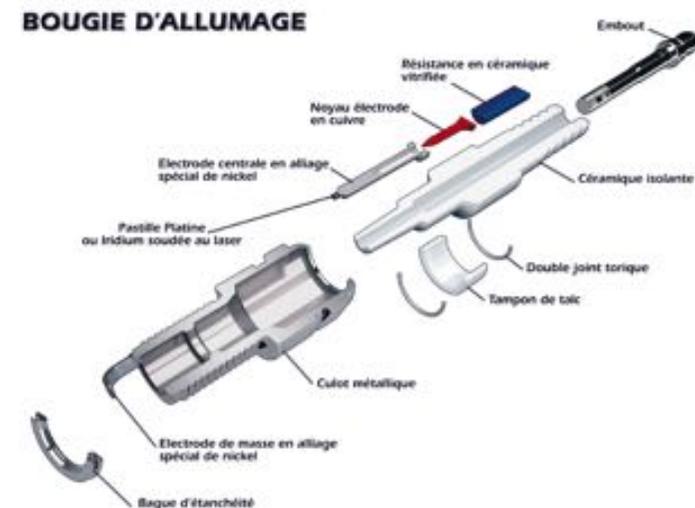
- Produit ?
- Procédés ?
- Matériaux ?

- → Exemple : une bougie d'allumage pour moteur essence

Principe du circuit d'allumage



Composition d'une bougie de moteur à essence → fabrication ?



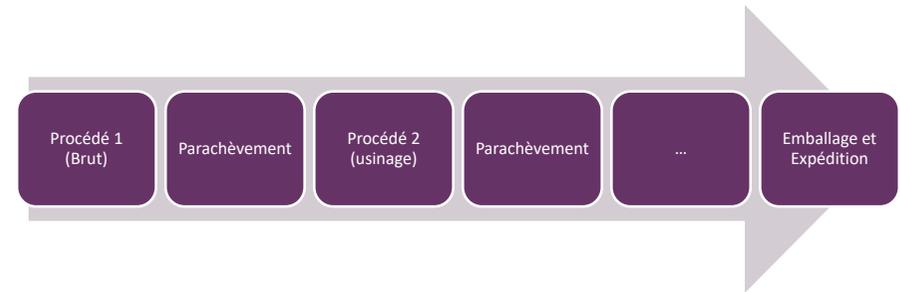
[vidéo bougie d'allumage](#)

Vidéo bougie

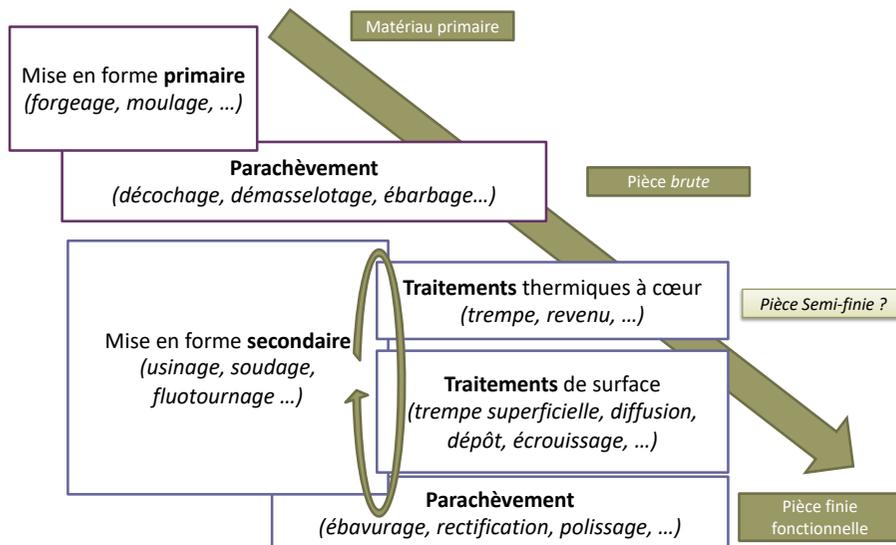
- Détail de la gamme :
 - Isolateur
 - Céramique crue en poudre + compactage
 - Usinage (meulage) à cru
 - Contrôle
 - Cuisson
 - Marquage + revêtement
 - Boîtier
 - Cisailage
 - Formage à froid (extrusion) en plusieurs étapes
 - Soudage du fil
 - Filetage par déformation
 - Assemblage
 - Électrode centrale + isolateur + poudre + borne => fusion + assemblage
 - Isolateur + boîtier => lubrification + assemblage
 - Pliage électrode
 - Contrôle final...

Gamme de fabrication

- Vision globale : enchainement des différents types de procédés permettant la réalisation complète de la pièce.
 - La pièce fabriquée peut s'intégrer directement dans une gamme d'assemblage.
- Vision locale : enchainement des différentes opérations permettant de réaliser une pièce (brute, semi-finie, finie) au sein d'une famille de procédé.



Gamme de fabrication



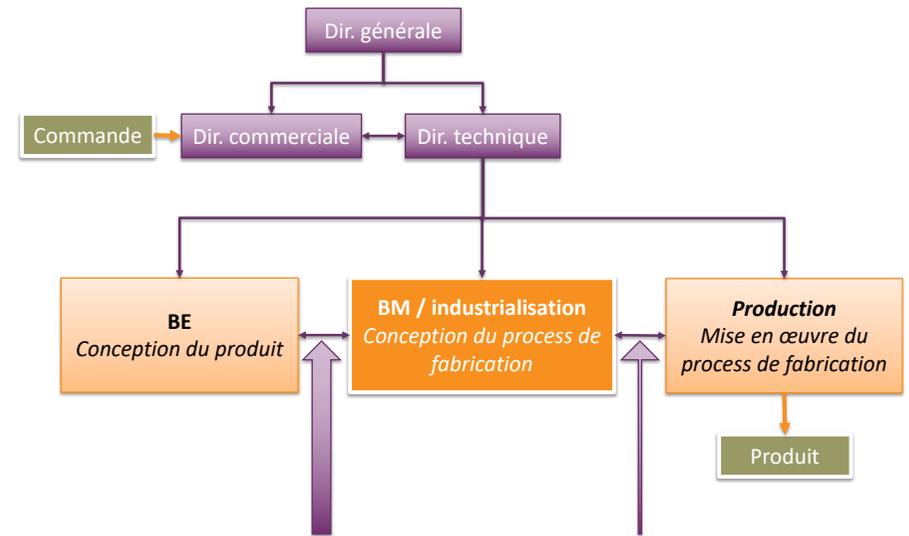
Objectifs de GM(CIP)-3-PROFA

- Connaître les bases de : Cycle de vie produit – Organisation de l'entreprise – Phasage et organisation des opérations de production.
- Classer et analyser les procédés par la relation Propriétés – Matériau – Procédé.
- Identifier les paramètres d'entrée et de sortie pertinents pour un procédé donné et quantifier leurs interactions à partir de résultats expérimentaux.
- Pour un certain nombre de familles de procédés, avoir des connaissances sur les bases de
 - la culture technique et technologique,
 - les contraintes machines et environnement,
 - les règles de conception, critères de choix,
 - les tolérances, matériaux et géométries obtensibles.

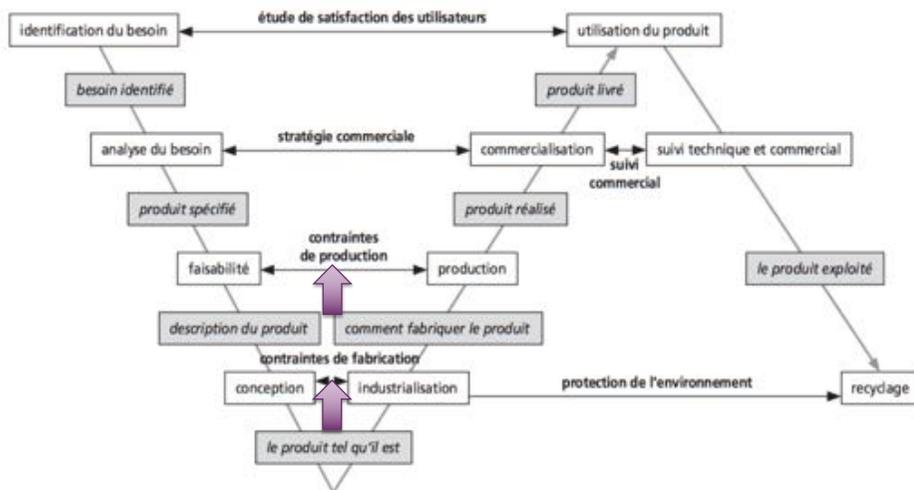
Organisation pédagogique de l'EC

- 3 ou 4 TP sur des classes de procédés différents :
 - Enlèvement de matière conventionnel : usinage
 - Enlèvement de matière *non-conventionnel* : jet-d'eau / EDM
 - Fabrication additive : dépôt de fil FDM
 - Injection plastique (pour 3GM uniquement – site d'Oyonnax)
- 8 séances de cours sur les procédés :
 - Introduction – Fonderie et moulage.
 - Mise en forme par déformation plastique.
 - Mise en forme à froid es métaux en feuille (emboutissage) – Découpe par jet d'eau.
 - Fabrication additive.
 - Usinage par outil coupant.
 - Electroérosion et usinage électrochimique.
 - Procédés laser – Assemblages : soudage.
 - Parachèvement de surface.

Organisation de l'entreprise



Cycle en V



La fabrication mécanique

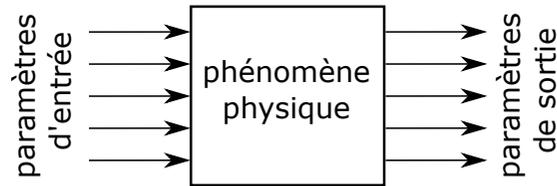
Faire de la fabrication mécanique signifie **maitriser** la qualité au sens large des pièces fabriquées. Cela comprend (entre autre) :

- des aspects techniques, tels que la métrologie : précision de forme, dimensions, tolérances, ...
- les matériaux : *bonnes* caractéristiques, métallurgie, ...
- les aspects financiers/coûts : de production, de maintenance, d'élimination ou de recyclage, ...
- l'organisation / les délais,
- ...

Pour pouvoir avoir la **maitrise** il faut **identifier** les phénomènes physiques (c'est à dire les décrypter et éventuellement les comprendre et les modéliser) **ET** les **optimiser**.

Identifier les phénomènes physiques

La stratégie adoptée pour identifier et décrypter les phénomènes physiques mis en jeu est celle de la "boîte noire".



- Il faut repérer les (principaux) paramètres de **commande** et ceux de **sortie**, ainsi que les **ordres de grandeur**.
- Les paramètres d'entrée sont ceux sur lesquels l'opérateur (donc vous) peut agir directement.
- Les paramètres de sortie sont ceux sur lesquels on ne peut pas agir directement. On ne peut les "modifier" qu'en agissant sur les paramètres d'entrée.

Les paramètres de sortie : le rendement énergétique

Pour un procédé de fabrication par enlèvement de matière, l'énergie spécifique correspond au ratio entre l'énergie nécessaire à cet enlèvement et le volume à enlever :

$$E_S = K_c = \frac{\text{Energie consommée}}{\text{Volume de matière enlevée}} = \frac{\text{Puissance}}{\text{Débit de copeaux}}$$

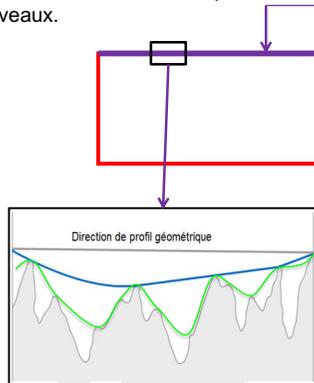
- Tournage ~ 1 à 5 J/mm³
- Découpe laser ~ 20 à 100 J/mm³
- Electroérosion ~ 1 à 5 kJ/mm³

Cette grandeur permet de comparer des procédés (de même finalité) entre eux du point de vue du coût énergétique :

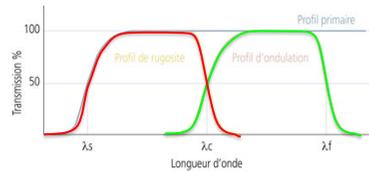
- Procédés volumiques : usinage, électroérosion, usinage électrochimique...
- Procédés de découpe : jet d'eau (eau pure ou avec abrasif), laser, électroérosion...
- Procédés d'assemblage : soudage à l'arc, laser, FSW...

Les paramètres de sortie : la précision géométrique

La précision géométrique est nécessaire pour le bon fonctionnement du mécanisme. Elle concerne directement la qualité des surfaces fabriquées, et se considère à plusieurs niveaux.



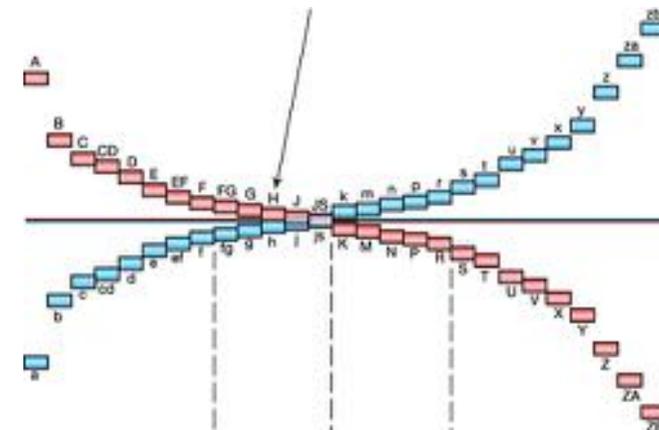
- 1^{er} ordre** : écart de forme
 - grande longueur d'onde du défaut
- 2^{ème} ordre** : défaut d'ondulation
 - longueur d'onde moyenne
- 3^{ème} ordre** ... rugosité
 - longueur d'onde faible



Les paramètres de sortie : la précision géométrique

Écart de forme / précision dimensionnelle

- Exemple : Accouplement normalisé, glissant : Ø30 H7 g6
 - Utilisation de la norme ISO 286



Les paramètres de sortie : la précision géométrique

Écart de forme / précision dimensionnelle

- Exemple : Accouplement normalisé, glissant : Ø30 H7 g6
 - Utilisation de la norme ISO 286

Dimensions nominales (mm)	Indices de qualité Q									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
< 3 inclus	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140
>3 à 6 inclus	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180
>6 à 10 inclus	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220
>10 à 18 inclus	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270
>18 à 30 inclus	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330
>30 à 50 inclus	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390
>50 à 80 inclus	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460
>80 à 120 inclus	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540
>120 à 180 inclus	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630
>180 à 250 inclus	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720
>250 à 315 inclus	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810
>315 à 400 inclus	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890
>400 à 500 inclus	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970

Tolérances en µm

Quelques ajustements possibles

Emploi		Ajustements principalement utilisés					
		Arbre	Alésage				
			H6	H7	H8	H9	H11
Pièces mobiles l'une par rapport à l'autre	Pièce dont le fonctionnement nécessite un grand jeu (dilatation, mauvais alignement, portées très longues, etc.)	c				8	14
	Cas ordinaire des pièces tournant ou glissant dans une bague ou palier (bon graissage assuré)	d				5	11
		e		7	8	9	
	Pièce avec guidage précis pour mouvement de faible amplitude	f	6	6/7	7		
Pièces immobiles l'une par rapport à l'autre	Démontage et remontage possible sans détérioration des pièces	Mise en place possible à la main	h	5	6	7	8
		L'ajustement ne peut pas transmettre d'effort	js	5	6		
	Démontage impossible sans détérioration des pièces	Mise en place au maillet	k	5			
		L'ajustement peut transmettre des efforts	m		6		
		Mise en place à la presse	p		6		
		Mise en place à la presse ou par dilatation	s			7	
			u			7	
		x			7		
z				7			

Réalisation aisée, sans soin particulier

Réalisation compliquée avec les moyens classiques

La précision géométrique : écarts de forme / Spécifications géométriques

Intervalle de tolérance + forme de la zone de tolérance

Surface spécifiée

Surface de référence

dimension théorique exacte

Tolérance de forme:

- $\text{—} | t$ rectitude
- $\text{▭} | t$ planéité
- $\text{○} | t$ circularité
- $\text{⊘} | t$ cylindricité
- $\text{⤵} | t$ ligne quelconque
- $\text{⤶} | t$ forme quelconque

Tolérance d'orientation:

- $\text{∕} | t | A$ inclinaison
- $\text{⊥} | t | A$ perpendicularité
- $\text{∥} | t | A$ parallélisme

Tolérance de position:

- $\text{⊕} | \text{⊕} | t | A | B | C$ localisation
- $\text{⊙} | t | A$ coaxialité
- $\text{≡} | t | A$ symétrie
- $\text{⤵} | t | A$ ligne quelconque
- $\text{⤶} | t | A$ forme quelconque

Tolérance de battement:

- $\text{∕} | t | A$ battement simple
- $\text{∥} | t | A$ battement total

Tableaux des tolérances générales ISO 2768

Classe de précision	Usinage mm											
	Dimension linéaire				Angle cassé (chanfrein ou rayon)			Dimension angulaire (côté le plus court)				
	>0,5 à 3 inclus	>3 à 6	>6 à 30	>30 à 120	>120 à 400	>0,5 à 3 inclus	>3 à 6	>6	≤10	>10 à 50 inclus	>50 à 120	>120 à 400
f (fin)	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,2	± 0,5	± 1	± 1°	± 30'	± 20'	± 10'
m (moyen)	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,2	± 0,5	± 1	± 1°	± 30'	± 20'	± 10'
c (large)	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 0,4	± 1	± 2	± 1°30'	± 1°	± 30'	± 15'
v (très large)	—	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 0,4	± 1	± 2	± 3°	± 2°	± 1°	± 30'

Classe de précision	Rectitude (—) - Planéité (▭)					Perpendicularité (⊥)			Symétrie (≡)		Battement (∕)
	≤10	>10 à 30 inclus	>30 à 100	>100 à 300	>300 à 1000	≤100	>100 à 300	>300 à 1000	≤100	>100 à 300	
H (fin)	0,02	0,06	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5
K (moyen)	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,4	0,5	0,8	0,6	0,6	0,8
L (large)	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	0,6	1	1,5	0,6	1	1,5

La précision géométrique : état de surface, rugosités

- L'état de surface se mesure à l'aide de moyens optiques ou mécanique



- Filtrage mécanique et numérique des défauts d'ordre 1 et 2



- Les paramètres de rugosité se mesurent sur un profil dont les défauts de forme ont été soustraits



Source : Mitutoyo

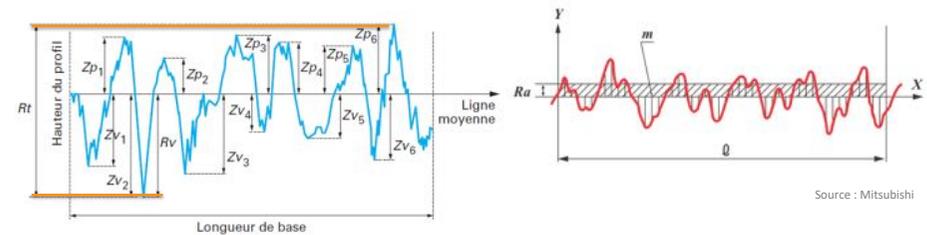


22



La précision géométrique : état de surface, Rugosités

- Rugosité totale de la surface
 - R_t = hauteur min-Max du profil
 - R_z = moyenne des min-Max sur 5 portions de la longueur de base
- Rugosité moyenne
 - R_a = moyenne arithmétique des hauteurs du profil
- Nombreux paramètres de rugosité : ordres supérieurs, paramètres surfaciques...



Source : Techniques de l'ingénieur



23



Les paramètres de sortie : l'état de surface

Quel état de surface pour quelle application ?

- Frottement de glissement, frottement de roulement.
- Matage, contact localisé.
- Étanchéité statique, étanchéité dynamique.
- Sollicitation alternée (fatigue).
- Corrosion.
- Adhérence : peinture, collage, dépôt...
- Aspect...

Les paramètres de sortie : l'état de surface

Quel état de surface pour quelle application ?

- Frottement de glissement, frottement de roulement
- Matage, contact localisé
- Étanchéité statique, étanchéité dynamique
- Sollicitation alternée (fatigue)
- Corrosion
- Adhérence : peinture, collage, dépôt...
- Aspect...

Fonction	Exemple d'application	Ra
Frottement de glissement	Glissière de machines-outils	0,4
Frottement de roulement	Chemin de roulement à billes	0,02
Étanchéité dynamique	Portée pour joint à lèvres	0,3
Étanchéité statique	Surface d'étanchéité glacée (sans joint)	0,1
Ajustement fixe avec contrainte	Portée de roulement	0,8
Outils coupants (arête)	Outils en carbure	0,2

L'essentiel - STS IPM



24



25



Contraintes résiduelles

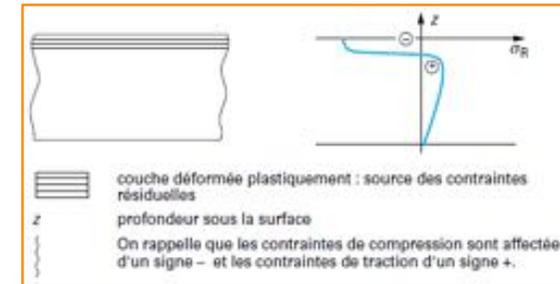
- Les contraintes résiduelles sont parfois subies.
 - Conséquence néfaste des procédés de fabrication, générant des contraintes résiduelles dans les zones affectées thermo-mécaniquement.
- Mais plusieurs procédés ont aussi pour but d'en générer.
 - Traitements de surface (cf. fin du semestre) : génération de contraintes compressives dans les zones les plus sollicitées.



Galetage

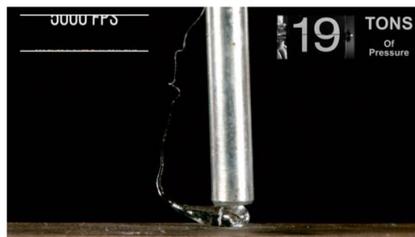
Contraintes résiduelles

- Origine des contraintes résiduelles.
 - Proviennent des hétérogénéités de déformation :
 - déformation plastique hétérogène entre différentes zones d'une pièce,
 - variations de volume dues à des changements de phases,
 - ...
- Exemple d'un matériau mis en compression par déformation plastique des couches superficielles



Contraintes résiduelles

- Quelques exemples : Larmes de verre (Prince Rupert's drops)
 - Obtenues par solidification d'une goutte de verre fondu
 - Grande résistance du bulbe du fait de la présence des contraintes
 - La rupture de la queue entraîne, par rééquilibrage des contraintes résiduelles, la pulvérisation de l'ensemble



#SmarterEveryDay [1'48]



#Warped Perception [0'10]

Contraintes résiduelles

- Quelques exemples : les légumes !
 - Les biomatériaux (les légumes par exemple, surtout s'ils sont gorgés d'eau, mais aussi les vaisseaux sanguins par exemple) génèrent des contraintes résiduelles lors de leur fabrication
 - Lorsqu'on les coupe, le rééquilibrage des contraintes entraîne des distorsions
 - Sans contraintes résiduelles, pas de beurre dans les radis !



La fabrication mécanique

Faire de la fabrication mécanique signifie **maitriser** la qualité **au sens large** des pièces fabriquées. Cela comprend (entre autre) :

- des aspects techniques, tels que la métrologie : précision de forme, dimensions, tolérances, ...
- les matériaux : *bonnes* caractéristiques, métallurgie, ...
- les aspects financiers/coûts : de production, de maintenance, d'élimination ou de recyclage, ...
- l'organisation / les délais,
- ...

Pour pouvoir avoir la **maitrise** il faut **identifier** les phénomènes physiques (c'est à dire les décrypter et éventuellement les comprendre et les modéliser) **ET** les **optimiser**.

Optimiser

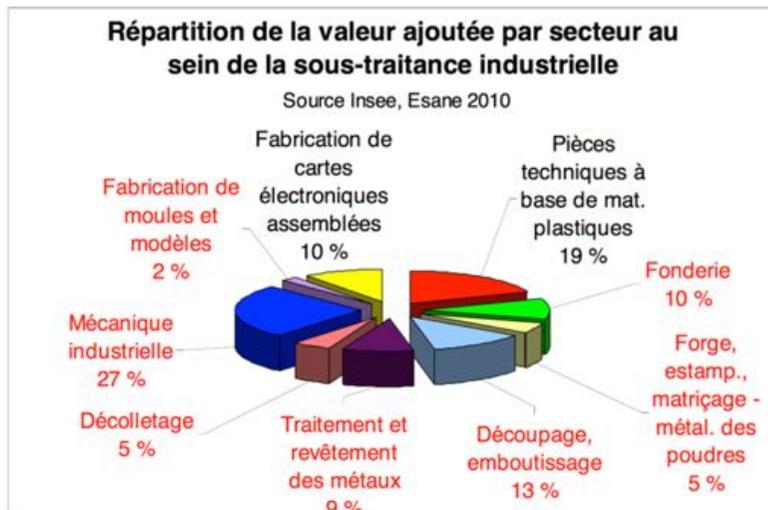
L'objectif du fabricant mécanicien "moyen" est de

Réaliser une série de pièces conformes le plus rapidement possible et à moindre coût.

On retrouve dans cette phrase les mots clés précédents:

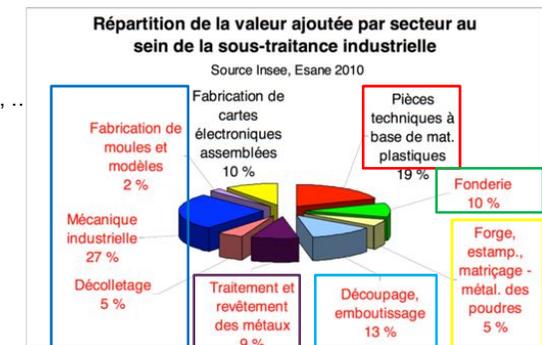
- **série** : aspects techniques,
 - **conforme** : aspects techniques et matériaux,
 - **rapidement** : délais,
 - **moindre coût** : aspects financier.
- Le choix des procédés et des gammes de fabrication pour la réalisation de ces pièces dépend donc de contraintes technico-économiques. Le poids économique de ces choix peut être illustré par l'étude suivante ...

Données économiques



Procédés abordés

1. Fonderie : moulage
2. Formage : forge, emboutissage, ..
3. Découpe Jet-d'eau
4. Fabrication additive
5. Usinage conventionnel
6. EDM + ECM
7. Procédés lasers, assemblage
8. Traitements thermiques, Traitements de surface



Procédés de fonderie

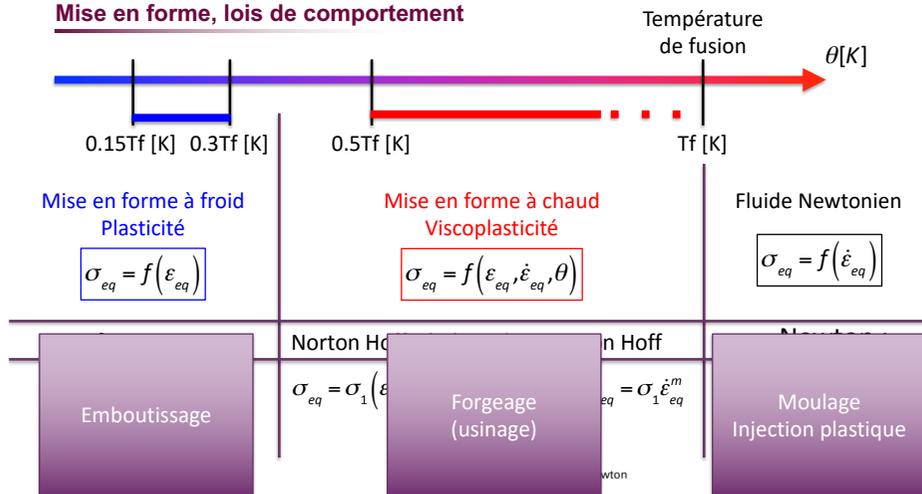
Moulage

Principe de la fonderie

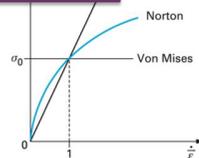
Fonderie :

- **Mise en forme** d'une pièce à l'aide d'un matériau à l'état liquide / fondu ...
- ... et donc relativement **chaud**

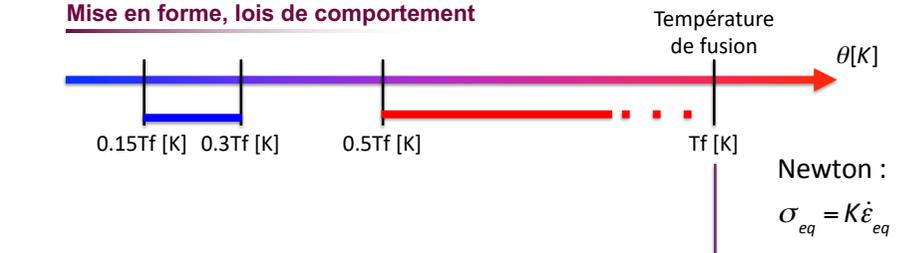
Mise en forme, lois de comportement



n : coefficient d'écroutissage ($n < 1$, ↘ avec θ)
m : indice de viscosité ($m < 1$, ↗ avec θ)
 β : coefficient de thermodépendance

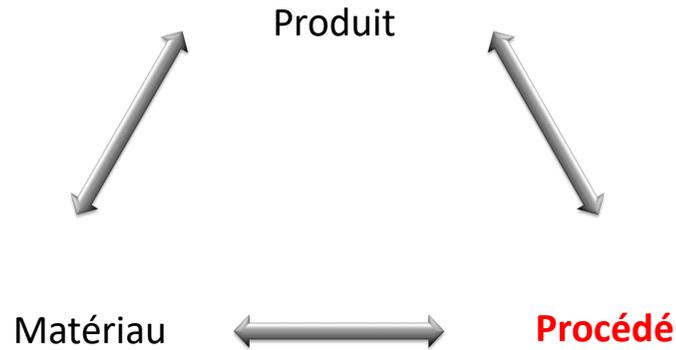


Mise en forme, lois de comportement



Matériau	Tf
Al 2xxx	635°C
Bronze	870°C
Fonte eutectique	1150°C
Acier C45	1500°C
Inconel	1350°C
TA6V	1650°C

Relation Produit – Procédé – Matériau

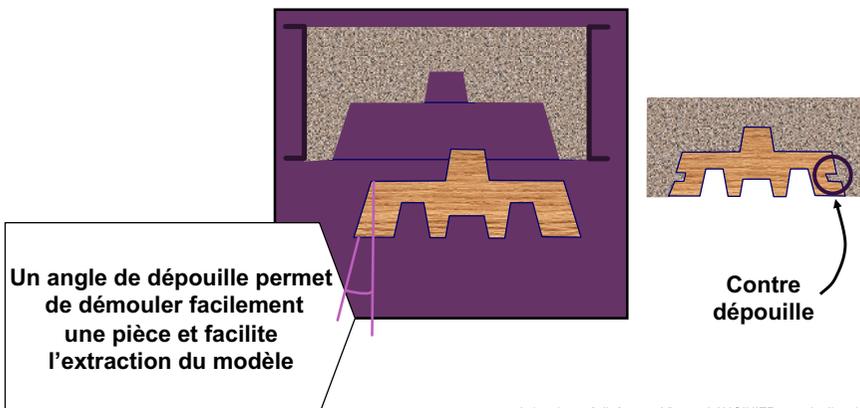


[Vidéo moulage au sable](#)

Principe du procédé de moulage

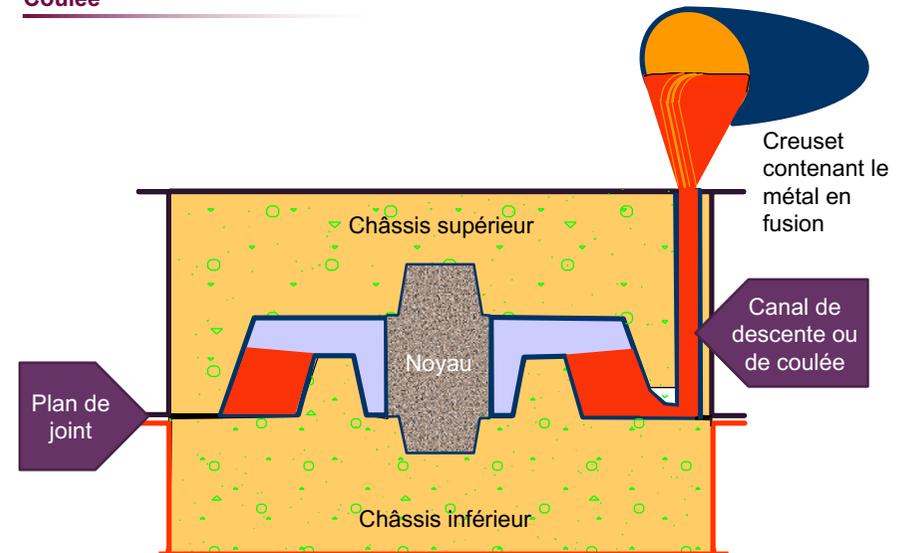


Problème lors de l'enlèvement du modèle



Animations réalisées par Vincent LANGINIER sous la direction de Charles RIVET du Lycée Léonce Vieljeux Rochelle

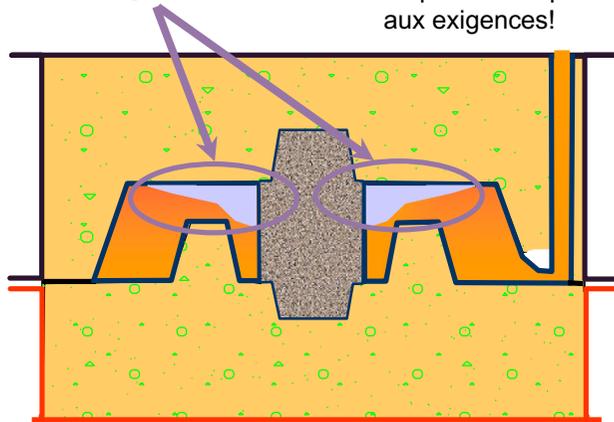
Coulée



Mise en évidence des problèmes rencontrés lors de la coulée

Gaz emprisonné

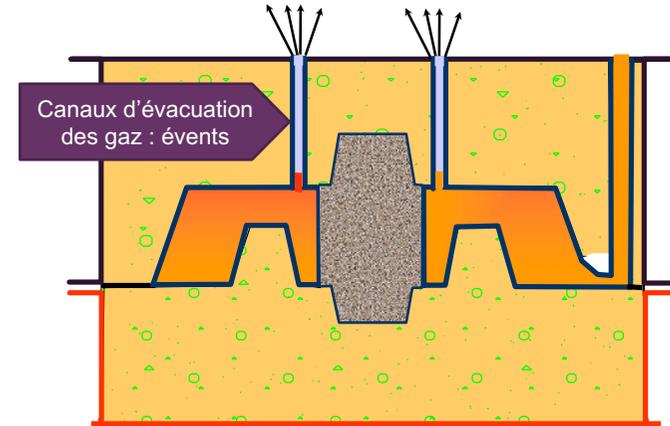
La pièce n'est pas conforme aux exigences!



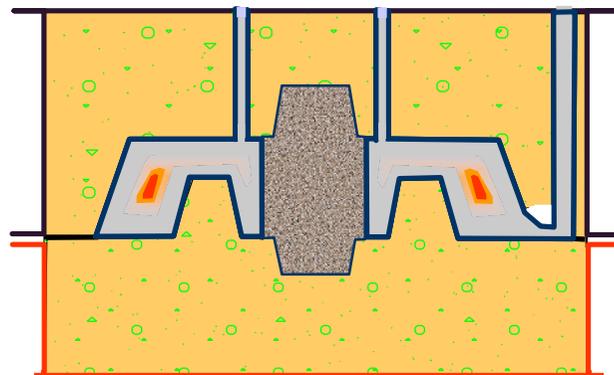
Mise en évidence des problèmes rencontrés lors de la coulée

Evacuation des gaz

Canaux d'évacuation des gaz : évents

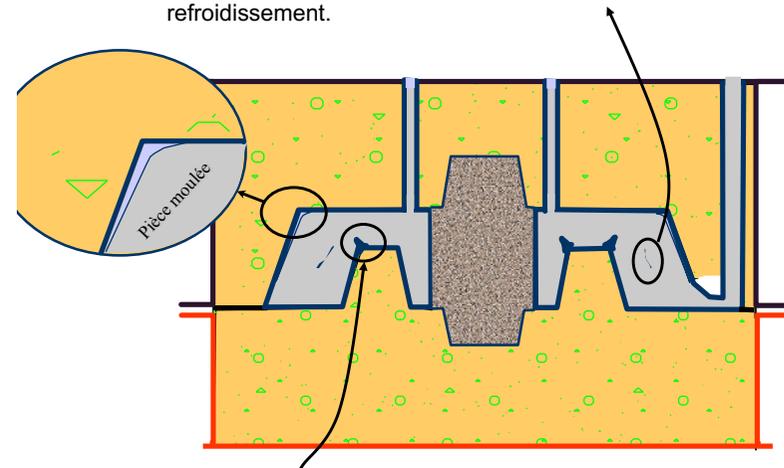


Mise en évidence des problèmes rencontrés lors du refroidissement



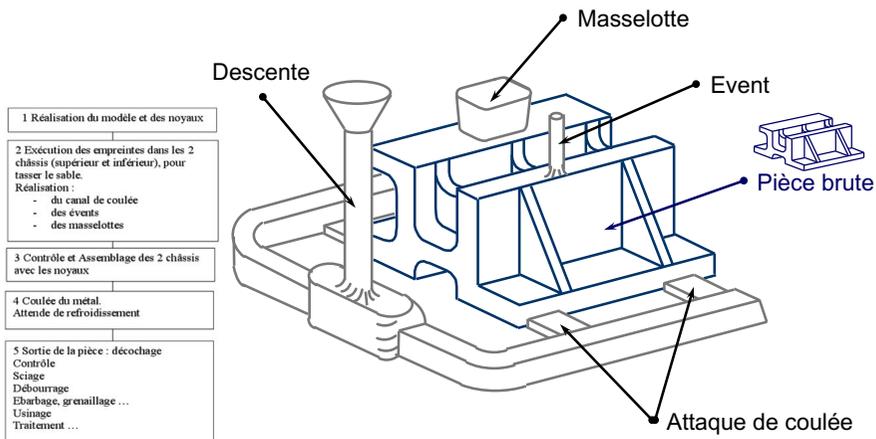
Mise en évidence des problèmes rencontrés lors du refroidissement

Retassure : Cavité se formant à l'intérieur des pièces durant la phase de solidification. Elle est due à l'effet de « rétraction » du métal lors de son refroidissement.

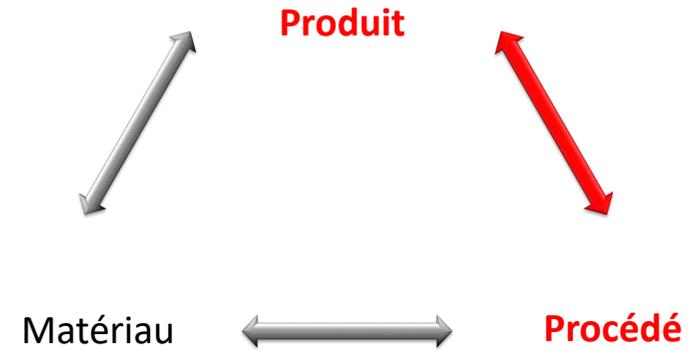


Crique : fissure se produisant en cours de solidification due au retrait linéaire de la matière

Démoulage de la pièce



Relation Produit – Procédé – Matériau

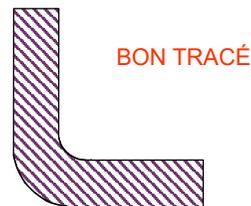
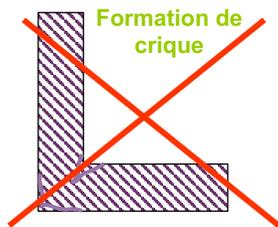


Eviter les criques

- **Solution BM** : placer des masselottes
- **Solution BE** : les angles vifs sont à remplacer par des arrondis et des congés.



Pièce en forme de L à mouler

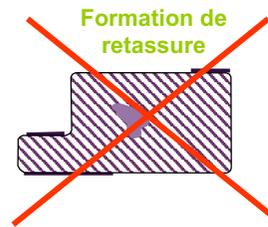


Eviter les retassures

- **Solution BM** : placer des masselottes et des refroidisseurs
- **Solution BE** : éviter les variations brusques d'épaisseurs, éviter des épaisseurs trop importantes



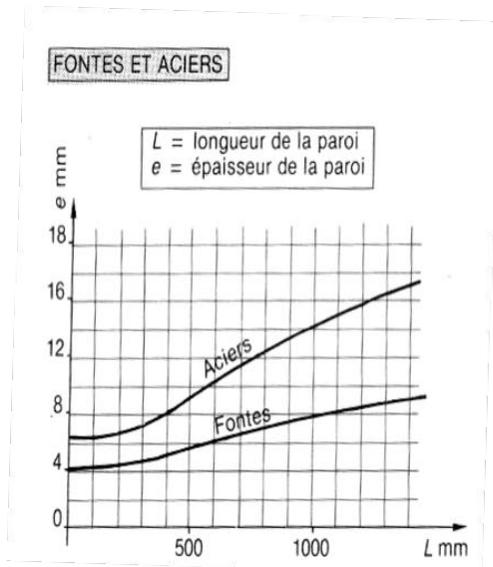
Soient ces 3 surfaces fonctionnelles à obtenir après moulage quelle doit être la forme de la pièce?



Préférer les nervures plutôt que des parois épaisses

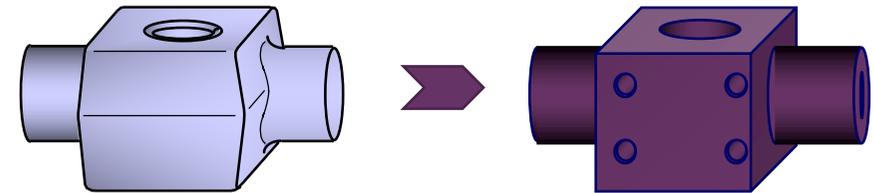


Epaisseurs de parois



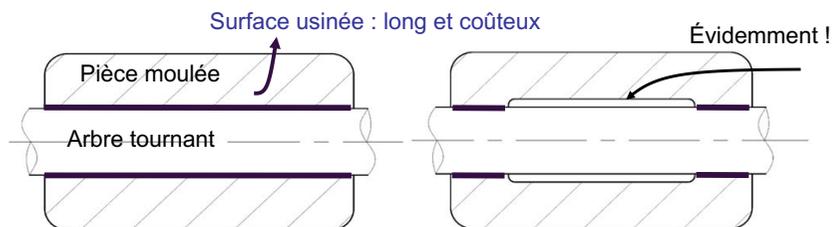
Surfaces fonctionnelles

- Surface fonctionnelle : Surface de la pièce remplissant une fonction (surface d'appui, surface de guidage ...)
- Toute surface fonctionnelle doit être usinée (l'état de la surface des pièces moulées est médiocre)



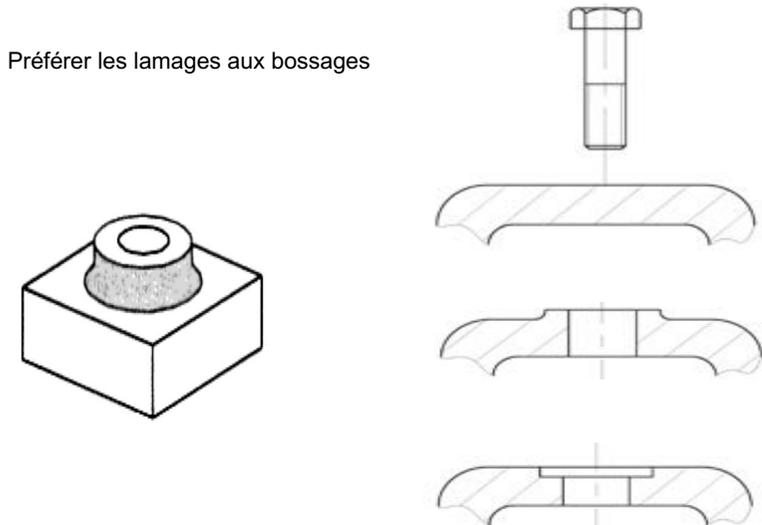
Surfaces fonctionnelles

- Limiter au maximum les surfaces à usiner



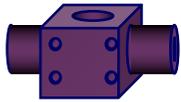
Surfaces fonctionnelles

- Préférer les lamages aux bossages



Dépouilles et contre dépouilles

- En BE, on ne dessine que les formes finales de la pièce, on ne dessinera jamais les dépouilles !



Pièce à réaliser
Tracé BE



Tracé des congés, dépouilles
et surépaisseurs d'usinage
Tracé BM

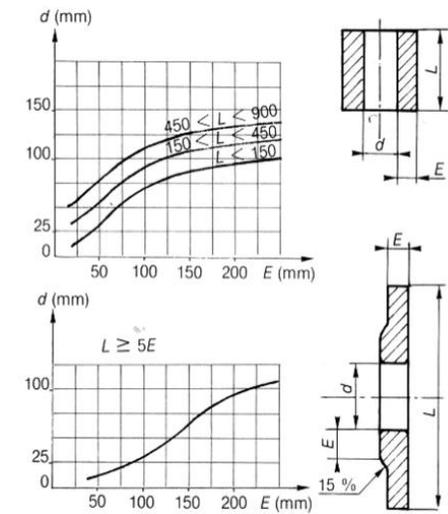


Pièce brute
de fonderie

- **Contre dépouilles** : forme du modèle empêchant son démoulage correct (détérioration du moule), ne jamais en dessiner !!!

Les noyaux

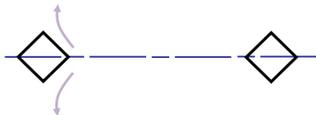
- Les noyaux ont un diamètre minimum en fonction de l'envergure de la pièce



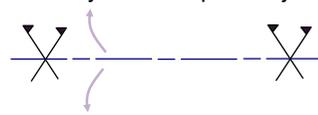
Plan de joint

- Il doit être choisit pour assurer le bon démoulage de la pièce.
- On le choisit en général
 - passant par le plan le plus grand de la pièce,
 - passant par le plan de symétrie de la pièce,
 - évitant les contre dépouilles,
 - limitant les noyaux...

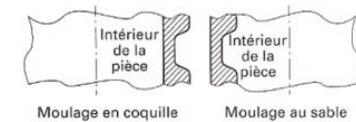
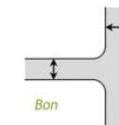
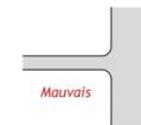
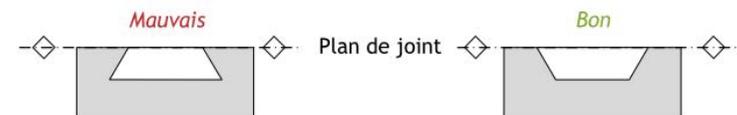
Symbole du plan de joint



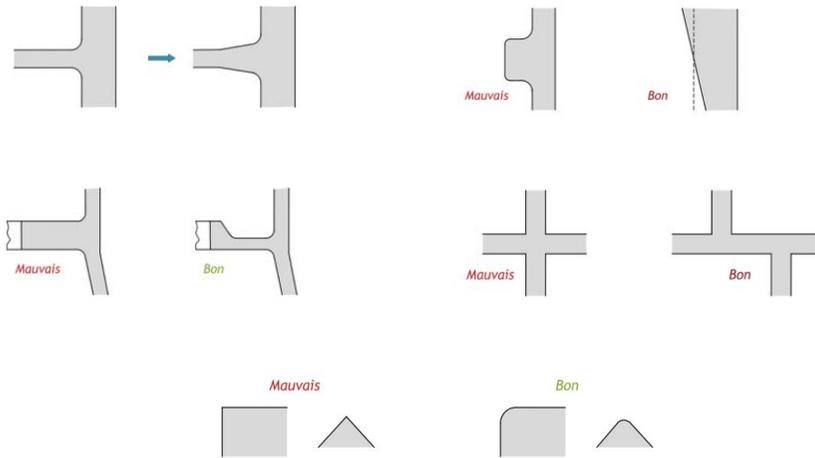
Ancien symbole du plan de joint



Règles de tracé



Règles de tracé



Exemples de tracés

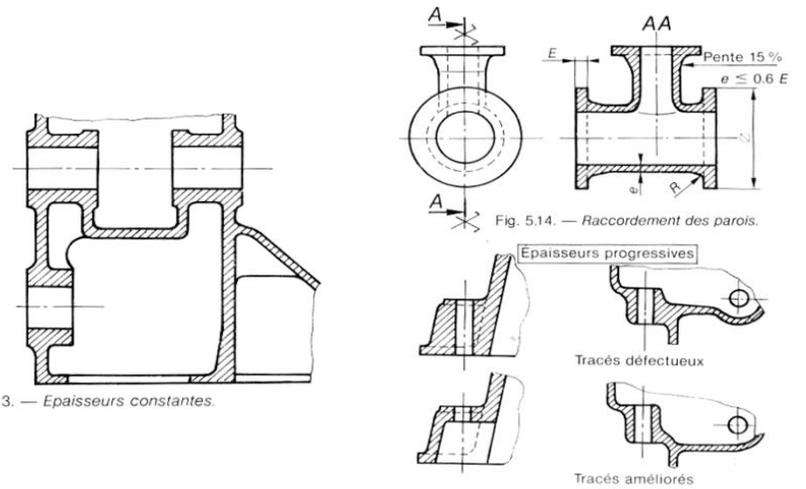
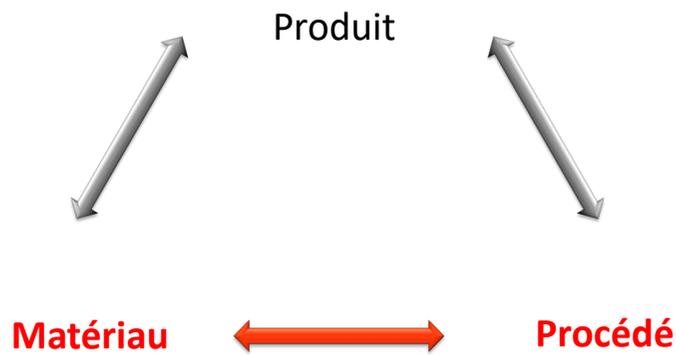


Fig. 5.13. — Epaisseurs constantes.

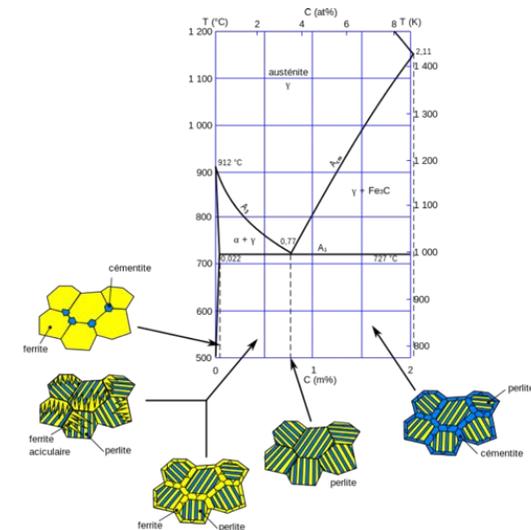
Fig. 5.14. — Raccordement des parois.

Fig. 5.15. — Pas de parties massives.

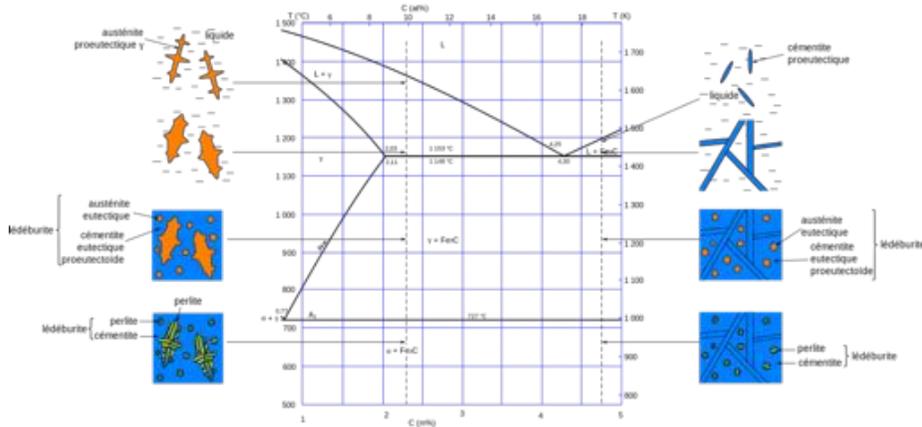
Relation Produit – Procédé – Matériau



Matériau : acier ...

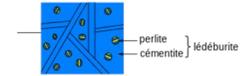


Matériau : acier → fonte



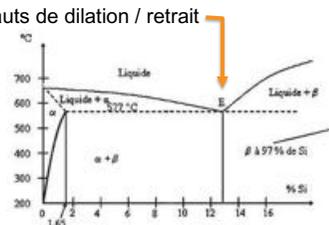
Matériau : acier → fonte

- Cémentite = carbure de fer (Fe₃C) → très fragile
 - Fonte blanche, dure, cassante, pour les pièces d'usure
- Formation de graphite → fonte grise
 - Processus naturel, mais très lent
 - Recuit de fonte blanche (1000°C, ~10h, refroidissement en 15h)
 - Fonte malléable à cœur noir
 - Ajout d'alliages (Cu, Ni, Si)
 - Précipitation du graphite sous forme de lamelles
 - Fonte à graphite lamellaire EN GJL
 - Fragilisation par concentration de contrainte
 - Grande stabilité
 - Bâti, tuyaux de grands diam.(égouts), inserts de cheminée, ...
 - Précipitation du graphite sous forme de sphères
 - Matériau à faible taux de soufre,
 - Inoculation au magnésium avant la coulée (ébullition : 1103°C !!!!)
 - Fonte à graphite sphéroïdal, dite *fonte ductile* : EN GJS
 - Canalisations, arbres à came, vilebrequins



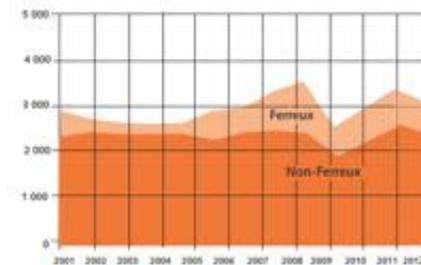
Matériau : ...

- Aciers (pas beaucoup, T° fusion élevée) ; ex : G S 235
- Cuivre (T_f = 1085°C)
 - Bronze : robinetterie, pièces de frottement, ... (jusqu'à 20% d'étain)
 - Cupro-aluminium : résistance à la corrosion → hélices de bateau
 - Laitons
 - Cupro-nickel : résistance à la corrosion
- Aluminium
 - + silicium → meilleure coulabilité, moins de défauts de dilation / retrait
 - + cuivre → meilleure dureté
 - Al-Cu4MgSi = Dural = AU4G = 2017
- Zinc
 - Zinc+Aluminium+Magnésium+Cuivre =ZAMAK
 - Zamak 3 : 4% Al + 0.03% Mg ; T_f = 384°C

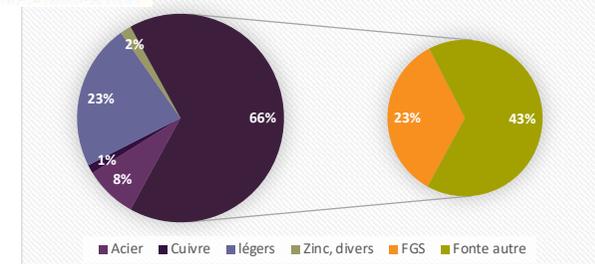


Matériau : marché (2012)

Evolution de la production en valeur (millions d'euros)



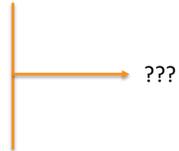
Production (en tonnes)



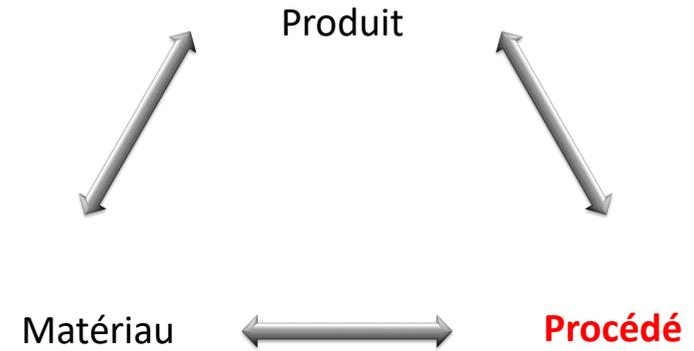
Relation Procédé – Matériau

- Quel moule pour quel matériau ?

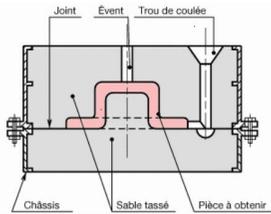
Matériau	Tf
Al 2xxx	635°C
Bronze	870°C
Fonte	1150°C
Acier C45	1500°C
Inconel	1350°C
TA6V	1650°C



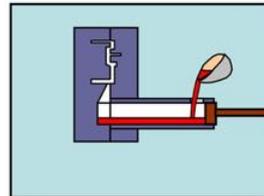
Relation Produit – Procédé – Matériau



Techniques de moulage



Moulage au sable



Moulage en coquille

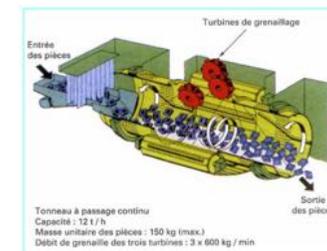


Moulage à modèle perdu (cire ou polystyrène)



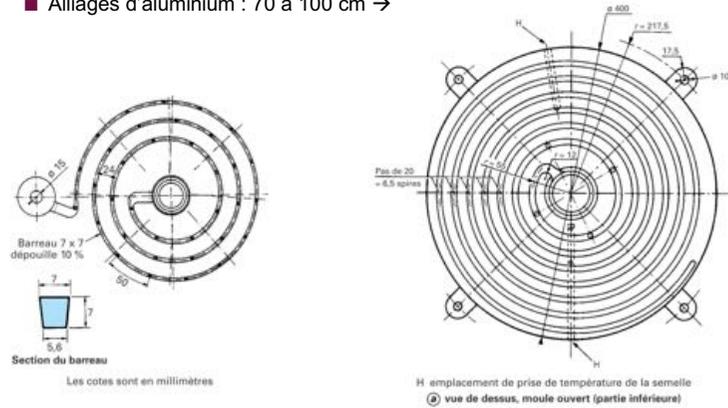
Parachèvements

- Séparer la pièce du moule
 - Éjection
 - Décochage = défonçage + grille vibrante
- Nettoyer la pièce
 - Sablage (air + sable), sablage doux (air + noyaux), jet d'eau
 - Grenailage (grenailles métalliques, fils coupés)
- Démasselotage
- Ébarbage
 - Marteau, lime, meuleuse, ...
 - Découpe à la presse
 - Roulage, au tonneau
 - Gougeage



Propriétés, défauts

- Coulabilité
 - Caractère du matériau à être coulé, dépend de la température, du moule, ...
 - Alliages d'aluminium : 70 à 100 cm →



Propriétés, défauts

- Coulabilité
 - Caractère du matériau à être coulé, dépend de la température, du moule, ...
- Retrait entre le matériau liquide et le matériau *froid*
 - Retrait : liquide chaud → liquide froid
 - Retrait (ou expansion) : liquide froid → matériau chaud
 - Retrait (ou expansion) : matériau chaud → matériau froid
 - **ATTENTION** : Retrait du matériau (~5%) différent du retrait de la pièce (~15%)
- Formation de la structure du matériau
 - Conditions cinématiques de refroidissement
 - ...

Propriétés, défauts

- *Ségrégation* : hétérogénéité à différents endroits de la pièce
 - *Retassures* : creux en surface ou vide dans la pièce → retrait / masselottes, ...
 - *Criques* : rupture du matériau → retrait bloqué / rigidité du moule-des noyaux, ...
 - *Soufflures* : bulles de gaz, initialement dissoute dans le matériau ou avalée à la coulée
- on peut contrôler les défauts internes et la microstructure à l'aide de techniques de contrôle non destructives (CND) :
- Rayons X
 - Ultrasons
 - ...

Rappels sur les procédés de mise en forme

	Au sable	Au sable mécanisé	Cire perdue	Loast –Foam	Coquille
Poids	10 ⁻³ à 10 ³ kg	10 ⁻³ à 100 kg	10 ⁻³ à 0.5 kg (10 kg)	10 à 10 ³ kg	10 ⁻³ à 50 kg
Série	Unitaire	Petite à grande série	Grande série (unitaire)	unitaire	Grande série
Tolérance (L=150 mm)	2 mm	2 mm	0.5 mm	1 mm	1 mm

Rappels sur les procédés de mise en forme

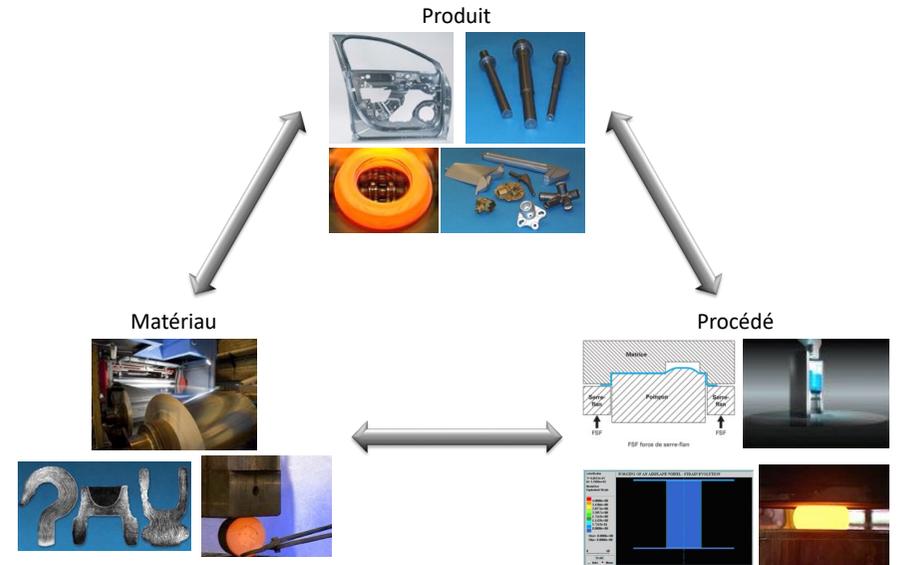
PROCÉDÉS ①	AGENT DE REMPLISSAGE ET D'ALIMENTATION ②	TYPE DE MOÛLE ③	SÉRIE MINIMUM ④	CADENCE DE PRODUCTION MOYENNE ⑤	DURÉE DE VIE MOYENNE DU MOÛLE ⑥
COULÉE EN COÛLLE	Action de la pesanteur (coulée par gravité)	Métallique. Noyaux en sable agglomérés possibles	2.000 pièces	15 pièces/heure	40.000 pièces
COULÉE SOUS PRESSION	Mise en pression du métal par piston	Entièrement métallique	20.000 pièces	(1) 50 injections à l'heure	70.000 injections (allages d'alú)
COULÉE BASSE PRESSION	Mise en pression du métal par air comprimé	Métallique Noyaux en sable agglomérés possibles	5.000 pièces	(1) 20 injections à l'heure	40.000 injections
CENTRIFUGATION	Action de la force centrifuge	Métallique ou en graphite	Pièce unitaire possible	5 à 10 pièces à l'heure	Voir étude détaillée page 115
COULÉE CONTINUE	Action de la pesanteur (coulée par gravité)	Filère métallique ou en graphite	Grande série nécessaire	350 mm de produit à la minute	Voir étude détaillée page 116

(1) Une injection de métal peut donner plusieurs pièces, si le moule est à plusieurs empreintes.

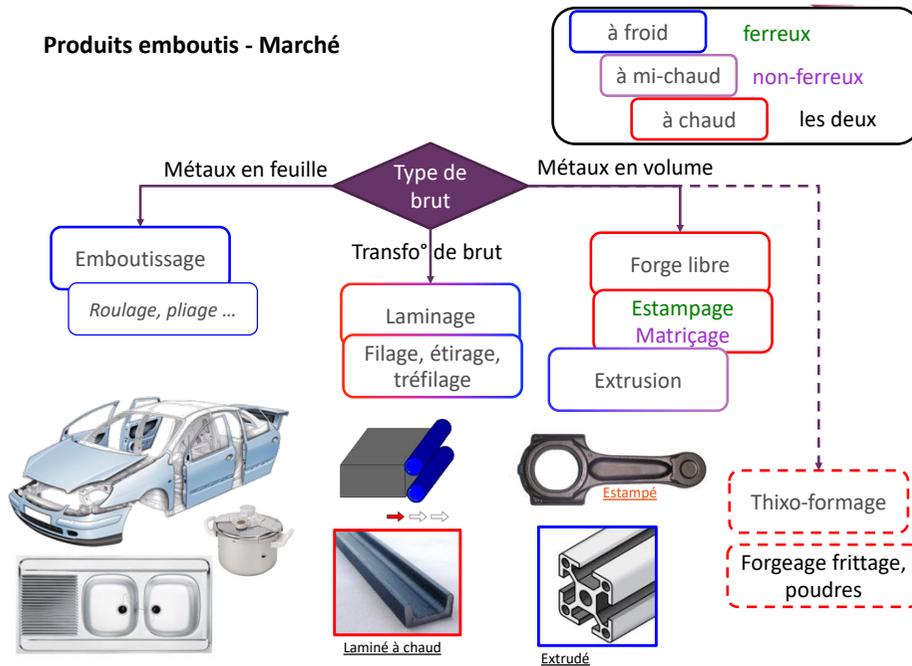
Mise en œuvre des métaux par déformation

Généralités – notions de visco-plasticité

Mise en forme par déformation plastique



Produits emboutis - Marché



Données économiques

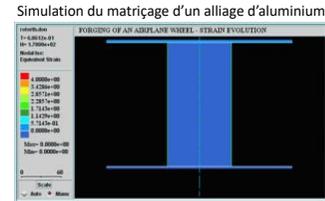
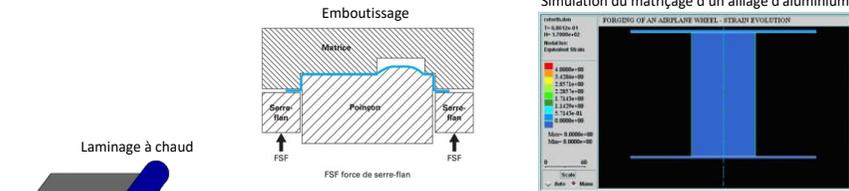
	Industrie manufacturière	Sous-traitance industrielle	Part de la sous-traitance au sein de l'industrie
Nombre d'entreprises	152 000	14 100	9 %
Effectifs à temps plein	2,2 millions	230 000	10 %
Chiffre d'affaires	690 milliards €	39 milliards €	6 %
Taux d'exportation	37 %	28 %	
Valeur ajoutée	180 milliards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

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

Source Insee, Esane 2010

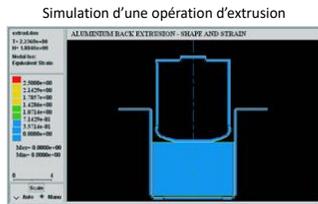


Relation Produit-Procédé



Outillage de forme (presque tout le temps) :

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



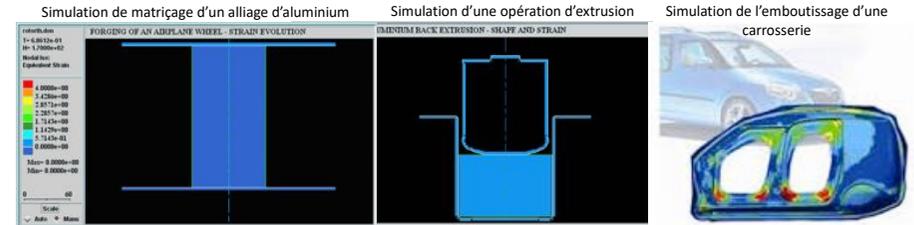
En général, coût d'outillage important

Implication sur les formes réalisables

En général, plutôt adapté aux grandes séries

Pas de contre dépouille

Relation Matériau - Procédé

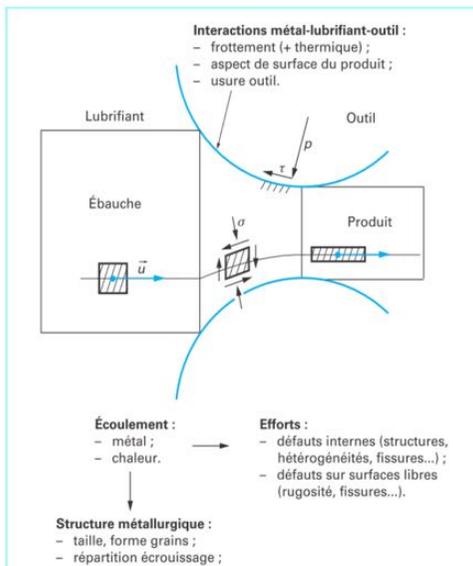


Mise en forme du matériau par **déformation plastique** ...
 ... à chaud ou à froid,
 ... en traction, en compression, ...
 ... en grande transformation, à +- grande vitesse, ...

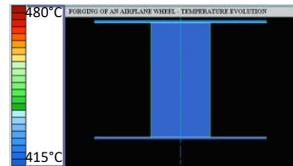
Traitement thermomécanique du matériau de base :

- ...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



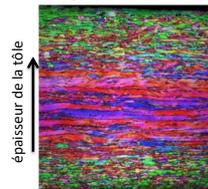
Matricage d'un alliage d'aluminium cartographie de température



Coupe macrographique de pièces issues d'estampage : Fibrage

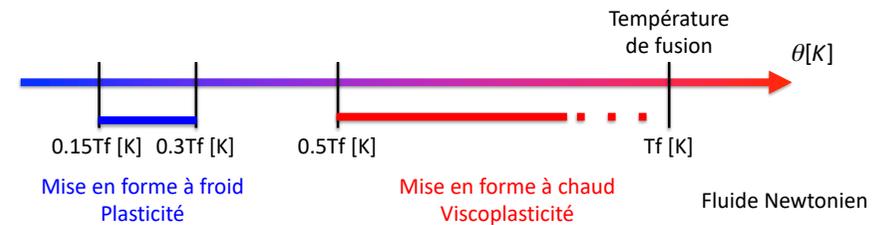


texture d'un acier ferritique laminé à chaud



sens du laminage

Effet de la température

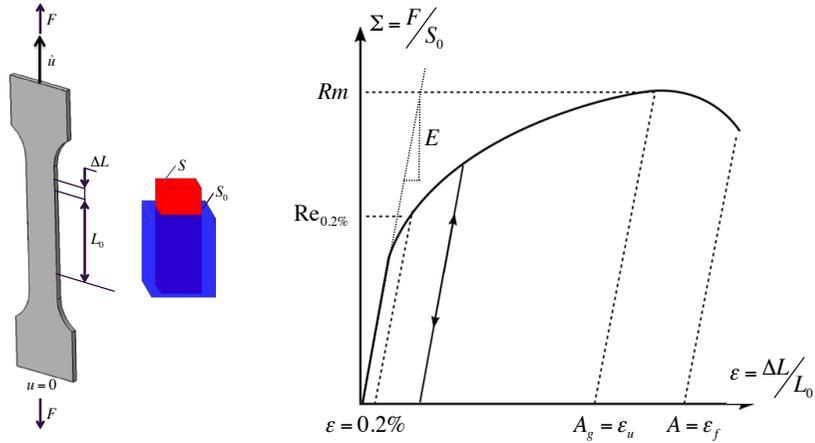


Matériau	0.15Tf [K]	0.3Tf [K]	0.5Tf [K]	Tf
Acier C45	-25°C	220°C	550°C	1370°C
Al 2xxx	-140°C	0°C	180°C	635°C
Bronze	-100°C	70°C	300°C	870°C
TA6V	15°C	300°C	690°C	1650°C

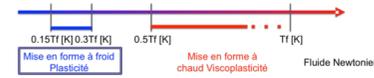
Plasticité des métaux à froid



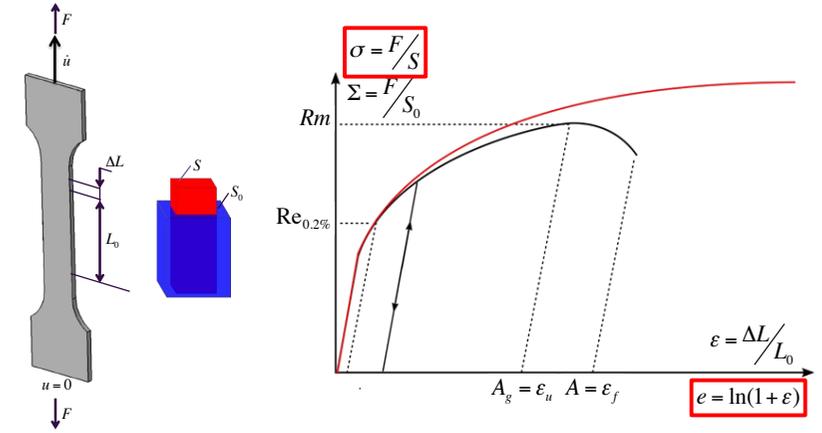
- Essai de traction uniaxial : Mesures Conventiennelles



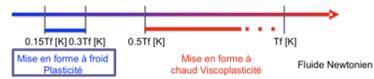
Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Mesures vraies

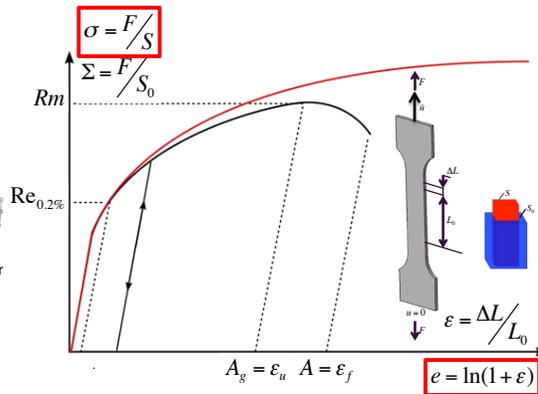
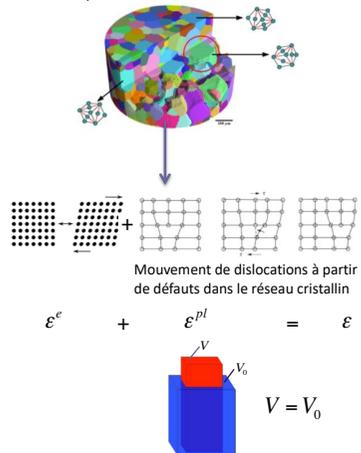


Plasticité des métaux à froid

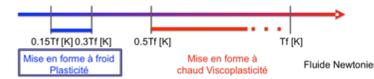


- Essai de traction uniaxial : Déformation plastique

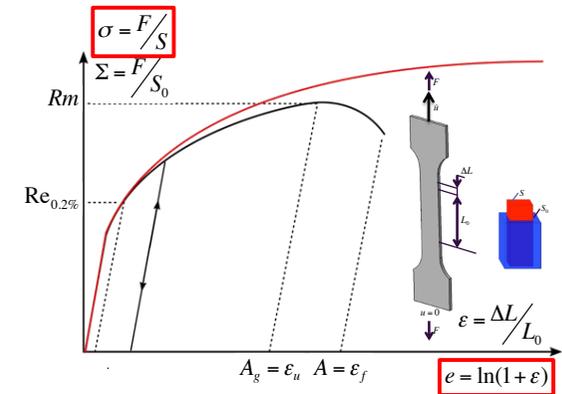
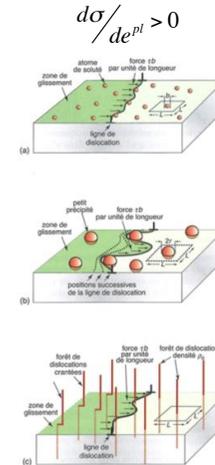
Métaux = Poly cristaux



Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Consolidation (ie écrouissage)



Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Consolidation (ie écouissage)

Hollomon (acier basse limite d'élasticité, acier doux) :

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

Swift (acier) :

$$\sigma = k (\epsilon_0 + \epsilon_{pl})^n$$

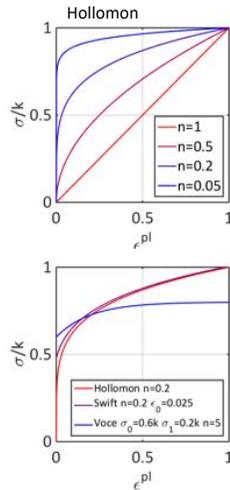
Voce (alliage d'aluminium ou laiton) :

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_0) \text{Exp}(-n \cdot \epsilon_{pl})$$

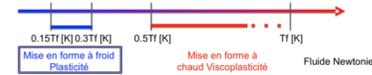
Swift/Voce combinés (Acier à hautes caractéristiques) :

$$\alpha \cdot \text{Swift} + (1 - \alpha) \text{Voce}$$

n : coefficient d'écouissage

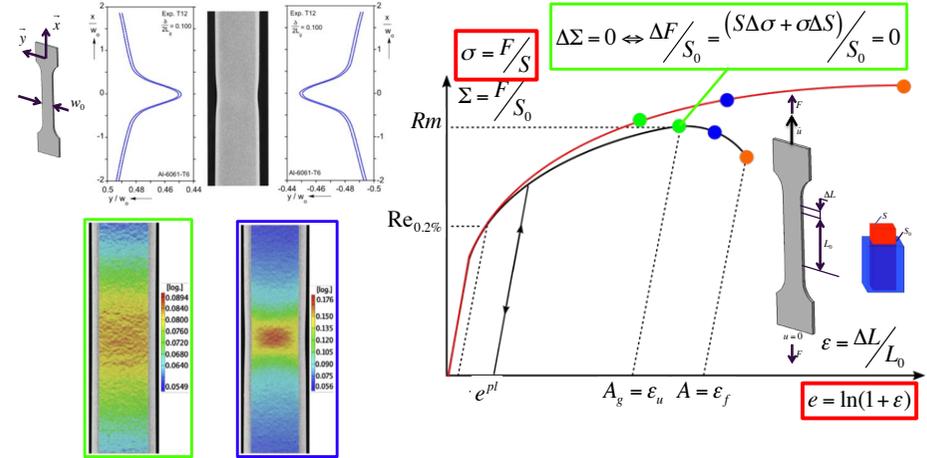


Plasticité des métaux à froid



- Essai de traction uniaxial : Striction diffuse

Instabilité de la structure → Localisation des déformations

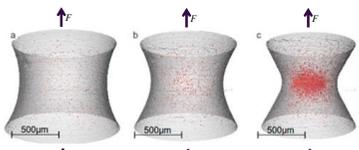
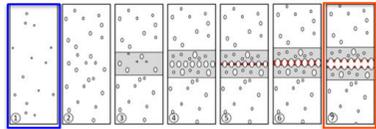


Plasticité des métaux à froid

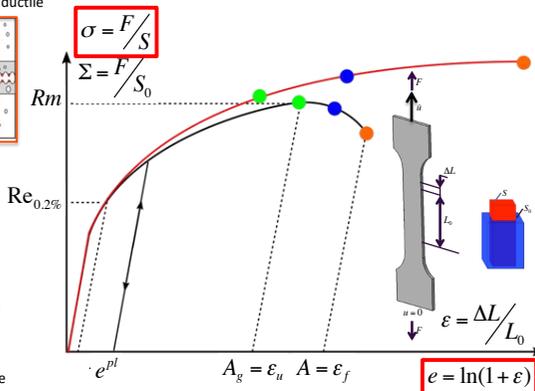


- Essai de traction uniaxial : Striction localisée jusqu'à rupture

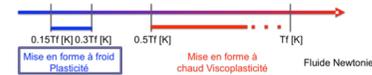
Localisation interne des déformations + Endommagement ductile



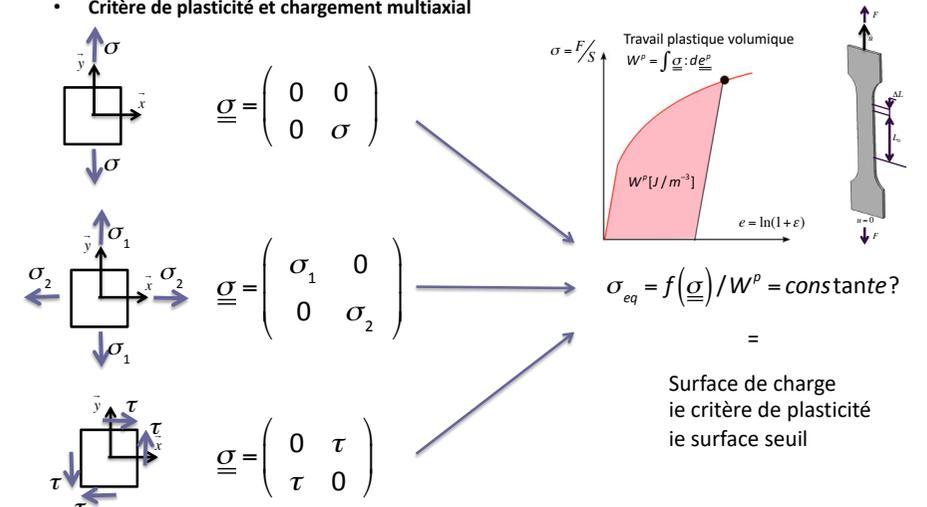
Localisation interne des déformations / nucléation, croissance et coalescence de vides (rouge) jusqu'à rupture sur éprouvette cylindrique. Mesure par tomographie au rayon X.



Plasticité des métaux à froid



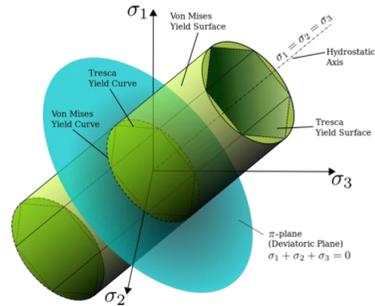
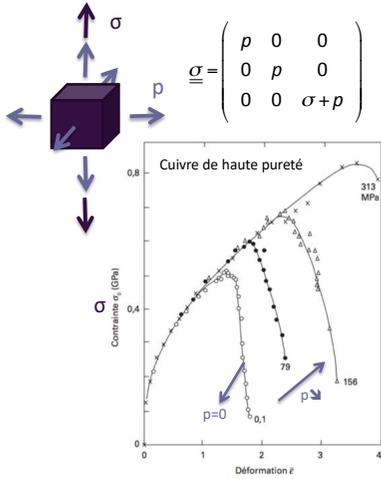
- Critère de plasticité et chargement multiaxial



Plasticité des métaux à froid

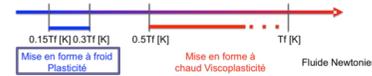


• Critère de plasticité et chargement multiaxial

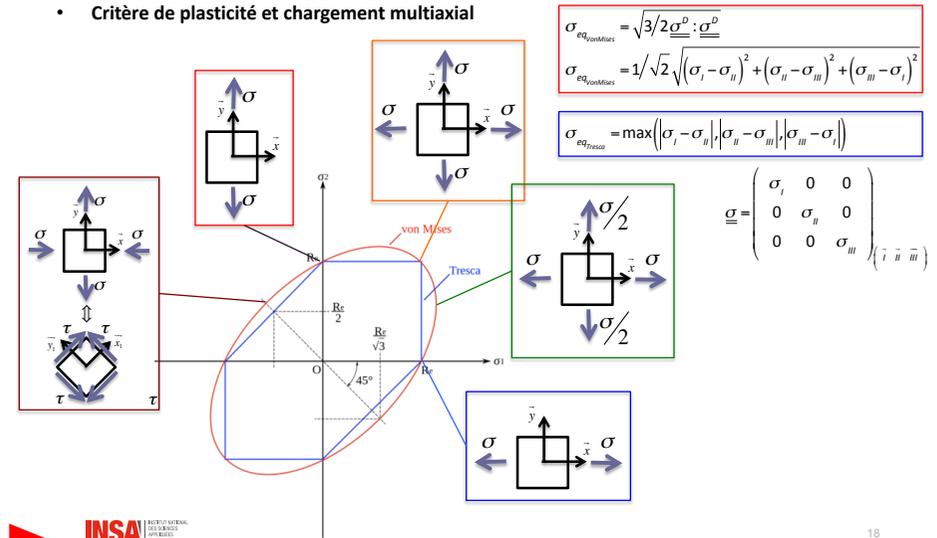


La surface de charge est insensible à la pression hydrostatique $\rightarrow \sigma_{eq} = f(\underline{\underline{\sigma}}^D)$
 $\underline{\underline{\sigma}}^D = \underline{\underline{\sigma}} - 1/3tr(\underline{\underline{\sigma}})Id$
 $\underline{\underline{\sigma}}^D$: déviateur des contraintes
 $p_H = 1/3tr(\underline{\underline{\sigma}})Id$: pression hydrostatique

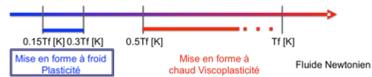
Plasticité des métaux à froid



• Critère de plasticité et chargement multiaxial

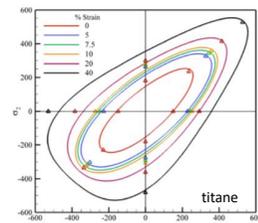
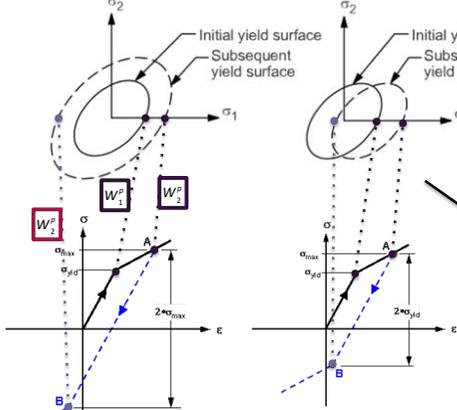


Plasticité des métaux à froid



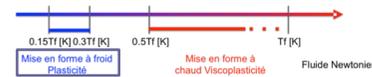
• Critère de plasticité et chargement multiaxial : Influence de l'écroutissage sur la surface de charge

Déformation de la surface de charge induit par le travail plastique
 Ecrouissage isotrope Ecrouissage cinématique (effet Baushinger)

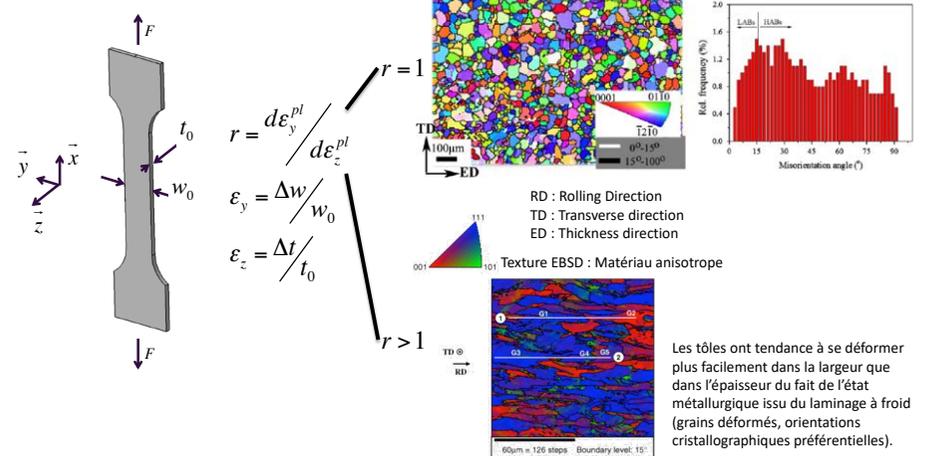


Passage d'un matériau isotrope à un matériau anisotrope lors de l'écroutissage.

Plasticité des métaux à froid



• Anisotropie : Coefficient de Lankford



Plasticité des métaux à froid



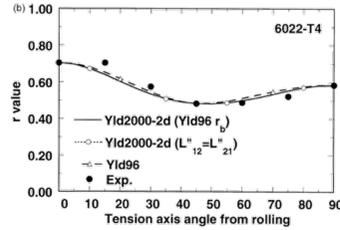
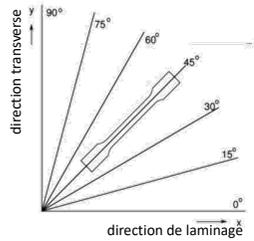
- **Anisotropie moyenne et planaire**
Exemple des tôles laminées

Anisotropie moyenne :

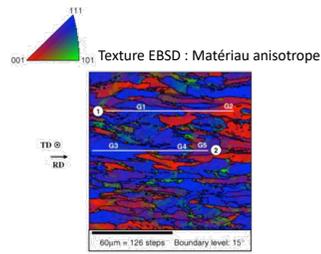
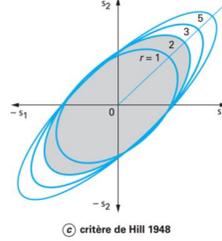
$$r_{moy} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$$

Anisotropie planaire :

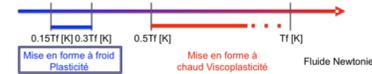
$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$



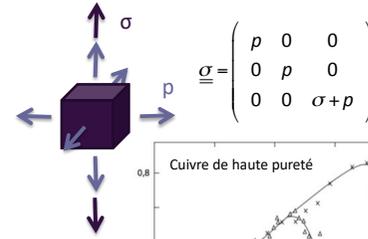
exemple de critère anisotrope simple utilisé pour les tôles en acier



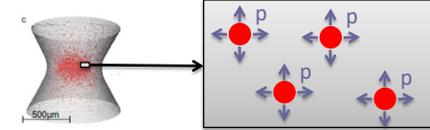
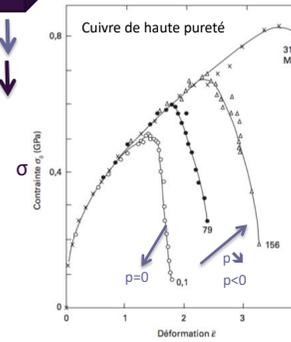
Plasticité des métaux à froid



- **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.

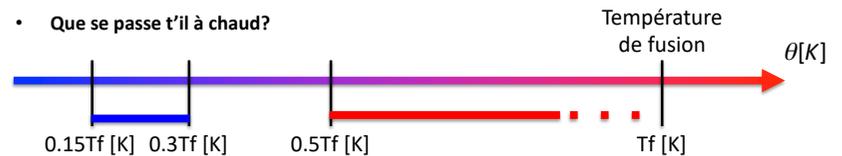
Rq : Les fortes déformations permises lors de certains procédés de mise en forme des métaux telle que le matricage est lié au confinement entre matrices qui permet de diminuer la pression hydrostatique.

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 répartie 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?**

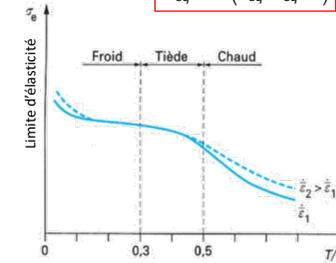


Mise en forme à froid
Plasticité

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

Mise en forme à chaud
Viscoplasticité

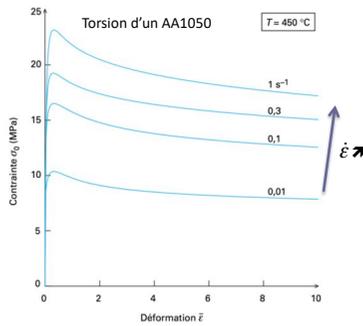
$$\sigma_{eq} = f(\epsilon_{eq}, \dot{\epsilon}_{eq}, \theta)$$



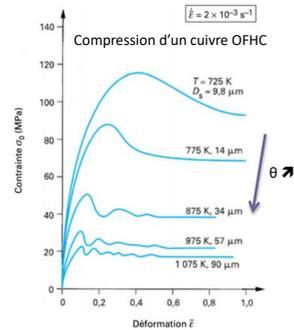
Plasticité des métaux à chaud



Comportement à chaud

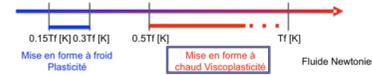


Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques

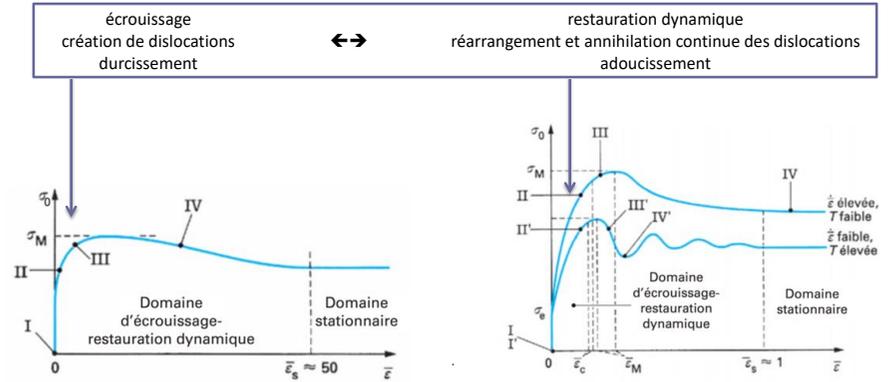


Matériaux à faible énergie de défaut d'empilement
Cuivre, laitons, fer γ , aciers austénitiques

Plasticité des métaux à chaud



Comportement à chaud : déformation faible jusqu'à Rm



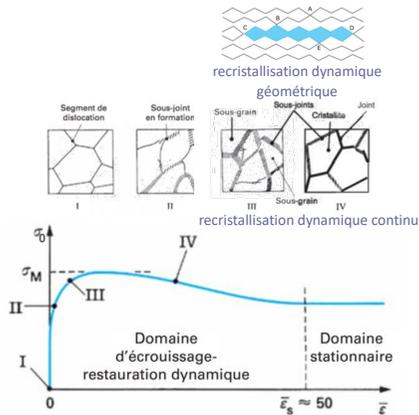
Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques

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

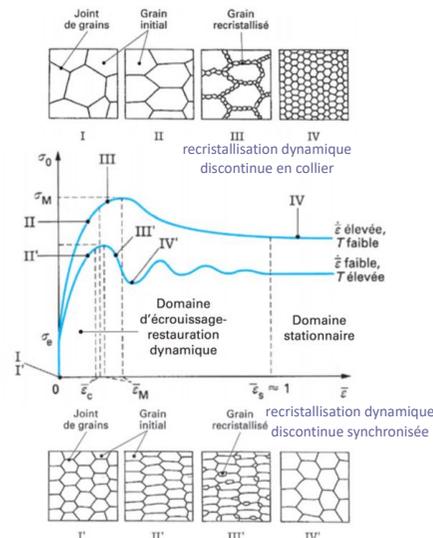
Plasticité des métaux à chaud



Comportement à chaud : forte déformation

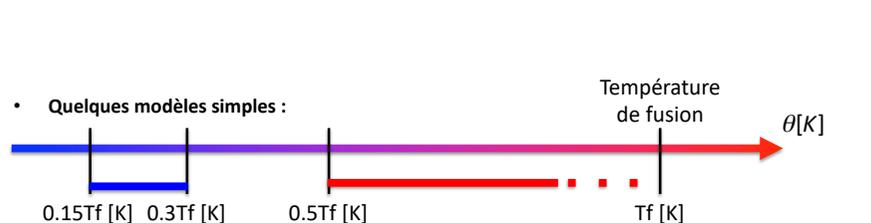


Matériaux à forte énergie de défaut d'empilement
Aluminium, Fer α , titane β , aciers ferritiques



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

Plasticité des métaux à chaud

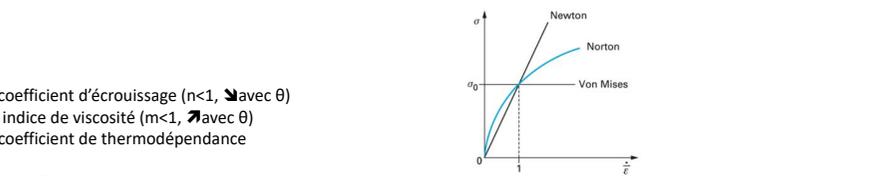


Quelques modèles simples :

Mise en forme à froid Plasticité : $\sigma_{eq} = f(\epsilon_{eq})$ (Swift) $\sigma_{eq} = k(\epsilon_0 + \epsilon_{eq})^n$

Mise en forme à chaud Viscoplasticité : $\sigma_{eq} = f(\epsilon_{eq}, \dot{\epsilon}_{eq}, \theta)$ (Norton Hoff généralisé) $\sigma_{eq} = \sigma_1(\epsilon_0 + \epsilon_{eq})^n \dot{\epsilon}_{eq}^m e^{-\beta(\theta - \theta_0)}$ → Norton Hoff $\sigma_{eq} = \sigma_1 \dot{\epsilon}_{eq}^m$

Fluide Newtonien : $\sigma_{eq} = f(\dot{\epsilon}_{eq})$ (Newton) $\sigma_{eq} = K \dot{\epsilon}_{eq}$



n : coefficient d'écrouissage (n<1, avec θ)
m : indice de viscosité (m<1, 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)



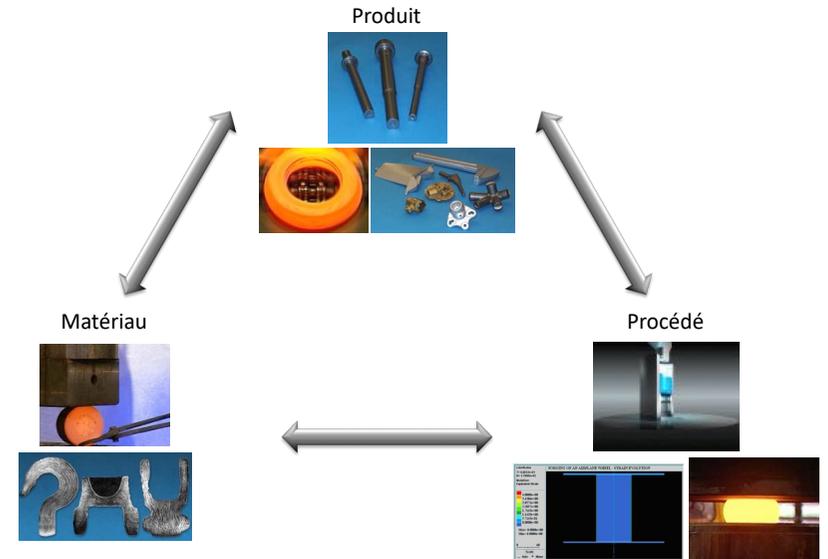
Nécessité d'ajouter des traitement de recuit entre séquence de mise en forme

Maîtrise de la lubrification

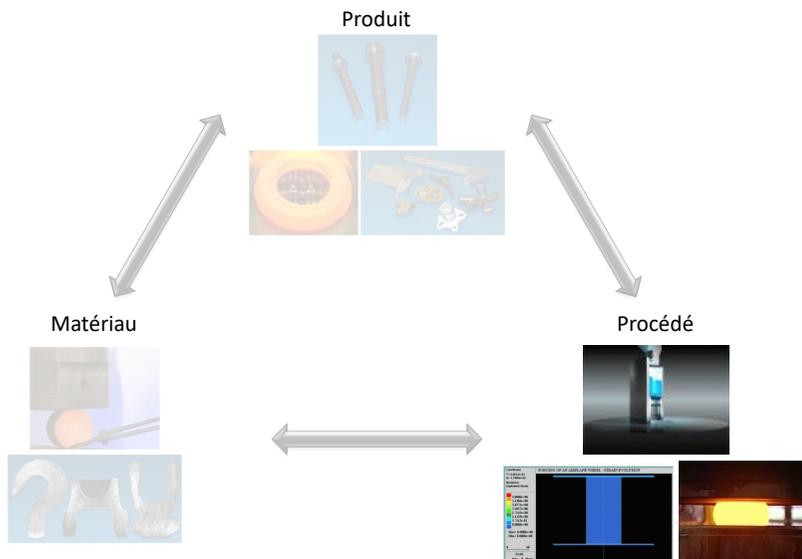
Mise en œuvre des métaux par déformation en volume

Focus sur forge libre - estampage/matriçage - extrusion

Mise en forme par déformation plastique



Mise en forme par déformation plastique



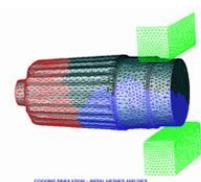
Procédés - Principes généraux

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.

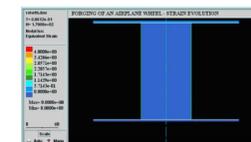
$$\theta [K] > \theta_{\text{recristallisation}}$$



Estampage / matriçage

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

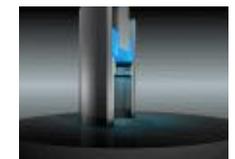
$$\theta [K] > \theta_{\text{recristallisation}}$$



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.

$$\begin{aligned} &\text{à froid :} \\ &0,15\theta_{\text{fusion}} < \theta [K] < 0,3\theta_{\text{fusion}} \\ &\text{à mi-chaud :} \\ &0,5\theta_{\text{fusion}} < \theta [K] < \theta_{\text{recristallisation}} \end{aligned}$$

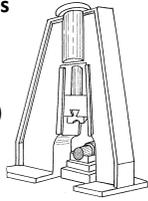


Procédés - Machines



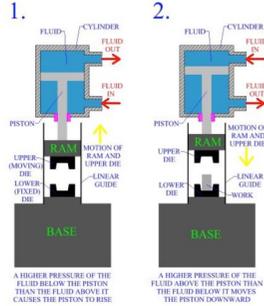
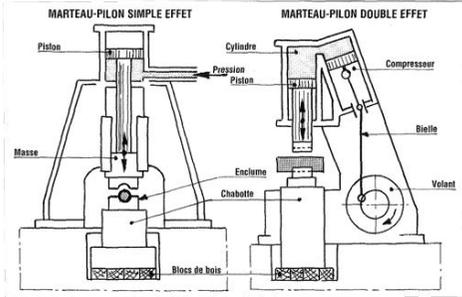
Travail par chocs Marteau- Pilon

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



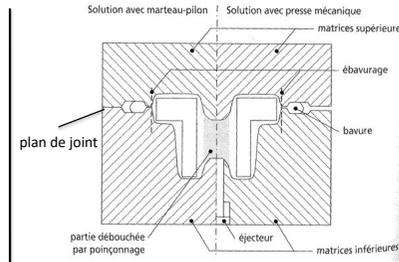
Travail par pression Presse

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

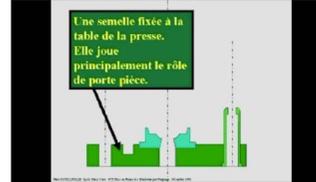


Procédés - Outillages

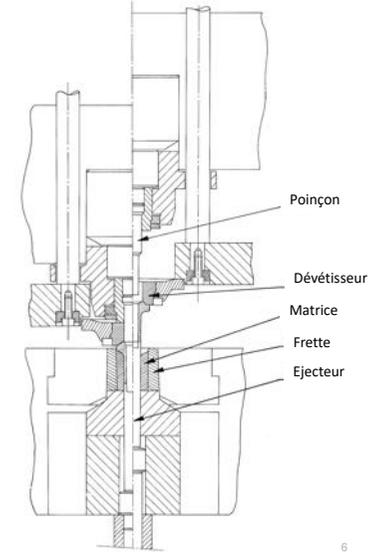
Estampage / matriçage



Ebavurage

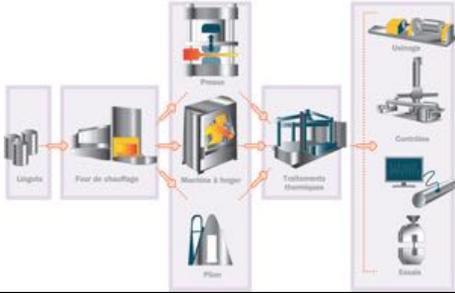


Extrusion

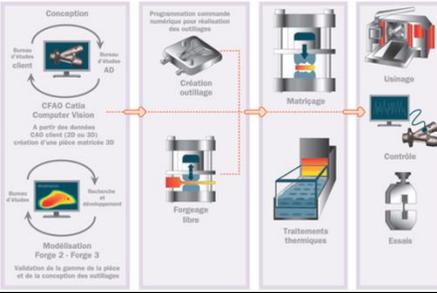


Procédés - Gamme macroscopique

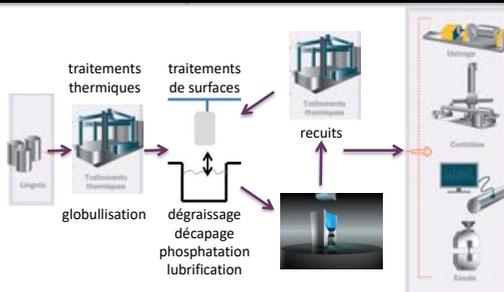
Forge libre



Estampage/matriçage



Extrusion



Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

Forges libres



Étirage



Planage



Poinçonnage



bigornage

Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

- Estampage / Matriciage

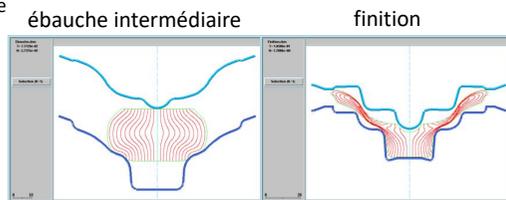
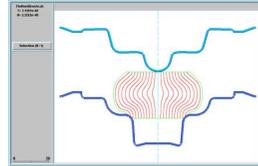


débitage lopin par
cisaillage ou sciage
au strict volume
souhaité (pièce +
bavures)

opérations
d'estampage

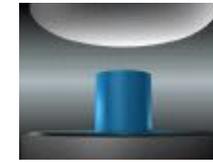
ébauchage

Finition directe = défaut

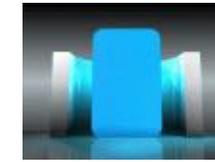


Procédés - Gammes : Opérations élémentaires

- Extrusion



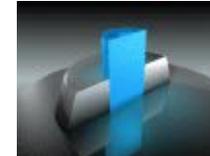
Ecrasage



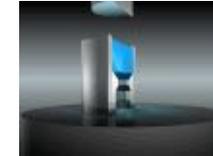
Préformage



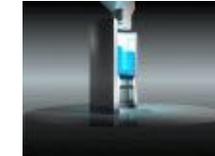
Poinçonnage



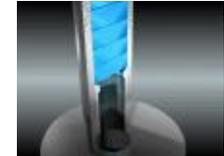
Refoulage



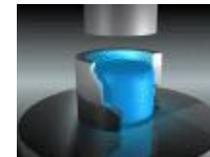
Filage direct



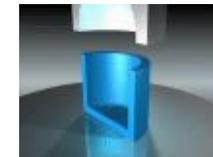
Filage direct creux



Filage direct en
enfilade



Filage latéral



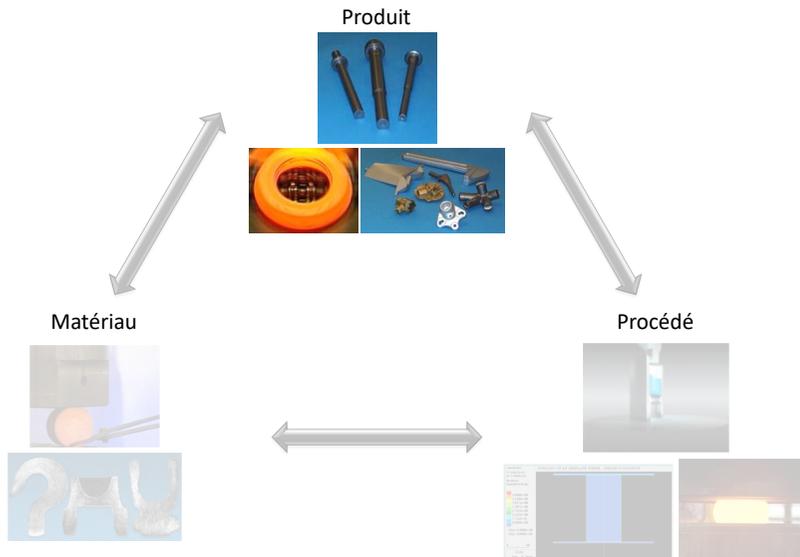
Ogivage



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

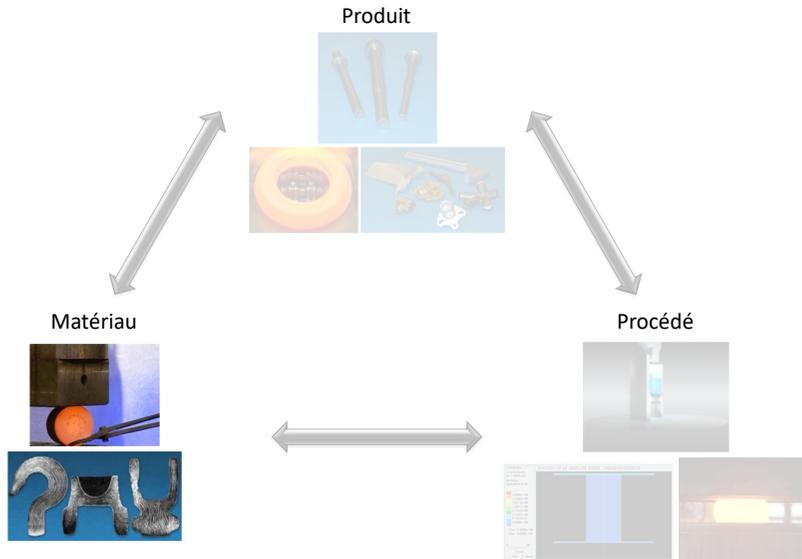


Extrusion

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 ...

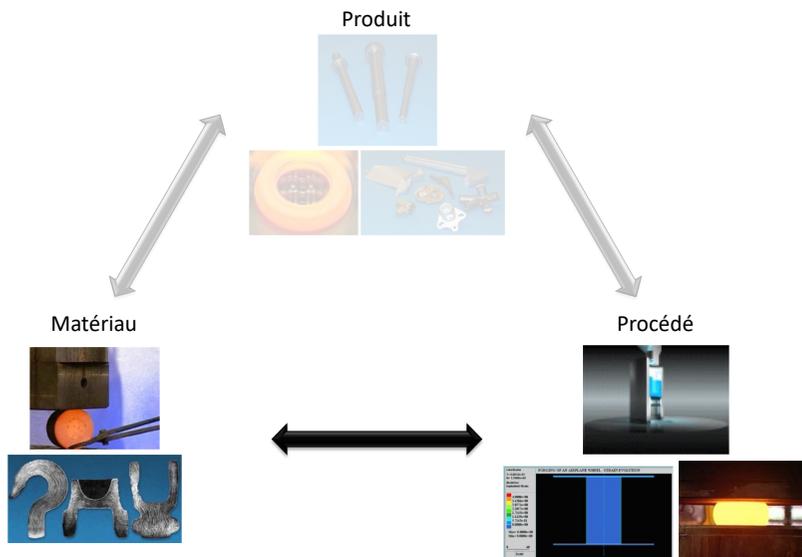
Forge libre / matriçage

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

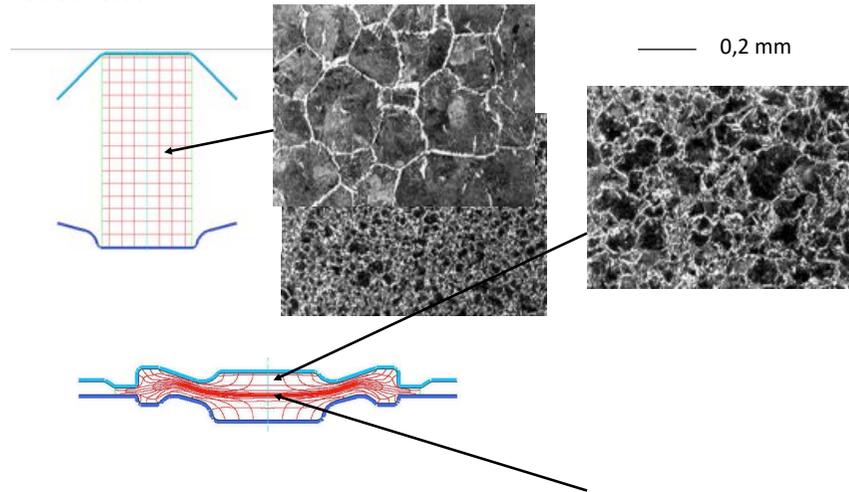


Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

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

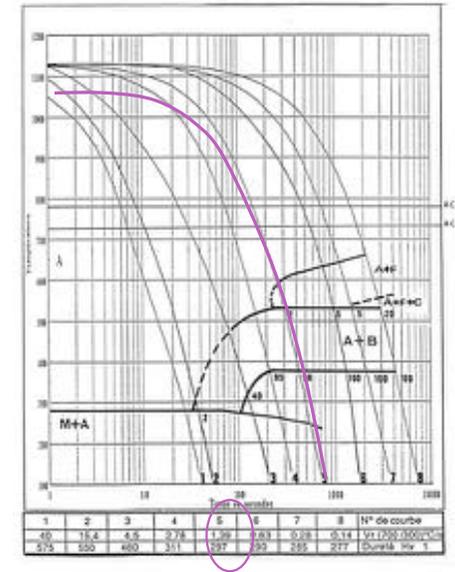
Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

Recristallisation

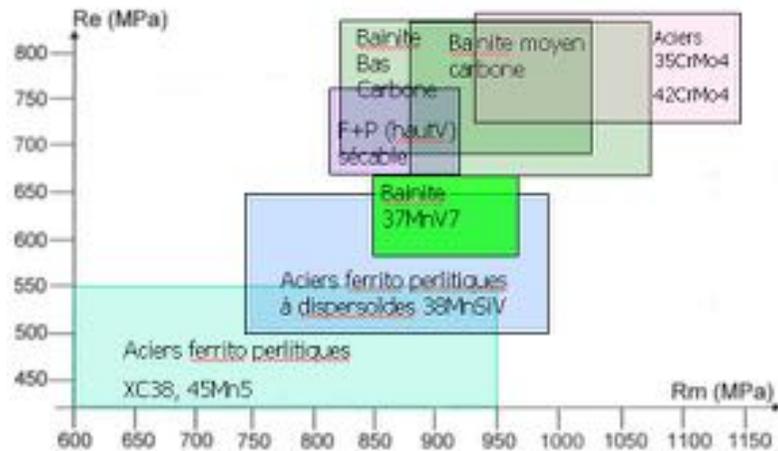


Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

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



Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud



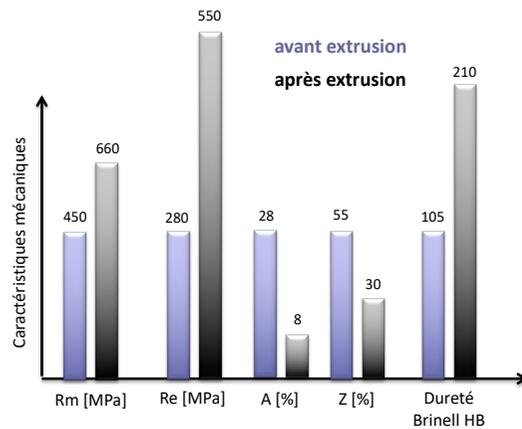
Relation Procédé - Matériaux - Mise en forme à chaud

Fibrage : Anisotropie → Meilleure résistance dans le sens du fibrage

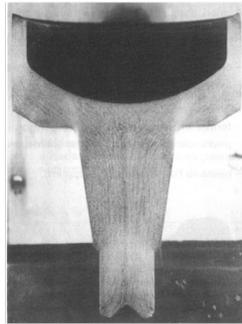


Relation Procédé - Matériaux - Extrusion

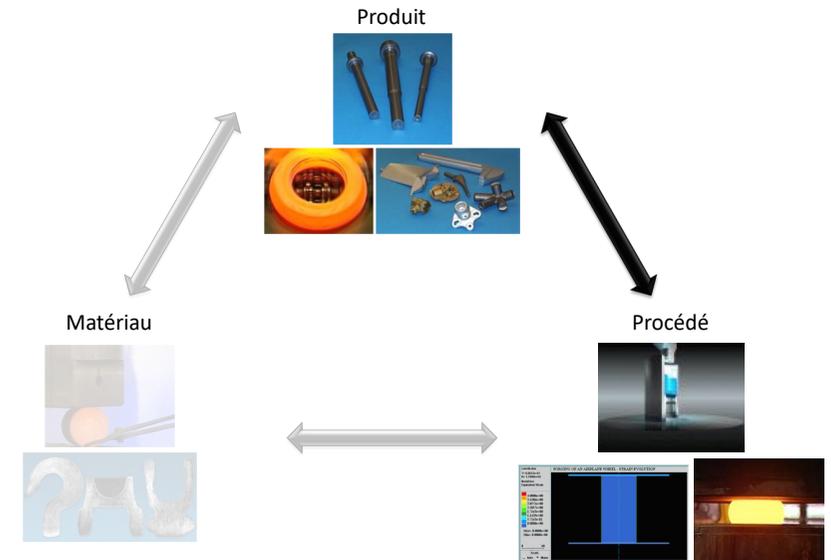
Effet de l'érouissage sur un acier C18:



Fibrage:



Mise en forme par déformation plastique



Relation produit - procédé :

	Forge libre	Estampage	Matriçage	Extrusion
Formes réalisables	Simple	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		∅ : 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

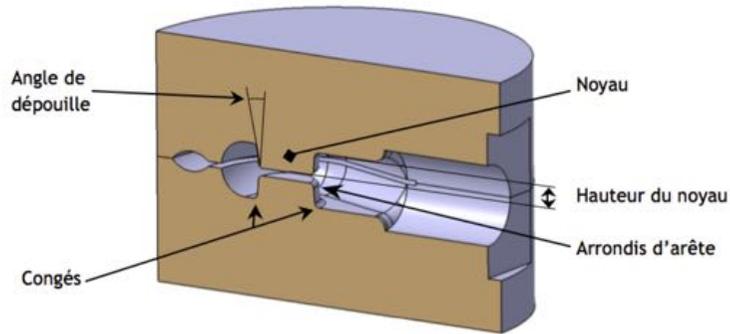
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **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 Défaits de guidage des machines**
tolérances, choix du plan de joint

Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

Quelques définitions



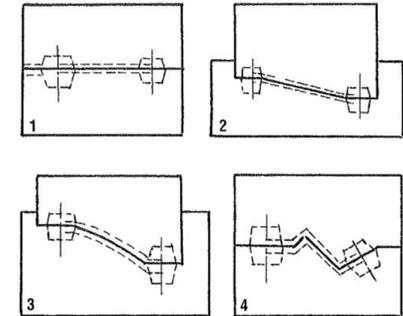
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **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.



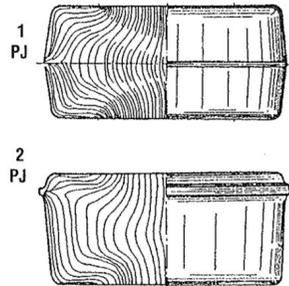
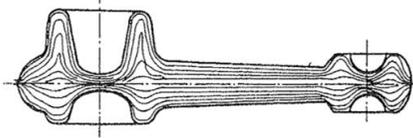
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **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

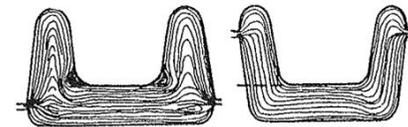


Relation produit - procédé : Règles de tracé

- **Matriçage-Estampage**

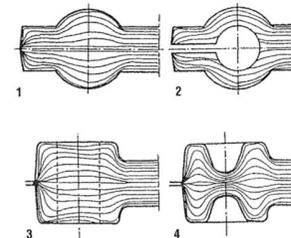
Choix du plan de joint & Orientation du fibrage :

Pièces avec nervures

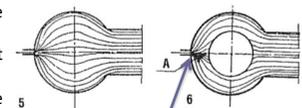


Les fibres regroupées au plan de joint peuvent induire une amorce de rupture. Il est possible de déporter le plan de joint pour modifier l'emplacement de cette zone de rupture éventuelle en l'éloignant des points d'application des efforts.

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.



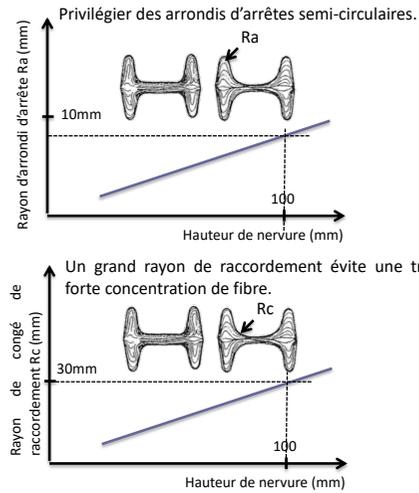
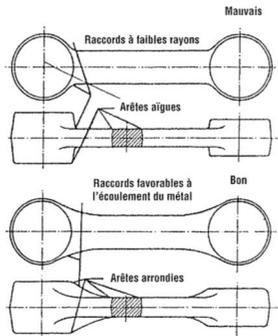
Risque de rupture

Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Matricage-Estampage

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

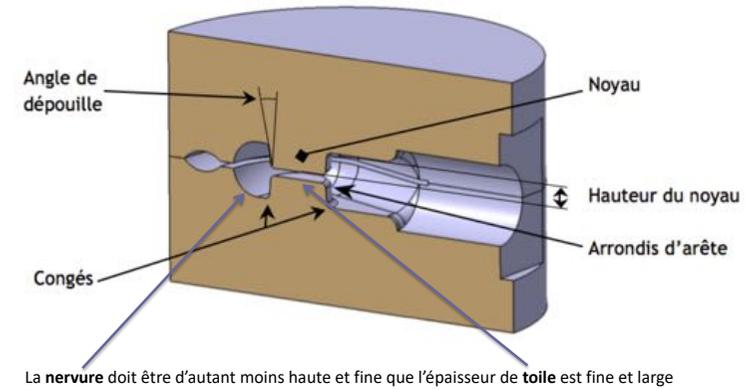
De manière général, mettre en place des variations de section les plus progressives possibles.



Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Matricage-Estampage

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

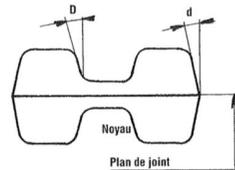


Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Matricage-Estampage

Dépouilles : garantissent l'extraction des outils.

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



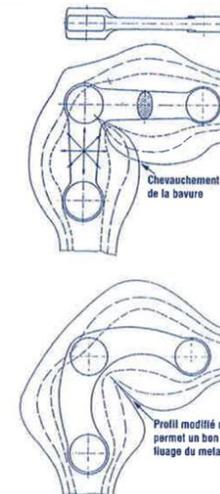
d = dépouille extérieure
D = dépouille intérieure

Machine	Valeurs des dépouilles – Recommandées en fonction des machines.					
	« 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
				5 %	3°	Pièces de révolution de faible hauteur
Presses à forger verticales	16 %	9°	Creux profonds	10 %	6°	Pièces de révolution de faible hauteur
	10 %	6°	Valeur normale	5 %	3°	Valeur normale
	5 %	3°	Éjecteur	2 %	1°	Éjecteur
Presses à forger horizontales	5 %	3°	En fonction de la profondeur du trou borgne ou débouchant	5 %	3°	Poinçons coulisseaux principaux
	à	à		2 %	1°	Valeur normale
	2 %	1°		0 %	0°	Poinçons coulisseaux secondaires

Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Matricage-Estampage

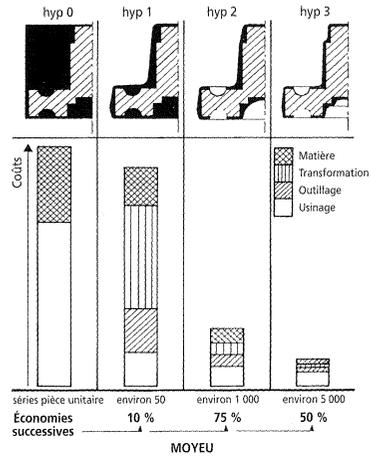
Gestion des bavures



Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Matricage-Estampage

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



Valeurs des surépaisseurs (mm)						
Épaisseur E	- de	30	60	120	250	
Longueur L	à	60	120	250	500	
Diamètre D	à	60	120	250	500	
Surépaisseur sur chaque face ou rayon		1	1,5	2	2,5	3

Relation produit - procédé : Règles de tracé

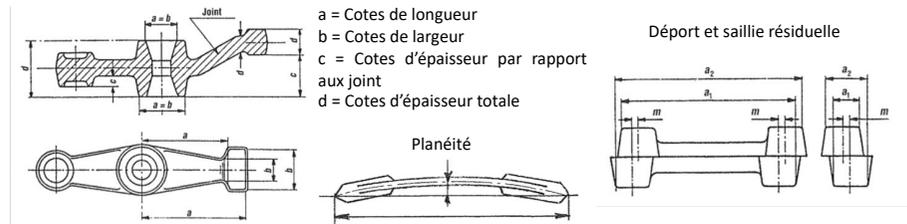
• Matricage-Estampage

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)

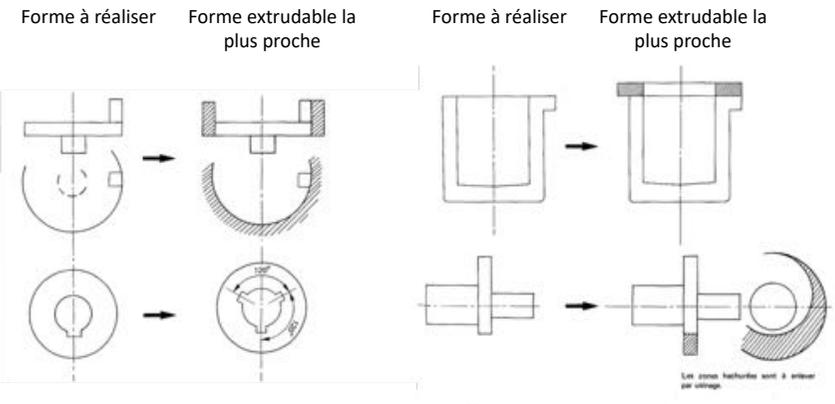


Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Extrusion

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

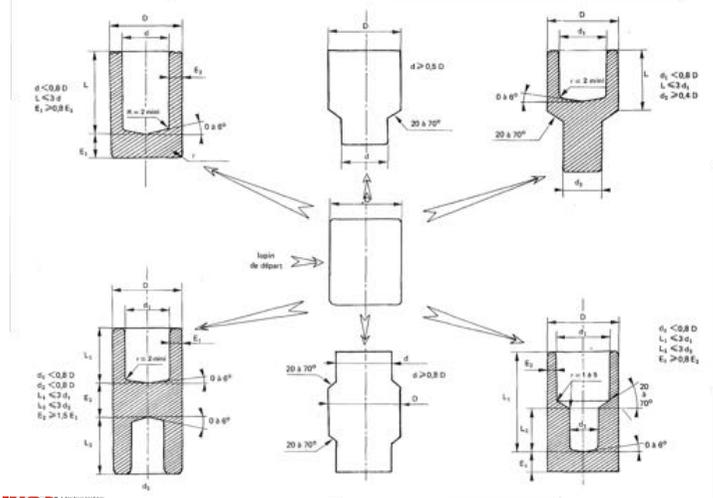
Symétries des efforts lors de l'extrusion : Symétries et axes de symétries sur la pièce



Relation produit - procédé : Règles de tracé

• Extrusion

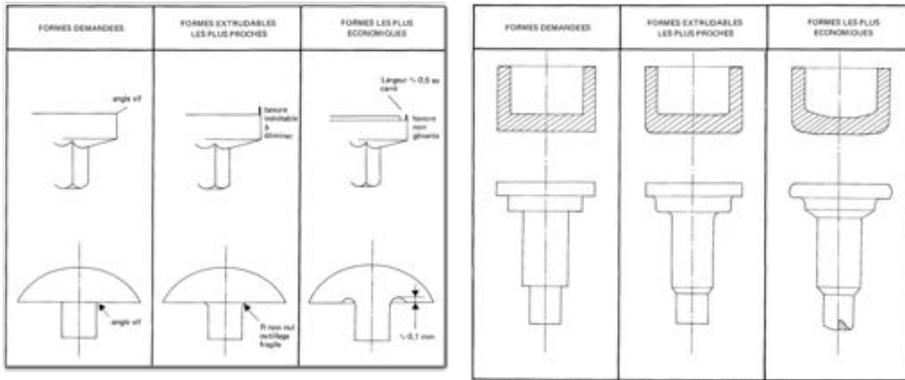
Ecoulement du métal : Variations d'épaisseur de parois de section (problème de formation de criques)



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

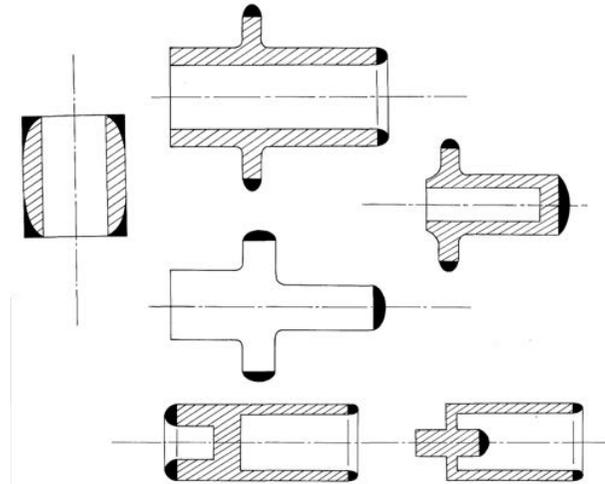
Gestion des bavures et de l'usure des outils



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

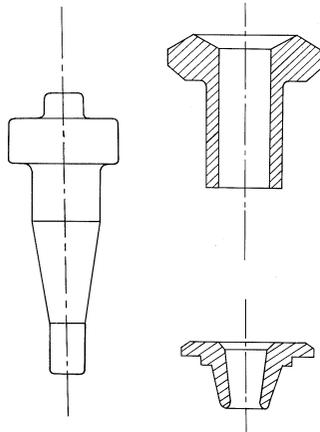
Emplacement des surplus de matière



Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

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



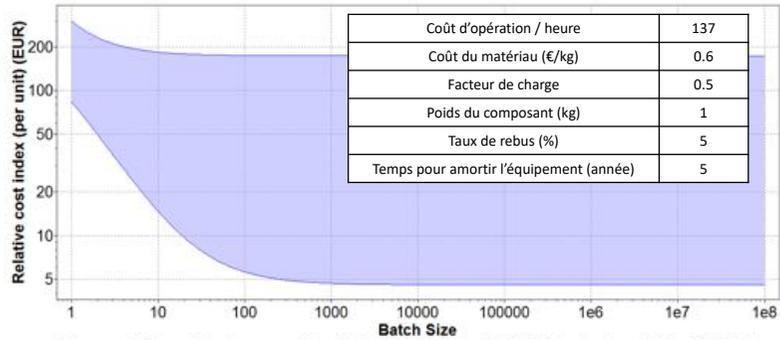
Relation produit - procédé : Règles de tracé

- Extrusion

Tolérancement (rigidité des outillages, guidage poinçon/filière)

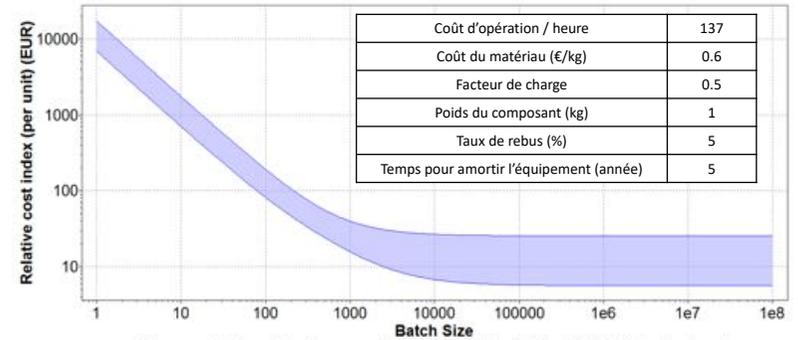
CONCENTRICITÉ	LONGUEUR	DIAMETRE
<p>PERPENDICULARITE</p> <p>PARALLÉLISME</p>	<p>BATTEMENT</p> <p>-simple</p> <p>-double</p>	

Données économiques : Forge libre



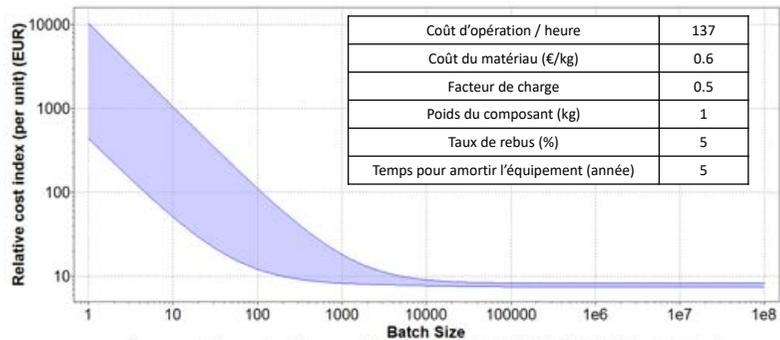
Coût de l'équipement (€)	$3E^5 - 9E^5$
Fraction de matériau utilisée	0.4 - 0.9
Cadence (pièce/heure)	1 - 50
Coût de l'outillage (€)	35 - 200
Durée de vie de l'outillage (pièce)	$1E^3 - 1E^4$

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)	$1E^3 - 5E^6$

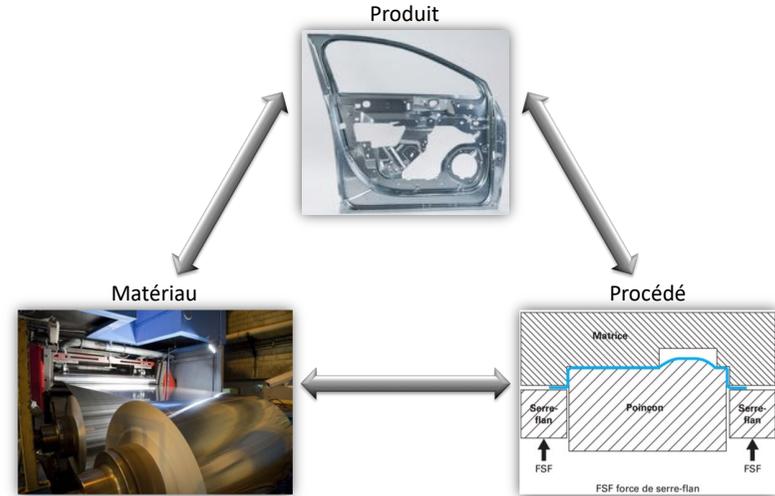
Données économiques : Extrusion



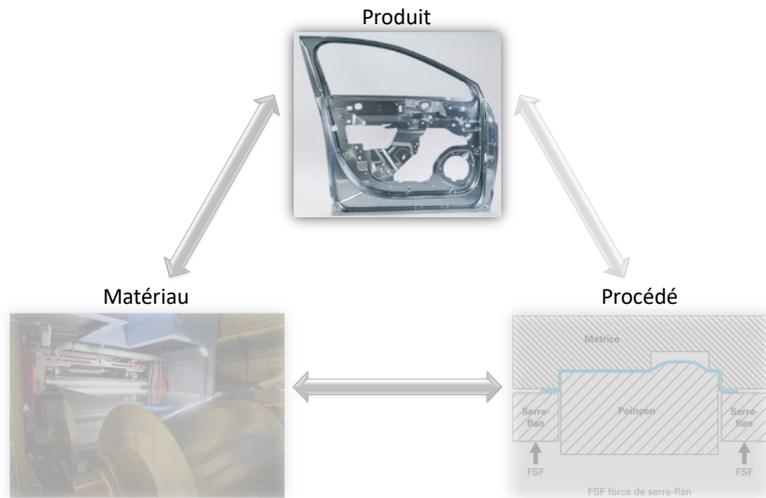
Coût de l'équipement (€)	$2E^5 - 1E^6$
Fraction de matériau utilisée	0.9 - 1.0
Cadence (pièce/heure)	$1E^3 - 1E^4$
Coût de l'outillage (€)	$5E^2 - 1E^4$
Durée de vie de l'outillage (pièce)	$1E^5 - 1E^6$

Mise en forme à froid des métaux en feuille Emboutissage

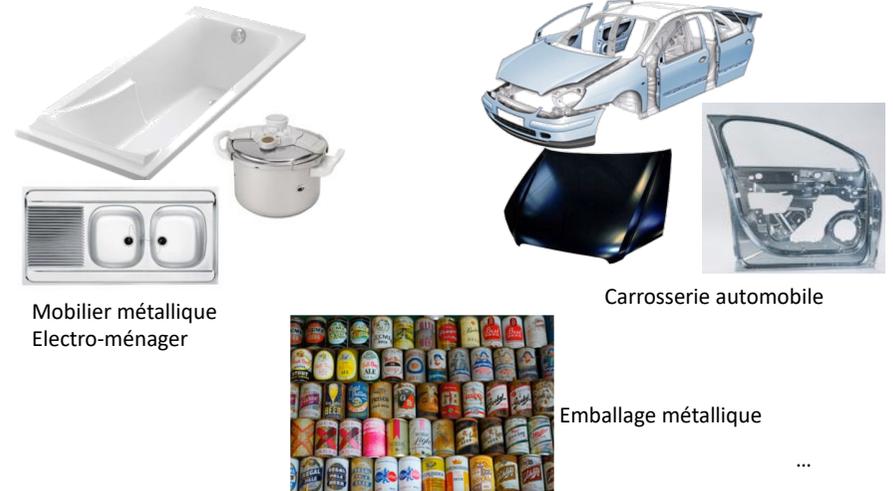
Emboutissage des métaux en feuilles



Emboutissage des métaux en feuilles

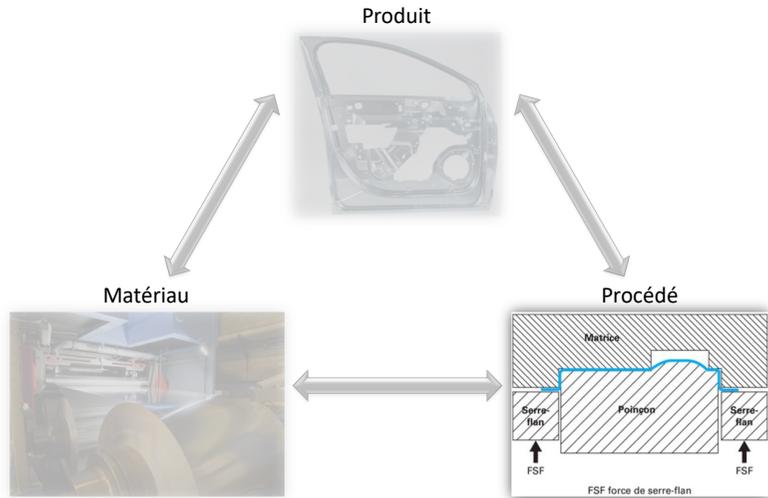


Produits emboutis - Marché

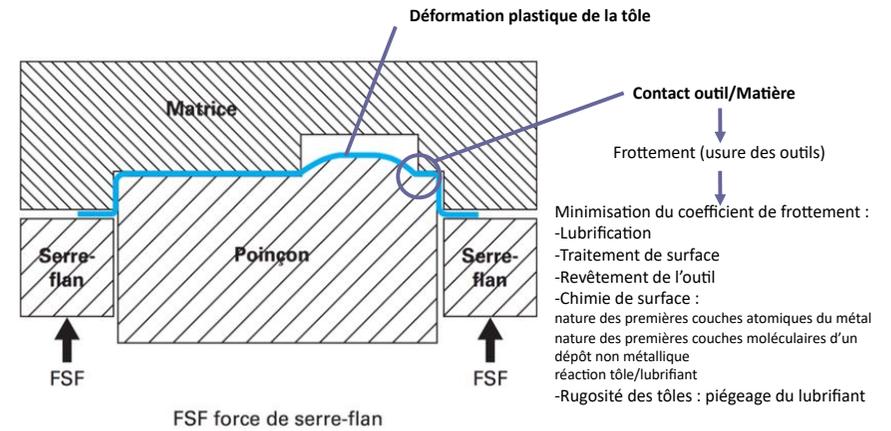


Pièces surfaciques de forme complexe non développable embouties à partir de tôles

Emboutissage des métaux en feuilles



Procédé - Principes physiques mis en jeu



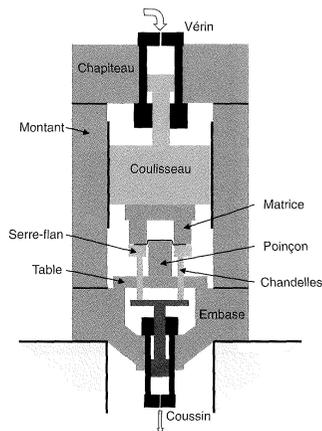
Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

Presses Mécaniques
Presses Hydrauliques
Servopresses

Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse simple-effet hydraulique

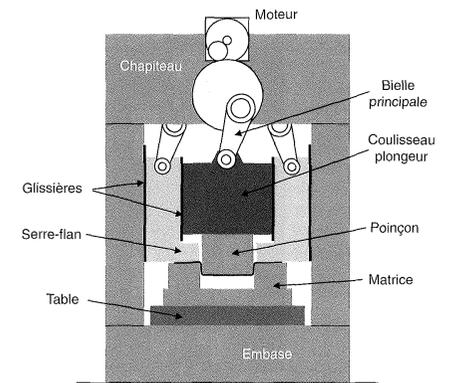
Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

Presses Mécaniques
Presses Hydrauliques
Servopresses

Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse double-effet mécanique

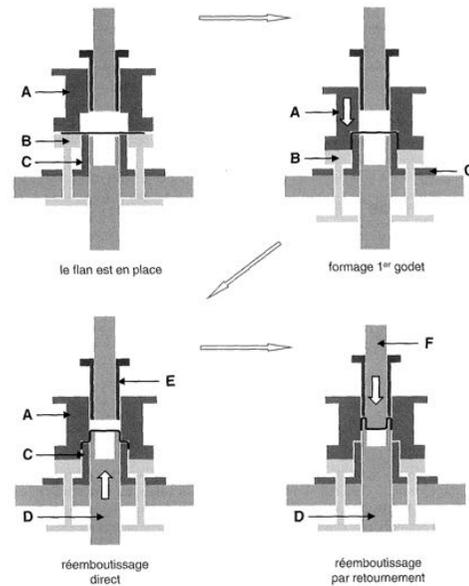
Procédé - Presses d'emboutissage

Modes d'entraînement :

Presses Mécaniques
Presses Hydrauliques
Servopresses

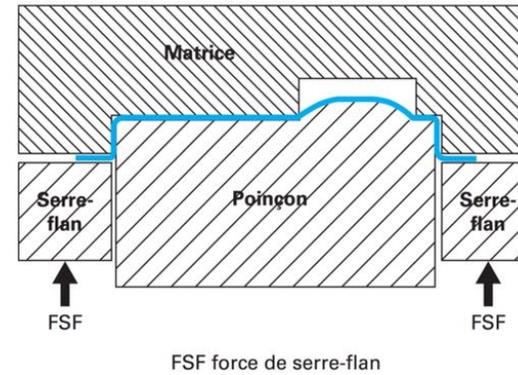
Nombre d'effets :

effet = mouvement du coulisseau qui est moteur



Presse triple-effet hydraulique

Procédé - Outillage



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.

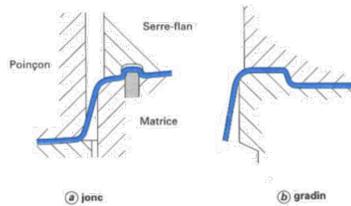
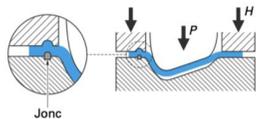
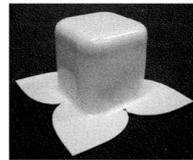
Serre-flan :

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 :

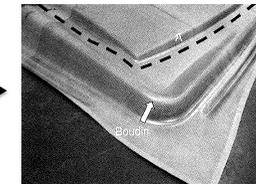
- Homogénéiser l'avalement de matière
- réduire le manque de tension de la pièce si celle-ci est relativement plate
- réduire l'apparition de voilage



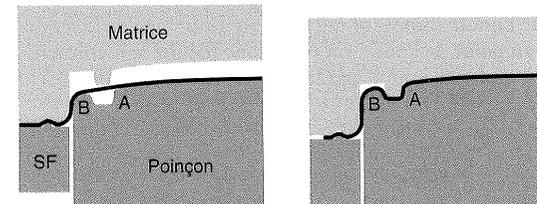
Procédé - Accessoires d'outillage

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

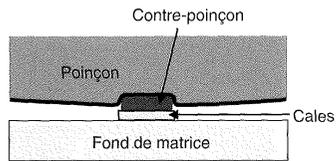


Formage avec boudin

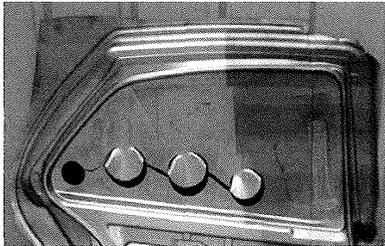


Procédé - Accessoires d'outillage

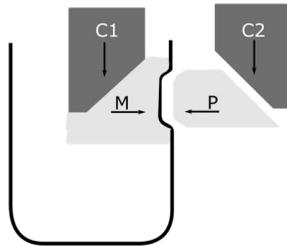
Contre-embouti



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

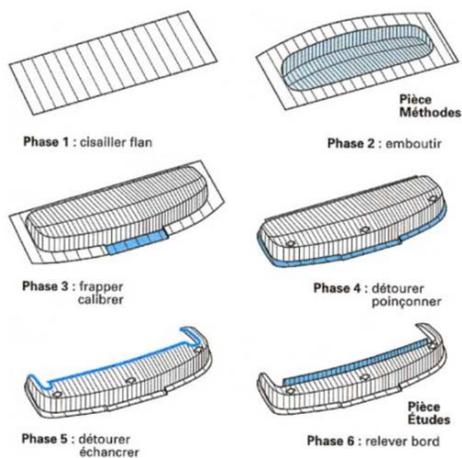
Ejecteurs : nécessaires dans certains cas à causes des contraintes résiduelles qui peuvent tendre dans certains cas à fermer l'embouti sur l'outil.

Procédé - Matériau des outils

	Coût	complexité et/ou taille des outillages	Résistance en traction	Résistance à l'usure	Traitement de surface	Remarque
Fontes grises	+	+	-	-	induction ou chaluveau nitruration chromage	moulabilité amortissement des chocs
Aciers à outils	-	-	+	+		
Carbures de tungstène	--	--	-	++		bague sertie avec frettage dans une bague en acier

L'outillage de presse représente 40% de l'investissement pour l'industrialisation d'un nouveau véhicule

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



-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 :

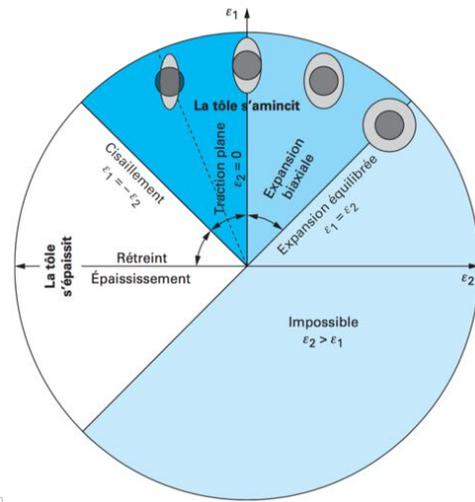
l'emboutissage s'effectue le plus souvent sur presse double effet monoposte, les opérations de parachèvement étant réalisées sur des presses simple effet alignées avec la première ; c'est le cas pour l'ensemble des *pièces de robe* (c'est-à-dire pièces extérieures de carrosserie) nécessitant 3 à 5 presses 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 :

$$\mathbb{E} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} \end{pmatrix}$$

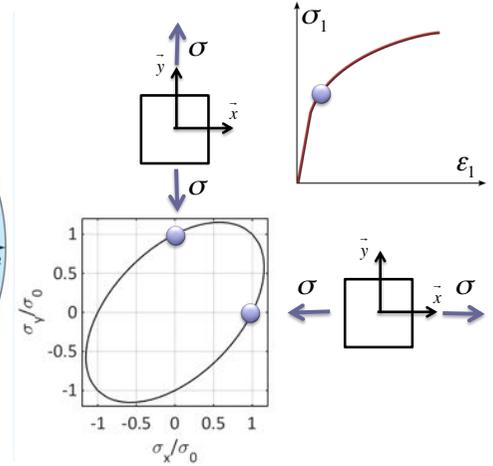
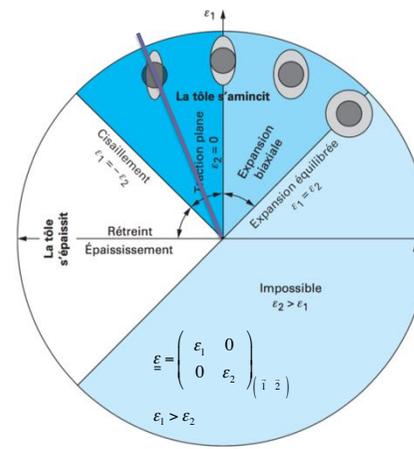
$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



GM-3-PROFA - Em

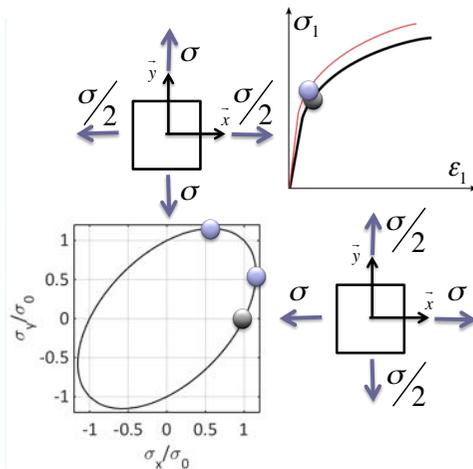
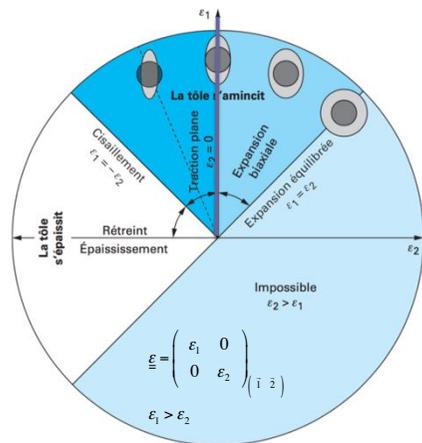
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

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



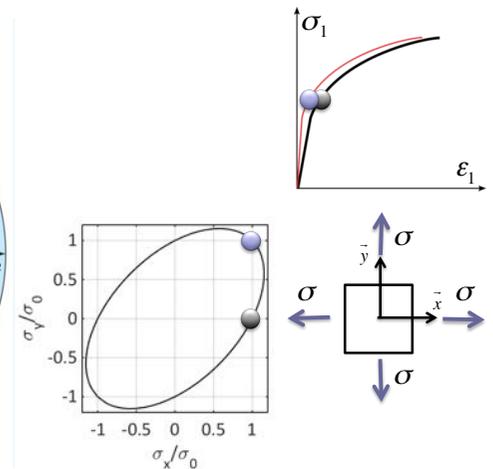
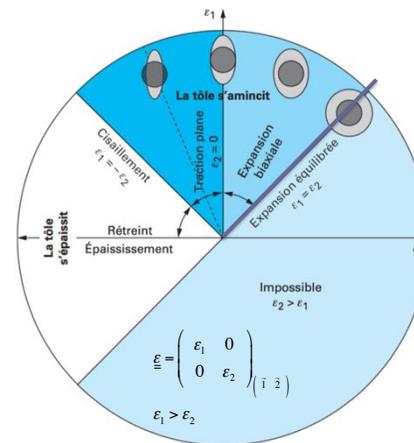
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

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



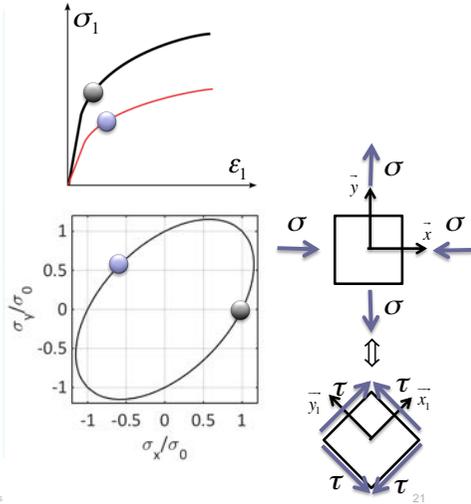
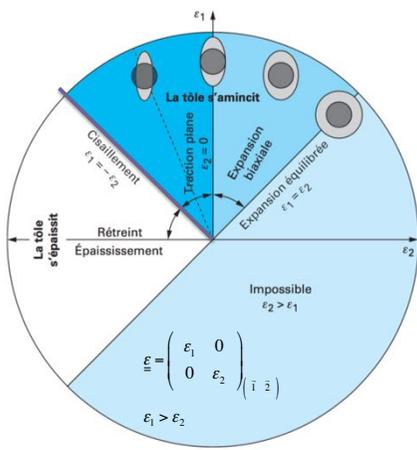
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

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



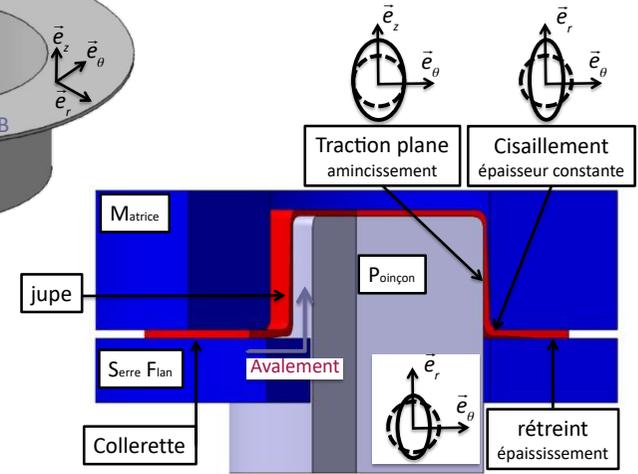
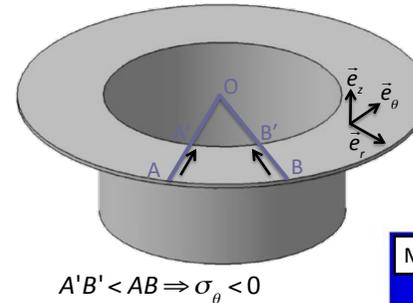
Procédé - Rappel et notions nouvelles de plasticité des métaux

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



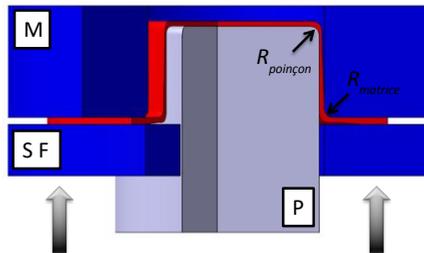
Trajet de déformation : Le rétreint

Cas du godet



Critère d'emboutissabilité en rétreint

Cas du godet



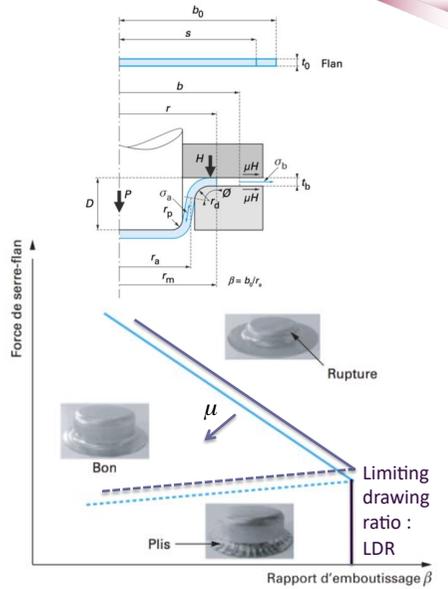
Force de Serre-flan

$$R_{matrixe} \uparrow \Rightarrow F_{presse} \downarrow$$

$$H_{godet} \uparrow$$

$$R_{poinçon} \uparrow \Rightarrow F_{presse} \leftarrow$$

$$H_{godet} \uparrow$$

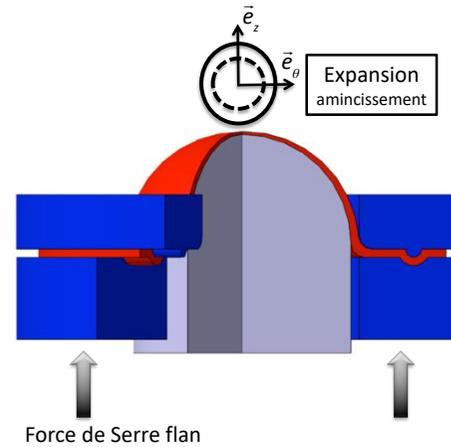


$$\beta = \frac{D_{flan}}{d_{poinçon}} = \frac{b_0}{r_a}$$

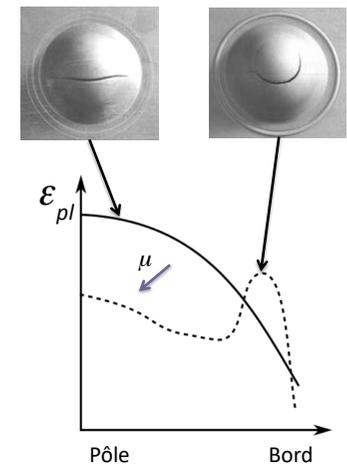
μ Coefficient de frottement

Trajet de déformation : L'expansion

Emboutissage sur poinçon hémisphérique

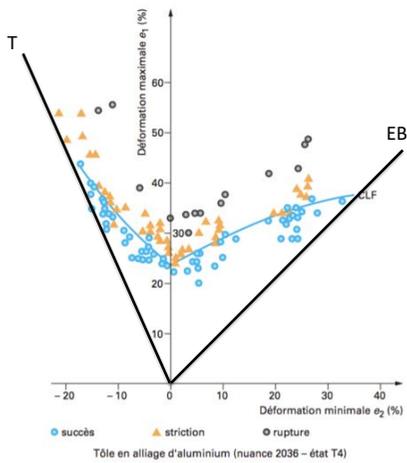


Force de Serre-flan



μ Coefficient de frottement / hétérogénéité de la lubrification

Critère d'emboutissabilité : Courbe limite de formage



Expansion équi-biaxiale EB



Traction uniaxiale T

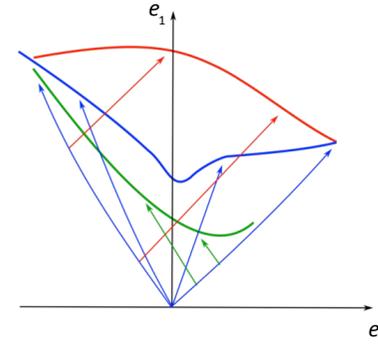
Méthode Nakajima

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 :

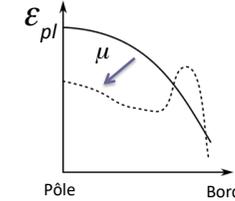
Chemin de déformation non radial :



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



Lubrification : représentativité des essais de laboratoire



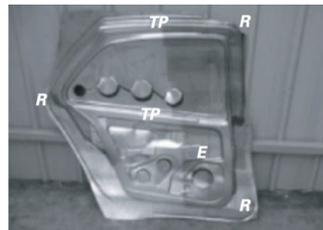
- Vieillessement du matériau (palier en début de domaine plastique)
- Découpe des bords des flans
- Répartition des déformations
- Variabilité des résultats ...

Trajet de déformation : Emboutis plus complexes

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



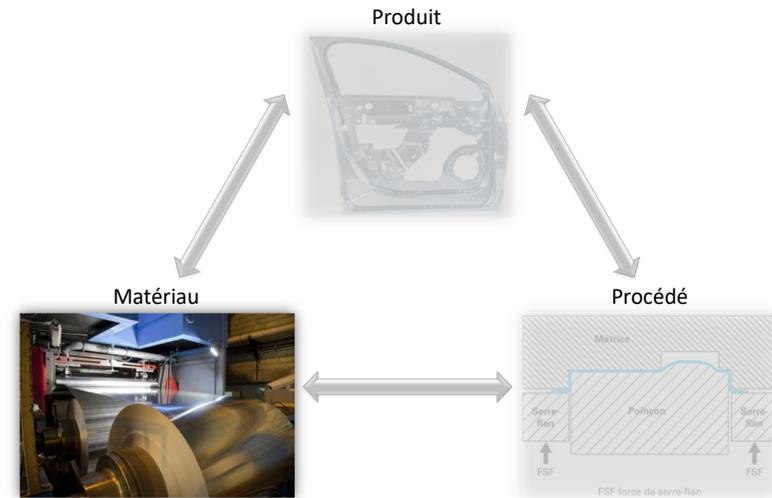
Carter d'huile pour poids lourds



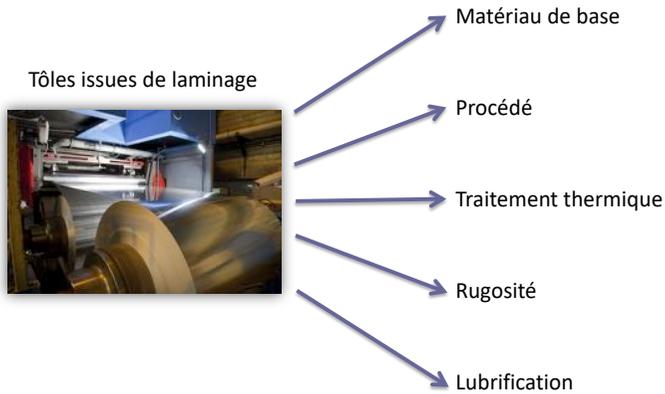
Caisson de porte d'automobile

- 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

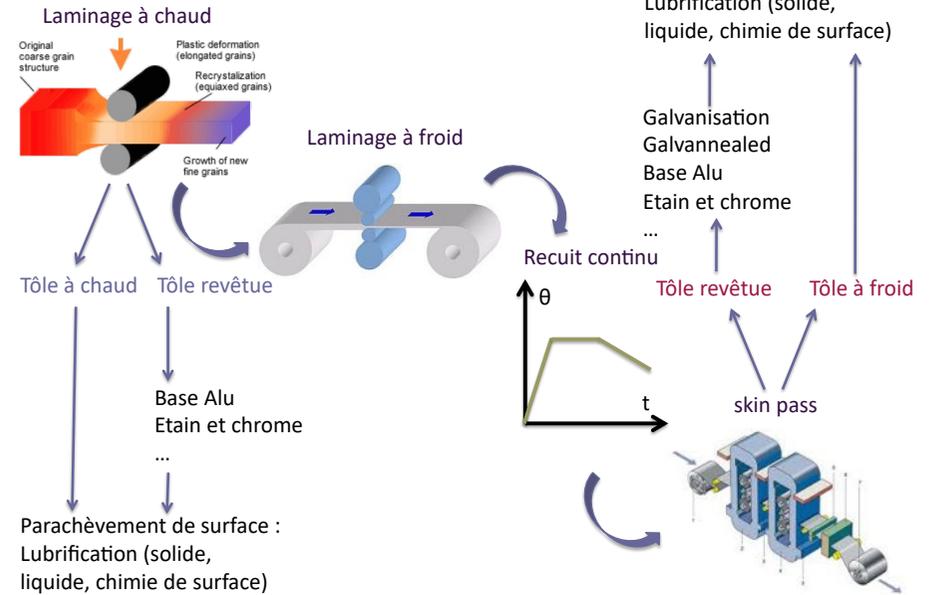
Emboutissage des métaux en feuilles



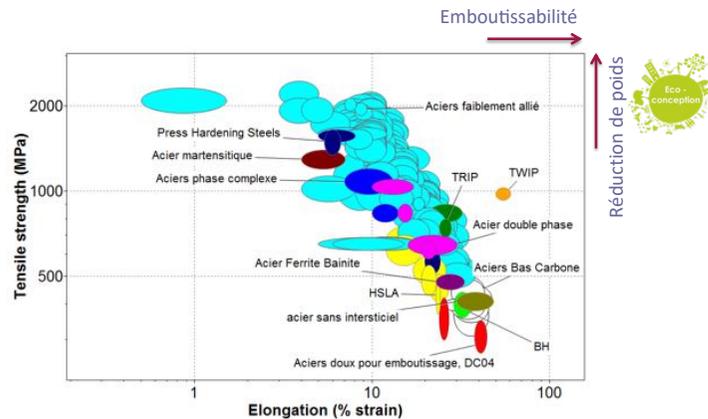
Matériau



Exemple de l'obtention de tôle en acier



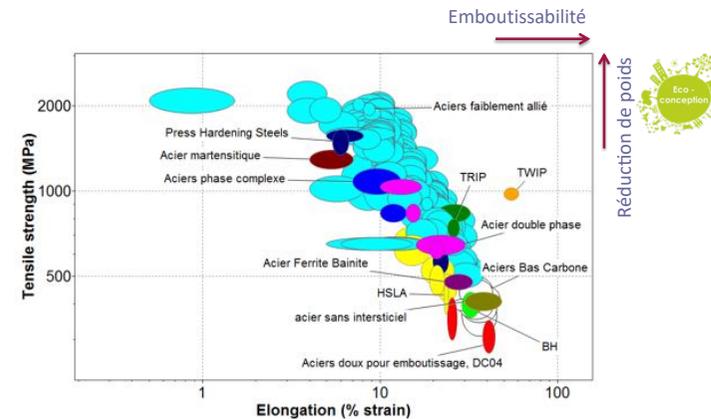
Aciers au carbone



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

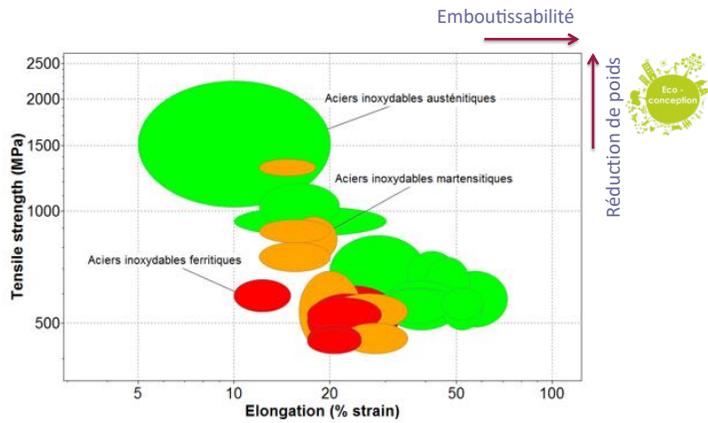


Tôle à froid : (épaisseur 0.35 à 3mm)

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 aux chocs), structure de siège, longeron...
 Acier phase complexe (C) -> Pièces de structure peu déformées lors de l'emboutissage
 Acier Twinning Induced plasticity (TWIP)

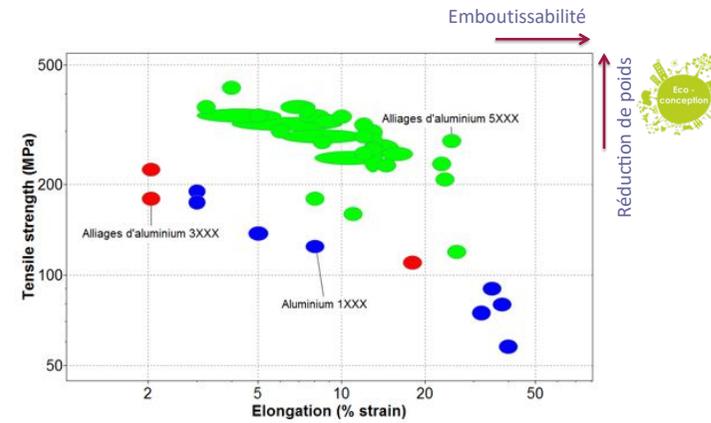
Aciers inoxydables



Aciers inoxydables martensitiques -> 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).

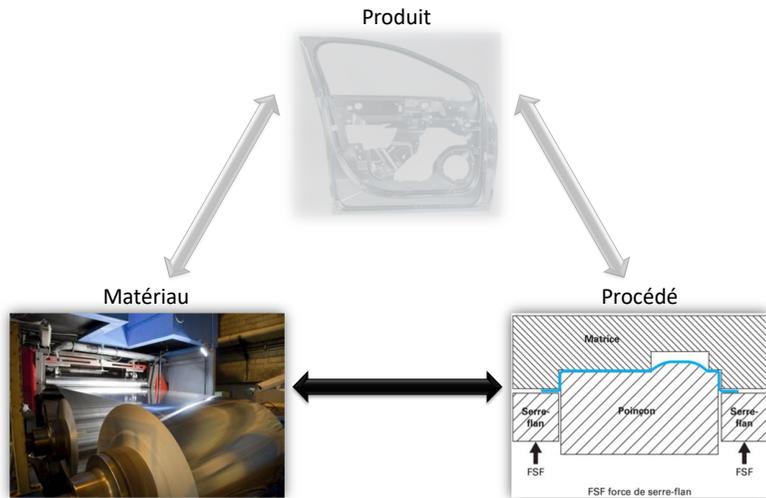
Alliages d'aluminium



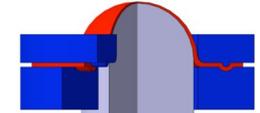
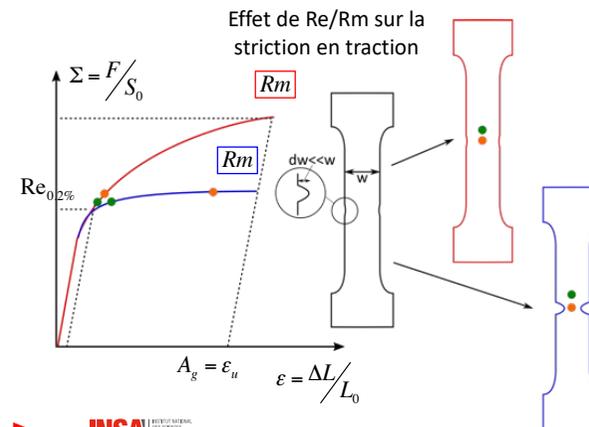
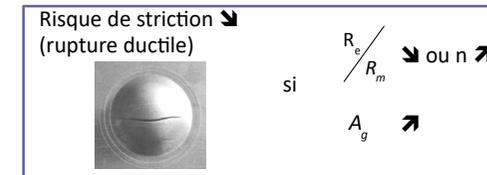
Aluminium pur (1XXX)-> formabilité limitée, ustensiles culinaires
 Alliages non durcissants (3XXX)-> formabilité limitée, ustensiles culinaires
 Alliages non durcissants (5XXX)-> meilleure formabilité, caisson de portes automobiles, éléments de structure
 Alliages d'aluminium pour emballage (3XXX, 5XXX)->capsules de bouteille, boîtes de boisson, plats jetables.

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

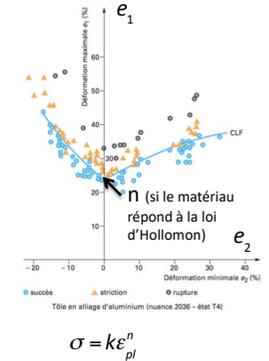
Emboutissabilité



Caractéristiques d'emboutissabilité en expansion des tôles

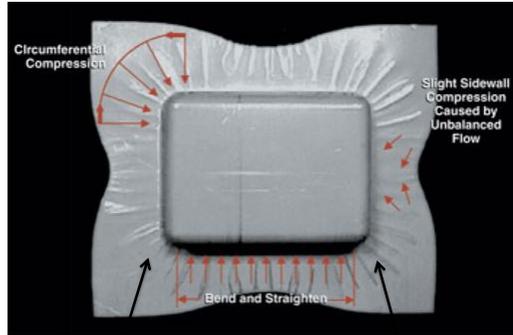


Effet de la consolidation n sur la CLF



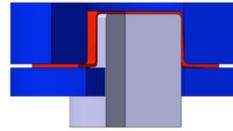
Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

Apparition de plissement si l'épaisseur t ↗

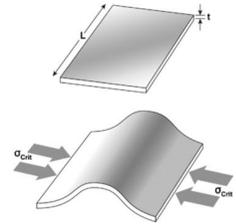


Plissement

Flèche inverse proportionnelle au cube de l'épaisseur



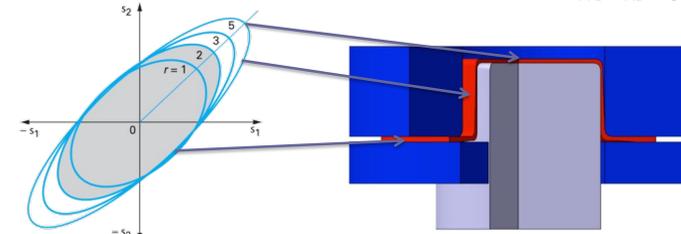
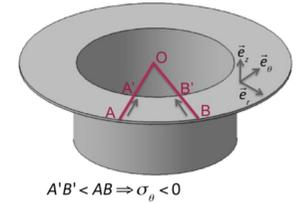
Flambage de tôle mince



Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

Apparition de plissement si r_{moyen} ↗ et si Re ↘

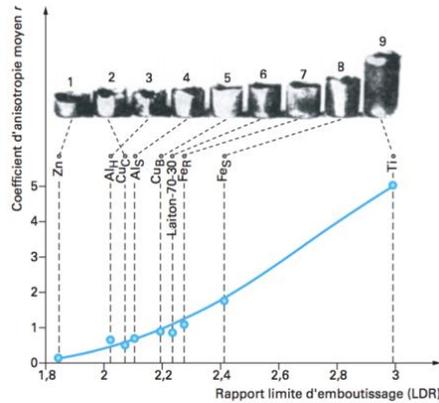
Le coefficient d'anisotropie r_{moyen} rend compte de la tendance du métal, au cours d'un essai de traction, à se déformer plutôt en largeur qu'en épaisseur. Le mode de déformation appelé rétreint impose précisément une diminution de largeur (circonférentielle) sous traction pour que le métal pénètre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



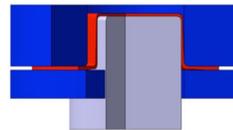
La contrainte nécessaire pour déformer la tôle en rétreint est plus faible comparativement aux autres modes de déformation quand r_{moy} augmente

Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

Apparition de plissement si r_{moyen} ↗ et si Re ↘

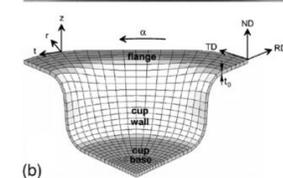
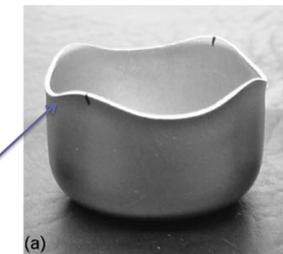
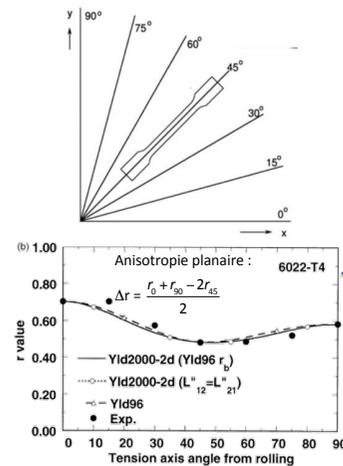


Al_H aluminium écroui
Al_S aluminium recuit
Cu_B, Cu_C deux qualité de cuivre
Fe_R acier effervescent
Fe_S acier calmé à l'aluminium



Caractéristiques d'emboutissabilité en rétreint des tôles

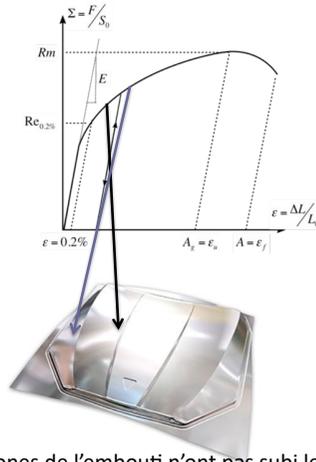
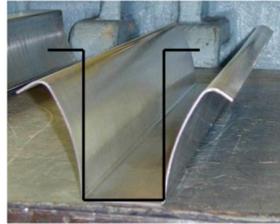
Apparition de cornes d'emboutissage si Δr ↘



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.



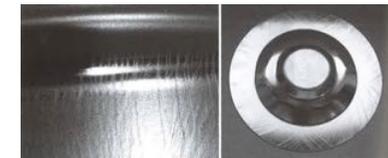
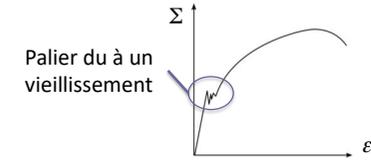
Si plusieurs zones de l'embouti n'ont pas subi le même taux de déformation lors de l'emboutissage. Lorsque l'on relâche l'effort d'emboutissage, le rééquilibrage des contraintes peut induire des zones comprimées qui ont tendance à voiler.

Caractéristiques d'emboutissabilité : Défauts de surface

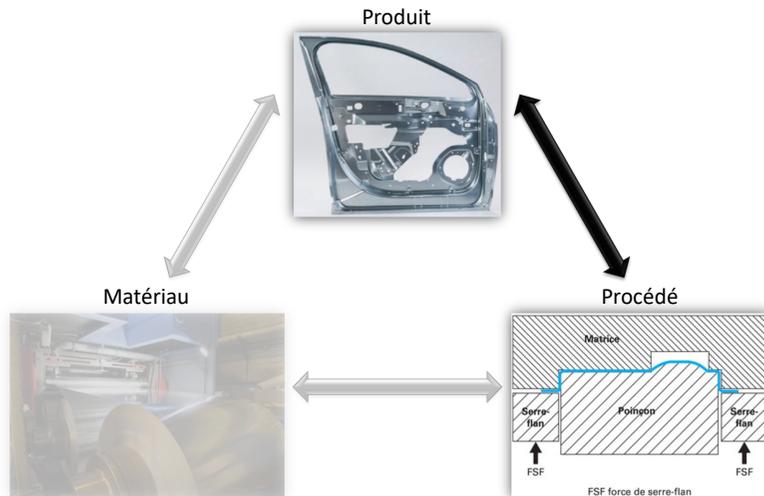
Peau d'orange : Induit par la présence d'une **taille de grain excessive (50-80µm)**, induit par une mauvaise gestion du cycle thermomécanique lors de l'élaboration de la tôle



Vermiculure : induit par un **vieillessement 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.

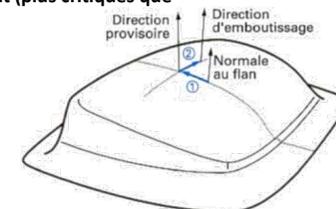


Relation produit - procédé

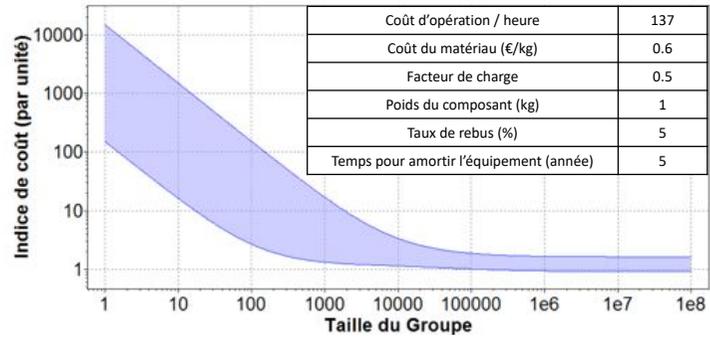


Influence du procédé sur les formes réalisables

- 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 - 12.5µm (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)	$10^4 - 10^6$

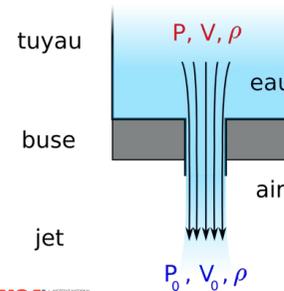
Découpe par jet d'eau

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique,
 $E_p = P + \rho gh$, $E_c = \frac{1}{2} \rho V^2$.

On applique le théorème de Bernoulli :

$$\frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho V^2 + P + \rho gh$$

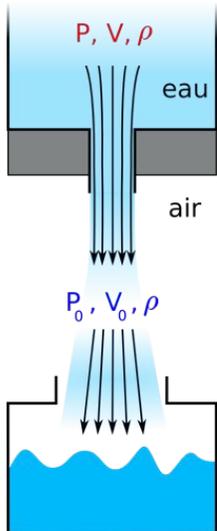


■ Vitesse du jet dans l'air

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

■ Pertes de charge $V_j = C_d V_0$
 avec $C_d \simeq 0,7$ coeff de décharge.

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE II



Puissance hydraulique $P_h = P Q$
 Débit d'eau $Q = V_j S$

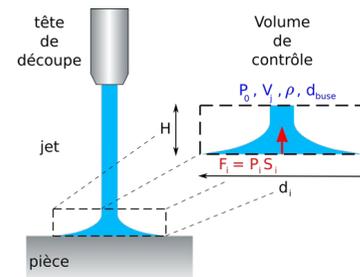
P=4000bars		
d_{buse} (mm)	Q (l.min ⁻¹)	P_h (kW)
0,15	0,66	4,4
0,33	3,22	21,4

Et si toute l'énergie du jet se transforme en chaleur

$$\frac{1}{2} \rho V_j^2 = \rho C_p \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{V_j^2}{2C_p}$$

ΔT est l'élévation de température de l'eau.
 $d_{buse} = 0,15mm$, $C_p = 4190J.kg^{-1}.K^{-1}$
 $\Rightarrow \Delta T = 50^\circ C$.

INTERACTION JET/MATIÈRE



On applique le théorème de Bernoulli au volume de contrôle :

$$\frac{1}{2} \rho V_j^2 + P_0 + \rho gh = \frac{1}{2} \rho V_{impact}^2 + P_i$$

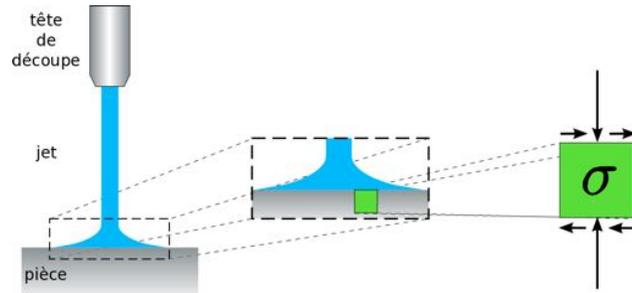
$$P_i \simeq P \Rightarrow F_i = \frac{1}{2} \rho V_j^2 S_i = \frac{\pi}{4} C_d^2 P d_i^2$$

$P = 4000bars$, $d_{buse} = 0,15mm$, $d_i = 0,5mm$, $C_d = 0,7$
 $\Rightarrow F_i = 39N$. Soit une énergie spécifique $E_s (= P_i = C_d^2 P)$

$$E_s = 0,2J.mm^{-3}$$

A comparer à l'usinage d'un acier $E_s = 2$ à $3J.mm^{-3}$

ETAT DE CONTRAINTES ET ENLÈVEMENT DE MATIÈRE

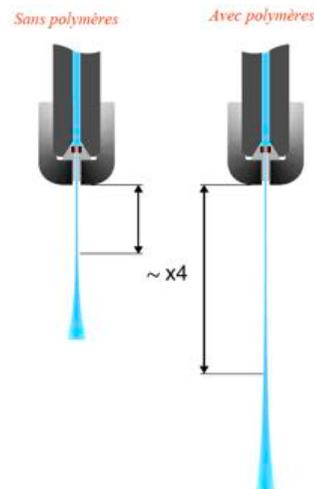


- Le matériau est soumis à un champ de contraintes complexes (compression + cisaillement).
- Enlèvement de matière par **décohésion** et **fissuration**.
- Jet fixe/pièce ⇒ **perçage**, jet mobile/pièce ⇒ **découpe**.

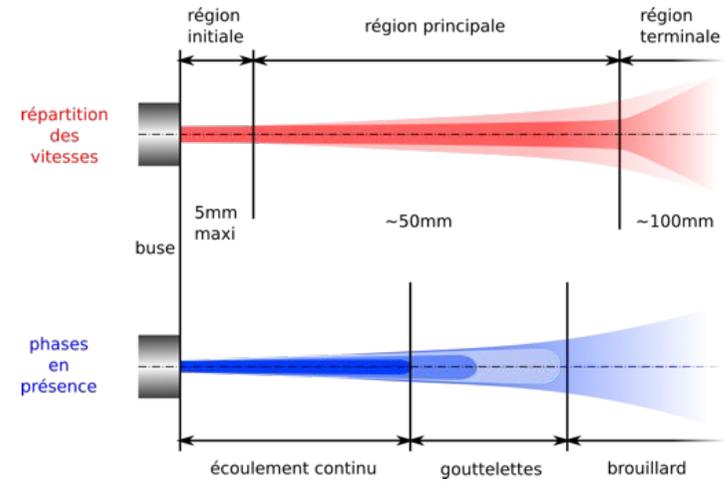
AJOUT DE POLYMÈRES (MACROMOLÉCULES)

Augmentation de la tension superficielle du fluide :

- diminution de l'humidité résiduelle des pièces découpées,
- augmentation de la longueur de cohérence du jet (divergence plus tardive).



STRUCTURE DU JET

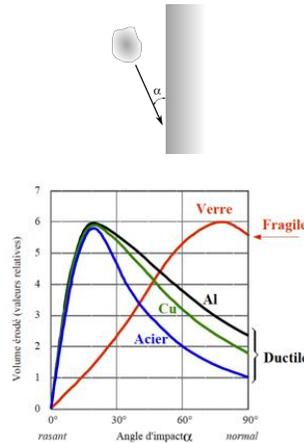


AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ

- Avec de l'eau pure l'énergie spécifique est limitée à $E_s = 0.1 \text{ à } 1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$, c'est à dire aux matériaux tendres.
- L'idée est d'ajouter à l'action directe du fluide l'impact de **particules dures** : des grains de matériau **abrasif**.
- Le jet fluide passe du rôle d'outil à celui de **vecteur des grains**.
- La vitesse d'impact est la vitesse du fluide.
- Le mode d'enlèvement de matière change.

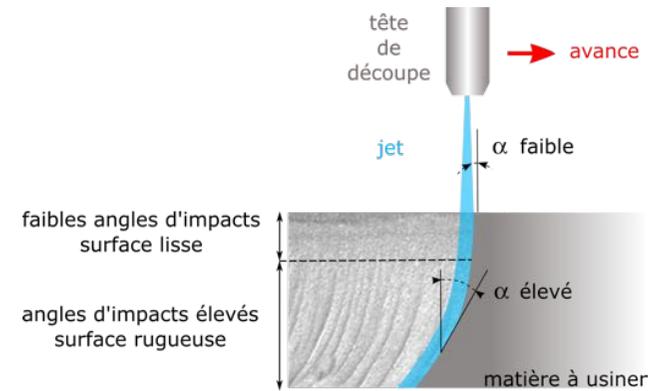
ENLÈVEMENT DE MATIÈRE

- Angle d'impact faible : **abrasion**.
Collision particules/cible ⇒ formation de copeaux.
- Angle d'impact élevé : **érosion**.
 - 1 matériaux ductiles : collision ⇒ plastification ⇒ écoulement ⇒ fatigue (grand nb de cycles) ⇒ rupture
 - 2 matériaux fragiles : collision ⇒ fissuration ⇒ rupture.



- Le caractère ductile/fragile du matériau est dominant.

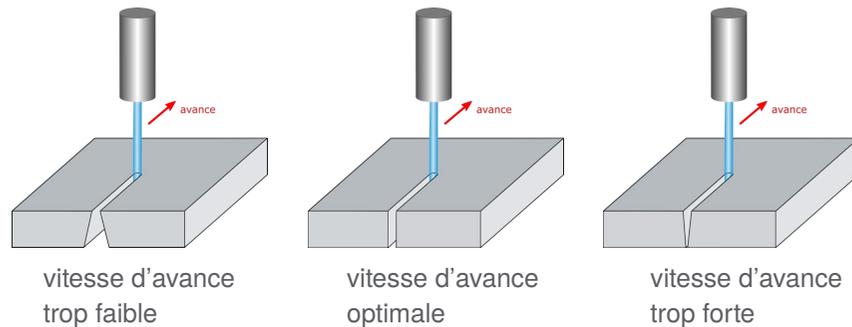
ABRASION LORS DE LA DÉCOUPE



Remarque : la pression hydrodynamique du fluide porteur est très faible devant les contraintes mécaniques générées par les particules abrasives.

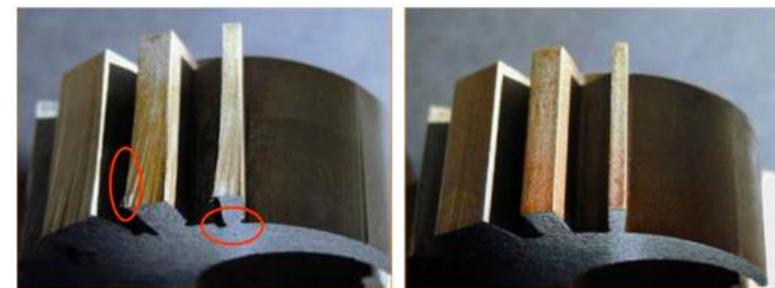
ÉTAT DE LA SURFACE DÉCOUPEE

- 1 Défauts micro-géométriques
 - rugosités : arrachement, micro-usinage, etc...
 - ondulations (instabilités du jet)
- 2 Défauts macro-géométriques
 - dépouille dans le plan orthogonal à la vitesse d'avance

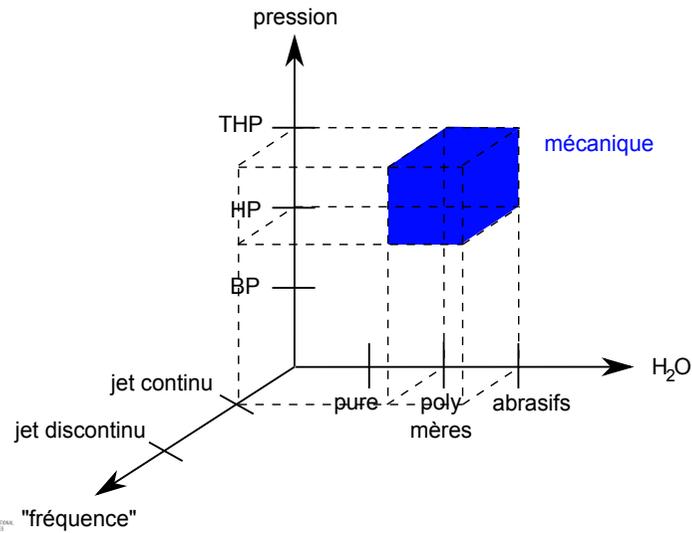


ÉTAT DE LA SURFACE DÉCOUPEE II

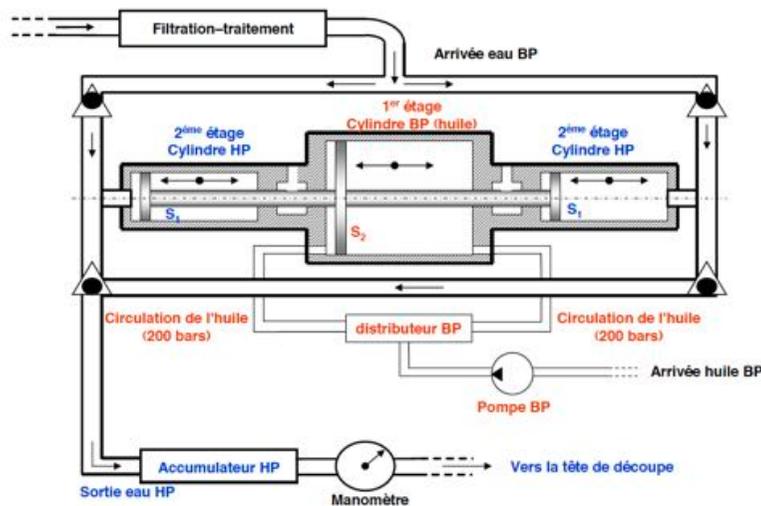
- 2 Défauts macro-géométriques
 - retards à la coupe intérieur et extérieur



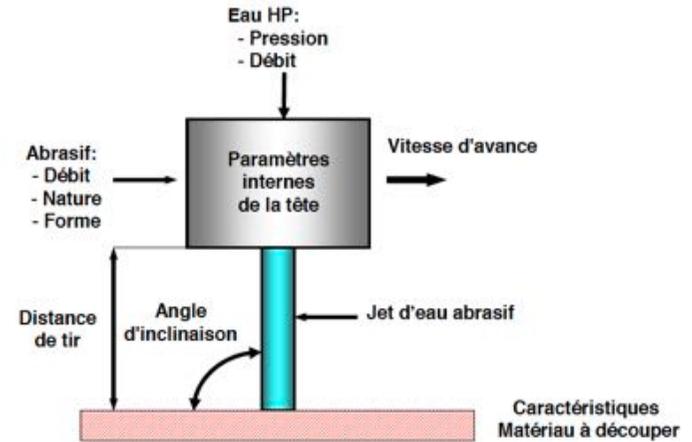
CLASSIFICATION DES APPLICATIONS



CIRCUIT HAUTE PRESSION



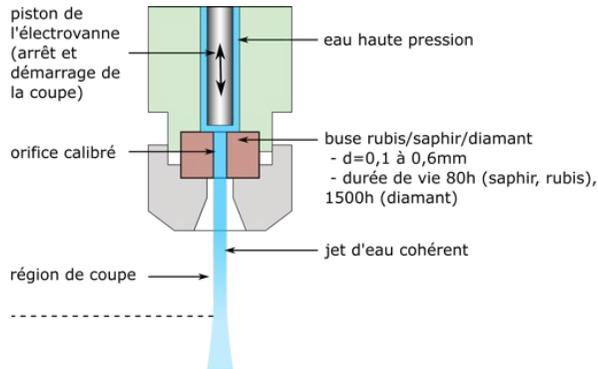
PARAMÈTRES DE DÉCOUPE



TRANSPORT DU FLUIDE

- 1 Tuyaux flexibles, pour applications jusqu'à 2400bars (nettoyage, hydrodémolition, etc...)
 - tube intérieur en matière synthétique,
 - succession d'enroulements en fibres synthétiques,
 - revêtement final en caoutchouc ou plastique.
- 2 Tuyaux rigides pour applications à 4000bars et plus (découpe)
 - acier inoxydable à haut résistance mécanique $R_m \geq 1100MPa$,
 - diamètre extérieur de 10 à 15mm, épaisseur de 3 à 5mm.

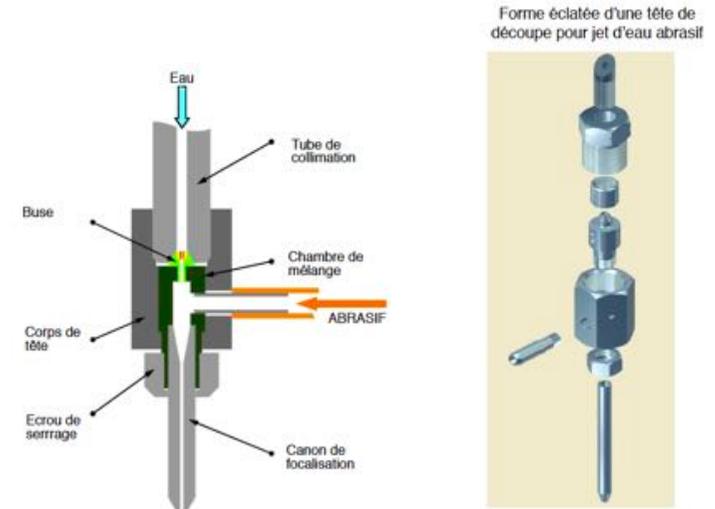
BUSE



Caractéristiques du matériau de la buse :

- permet la formation d'un jet focalisé,
- mise en marche et arrêt du jet instantanée (résistance aux ondes de choc).

TÊTE DE DÉCOUPE À CHAMBRE DE MÉLANGE



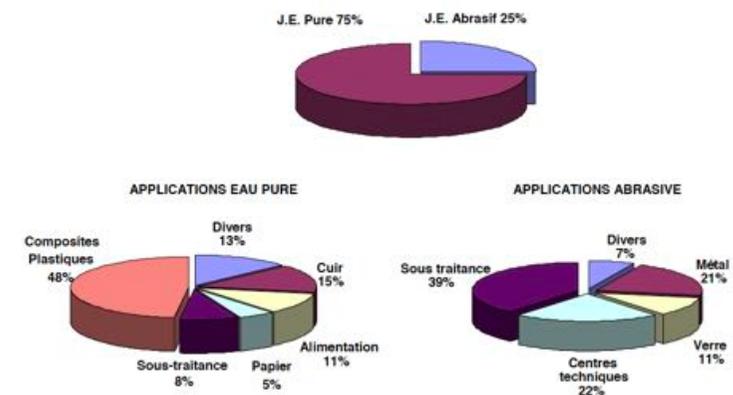
PARTICULES ABRASIVES

Les critères de choix sont :

- caractéristiques abrasifs,
- non agressif vis à vis de la chambre de mélange,
- non nocif à la santé,
- etc...

Nature	Dureté (échelle de Mohs)
Laitiers de silicate	6 à 7
Olivine	7
Grenat	10
Oxyde de zirconium	11
Carbure de tungstène	11
Alumine	12
Carbure de silicium	13
Carbure de bore	14
Diamant	15

RÉPARTITION DES APPLICATIONS



AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

- applications diverses et grande adaptabilité,
 - découpe de (presque) tous les matériaux,
 - pièces finies, sans opérations supplémentaires,
 - pas de Zone Affectée Thermiquement,
 - pas de contraintes mécaniques ou de micro-fissures,
 - grande précision, y compris sur les fortes épaisseurs,
 - un seul outil pour tous les matériaux,
 - un seul outil pour toutes les opérations (découpe, perçage, contournage).
- procédé bruyant,
 - traitement des déchets (boues d'abrasif),
 - correction des défauts délicate sur fortes épaisseurs.

DÉCOUPE 2D ABRASIVE

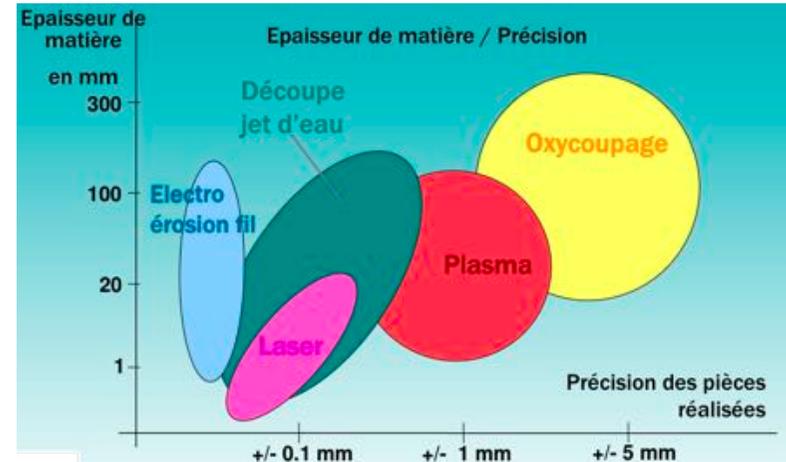
Exemples de vitesses de découpe en mm/min

Matériaux Epaisseur	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	50 mm	100 mm
Acier rapide	678	370	236	169	128	102	48	18
Acier inoxydable 304	883	454	290	208	159	125	60	22
Titane	1083	590	377	270	206	163	78	28
Aluminium	2250	1226	782	561	427	339	162	59
Granite (Mohogany)	2974	1621	1035	741	565	448	214	78
Composites Fibres de Carbone	3915	2135	1363	975	744	590	281	103
Verre	4315	2352	1502	1075	820	650	310	113
Marbre	4672	2547	1626	1164	888	704	336	123
Plexiglas	4904	2674	1707	1222	932	739	352	129
Composites fibre de Verre	5948	3243	2070	1482	1131	896	427	156
Kevlar	6195	3378	2156	1543	1178	934	445	163
Graphite	8087	4409	2815	2015	1538	1219	581	213
Carreau de céramique	8869	4835	3087	2210	1686	1337	637	233

Ces valeurs représentent la vitesse de séparation maximale et sont obtenues en travaillant à 4100 bar, 3,7 l/min, et 580 g/min d'abrasif (FLOW PASERplus Garnet, mesh 80). Pour une découpe d'ébauche, comptez 80% de ces valeurs et 40% pour une découpe de qualité. Ces valeurs sont théoriques et non contractuelles.

D'après FlowEurope.

PRÉCISION DU PROCÉDÉ

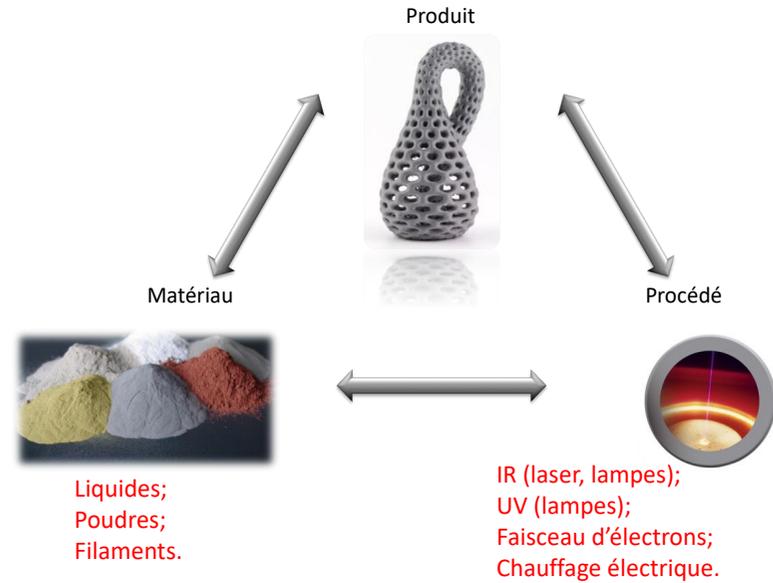


DÉCOUPE 2D : MÉTAUX



Fabrication additive

Fabrication Additive

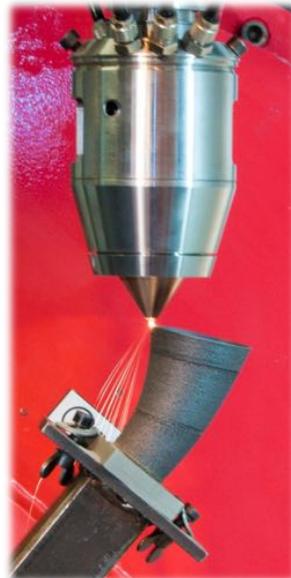
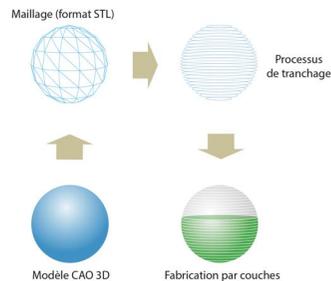


Le principe

Moyens de fabrication par addition de matière et sans rupture de la chaîne numérique.

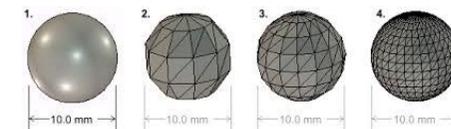
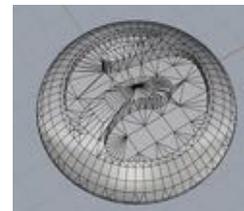
L'addition de matière passe en général par un changement d'état de celle-ci.

La matière est déposée couche par couche.

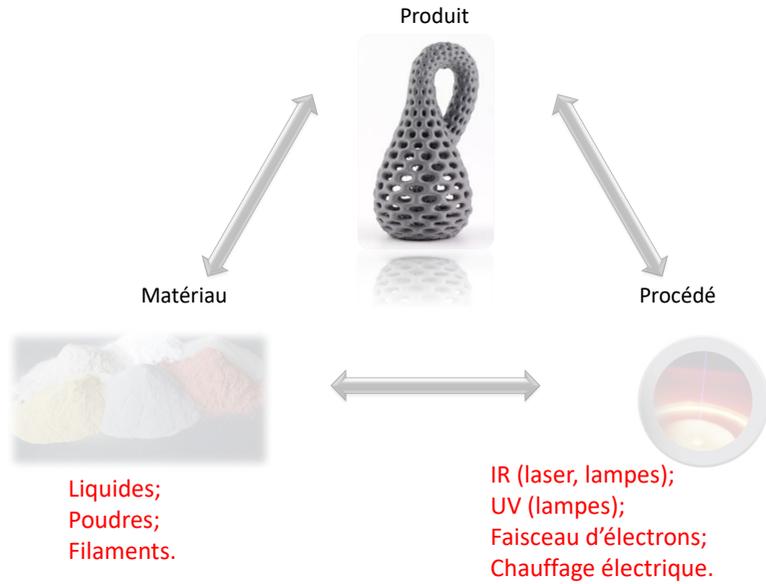


Notion de format STL

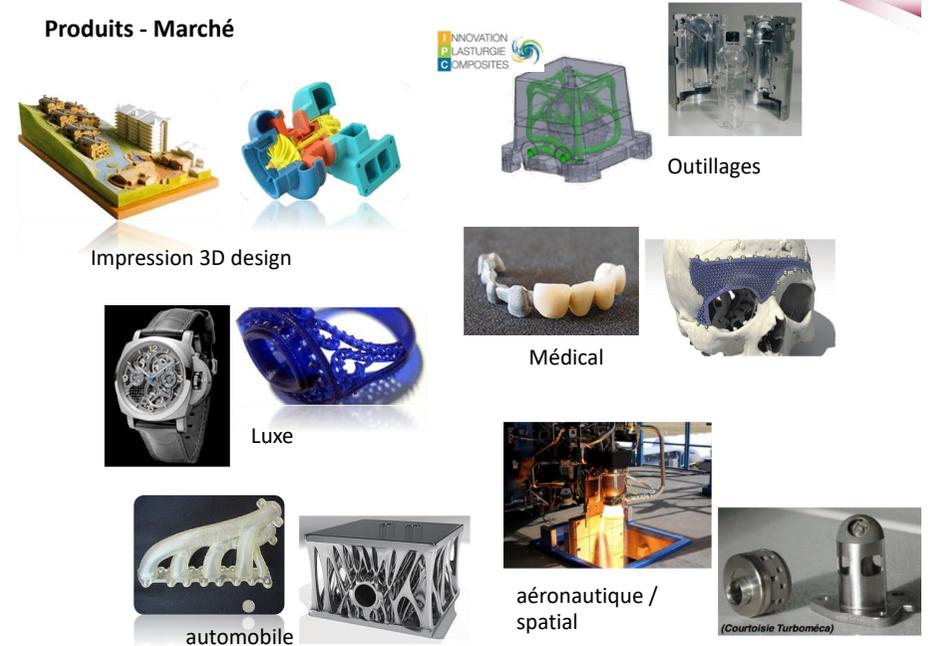
- Stereolithography Tessellation language ou Standard Tessellation Language
- Surface en triangles orientés;
- Simple, tous logiciels CAO;
- Approximation;
- Erreurs possibles : surface non fermée, intersection de triangle...
- Erreur de corde;
- Autres formats VRML Virtual reality Modeling Language ou AMF (triangle curviligne) et bien d'autres...



Fabrication Additive



Produits - Marché



Données économiques

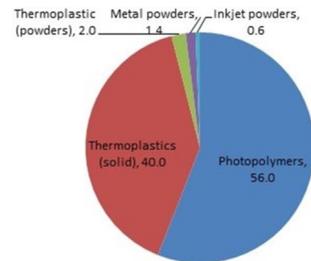
Marché en très forte croissance
+25% de CA /an depuis 2010

Année	Chiffre d'Affaires (M\$)
2001	538
2014	5700
2018	12 700

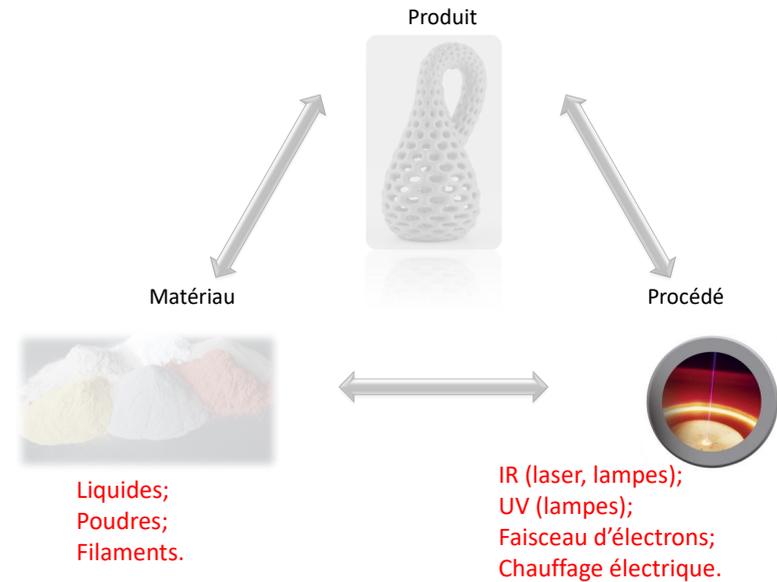
Domaines d'activités:
Dentaire, l'horlogerie;
L'automobile;
Le particulier;
.....L'aéronautique.

Procédé de prototypage

Procédé de fabrication directe



Fabrication Additive



Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

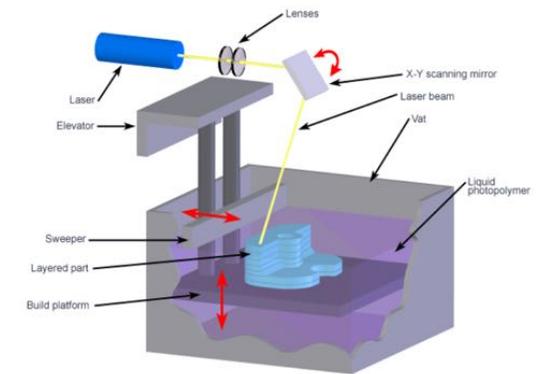
- Polymérisation résine par laser
- Projection de gouttes de matériau
- Projection liant sur un substrat
- Solidification de poudre sous source d'énergie moyenne à forte puissance
- Projection de poudre dans un flux d'énergie
- Extrusion de matière
- Assemblages de couches à partir de feuilles, plaques

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Polymérisation résine par laser

SLA : Stéréolithographie



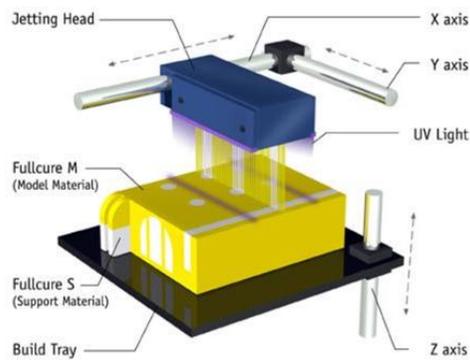
Copyright © 2008 CustomPartNet

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection de gouttes de matériau

exemple : Projet 3510HD au labo de fabrication additive de l'INSA de Lyon



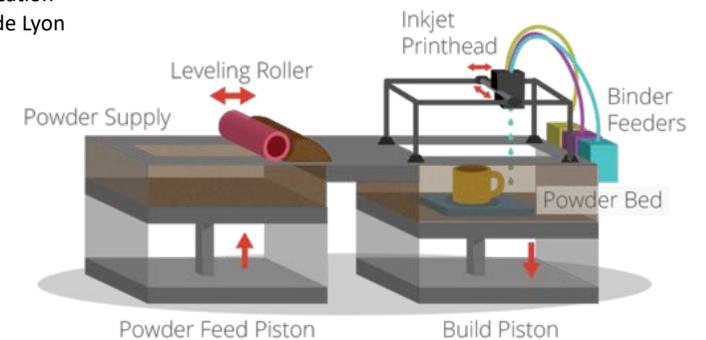
The Objet PolyJet Process

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection liant sur un substrat

exemple : Zcorp... dans le laboratoire de fabrication additive de l'INSA de Lyon



Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Solidification de poudre sous source d'énergie moyenne à forte puissance

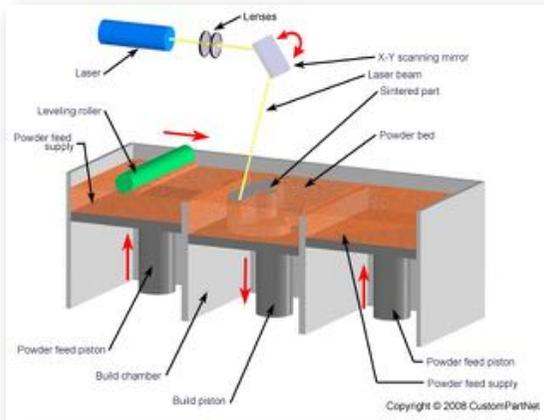
Laser faible puissance :
SLS : selective laser sintering



Laser haute puissance :
SLM : selective laser melting



Faisceau d'électron :
EBM : Electron beam melting

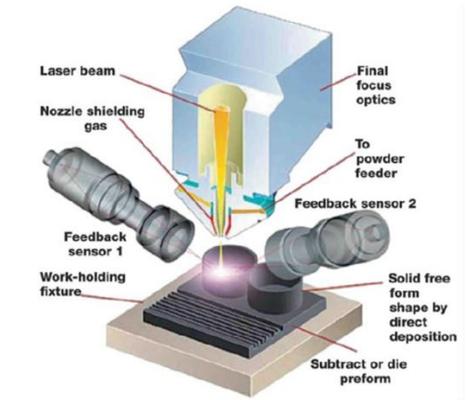


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection de poudre dans un flux d'énergie

exemple : BeAM développé en France

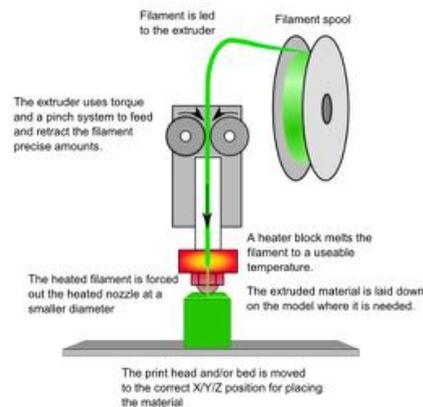


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Extrusion de matière

exemple : Fusion de fil à travers une buse chauffante, procédé FDM
Fortus ...
TP de fabrication additive

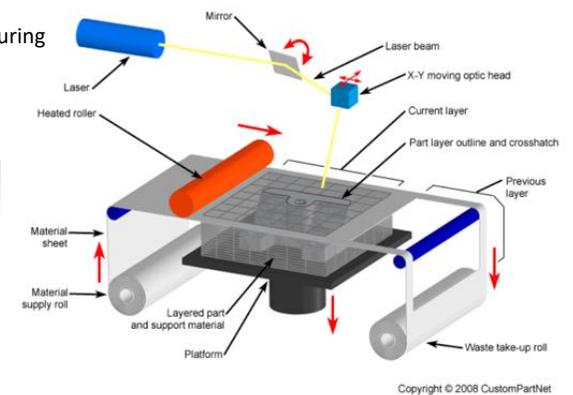


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Assemblages de couches à partir de feuilles, plaques

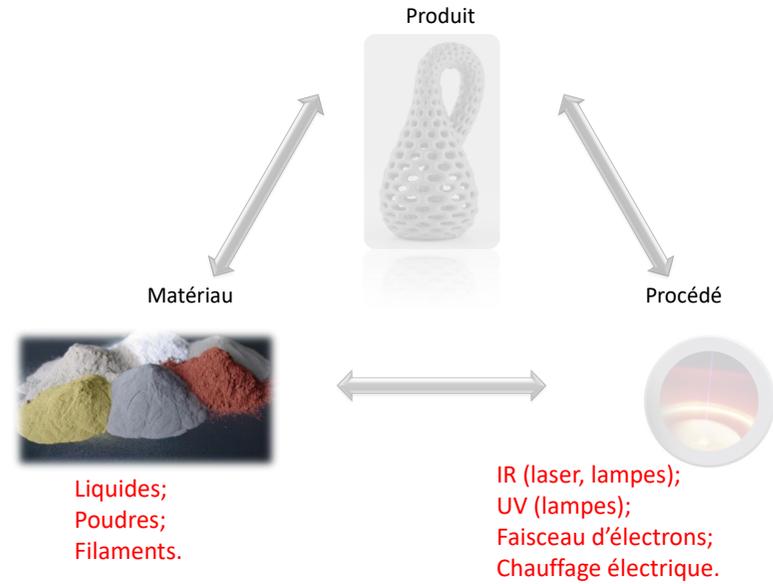
Procédé LOM :
Laminated Object manufacturing



Machines disponibles au labo de fabrication additive de GM

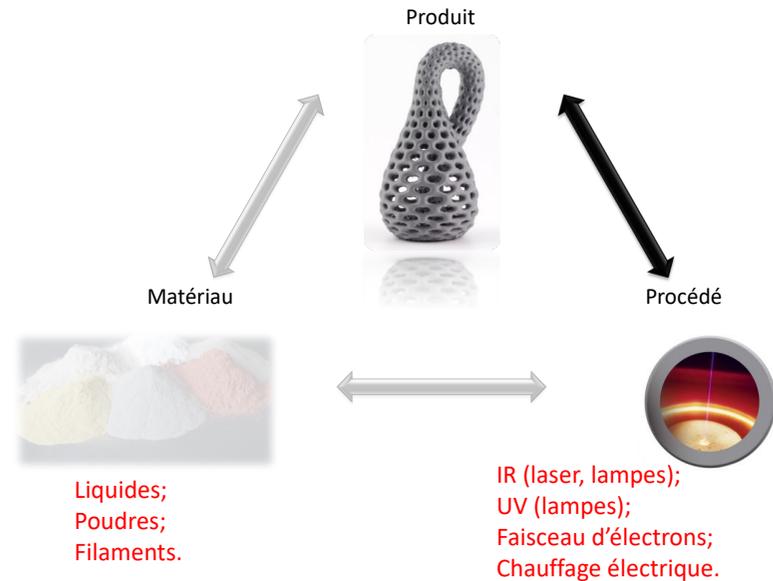
	ZCORP	3D TOUCH	DOOD	UP MINI	FORTUS	FORMLAB	PROJET
	Projection Usat sur substrat	Mixte matériaux plastiques	FDM	Résinée enseignement	FDM	SLA	Multijet printing
Technologie	---	---	---	---	---	---	---
Précision	---	---	---	---	---	---	---
résistance	---	---	---	---	---	---	---
coût	---	---	---	---	---	---	---
Épaisseur des couches (µm)	100	250	25	150	178, 254, 333	25, 50, 100	16, 29 ou 33
Cote X Y Z max (mm)	203x254x203		220 x 190 x 200	120x120x120	254x254x333	145x145x178	298x165x203 en HD 127x178x152 en XHD
Précision pour 100mm	0.3 mm	0.2 mm	0.1	0.2mm	0, 18mm	0.14 mm	0.08 mm
Matériau de base	Filétre infitré cyanoacrylate	PLA ou ABS	PLA, ABS, semi flex, flex	ABS	ABS	CLAR, FLEX	Haute résistance
E (Mpa)	Pièce non fonctionnelle	Non fournis par les fabricants	Non fournis par les fabricants	Non fournis par les fabricants	2320	Siéline transparente Shore A	Proche d'un ABS injecté
ar (Mpa)	Vecteur de communication				37	80	42.4
A%	18000 couleurs				3		4.8
support	Sans support	Enlèvement mécanique	Enlèvement mécanique	Enlèvement mécanique	Soluble dans le water	Enlèvement mécanique	Cire à fondre
Filices types							
Machines							

Fabrication Additive



Matériau	Exemple	Type de procédé suivant norme ISO 17296						
		SLA	Projection de goutte	Projection de liant	SLS, SLM, EBM	Projection de poudre dans un flux d'énergie	Extrusion de matière	Assemblage de couches laminées
Résines thermodurcis sables	Epoxies Acrylates	X	X					
Résines thermoplastiques	Polyamide, ABS, PPSF		X	X	X		X	X
Bois	Papier							X
Métaux	Acier, Alliages de titane, cobalt, chrome nickel			X	X	X		X
Céramiques industrielles	Alumine, Zircone, Silicone	X		X	X			X
Céramique structurelle	Ciment, sable			X	X		X	

Fabrication Additive



Relation produit procédé

La fabrication additive est très attractive mais elle ne supplantera jamais les procédés conventionnels. Elle leur est complémentaire pour les produits/applications présentant les caractéristiques suivantes :

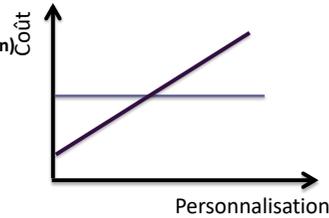
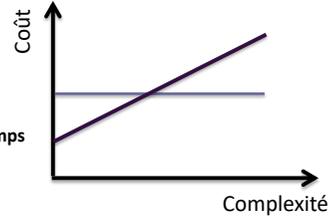
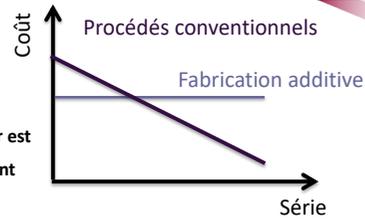
- **Complexité des formes réalisables**

- Réduction des assemblages
- Possibilité de réaliser des canaux internes complexes
- Allègement des structures

- **Pas d'outillage spécifique / Evolution intégrée en temps réel**

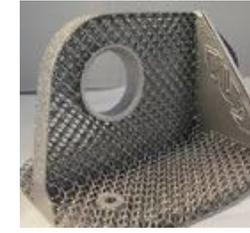
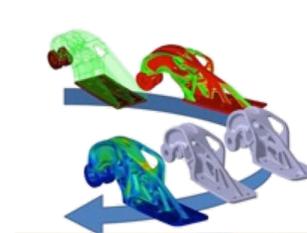
- Personnalisation
- Service après-vente (0 stock)

- **Possibilité de fonctionnaliser les surfaces (texturation)**



Relation produit-procédé : Repenser la conception DFAM : Design for additive manufacturing

- La fabrication additive repousse les potentialités de conception des produits

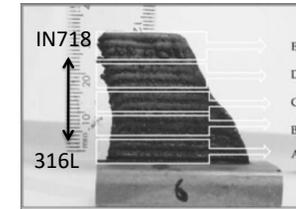


Structure architecturée

Structure FGM
Gradient de mélange
métallurgique



Structure bio inspirée



Relation produit-procédé - Outil d'optimisation topologique



Relation produit-procédé - Exemple de reconception réussie

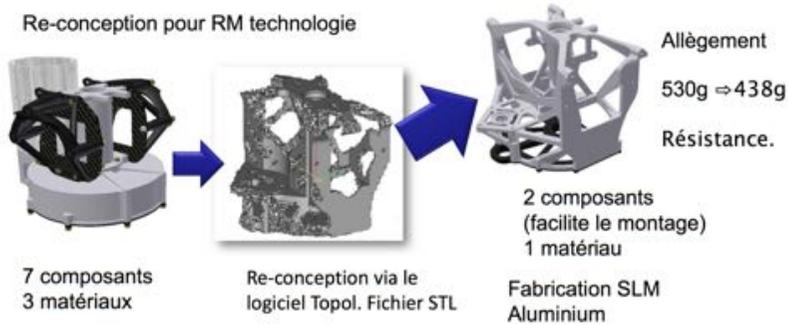


Gains:
De poids sur l'ensemble 20%,
Facilité de montage,
Diminution du nombre de composants,
Economie de 15%.

Relation produit-procédé - Exemple de reconception réussie

- Définitions des contraintes mécaniques par Flying Cam Application
- Re-conception spécifique du châssis (Logiciel Topol) par Sirris Topologie
- Fabrication du châssis en Aluminium MB Proto Matière/ Géométrie

Re-conception pour RM technologie



Relation produit procédé : Contraintes de conception

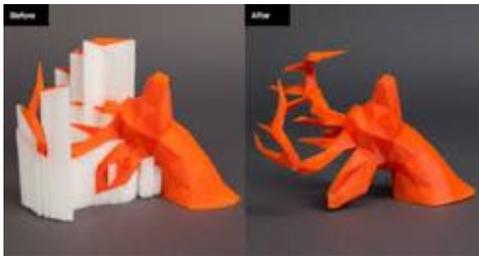
- Si les potentiels de conception sont énormes, il reste quelques contraintes de conception à prendre en compte. Ces contraintes dépendent du procédé mis en jeu :

Précision et état de surface souvent médiocres

Nécessité de parachèvement à optimiser et potentiellement à réaliser manuellement

Présence de supports pour certaines technologies

Relation produit procédé : Notion de support



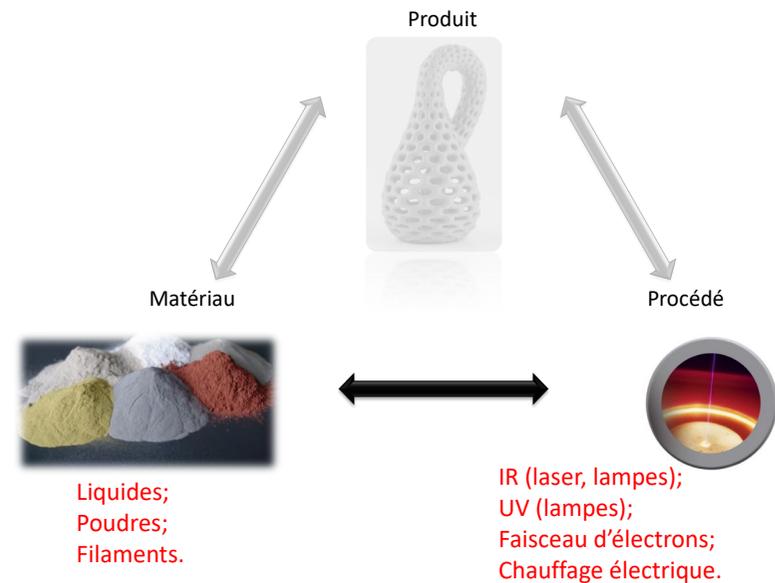
• Rôle :

- Ils supportent les surfaces en contre-dépouille ou en porte à faux
- Ils préviennent d'une déformation de la pièce lors du process.
- Ils dissipent la chaleur.
- Ils constituent un support provisoire à une pièce en construction, qui serait rigide finie mais fragile pendant le process.

• A prendre en compte :

- dépend de l'orientation de la pièce dans la zone de fabrication
- Enlèvement mécanique et/ou chimique
- Ne concerne pas tous les procédés**

Fabrication Additive



Relation matériau procédé

- L'ajout de matière passe en général par un changement de phase qui a lieu localement au point d'impression et donc de façon inhomogène sur la pièce. Ainsi bien que fortement procédé dépendantes, les caractéristiques des pièces issues de fabrication additive sont les suivantes :

Forte Anisotropie liée à la stratégie de fabrication

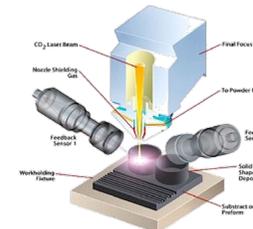
Perte de ductilité par rapport au matériau de base (intercouches faibles)

Présence de contraintes internes (déformation / Risque en fatigue)

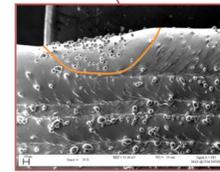
Présence de défauts de type porosité/délamination

Relation matériau procédé

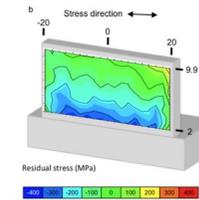
- Exemple de caractéristiques de pièces brutes de Projection sous flux dirigé :



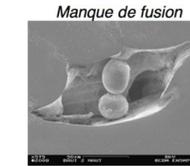
Procédé DED



Fusion locale de poudre sur substrat

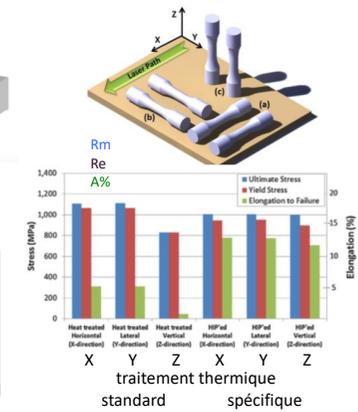


contraintes résiduelles



porosité

Essais de traction

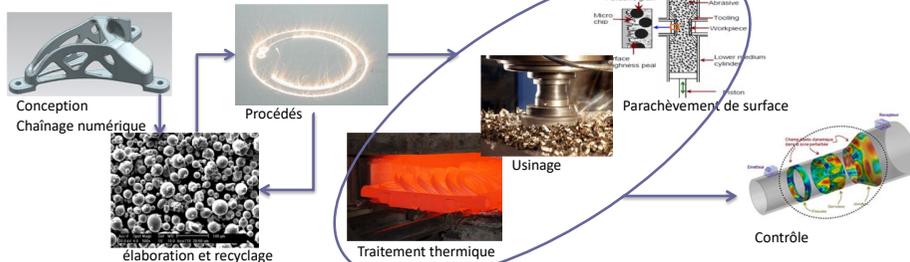


Fabrication Additive : Bilan

Bilan :

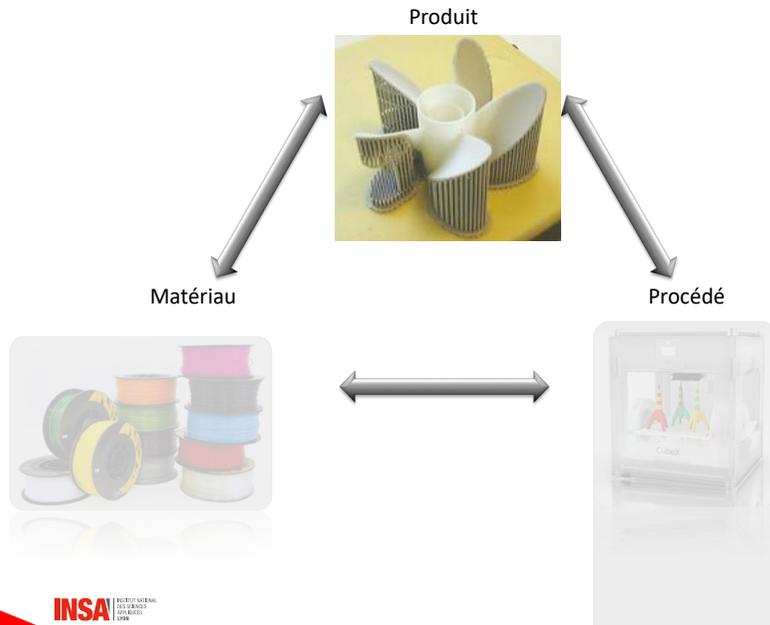
- +** Révolution en terme de forme réalisable
- Agilité du procédé
- Production lente
- Qualité dimensionnelle et état de surface
- Procédés jeunes : manque de certification de toute la chaîne de valeur des procédés pour application à des pièces de structure.

Exemple de chaîne de valeur associée au SLM :



Procédé FDM : Fused deposition modeling

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



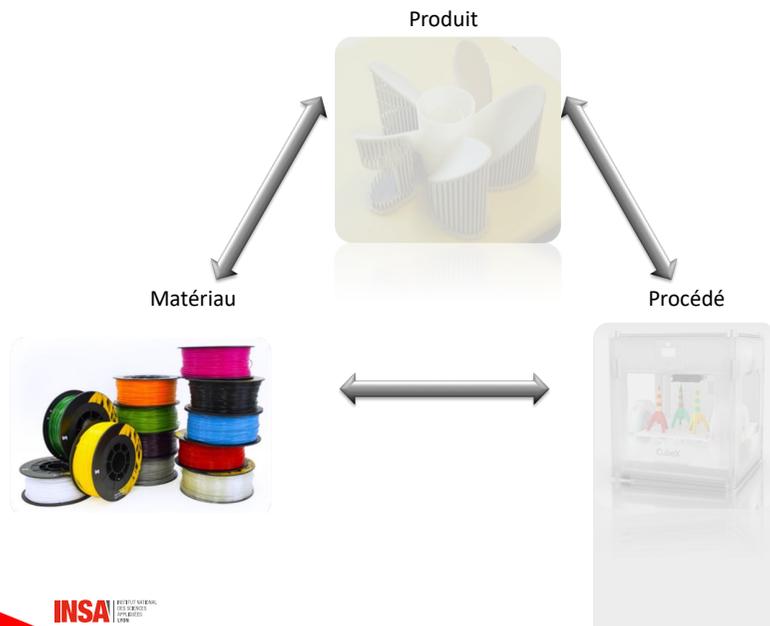
34

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



35

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



36

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Les plus courants :

- **ABS** acrylonitrile butadiène styrène, thermoplastique, chimie du carbone
- **PLA** acide polylactique, thermoplastique bio sourcé (amidon maïs)
- Les possibles : PC, PS, nylon, PPSF, ULTEM
- Et d'autres...

37

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

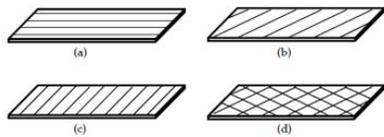
Données fournies par STRATASYS

ABS acrylonitrile butadiène styrène
FDM E 2300 Mpa, σ_r 35 Mpa, A% 3

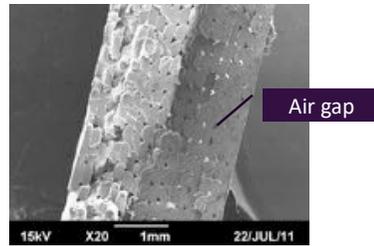
ULTEM polyéthirémide
FDM E 2200 Mpa, σ_r 70 Mpa, A% 6

Attention!

Dépend du type de remplissage, de l'orientation de dépose
Essai d'orientation sur ABS

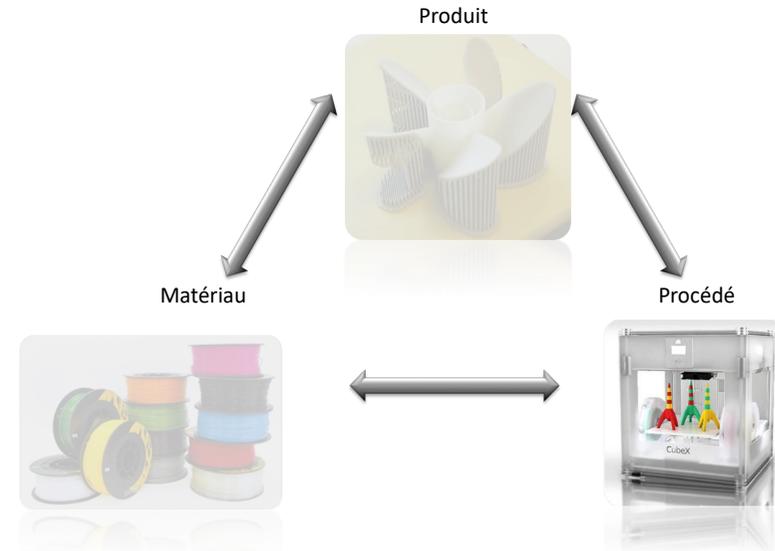


Source : C. Zieman



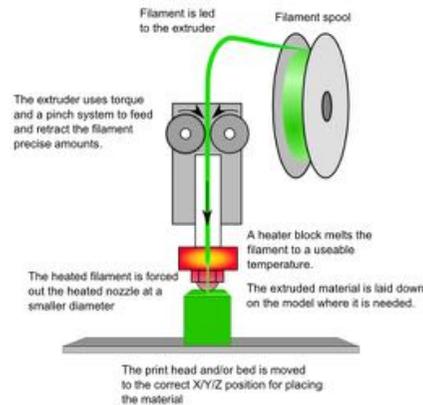
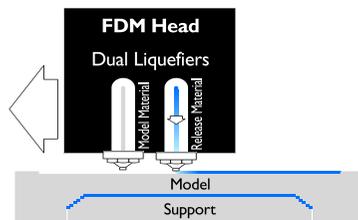
Raster Orientation	Mean Ultimate Strength (MPa), Std Dev
Longitudinal (0°)	25.72, 0.91
Diagonal (45°)	16.22, 0.27
Transverse (90°)	14.56, 0.05
Default (+45°/-45°)	19.36, 0.39

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

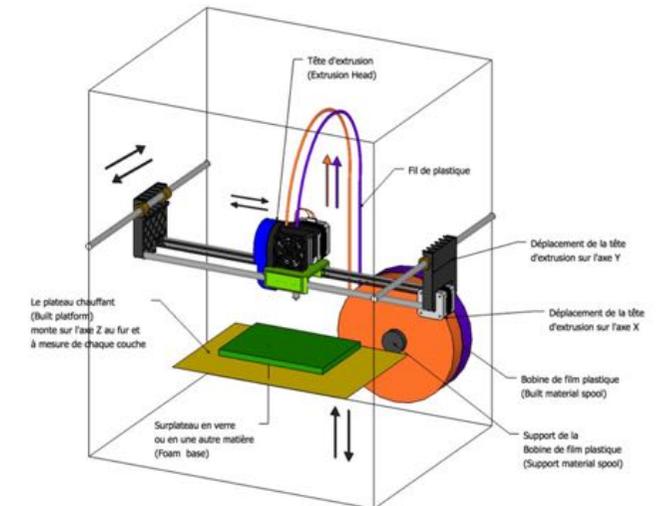


Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

FDM pour Fusion Depsite Modeling



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM Technologie machine



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



	3Dtouch	UP mini	Fortus
	Mixte matériaux possibles	Réservée enseignement	
Précision	--	--	+
résistance	-	-	+
coût	+	+	-
Epaisseur des couches (µm)	250	150	178, 254, 333
Cote X Y Z max (mm)		120*120*120	254x254x333
Précision pour 100mm	0,2 mm	0.2mm	0, 1mm en x , y en x , y et l'ep d'une couche en z
Matériau de base	PLA ou ABS	ABS	ABS
E (Mpa)	Non fournis par les fabricants		2320
σr (Mpa)			37
A%			3
support	Enlèvement mécanique	Enlèvement mécanique	Soluble dans la soude

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

- Procédés nécessitant du support
- Enlèvement mécanique courant mais limité
- Enlèvement par eau, soude...performant (matériau support spécifique)



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

- Epaisseur de couches réglables
- de l'ordre de 0,1 mm
- État de surface pièce mauvais
- Post traitement (vapeur d'acétone)



0,2 mm

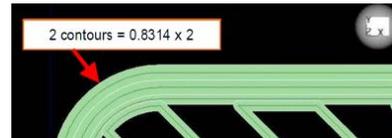
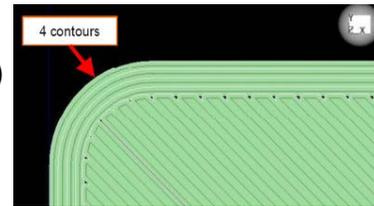
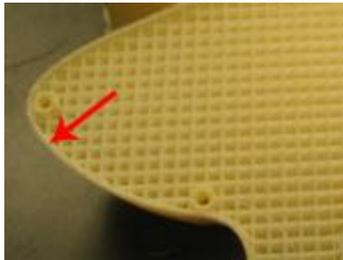
0,1mm

0,1mm poli

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

- Remplissage réglable (suivant les machines)
- structure en nid d'abeille
- Rapport résistance/poids



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

- Principal défaut : warpage
- retrait volumique au refroidissement
- Plateau ou enceinte thermo régulés
- Encollage plateau
- Dépôt de couches « radeau »



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Règles de conception

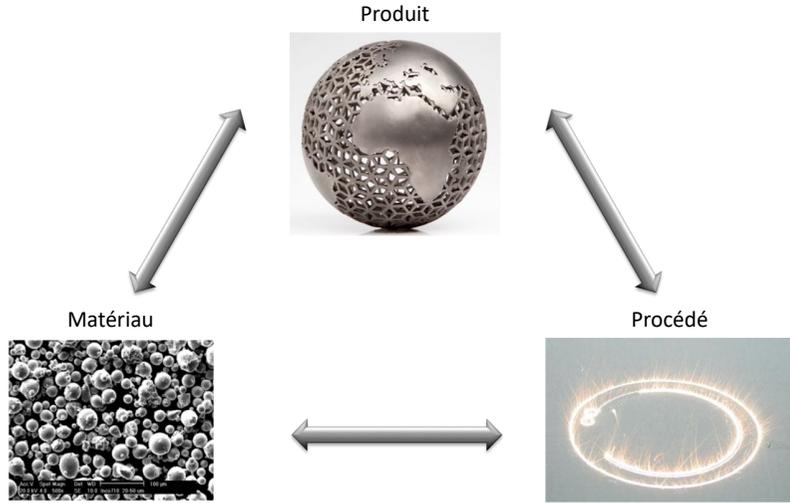
- Epaisseur de paroi = 2* épaisseur de couche
- jeu radial = 2* largeur du dépôt

Largeur de dépôt fonction du diamètre de buse principalement

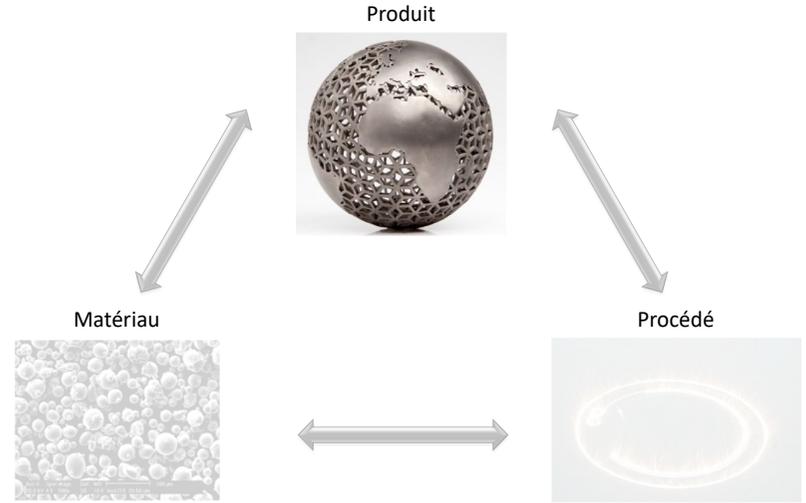
- Penser à l'enlèvement des supports
- Surface de révolution a orientée suivant l'axe z

Procédé Selective Laser Melting (SLM)

Fabrication additive : Selective Laser Melting



Fabrication additive : Selective Laser Melting



Produits

- Petites pièces
- Formes complexes



Outillage : conformal cooling



Médical



Luxe

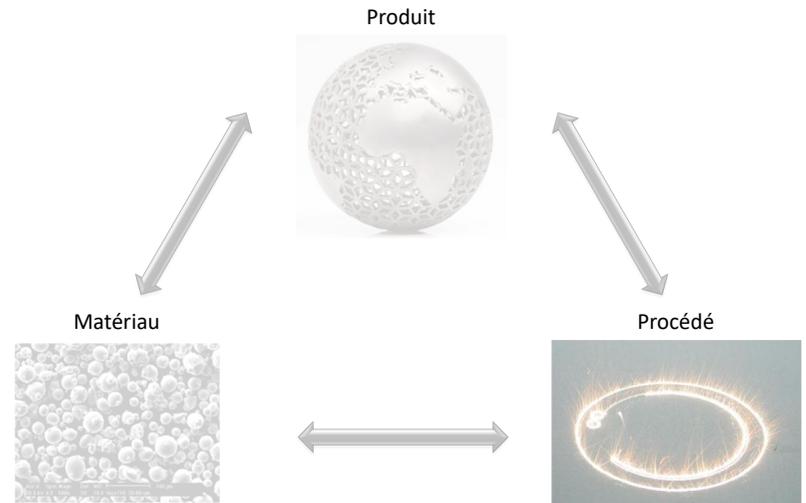


échangeur thermique



aéronautique, ceinture de sécurité

Fabrication additive : Selective Laser Melting



Le procédé

- HSE : Hygiène sécurité environnement**

- Particules fines
- Inflammabilité
- Recyclage

- Procédés**

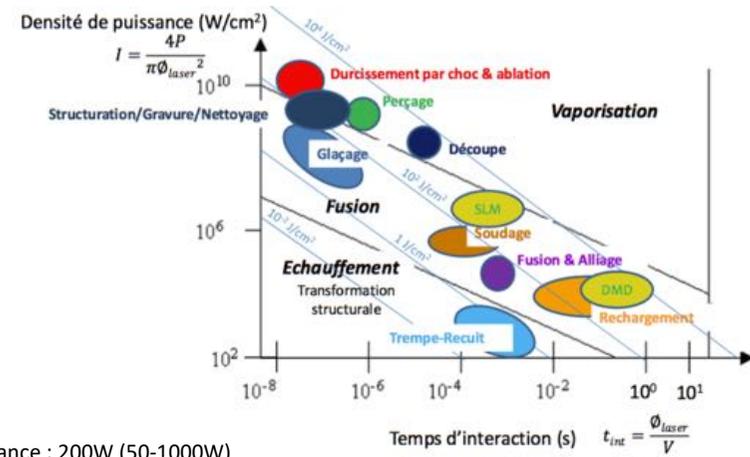
- Maîtrise
- Fiabilité
- Monitoring en temps réel
- Rendement Volume pièce finale / Volume matériau faible

- Critères de choix :**

- Alimentation poudre, laser, volume de fabrication, dépoufrage, préchauffage, atmosphère contrôlée, chaîne numérique, recoater, filtration, mise sous contrôle

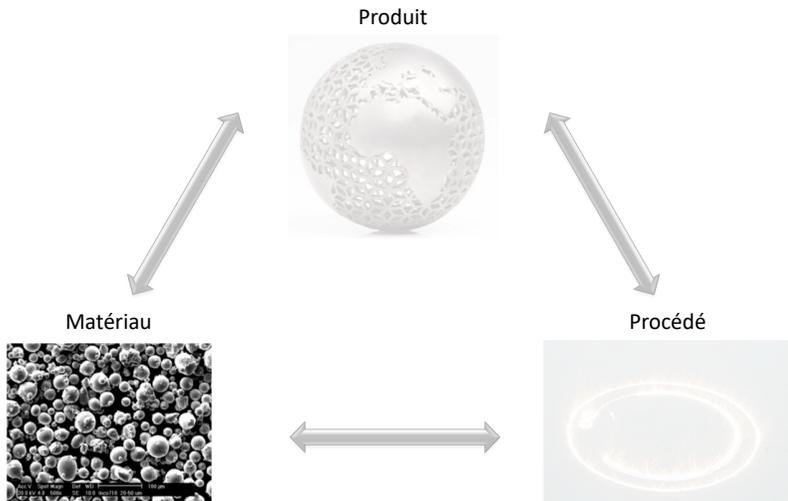


Le procédé



- Puissance : 200W (50-1000W)
- Volume de fabrication : 100x100x80mm - 700x700x700mm
- Epaisseur de couche : 20-200µm
- Vitesse de balayage : 10m/s (5-15m/s)
- Vitesse de construction : 1-2l/h

Fabrication additive : Selective Laser Melting



Le matériau

- Poudres métalliques**

alliages de titane	TiAl6V4 TiAl6V4 ELI T40 TiAl6Nb7	Médical
alliages Chrome-Cobalt	MP1, SP2	Médical
Alliages d'aluminium	AlSi10Mg AlSi12 AlSi7Mg0,7	Automobile, Aéronautique
Aciers d'outillage	Maraging 1.2709, H13	Outillages mécaniques
Superaliages base nickel	Hastelloy X, Inco 625, Inco 718	Aéronautique
Aciers inoxydables	Austénitique : 316L,304L Martensitique : 15-5 PH, 17-4 PH	Automobile
Autres	Or - Argent	Luxe

Le matériau

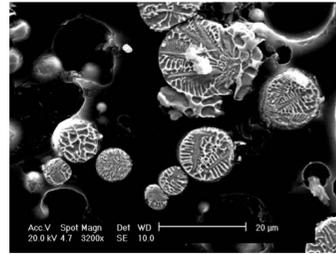
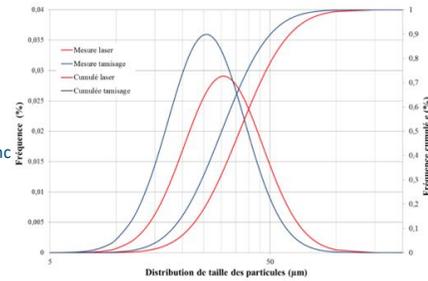
Caractéristiques des poudres métalliques

Granulométrie 10/15 μ m - 45/53/63 μ m

Densité : Une bonne répartition granulométrique permet de minimiser les vides entre particules et donc la porosité finale de la pièce

La coulabilité ou plutôt l'étabilité (dépendant de la forme)

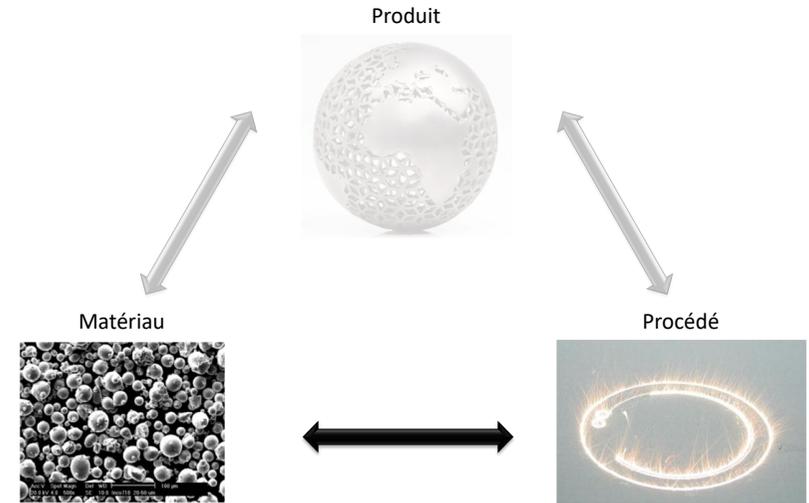
- actuellement matériaux utilisés et optimisés pour procédés conventionnels (soudabilité). Gros efforts de développement de nouveaux matériaux optimisés pour la fabrication additive.



IN718 atomisé par voie gazeuse

58

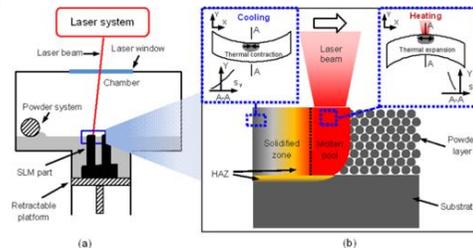
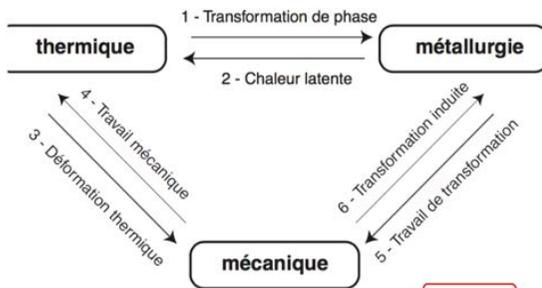
Fabrication additive : Relation matériau - Procédé



INSA

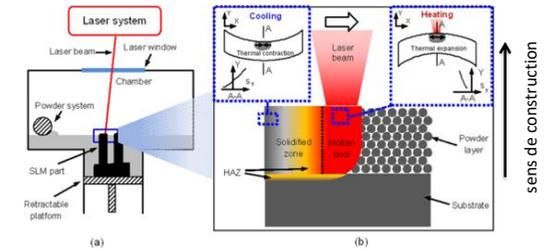
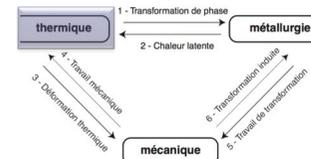
59

Relation Matériau - Procédé : Ti6Al4V



60

Relation Matériau - Procédé : Ti6Al4V



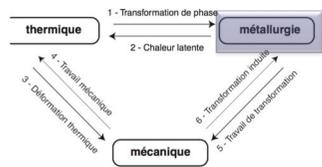
Très fort gradient thermique (3000°C/mm dans la direction de construction)
Très forte vitesse de chauffe et de tremp (10⁵°C/s)

INSA

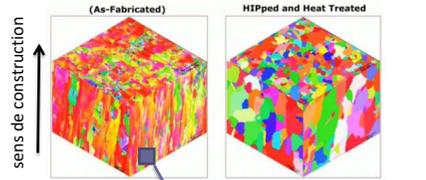
61

INSA

Relation Matériau - Procédé : Ti6Al4V

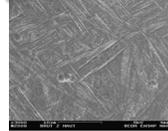


texture et morphologie des grains (grains colonnaires)

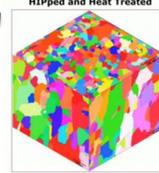


sens de construction ↑

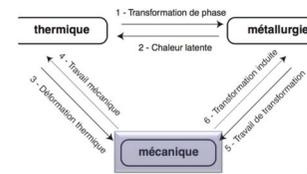
microstructure fine (durcissant)



en partie modifiable par un traitement thermique adapté

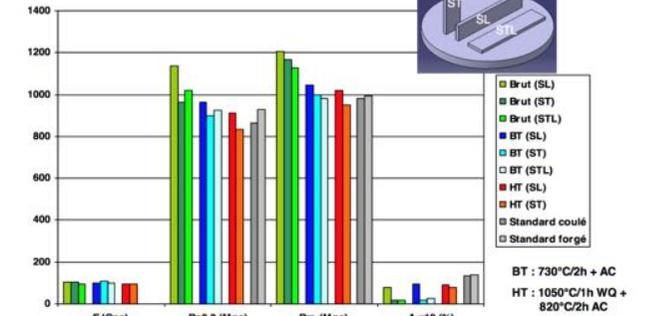


Relation Matériau - Procédé : Ti6Al4V

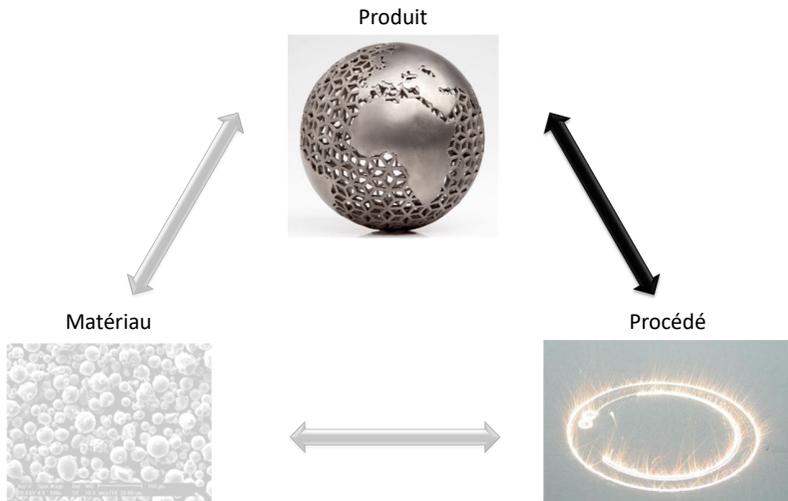


Des contraintes résiduelles qu'il faut relaxer, une anisotropie et une perte de ductilité qu'il est possible de minimiser avec un traitement thermique adapté.

Post-traitement thermique au four

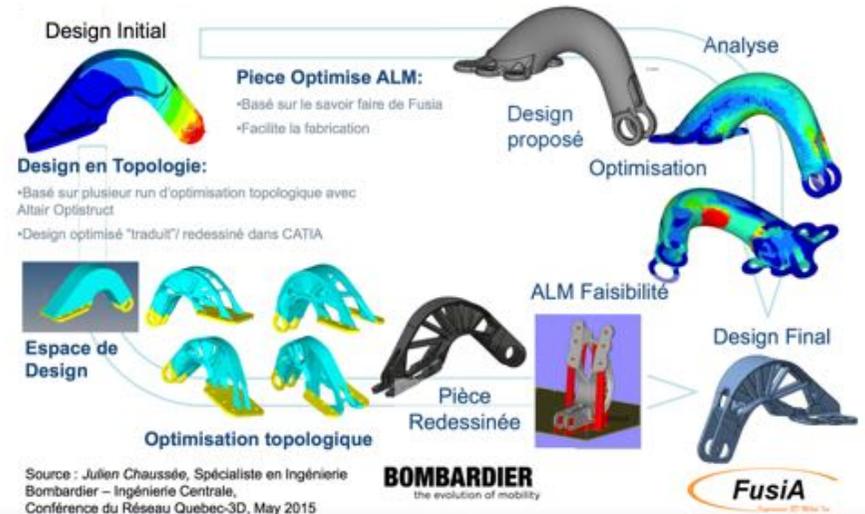


Fabrication additive : Relation Produit - Procédé



Relation Produit - Procédé : Règles de conception DFAM : Design for additive manufacturing

Optimisation topologique + Prise en compte des contraintes du procédé

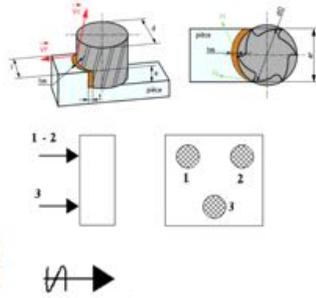


Relation Produit - Procédé : Règles de conception

DFAM : Design for additive manufacturing

Optimisation topologique + Prise en compte des contraintes du procédé + les éventuelles reprises d'usinage

- La résistance aux actions mécaniques dues aux différents usinages.
- Assurer la mise en position de la pièce dans le porte pièce pour toutes les opérations d'usinage.
- Assurer le maintien en position sans déformation de la pièce durant les opérations d'usinage.

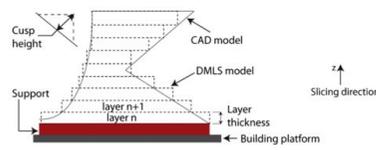


Relation Produit - Procédé : Règles de conception

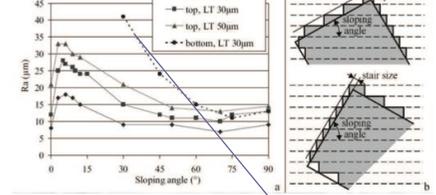
DFAM : Design for additive manufacturing

• Contraintes du procédé

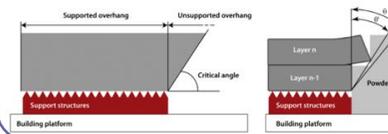
effet escalier



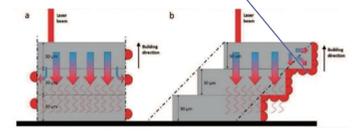
Rugosité dépendante de l'orientation de la face par rapport au sens de construction (attention aux propriétés en fatigue)



orientation critique et déformation des zones en porte à faux



frittage de poudre si la conduction thermique est mal maîtrisée



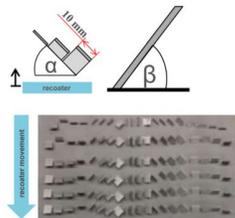
Besoin de support
Complexe à enlever sans générer de défauts

Relation Produit - Procédé : Règles de conception

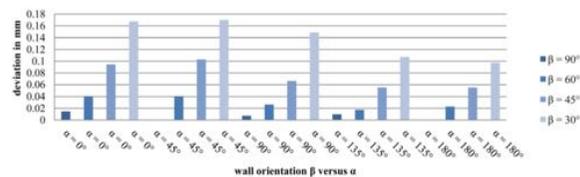
DFAM : Design for additive manufacturing

• Autres contraintes

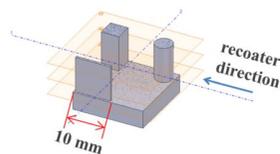
Etalement du lit de poudre par le rouleau : effet de l'inclinaison de la face par rapport au rouleau et par rapport au plateau support



erreur d'épaisseur de la paroi



Dépendance à la position sur le plateau support



Relation Produit - Procédé : Règles de conception

DFAM : Design for additive manufacturing

• Autres contraintes

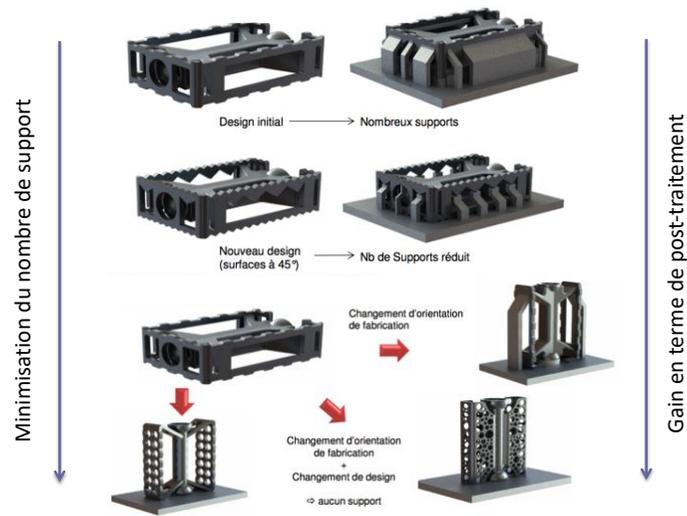
Prévoir l'évacuation de la poudre (pas de surface fermée)!

Eviter les angles vifs -> Mettre des congés. Concentrations de contraintes + contraintes internes inhérentes au procédé impliqueraient une rupture en cours de fabrication.

Epaisseur minimale de paroi 0.4mm. Devient complexe lorsque inférieur au mm.

Tolérances dimensionnelles : Max(±0.2%, 0.2mm)

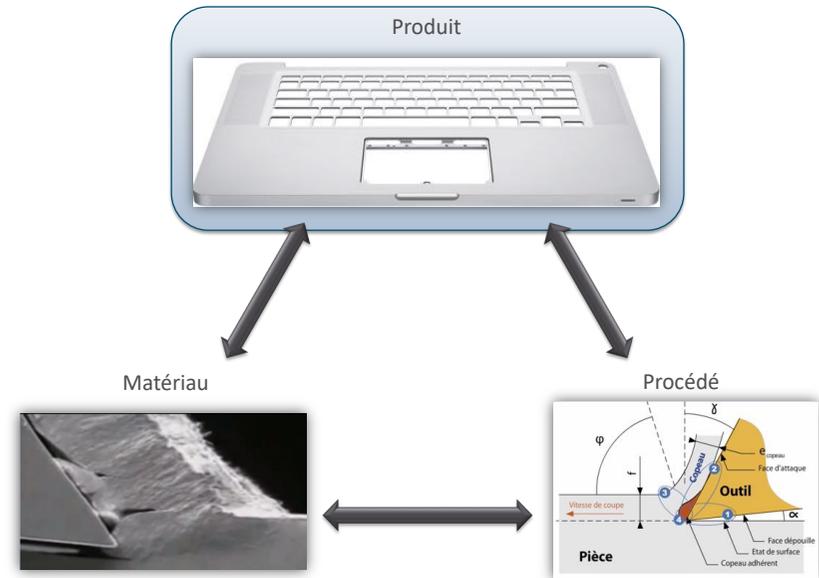
Relation Produit - Procédé : Règles de conception DFAM : Design for additive manufacturing



Plus d'exemples et de règles de conception sur
<https://prezi.com/ggiujvngqxj0/copy-of-dmls-design-guide-v4/>

Usinage par outil coupant

Usinage par outil coupant

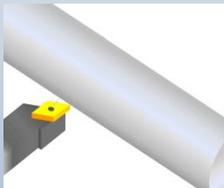


Usinage par outil coupant - Procédés

Tournage :

- Pièce en rotation (mouvement de *coupe*)
- Outil à arête unique en translation (mouvement d'*avance*)

⇒ Formes de révolution



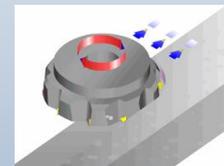
[accuratethreadedproducts.com]

Usinage par outil coupant - Procédés

Fraisage :

- Outil en rotation (mouvement de *coupe*)
- Translation pièce/outil (mouvement d'*avance*)
- Arêtes multiples

⇒ Formes *quasi* quelconques



[turningparts.com.tw]

Perçage :



Usinage par outil coupant - Procédés

Rectification :

- Amélioration de l'état de surface après usinage
- Usinage par abrasion (μ -outils coupants)



Brochage :

- Réalisation de géométries internes ou externes par translation d'un outil

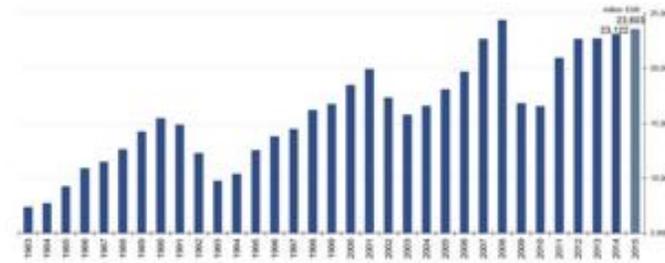


Taillage :

- Pour la génération d'engrenages internes et externes



Données économiques



Production de machines-outils dans les pays membres du CECIMO
European Association of the Machine Tool Industries

En France (chiffres SYMOP 2015), machines et technologies de production en France

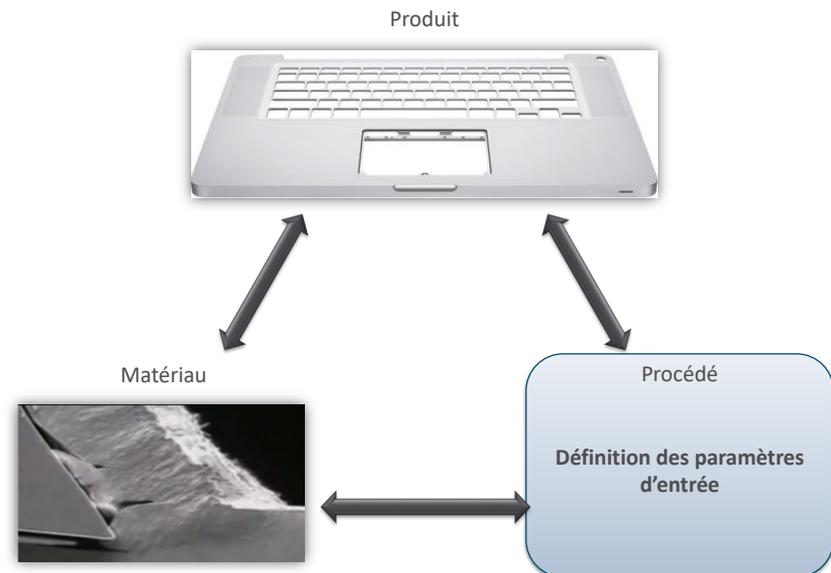
- 8.1Md€
- 38400 employés

Données économiques

Evolution de la production des diverses machines-outils pour la mise en forme des matériaux métalliques dans l'Allemagne de 2004 à 2007 [http://www.vdw.de]

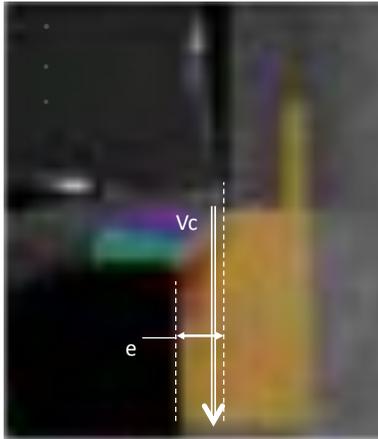
Type de machine	2004	2005	2006	2007	Évolution
Machines d'usinage par faisceau laser, faisceau d'électrons	3,2	4,4	4,98	5,12	Croît
Machines d'usinage par électroérosion	1,05	0,92	0,7	0,94	Stable
Centres d'usinage	15,9	17,9	16,2	18,9	Stable
Machines-transferts	7	5,45	4,7	2,22	Décroit
Tours	14	13,4	13,8	15,3	Stable ?
Fraiseuses, perceuses, aléseuses	11,1	11,1	12,4	12,8	Croît ?
Machines à rectifier et à polir	12,7	13,4	12	11,5	Stable ?
Machines de fabrication d'engrenages	4,36	4,5	5,66	5,86	Croît
Scieuses	2,27	2,04	2,54	2,53	Stable
Autres machines d'usinage	1,67	1,2	1,15	0,84	
Total machines d'usinage (%)	73	74,4	74,2	76,2	Croît
Machines de forgeage (presse, pilon)	1,49	1,13	0,91	1,19	
Dresseuses, cintruses, rouleuses	5,71	5,58	5,5	5,77	Stable
Cisailluses, poinçonneuses, encocheuses	3,78	3,9	4,15	4,6	Croît
Autres presses (emboutissage...)	9,61	8,78	7,57	5,23	
Tréfileuses	2,79	2,76	2,92	2,86	Stable
Autres machines de mise en forme	3,6	3,4	4,71	4,15	
Total machines de forgeage	27	25,6	25,8	23,8	Décroit
Total valeur marchande toutes machines-outils (milliards €)	7,2	7,87	8,07	9,42	Croît

Usinage par outil coupant



Définition des paramètres d'usinage

- Constatation expérimentale – *Simulation* d'un usinage



Pour enlever de la matière, il faut :

- ... choisir une épaisseur à découper e
- ... imposer une vitesse permettant la découpe V_c
- ... sur une certaine largeur (**profondeur de passe**), liée à l'outil a_p
- ... et imposer un mouvement pour la passe suivante
⇒ l'**avance**, liée à e

Définition des paramètres d'usinage

- On se place dans le cas de l'opération de référence : le chariotage

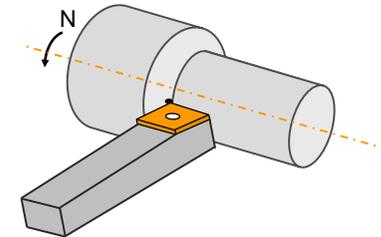
Chariotage : usinage d'un cylindre sur un tour selon un axes parallèle à l'axe de rotation



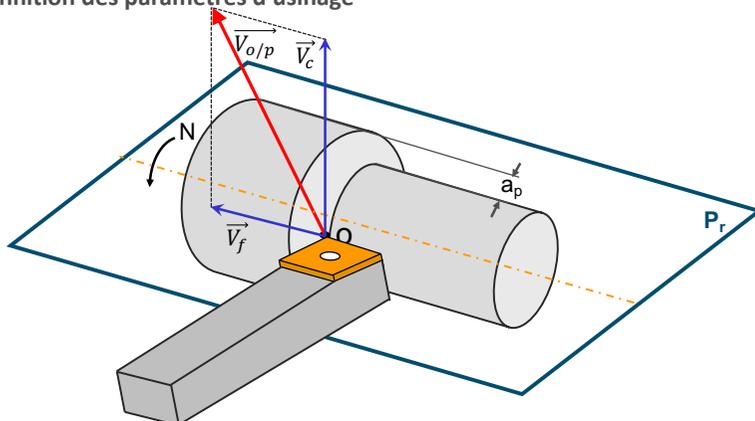
Rotation de la pièce à une vitesse N (trs/min)

⇒ Vitesse de coupe générée tangente au diamètre de la pièce

Mouvement de l'outil // axe rotation

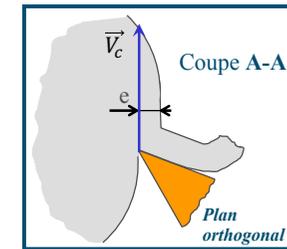
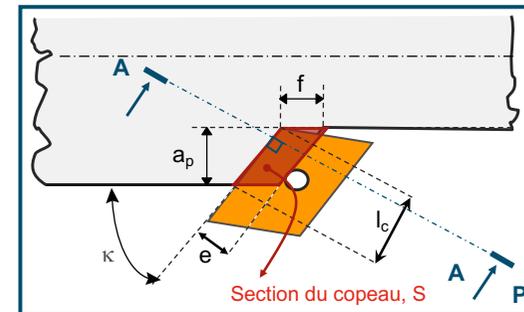


Définition des paramètres d'usinage



- Vitesse de coupe : V_c . Vitesse par rapport à la machine générée par la rotation ; part de l'outil ; unité (m/min)
- Vitesse d'avance : V_f . Mouvement de l'outil par rapport à la machine ; unité (mm/min)
- Vitesse de l'outil par rapport à la pièce : $V_{o/p} = V_c + V_f$
- Profondeur de passe : a_p . En chariotage, valeur de réduction du rayon ; définie dans la direction perpendiculaire à l'avance ; unité (mm)
- Plan de référence P_r . Bâti machine ; $\perp V_c$

Définition des paramètres d'usinage



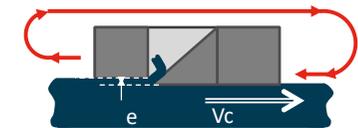
- On retrouve les paramètres initialement définis

Vitesse de coupe V_c

Épaisseur de matière découpée e

Largeur de matière découpée l_c

Mouvement permettant de définir la forme V_f



Relations entre les paramètres

- Calcul des vitesses

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \leftrightarrow N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

$$V_f = f \cdot N$$

Attention aux unités *usuelles* V_c (m/min), N (tr/min), V_f (mm/min)

D sera pris comme le diamètre final usiné

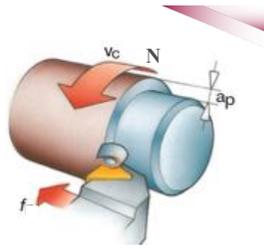
- Section du copeau

$$S = a_p \cdot f = l_c \cdot e$$

$$e = f \cdot \sin(\kappa)$$

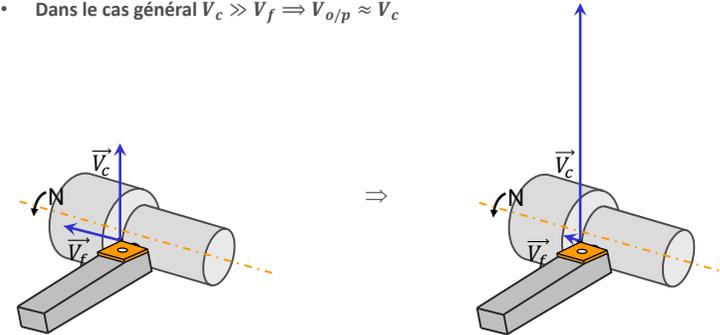
- Remarque

N et V_f varient généralement selon la position diamétrale (et donc au cours de l'opération d'usinage).



Remarques complémentaires

- Les relations précédentes sont à connaître et se retrouvent facilement à partir de considérations géométriques
- Dans le cas général $V_c \gg V_f \Rightarrow V_{o/p} \approx V_c$



Remarques complémentaires

- Les relations précédentes sont à connaître et se retrouvent facilement à partir de considérations géométriques
- Dans le cas général $V_c \gg V_f \Rightarrow V_{o/p} \approx V_c$

Le torseur de vitesse de l'outil par rapport à la pièce sera donc vu comme comportant deux composantes.

La vitesse de coupe V_c (usuellement exprimée en m/min) est de grande amplitude et se retrouvera dans le calcul de la puissance nécessaire à la coupe.

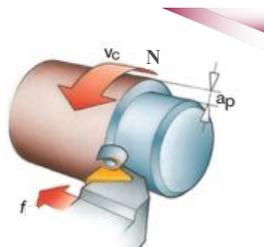
La vitesse d'avance V_f (mm/min) est négligeable en comparaison mais est l'origine de la définition de la forme de la pièce.

- Paramètres de coupe/Paramètres machines

(N, f, a_p) = paramètres de réglage machine (sur les tours traditionnels notamment)

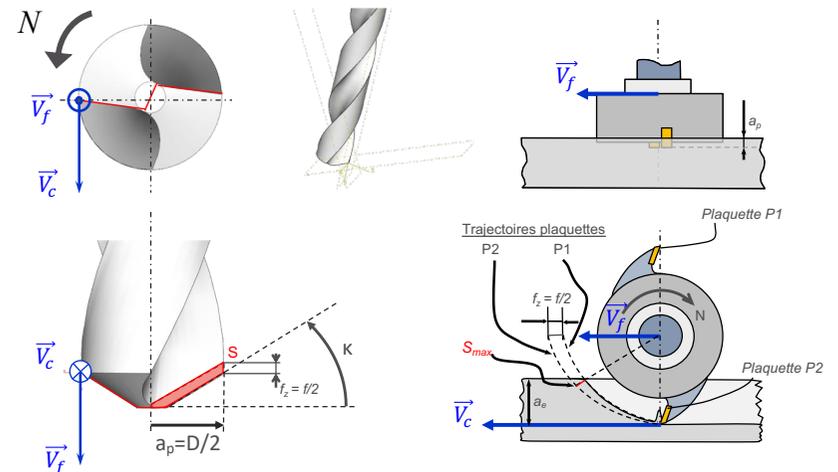
(V_c, e, l_c) = paramètres de base du modèle « physique »

(V_c, f, a_p) sont les paramètres usuellement utilisés pour définir une opération d'usinage

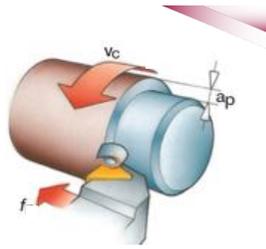


Paramètres de coupes en fraisage/perçage

- On retrouve l'angle de direction d'arête κ et en fraisage, une profondeur de passe radiale a_e



Bilan paramètres d'entrée



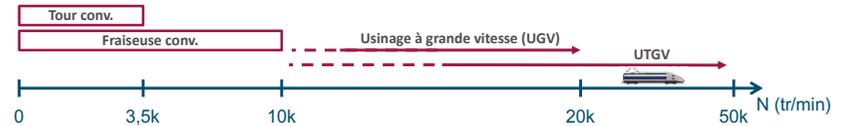
- Paramètres d'entrée en usinage par outil coupant
- Vitesse de coupe
 - Fortement liée au matériau usiné
 - Joue sur la puissance consommée par la machine et le temps d'usinage
 - Paramètre à optimiser
- Avance
 - Joue sur la section de matière enlevée, donc les efforts, le couple, la puissance
 - Influence du 1^{er} ordre sur l'état de surface
- Profondeur de passe
 - Joue sur la section de matière enlevée, donc *idem* : efforts, couple, puissance
 - Généralement contrainte voire imposée par la pièce à usiner (écart brut/surface finie)

Ordres de grandeur des paramètres de coupe

- Ordres de grandeur *courants* des paramètres de coupe, en usinage « conventionnel »

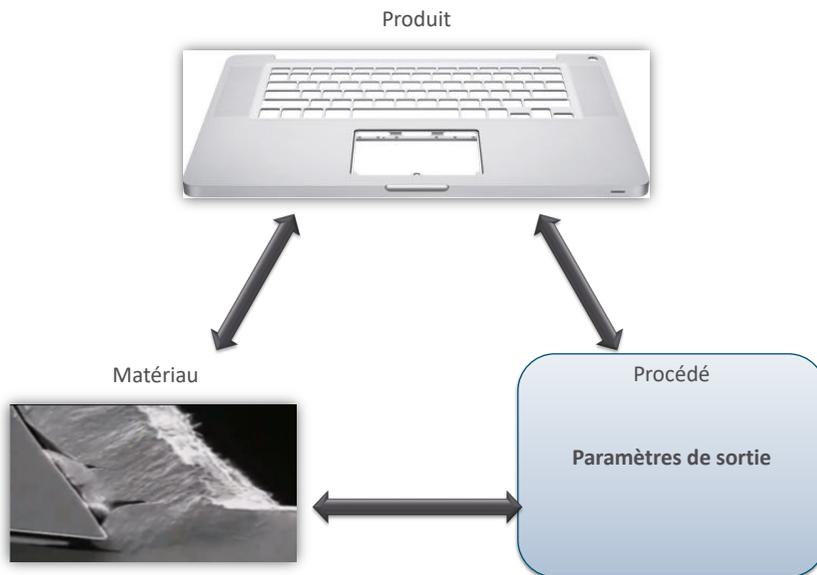
Tous sont à prendre avec des pincettes !

- N – tr/min – Fonction des capacités des machines-outils



- f – [0.01 – 0.5 mm/tr]
- a_p – [0.05 – 10 mm] – très variable selon le matériau usiné
- V_c – acier [30 – 200 m/min] aluminium [100 - 800 m/min] - idem
- Q – cm³/min – à calculer en conséquence !

Usinage par outil coupant



Paramètres de sortie

- Objectif : usiner *rapidement* une pièce de *bonne qualité* et à *moindre coût*
 - **Rapidement :**
Diminution du temps d'usinage = Maximisation du débit de matière
 - **Bonne qualité :**
Précision géométrique = limiter les déformations, donc les efforts
Garantir un bon état de surface
 - **A moindre coût :**
Limiter le coût énergétique : puissance consommée et énergie spécifique
Limiter le coût de l'usinage

Quelques grandeurs supplémentaires !

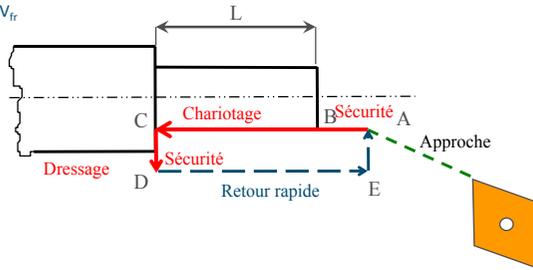
- Comment calculer le temps d'une opération d'usinage ?

Plusieurs étapes sont à considérer !

- t_{pp} - Temps nécessaire pour amener l'outil à côté de la pièce
- t_u - Temps de contact effectif outil/pièce, effectué à V_f (voir usure des outils...)
- t_a - Temps annexe, parcours des distances de sécurité (et dressage dans ce cas), effectué à V_f (contact outil-pièce)
- t_r - Temps de parcours à vitesse rapide V_{fr}

$$t_{total} = t_{pp} + t_u + t_a + t_r$$

$$t_{total} = t_{pp} + \frac{BC}{V_f} + \frac{AB+CD}{V_f} + \frac{DE+EA}{V_{fr}}$$



Débit de copeaux

- Comment estimer la vitesse de l'usinage ?

Calcul du débit de matière usinée ou débit copeau Q

Débit = surface x vitesse = volume / temps

- Plusieurs manières de le voir...

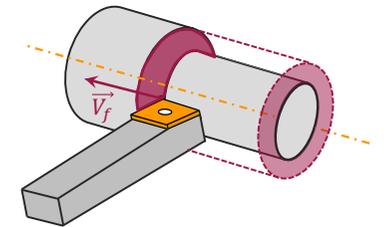
Globale : section de matière enlevée à une vitesse d'avance V_f

=> Débit moyen

Local : section de copeau découpée à vitesse de coupe V_c

=> Débit instantané

ou encore volume de matière enlevé pendant le temps d'usinage t_u



Débit de copeaux

- Comment estimer la vitesse de l'usinage ?

Calcul du débit de matière usinée ou débit copeau Q

Débit = surface x vitesse = volume / temps

- Plusieurs manières de le voir...

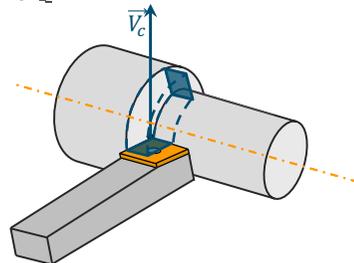
Globale : section de matière enlevée à une vitesse d'avance V_f

=> Débit moyen

Locale : section de copeau découpée à vitesse de coupe V_c

=> Débit instantané

ou encore volume de matière enlevé pendant le temps d'usinage t_u



Débit de copeaux

- Comment estimer la vitesse de l'usinage ?

Calcul du débit de matière usinée ou débit copeau Q

Débit = surface x vitesse = volume / temps

- Plusieurs manières de le voir...

Globale : section de matière enlevée à une vitesse d'avance V_f

Locale : section de copeau découpée à vitesse de coupe V_c

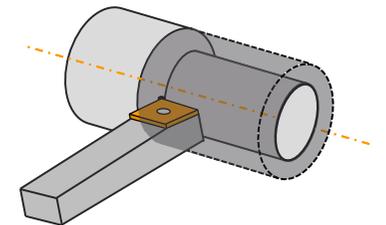
ou encore volume de matière enlevé pendant le temps d'usinage t_u

$$Q = V/t_u = \pi \cdot D \cdot a_p \cdot L \cdot \frac{V_f}{L} = \pi \cdot D \cdot a_p \cdot V_f = V_c \cdot S$$

Avec $V_f = f \cdot N$ en mm/min :

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \text{ en (cm}^3\text{/min)}$$

avec les unités conventionnelles d'usinage



Débit de copeaux

- Quid du fraisage ? Exemple sur

Débit instantané Q_i

$$Q_i = \sum_{i=1}^n V_c \cdot S_i \text{ mais l'épaisseur de copeau est variable}$$

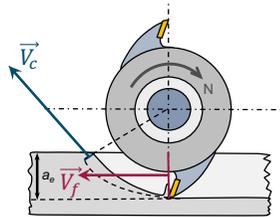
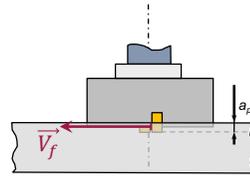
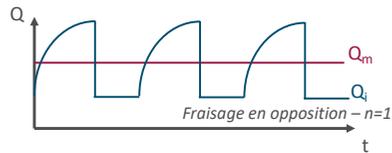
⇒ S_i variable, le débit de copeau varie

Débit moyen Q_m

$$Q_m = V_f \cdot a_p \cdot a_e$$

Valeur moyennée sur plusieurs rotations

Calcul simplifié



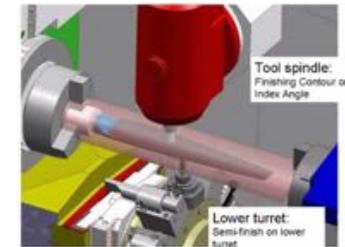
Pourquoi caractériser les efforts de coupe ?

- On souhaite caractériser les efforts générés par l'opération de coupe
 - Résistance mécanique et déformation de l'outil/du porte-outil (outils élançés principalement)
 - ⇒ Outils élançés, alésage, perçages profonds...
 - Résistance mécanique et déformation de la pièce
 - ⇒ Usinage de voiles minces, vibrations de la pièce pendant l'usage (broutement,...)
 - Capacités de la machine
 - ⇒ Couple à fournir au niveau de la broche, puissance fournie par la machine

- Sur une opération de chariotage

Voir généralisation au cas du Perçage en TP

Ex : usinage d'une pale : limitation des efforts



Efforts dans le cas du chariotage

- Hypothèse :

Pas de moment au niveau de la pointe de l'outil, le torseur des efforts est un glisseur

- 3 composantes d'efforts

Coupe \vec{F}_c , avance \vec{F}_f et pénétration \vec{F}_p

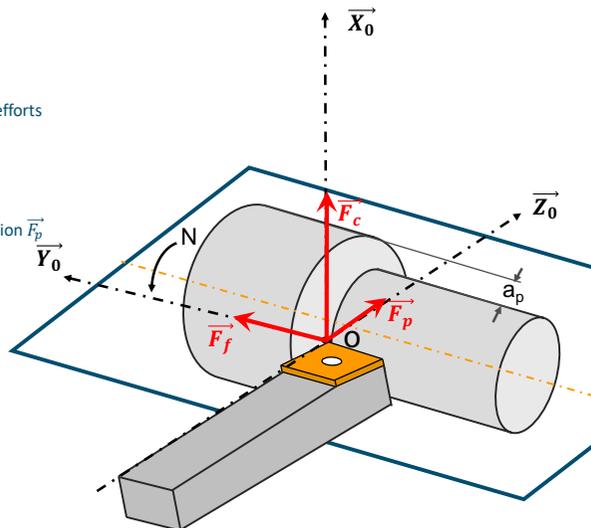
Rapport approximatifs

dans le cas du

tournage

$$\vec{F}_f \approx \left[\frac{1}{2}; \frac{2}{3} \right] \cdot \vec{F}_c$$

$$\vec{F}_p \approx 0,3 \cdot \vec{F}_c$$



Détermination de l'effort spécifique de coupe

- On rapporte l'effort de coupe F_c à la surface sur laquelle il s'applique

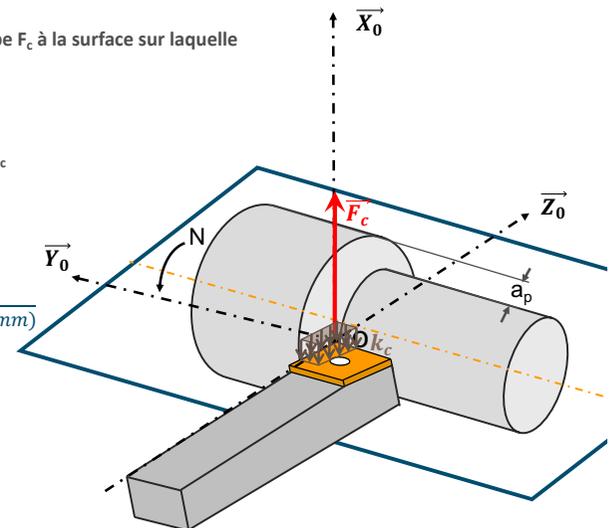
⇒ Surface de copeau S

- Effort spécifique de coupe k_c

Supposé constant sur S

$$F_c = S \cdot k_c$$

$$k_c (MPa) = \frac{F_c (N)}{a_p \cdot f (mm) \cdot (mm)}$$



Effort spécifique de coupe

- De quels paramètres dépend k_c ?

Au 1^{er} ordre : Couple Outil Matière (COM)

Au 2nd ordre : Epaisseur de copeau e et angle de coupe γ_0

⇒ Augmentation des efforts avec la diminution de l'angle de coupe (cf. usinage des matériaux durs/mous)

⇒ Forte augmentation des efforts pour les faibles valeurs d'épaisseur de copeau : refus de coupe

- Expression de l'effort spécifique de coupe

$$k_c = k_c(e_0, \gamma_0) \cdot k_e \cdot k_\gamma$$

$k_c(e_0, \gamma_0)$ valeur de référence (dépendance du matériau) pour une épaisseur de copeau e_0 et un angle de coupe γ_0 donnés

$$k_e = \left(\frac{e}{e_0}\right)^{-0.3} \quad \text{influence de l'épaisseur de copeau}$$

$$k_\gamma = 1 - 0.02 \cdot (\gamma - \gamma_0) \quad \text{influence de l'angle de coupe}$$

} Valeurs proches de 1

Méthodologie de détermination des efforts

- Cas *courant* industriel

Mesure systématique de l'effort difficile, besoin de prédiction rapide...

⇒ Détermination de k_c :

- Valeur de référence fonction du matériau

- Corrections en fonction de l'épaisseur de copeau et de l'angle de coupe réels

⇒ Estimation de l'effort et de la puissance de coupe

- Avec mesure d'efforts

Cf. TP Perçage

⇒ Mesure des efforts en fonction de différents paramètres de coupe

⇒ Détermination plus précise de l'expression de k_c pour utilisation ultérieure

Energie spécifique de coupe et ordres de grandeurs

- Energie spécifique de coupe

Puissance nécessaire pour générer un certain débit de copeau

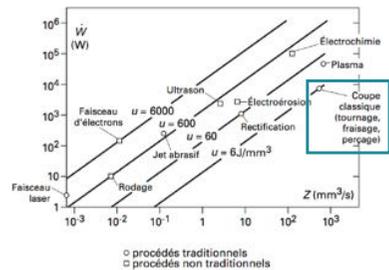
ou énergie nécessaire pour enlever un volume de matière donné

Donne une idée de la consommation énergétique du procédé :

$$E_s = \frac{P_c}{Q} \cdot \frac{(J)}{(mm^3)}$$

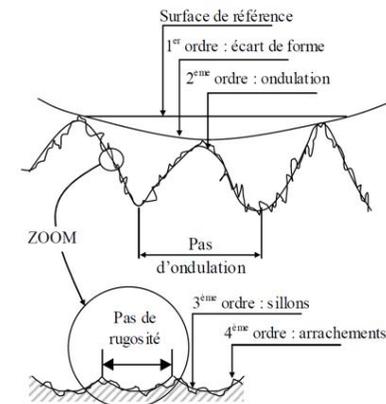
On montre facilement que cette énergie, dans le cas de l'UC, est directement proportionnelle à l'effort spécifique de coupe et donc homogène à une pression

Procédés	E_{sc} (J/mm ³)
Electro érosion	0.7-10000
Rectification	50-300
Fraisage/Perçage	3-6
Tournage	2-3



Vous avez dit état de surface ?

- Les défauts du profil de surface peuvent être classés en 4 ordres de grandeur



Premier ordre : écarts de forme

Deuxième ordre : ondulations

Troisième ordre : sillons

Quatrième ordre : arrachements

} Défauts macro géométriques

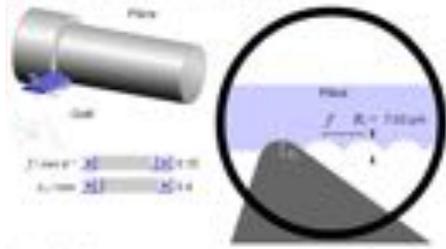
} Rugosité

Diminution de la longueur d'onde des défauts

Les défauts du 3^{ème} ordre peuvent être modélisés géométriquement.

Vous avez dit état de surface ?

- Les défauts du profil de surface peuvent être classés en 4 ordres de grandeur



Troisième ordre : longueur d'onde de l'ordre de l'avance

Sillons

Domaine de la rugosité (moyens de mesure spécifiques)
Effet géométrique (tracé de la forme de l'outil à la surface de la pièce), analytiquement prédictible

$$\text{Sillons de hauteur } R_t \cong \frac{f^2}{8R_\epsilon}$$

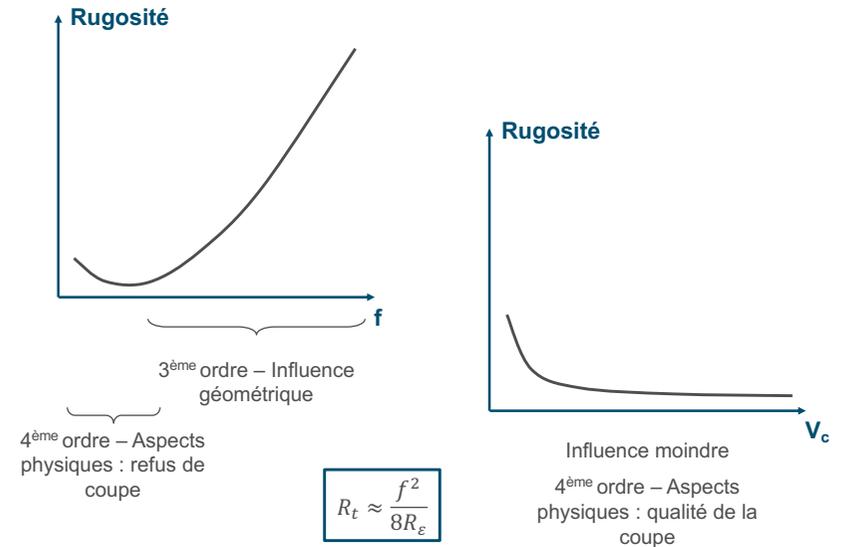
Quatrième ordre : très haute fréquence

Arrachements

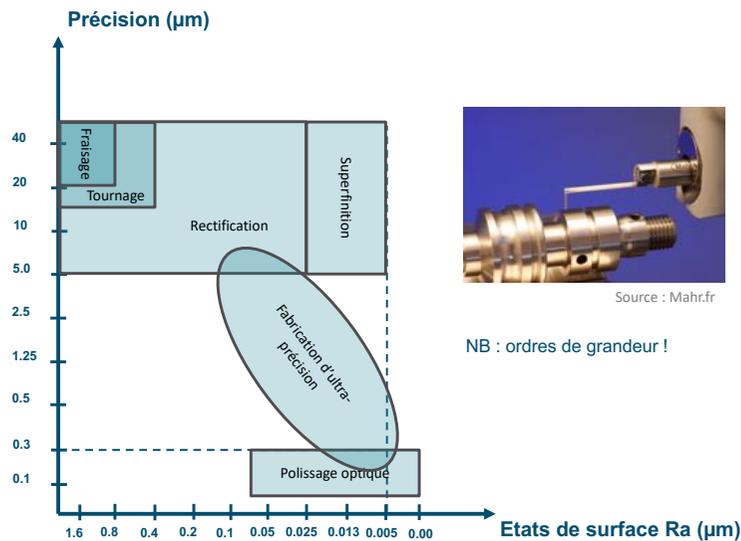
Aussi considérées

Sources possibles : arrête rapportée, propriétés locales de la matière, usure de l'outil...

Influence des paramètres de coupe



Ordres de grandeur des qualités de surface atteignables en usinage



Source : Mecasem

Usiner oui, mais avec quel outil ?

- Vous avez dit outil d'usinage ?**

Outil = plaquette + porte-plaquette

- Tournage**

Selon les matériaux, les géométries usinées, les opérations



Voir catalogues fournisseurs

⇒ TP Optimisation

Principaux éléments géométriques d'un outil d'usinage

- **Un zoom sur l'outil de référence : plaquette de tournage**

Comme pour la modélisation, les considérations suivantes sont généralisables pour toutes les opérations d'usinage par outil coupant. Voir TP Perçage.

- **Un outil...**

...coupe la matière au niveau de l'arête de coupe
celle-ci s'écoulant sur la face de coupe.

- **Des points de repères géométriques**

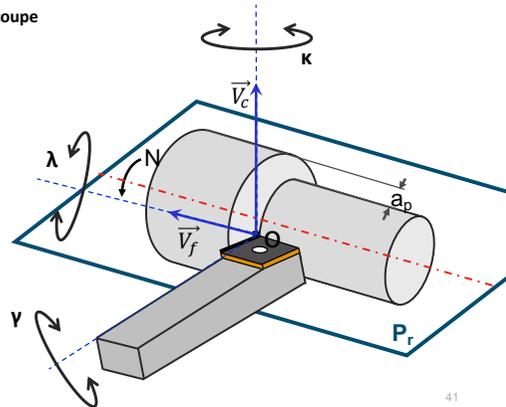
- **et des angles caractéristiques**

Angle de direction d'arête κ

Angle de coupe γ

Angle d'inclinaison d'arête λ

Angles dus à l'orientation de l'outil et de son porte-outil

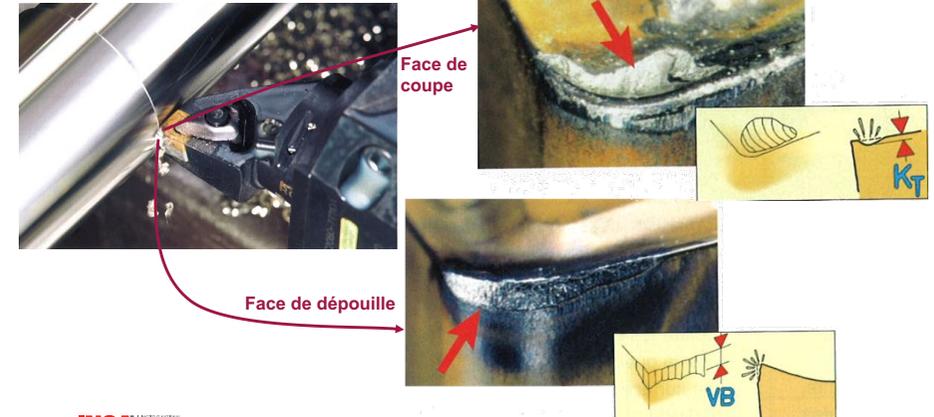


Vie et mort d'un outil



- **Endurance et usure de l'outil**

Constatations expérimentales



Causes de l'usure

- **Contact mécanique outil/pièce : efforts et frottements importants**

⇒ Usure par adhésion et par abrasion

- **Echauffement**

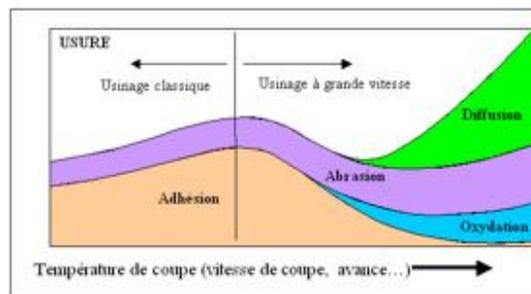
⇒ Usure par oxydation et diffusion

- **Sources variables selon les domaines d'usinage**

- **D'où revêtements des plaquettes :**

⇒ + grande résistance à l'usure mécanique

⇒ Effet de barrière thermique



Source : <http://plasmas.agmat.asso.fr>

Mesure de l'usure

- **Deux éléments géométriques**

Cratère sur la face de coupe : profondeur du cratère K_t

⇒ Mesure délicate

Bande d'usure sur la face de dépouille : largeur de la bande VB

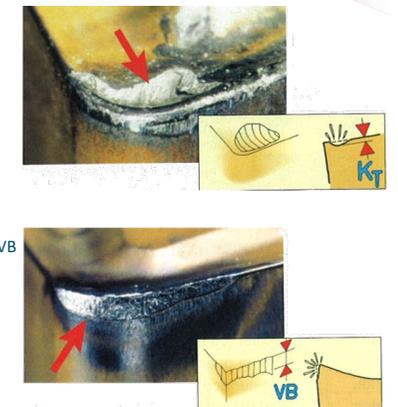
⇒ Plus facile à mettre en œuvre

- **Corrélation entre ces deux éléments ?**

Si les phénomènes d'usure sur les faces de coupe et de dépouille sont corrélés, il suffit de mesure VB pour avoir une vision représentative de l'usure de l'outil

⇒ A confirmer lors d'une étude de cas

⇒ Voir TP Usure



Influence des paramètres d'usinage

- On fait varier la vitesse de coupe V_c uniquement

Tous autres paramètres d'usinage constants

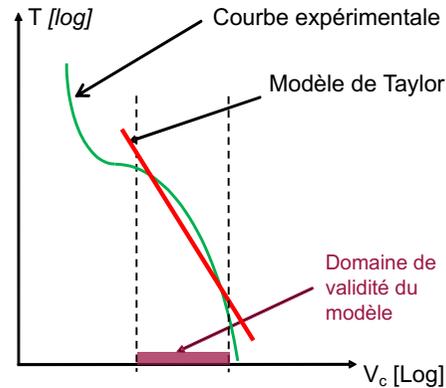
Mesure de la durée de vie T de l'outil pour un critère Vb_{lim} fixé

Comportement quasi linéaire dans le domaine de vitesses d'usinage :

$$\log(T) = n \cdot \log(V_c) + cte$$

$$\Rightarrow T = C \cdot V_c^n$$

Valable uniquement dans le domaine de linéarité



Modèle de Taylor généralisé

- On retrouve une dépendance linéaire (sur une échelle log-log) en faisant varier l'avance f et la profondeur de passe a_p

⇒ Modèle de Taylor généralisé ou de Gilbert :

$$T = k \cdot a_p^l \cdot f^m \cdot V_c^n$$

- k dépend du Couple Outil Matière... Attention aux unités !
k en $(\text{min}^{1+n} \text{mm}^{4-m-n} 10^{2n})$?... A exprimer en unités C.U. (conventionnelles en usinage)
- Les coefficients l , m et n ne dépendent que du matériau constituant l'outil

Avec $l \approx n/6$ et $m \approx n/3$

($l, m, n < 0$, une forte valeur (absolue) de n indique une forte dépendance de la durée de vie à la vitesse donc un matériau peu résistant à l'usure)

Données du modèle de Taylor généralisé

- Cas général :

Matériau outil connu – Données issues de la littérature/constructeurs pour n et donc l et m

Matériau outil	Aciers Rapides Ordinaires ARO	Aciers Rapides Supérieurs ARS	Carbures métalliques frittés	Carbures revêtus	Céramique, CBN
n	-8	-6	-4	-3	-2

Un seul essai d'usure à faire pour déterminer k

⇒ Modèle de Taylor utilisable pour tout triplet (V_c, f, a_p) contenu dans le domaine de validité

- Pour déterminer plus précisément les coefficients de la loi d'usure :

Au minimum 9 essais d'usure jusqu'à Vb_{lim}

⇒ Détermination de k , l , m et n par expérimentation

Cf TP Usure

Optimisation des coûts

- Optimisation du coût de l'usinage à l'intérieur du domaine des possibles ainsi défini :

Une machine-outil peut produire pendant 70-80% de son temps sous réserve d'une organisation et d'un environnement efficace

⇒ Optimisation de ce temps

⇒ Choix des conditions de coupe (V_c, f, a_p)

- Principaux critères d'optimisation :

- coût global de fabrication minimum

- production horaire maximale

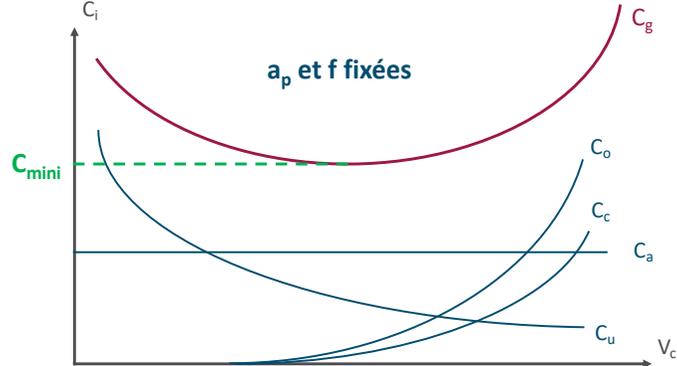
- durée effective de l'outil de coupe imposée

Détermination du coût global de l'usinage

- Coût global par pièce usinée

$$C_{global} = C_{usinage} + C_{outillage} + C_{\text{temps de changement d'arrête}} \dots$$

$$\dots + C_{\text{temps auxiliaires (montage, démontage, transfert)}}$$



Optimisation - Bilan

- Optimisation à coût de production minimum

- Optimisation à production horaire maximum

⇒ Pour une profondeur de passe donnée, choisir l'avance maximum puis la vitesse $V_{eco/Q}$ en conséquence

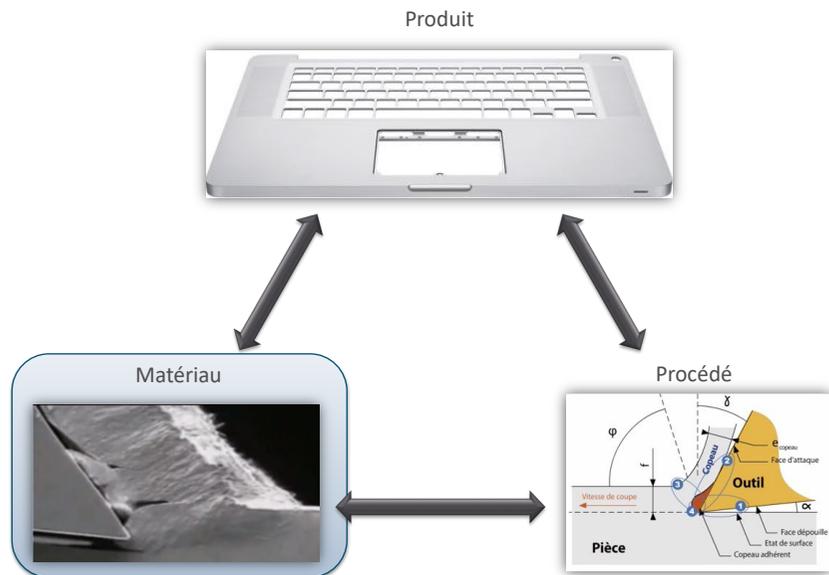
- Optimisation à durée effective de coupe imposée

- Durée de vie d'outil ajustée à une séance de travail
- Durée de vie d'outil ajustée à une série de pièces
- ...

⇒ Fonctionnement hors du régime de coût mini ou production maxi, consenti pour d'autres gains

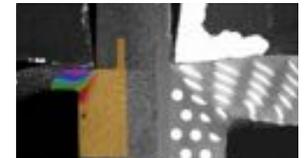
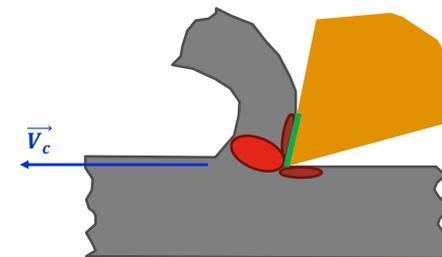
⇒ S'assurer que la contrepartie est suffisante !

Usinage par outil coupant



Un (tout petit) peu plus de physique de la coupe

- Que subit la matière ?



- Zones de cisaillement **primaire (secondaire et tertiaire)**

⇒ Déformations plastiques/irréversibles par **cisaillement**, continues, quasi-stationnaires

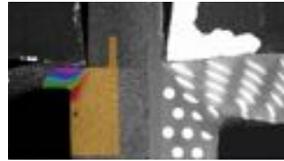
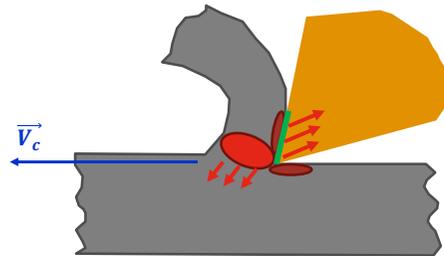
⇒ Décohésion de la matière, génération du copeau

Déformation plastiques : ~90% de l'énergie dissipée se transforme en chaleur : $T \approx 500^\circ\text{C}$ en pointe d'outil

- Zone de contact**, glissement à grande vitesse

Un (tout petit) peu plus de physique de la coupe

- Que subit la matière ?



- Zone de contact + frottement, glissement à grande vitesse
- Génération et diffusion de chaleur
 - ⇒ Échauffement de la matière (jusqu'à 10⁶°C/s), augmentation de la ductilité, trempe superficielle du matériau.
 - ⇒ Diffusion de chaleur dans l'outil, d'où usure

Et si on accélère ?

WHAT IF WE TRIED MORE POWER?

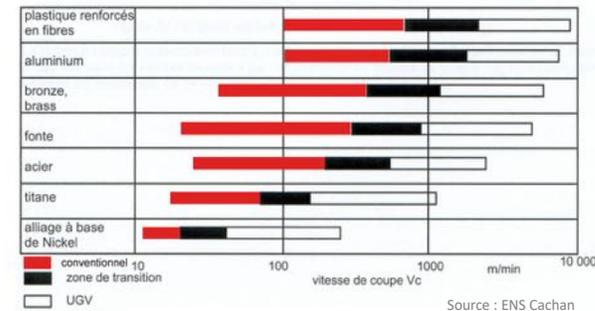


Source : whatif.kcd.com

- Que veut dire usinage conventionnel ?

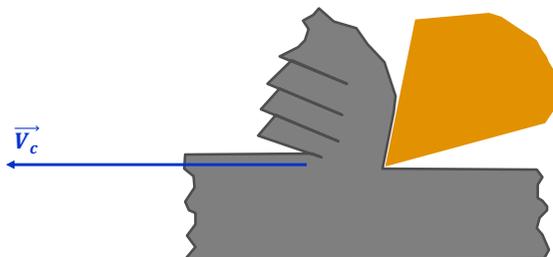
Les améliorations technologiques des machines ont permis d'augmenter fortement les vitesses de rotation des broches et donc les vitesses de coupe

- Plages de vitesse de coupe de quelques métaux et alliages



Un peu de physique de coupe... de l'UGV

- Et si la vitesse de coupe augmente ?



- Création du copeau par rupture du matériau et non plus par cisaillement
 - Fortes vitesses de déformation, phénomène physique différent
 - Température en pointe d'outil $T \approx 1000^\circ\text{C}$
 - Mais les transferts thermiques n'ont pas le temps de s'établir.
 - ⇒ La pièce reste quasiment à température ambiante
 - ⇒ 80% de l'énergie de coupe s'évacue dans les copeaux

Caractéristiques de l'Usinage à Grande Vitesse

- Efforts de coupe :

Fortement liées à l'avance et la profondeur de passe, peu à la vitesse de coupe

↑ des vitesses ⇒ ↑ puissances ⇒ en général, profondeurs de passes faibles (↓ efforts) mais avances élevées (↑ débit)

- Contraintes sur les machines et outils

Besoin de grande rigidité (fortes accélérations), fortes puissances : 20 – 50kW

Grandes vitesses d'avance (60 – 90m/min) : moteurs linéaires

et de rotation (20 – 50000tr/min) : roulements à billes céramiques, paliers magnétiques ou hydrostatiques

Porte-outils spécifiques : cônes HSK

Stratégies et trajectoires d'usinage spécifiques : optimisation des phénomènes thermiques, dynamiques...

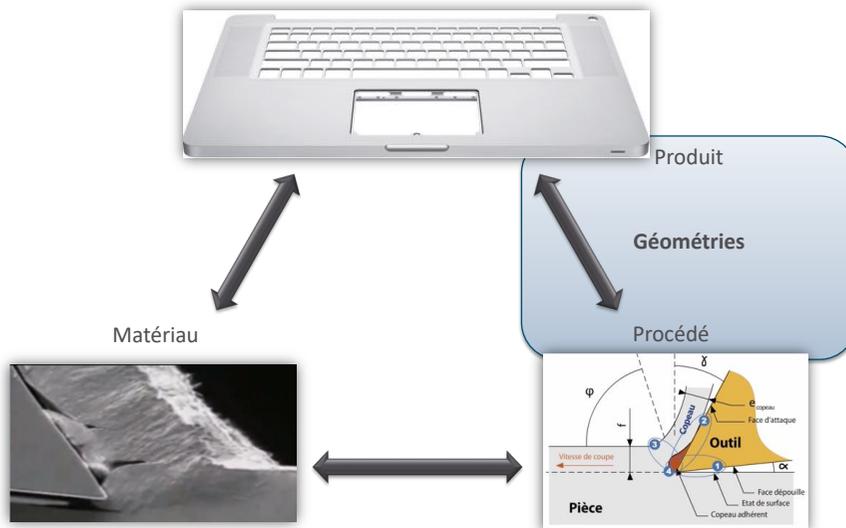
Caractéristiques de l'Usinage à Grande Vitesse

- Quelques avantages de l'UGV :
 - Efforts de coupe réduits par rapport à usinage conventionnel
 - ⇒ Précision des pièce usinée supérieure car moins de déformations lors de l'usinage
 - Calories dissipées par la coupe évacuées par les copeaux et n'affectent pas thermiquement la pièce
 - ⇒ Meilleure stabilité dimensionnelle
 - Plus grande facilité à usiner des pièces minces
 - Meilleur état de surface des pièces
 - Gain de temps à l'usinage : typiquement d'un facteur 3 à 10
 - Pour certains types de matériaux, possibilité d'usiner sans fluide de coupe (pas de lubrification)

Caractéristiques de l'Usinage à Grande Vitesse

- Conséquences sur les critères de conception
 - Diminution des efforts grâce aux nouvelles conditions de coupe
 - ⇒ Usinage de pièces d'épaisseurs plus faibles pour un même critère de déformation
 - ⇒ Contraintes moindres sur le bridage
 - Forte augmentation des débits de copeaux et réduction des efforts de coupe
 - ⇒ Outils de formes différentes (fraise boule)
 - ⇒ Usinage dans la masse de pièces prototypes
 - Efforts et efforts thermiques sur les pièces moindres
 - ⇒ meilleure qualité de surface sans rectification, pas de traitement surfacique des pièces
 - ⇒ usinage de matériaux durs avec une difficulté moindre

Usinage par outil coupant



Géométries réalisables par usinage par outil coupant

- Les progrès en usinage, à grande vitesse notamment, permettent d'usiner :
 - Des géométries fines, voiles minces...
 - De très grandes gammes de matériaux : métaux, y compris durs, polymères, bois, céramiques sous certaines conditions, composites...
- ⇒ Quelles contraintes sur la conception des pièces usinées ?
 - Géométries des pièces selon celles des outils et l'architecture des machines
 - Optimisation des pièces pour limiter les dispersions (remises en position)
 - ...

Géométrie des pièces usinées

• Tournage – Définition des opérations

Réalisation d'une surface finale en plusieurs opérations depuis une **surface brute**

- Finition :

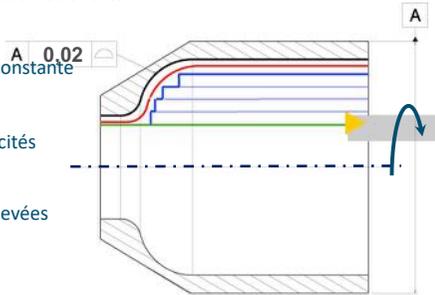
réalisation de la surface finale, bon état de surface

⇒ Besoin d'une avance f faible

⇒ Temps d'usinage important, besoin de lisser les efforts

- Demi-finition :

permettre de finir avec une surépaisseur constante



- Ebauche :

débit de copeau maxi. respectant les capacités machine, plusieurs passes possibles

⇒ Avance f et profondeurs de passe a_p élevées

Architecture des machines

• Eléments principaux

Axes en translation

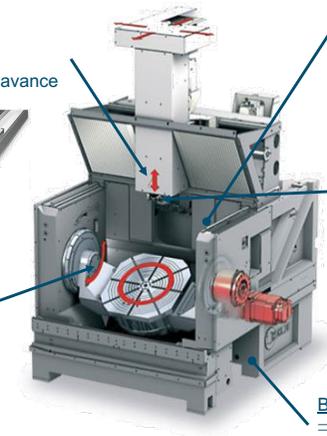
(liaisons glissières, vis à billes)

⇒ Génération du mouvement d'avance



Axes en rotation

⇒ Mouvement continu ou positionné



Système de circulation d'huile

Broche

⇒ Génération du mouvement de coupe



Bâti et fixation au sol
⇒ Rigidité (déformations en usinage, vibrations...)

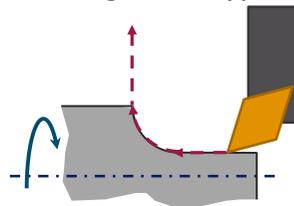
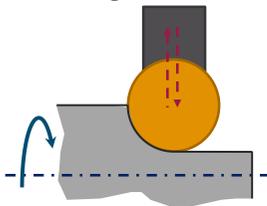
Géométrie des pièces usinées

• Grands principes et petites astuces

• Usinage de forme

vs.

Usinage d'enveloppe



⇒ Usinage de forme : réalisation d'outils complexes, trajectoires simples

⇒ Usinage d'enveloppe : outil de géométrie plus simple, réalisation de trajectoires complexes ⇒

Architecture et cinématique des machines

Le plus courant avec les machines à commande numérique moderne

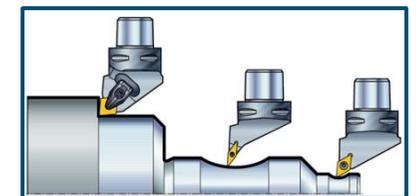
Géométrie des pièces usinées

• Un premier type de cinématique - Tournage :

Pièce en rotation : axe Z

Outil en translation : axes X (radial) et Z (axial)

⇒ Réalisation de géométries de révolution, par forme ou **essentiellement** par enveloppe

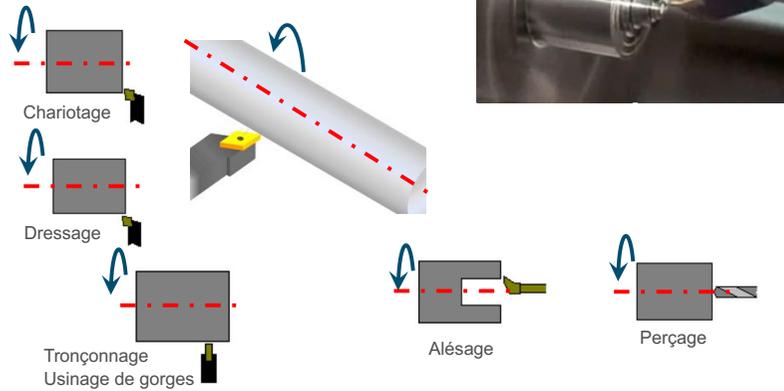


Source : SANDVIK

Géométrie des pièces usinées

• Tournage

Opérations de base



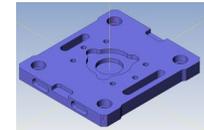
Géométrie des pièces usinées

• Seconde cinématique classique - Fraisage :

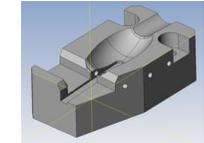
Outil en rotation : axe Z

Rotation outil 1/1 pièce : axes X, Y et Z (axe broche)

⇒ Réalisation de géométries prismatiques

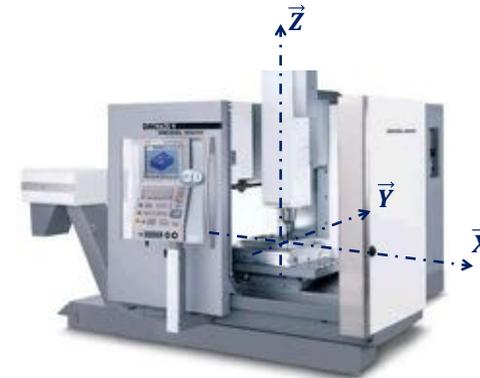


ou formes gauches



essentiellement par enveloppe

Ici avec plusieurs mises en positions (*phases*)



Géométrie des pièces usinées

• Opérations de base

Usinage en bout



Usinage en roulant

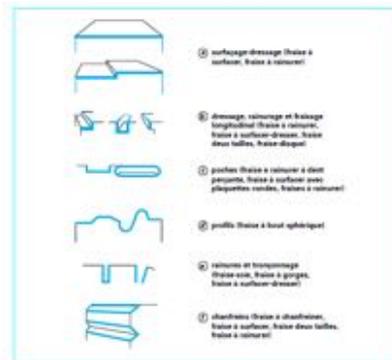
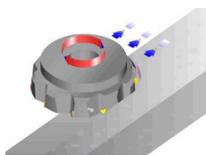


Figure 8 - Principales opérations réalisées en tournage

• Fraises :



A surfacer



2 tailles

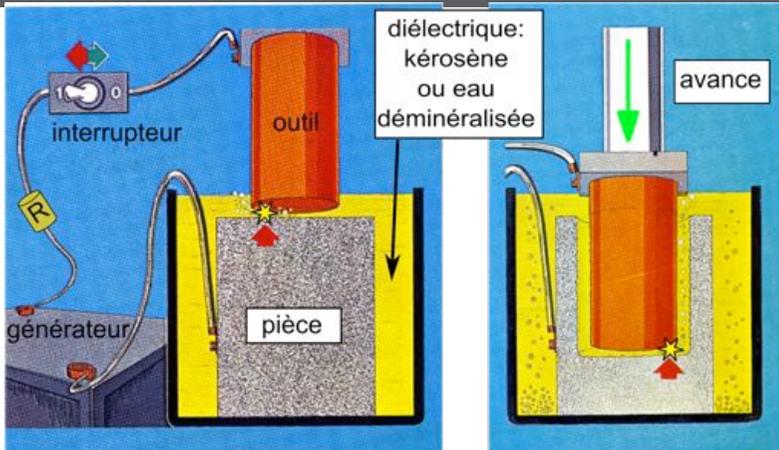


3 tailles

Electroérosion

Principe ●○○○○○ Paramètres ○○○○○○○○○○○○ Surface ○○ Techno enfonçage ○○○○○○ Techno fil ○○○○○○○○

PRINCIPE



Enlèvement de matière aux points d'impact de micro arcs électriques.
Phénomène initial : **claquage diélectrique**.

Avance de l'outil.
Complémentarité géométrique outil/pièce

Electroérosion (EDM)

- 1 Principe du procédé
- 2 Paramètres du procédé
- 3 État de la surface usinée
- 4 Technologie par enfonçage
- 5 Technologie de découpe par fil

Principe ●○○○○○ Paramètres ○○○○○○○○○○○○ Surface ○○ Techno enfonçage ○○○○○○ Techno fil ○○○○○○○○

CLAQUAGE DIÉLECTRIQUE



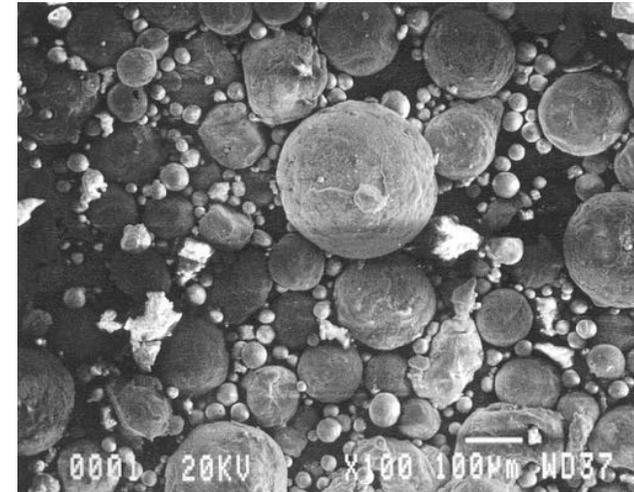
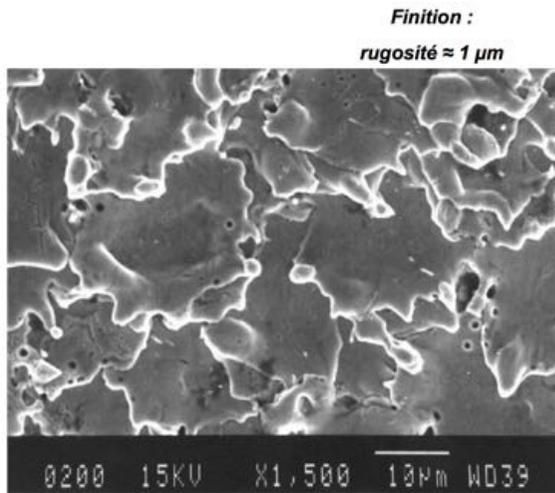
Claquage diélectrique



RÉPÉTITION DES ARCS ÉLECTRIQUES : SURFACE ISOTROPE

COPEAUX SOLIDES

Temps de repos
5 à 100 μ s
+
Circulation du diélectrique
↓
répartition
statistique des arcs
uniforme
↓
complémentarité
outil / pièce
rugosité
ISOTROPE

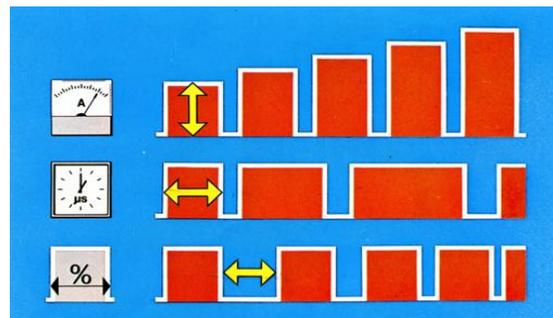


Particules érodées en ébauche, pièce acier, outil cuivre.

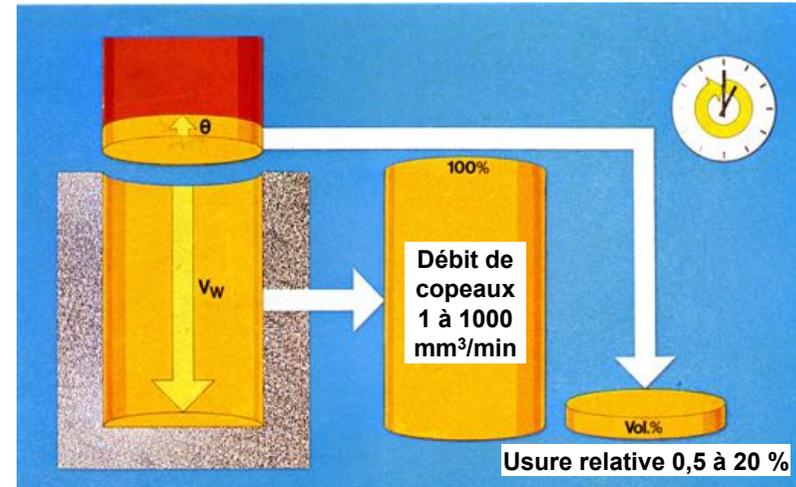
PARAMÈTRES D'ENTRÉE

PARAMÈTRES DE SORTIE

- intensité I
- durée d'impulsion T
- temps de repos P
- matériaux
- polarité
- arrosage



■ l'avance ne peut pas être imposée => asservissement pour maintenir l'intervalle outil/pièce constant



MATÉRIAUX USINABLES

La conductivité électrique doit être suffisante pour permettre le passage de la décharge électrique ($\kappa \geq 10^{-2} \Omega/cm$). Le procédé est le plus performant si le matériau possède :

- une température de fusion et de vaporisation basse,
- une mauvaise diffusivité thermique.

Le procédé permet d'usiner dans des conditions acceptables les matériaux suivants :

- alliages métalliques,
- graphites,
- céramiques conductrices ou semi-conductrices,
- certains matériaux composites,
- certains semi-conducteurs,
- supraconducteurs,
- diamant polycristallin.

MATÉRIAUX POUR ÉLECTRODES

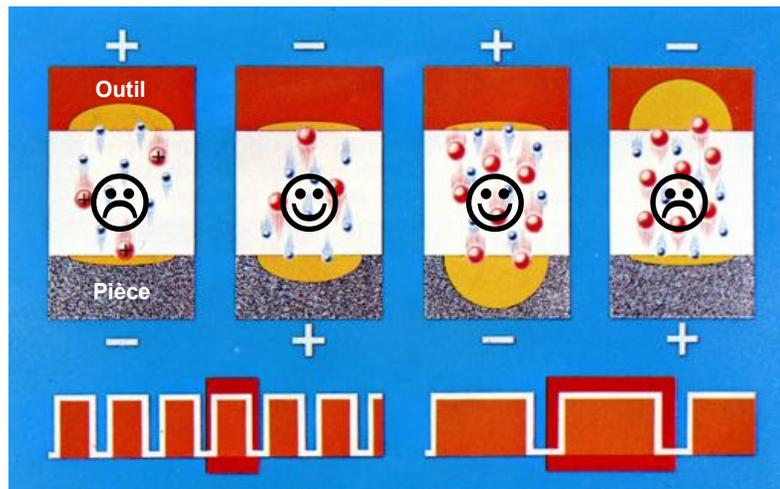
Pour les outils, il est important d'utiliser des matériaux permettant un bon enlèvement de matière sur la pièce, une usure faible sur l'outil et un usinage préalable aisé. Les matériaux adaptés ont les propriétés suivantes :

- haute température de fusion et vaporisation,
- haute diffusivité thermique
- bonne usinabilité à l'outil coupant.

Les matériaux adéquats sont essentiellement :

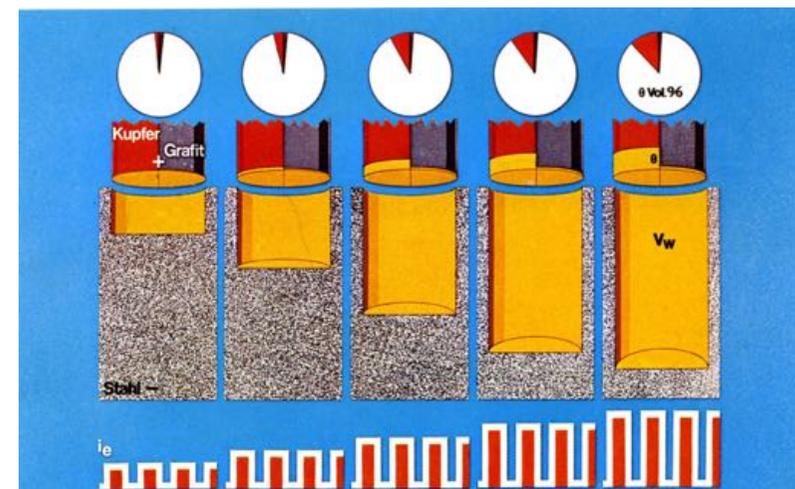
- cuivre et alliages,
- graphite,
- des matériaux plus résistants tels que le molybdène et le tungstène.

INTERACTION POLARITÉ/DURÉE D'IMPULSION

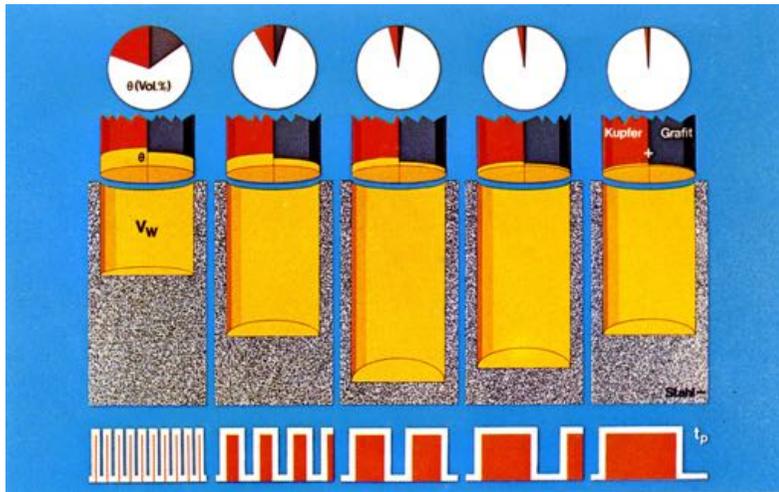


l'interaction polarité/durée d'impulsion influe sur l'usure de l'outil.

INFLUENCE DU COURANT I

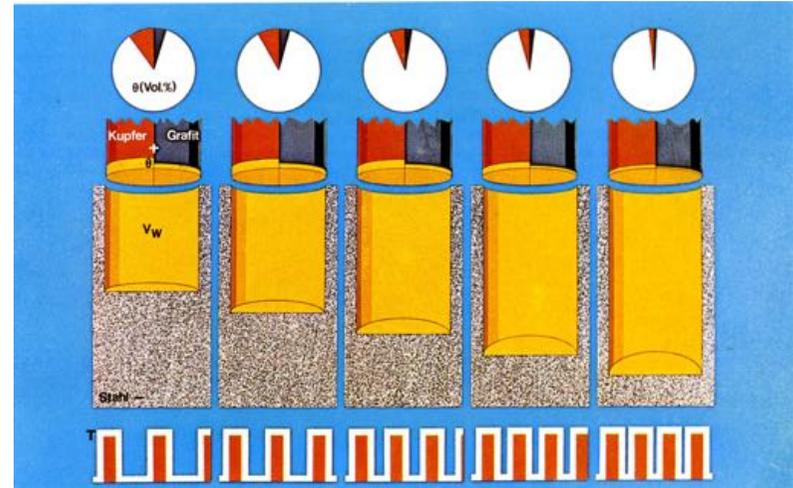


INFLUENCE DE LA DURÉE D'IMPULSION T

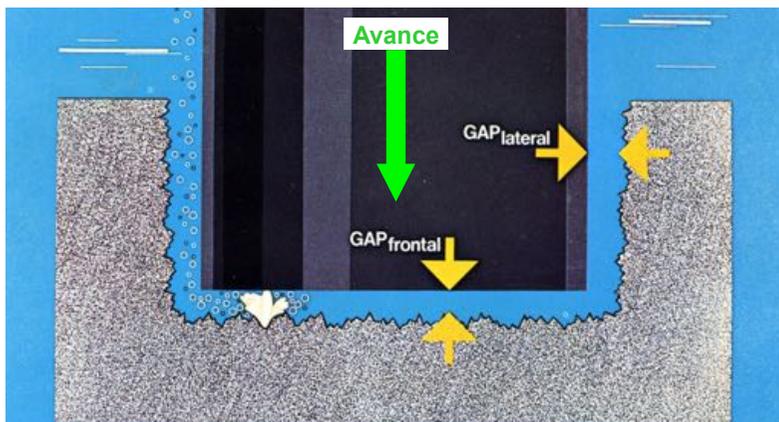


La dépendance de Q à T est non-linéaire => optimisation !

INFLUENCE DU TEMPS DE REPOS P

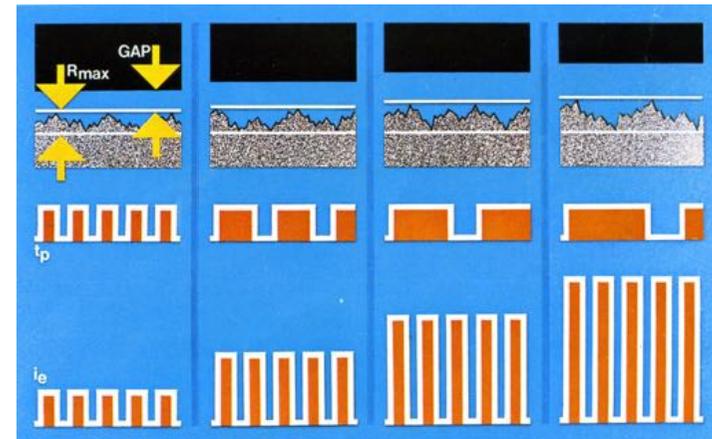


INTERVALLE OUTIL-PIÈCE



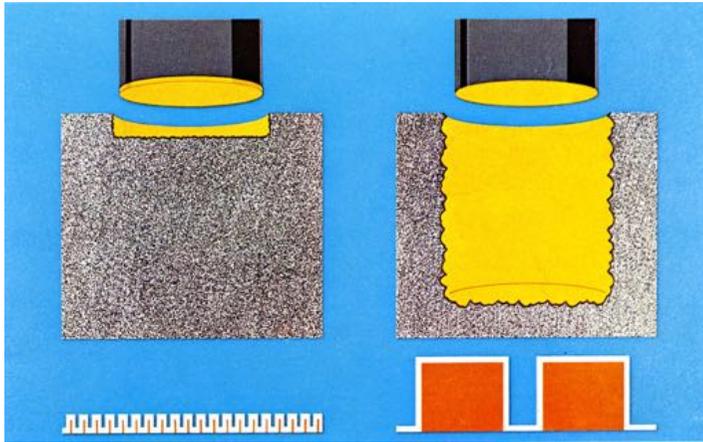
intervalle frontal < intervalle latéral (heureusement !)

RUGOSITÉ DE LA SURFACE USINÉE



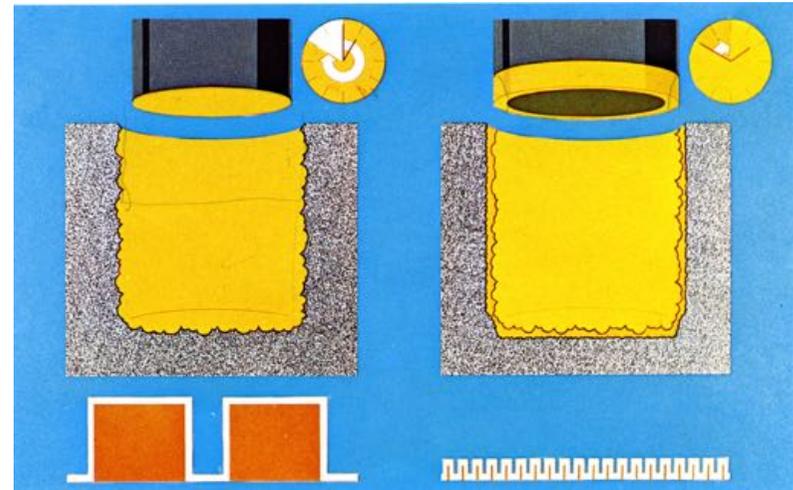
La rugosité de la surface usinée et l'intervalle sont liés à l'énergie des impulsions.

BILAN



- deux régimes se détachent : finition et ébauche.
- les relations entre paramètres sont complexes et non linéaires !

GAMME D'USINAGE



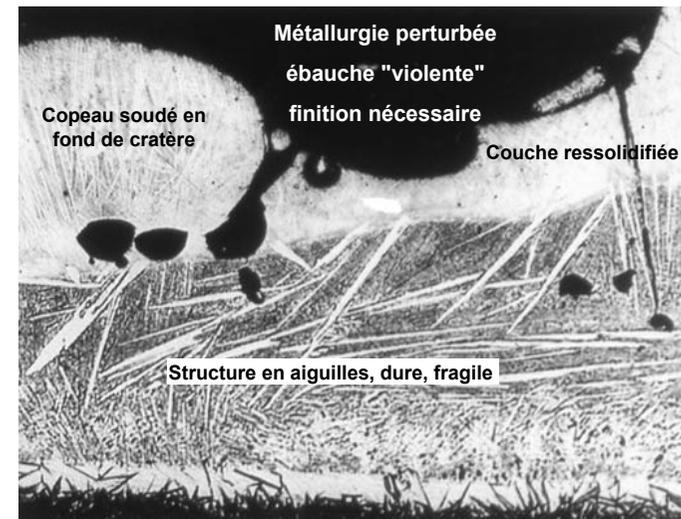
Gamme d'usinage : ébauche puis finition(s).

RÉGIMES ÉBAUCHE/FINITION

Comparaison des paramètres et performances selon 3 régimes de fonctionnement.

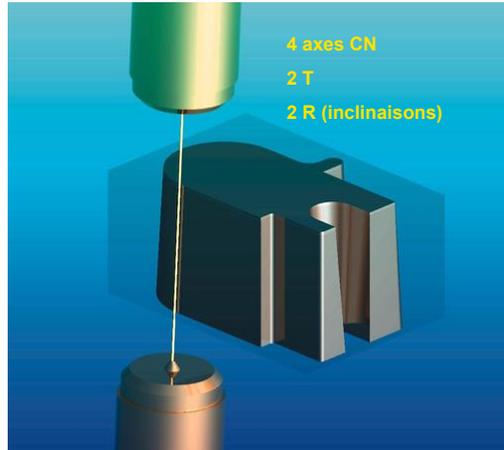
	ébauche	1/2 finition	finition
Intensité I (A)	64	8	4
Durée d'impulsion T (μs)	50	25	3
État de surface Ra (μm)	11	3,5	1,5
Usure relative outil (%)	1	8	35

ÉTAT DE LA SURFACE USINÉE



PRINCIPE DE LA DÉCOUPE PAR FIL

- simplification géométrique de l'outil,
- géométries complémentaires outil/pièce,
- pilotage par CN 4 axes
- limitation : procédé de découpe.



PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ

Les caractéristiques techniques du procédé sont différentes du défonçage :

- énergie des impulsions plus faible,
- Ra de 2-5 μm en ébauche à 0,1 μm en super finition,
- précision géométrique de quelques μm sur des épaisseurs d'environ 100mm.

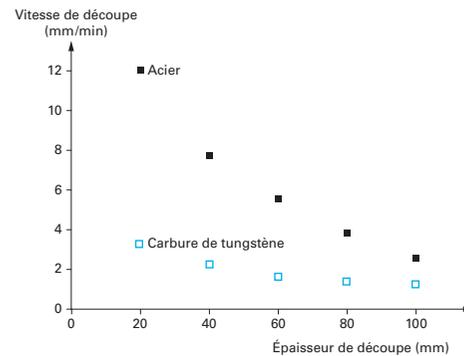
Les caractéristiques des matériaux pour le fil sont :

- haute résistance à la traction (limite élastique et à rupture),
- haute conductivité électrique,
- basse température de fusion,
- basse température de vaporisation.

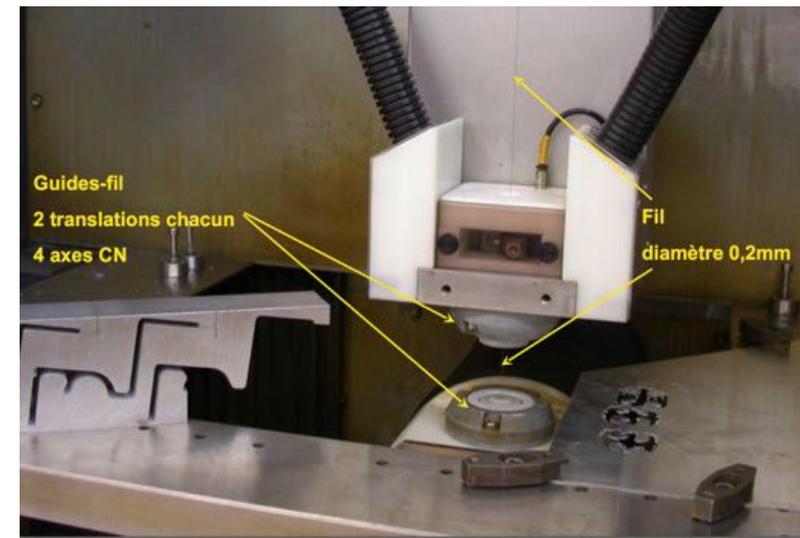
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ II

Pour des raisons technologiques, on préfère que le matériau du fil soit vaporisé plutôt que fondu (il est plus facile d'évacuer un gaz que des particules solides dans l'espace restreint produit par la saignée).

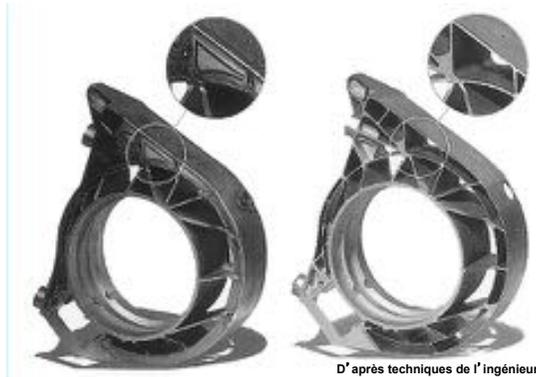
La vitesse d'avance dépend des caractéristiques du matériau découpé et de son épaisseur :



TECHNOLOGIE DES MACHINES



EXEMPLES DE PIÈCES



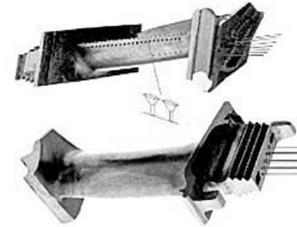
D'après techniques de l'Ingénieur

Porte moyeu arrière de formule 1 en titane. La découpe fil (40h) remplace l'usinage de 10 pièces et leur soudage à l'aide d'un gabarit dont le montage est très complexe (60h). La pièce fabriquée est plus légère et plus résistante.

EVOLUTIONS DU PROCÉDÉ

La technologie (à fil ou à enfonçage) se développe aujourd'hui pour des applications de micro-usinage :

- perçage de trous non cylindriques.

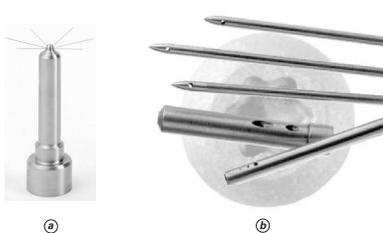


Perçage de trous hélicoïdaux dans des aubes de réacteurs d'avions pour assurer leur refroidissement.

EVOLUTIONS DU PROCÉDÉ

La technologie (à fil ou à enfonçage) se développe aujourd'hui pour des applications de micro-usinage :

- perçage de trous non cylindriques.
- perçage de trous de diamètre inférieur à 0,1mm sur des profondeurs importantes (quelques mm). Sur de faibles profondeurs on peut descendre à des diamètre de 0,01mm.

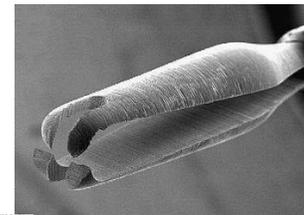


Perçage de micro trous dans des injecteurs diesel de dernière génération.

EVOLUTIONS DU PROCÉDÉ

La technologie (à fil ou à enfonçage) se développe aujourd'hui pour des applications de micro-usinage :

- perçage de trous non cylindriques.
- perçage de trous de diamètre inférieur à 0,1mm sur des profondeurs importantes (quelques mm). Sur de faibles profondeurs on peut descendre à des diamètre de 0,01mm.
- micro-découpe par fil en utilisant des fils en tungstène ou molybdène de 0,02mm de diamètre.



Usinage par fil d'un instrument de micro-chirurgie.

Usinage électrochimique



Oxydo-réduction
●●○

Electrolyse
○

OXYDO-RÉDUCTION

Définition 1

Une **OXYDATION** est une perte d'électron(s) $A \longrightarrow B + n \cdot e^-$
Exemple : $M \longrightarrow M^{n+} + n \cdot e^-$

Définition 2

Un **RÉDUCTEUR** est une entité chimique qui perd un ou plusieurs électrons.

Définition 3

Un **COUPLE REDOX** est constitué d'un oxydant et d'un réducteur conjugués.



Rappels d'électrochimie

- 1 Oxydo-réduction
- 2 Electrolyse

Oxydo-réduction
●●○

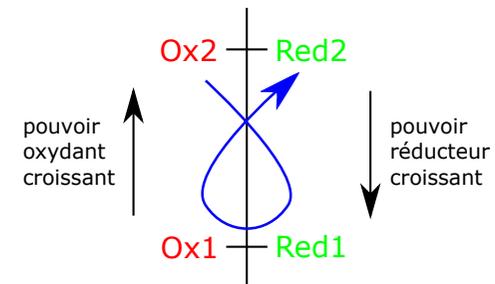
Electrolyse
○

RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION

Il y a conservation de la charge électrique, donc développement **simultané** d'une oxydation **et** d'une réduction.



La réaction est spontanée si les conditions énergétiques sont favorables (règle du γ).



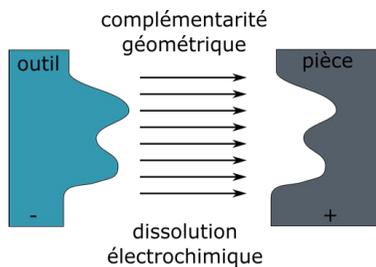
ASPECTS GÉOMÉTRIQUES

- Les réactions homogènes ont souvent lieu en phase liquide.
- Les réactions hétérogènes ont lieu à l'interface solide/liquide.

Définition
une **ANODE** est le lieu d'une **oxydation**.
une **CATHODE** est le lieu d'une **réduction**.

- à l'échelle microscopique c'est le cas de la corrosion. C'est cette réaction redox qui est utilisée pour la gravure chimique du cuivre :
$$\text{Cu} + 2\text{Fe}^{3+} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{Fe}^{2+}$$
- à l'échelle macroscopique il s'agit de l'électrolyse.

PRINCIPE ET PHÉNOMÈNES



Phénomènes
Un processus électrochimique :

- Oxydation du matériau de la pièce - anode
$$\text{M} \longrightarrow \text{M}^{n+} + n \cdot \text{e}^{-}$$
- Réduction à la surface de l'outil - cathode
$$\text{H}_3\text{O}^{+} + \text{e}^{-} \longrightarrow \frac{1}{2}\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

Usinage Electro-Chimique (ECM)

- 1 Principe
- 2 Modélisation
- 3 Exemples
- 4 Machines
- 5 Exemples II

PRINCIPE ET PHÉNOMÈNES II

Conditions :

- matériau de la pièce oxydable dans le milieu utilisé,
- milieu conducteur électrique, indifférent : électrolyte, solution aqueuse de NaCl, NaNO₃, ...
- conservation de la géométrie de l'outil : dépôts déposés sur la cathode d'une cellule d'électrolyse interdits !

Un processus électrochimique associé à un processus strictement chimique :
$$\text{M}^{n+} + n \cdot \text{OH}^{-} \longrightarrow \text{M}(\text{OH})_n$$

PRINCIPE ET PHÉNOMÈNES II

Un processus électrochimique associé à un processus strictement chimique : $M^{n+} + n \cdot OH^{-} \longrightarrow M(OH)_n$

Copeaux :

- Boues d'hydroxydes métalliques à la surface de la pièce, insolubles, inertes, isolants électriques.
- Bulles de H_2 à la surface de l'outil.

→ Circulation de l'électrolyte !!!

LOI QUANTITATIVE GLOBALE



Faraday, 1832

$$M \longrightarrow M^{n+} + n \cdot e^{-}$$

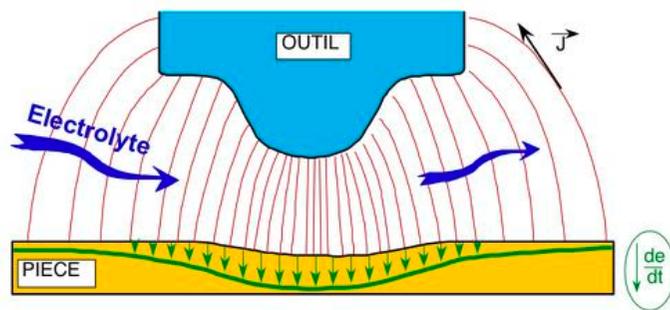
$$A \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow n, F$$

$$m = \frac{A}{nF} \int_0^T i(t) \eta dt$$

n : valence
A : masse atomique
T : durée de l'usinage
t : temps

F = 1 Faraday = 96500 Coulombs
m : masse de matière enlevée
i : intensité du courant
 η rendement de la dissolution
prend en compte les éventuelles oxydations parasites à l'anode.

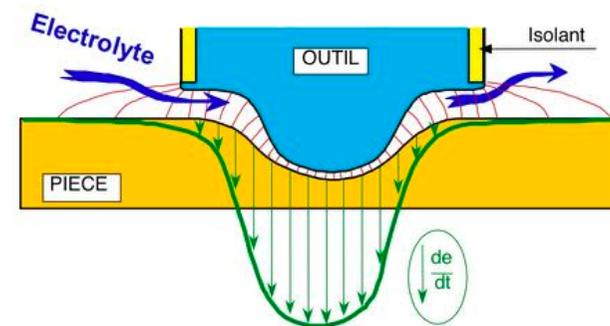
GÉOMÉTRIE



Pour localiser l'usinage, il faut localiser la densité de courant :

- isolation latérale de l'outil,
- intervalle outil/pièce faible, quelques dixièmes de mm.

GÉOMÉTRIE



Pour localiser l'usinage, il faut localiser la densité de courant :

- isolation latérale de l'outil,
- intervalle outil/pièce faible, quelques dixièmes de mm.

MODÉLISATION

Il faut décrire :

- l'enlèvement de matière par la loi de Faraday locale,
- la répartition de $\mathbf{J} = k \cdot \mathbf{E} = -k \cdot \text{grad}v$, i.e. $\Delta v = 0$, avec les conditions aux limites, la géométrie et les polarisations réelles,
- les perturbations de la conductivité k par les copeaux (boues, bulles) et par l'échauffement,
- l'écoulement de l'électrolyte,
- les transferts de chaleur,
- l'influence de la température sur la cinétique de dissolution et sur les polarisations,
- le tout en 3D en régime instationnaire !

MODÉLISATION III

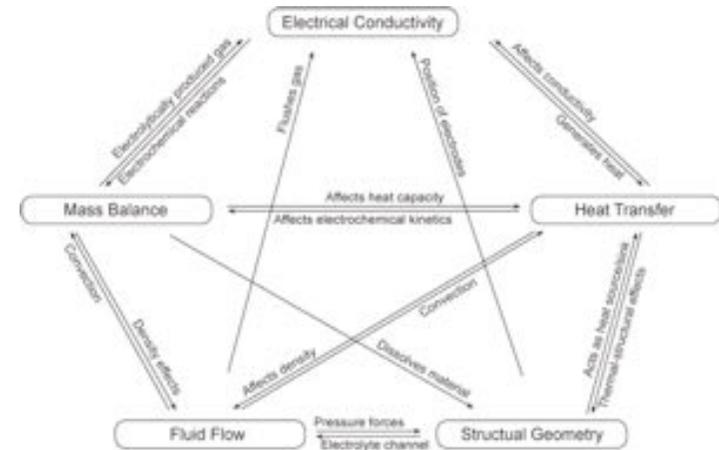
Géométries simples :

- deux électrodes planes parallèles,
- deux électrodes cylindriques coaxiales,
- deux électrodes sphériques concentriques.

Hypothèses

- conductivité constante : l'échauffement compense la pollution,
- rendement constant dans le temps,
- répartition de \mathbf{J} sans effets de bords,
- alimentation à tension imposée constante,
- polarisations constantes et uniformes,
- avance constante dans le temps.

MODÉLISATION II



Comsol. http://www.comsol.fr/stories/vantijum_philips_shaver_ecm/
page consultée le 10/12/2010.

DÉFONÇAGE VITESSE CONSTANTE II

Intérêt du modèle :

- dimensionnement sommaire de l'outil,
- choix des paramètres d'usinage.

Limitations du modèle :

- hypothèses physiques très simplifiées : polarisations mal connues, ...
- si on augmente a , on diminue y_e : la précision augmente, la durée d'usinage diminue mais l'écoulement de l'électrolyte devient très délicat !!!

BILAN

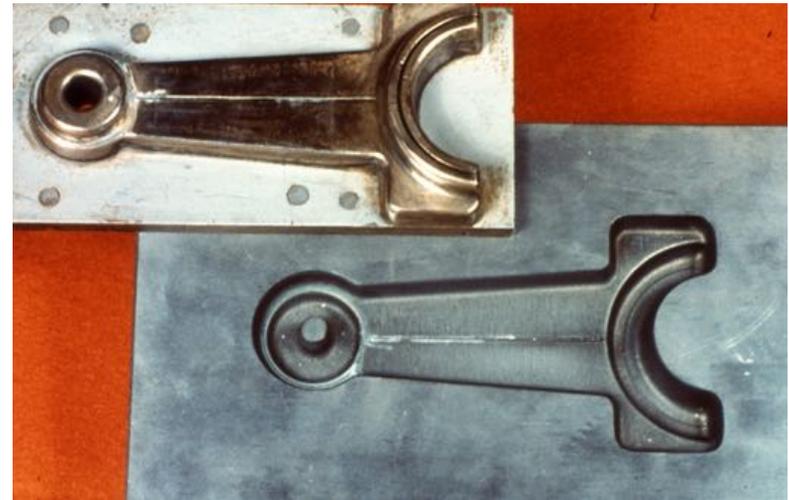
Avantages

- géométries complexes (usinages intérieurs et extérieurs, ...),
- précision "mécanique courante",
- outil "éternel" (si bien conçu),
- bonne microgéométrie,
- pas de dualité ébauche/finition,
- arrondis,
- R_m de la pièce sans influence,
- pas de contraintes mécaniques : intégrité de la pièce préservée.

Inconvénients

- mise au point des outillages,
- électrolyte souvent corrosif,
- pas d'angles vifs,
- élimination des copeaux (boues).

COMPLÉMENTARITÉ GÉOMÉTRIQUE OUTIL/PIÈCE



APPLICATIONS TURBORÉACTEURS MODERNES

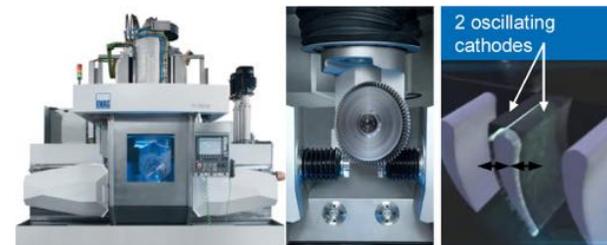
Les améliorations technologiques sur ces composants sont :

- température de fonctionnement plus élevée => nouveaux matériaux (composites à matrice céramique), augmentation de l'usage des superalliages à base Ni.
- amélioration de l'aérodynamisme dans la turbomachine : superfinition des aubes, structure blisk (blade + disk en une seule pièce).
- ...

D'où une recherche permanente de procédés pour améliorer la fabrication de ces composants !

MACHINES PECM

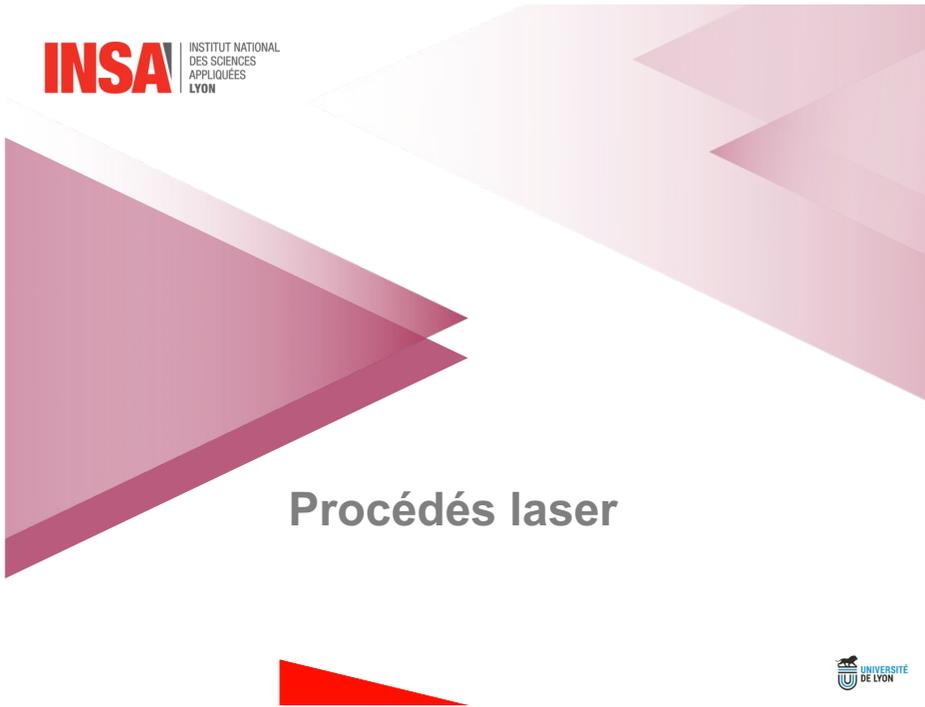
Les machines modernes à courant pulsé à plusieurs axes peuvent faire les phases d'ébauche, finition et polissage. Le générateur pulsé délivre jusqu'à 40000A avec une fréquence jusqu'à 10kHz. La surface usinée va jusqu'à 60cm² avec une vitesse d'avance de 3mm/min.



REDRESSEUR DE FLUX



La pièce fait 35cm de diamètre et de hauteur. Le matériau est un superalliage à base Ni, usiné sous 12V et 10000A.

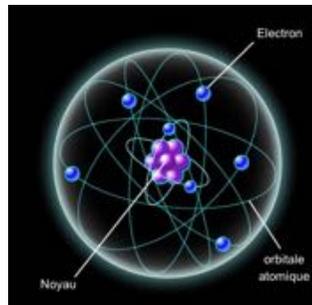


Procédés laser

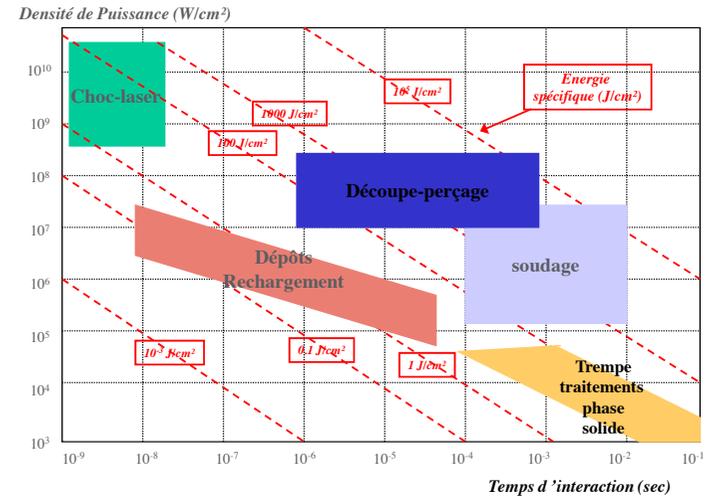


ATOMES ET NIVEAUX D'ÉNERGIE

- Un atome est constitué d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci.
- La position spatiale des électrons peut être décrite par les orbitales atomiques.
- Dans une version simplifiée de la réalité physique, on peut imaginer les orbitales comme représentant les différents niveaux d'énergie d'un atome.

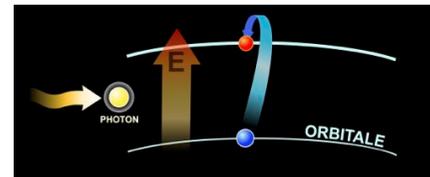


LASERS DE PUISSANCE : POUR QUOI FAIRE ?

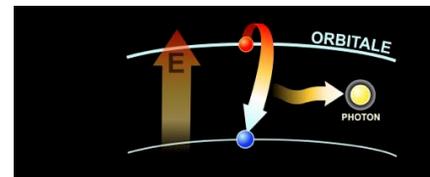


INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE I

Deux phénomènes de base peuvent être envisagés :



- **Absorption** : un photon est absorbé et provoque une hausse d'énergie $E_1 \rightarrow E_2$.

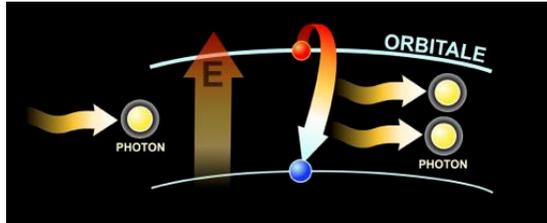


- **Emission spontanée** : un atome dans un état d'énergie élevé émet ($E_2 \rightarrow E_1$) un photon de direction et phase quelconque.

La conservation de l'énergie impose $W = E_2 - E_1 = h\nu$, ou ν est la fréquence du photon et h la constante de Planck.

INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE II

Au début du XX^{ème} siècle, Einstein a montré l'existence d'une 3^{ème} possibilité : l'**émission stimulée**.

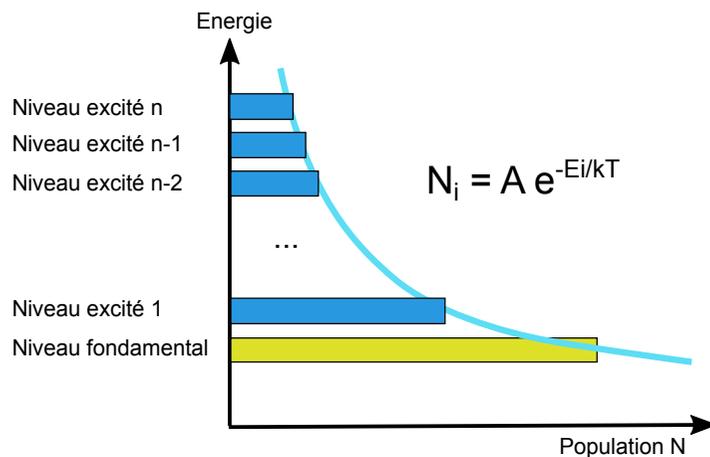


- Un atome excité absorbant un photon de fréquence adéquate change de niveau d'énergie ($E_2 \rightarrow E_1$) et émet deux photons.
- Ces deux photons ont la même direction, la même fréquence et la même phase que le photon incident.
- On parle alors d'émission cohérente.

EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?

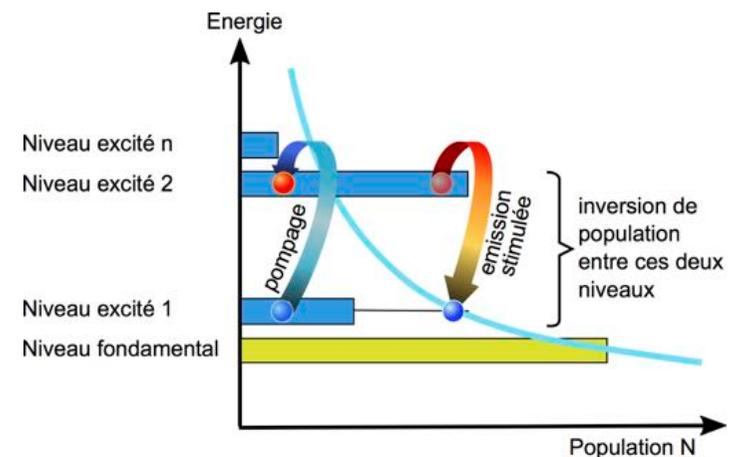
- Pour que l'émission stimulée fonctionne, on doit avoir en permanence plus d'atomes au niveau E_2 qu'au niveau E_1 .
- Il faut donc réaliser une **inversion de population**, le niveau le plus faible E_1 étant le plus stable et donc le plus courant.
- A l'état stable, la population des différents niveaux d'énergie est régi par la statistique de Boltzman.
- Plus l'énergie d'un niveau donné est importante, moins il est peuplé.

EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



Population des niveaux d'énergie - loi de Boltzman

EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?

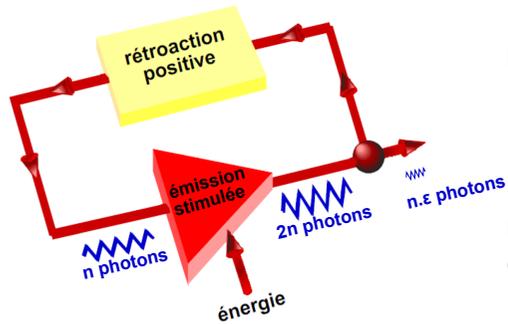


Maintient de la surpopulation du niveau 2 par pompage pour compenser l'émission stimulée

LASER

RÉSUMÉ

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

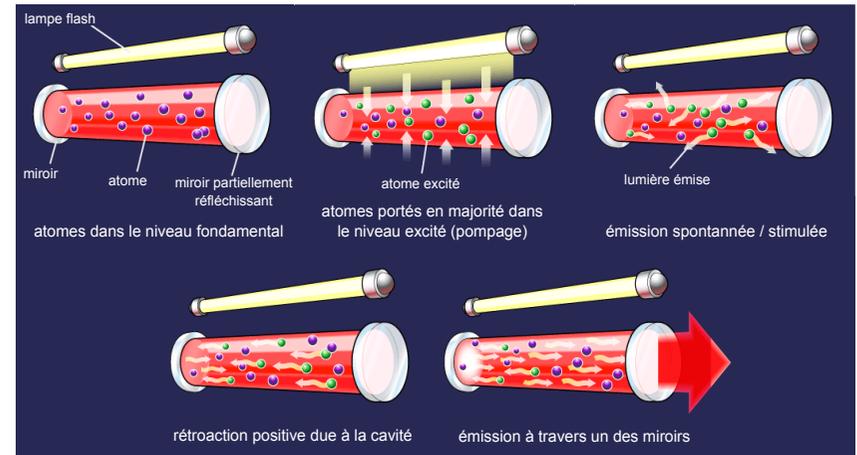


Propriétés du faisceau :

- quasi-parallèle,
- monochromatique,
- cohérent.

Donc source d'une très grande brillance.

L'onde est amplifiée par exemple par une cavité résonante optique (interféromètre de Fabry-Pérot).



BILAN : MILIEU AMPLIFICATEURS ET POMPAGE

BILAN : ORDRES DE GRANDEUR

Milieux amplificateurs : plusieurs centaines.

- Solide : ions dans monocristal ou verre.
- Liquide : colorants.
- Gaz : plasmas.
- Jonction semi-conducteurs : diode.
- Radicaux libres : excimères.
- Etc.

Pompage : environ 40 méthodes.

→ Plus de 1000 lasers ... dans les labos de recherche.

Puissance émise.

- quelques μW à quelques dizaines de kW (sources industrielles).

Durée d'émission.

- du continu à 10^{-15}s .

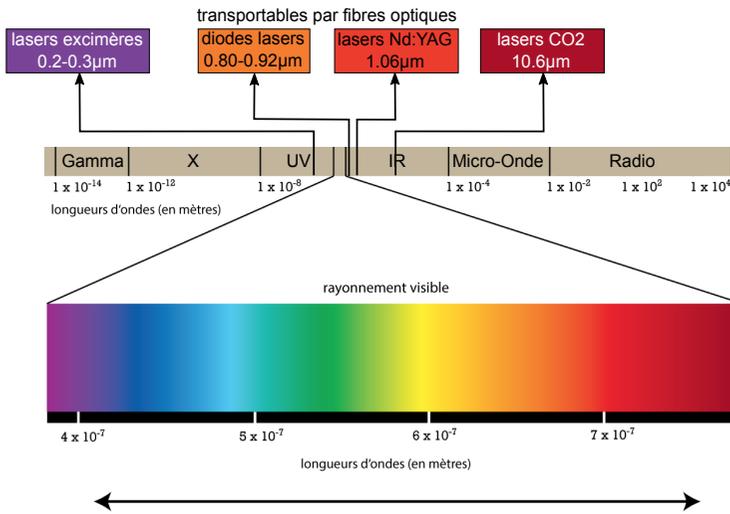
Energie par impulsion.

- du mJ à quelques dizaines de J.

Deux douzaines de lasers industriels.

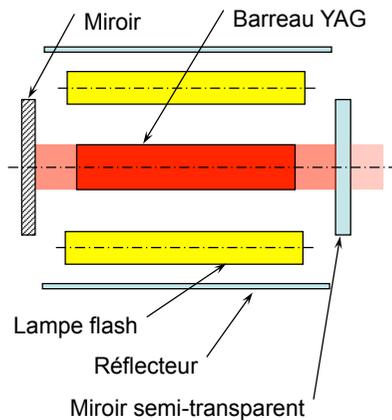
→ Lasers de puissance **P > 100W**.

SOURCES DISPONIBLES



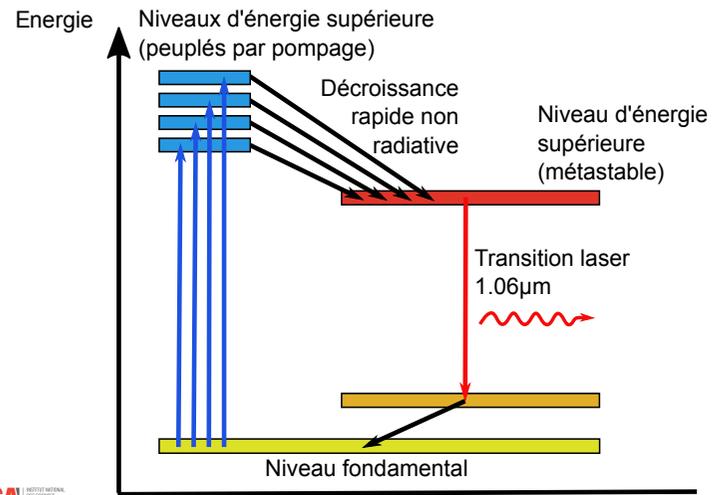
LASER YAG - ND II

- Pompage optique (lampes flash ou diodes).
- Proche IR $\lambda = 1.06\mu\text{m}$.
- Transport du faisceau par fibre optique.
- Sources continues (100W à 10kW) ou pulsées (qq. 10J, 10ns à 100 ms, 1 kW moyen, 1 GW instantané).



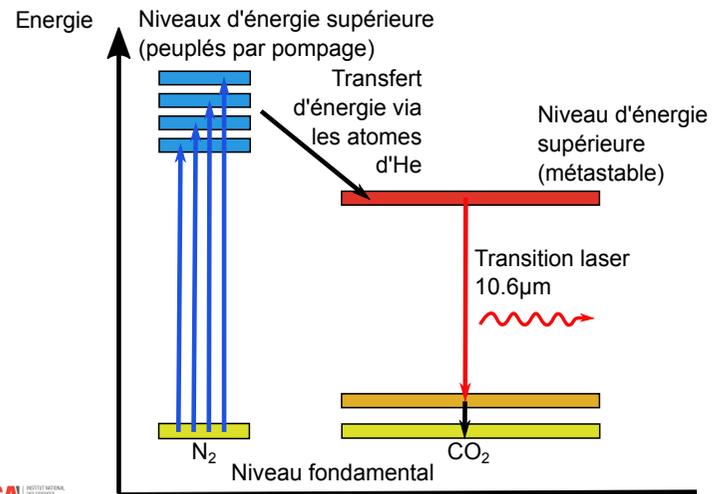
LASER YAG - ND

Monocrystal Yttrium - Grenat- Aluminium dopé au Néodyme.



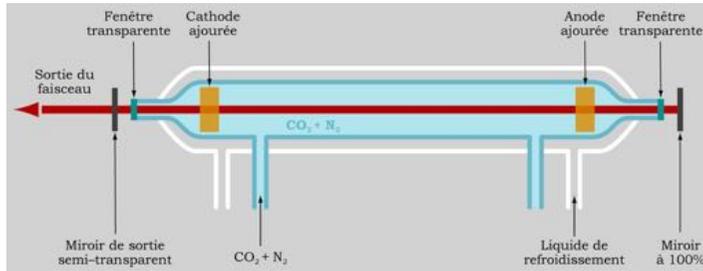
LASER CO₂

Mélange gazeux : 50% N₂ 50% He 1% CO₂.



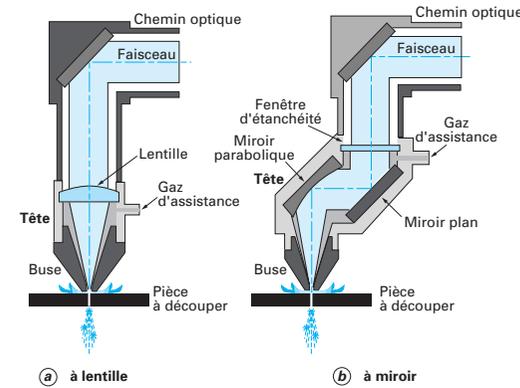
LASER CO₂ II

- Pompage par décharge électrique ou RF.
- IR moyen $\lambda = 10.6\mu\text{m}$.
- Transport du faisceau par miroirs et lentilles.
- Sources continues (100W à 50kW).



UTILISATION DE LA PUISSANCE

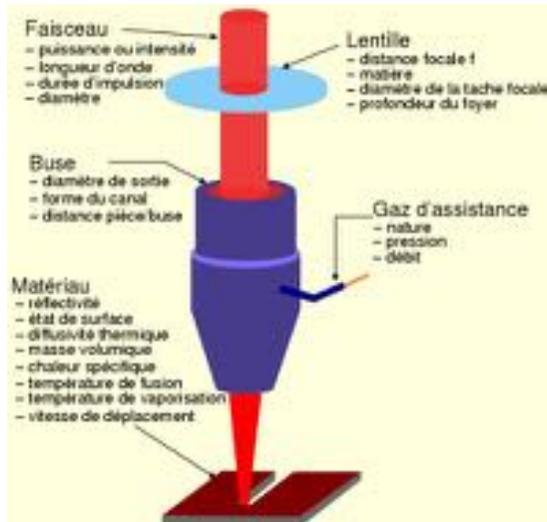
- Densité de puissance 10^3 à $10^9 \text{ W/cm}^2 \rightarrow$ focalisation.
- Transport du faisceau de la source vers la machine utilisatrice.



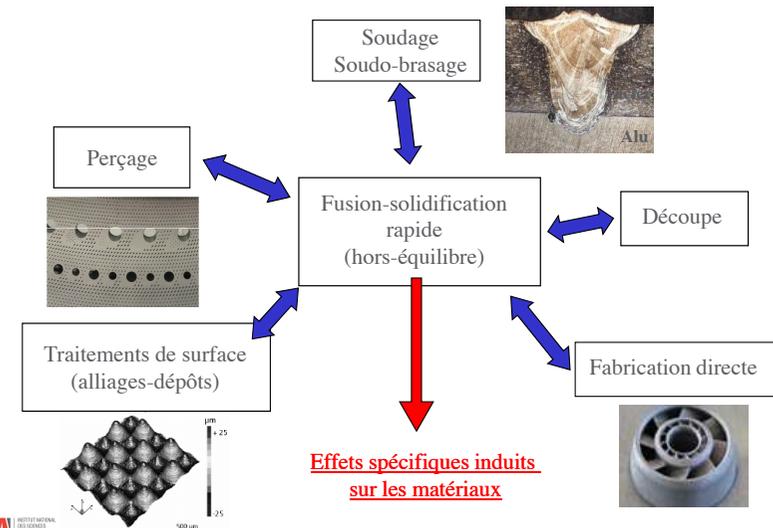
Matériaux optiques :

- YAG : verres fibres, lentilles.
- CO₂ : lentilles ZnSe, miroirs métalliques.

PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ



APPLICATIONS



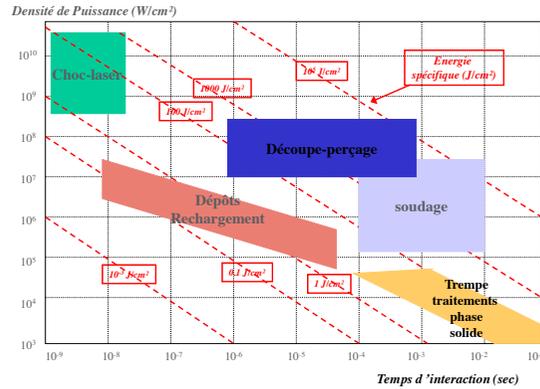
USINAGE

Phénomènes :

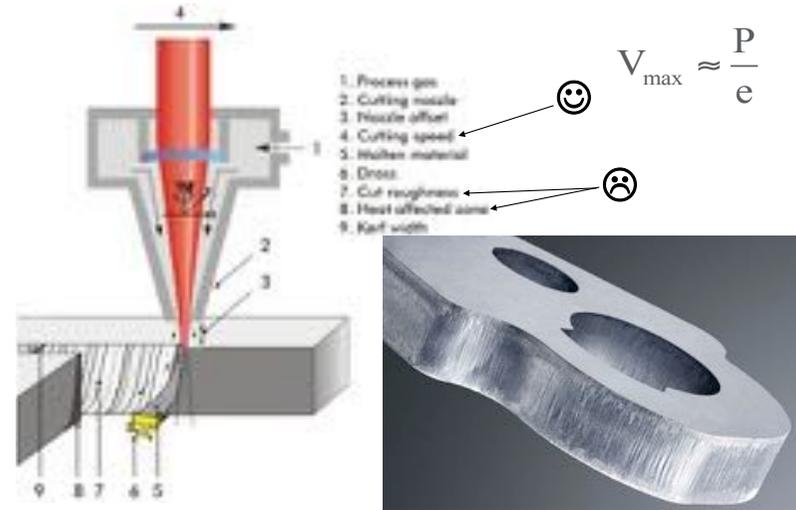
- fusion,
- vaporisation,
- dégradation thermique,
- dégradation photochimique.

Matériaux :

- métaux et alliages,
- bois et dérivés,
- plastiques,
- céramiques.



DÉCOUPE I



DÉCOUPE III

	Laser CO ₂	Laser YAG	Jet d'eau	Oxycoupage	Plasma
Acier	Vitesse (m/min)				
8mm	2,4	1,8	0,097	0,56	2,4
15mm	1,3	--	0,047	0,44	2,35
30mm	0,7	--	0,021	0,38	1,2
Alu	Vitesse (m/min)				
4mm	3,4	4,4	0,77	--	2,8
8mm	1,1	1,5	0,28	--	3,0
10mm	--	1,2	0,27	--	2,0
Inox	Vitesse (m/min)				
3mm	4,1	3,0	0,28	--	2,16
5mm	2,5	1,6	0,16	--	2,4
8mm	1,4	3,8	0,09	--	1,2

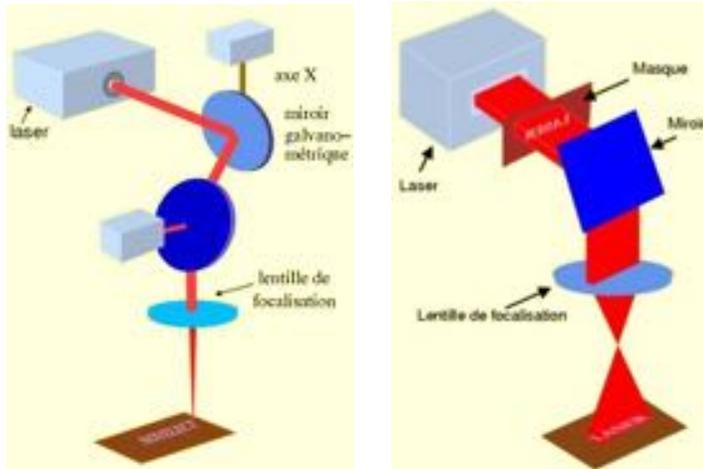
PERÇAGE



- Perçage oblique de faible diamètre.
- Précision pouvant atteindre le 1/10^{ème} de mm.

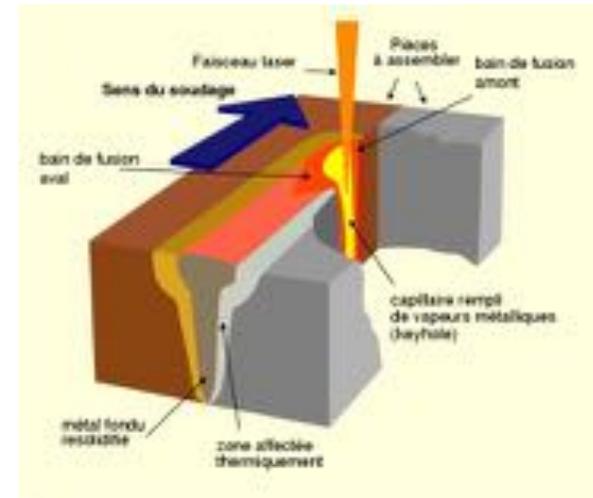
MARQUAGE I

Enlèvement de matière ou modification de surface.



SOUDAGE

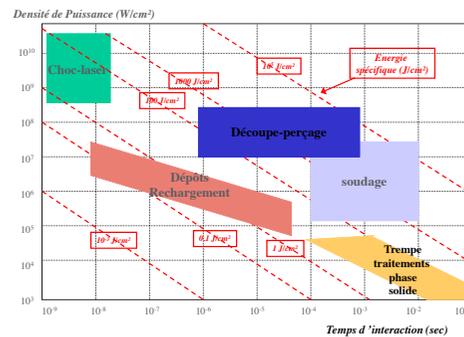
Soudage « par pénétration ».



TRAITEMENT DE SURFACE I

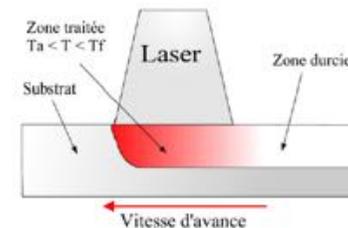
Modification des propriétés des matériaux métalliques.

- A l'état solide : trempe 10^3 W/cm^2 .
- Avec passage à l'état liquide 10^6 W/cm^2 .
- Gradients thermiques importants.
- Cinétiques rapides.
- Traitements localisés.



- Refusion/texturation de surface.
- Dépôts/rechargement.
- Création d'alliages in-situ.

TRAITEMENT DE SURFACE II



Trempe durcissement



FABRICATION ADDITIVE I

Fabrication directe par laser.

■ Selective Laser Melting

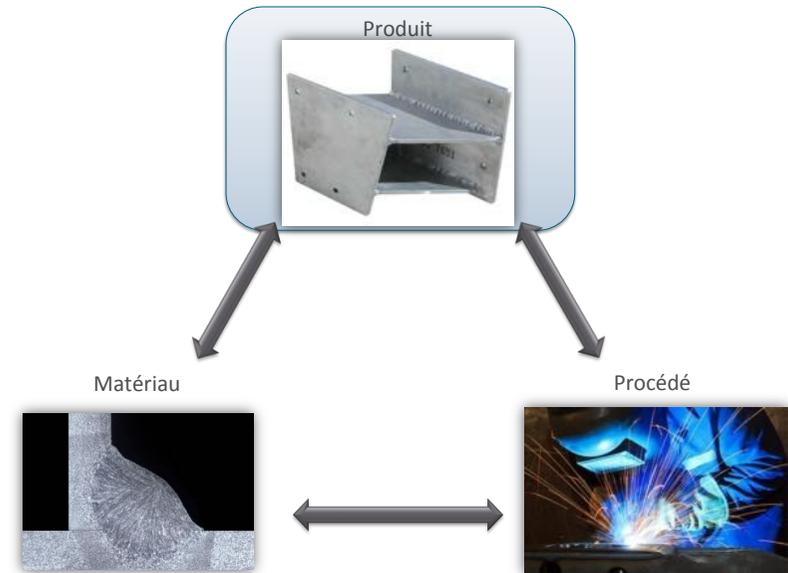


■ Direct Energy Deposition



Assemblage par soudage

Assemblage par soudage



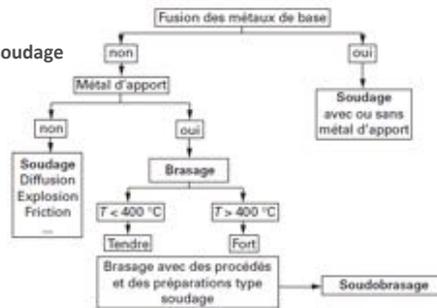
Soudage : définition

- **Soudage – Techniques de l'ingénieur**
 - Opération consistant à réunir deux ou plusieurs d'un assemblage pour en obtenir la continuité mécanique, thermique, électrique
 - Par chauffage et/ou intervention de pression
 - Avec ou sans produit d'apport dont la température de fusion T_{lf} est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base

La soudure est le résultat de l'opération de soudage

Brasage

- Opération consistant à assembler des surfaces métalliques à l'aide d'un métal ou alliage d'apport à l'état liquide, ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces
- Les surfaces assemblées ne participent pas par leur fusion à la constitution du joint



Source : Techniques de l'ingénieur

Le joint brasé est le résultat d'une opération de brasage.

Exemples de pièces

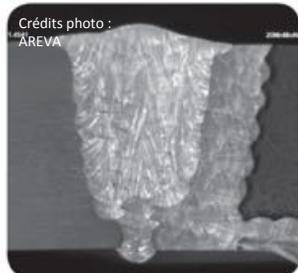
- **Bâtis mécano-soudés**



Source : mongin.eu

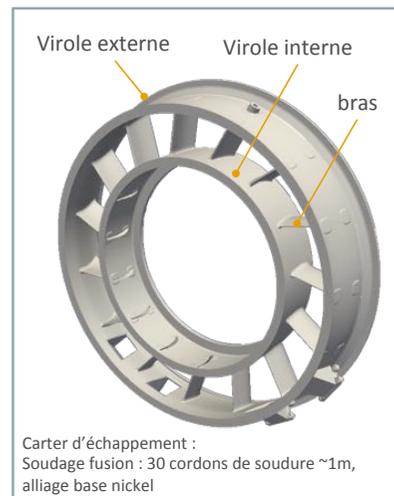
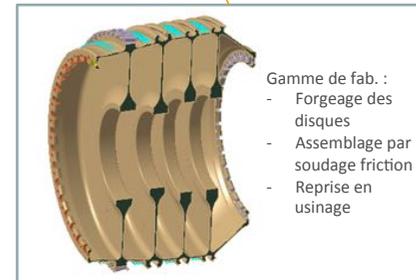
Exemples de pièces

- Éléments de générateurs de vapeur (Centrale nucléaire) – source : AREVA



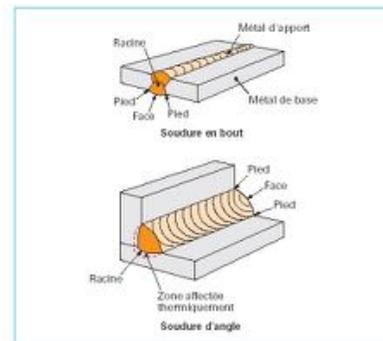
Exemples de pièces

- Turboréacteur – Source Safran



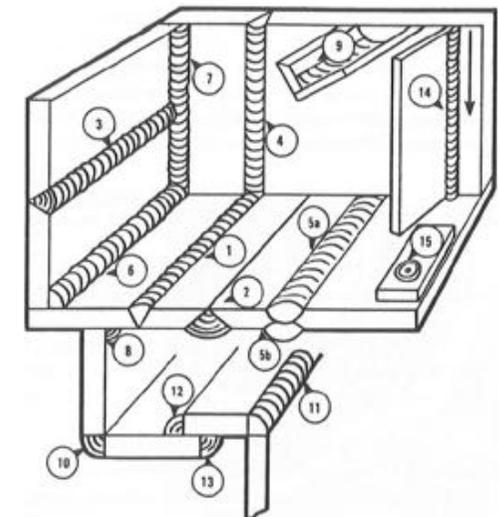
Vocabulaire

- Métal de base :
matériau de la pièce
- Métal d'apport :
matériau de l'électrode
- Face :
surface extérieure de la soudure
- Racine :
lieu de l'assemblage jusqu'ou le cordon a pénétré
- ZAT : Zone affectée thermiquement :
Zone non fondue mais échauffement /refroidissement rapide

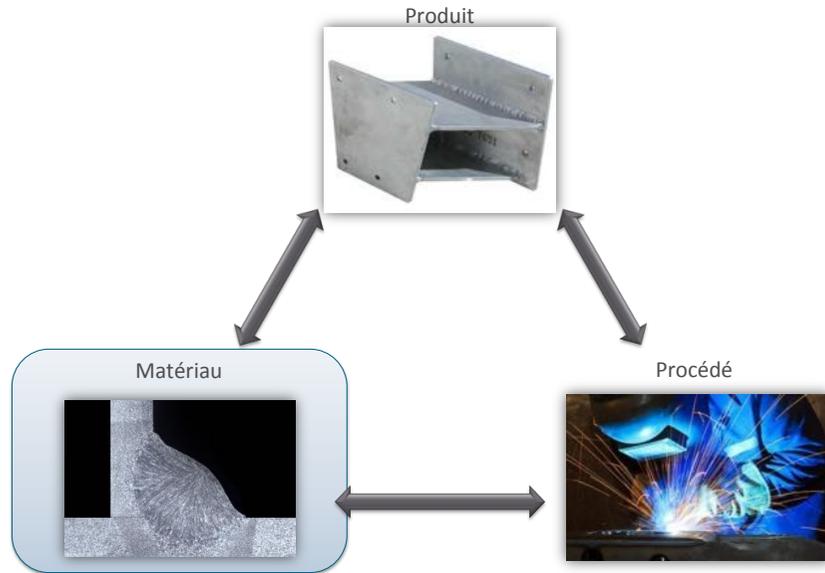


Vocabulaire

- Types de soudure :
Bord à bord : 1-5
En angle intérieur : 6-9, 14
En angle extérieur : 10, 11
Soudure à clin : 12,13
En bouchon : 15



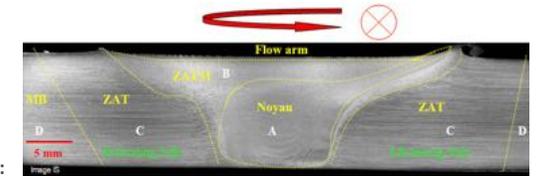
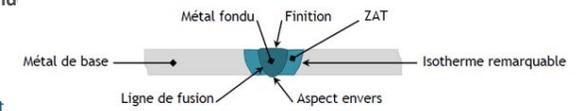
Assemblage par soudage



Conséquences du soudage

Pour du soudage en phase liquide

- Zone fondue
⇒ métal resolidifié
- Zone Affectée Thermiquement
Zone non fondue mais dont les propriétés métallurgiques ont été modifiées
- Métal de base



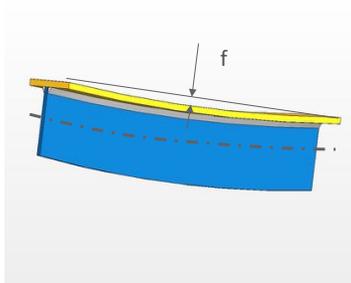
Zone affectée thermo-mécanique – Soudage FSW

⇒ Plusieurs conséquences notables :

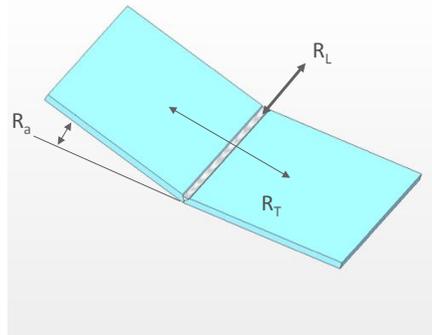
- Distorsions résiduelles des pièces
- Contraintes résiduelles
- Modifications métallurgiques

Retrait du cordon

- Diminution du volume de la zone fondue au refroidissement (retrait > dilatation)
⇒ Retrait longitudinal (parallèle au cordon)
⇒ Retrait transversal (lié à la largeur du cordon)
⇒ Retrait angulaire



Distorsions résiduelles sur une soudure en T



Définition des retraits sur une soudure bord à bord

Déformations résiduelles

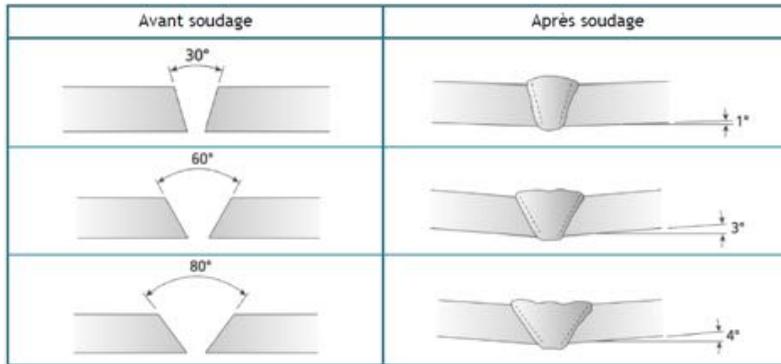
- Ordres de grandeurs du retrait angulaire – Déformation de soudage d'assemblages T

Avant soudage	Après soudage

Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

Déformations résiduelles

- Ordres de grandeurs du retrait angulaire – Déformation de soudage de joint V



Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

- Pour limiter les déformations :

Bonne préparation des joints ; limiter le nombre de passes ; augmenter la vitesse de soudage ;
préchauffage ; bridage ; pointage

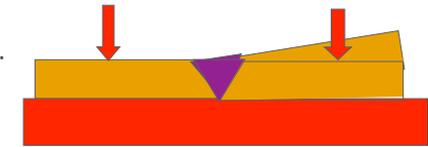
INSA

GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

14

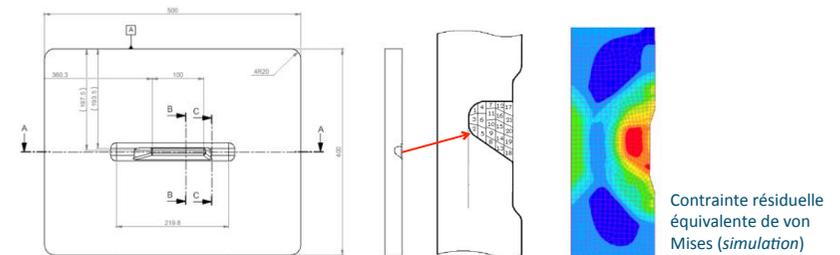
Contraintes résiduelles

- Pièces laissées libres \Rightarrow déformation maxi.
- Pièces bridées \Rightarrow contraintes maxi.



- La zone chauffée est « bridée » par le métal de base, froid, lors de sa dilatation
 \Rightarrow Contraintes résiduelles de traction dans le cordon et de compression autour

- Exemple : opération de réparation sur pièce en Inconel 600 – 21 cordons, TIG pulsé



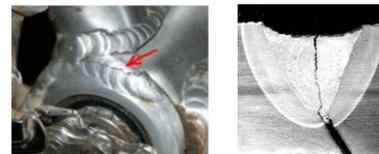
INSA

GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

15

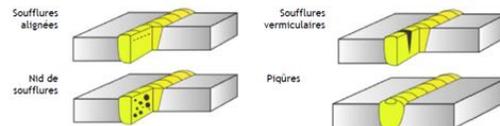
Principaux risques liés au soudage

- Fissuration à froid (ZAT), à chaud (zone pâteuse)



- Soufflure

Défauts creux, liés à la présence de gaz
Piqûres si débouchant



- Pollution, corrosion des surfaces

- Retassures, criques de solidification

Voir cours sur le moulage

- Inclusion (présence d'un corps étranger dans le cordon de soudure)

Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

INSA

GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

16

Conséquences métallurgiques - Aciers

- Transformations métallurgiques dans la ZAT

Effet de trempe plus ou moins rapide selon :

- la distance à la zone fondue
- La conductivité thermique
- L'épaisseur des pièces
- L'énergie apportée

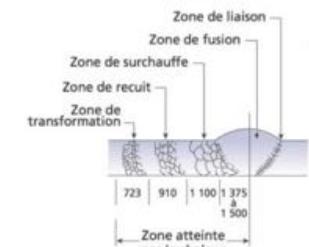
- Risque de formation de martensite (fragile) si trempe trop rapide

$\%C < 0,25\% \Rightarrow$ soudable

$\%C \in [0,25; 0,6\%] \Rightarrow$ soudable avec précaution

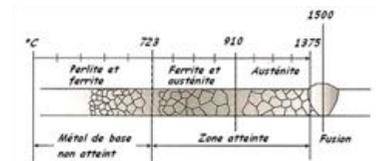
$\%C > 0,6\% \Rightarrow$ difficilement soudable

- Règles de calcul des pourcentages équivalents de carbone



Structure dans la ZAT

Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur



Effet de la température sur les grains dans l'acier
Source : rodacier.com

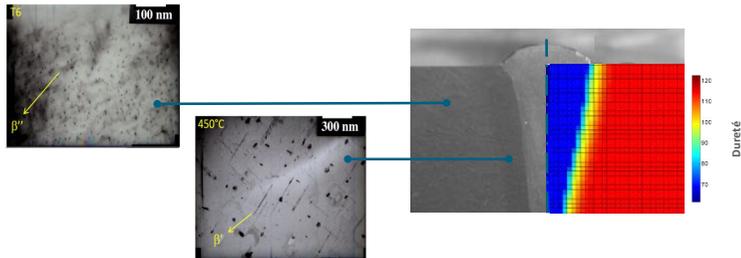
INSA

GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

17

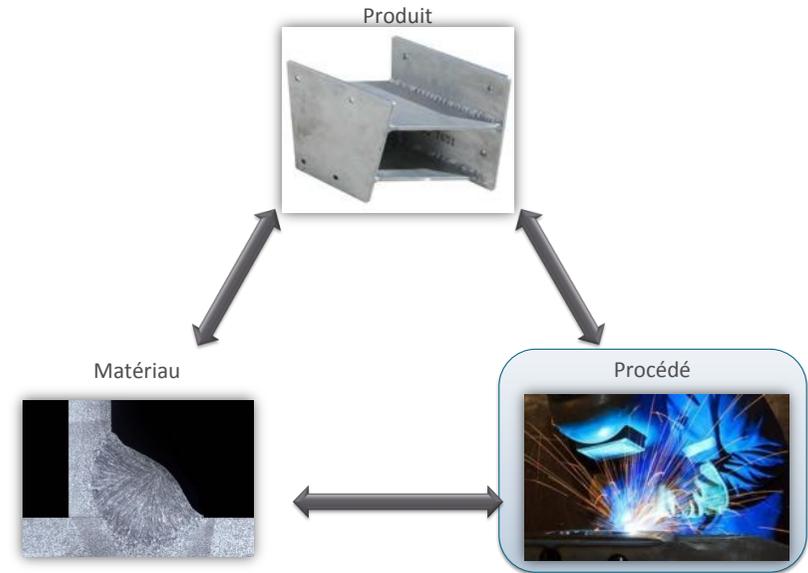
Autres matériaux

- **Soudage de l'aluminium**
Forte conduction thermique \Rightarrow difficulté à souder (*idem* pièces de grandes dimensions)
- **Alliages à durcissement structural (certains alliages d'aluminium, base nickel)**
Chute des propriétés mécaniques dans la ZAT, fragilisation de la structure autour du cordon



Cartographie de dureté autour d'un joint en AA6061 soudé par faisceau d'électrons

Assemblage par soudage



Classification des procédés de soudage

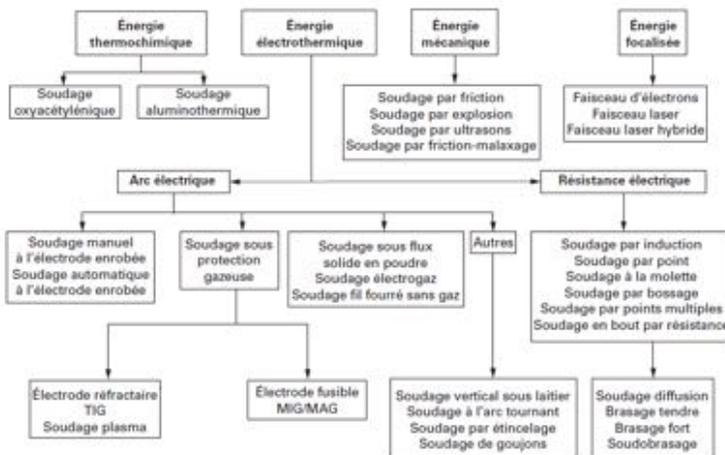
	PRINCIPE	ENERGIE	PROCEDE		
EN PHASE LIQUIDE	Coulée du métal d'apport	Foyer extérieur	Soudage à la poche		
		Réaction exothermique	Aluminothermie		
	Fusion de proche en proche du cordon	Combustion gazeuse		Soudage oxy-acétylique	
			Electrode réfractaire	TIG	
		Arc électrique	Electrode fusible, métal d'apport		Electrode enrobée
					Fil fourré
					MIG
					MAG
					Sous flux solide
					Sous laitier
			Chaleur du plasma	Plasma	
			Energie cinétique	Faisceau d'électrons	
		Energie optique	Laser		
Recouvrement	Effet Joule dans une résistance		Par points		
			A la molette		
			Par bossages		
En bout			Etincelage		

Classification des procédés de soudage

	PRINCIPE	ENERGIE	PROCEDE
SOLIDE	Pression de contact	Foyer extérieur	Colaminage
			Diffusion moléculaire
	Onde de choc	Echauffement mécanique	Explosion
	Frottement solide		Friction
		Stir welding	

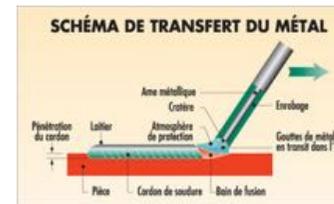
- **Phase liquide :**
Métal en fusion mobile \Rightarrow occupation de l'espace entre éléments solides
- **Phase solide :**
 $T \sim 0.6T_f [K]$ + effort presseur
Gain énergétique
Déformations résiduelles moindres
Possibilité de rester sous les températures de transfo. métallurgiques

Classification des procédés de soudage, selon la nature de l'énergie utilisée - variante



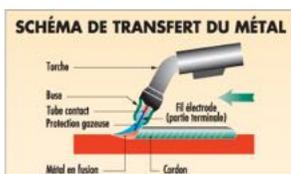
Electrode enrobée

- Courant ; faible investissement ; manuel ; peu productif
- Electrode enrobée => stabilisation arc, guidage fil, protection métal d'apport et métal fondu (laitier)
- Aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment), bases nickel et fontes



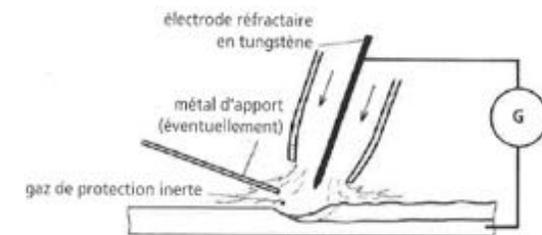
MIG/MAG

- Metal Inert/Active Gaz ; même poste, simple changement du fil et du gaz
 - Automatisable ; pas de laitier ; $\Phi \text{fil} = [0,6 - 2,4 \text{ mm}]$
 - Grande souplesse \leq diamètre fil, type régimes : variation énergie apportée
 - MIG : alliages légers et cuivreux, nickel et ses alliages, titane et ses alliages
 - MAG : aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment)
- Fortes épaisseurs, pas de laitier, torche encombrante, apport de matière important



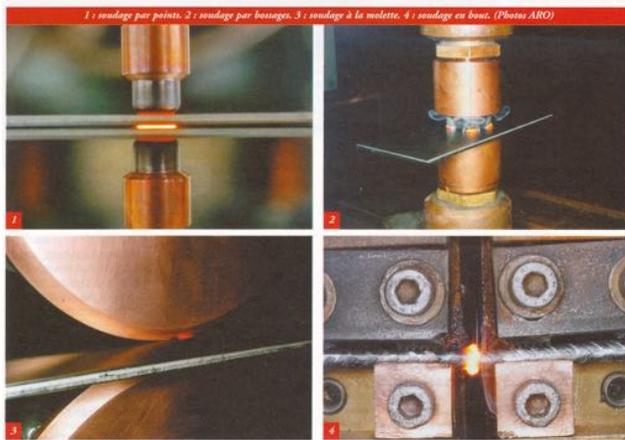
TIG

- Tungsten Inert Gaz : électrode réfractaire en Tungstène + Argon et/ou Hélium
- Avec ou sans métal d'apport ; lent mais grande qualité => passes racines et métaux nobles ; automatisable ; $e = 0,5 - 6 \text{ mm}$
- Aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment), alliages légers et cuivreux, nickel, titane, tantale, zirconium et leurs alliages
- Faible apport de métal
- Température élevée



Soudage par résistance

- ou soudage par points
- Rapide, bonne qualité
- Déformations faibles
- Soudure continue possible
- Epaisseur limitée

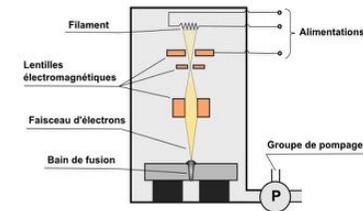


GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

26

Faisceau d'électrons

- Faisceau d'électrons créé par techno ~cube cathodique => énergie cinétique => chaleur
- Vide primaire (0,1-1Pa) => pompage long 5min/m³ mais pas d'oxydation !
- Haute densité d'énergie, $prof/L_{fondue}=40-50$; jusqu'à 300mm acier (P=100kW)
- Faible largeur fondue => apprêter en usinage
- Faibles distorsions => pas de reprise

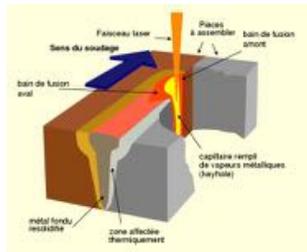
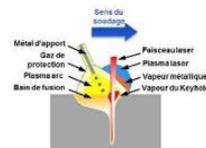


GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

27

Laser

- Laser, Nd:Yag CO₂ sur S=0.1mm² + gaz inerte
- Haute densité énergie (10-100MW/cm²) ; $\eta \approx 6\%$
- Faibles distorsions =< grande pénétration, faible largeur
- Epaisseurs 0.1 à 6-8mm

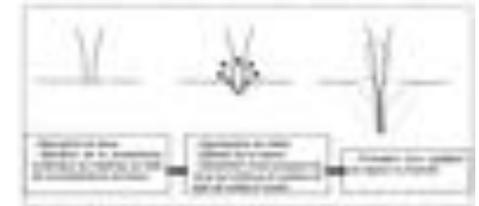


GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

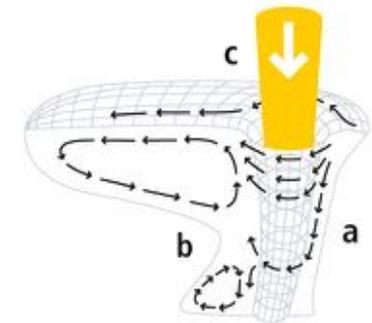
28

Formation du keyhole

- Structure typique des soudures à haute densité d'énergie
- Forte pénétration de la soudure



0,0000s 0mm/s Luleå Tekniska Universitet



GM-3-PROFA – Assemblage - Soudage

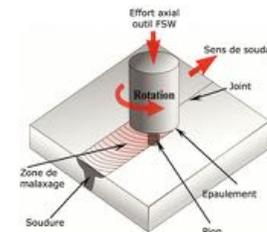
Soudage friction

- Procédé en phase solide
- Très rapide, faibles déformations
- Sur machine dédiée \Rightarrow plutôt sur des séries de pièces
- Ex : soudage acier par restitution d'énergie cinétique d'un volant d'inertie $\Rightarrow S=16dm^2$ avec $D_{max}=1.5m$
- Précision élevée, pas de reprise d'usinage : coaxialité 0,2mm, calage angulaire 0,5°



Soudage par friction malaxage (E_riction S_tir W_elding)

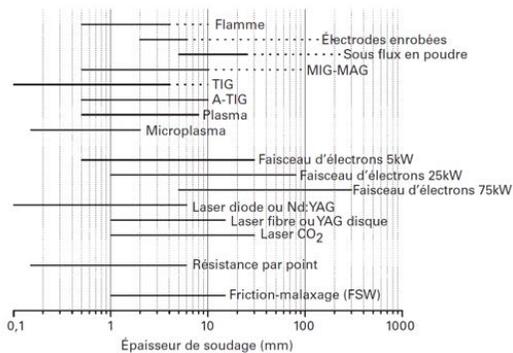
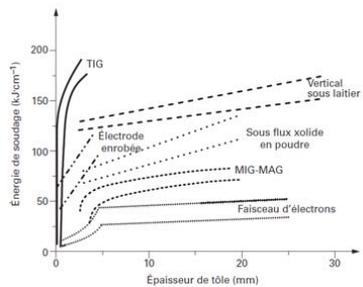
- Procédé récent : brevet TWI 1991
- Frottement solide avec outil tournant, fort bridage ; pas de métal d'apport
- Essentiellement alliages légers
- $E=0,2E_{MIG}$; pas de fumée, pas d'UV
- 1 outil = 1000m soudure Alu 6xxx ; e=15mm (30 sur 2 passes)
- Montable sur une machine d'usinage...



Bilan – Comparaison des procédés de soudage

Performance des procédés de soudage en termes de possibilité d'épaisseur soudable en mono ou multipasse (pointillés)

Influence du procédé et de l'énergie de soudage sur les épaisseurs soudables atteintes



Source : Techniques de l'ingénieur

Bilan – Avantages/Inconvénients

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Avantages • Liaison continue • Economie de matière • Etanchéité • Automatisation (souvent) • Bien adapté aux métaux • Productif (pas de perçage, repérage simple, rapide...) | <ul style="list-style-type: none"> • Inconvénients • Liaison indémontable • Modifie la structure matière • Induit des contraintes et/ou des déformations résiduelles • Difficile de joindre des matériaux différents • Le contrôle précis est complexe • Tous les matériaux ne sont pas soudables (ex. AU4G, fonte...) |
|---|--|

Bilan – Quelques règles de conception

- **Règles de conception**

Sollicitation du cordon en traction ou cisaillement

Situer les cordons dans les zones les moins sollicitées (fibre neutre)

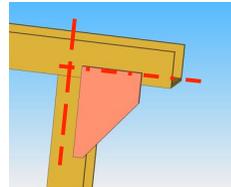
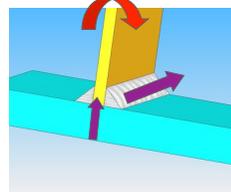
Limiter les déformations en disposant des soudures symétriques

Une sollicitation // axe de la soudure est préférable

Éviter le croisement des cordons

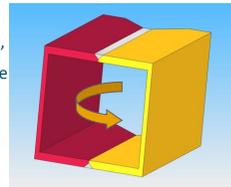
Privilégier au maximum la réalisation de soudures à plat

⇒ problématique de maintenance des pièces massives



- **Nombreuses règles de calcul disponibles et réglementations**

Eurocodes (construction métallique EC3), RCCMR (ingénierie nucléaire), CODAP (appareils à pression, réservoirs...), FEM (fédération européenne de la maintenance : engins de levage et de maintenance)

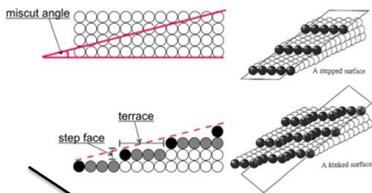


Parachèvement de surface

Généralités

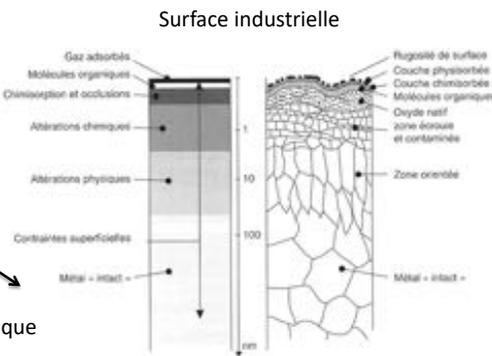
C'est quoi une surface?

Energie superficielle dépendant de la désorientation par rapport au plan de haute densité du cristal



échelle
atomique

échelle
micrométrique

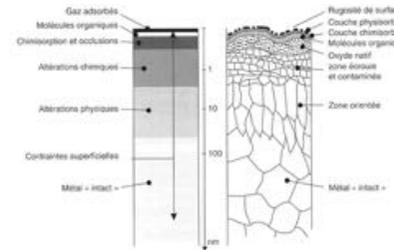


C'est quoi une surface?

Propriétés physiques :
Conductivité thermique
Pouvoir réflecteur

Propriétés chimiques :
- réactivité

Propriétés mécaniques :
- dureté
- ténacité
- coefficient de frottement
- contraintes résiduelles



Propriétés géométriques :
- rugosité

Propriétés métallurgiques :
structure cristallographique
taille de grain
texture
inclusion, porosité

Pourquoi fonctionnaliser une surface?

Aspect, Pouvoir réflecteur



Biocompatibilité



résistance de contact



corrosion, oxydation



étanchéité



collage, adhésion
réactivité, catalyse...

frottement, usure

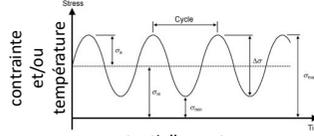


résistance à la fatigue



Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue

chargement cyclique en service



défauts de type inclusion, porosité



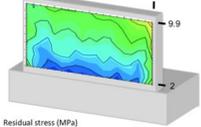
défauts de type rugosité



potentiellement sous atmosphère corrosive



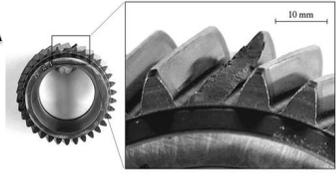
Contraintes internes de traction induites par le procédé de fabrication



fragilisation par corrosion sous contrainte aux joints de grains



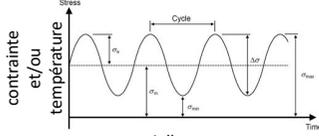
rupture par fatigue



Concentration de contrainte

Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue

chargement cyclique en service



défauts de type inclusion, porosité



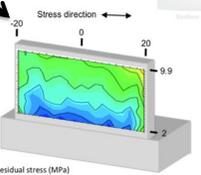
défauts de type rugosité



potentiellement sous atmosphère corrosive



Contraintes internes de traction induites par le procédé de fabrication



fragilisation par corrosion sous contrainte aux joints de grains



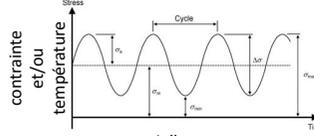
Concentration de contrainte

traitement thermique

réduction de la rugosité ex : polissage

Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue

chargement cyclique en service



défauts de type inclusion, porosité



défauts de type rugosité



potentiellement sous atmosphère corrosive



Ajout de contraintes superficielles de compression, écouissage de la surface ex : grenailage

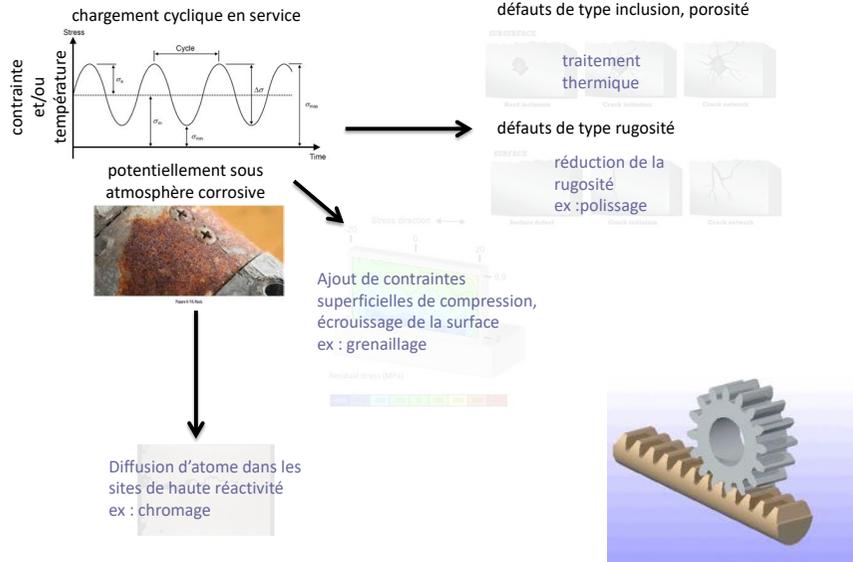


fragilisation par corrosion sous contrainte aux joints de grains



Concentration de contrainte

Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue



Revêtements & Traitements de Surface (RTS)

Traitements préparatoires :

- Nettoyage, Mise à vif de la surface
- Amélioration de l'aspect

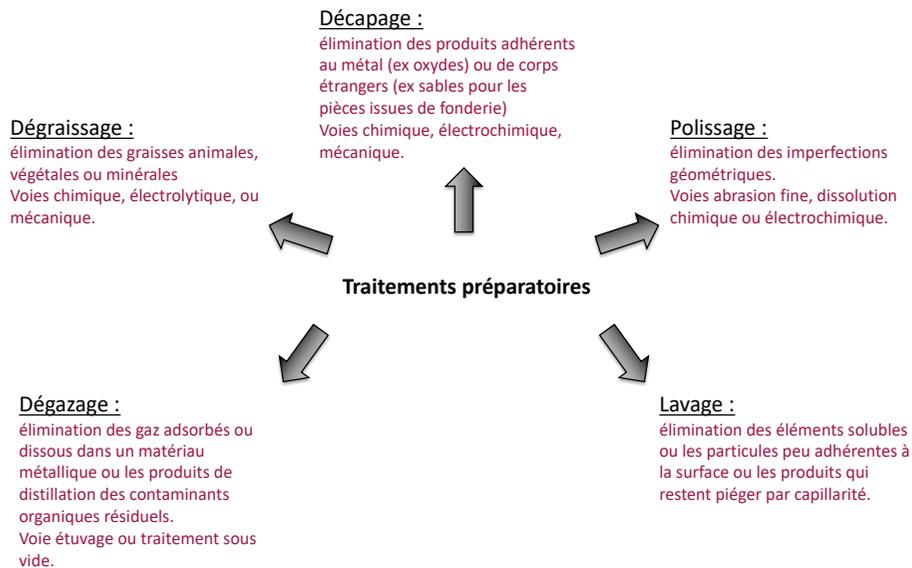
Traitement de surface :

Modification structurale superficielle des surfaces
Modification comportant un gradient dans l'épaisseur

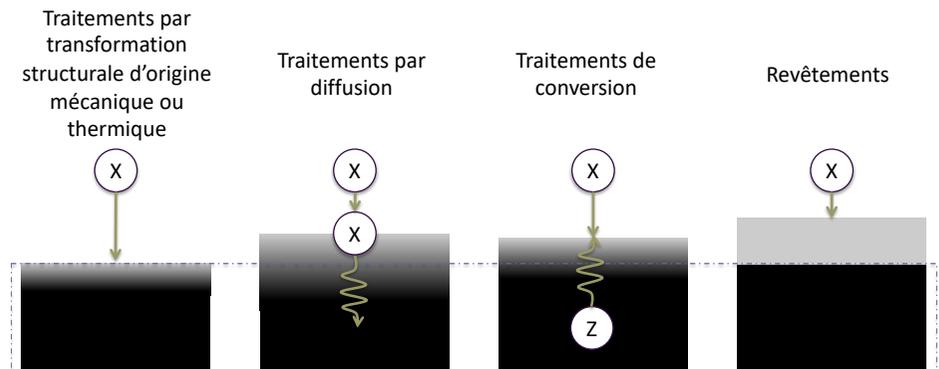
Revêtement :

Couche métallique, organique ou minérale déposée sur une surface de façon assez homogène sans modification notable du substrat

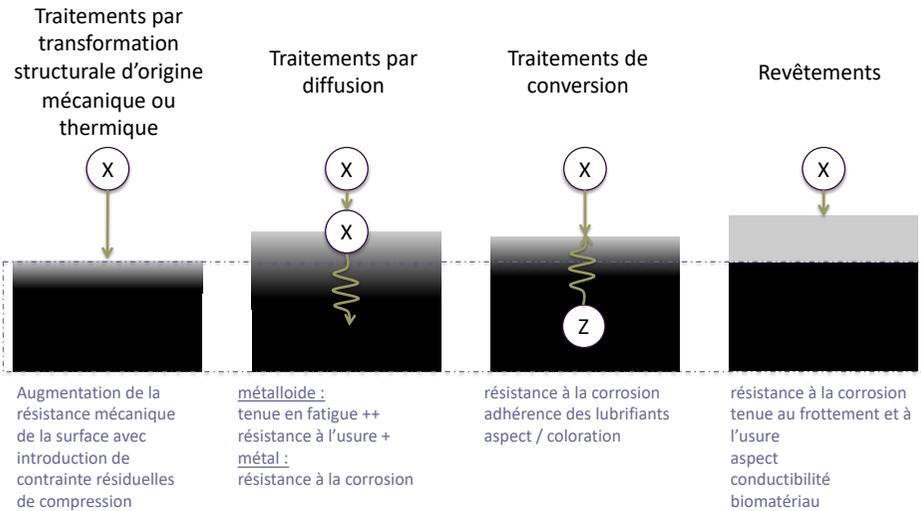
Les différentes classes de traitements préparatoires



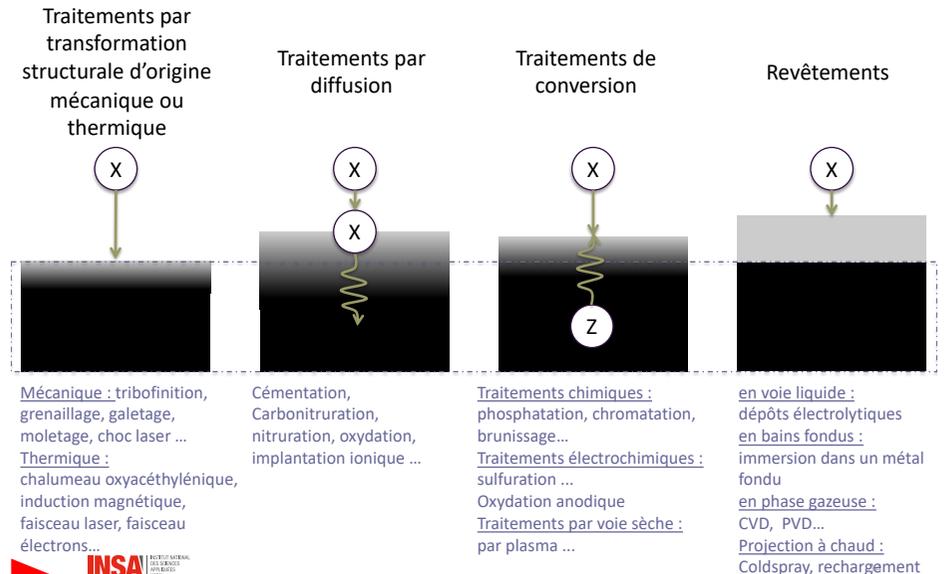
Les grandes familles de RTS classées par mécanismes d'édification des couches



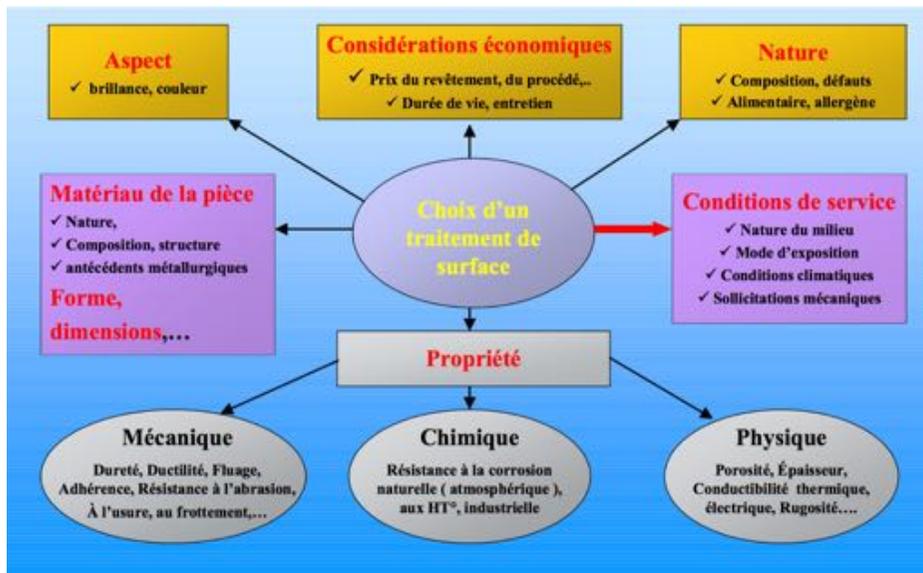
Les grandes familles de RTS classées par mécanismes d'édification des couches



Les grandes familles de RTS classées par mécanismes d'édification des couches



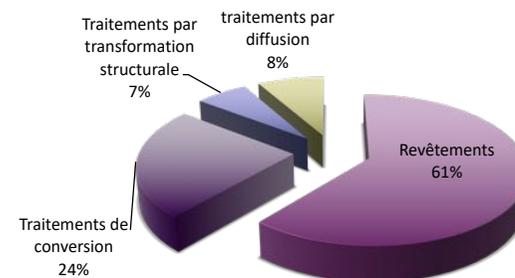
Critères de choix d'un RTS



Données économiques

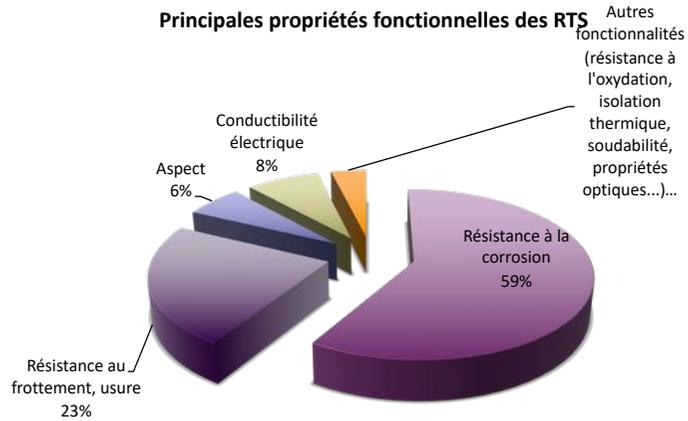
- Secteur d'activité de 440000 personnes en Europe (2004)
- 18300 entreprises en Europe (2004)
- 30000 personnes en France pour un chiffre d'affaire de 4GE (2004)

Répartition des différentes filières de traitements de surface en France (2000)



Données économiques

Principales propriétés fonctionnelles des RTS



Traitements préparatoires : Focus sur le polissage

Etats de surface obtensibles par les procédés conventionnels

Aspect	Terne		Mat		Brillant		Giacé				
	Grossière	Moyenne	Moyenne	Fine	Fine	Très fine	Très fine	Très fine			
R en µm	125	63	32	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,25	0,1	0,05
Ra en µm	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0
Moulage sable	[Bar chart showing surface quality range]										
Moulage cire perdue	[Bar chart showing surface quality range]										
Moulage moule métallique	[Bar chart showing surface quality range]										
Moulage sous pression	[Bar chart showing surface quality range]										
Matricage à chaud	[Bar chart showing surface quality range]										
Laminage à chaud	[Bar chart showing surface quality range]										
Laminage extrusion à froid	[Bar chart showing surface quality range]										
Sciage	[Bar chart showing surface quality range]										
Oxydage	[Bar chart showing surface quality range]										
Frittage	[Bar chart showing surface quality range]										
Rabotage	[Bar chart showing surface quality range]										
Fraisage acier rapide	[Bar chart showing surface quality range]										
Fraisage carbure	[Bar chart showing surface quality range]										
Tournage ébauche	[Bar chart showing surface quality range]										
Tournage finition	[Bar chart showing surface quality range]										
Tournage outil diamant	[Bar chart showing surface quality range]										
Pérage au forêt	[Bar chart showing surface quality range]										
Alésage à l'aleoir	[Bar chart showing surface quality range]										
Alésage à outil diamant	[Bar chart showing surface quality range]										
Brochage	[Bar chart showing surface quality range]										
Taillage	[Bar chart showing surface quality range]										
Rectification ébauche	[Bar chart showing surface quality range]										
Rectification de production	[Bar chart showing surface quality range]										
Rectification de précision	[Bar chart showing surface quality range]										
Rodage à la pierre	[Bar chart showing surface quality range]										
Rodage au rodoir	[Bar chart showing surface quality range]										
Polissage mécanique	[Bar chart showing surface quality range]										
Polissage électrolytique	[Bar chart showing surface quality range]										
Superfinition	[Bar chart showing surface quality range]										
Usinage électrolytique	[Bar chart showing surface quality range]										
Galetage	[Bar chart showing surface quality range]										

Usinage : [gris] grossier [vert] normal [jaune] difficile

Polissage mécanique

finition brillante ↓

- Dégrossissage
 - Bandes
 - Meules
- Finition
 - Tamponnage (alliages d'aluminium et cuivres)
 - Brossage (métaux durs)
 - Avivage (tampon très doux)

Rectification

- Dernière opération d'usinage \Rightarrow besoin de fiabilité, rigidité des machines
- Très faible quantité de matière enlevée
- Obtention d'excellentes qualités de surfaces

Paramètres d'entrée

Rectification conventionnelle

Vitesse périphérique de la meule
30-45 m/s

Vitesse périphérique de la pièce
1-200 mm/s

Avance par tour
0.005 (F) - 0.1 (E) mm/tr



Rectification d'un vilebrequin

Rectification - Améliorations

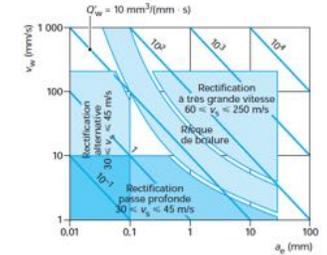
- Rectification 5 axes : machines similaires aux machines d'usinage 5 axes, rectification de formes gauches
- Pour les états de surface encore meilleurs, on parle de *superfinition*

Améliorations :

Rectification à très grande vitesse ; en passe profonde



Superfinition par toilage - $R_a = 0,1\mu\text{m}$



v_w (m/s) : vitesse de rotation périphérique de la meule
 a_w (mm) : profondeur de passe
 v_w (mm/s) : vitesse de rotation de la pièce usinée
 Q_w (mm³/(mm·s)) : volume de matière enlevée par unité de temps (ou débit de matière) et par unité de largeur de meule

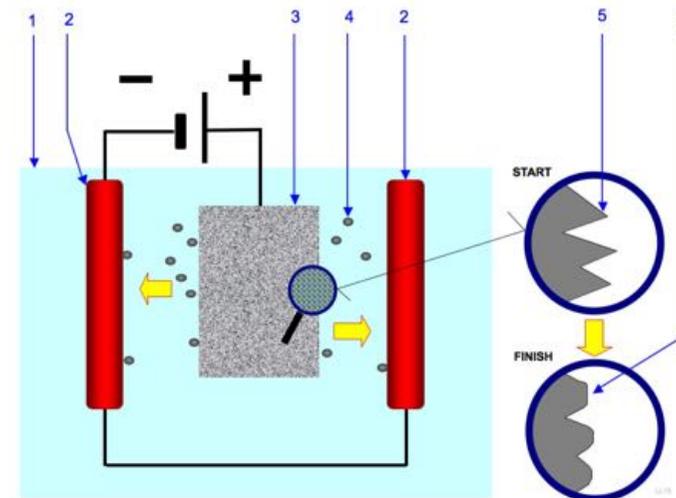
Zones d'applications des différents types de rectification

Polissage mécanique : Avantages et inconvénients des procédés

- ⊖ • Accessibilité des surfaces complexes telles que surfaces gauches, canaux internes complexes (outil de forme)
- ⊕ • Vitesse tangentielle de l'ordre de 30-40m/s selon le matériau confère une couche de Belby (couche très écrouie, sous forte contrainte)
- Accroît la résistance à la corrosion atmosphérique
- Accroît la tenue de revêtements ultérieurs de faible épaisseur pour la décoration

Polissage électrolytique

Electropolishing



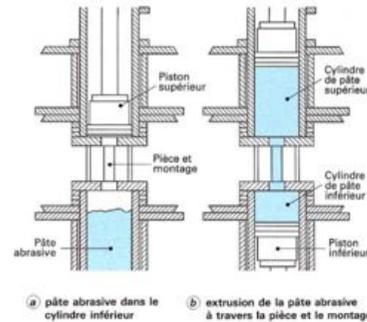
Polissage électrolytique

- Utilisable seulement sur matériau ayant un domaine de passivité relativement important (aciers inoxydables, Alliage cuivreux, Alliages d'aluminium, Alliages de titane)
- réduction des « pics » mais pas des « creux » : pas de gros gain en fatigue.
- Qualité de brillance
- Accroît adhérence des traitements ultérieurs



Extrusion de pâte abrasive – *Abrasive Flow Machining*

- Finition des surfaces et arêtes par extrusion d'une pâte abrasive visqueuse
Abrasion dans les zones de restriction de l'écoulement
- Façonnement de plusieurs cavités et pièces simultanément ⇒ forte productivité



Revêtement

Différentes filières de revêtements

Filière de revêtement	Conditionnement	Structure interface	Procédés
Faible effet thermique	Milieu aqueux	Pas de déplacement à l'interface	Galvanoplastie, chimie, réduction chimique
Faible effet thermique	Milieu gazeux	Pas de déplacement à l'interface	Dépôt PVD, PACVD
Faible effet thermique	Apport de métal sous forme pulvérante	Pas de déplacement à l'interface	Projection thermique
Fort effet thermique	Milieu gazeux	Déplacement par diffusion	Dépôt CVD
Fort effet thermique	Voie liquide, enduction	Déplacement par diffusion	Dépôt en bain de sel, métal fondu, bouillies, émaillage
Fort effet thermique	Apport de métal sous forme de poudre ou de fil	Déplacement par dilution	Rechargement TIG, MIG, plasma, laser

Dépôts et revêtements électro-lytiques

Revêtements en phase gazeuse : Dépôt chimique en phase vapeur CVD

- **Formation d'un revêtement sous réaction chimique :**

Apport d'un ou plusieurs composé gazeux

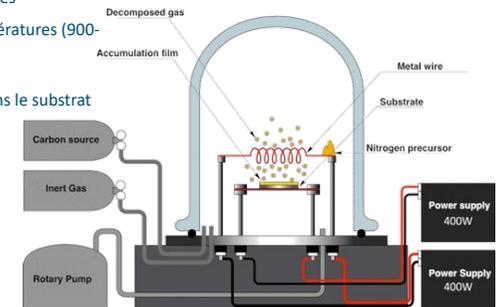
réaction avec le substrat (déplacement, réduction, dissociation de précurseurs gazeux (halogénures métalliques chlorure, fluorure) à hautes températures (900-1100°C)

Diffusion de l'élément métallique d'apport dans le substrat

- **Domaines d'application :**

électronique : élaboration de composants (Si, SiO₂, GaAs)

mécanique : outil de coupe Al₂O₃-TiN-TiC
outils d'extrusion, Moule sous pression.



Revêtements en phase gazeuse : Dépôt physique en phase vapeur PVD

- **Formation d'un revêtement sous pression réduite en 3 étapes :**

Vaporisation des espèces à déposer

Transport de ces espèces jusqu'au substrat contenant éventuellement des éléments réactifs par vide primaire

Condensation et croissance du dépôt

- **2 types :**

par évaporation

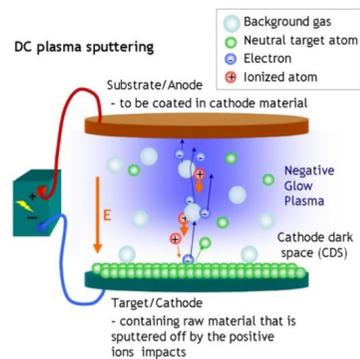
par pulvérisation (« sputtering »)

- **Domaines d'application :**

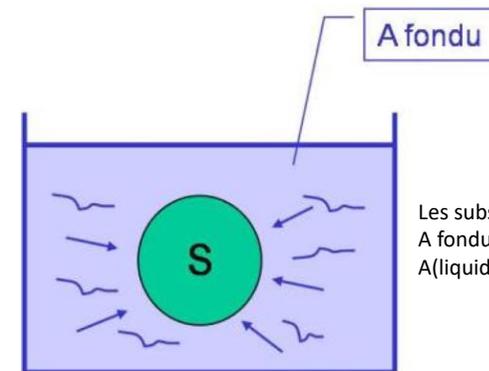
fonctions décoratives : composants d'optiques, surfaces réfléchissantes

fonctions mécaniques : connectique, outillages de découpe, prothèses orthopédiques, outils de coupe

PVD par pulvérisation



Immersion dans les métaux fondus IMF

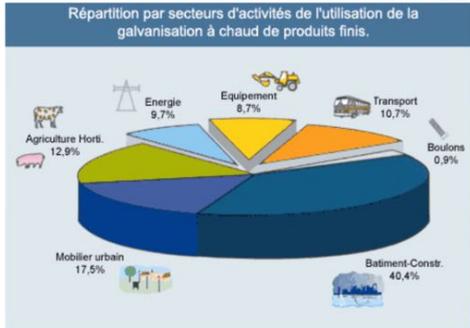
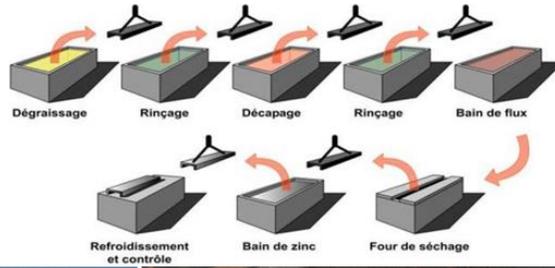


Les substrat S est immergé dans le métal d'apport A fondu :
A(liquide) -> A(solide)

1. Mouillage de l'acier par le métal en fusion lié à la composition superficielle de l'acier, sa propreté, sa rugosité et aux caractéristiques du bain (composition et température)
2. Attaque du fer par le bain avec dissolution
3. Réactions de diffusion

IMF : exemple de la galvanisation à chaud (470°C)

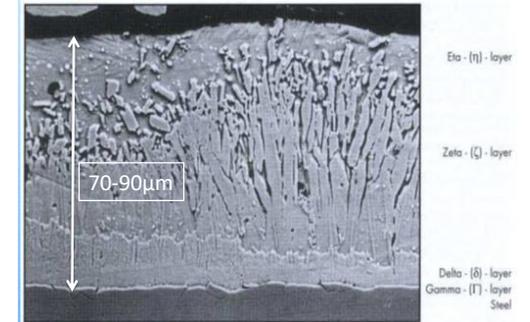
Protection contre la corrosion extérieure



Projection dynamique à froid - principe et comparaison

Procédé très répandu
Coût faible
Procédé adapté à la série
épaisseur importante (qqes μm)
+ protection longue durée
procédé non fragilisant
très adhérent
revêtement ductile
pas d'entretien particulier

Surqualité (durée de vie trop longue)
- Surépaisseur dans les cavités
- Chocs thermiques possibles
Déformation possible à chaud

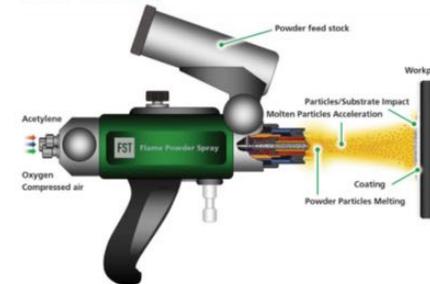


Projection à chaud - Principe

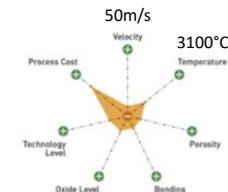
- Production d'énergie thermique et cinétique, par différents moyens d'apport d'énergie
- Introduction du matériau d'apport dans la zone où l'énergie thermique est concentrée
- interactions des particules avec le milieu : échauffement et accélération
- édification du revêtement couche par couche (accrochage mécanique), avec refroidissement brutal des particules qui peut conduire à des structures métastables ou microcristallisées.
- **Propriétés du revêtement :**
Epaisseur de couches entre 50 et 300 μm dans la majorité des cas
3 familles : Alliages métalliques, carbures avec liant métallique (cermets), céramiques

Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

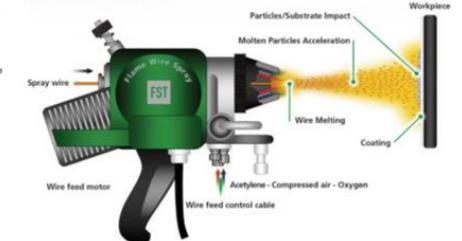
Flame Powder Spray



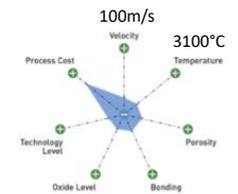
Typical coatings
→ Self-fluxing alloys (fusing)
→ Iron based alloys
→ Nickel based alloys
→ Ceramics & Cermets
→ Abradables
Main applications
→ Wear resistance
→ Corrosion protection
→ Chemical resistance
→ Dimensional restoration



Flame Wire Spraying

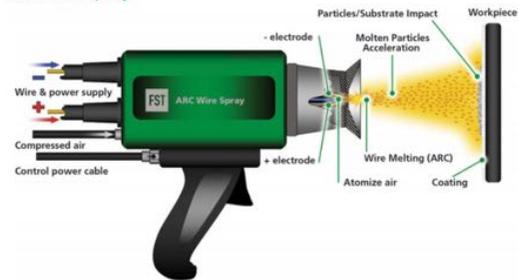


Typical coatings
→ Iron based alloys
→ Nickel based alloys
→ Molybdenum
→ Copper & Copper alloys
→ Aluminium, Zinc, Al/Zn alloys
Main applications
→ Wear resistance
→ Friction properties
→ Corrosion protection
→ Dimensional restoration
→ Electromagnetic shielding



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

Arc Wire Spray

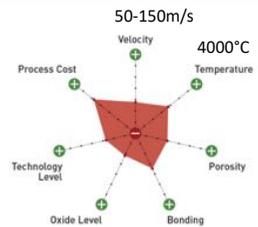


Typical coatings

- Iron based alloys
- Nickel based alloys
- Copper & Copper alloys
- Aluminium, Zinc, Al/Zn alloys
- Babbitt alloys

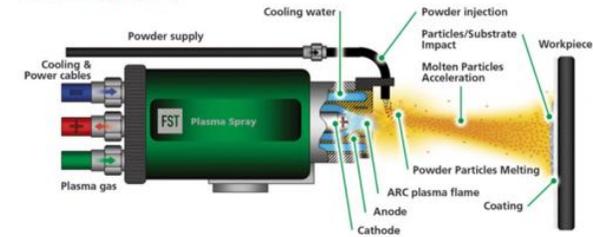
Main applications

- Wear resistance
- Corrosion protection
- Dimensional restoration
- Bond coat



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

Plasma Spraying

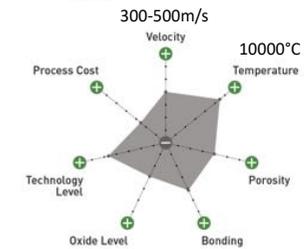


Typical coatings

- Ceramics
- Carbides & Cermets
- Iron, Nickel & Cobalt based alloys
- Abradables

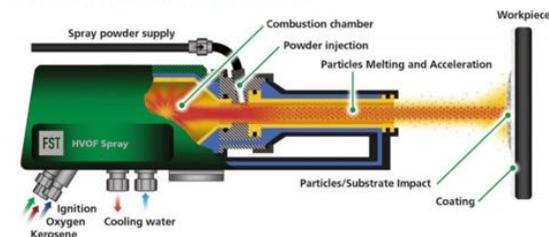
Main applications

- Wear resistance, Sliding, Abrasive, Erosion, etc.
- Corrosion resistance
- Thermal barriers
- Combinations



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

HVOF - High Velocity Oxygen Fuel

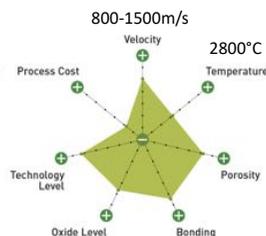


Typical coatings

- Nickel & Cobalt based alloys, Stellite,
- Triballoy, Inconel,
- Iron based alloys, AISI 316L, etc.
- Carbides & Cermets
- MCrAlY

Main applications

- Wear resistance Sliding, Abrasive, Erosion, etc.
- Chemical resistance
- High Temperature applications



Projection à chaud

• Domaines d'application :

- Industrie aéronautique (trains d'atterrissage, aubes de turbines, barrière thermiques ...)
- Industrie mécanique (dépôt résistant à l'usure sur poulies de guidage et cabestans de treuilage, rouleaux tensionneurs dans les installations de traitements (dépôt, thermiques) avant laminage)
- Industrie chimique (arbres de compresseurs et plans de joints mécaniques, malaxeurs de pâtes abrasives).

• Comparaison projection de cermet par HVOF par rapport à dépôt électrolytiques de chrome dur :



- meilleure résistance à l'usure (x3-5)
- meilleure résistance à la corrosion
- meilleure résistance à la fatigue
- pas de fragilisation par l'hydrogène
- meilleure résistance aux impacts
- grandes pièces (instrumentation sur robots)



- moins bonne adhérence
- coût plus élevé (x1.5-2)
- accessibilité pour canaux internes
- faible productivité pour un investissement important

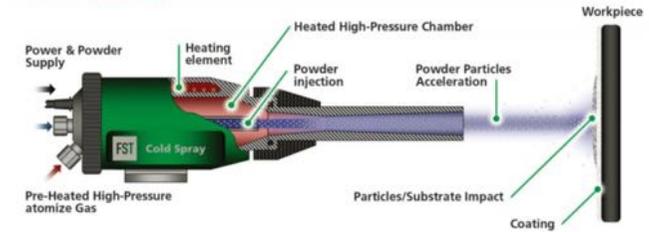
Projection dynamique à froid - principe et comparaison

- projection de particules de taille 10-40µm de dureté limitée (<40HRC)
- Température entre 100-800°C
- Projection sur un substrat au moyen d'un dispositif transformant un jet subsonique en jet supersonique (buse de laval) sous gaz inerte (azote, hélium) à fort débit (30-80 Nm³/h) et forte pression 35bars.
- Plastification importante des particules projetées

<p>+ fort rendement (>90%)</p> <p>bonne compacité et absence d'inclusion d'oxydes</p> <p>large gamme d'épaisseurs (20µm à 1mm)</p> <p>bonne adhérence</p> <p>faible rugosité superficielle</p>	<p>- susceptibilité des dépôts à l'écaillage</p> <p>niveau de bruit important (enceinte isolée phoniquement)</p> <p>coût élevé du procédé</p>
--	--

Projection dynamique à froid

Cold Gas Spray

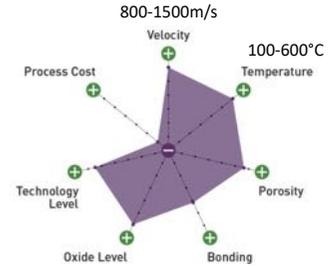


Typical coatings

- Ductile materials & alloys, Zn, Al, Ni, Ti, Cu, Ag, NiCr, CuAl, MCrAlY's, etc.
- High end materials: Niobium or Tantalum

Main applications

- Electrical and thermal conductivity
- Pre-placement of solders
- Corrosion protection
- Dimensional restoration



Rechargement - principe

- Fusion d'un métal d'apport sur un substrat (s'apparente au soudage).
- Le Revêtement obtenu est composé à la fois du métal d'apport et de la partie du substrat fondu.
- Taux de dilution : Quantité du substrat fondu / Quantité de métal fondu (substrat + apport)
- Possibilité de réaliser des dépôts épais (>5mm)
- Multifonctionnalité (ex résistance à la corrosion, à l'usure en liaison avec une bonne ténacité)
- S'utilise sur matériau soudable (acier avec C<0.4%, alliages cuivreux)



Rechargement - Différentes sources d'énergie

Procédé	Densité locale d'énergie	Dilution	Déformation	Homogénéité de l'épaisseur	Reprise finale après dépôt	Vitesse dépôt (kg/h)	Epaisseur minimale (mm)
MIG/MA G	4	10-40	4	2-3	3-4	1-6	3
TIG	3	10-20	4	2	3	0.5-4	2.5
PTA	2	5-20	2	2	2	0.5-7	0.8
Laser	1	1-5	1	1	1	0.5-4	0.5

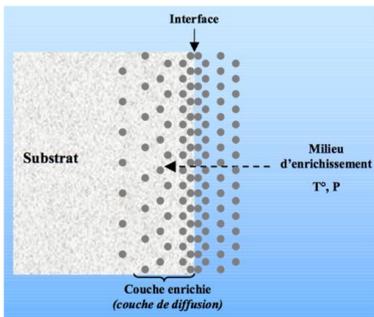
PTA : plasma à arc transféré

Rechargement - domaines d'application

- **Alliages base fer :**
résistance à l'usure par abrasion (ex : cylindres de laminoir, éléments de broyeurs...)
- **Alliages base nickel :**
résistance à l'usure sous atmosphère agressive (milieux acides organiques ou réducteurs) (ex : outil d'extrusion)
résistance à chaud des substrat (ex : outils de forge d'aciers,, outils d'extrusion d'aluminium)
- **Alliages base cobalt :**
résistance au frottement et à l'usure au delà de 500°C
résistance à la déformation à chaud (outillages de forges, aubes soupapes...)
- **Industries**
Nucléaire (robinetterie...), transport (sièges de soupapes...), mécanique (pale de malaxeur), métallurgie (matrices de forges...), chimie, production d'énergie (turbines...)

Traitements par diffusion

Traitements de diffusion



Enrichissement superficiel d'un matériau par diffusion thermique d'un ou plusieurs éléments extérieurs.

Modification de la composition chimique en surface.

- +++ Augmentation de la dureté superficielle (tenue à l'usure par abrasion)
- +++ Diminution du coefficient de frottement superficiel (résistance à l'usure par frottement, au grippage)
- ++ Augmentation de la résistance en fatigue
- + Augmentation de la résistance à la corrosion

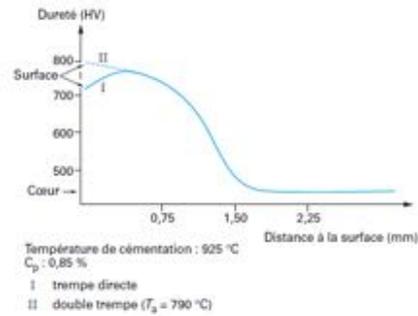
Traitements de diffusion des métalloïdes

Type de traitement	Matériau concerné	Mis en oeuvre	Type de couche superficielle	Dureté maxi Profondeur
Cémentation	Aciers (0.1-0.25%C)	Diffusion de C T max 1050°C Trempe	Martensite à gradient de teneur en C	800-900 HV 500-1500µm
Carbonituration	Aciers	Diffusion C et N T max 850°C Trempe	Martensite à gradient de teneur en C et N	800 à 900 HV 200 à 700 µm
Nituration	Aciers, Fontes, Alliages de Titane	Diffusion de N (avec C éventuel) Tmax 600°C pour aciers, 800°C pour Ti	Couche de combinaison (nitride) Couche de diffusion de N	600 à 1500HV quelques µm-600µm
Oxydation	Aciers, Alliages de Titane, Zirconium	Diffusion de O, Tmax 600°C pour acier, 550 pour Ti, 800 pour Zr	Couche de combinaison (oxydes)	550 à 750 HV quelques µm à 50 µm
Implantation ionique	Tous matériaux métalliques, Polymères	Diffusion par voie physique	Solution solide, éléments implantés	Pas mesurable environ 0,2µm max

Traitements de diffusion exemples

• Cémentation

Cémentation dans atmosphère gazeuse puis trempe
 ⇒ augmentation de la dureté superficielle et contraintes résiduelles



Profil de dureté d'une couche cémentée sur un acier 16NiCrMo13 après trempe

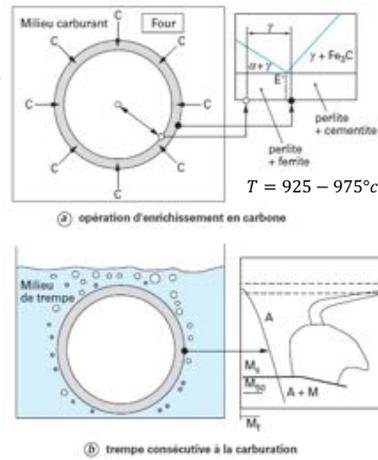
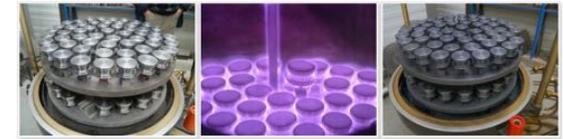


Schéma simplifié du traitement de cémentation

49

Traitements de diffusion exemples

Nitruration ionique



• Carbonituration

Apport d'azote (par ammoniac) en plus du carbone ⇒ réduction de la température de traitement

+ : distorsion moindre des pièces ; amélioration de la trempabilité

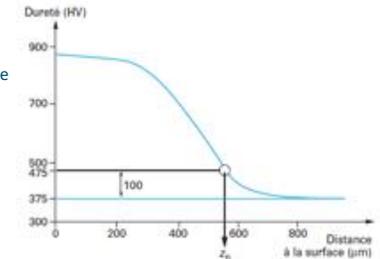
- : Limité à $\approx 0,75mm$ (temps de diffusion ; contrôle) ; abaissement du point M_s donc plus d'austénite résiduelle

• Nitruration et nitrocarburation

Apport d'azote à des températures [520; 580°C], en phase liquide, gazeuse ou ionique

Matrice à l'état ferritique ⇒ durcissement et contraintes résiduelles générées par un effet de précipitation (phases ϵ et γ')

Pas d'étape de trempe

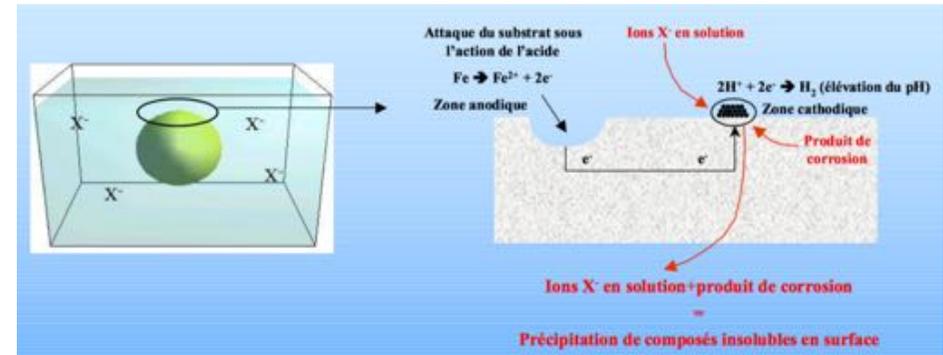


Profil de dureté et détermination de la profondeur conventionnelle de nitruration

50

Traitements par conversion

Principe de la conversion chimique



Le métal à traiter est mis en contact (par aspersion ou immersion) avec une solution aqueuse « corrosive », qui provoque la corrosion contrôlée de ce dernier.

La composition de la solution est définie afin que les produits de corrosion forment en présence d'ions X- un film adhérent et compact qui « isole » le métal du milieu corrodant.

52

Les différents traitements de conversions chimiques

- Selon les procédés, les solutions de traitement seront à base d'ions X- :

Chromates : Chromatation (aciers, fontes alliages d'aluminium et de zinc). Tenue à la corrosion, brillance, coloration, adhérence pour revêtement ultérieur

Phosphates : Phosphatations (aciers, alliages d'aluminium et de zinc). Tenue à la corrosion, base d'adhérence, résistance électrique superficielle, coefficient de frottement, antireflet.

Nitrates : Passivation (aciers inoxydables)

Oxalates : Oxalatation (aciers inoxydables). Améliorer l'adhérence des lubrifiants

Brunissage sur aciers : aspect esthétiques + protection contre la corrosion atmosphérique

- Domaines d'application

Stabilisation de l'interface entre un substrat métallique et un matériau polymère ou éventuellement céramique (présence d'oxyde + hydroxyde et rugosité).

Traitements par transformation structurale d'origine mécanique ou thermique

Les différents traitements de conversions chimiques

- Accessibilité des formes



- Large diffusion

- Procédés peu coûteux

- Facilité de mise en œuvre



- Problème de rejets aqueux (station d'épuration).

Contraintes résiduelles

- Définition

Les contraintes résiduelles, souvent notées σ_R ou σ_{res} , sont des contraintes multiaxiales, statiques, auto-équilibrées, existant dans un système isolé de température uniforme et en l'absence de tout chargement extérieur.

⇒ Auto-équilibrées : s'il y a de la traction quelque part, c'est qu'il y a de la compression ailleurs

⇒ Contraintes existant en l'absence de tout chargement extérieur : peuvent avoir un impact sur la tenue mécanique de la pièce en service, sur sa durée de vie

Si contraintes de traction :

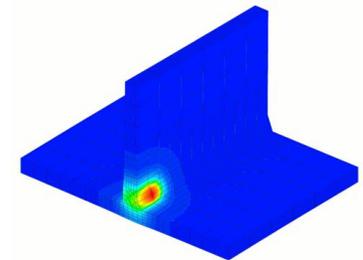
augmentation du risque de rupture

Si contraintes de compression :

gain potentiel en durée de vie/résistance à la fatigue

Sur des pièces de faibles dimensions :

génération de distorsions

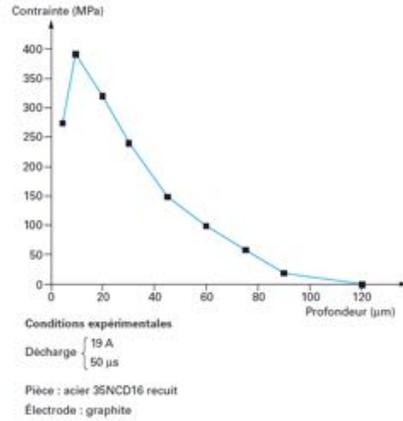


Distorsion d'un joint soudé

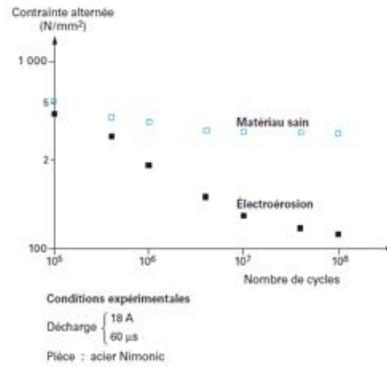
Source : ec2-modélisation

Contraintes résiduelles

- Quelques exemples et ordres de grandeurs



Contraintes résiduelles après un usinage par électroérosion



Effets des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue

Traitement mécaniques superficiels

- Déformation plastique des couches superficielles par action mécanique

Dénomination	Mise en œuvre	Profondeur de traitement	Avantages et inconvénients
Tribofinition	Frottement	de 0,01 à 0,03 mm	Long et coûteux à réaliser
Grenailage	Projection contrôlée de billes de différents diamètres, de différentes mesures et de différentes vitesses	de 0,1 à 0,6 mm suivant le matériau et les conditions	Quelques problèmes d'incrustation, de microdéfauts et parfois de rugosité S'adapte à toutes les géométries
Martelage	Impact d'aiguilles à extrémité sphérique	de 1 à 2 mm	Problème d'état de surface, ne s'applique qu'aux géométries simples
Galetage	Roulement d'un galet avec une forte force d'appui	de 2 à 3 mm	Variations dimensionnelles, nécessite une géométrie particulière
Ondes de choc	Explosion Laser impulsionnel de très forte puissance	jusqu'à 4 mm	S'adapte à toutes les géométries (pour le laser) Pas de modification de l'état de surface Traitement en cours de développement
Préconformage Autofrettage	Flexion, expansion ou torsion avec passage en plasticité	quelques mm	Traitement directionnel

- ⇒ Modifications possibles

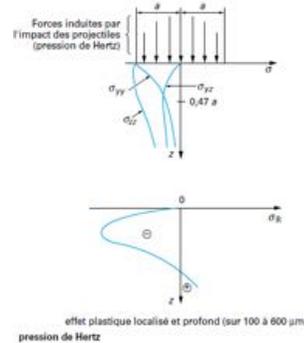
Des caractéristiques géométriques de la pièce, de la microstructure (↑ densité dislocations)
 ⇒ changement de la rugosité, des contraintes résiduelles, de la dureté, de la ductilité

Principe mécaniques superficiels

- Déformation plastique des couches superficielles par action mécanique

Cas de l'impact d'une sphère sur un plan (*contact de Hertz*)

Selon le type de chargement (géométrie des projectiles, Choc laser, ...) les distributions de pression et de contraintes peuvent varier mais le principe reste similaire.



- Grenailage de précontrainte

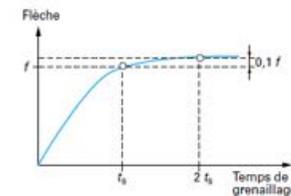
Projection de billes ($D \approx [0,3; 6mm]$)
 libres (turbine, jet d'air) ou
 attachées (*rotopeening*)

Grenailage de précontrainte

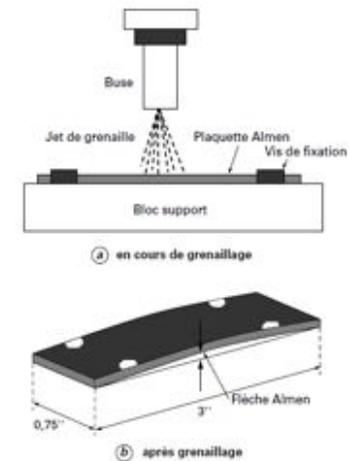
- Paramètres du procédé :

Diamètre, vitesse, matériau des billes
 Taux de recouvrement

Paramètres industriellement identifiées via l'intensité Almen



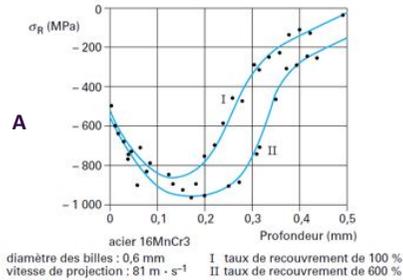
Courbe de saturation d'une éprouvette Almen



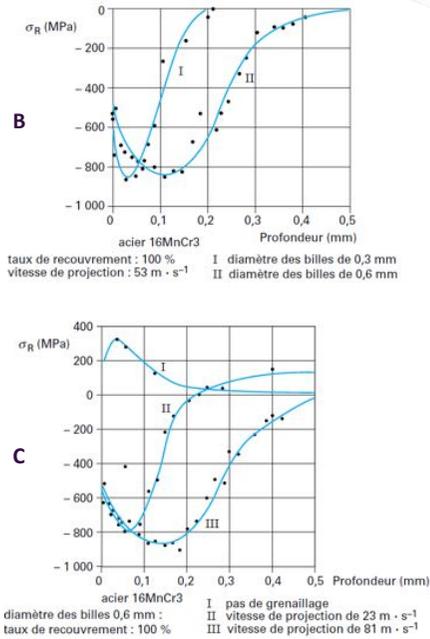
Montage pour la détermination de l'intensité Almen

Grenailage de précontrainte

Influence des paramètres d'entrée

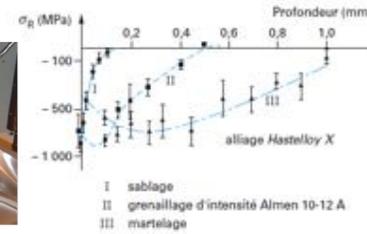
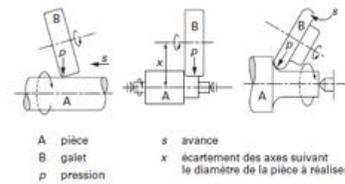


- A – Taux de recouvrement
- B – Diamètre des billes
- C – Vitesse de projection

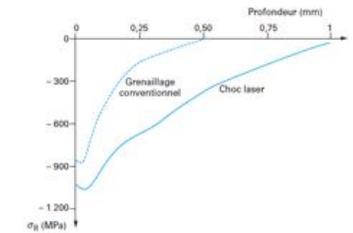
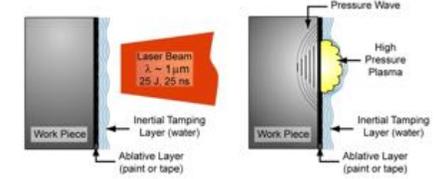


Autres procédés de grenailage

Martelage, galetage



Choc laser



Mais aussi des fonctions de plus en plus complexes induites par des texturations à plusieurs échelles.

Texturation laser

biomimétisme

