

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

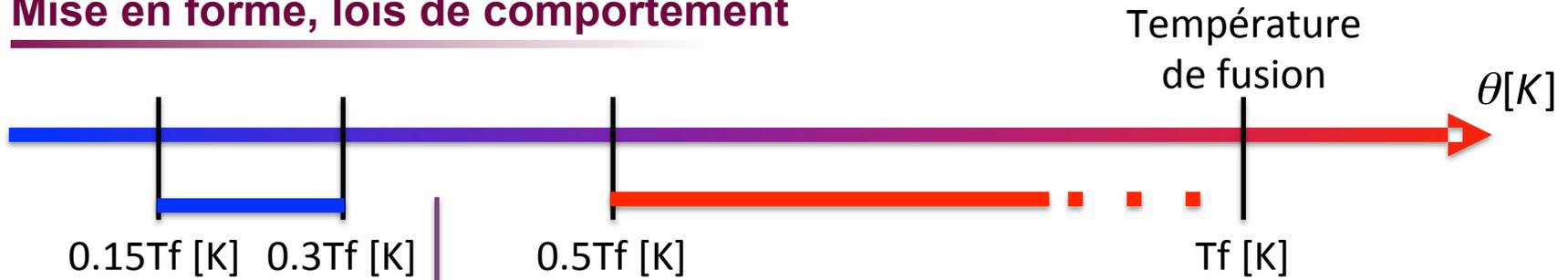
Procédés de fonderie

moulages

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



Mise en forme à froid
Plasticité

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

Mise en forme à chaud
Viscoplasticité

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

Fluide Newtonien

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

Emboutissage

Norton Hoff

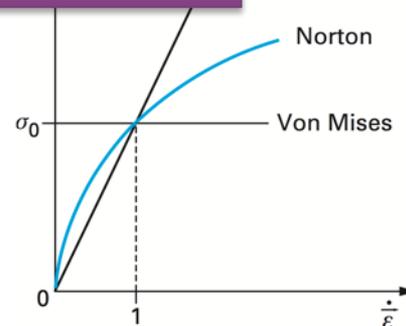
$$\sigma_{eq} = \sigma_1 (\dot{\varepsilon}_{eq})^m$$

Forgeage
(usage)

n Hoff

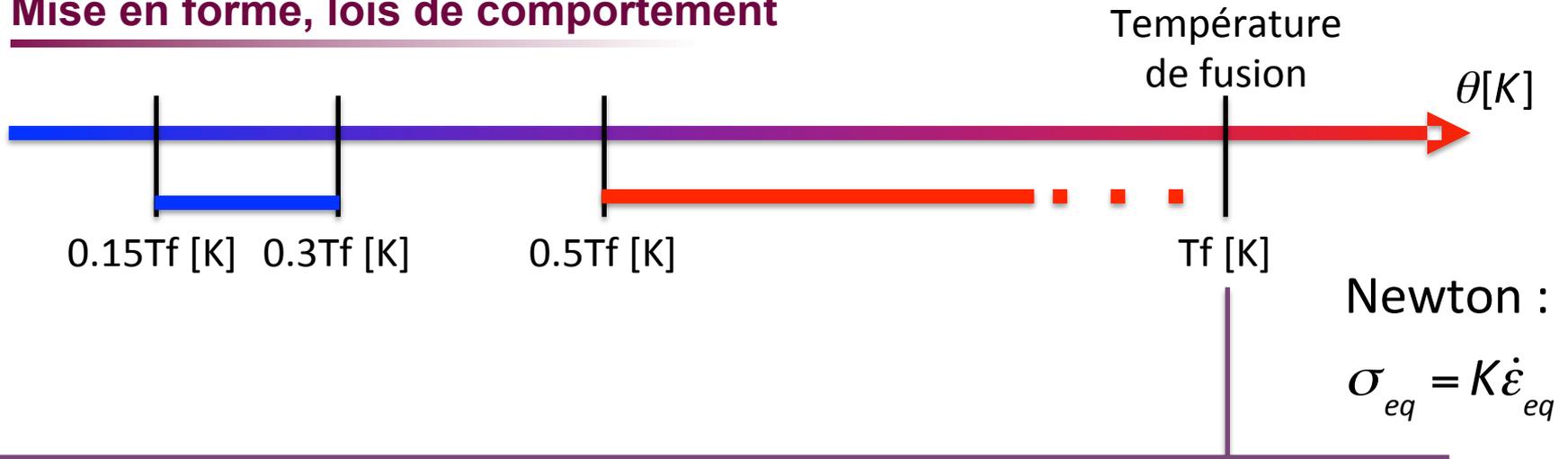
$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \dot{\varepsilon}_{eq}^m$$

Moulage
Injection plastique



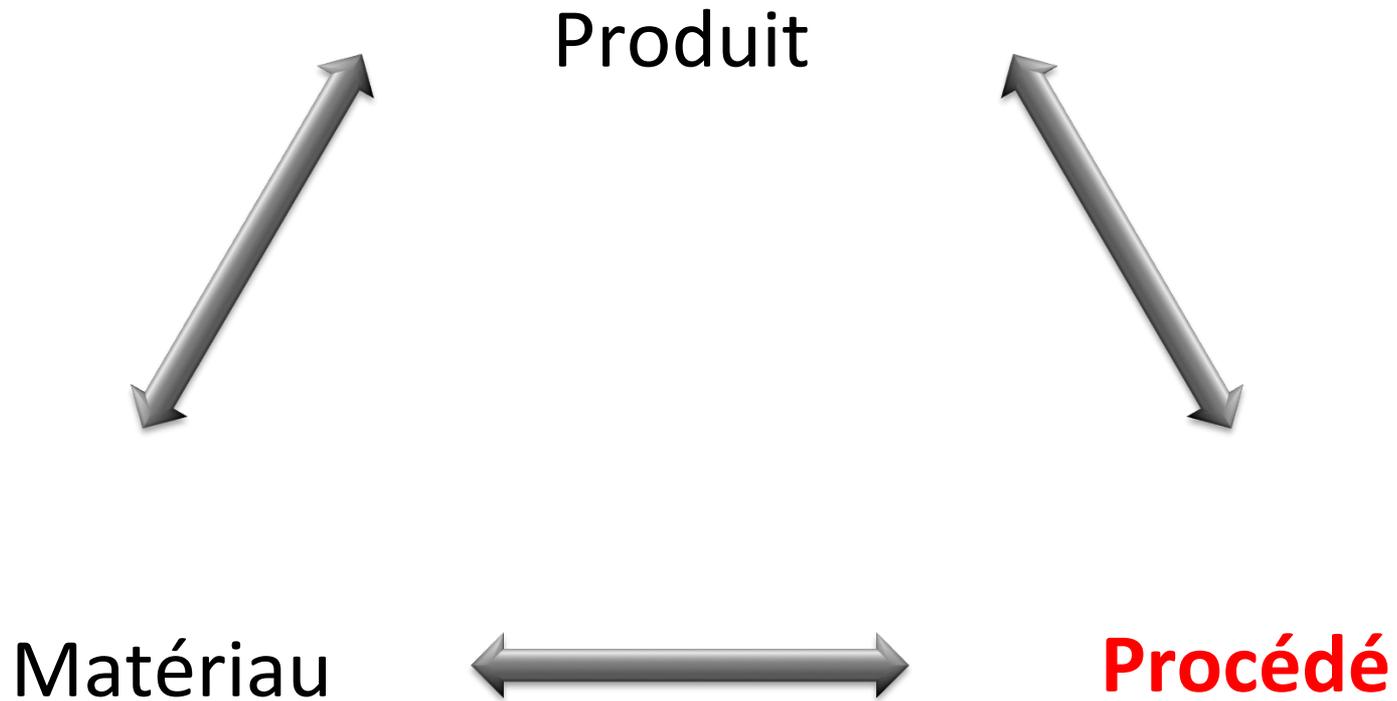
n : coefficient d'écrouissage ($n < 1$, ↘ avec θ)
m : indice de viscosité ($m < 1$, ↗ avec θ)
 β : coefficient de thermodépendance

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

Modèle réutilisable

Agent de démoulage

Châssis

Tassage du sable
Fabrication du moule

Trou de coulée



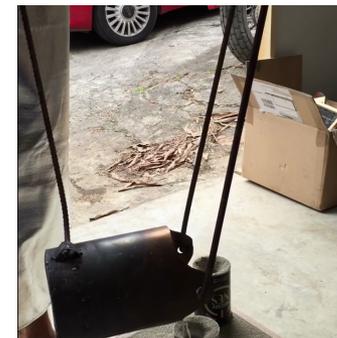
Démoulage du modèle

Attaque de coulée

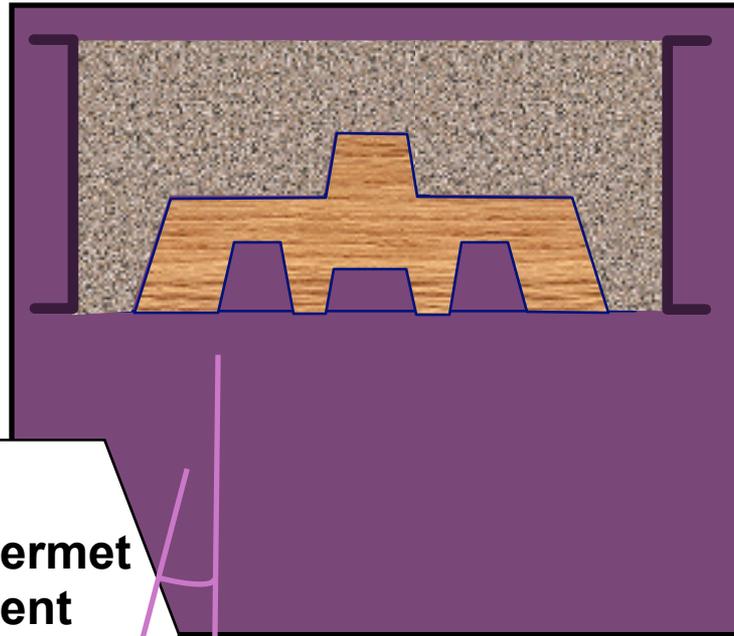
Système de remplissage

Coulée

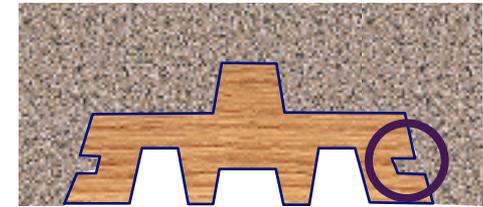
Décochage



Problème lors de l'enlèvement du modèle



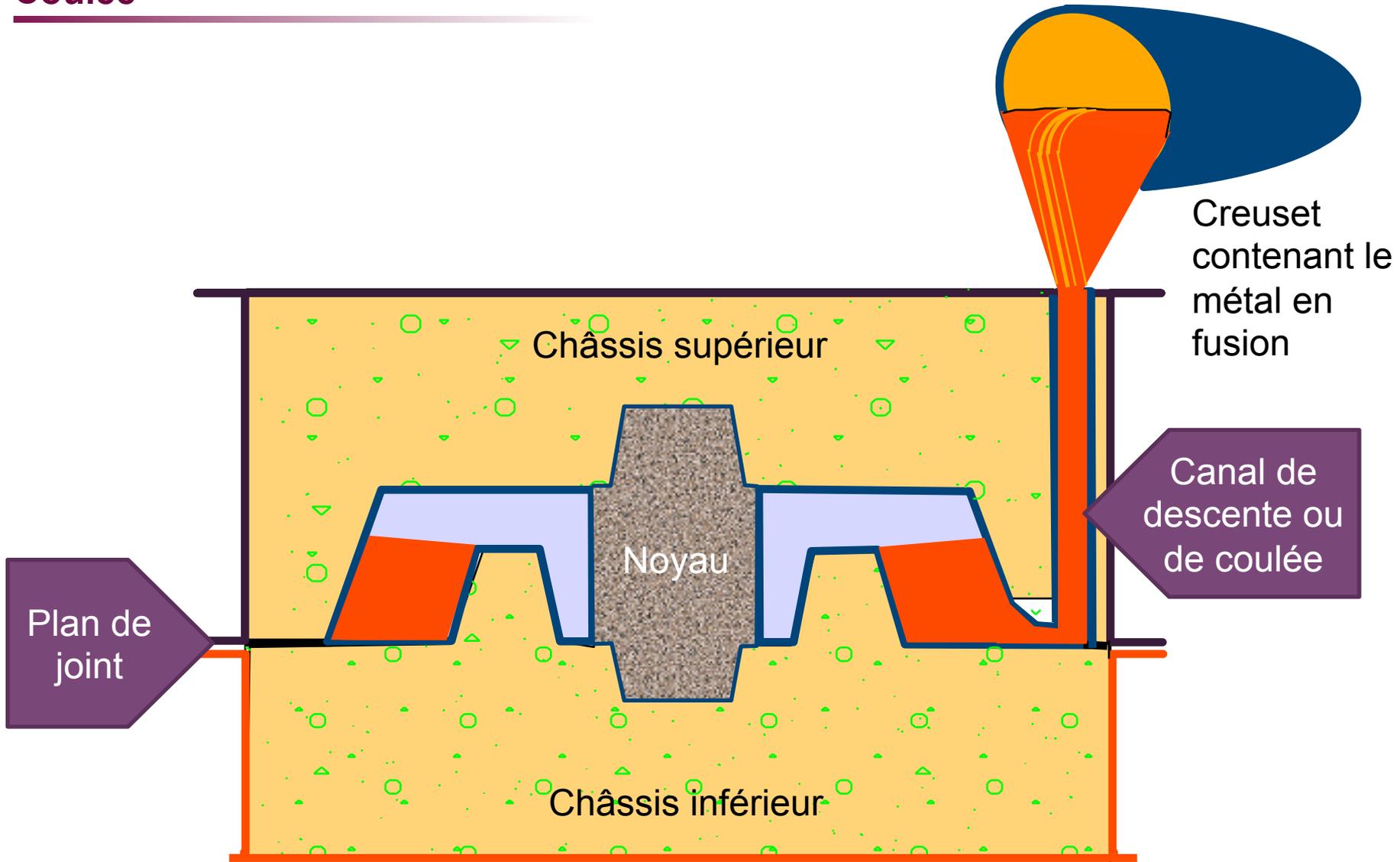
Un angle de dépouille permet de démouler facilement une pièce et facilite l'extraction du modèle



Contre dépouille

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

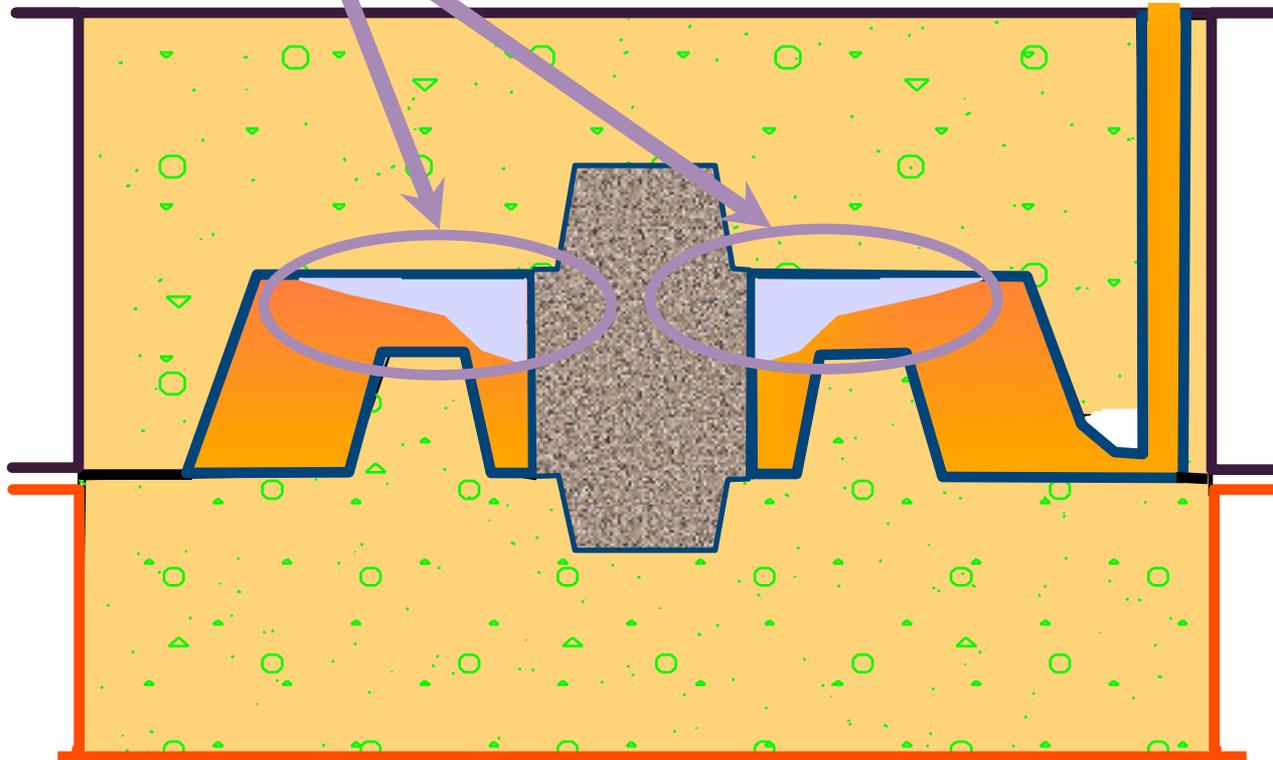
Coulée



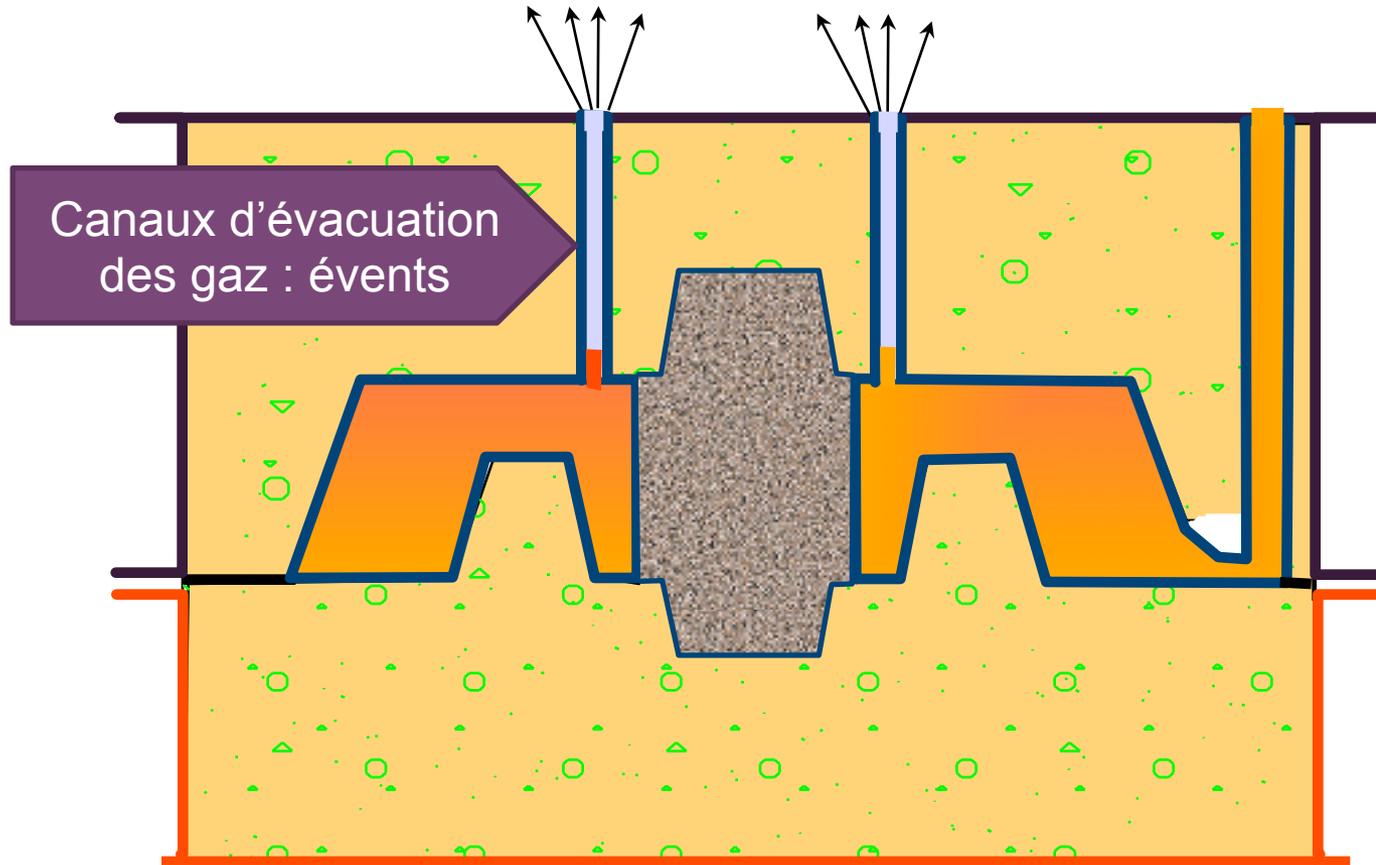
Mise en évidence des problèmes rencontrés lors de la coulée

Gaz emprisonné

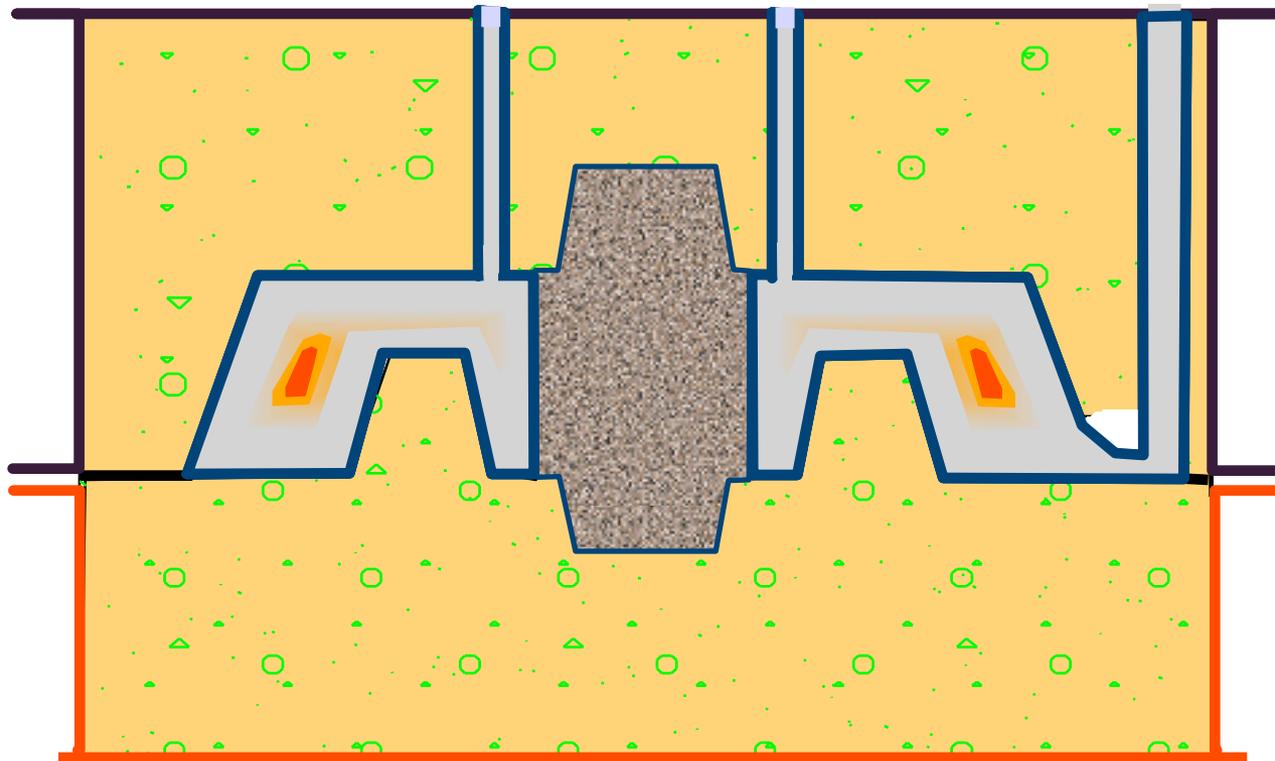
La pièce n'est pas conforme aux exigences!



Evacuation des gaz

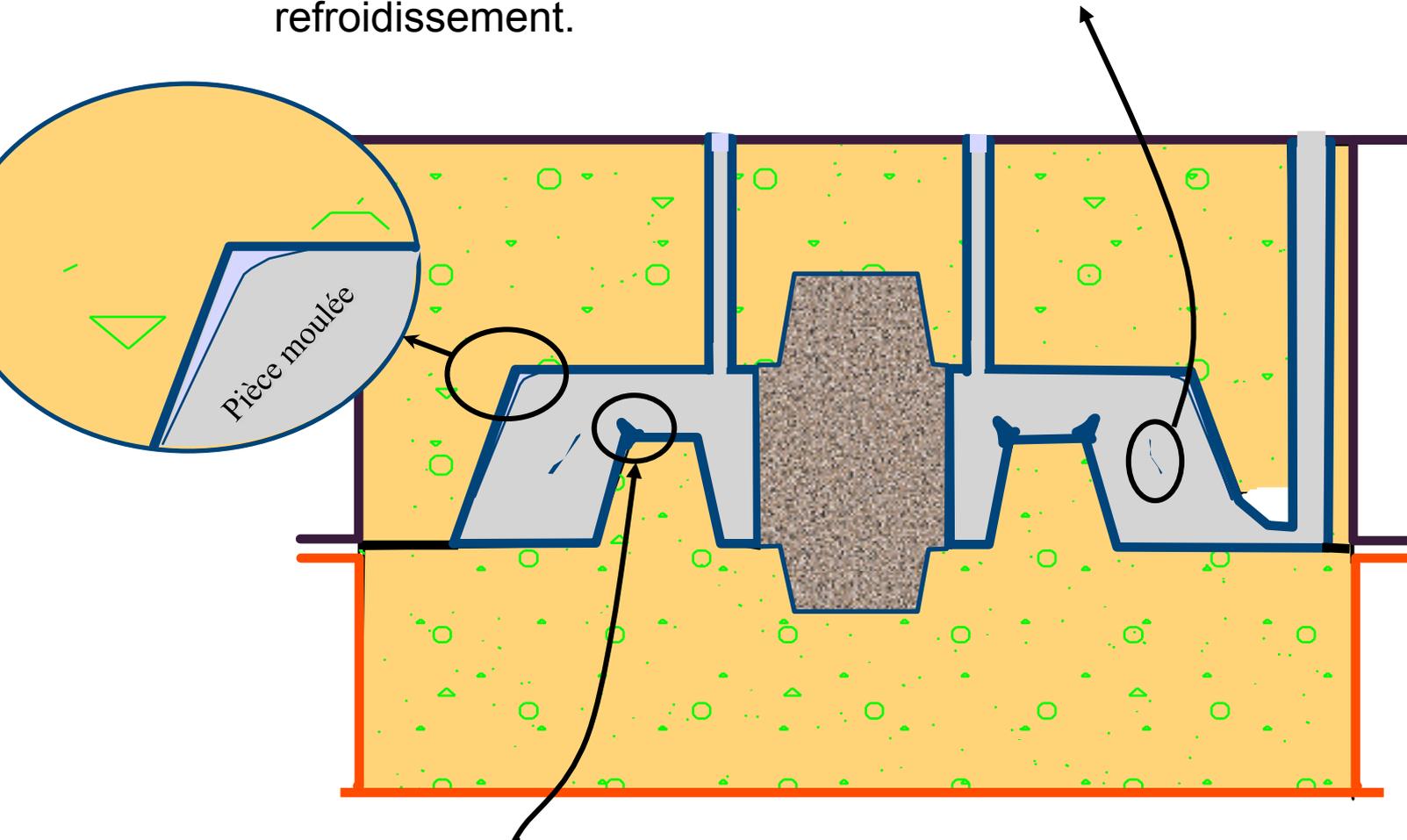


Mise en évidence des problèmes rencontrés lors du refroidissement



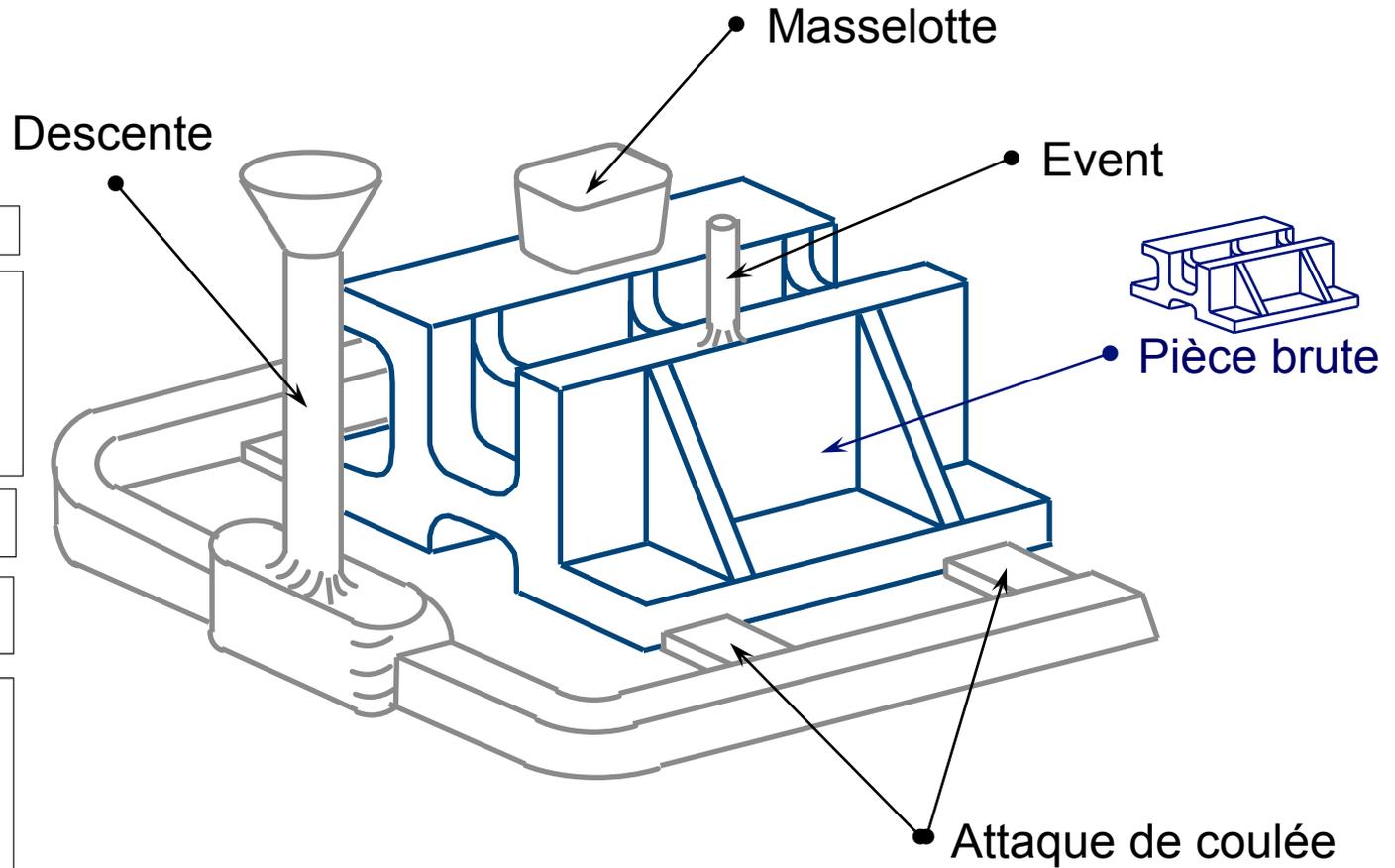
Mise en évidence des problèmes rencontrés lors du refroidissement

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.



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

Démoulage de la pièce



1 Réalisation du modèle et des noyaux

2 Exécution des empreintes dans les 2 châssis (supérieur et inférieur), pour tasser le sable.

Réalisation :

- du canal de coulée
- des évents
- des masselottes

3 Contrôle et Assemblage des 2 châssis avec les noyaux

4 Coulée du métal.

Attende de refroidissement

5 Sortie de la pièce : décochage

Contrôle

Sciage

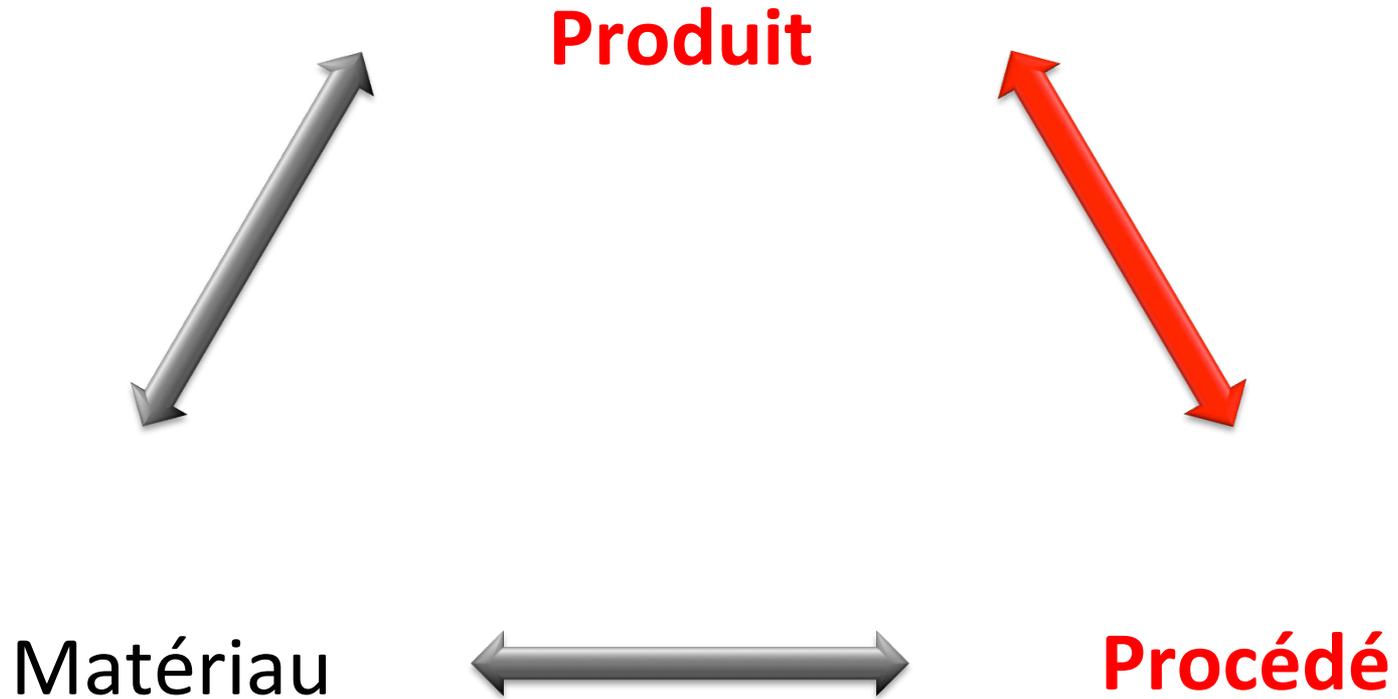
Débouillage

Ebarbage, grenailage ...

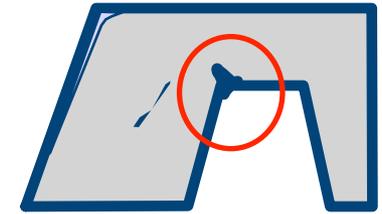
Usinage

Traitement ...

Relation Produit – Procédé – Matériau



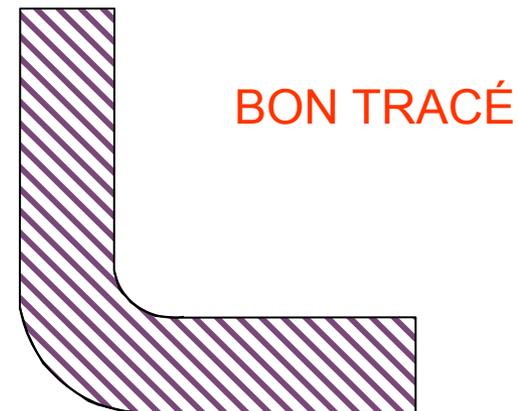
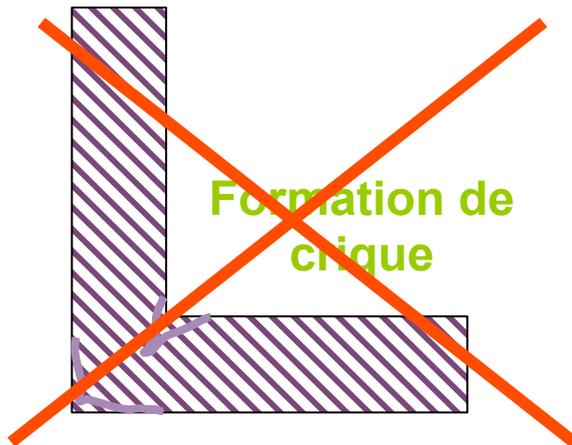
Eviter les criques



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

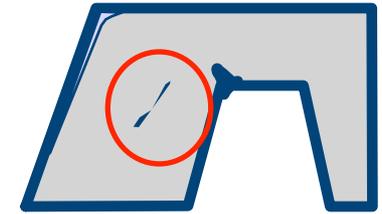


Pièce en forme de L à mouler



Eviter les retassures

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

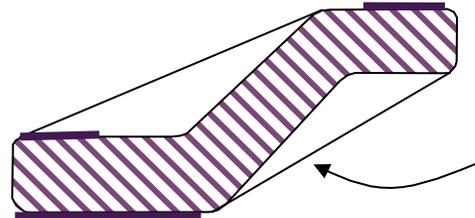


Soient ces 3 surfaces fonctionnelles à obtenir après moulage quelle doit être la forme de la pièce?

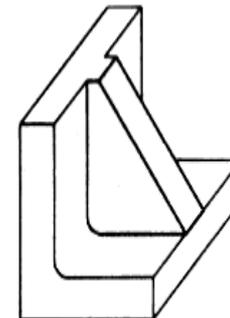
Formation de retassure



BON TRACÉ

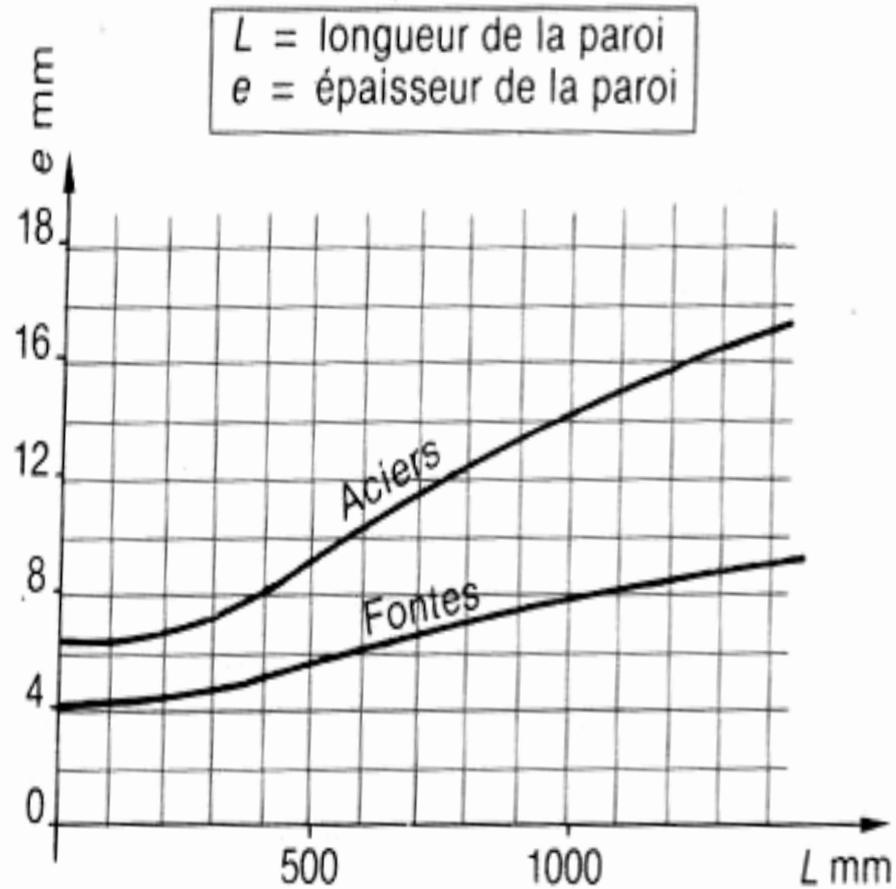


Préférer les nervures plutôt que des parois épaisses



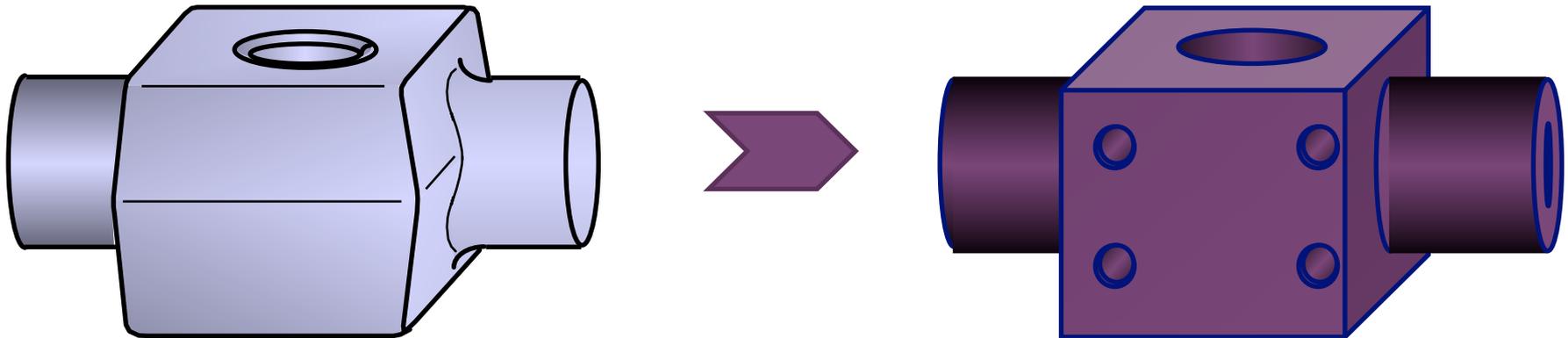
Épaisseurs de parois

FONTES ET ACIERS



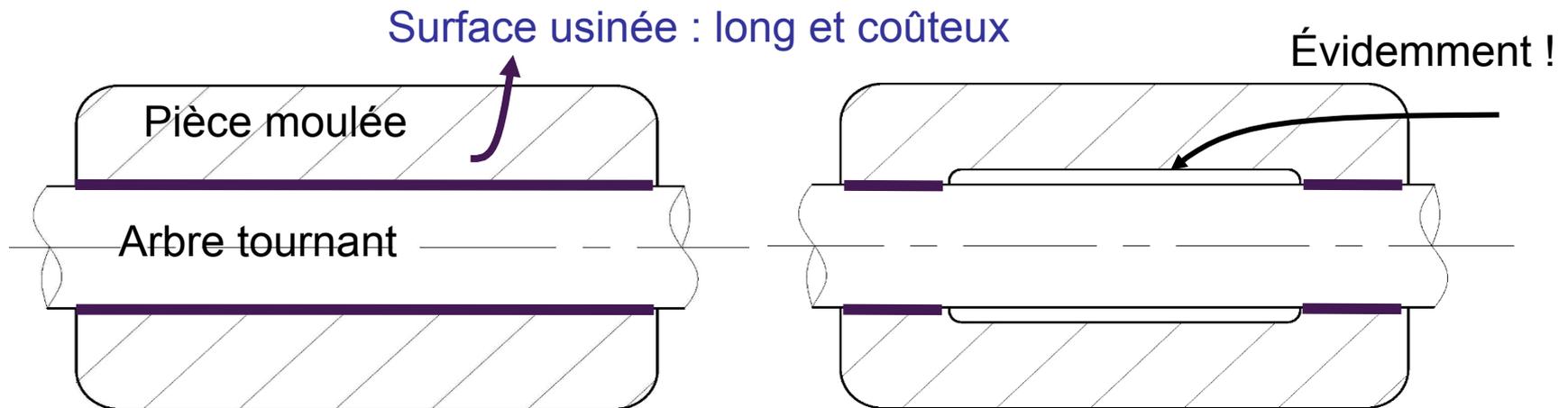
Surfaces fonctionnelles

- 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)



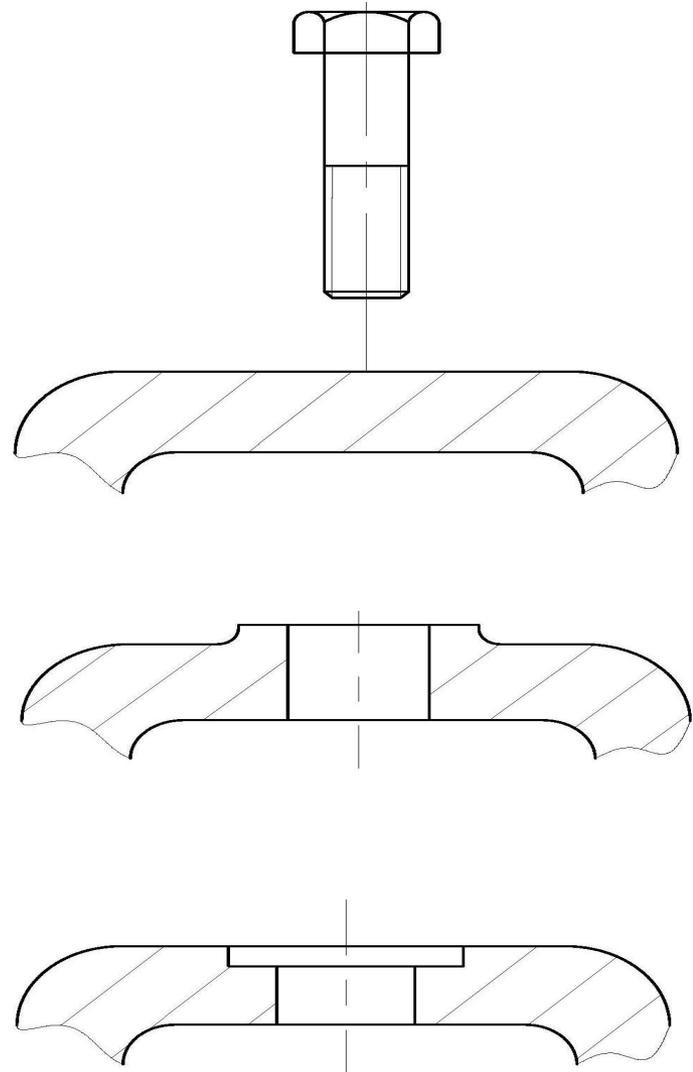
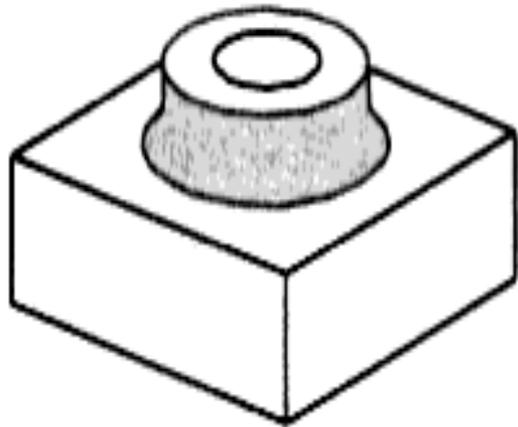
Surfaces fonctionnelles

- Limiter au maximum les surfaces à usiner



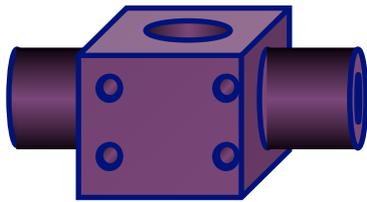
Surfaces fonctionnelles

- Préférer les lamages aux bossages

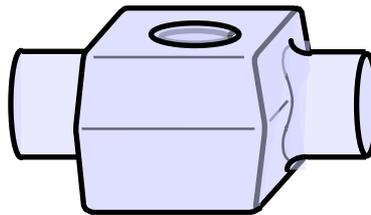


Dépouilles et contre dépouilles

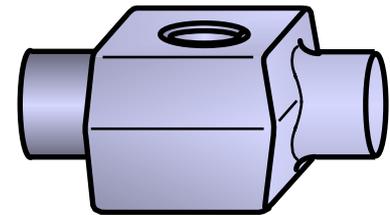
- **En BE**, on ne dessine que les formes finales de la pièce, on ne dessinera jamais les dépouilles !



Pièce à réaliser
Tracé BE



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

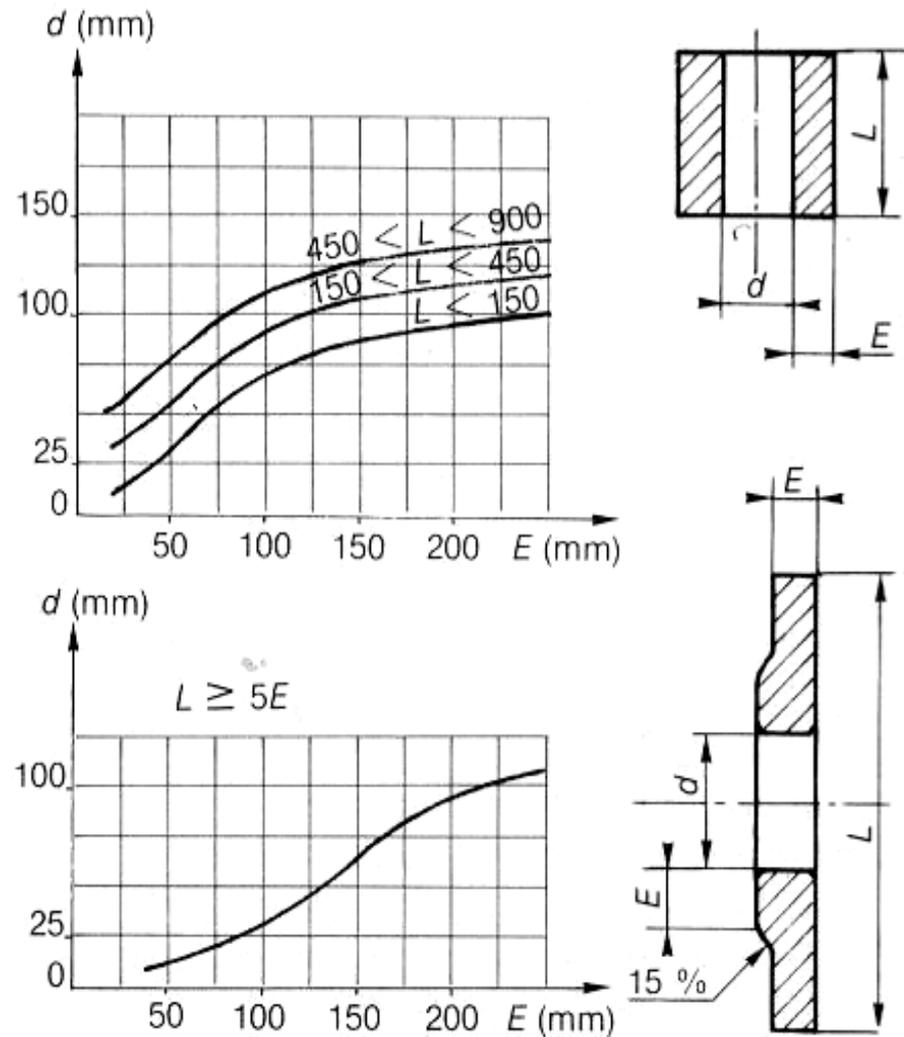


Pièce brute
de fonderie

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

Les noyaux

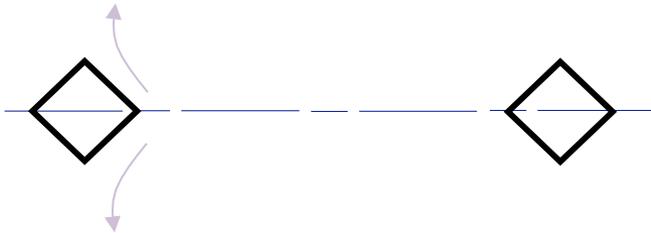
- Les noyaux ont un diamètre minimum en fonction de l'envergure de la pièce



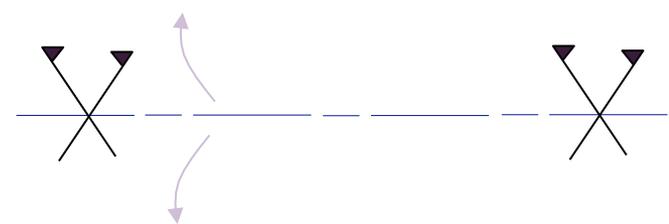
Plan de joint

- Il doit être choisis 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...

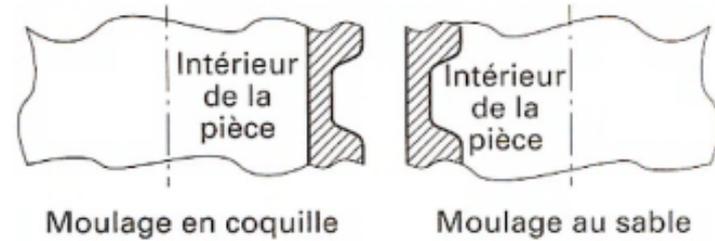
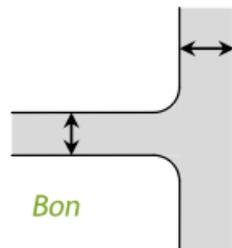
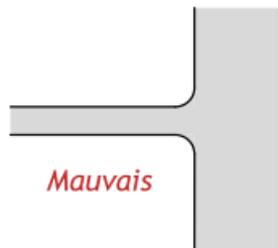
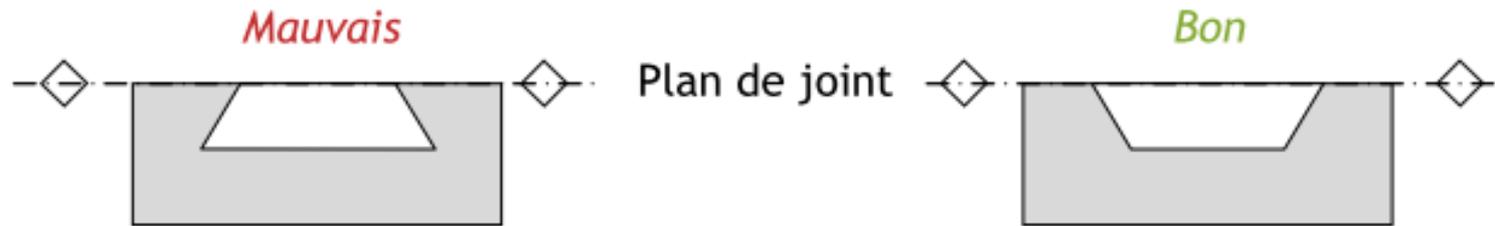
Symbole du plan de joint



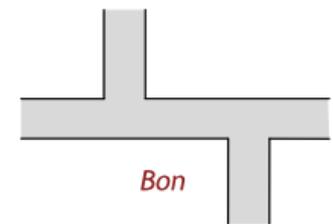
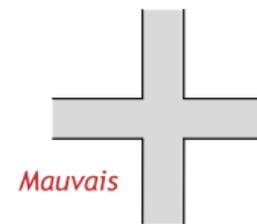
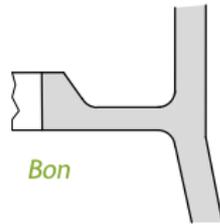
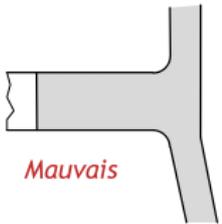
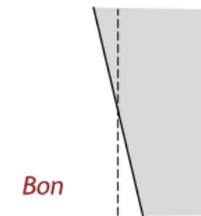
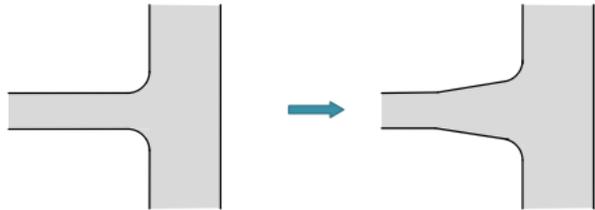
Ancien symbole du plan de joint



Règles de tracé



Règles de tracé



Mauvais



Bon



Exemples de tracés

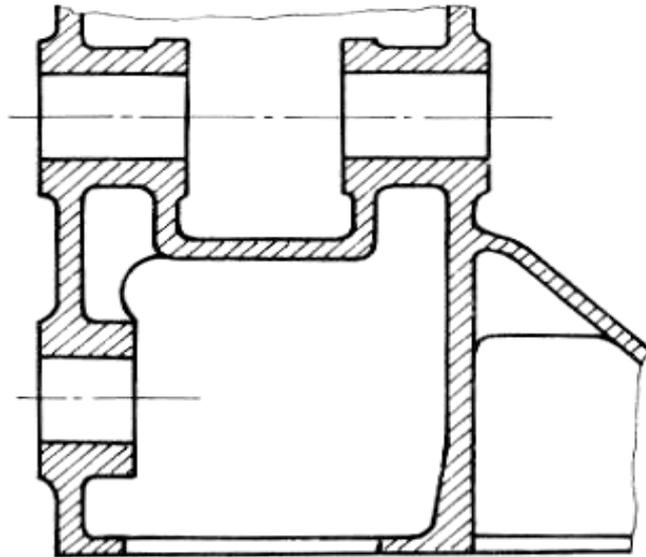


Fig. 5.13. — *Épaisseurs constantes.*

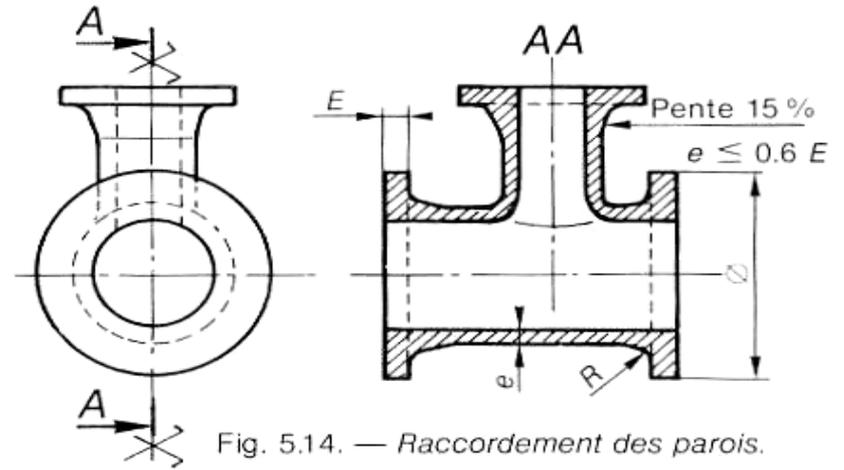


Fig. 5.14. — *Raccordement des parois.*

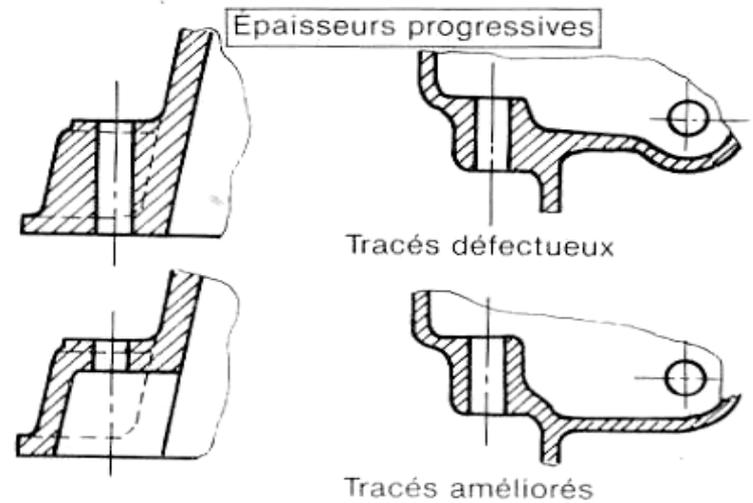
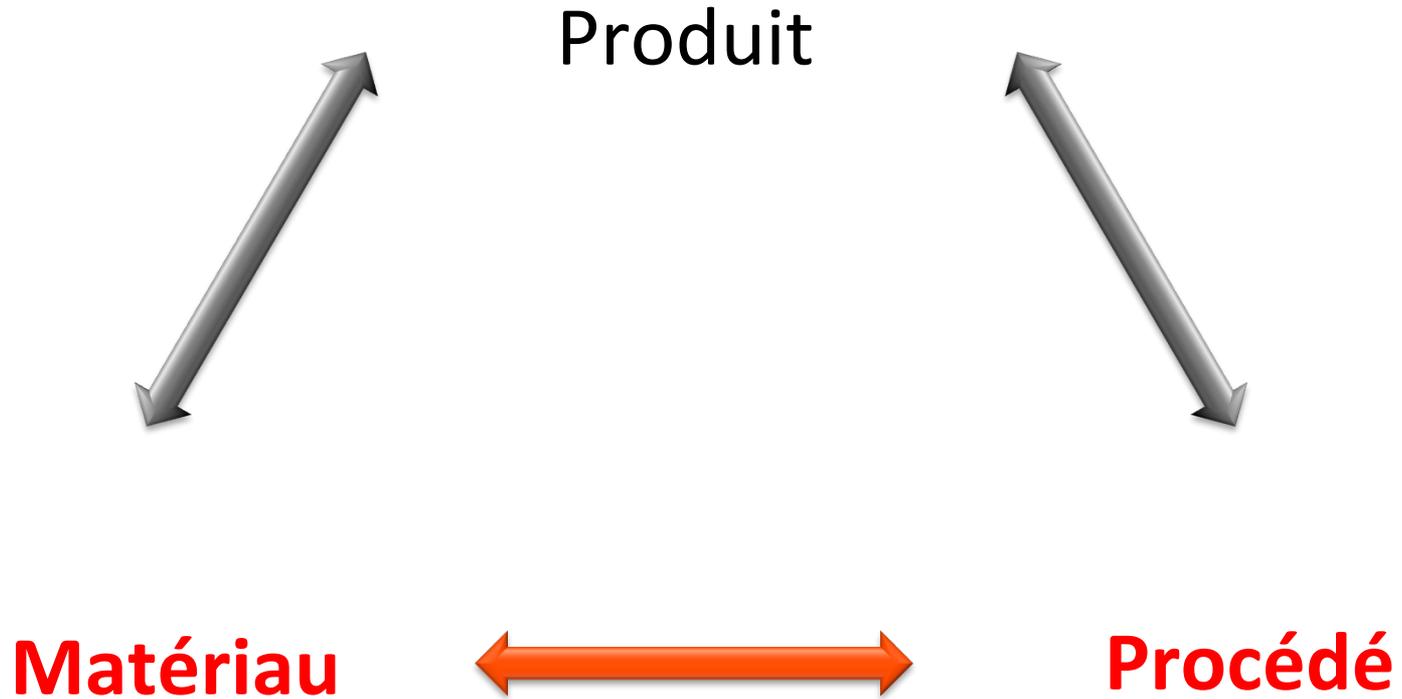
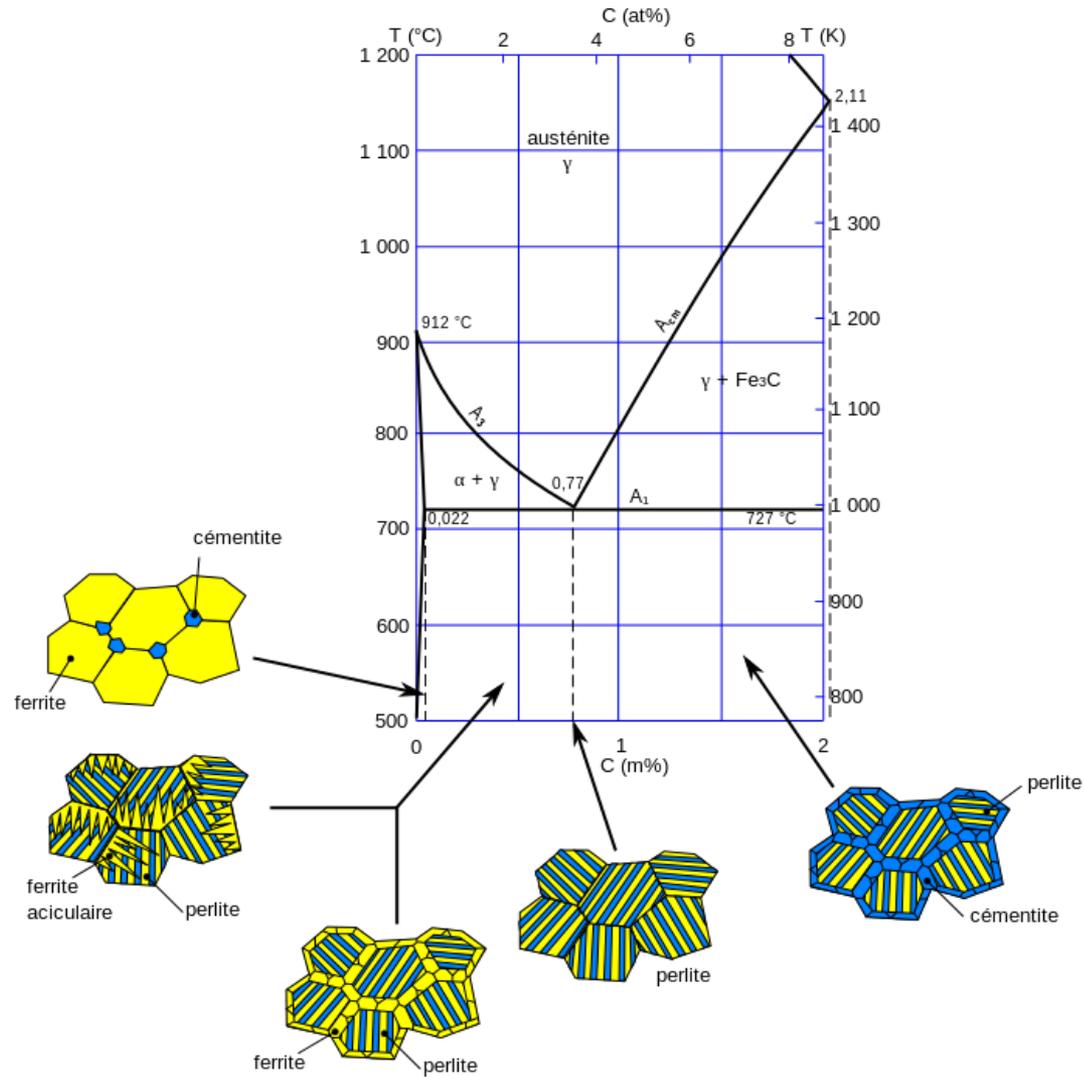


Fig. 5.15. — *Pas de parties massives.*

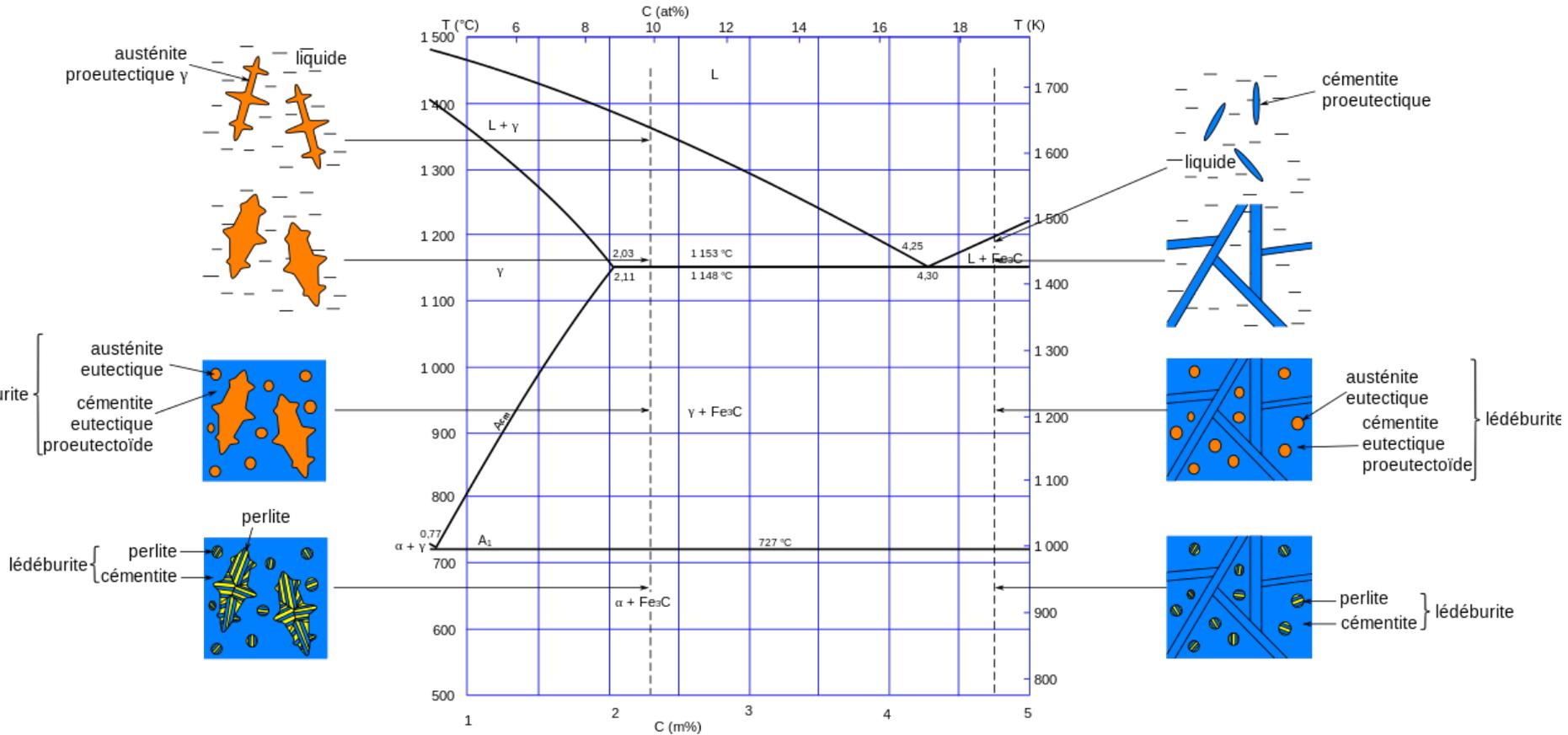
Relation Produit – Procédé – Matériau



Matériau : acier ...

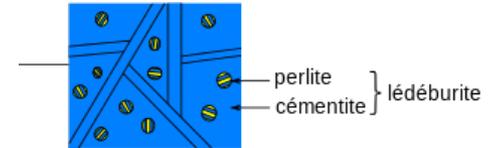


Matériau : acier → fonte



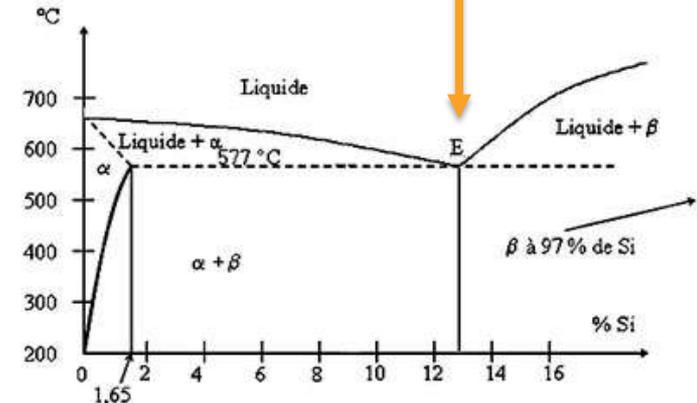
Matériau : acier → fonte

- Cémentite = carbure de fer (Fe_3C) → 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
 - Bâtis, 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



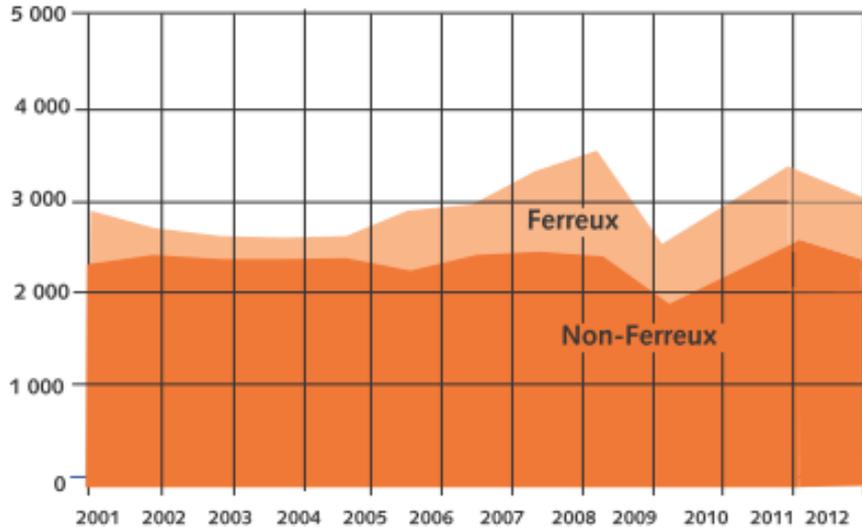
Matériau : ...

- Aciers (pas beaucoup, $T_{\text{fusion}}^{\circ}$ élevée) ; ex : G S 235
- Cuivre ($T_f = 1085^{\circ}\text{C}$)
 - 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 ; $T_f = 384^{\circ}\text{C}$

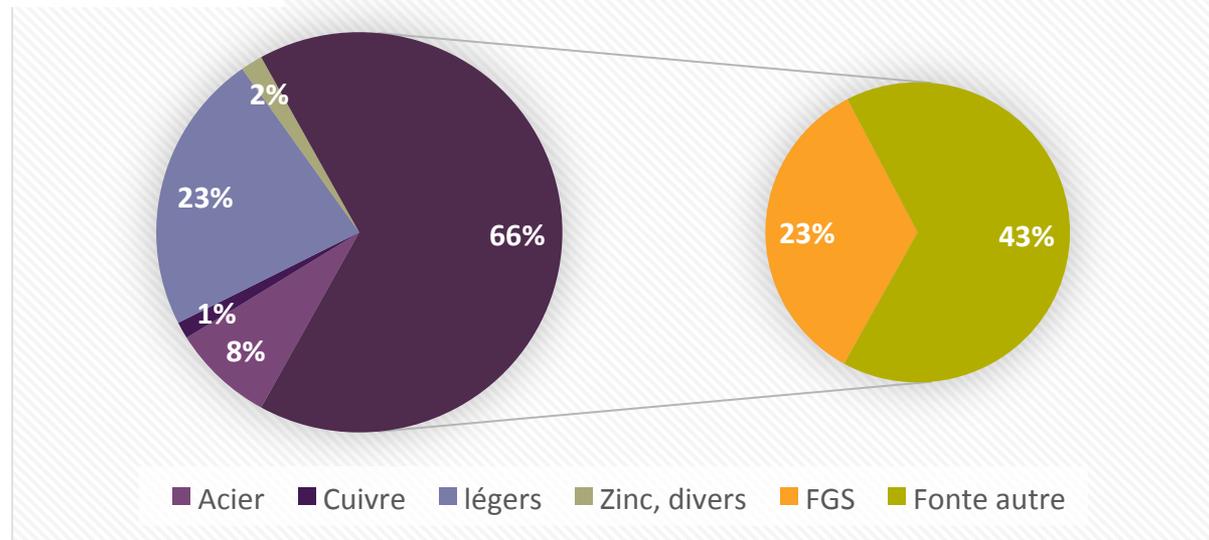


Matériau : marché (2012)

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



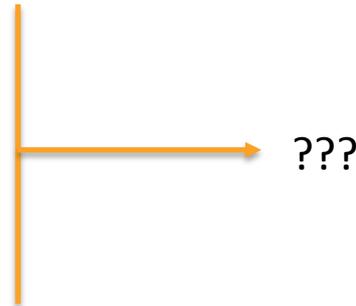
Production (en tonnes)



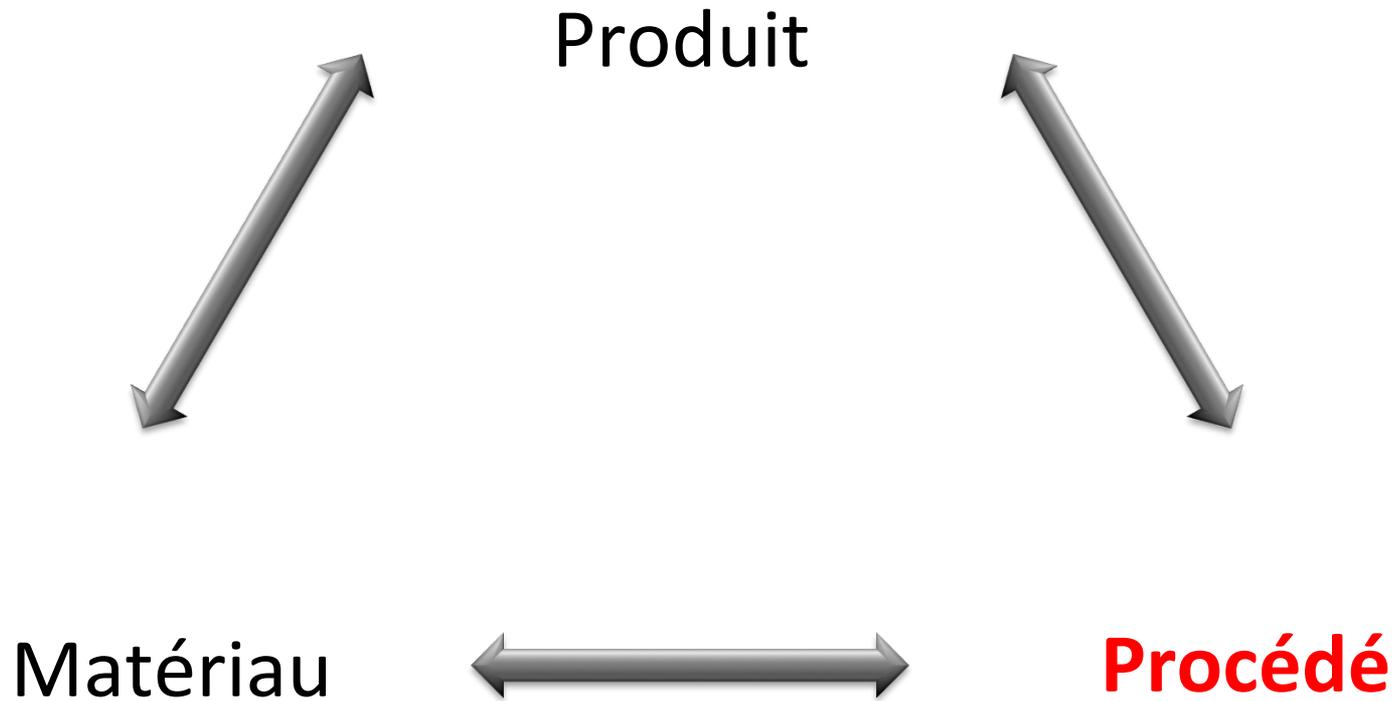
Relation Procédé – Matériau

- Quel moule pour quel matériau ?

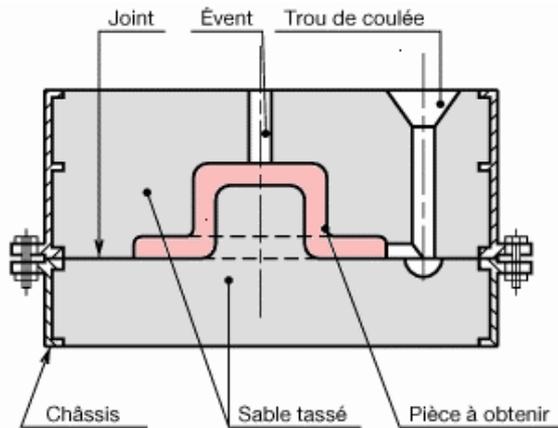
| Matériau | Tf |
|-----------|--------|
| Al 2xxx | 635°C |
| Bronze | 870°C |
| Fonte | 1150°C |
| Acier C45 | 1500°C |
| Inconel | 1350°C |
| TA6V | 1650°C |



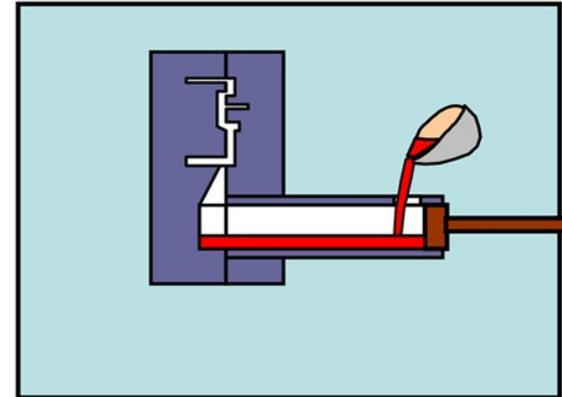
Relation Produit – Procédé – Matériau



Techniques de moulage



Moulage au sable



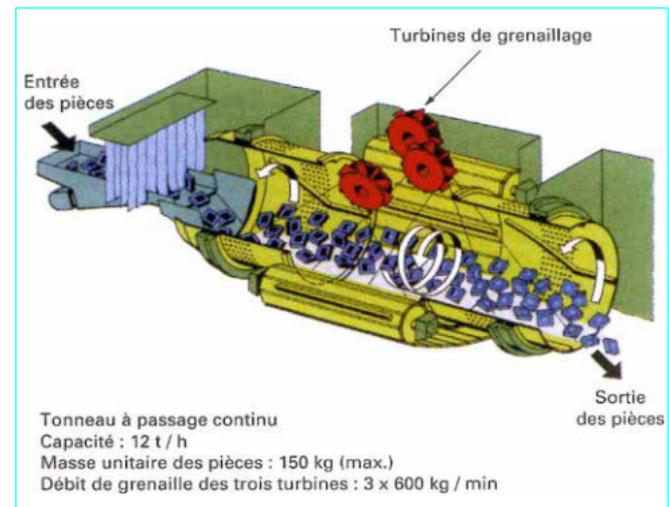
Moulage en coquille



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
 - Grenaillage (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, ...
- 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 MOULE ③ | SÉRIE MINIMUM ④ | CADENCE DE PRODUCTION MOYENNE ⑤ | DURÉE DE VIE MOYENNE DU MOULE ⑥ |
|-----------------------|---|--|-------------------------|------------------------------------|--|
| COULÉE EN COQUILLE | Action de la pesanteur (coulée par gravité) | Métallique. Noyaux en sable aggloméré 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 (alliages d'aluminium) |
| COULÉE BASSE PRESSION | Mise en pression du métal par air comprimé | Métallique Noyaux en sable aggloméré 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) | Filière 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.