

Procédés de Fabrication I - IGI

Chapitre 4. Fonderie

17 janvier 2025

Programme de la première partie

1. Introduction

Généralités

2. Moules non permanents

Moulage en sable

Moulage à la cire perdue

Moulage en carapace

Moulage en mottes

Opérations et vocabulaire

3. Moules permanents

Moulage gravifique

Moulage basse pression

Moulage haute pression

Moulage centrifuge

4.1.1 Généralités

Définition et principe

- *La fonderie est un procédé de production de pièces métalliques.*
- *Au départ du procédé de fonderie,*
 - *le matériau de base est sous forme liquide.*
 - *il coule sous l'effet de la gravité (ou de toute autre espèce de force) dans la cavité d'un outil de forme appelé **moule de fonderie**.*
- *La fonderie est un procédé répliatif.*

Atouts principaux de la fonderie

- *Possibilité de fabriquer des pièces de forme relativement complexe.*
- *Possibilité de fabriquer de pièces de quelques grammes jusqu'à plusieurs tonnes.*
- *Gamme étendue d'alliages dont des matériaux difficiles à usiner.*
- *Adaptation à des productions en petite comme en très grande série.*
- *Facilité de mise en oeuvre avec du personnel faiblement qualifié.*

(cf. Annexe 1)

4.1.2 Généralités (suite)

Aspects technologiques

- *Les moules de fonderie sont*
 - *généralement constitués de sable.*
 - *parfois, ils sont faits en métal.*
- *Les moules en sable sont non-permanents (on dit aussi sacrificiels) :*
 - *1 moule → 1 pièce.*
- *Les moules en métal sont permanents :*
 - *1 moule → N pièces.*

Note historique

- *Premières traces du procédé de fonderie \simeq 4'000 av. J.C. (âge de bronze),*
- *Motivations religieuses (statues, objets de culte) et militaires (canons, dès le 14^{ème} siècle).*
- *Au travers des âges, la fonderie a revêtu une importance stratégique (civilisations égyptienne, grecque, romaine).*

4.1.3 Présentations des procédés

Fonderie à moule non-permanents

- *Moulage en sable,*
- *Moulage à la cire perdue,*
- *Moulage en carapace,*
- *Moulage en motte.*

Fonderie à moule permanents

- *Moulage par gravité,*
- *Moulage basse pression,*
- *Moulage haute pression*
 - *à chambre froide,*
 - *à chambre chaude,*
- *Moulage centrifuge.*

4.2.1 Moules non permanents : moulage en sable

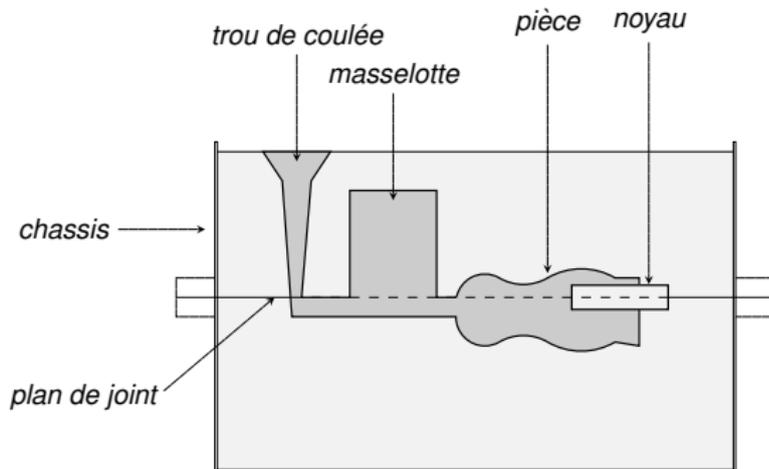
Principes généraux

- *Le moule est fabriqué à la main à partir de sable qu'on serre dans un **chassis** autour d'un modèle fait en bois, plâtre ou en métal. Dans ce sens, le moulage en sable est une chaîne de procédés duplicative.*
- *Le modèle est réutilisable, c'est un modèle maître. Sa fabrication sera discutée plus tard ainsi que les caractéristiques du sable.*
- *Le moule est obtenu après le retrait du modèle (**démoulage**) :*
 - *Le moule est séparable en plusieurs parties, les plans de séparation des parties sont appelés **plans de joint**.*
 - *Les modèles sont inclinés favorablement (**dépouille**).*
- *La pose de **noyaux** à l'intérieur de l'empreinte est nécessaire si la pièce à réaliser est creuse, présente des rebords ou si ses parois n'ont pas de dépouille.*
- *L'empreinte est remplie de métal en fusion par un canal appelé **trou de coulée**.*
- *La pièce est récupérée après destruction du moule (**décochage**). On dit que le moule est un outil de forme **sacrificiel**.*

(cf. Annexes 2, 3, 4)

4.2.2 Moules non permanents : moulage en sable

Schéma d'un moule en sable



Volumes

pièce : V_p
masselotte : V_m
trou de coulée : V_{tc}

Mise en mille

- $Mise\ en\ mille = \frac{V_p + V_m + V_{tc}}{V_p}$

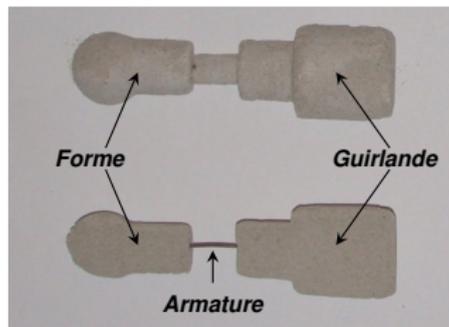
4.2.3 Moules non permanents : moulage en sable

Modèles et noyaux pour la fabrication de moules en sable

Boîte à noyaux



Modèle



Noyau



Pièce

4.2.4 Moules non permanents : moulage en sable

Coulée du métal en fusion



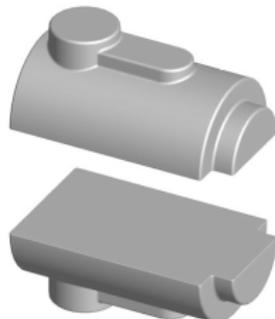
4.2.5 Moules non permanents : moulage en sable

Modèles solides



Copyright © 2008 CustomPartNet

Modèles séparés



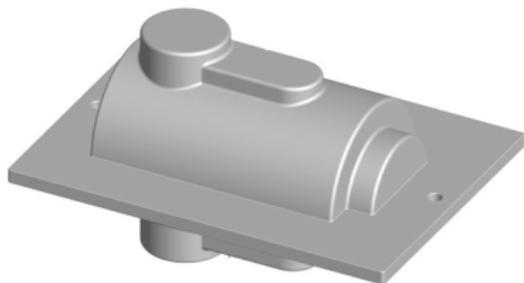
Copyright © 2008 CustomPartNet

Avantage et inconvénients des modèles solides et séparés

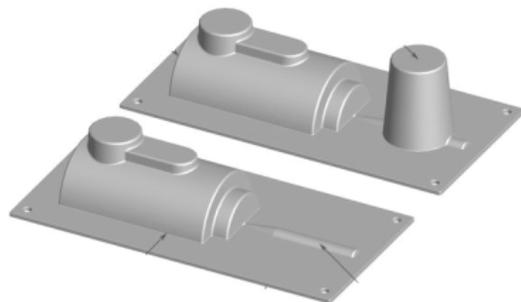
- *faciles à fabriquer, conviennent à de petite série,*
- *conception du masselottage et des canaux indépendante.*
- *positionnement du plan de joint laissé au jugement de l'opérateur dans le cas du modèle solide,*
- *positionnement du plan de joint déjà planifié dans le cas du modèle séparé.*

4.2.6 Moules non permanents : moulage en sable

Modèles avec plaque de joint



Modèles poinçon-matrice



Copyright © 2008 CustomPartNet

Copyright © 2008 CustomPartNet

Avantage des modèles avec plaque de joint

- *planification des plans de joints,*
- *conception du masselottage et des canaux éventuellement intégrée,*
- *convient à une fabrication automatisée des moules.*

4.2.7 Moules non permanents : moulage en sable

Qualité du sable : six indicateurs fondamentaux

1) **La résistance**

- est la faculté du sable à garder sa forme et à résister à l'érosion.

2) **La perméabilité**

- est la faculté du sable à évacuer l'air et les gaz.

3) **La stabilité thermique**

- est la faculté de la cavité à résister aux fissures lors de l'arrivée du métal liquide.

4) **La compliance**

- est la faculté du moule à laisser le métal se retirer sans craquer.

5) **La décochabilité**

- fait référence à la facilité qu'on a d'éliminer le sable de la pièce coulée.

6) **La réutilisabilité**

- qui fait référence au recyclage du sable.

4.2.8 Moules non permanents : moulage en sable

Classification des sables

Il existe deux types de sable :

- 1) *les sables non durcis ou **sables à vert ou encore naturels**.*
- 2) *les **sables à durcissement chimique**.*

1) Les sables à vert (ou sables naturels)

- *Mélanges de silice ou de quartz (SiO_2), d'argile et d'eau.*
- *Mis en forme par serrage (compactage).*
- *Ils conviennent à la plupart des applications et sont bons du point de vue des six indicateurs.*
- *L'humidité peut être problématique dans certains cas (soufflures, réactions chimiques ...).*
- *Dans certains cas, les moules en sable à vert sont partiellement séchés par étuvage. On les appelle alors **moule étuvés**.*
- *Dans d'autre cas, on applique un séchage aux surfaces du moule (air chaud, infra-rouge, flamme ...). On parle alors de **moules flambés**.*

4.2.9 Moules non permanents : moulage en sable

2) Les sables à durcissement chimique

- *Mélanges de silice, d'argile et d'un adjuvant. Il y a deux types de durcissement (à froid et à chaud) et quatre types principaux d'adjuvants :*
 - **Le ciment** : (durcissement à froid)
 - le moule est d'abord serré sur le modèle (qlqs heures),
 - on pratique ensuite au démoulage puis on sèche le moule à l'air (qls jours).
 - **Le silicate de soude Na_2SiO_3** : (durcissement à froid)
 - un gazage au CO_2 transforme le silicate et le combine avec l'eau pour former de l'hydroxyde de silicium $\text{Si}(\text{OH})_4$ (SilicaGel) qui agglomère le moule,
 - moule rigide avec une tendance à s'effriter, bonne recyclabilité du sable.
 - **Les résines furaniques ou phénoliques** : (durcissement à chaud)
 - durcissement par action d'un catalyseur,
 - moules précis et résistants mais chers et pas (ou peu) recyclables.
 - **Les résines thermodurcissables** : (durcissement à chaud)
 - durcissement à plus de 200°C dans une étuve,
 - moules chers et difficiles à recycler mais précis et résistants.

4.2.10 Moules non permanents : moulage en sable

Remarques générales

- *Le moulage en sable à la main est le procédé **générique** de la fonderie.*
- *Le moulage en sable est un procédé très artisanal dont le résultat dépend beaucoup de l'habileté de l'opérateur.*
- *Aujourd'hui les **procédés additifs** (comme le frittage sélectif laser EOS™ ou l'impression 3D PROMETALEXONE™) commencent à être appliqués de façon industrielle pour fabriquer les moules. Dans ce cas, le moulage en sable **ne conclut plus** une chaîne de procédés duplicative.*
- *Des progrès considérables se sont succédés au fil des ages pour :*
 - *améliorer les performances du procédé de fonderie,*
 - *l'automatiser et augmenter les cadences de production.*

Ils ont donné lieu à la naissance de nouveaux procédés de fonderie à moules non permanents comme

 - *le moulage à cire perdue,*
 - *le moulage en carapace,*
 - *le moulage en motte etc...*

dont certains sont présentés ci-après.

4.2.11 Moules non permanents : moulage en sable

Quelques adresses en Suisse

- **Les fonderies de Moudon** : Place de la gare 19, CH-1510 Moudon



- **Durox SA** : En Faraz 3, CH-1031 Mex

DUROX S/A

- **Von Roll Casting SA** : Rüeggisingerstrasse 2, CH-6020 Emmenbrücke



4.2.12 Moules de fonderie par déposition de liant

Préstatitaire de services



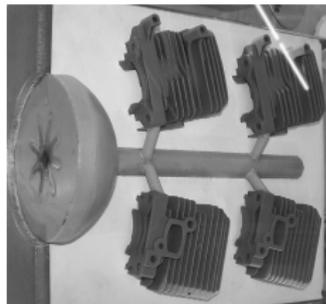
BENNINGER GUSS AG
Fabrikstrasse
CH - 9240 Uzwil
Tél. +41 71 955 88 00
e-mail :info@benningerguss.ch

4.2.13 Moules non permanents : cire perdue

Principes généraux

- *Pour chaque pièce, on fabrique un modèle en cire (ou en urée NH₂-CO-NH₂).*
- *Les modèles en cire sont collés ensemble pour former une grappe.*
- *La grappe est entourée d'une carapace en céramique :*
 - *Les branches de la grappe vont constituer les conduits pour le métal liquide et les masselottes.*
- *La cire est ensuite évacuée dans un autoclave et le moule est fritté à $T \simeq 1000^{\circ}\text{C}$ pour résister au choc thermique et au poids du métal.*
- *Le procédé de cire perdue est une chaîne de procédés duplicative à modèles perdus.*

Modèles perdus revêtus



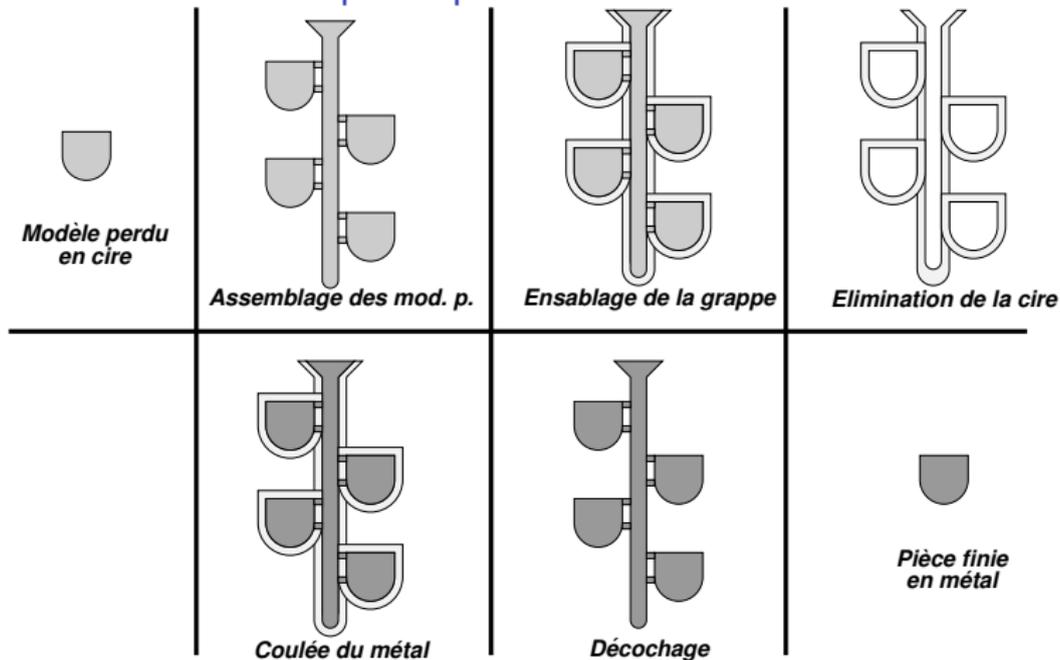
Pièces métalliques



(cf. Annexe 2)

4.2.14 Moules non permanents : cire perdue

Présentation schématique du procédé



4.2.15 Moules non permanents : cire perdue

Avantages

- *Bon état de surface.*
- *Adapté à des pièces de 1g à > 100kg.*
- *Adapté à tous les matériaux de fonderie.*
- *Aspect des trous jusqu'à 3 :1.*
- *Epaisseur des parois < 1 mm.*

Inconvénients

- *Maîtrise des retraits (cire, sable, métal)*
- *Fabrication des modèles perdus (procédés additifs bien adaptés)*

Applications

- *Implants médicaux et dentaires.*
- *Bijouterie, joaillerie.*
- *Pièces de moteur, aube de turbine.*

Implants médicaux



Culasse moteur à comb.



4.2.16 Moules non permanents : cire perdue

Armatures (airbus)



Aube de turbine



Statuette en bronze



4.2.17 Moules non perm. : moulage en carapace

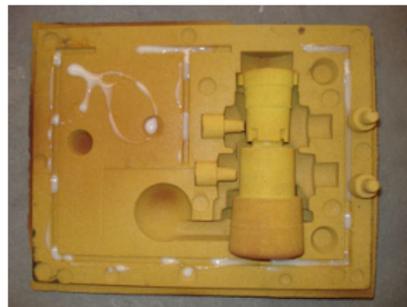
Principes généraux

- *Le moule est fait dans un sable à durcissement chimique à chaud (résine phénolique).*
- *Une plaque-modèle en métal est chauffée entre 200 et 300° C.*
- *Le sable est aggloméré sur la plaque par fusion de la résine.*
- *On dégage une carapace (ou croûte) durcie de la plaque-modèle.*
- *Les carapaces sont assemblées par collage et crampage pour former un moule.*
- *Ce procédé est aussi appelé **procédé Croning** du nom de son inventeur.*
- *Le moulage en carapace est une chaîne de procédés duplicative à modèles maîtres.*

Plaque modèle



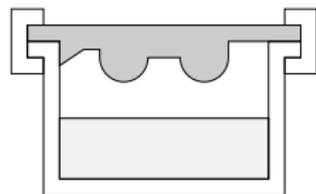
Carapace en sable



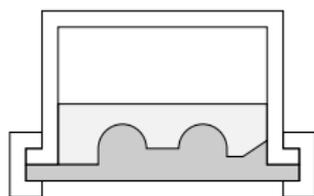
(cf. Annexe 2)

4.2.18 Moules non perm. : moulage en carapace

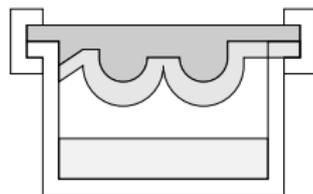
Présentation schématique du procédé



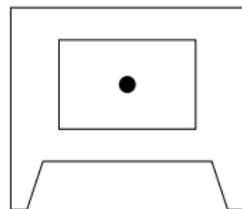
Chauffage du modèle



Premier retournement



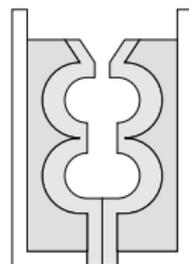
Second retournement



Séchage au four



Récupération de la coquille



Moule final

4.2.19 Moules non perm. : moulage en carapace

Avantages

- *Adapté à tous les matériaux de fonderie.*
- *Cadences de fabrications de 50 à 60 carapaces/heure.*
- *Tolérances : ± 0.2 mm (parfois inf. selon l'alliage), bel état de surface.*
- *Décochage et nettoyage des pièces faciles et post-usinage réduit.*
- *Manutention légère et conservation illimitée des modèles et des boîtes à noyaux.*

Inconvénients

- *Outillage coûteux (à amortir sur grandes séries) et résine chère.*
- *Mise au point délicate (retrait du sable durci).*
- *Limite de poids sur les pièces produites.*
- *Contrôle poussé des temps, des matières, des températures.*

Applications

- *Production de masse, robinetterie, tubes.*
- *Pièces de moteurs (arbres, têtes de cylindre).*

4.2.20 Moules non permanents : moulage en motte

Principes généraux

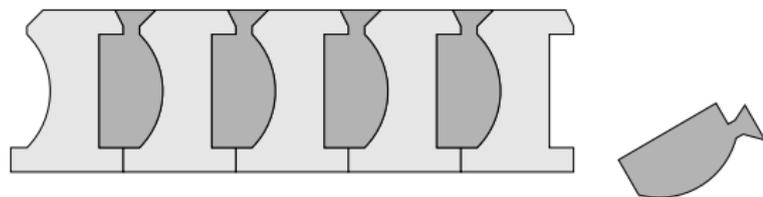
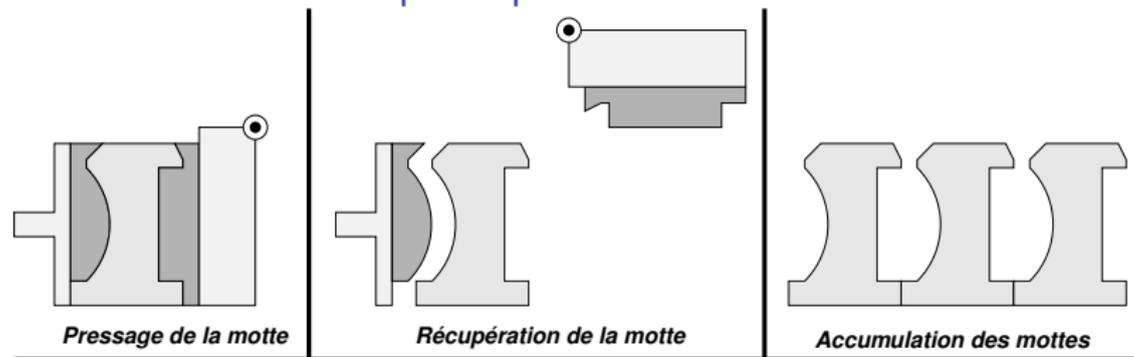
- *Inventé en 1957 (Vagn Aage Jeppesen), le moulage en motte repose sur le fait que les chassis sont inutiles dès que le sable est pressé à > 10 bars.*
- *Les parties inférieure et supérieure du moule sont construites dos à dos par l'action d'un piston qui presse le sable (**motte**) contre un volet mobile.*
- *Le volet mobile est basculé, la motte se déplace sur un tapis roulant et s'assemble aux autres.*
- *Le métal liquide est coulé dans les cavités entre les mottes. En fin de tapis, le métal est redevenu solide et le dernier moule tombe dans le couloir de décochage.*



Procédé Disamatic™

4.2.21 Moules non permanents : moulage en motte

Présentation schématique du procédé



Production

4.2.22 Moules non permanents : moulage en motte

Avantages

- *Automatisation poussée de la machine, un opérateur s'occupe de deux unités.*
- *Bonne précision (tol. typique de 0.1 mm).*
- *Adapté à la production de grandes séries avec des cadences allant jusqu'à 240 moules complets à l'heure.*

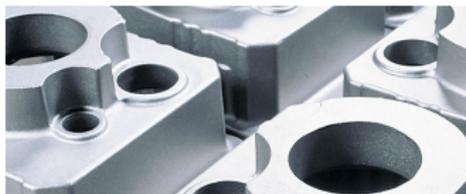
Inconvénients

- *L'installation de noyaux dans les empreintes est possible mais cette opération diminue la productivité.*

Applications

- *Industrie automobile, casseroles en fonte.*
- *Dimensions typiques des machines : de 400 mm×500 mm à 850 mm×1200 mm.*

Pièces pour l'automobile.



Casseroles en fonte



4.2.23 Opérations avec des moules non permanents

Gamme d'opérations

- 1) **Moulage** : fabrication du moule, utilisation d'un modèle.
- 2) **Démoulage** : enlèvement du modèle.
- 3) **Noyautage** : fabrication des noyaux.
- 4) **Remmoulage** : préparation du moule (assemblage des parties et des noyaux).
- 5) **Fusion** : obtention du métal liquide.
- 6) **Coulée** : remplissage du moule à l'aide de creusets.
- 7) **Décochage** : ouverture et défonçage du moule.
- 8) **Débouillage** : destruction des noyaux.
- 9) **Ebarbage et finition** : tronçonnage du jet de coulée, meulage des bavures.
- 10) **Opérations secondaires** : traitements thermiques, usinages.

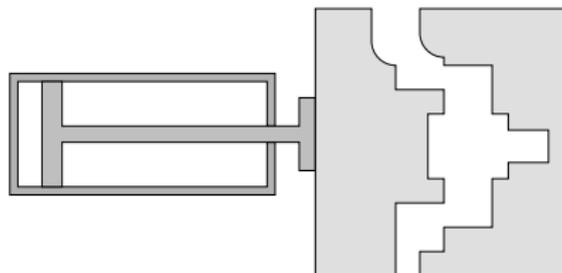
4.3.1 Moules permanents : généralités

Principes généraux

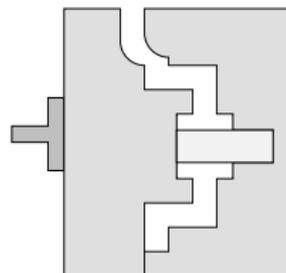
- Réaliser le moule en métal plutôt qu'en sable présente quelques avantages :
 - i) Le moule est réutilisable ou **permanent** et le contrôle des dimensions et des états de surface est facilité.
 - ii) Le métal est bon diffuseur thermique, le refroidissement est donc plus rapide (augmentation significative des cadences de production, diminution de la taille de grains et amélioration des propriétés mécaniques.)
- Les métaux généralement utilisés pour faire des moules sont des aciers :
 - la fonderie à moule permanent s'applique aux alliages à bas point de fusion (Al, Mg, Cu, Zn, les fontes sont en principe exclues).
- Les moules en métal sont usinés (HSM) ou érodés (EDM) :
 - prix élevé (> 100 kFrs), utilisation limitée aux grandes séries de pièces.
 - en moulage permanent, la chaîne de procédés correspondante n'est en principe **jamais** duplicative.
- Les techniques de fonderie à moules permanents se distinguent entre elles par la méthode de remplissage de la cavité :
 - i) moulage par gravité, moulage basse pression ou moulage centrifuge,
 - ii) moulage sous haute pression à chambre froide ou chaude (inj. métal.)

4.3.2 Moules permanents : moulage par gravité

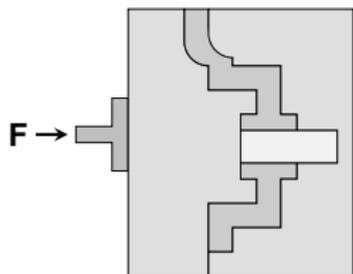
Présentation schématique



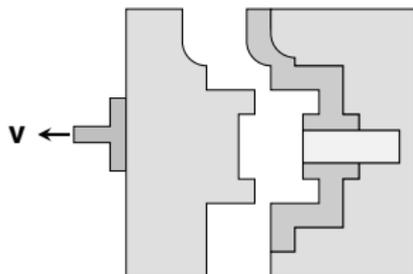
Prechauffage et revêtement



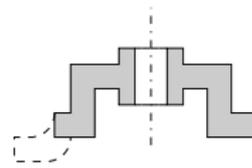
Installation du noyau



Fermeture et remplissage



Ouverture du moule



*Pièce finie
(vue en coupe)*

4.3.3 Moules permanents : moulage par gravité

Caractéristiques

- *Préchauffage requis pour éviter les chocs thermiques.*
- *Tolérances linéaires :*
 - alliages légers : 0.2-0.4 mm sur 100 mm*
 - alliages cuivreux : 0.3-0.6 mm sur 100 mm*
- *Durée de vie du moule sans retouche importante :*
≈ 50'000 pièces
- *A l'exception de la coulée, automatisation quasi totale possible :*
 - *guidage par crémaillères, ou vis,*
 - *verrins pneumatiques, hydrauliques ou électriques.*

Coulée gravifique

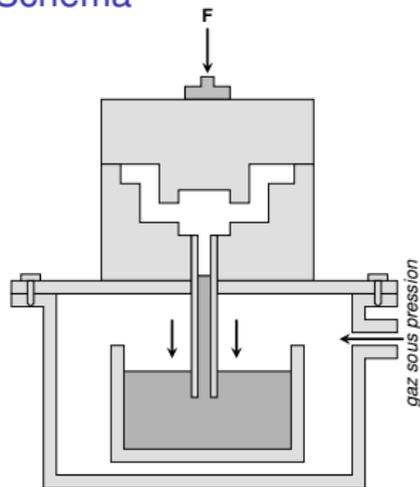


4.3.4 Moules permanents : moulage basse pression

Principes généraux

- *La cavité est située au-dessus et reliée au bain de métal en fusion par un **tube plongeur**.*
- *L'ensemble (bain+moule) est placé dans un environnement hermétiquement fermé et est mis sous vide relatif (1 mbar).*
- *Pour faire monter le métal dans la cavité, une surpression (0.1-0.2 bar) est appliquée à l'environnement étanche contenant le bain en fusion.*
- *Par rapport au remplissage par gravité :*
 - *diminution de la mise en mille et les défauts de remplissage (porosité, piqûres, retassures, malvenues).*
 - *appareillage est plus cher,*
 - *application principale : fabrication de jantes pour l'industrie automobile.*

Schéma



4.3.5 Moules permanents : moulage basse pression

Jante en aluminium



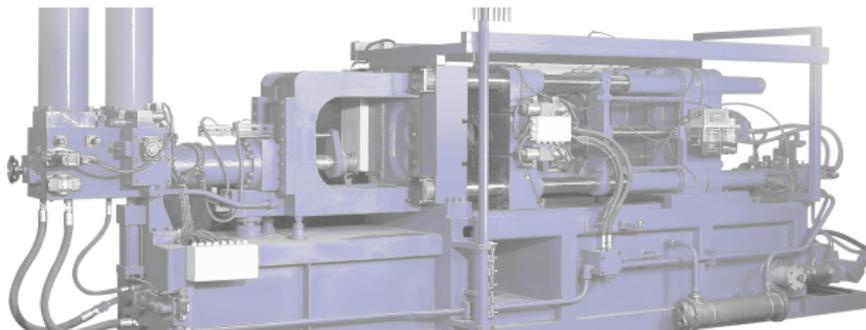
Appareillage



4.3.6 Moules permanents : moulage haute pression

Principes généraux

- *Le métal est injecté dans le moule par un **piston** qui se déplace dans une **chambre**,*
- *La pression peut atteindre 1000 bars,*
- *La technique de moulage est entièrement mécanisée, le moule est formé de deux blocs (l'un est bridé, l'autre est mobile).*
- *Au moment de l'injection le moule est verrouillé par un vérin hydraulique (**force de fermeture** jusqu'à 3000 t)!*
- *La pièce est **éjectée** au moment de la réouverture du moule.*

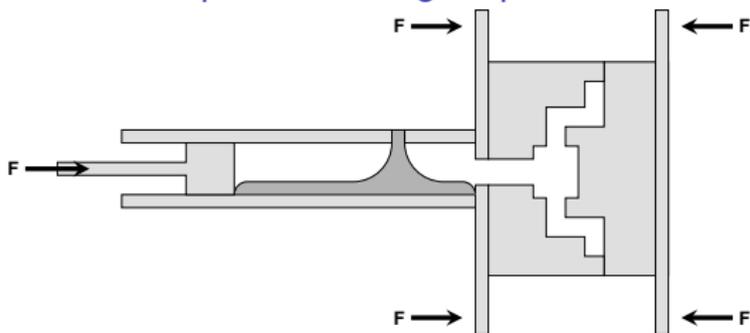


4.3.7 Moules permanents : moulage haute pression

Moulage haute pression à chambre froide ou chaude

- *On distingue deux procédés de moulage haute pression selon que la chambre du piston est maintenue ou non en température.*
- *Si la chambre n'est pas chauffée, on parle de procédé à **chambre froide**.*
- *La chambre froide est alimentée en métal fondu par une trémie.*
- *Le risque de ce procédé sont les blocages dus à des solidifications inopinées dans la chambre.*

Présentation schématique du moulage h.p. à chambre froide

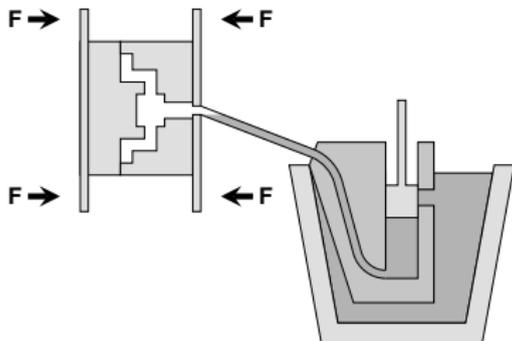


4.3.8 Moules permanents : moulage haute pression

Moulage haute pression à chambre froide ou chaude

- Si la chambre est chauffée, on parle de procédé à **chambre chaude** ou procédé bec d'oie (gooseneck).
- La réserve de métal fondu est complétée à chaque retour de piston.
- Ce procédé réduit le problème de blocage mais n'est pas applicable aux alliages à haut point de fusion.

Présentation schématique du moulage h.p. à chambre chaude



4.3.9 Moules permanents : moulage haute pression

Avantages

- Tolérance faible (0.5 mm sur 100 mm).
- Très bons états de surface ($Ra \simeq 2 \mu m$).
- Faible épaisseur de paroi (0.3 à 0.6 mm).
- Procédé fournissant des produits à contours quasi-définitifs (réduction d'usinage).
- Faible mise au mille (1.3).
- Excellentes propriétés mécaniques.
- Durée de vie d'un moule :

<i>matière injectée</i>	<i>nombre de pièces</i>
<i>alliage d'aluminium :</i>	75'000 à 130'000
<i>alliage de zinc :</i>	200'000 à 500'000
<i>laiton :</i>	20'000 à 50'000

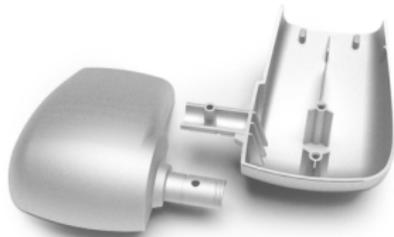
Inconvénients

- Investissement important (presse+moule)

Pièce en aluminium

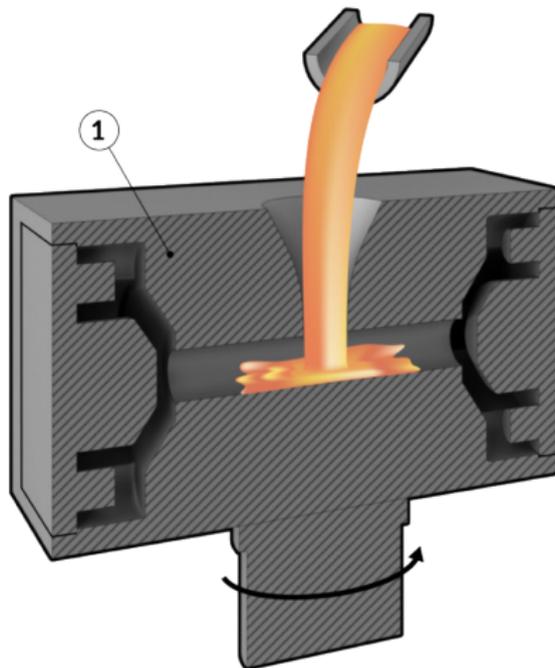


Pièce en zinc



4.3.10 Moules permanents

Moulage centrifuge



4.3.11 Moules permanents : moulage centrifuge

Avantages

- *Bon contrôle de la solidification (avancée radiale).*
- *Possibilité d'influencer la microstructure en agissant sur le débit de coulée.*
- *Les **meilleures** propriétés qu'on puisse obtenir par un procédé de fonderie.*

Inconvénients

- *Impossibilité d'utiliser des noyaux (qui ne résisteraient pas aux forces centrifuges).*
- *Degré d'automatisation réduit.*

Applications

- *Pièces à géométrie cylindrique,*
- *Paliers de glissement, paliers à rouleaux.*

Pallier



Rotors



Programme de la seconde partie

4. Défauts principaux des pièces de fonderie

Défauts généraux

Problèmes liés au moulage en sable

5. Matériaux de fonderie

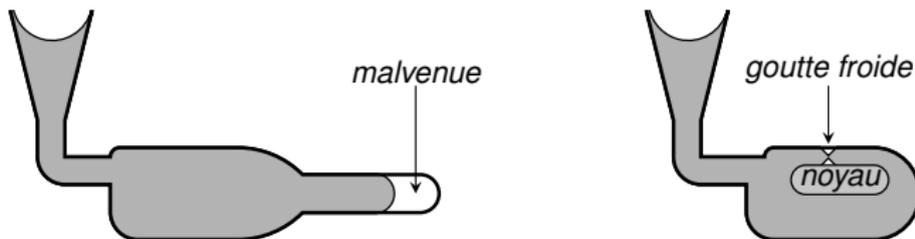
Les fontes

Autres matériaux

4.4.1 Défauts de fonderie : malvenue et goutte froide

Manifestation

- On appelle **malvenue** la zone manquante qui apparaît lorsque le métal se solidifie complètement avant d'avoir entièrement atteint le bord de la cavité.
- On appelle **goutte froide** le défaut interne qui apparaît à l'endroit où deux flux opposés de métal liquide n'ont pas réussi à s'unir avant solidification.



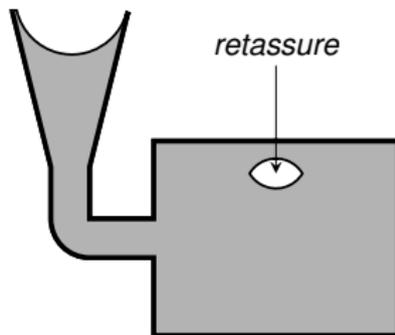
Causes/Solutions

- Mauvaise fluidité du métal liquide, température de coulée trop basse.
- Coulée trop lente, étranglement dans la cavité

4.4.2 Défauts de fonderie : retassures

Manifestation

- *Les retassures sont des dépressions externes (plus rarement internes). Elles sont liées au retrait de solidification important qui peut réduire la quantité de matière dans la dernière région qui se solidifie.*



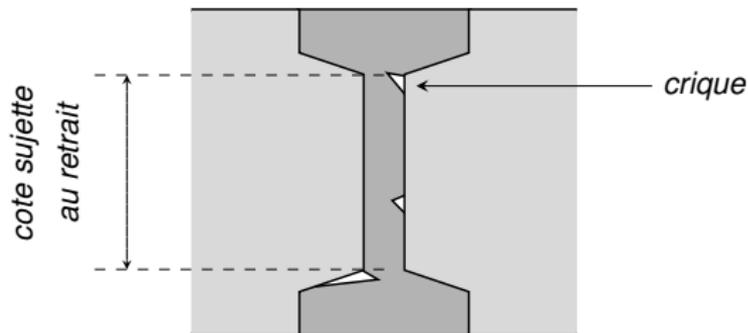
Solutions possibles

- **Moules non permanents** : Adaptation du masselottage
- **Moules permanents** : Contrôle de la pression de remplissage

4.4.3 Défauts de fonderie : criques

Manifestation

- *On appelle criques les défauts apparaissant lorsque la trop grande rigidité du moule empêche le retrait naturel de la pièce en fin de solidification. Ils se manifestent par une fissure de la pièce aux endroits où les tensions de traction sont maximales.*



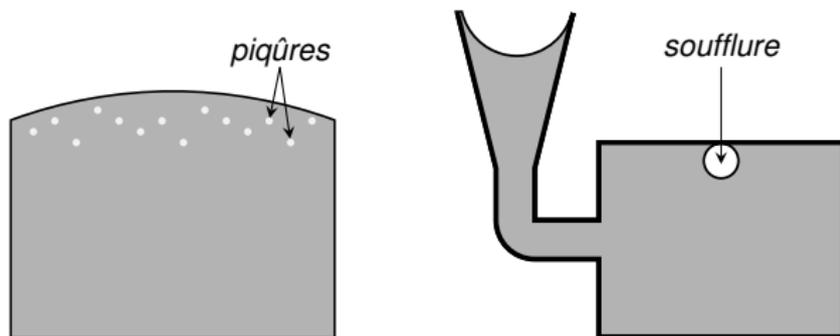
Solutions possibles

- **Moules non permanents** : Amélioration de la collapsibilité du sable
- **Moules permanents** : Ejection rapide de la pièce

4.4.4 Défauts de fonderie : piqûres et soufflures

Manifestation

- Des gaz (O_2 , H_2) dissous dans le métal en fusion et se dégageant lors de la solidification peuvent former de petites cavités ($\varnothing < 2\text{mm}$) appelées piqûres.
- Le mvmnt. de coulée peut faire percoler du gaz depuis les **moules en sable**. Il en résulte des cavités beaucoup plus grandes ($\varnothing \simeq 1\text{cm}$) : les soufflures.



Solutions possibles pour les soufflures

- **Moules non permanents** : Améliorer la perméabilité et la ventilation du sable, diminuer son taux d'humidité.
- **Moules permanents** : Agir sur les pressions de remplissage.

4.4.5 Défauts de fonderie : macroségrégation

Manifestation

- La macroségrégation est liée à la coulée d'**alliage** (solvant+soluté).
- Des **mouvements de convection** transportent du liquide riche en soluté sur des distances $> \text{mm}$ \implies inhomogénéité de c_{solute} à l'échelle macroscopique.
- Elle conduit à des pertes dramatiques des propriétés mécaniques.
- Contrairement à la **microségrégation** qui correspond à des fluctuations de c_{solute} à l'échelle microscopique, elle est difficile à éliminer par des traitements thermiques.

Causes des mouvements de convection

- Écoulement forcé lié à la coulée, retraits de solidification et entrainement de bulles d'air ou de vapeur.
- Forces d'Archimède liées à des différences de densité en fonction de c_{solute} .

Solutions possibles

- Contrôle des mouvements par application de forces externes (brassage, application de champs électro-magnétiques, coulée continue, etc...)

(cf. Annexes 5, 6)

4.4.6 Problèmes de la fonderie en sable

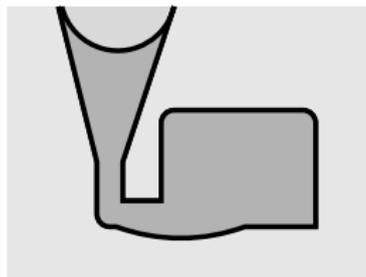
Classification

Il y a trois grands types de problèmes directement liés à la fonderie en sable

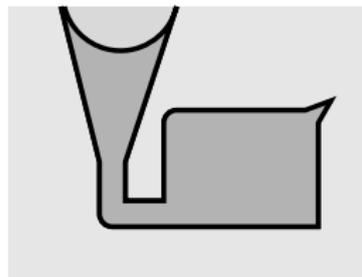
- (1) *Les interactions physico-chimique entre le moule et la pièce,*
 - *Les **marbrures** qui sont des taches apparaissant sur la pièce et correspondent à une incrustation du sable dans le métal en fusion.*
 - *Les **pénétrations** sont des défauts qui correspondent à une infiltration du métal dans la porosité du sable de fonderie.*
- (2) *Les dommages provoqués sur le moule par le métal en fusion :*
 - *L'**érosion** du moule durant la coulée.*
 - *Les **fissurations** apparaissant dans des moules trop peu résistants.*
- (3) *Les déplacements relatifs des éléments de moule*
 - *Le **décalage des parties supérieures et inférieures** du moule en cours de coulée.*
 - *Le **décalage des noyaux** sous l'effet de la force d'Archimède.*

4.4.7 Problèmes de la fonderie en sable (suite)

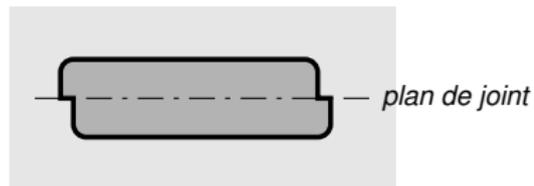
Illustrations des problèmes des classes (2) et (3)



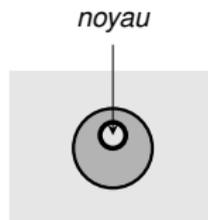
érosion du moule



fissuration du moule



déplacement des parties du moule



déplacement du noyau

4.5.1 Matériaux de fonderie, les fontes

Les fontes

- Les **fontes** sont des alliages de fer riches de 2.1 à 6.67% de carbone (combiné éventuellement au silicium).
- Leur **coulabilité** est excellente et leurs **températures de fusion** varient entre 1147° C et 1350° C selon la proportion de carbone et de silicium.
- Les fontes cristallisent soit sous forme d'une combinaison de **ferrite** α et de **graphite** (C) soit sous la forme d'une combinaison de **ferrite** α et de **cémentite** (Fe_3C). Cette dernière combinaison est **métastable**.
- Les fontes cristallisant sous forme de cémentite sont appelée **fontes blanches**. L'obtention d'une fonte blanche est favorisée par
 - des faibles teneurs en carbone et en silicium,
 - des vitesses de solidification élevées (car les atomes de carbone sont peu mobiles).
- Les fontes présentant une phase de Fer α et une phase graphite sont les **fontes grises**. L'obtention d'une fonte grise est favorisée par
 - une addition importante de silicium (élément graphitisant)
 - des vitesses de solidification faibles.

4.5.2 Matériaux de fonderie, les fontes blanches

Avantages des fontes blanches

- *bonne coulabilité*
- *aspect blanc brillant*
- *très résistantes à l'usure et à l'abrasion*

Applications des fontes blanches

- *pièces d'aspect, fonderie d'art*
- *pièces d'usure*

Inconvénients des fontes blanches

- *usinabilité délicate*

4.5.3 Matériaux de fonderie, les fontes grises

Avantages des fontes grises

- *excellente coulabilité*
- *bonne usinabilité*
- *très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud*
- *très bonne absorption des vibrations*
- *stabilité dimensionnelle*
- *prix peu élevé*

Applications des fontes grises

- *de nombreux type de pièces mécaniques (différents grades de résistance)*
- *réalisation de machines outil silencieuses et stables*

Inconvénients des fontes grises

- *relativement fragiles comparées aux aciers (qui sont difficilement coulables) et aux fontes blanches.*

4.5.4 Matériaux de fonderie, les alliages de Cuivre

Généralités

- *Le principal alliage cuivreux utilisé en fonderie est le **bronze** (Cu-Sn). Le **laiton** (Cu-Zn) est moins courant.*

Propriétés

- *sa résistance à la corrosion*
- *son bel aspect et sa résistance à l'usure*

Inconvénients

- *prix élevé du cuivre.*

Applications

- *tuyauterie et paliers mécaniques (pompes)*
- *hélices de bateau*

Statue (XIXème)



4.5.5 Matériaux de fonderie, l'aluminium

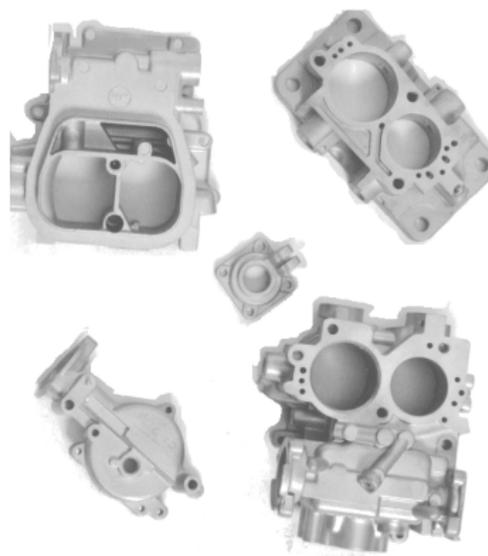
Généralités

- *L'aluminium est considéré comme un des meilleurs matériaux pour la fonderie*
- *Sa température de coulée est particulièrement basse ($T_m = 660^{\circ}\text{C}$)*

Propriétés

- *légèreté*
- *possibilité de couvrir une grande gamme de résistance par traitement thermique*
- *très bonne usinabilité*

Pièces en alu



4.5.6 Matériaux de fonderie, les alliages de zinc

Généralités

- *Le zinc et ses alliages sont les matériaux principaux utilisés en injection métallique*
- *Leur coulabilité est de tout premier ordre et leur température de coulée très basse ($T_m = 419^{\circ}\text{C}$ pour le zinc)*

Bloc moteur en zinc coulé (injection métallique)



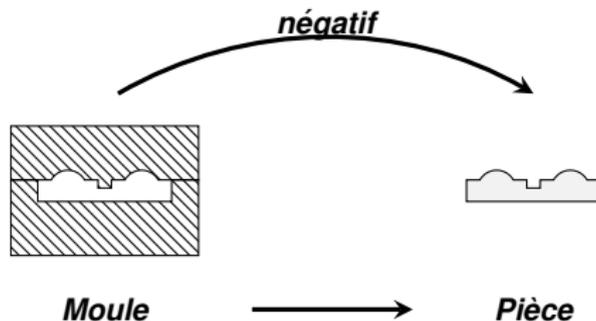
ANNEXES, TABLES ET BIBLIOGRAPHIE

A 1: Procédés réplcatifs

Définition : Procédé réplcatif

(Rappel)

- Un procédé réplcatif est un procédé dans lequel la pièce est obtenue en déformant la matière dans un outil de forme. L'outil de forme est un négatif de la pièce et, dans le cas de la fonderie, on l'appelle un **moule**.

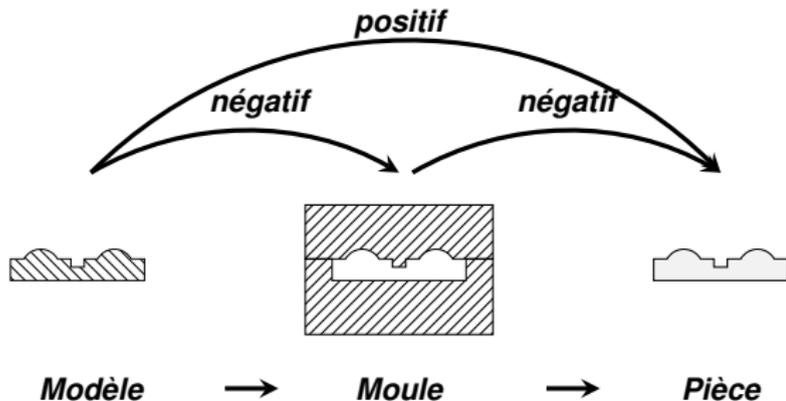


- Les procédés réplcatifs s'opposent :
 - aux procédés **ablatifs** où la pièce est obtenue par **enlèvement** de matière
 - aux procédés **additifs** où la pièce est obtenue par ajout de matière **sans** outil de forme.

A 2: Procédés duplicatifs

Définition : Chaîne de procédés duplicative

- Un procédé **réplicatif** termine une chaîne duplicative si l'outil de forme qu'il utilise est fabriqué lui aussi, par un procédé **réplicatif**.

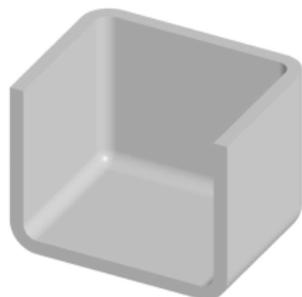


- Le modèle est appelé **modèle maître** s'il est réutilisable. S'il doit être sacrifié pour récupérer le moule, on l'appelle **modèle perdu**.

A 3: Conceptions adaptées à la fonderie

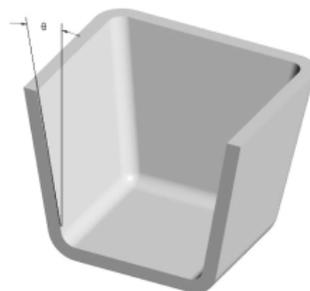
Prévoir des dépouilles et des rayons

Situation défavorable à la fonderie

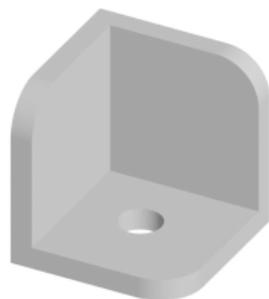


Copyright © 2007 CustomPartitas

Situation favorable à la fonderie



Copyright © 2007 CustomPartitas



Copyright © 2007 CustomPartitas



Copyright © 2007 CustomPartitas

A 4: Conceptions adaptées à la fonderie (suite)

Prévoir des parois minces et uniformes

Situation défavorable à la fonderie

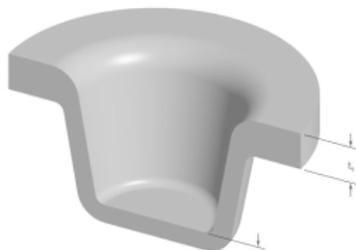


Copyright © 2007 CustomPartz Inc.

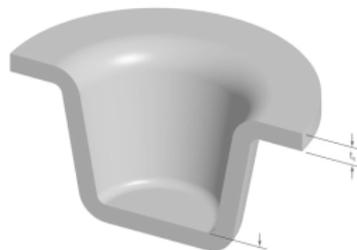
Situation favorable à la fonderie



Copyright © 2007 CustomPartz Inc.



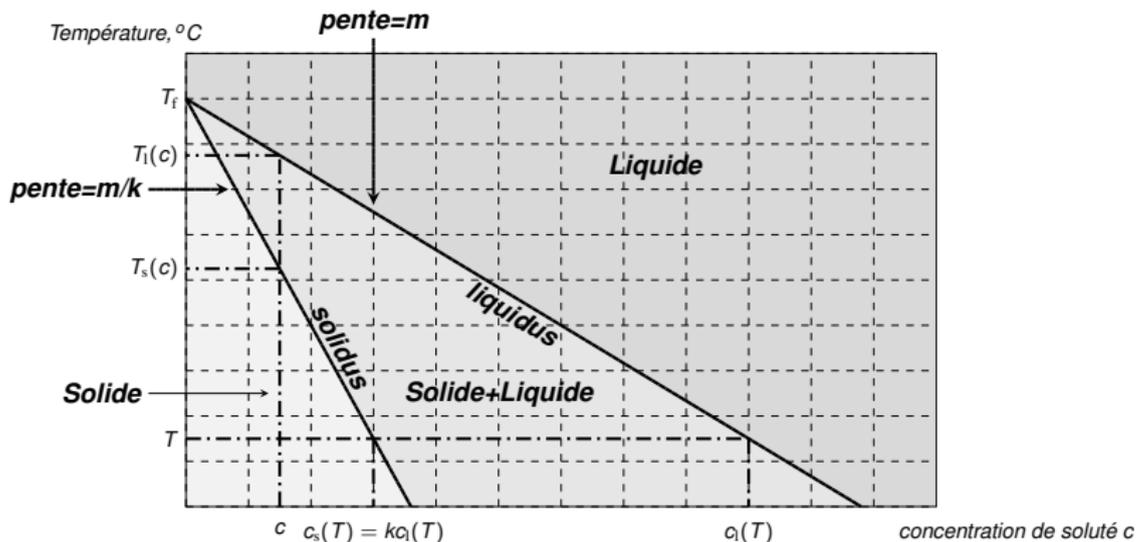
Copyright © 2007 CustomPartz Inc.



Copyright © 2007 CustomPartz Inc.

A 5: Phénomène de ségrégation

Diagramme de phase typique



A 6: Défauts typiques

Illustrations de défauts typiques

malvenue



goutte froide



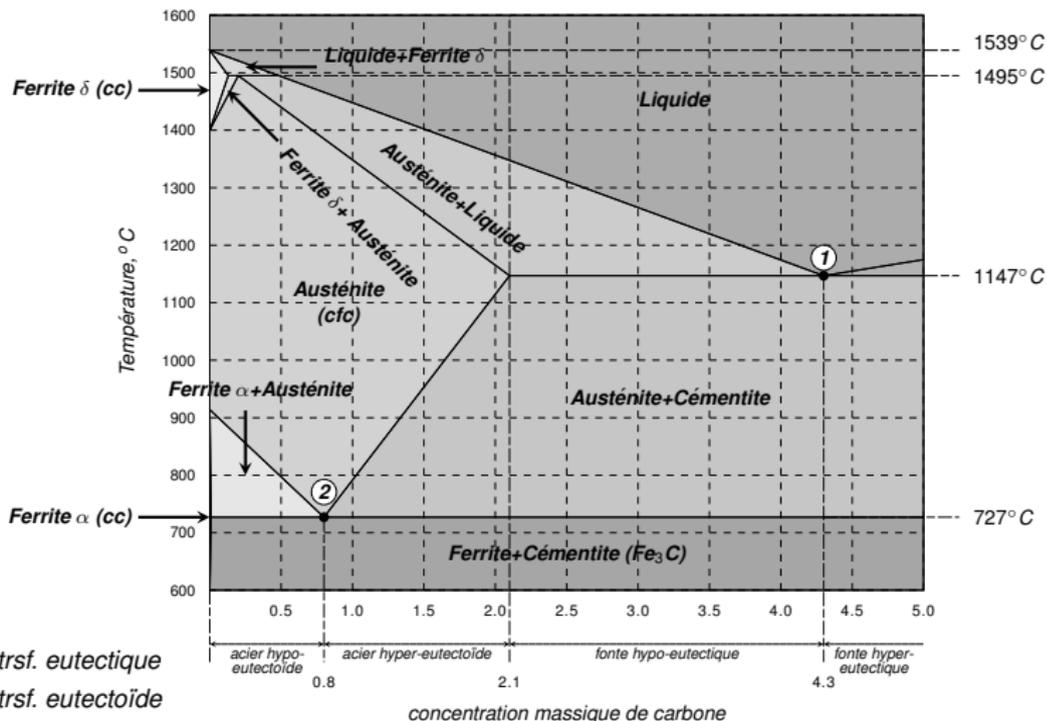
retassure



macrosegrégation

A 7: Diagramme de phase Fer-Carbone

Le diagramme de phase Fe-C avec $c < 4\%$ et $T > 600^\circ\text{C}$

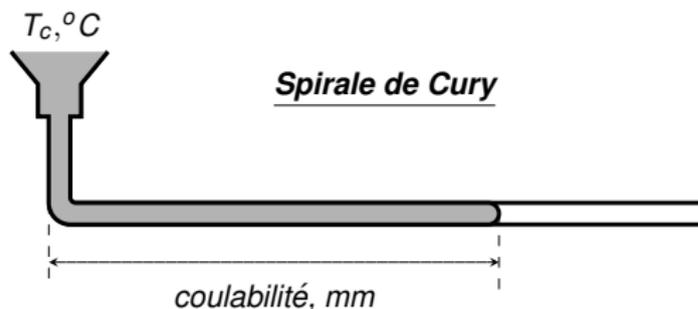


En 1 : trsf. eutectique

En 2 : trsf. eutectoïde

A 8: Coulabilité

- La coulabilité caractérise la faculté d'un métal à **remplir un moule** lorsqu'il est coulé à une certaine température T_c . Elle est mesurée au moyen d'un canal standardisé (**la spirale de Cury**).



- Le métal est déposée dans l'entonnoir à la température T_c . La coulabilité correspond alors à la **distance (mesurée en mm)** à laquelle le métal achève de se consolider.
- La coulabilité est une mesure hybride qui compose deux quantités physiques **l'inertie thermique et la viscosité**. Elle augmente avec l'inertie thermique mais diminue si la viscosité augmente.

A 9: Terminologie anglaise

Principaux procédés de fonderie et opération

<i>Français</i>	<i>Anglais</i>
<i>Fonderie :.....</i>	<i>Casting</i>
<i>Moulage en sable :.....</i>	<i>Sand casting</i>
<i>Procédé de cire perdue :.....</i>	<i>Investment casting</i>
<i>Moulage en carapace :.....</i>	<i>Shell molding</i>
<i>Moulage en motte :.....</i>	<i>Disamatic molding</i>
<i>Moulage basse pression :.....</i>	<i>Low pressure casting</i>
<i>Moulage haute pression :.....</i>	<i>Die casting</i>
<i>Chambre chaude (froide) :.....</i>	<i>Hot-(cold-)chamber</i>
<i>Moulage centrifuge :.....</i>	<i>Centrifugal casting</i>
<i>Noyautage :.....</i>	<i>Coring</i>
<i>Démoulage :.....</i>	<i>Pattern withdrawal</i>
<i>Décochage :.....</i>	<i>Stripping</i>
<i>Ebarbage :.....</i>	<i>Trimming</i>

A 10: Terminologie anglaise

Défaut de fonderie et sable

<i>Français</i>	<i>Anglais</i>
<i>Malvenue :.....</i>	<i>Misrun</i>
<i>Goutte froide :.....</i>	<i>Cold shut</i>
<i>Retassure :.....</i>	<i>Shrinkage cavity</i>
<i>Piqûres :.....</i>	<i>Pinholes</i>
<i>Criques :.....</i>	<i>Hot tears</i>
<i>Soufflures :.....</i>	<i>Sandholes</i>
<i>Erosion du moule :.....</i>	<i>Sand wash</i>
<i>Fissurations :.....</i>	<i>Cracks</i>
<i>Sable naturel (à vert).....</i>	<i>Green-sand</i>
<i>Sable à durcissement chimique</i>	<i>Dry-sand</i>
<i>Collapsibilité.....</i>	<i>Collapsibility</i>
<i>Perméabilité.....</i>	<i>Permeability</i>
<i>Réusabilité.....</i>	<i>Reusability</i>

A 11: Terminologie anglaise

Pièces de moule et matériaux de fonderie

Français	Anglais
<i>Moule en sable :</i>	<i>Sand casting mold</i>
<i>Moule non-permanent :</i>	<i>Expendable mold</i>
<i>Moule permanent :</i>	<i>Permanent mold</i>
<i>Cavité :</i>	<i>Cavity</i>
<i>Partie supérieure du moule : ...</i>	<i>Cope</i>
<i>Partie inférieure du moule :</i>	<i>Drag</i>
<i>Plan de joint :</i>	<i>Parting line</i>
<i>Modèle :</i>	<i>Pattern</i>
<i>Noyau :</i>	<i>Core</i>
<i>Guirlande de support :</i>	<i>Chaplet</i>
<i>Trou de coulée :</i>	<i>Downsprue, gate</i>
<i>Masselotte :</i>	<i>Riser</i>
<i>Creuset :</i>	<i>Ladle</i>
<i>Fonte :</i>	<i>Cast iron</i>
<i>Bronze :</i>	<i>Bronze</i>
<i>Laiton :</i>	<i>Brass</i>

A 12: Bibliographie pour le chapitre 4



J. Campbell.

Castings.

Butterworth-Heinemann, 2003.



M. COLOMBIE.

Matériaux industriels : matériaux métalliques (technique et ingénierie, série : Matériaux).
Recherche, 67 :02, 2000.



J.A. Dantzig and M. Rappaz.

Solidification.

EFPL Press, 2009.



G. Facy and M. Pompidou.

Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation.
1983.



A.S.M.M. Handbook.

Desk edition.

ASM International, Metals Park, OH, pages 6–70, 1985.



J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet, and P. Combrade.

Métallurgie : du minerai au matériau.

Masson, 1998.



M. Suéry et al.

Mise en forme des alliages métalliques à l'état semi-solide.

Hermès science publications, 2002.