

Gilles **Dour**

AIDE-MÉMOIRE

# Fonderie

2<sup>e</sup> édition

**DUNOD**

Illustration de couverture : © Sport Moments - Fotolia.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

© Dunod, 2004, 2009,  
nouvelles présentations 2016, 2023

11 rue Paul Bert 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-085514-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# TABLE DES MATIÈRES

---

Remerciements	IX
Avant-propos	XI

## A

---

### Les procédés industriels de fonderie

<b>1 • La mise en forme par moulage</b>	<b>3</b>
1.1 Conception de la pièce	3
1.2 Opérations élémentaires	5
1.3 Le matériau de fonderie	16
1.4 La sécurité en fonderie	17
1.5 Efficacité économique	19
<b>2 • Les procédés industriels</b>	<b>23</b>
2.1 Procédés à moules en sable	23
2.2 Coulée gravité en coquille	41
2.3 Coulées basse pression et contre-pression	48
2.4 Fonderie sous pression	54

2.5	Procédés à modèles perdus	68
2.6	Fonderie centrifuge	74
2.7	Technologies émergentes	77
<b>3</b>	<b>• La filière numérique en fonderie</b>	<b>95</b>
3.1	CAO pour la fonderie	95
3.2	Logiciels de calcul de fonderie	96
3.3	Prototypage rapide en fonderie	103

## **B**

---

### Sciences de l'ingénieur utiles en fonderie

<b>4</b>	<b>• Mécanique des fluides en fonderie</b>	<b>113</b>
4.1	Verse – Équations de Bernoulli	114
4.2	Caractérisation des écoulements	120
4.3	Écoulement en milieu poreux	126
<b>5</b>	<b>• Rappels de thermodynamique</b>	<b>129</b>
5.1	Généralités	129
5.2	Diagrammes de phase	130
5.3	Effet de la pression sur les diagrammes de phase	141
5.4	Dissolution de gaz, loi de Sieverts	142
<b>6</b>	<b>• Le transport de matière en fonderie</b>	<b>145</b>
6.1	Homogénéisation parfaite, équilibre thermodynamique	146
6.2	Mélange parfaitement homogène dans le liquide et transport nul dans le solide – Loi de Scheil-Gulliver	146
6.3	Régime de diffusion dans le liquide, transport nul dans le solide	151

<b>7 • Les transferts thermiques en fonderie</b>	<b>157</b>
7.1 Effets volumiques de la solidification sur la thermique	157
7.2 Transferts thermiques aux interfaces	163
<b>8 • La germination</b>	<b>179</b>
8.1 Concept de la germination	179
8.2 Germination homogène	180
8.3 Germination de bulles	184
8.4 Germination hétérogène	186
8.5 Vitesse de germination	189
<b>9 • La croissance</b>	<b>191</b>
9.1 Généralités	191
9.2 Théorie de la croissance libre	195
9.3 Croissance d'alliages dilués	198
9.4 Croissance eutectique	207
9.5 Croissance péritectique	211

## C

---

### Structures de fonderie et propriétés mécaniques résultantes

<b>10 • Structure de fonderie</b>	<b>219</b>
10.1 Structure de grains	219
10.2 Structures de solidifications	224
<b>11 • Les défauts de fonderie</b>	<b>239</b>
11.1 Défauts de retrait à la solidification, retassures et porosité	239
11.2 Soufflures	244

11.3	Ségrégations	247
11.4	Inclusions	253
11.5	Criques à chaud	257
<b>12</b>	<b>• Structure et propriétés mécaniques des pièces de fonderie</b>	<b>261</b>
12.1	Propriétés de surface	262
12.2	Comportement aux traitements thermiques	264
12.3	Propriétés mécaniques	269
12.4	Propriétés dynamiques	281
12.5	Résistance au fluage	286

## **D**

---

### Familles d'alliages de fonderie

<b>13</b>	<b>• Les fontes</b>	<b>291</b>
13.1	Définition	291
13.2	Les classes de fontes	296
13.3	Mise en œuvre	305
<b>14</b>	<b>• Les alliages d'aluminium</b>	<b>307</b>
14.1	Généralités	307
14.2	Les différents alliages d'aluminium	310
14.3	Mise en œuvre	317
<b>15</b>	<b>• Les alliages de zinc</b>	<b>323</b>
<b>16</b>	<b>• Les alliages de cuivre</b>	<b>327</b>
16.1	Généralités	327
16.2	Laitons	327

16.3 Bronzes	330
16.4 Cupro-aluminiums	331
16.5 Cupro-nickels	333
<b>17 • Les alliages de titane</b>	<b>335</b>
17.1 Propriétés	335
17.2 Composition	336
17.3 Mise en œuvre	341
<b>18 • Les alliages de magnésium</b>	<b>345</b>
18.1 Propriétés	345
18.2 Compositions	348
18.3 Les groupes d'alliages	352
18.4 Mise en œuvre	355
<b>Cas pratiques</b>	<b>359</b>
Sujet n° 1	359
Sujet n° 2	364
Sujet n° 3	368
Sujet n° 4	373
Annexes	377
<b>Bibliographie</b>	<b>383</b>
<b>Index</b>	<b>399</b>



# REMERCIEMENTS

---

L'auteur tient à remercier toutes les personnes qui l'ont aidé à réaliser cet ouvrage et l'ont convaincu de persévérer. Il remercie également l'École des Mines d'Albi-Carmaux et le Cooperative Research Centre/CAST Metals Manufacturing, et l'Université de Queensland, les premiers pour m'avoir autorisé de me mettre au vert pour apporter la dernière touche à cet ouvrage, et les suivants pour m'avoir si bien accueilli.

Un grand nombre d'illustrations sont tirées de documents appartenant à d'autres auteurs ou entreprises qui ont donné leur autorisation de reproduction ou m'ont autorisé à prendre des photos dans leurs ateliers. Qu'ils soient tous remerciés chaleureusement pour leur collaboration :

- Mlle A. Gillet, Fonderie Gillet à Albi, France.
- M. J.J. Albert, Fonderie Honsel-Messier à Arudy, France.
- M. J.C. Foucherand, Société Bühler, France.
- M. J.P. Gabathuler, Société Alcan Technology & Management Ltd, Neuhausen, Suisse.
- M. A. Valette, Fonderie Aluminium Cléon, Société Teksid à Cléon, France.
- MM. D. Girardin et A. Tournier, Saint-Gobain PAM, Centre de R&D, Pont-à-Mousson, France.
- Mlles, Mmes et MM. A. Bowles, N. Veldman, D. St John, M. Dargusch, C. Caceres, C. Davidson, S. McDonald, M. Easton, Ji-Yong Yao, CRC/CAST Metals Manufacturing, University of Queensland, Australie.
- MM. J.M. Maucourt, C. Pelaingre et C. Barlier, CIRTES Saint-Dié, France.
- MM. R. Graf, M. Gremaud et A. Jacot, Calcom ESI SA, Suisse.

- Mme A. Antoni-Zdziobek, LTPCM, Institut Polytechnique de Grenoble, France.
- Mme Eberschiebler, Aluminium Martigny France, France.
- M. Ch. Selig, Valfond Reyrieux, France.
- Prof. A.L. Greer, University of Cambridge, Royaume-Uni.
- Mlle N. Gouret, EADS Toulouse, France.
- M. J. Lacaze, CIRIMAT-CNRS, INP Toulouse, France.
- M. G. Torres Camacho, ENSIACET, INP Toulouse, France.
- M. S. Tovar et Prof. F. Rezaï-Aria, CROMeP, École des Mines d’Albi-Carmaux, France.
- Dr A. Hamasaiid, CROMeP puis RAPSODEE et enfin Rovalma.
- Prof. F. Durand, EPM-Madylam, INP Grenoble, France.
- Dr S. Da Silva, société 6T-MIC.
- Mme M.L. Bartet, PCC France, Ogeu-les-Bains, France.
- Mlle K. Bavard, CROMeP, École des Mines d’Albi-Carmaux, France.
- Mme K. Cohen, DISA France.
- M. H. Gros, PRESI, Brié et Angonnes, France.
- MM. B. Verlon et G. Bernhart, le directeur de l’École des Mines d’Albi-Carmaux et le directeur de son centre de recherche CROMeP, Albi, France.

Cet ouvrage a bénéficié d’un nombre de discussions avec des experts du domaine de la fonderie. L’auteur tient à remercier CRC/CAST MM dont C. Caceres, Qian Ma, J. Griffith et D. Saint John, Calcom SA et son *Solidification Courses*, M. Prof. F. Durand et le Microstructure Engineering by Solidification Processes European Network orchestré par J. Lacaze pour toutes ces discussions utiles.

Je dois un remerciement particulier à S. Tovar pour son soutien actif dans la réalisation des micrographies réalisées ensemble au CROMeP depuis des années. Enfin et non des moindres, cette deuxième version aura fortement bénéficié de la contribution d’Anwar Hamasaiid et de Matt Dargusch pour les montages, les informations et la vérification par la modélisation d’hypothèses sur les échanges thermiques interfaciaux.

# AVANT-PROPOS

---

À Gretchen, Tess et Charlie  
qui m'auront supporté toute cette année de transition.

À mes parents  
qui m'ont apporté et appris la vie  
et la persévérance dans le travail.

La fonderie est une activité de mise en forme par la fusion et la solidification de métaux et alliages. Autrefois artisanale, elle revêt aujourd'hui un caractère industriel, scientifique et, encore et toujours, artisanal.

Artisanal, car la production unitaire reste encore de mise. Artisanal car beaucoup de fonderies sont des petites PME et vivent d'un savoir-faire développé par le chef d'atelier à force d'essais-erreurs.

Réalité industrielle car la production de masse est une composante à part entière de la fonderie moderne. L'automobile et l'électroménager sont les plus gros clients de la fonderie. Des groupes toujours plus gros se montent depuis les années 1990 en France comme ailleurs. Dans ces usines, des machines de fonderie remplacent l'atelier de fonderie. Machines de moulage en sable automatiques, machines de coulée sous pression, etc.

Dans ce contexte industriel, la France se situe en 9<sup>e</sup> position, en retrait avec la situation 5 ans auparavant. La forte croissance dans ce domaine industriel des pays émergents comme la Russie, la Chine, l'Inde et le Brésil a fortement contribué à ce recul. La masse salariale française reste aux alentours de 45 000 personnes pour environ 460 sites. Chiffre très important, nos fondeurs exportent 2,6 fois plus que nous importons de

produits de fonderie, signe de la bonne santé technologique et du dynamisme de nos PME. Cependant, ce chiffre est lui aussi en retrait d'année en année compte tenu de la tendance à l'importation de produits industriels en provenance de pays à bas coûts. Néanmoins, ce recul est faible comparé à d'autres domaines, ce qui montre que la fonderie française se défend bien sur le marché international. Ces chiffres cachent cependant une vraie diversité suivant les alliages, les applications et les clients. Le lecteur sera bien avisé de consulter le site Internet du syndicat des Fondateurs de France ([www.fondeursdefrance.org](http://www.fondeursdefrance.org)) pour découvrir toute la diversité économique de l'activité de fonderie.

Réalité scientifique et technique car les nouvelles technologies se développent aujourd'hui encore dans le domaine de la fonderie : squeeze casting, formage semi-solide, rhéo-moulage, etc. Des alliages nouveaux voient aussi le jour régulièrement. Les fondeurs ne parlent jamais de *la* fonte, mais *des* fontes. Hormis les sous-catégories, nous parlerons dans cet ouvrage de cinq types de fontes. Idem pour les alliages d'aluminium, de zinc, de magnésium, etc. La compréhension des mécanismes physiques de la solidification est l'objet d'études depuis la guerre, qui se poursuivent encore aux quatre coins du globe. La microstructure résultant de l'étape de fonderie est en effet comme l'acte de naissance de la pièce et du matériau. Il est très difficile de l'effacer pendant la vie de la pièce fondue. Par exemple, les matériaux corroyés (les tôles laminées ou les pièces forgées) constituent le groupe de matériaux métalliques et de pièces les plus éloignés de l'étape de solidification. Le formage plastique à haute température ou à moyenne température et les traitements thermiques ont modifié drastiquement la microstructure du matériau, qui pourtant garde des stigmates de l'étape initiale de solidification, comme les bandes de macroségrégations ou d'autres défauts qui subsistent. Il est donc vital de bien contrôler cette étape primordiale de la solidification et de la mise en forme à l'état liquide.

Le but de cet ouvrage est de présenter les aspects scientifiques, technologiques et, à un moindre degré, économiques de la fonderie. Il s'adresse à des ingénieurs en fin de formation, qui connaissent la thermodynamique, ont des notions sur la science des matériaux, la thermique et la mécanique des fluides. Cet ouvrage n'est qu'une introduction à la fonderie en ce sens qu'il ne rentre pas dans les détails techniques, mais pourtant

vitaux, de la fonderie. Il ne s'adresse pas aux ingénieurs et personnels d'ateliers de fonderie, mais plutôt à des ingénieurs de bureaux d'études, en relation avec les fonderies ou les agents technico-commerciaux vendant les produits de fonderies. Pour plus d'informations sur les détails techniques, les références bibliographiques citées dans l'ouvrage constituent de bonnes sources d'information.

L'ouvrage est divisé en quatre parties dédiées chacune à un aspect de la fonderie. La lecture de cet ouvrage peut ne pas être linéaire, comme la connaissance en général. En particulier, les premiers chapitres comportent des références aux chapitres suivants qui eux-mêmes pourraient être lus indépendamment. La première partie s'intéresse aux procédés industriels de la fonderie. Elle passe en revue la plupart des procédés couramment employés et en cours de développement. La seconde partie est dédiée aux sciences de l'ingénieur utiles pour comprendre la fonderie dans son ensemble. Nous les expliquons dans le cadre de leurs applications en fonderie. La troisième partie détaille le type de microstructure que l'on peut obtenir en fonderie, les défauts associés et l'impact qu'ils ont sur les propriétés mécaniques des matériaux fabriqués. Enfin la dernière partie passe en revue les grandes familles d'alliages de fonderie utilisés.

Cette nouvelle édition présente également, en fin d'ouvrage, une série de cas pratiques permettant au lecteur de mettre en application les données fournies par la littérature.



# A

---

Les procédés  
industriels  
de fonderie



# 1 • LA MISE EN FORME PAR MOULAGE

---

A

LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS DE FONDERIE

La fonderie est un procédé de mise en forme de métaux passant par l'état liquide. Tous les procédés détaillés ci-après partagent les points suivants :

- le même souci des tolérances dimensionnelles et le respect de la forme des pièces fabriquées;
- le même découpage en opérations élémentaires;
- le souci du matériau fabriqué;
- la sécurité;
- l'efficacité économique.

## 1.1 Conception de la pièce

La fonderie est une activité de mise en forme et, à ce titre, les tolérances dimensionnelles et le respect de la forme sont des aspects primordiaux du métier. Traditionnellement le fondeur reçoit les plans d'une pièce à réaliser. Si son client est rodé aux spécificités de la fonderie, tout va bien et le dessin des outillages de production (moule ou modèle) et leur production sont lancés rapidement. Mais ceci n'arrive que rarement et, dès les plans reçus, les discussions sur des modifications de géométrie commencent. Il est facile d'imaginer que cela prend du temps. De plus en plus, le fondeur intervient dans la définition géométrique d'une pièce

pour éviter ces discussions sans fin. Celles-ci sont le plus souvent liées au démoulage de la pièce et à la différence entre les dimensions de la pièce et du moule ou du modèle :

- définir un plan de joint qui sépare les différentes parties du moule ;
- modifier la géométrie en introduisant des dépouilles afin d’assurer l’extraction de la pièce ou du modèle sans endommager celui-ci, ni les outillages ;
- tenir compte de la contraction du métal pendant la solidification et le refroidissement, etc.

Le remplissage de la pièce et le positionnement des canaux de remplissage et des attaques sont d’autres sources de discussion. Il en est de même pour le positionnement des masselottes. Ces deux points constituent en effet des ajouts à l’empreinte brute de la pièce sur le moule, et donc, n’interfèrent que très peu sur la définition géométrique de la pièce elle-même. Elles font aussi partie du savoir faire du fondeur, et donc il arrive que le fondeur garde sa définition pour lui. On découvre ici une constante de l’industrie de mise en forme. La définition géométrique de la pièce et des outillages appartient généralement au client, mais le savoir-faire et l’entretien des outillages sont l’apanage du fabricant. Pourtant comment peut-on séparer savoir-faire et outillage ? D’où une troisième source de discussions : le contrat d’exploitation.

Les formes obtenues en fonderie sont parmi les plus complexes qu’on peut obtenir dans l’industrie. Même si chacun des procédés de fonderie a ses propres limitations, comme par exemple la nécessité d’un plan de joint qui coupe la pièce en plusieurs parties (généralement deux) ou de dépouilles, il est toujours possible de trouver un procédé qui pourra faire cette forme, comme par exemple fonderie à cire perdue. Il est également possible de faire des formes creuses complexes. C’est une des autres forces de la fonderie. Pour faire un trou, ou un tuyau qui traverse une pièce, il est nécessaire de fabriquer des *noyaux* qui sont installés dans le moule avant la coulée. Parce qu’il faut pouvoir sortir ces tubes de géométrie complexe, ceux-ci sont généralement réalisés en sables durcis (voir chapitre 2, § 2.1) ou tout autre matériau réfractaire qui peut être détruit par simple cuisson, par vibration ou projection d’eau (sel par exemple).

## 1.2 Opérations élémentaires

Les opérations élémentaires qu'on retrouve dans toutes les usines de fonderie sont les suivantes [1-6].

### 1.2.1 Opérations de fusion

Il s'agit, bien entendu, de fondre le métal liquide, à partir de lingots stockés dans l'entreprise. Il arrive, très rarement, que l'entreprise soit livrée directement en métal liquide. D'ordinaire les fonderies sont équipées de gros fours, dits *fours de fusion*, ou de *cubilots* (pour la fonte exclusivement). Les fours de fusion permettent de fondre rapidement une grande quantité de métal. C'est leur rôle premier. Ce sont souvent des fours à gaz, pour des raisons évidentes de rapidité et de coût énergétique. Les cubilots sont

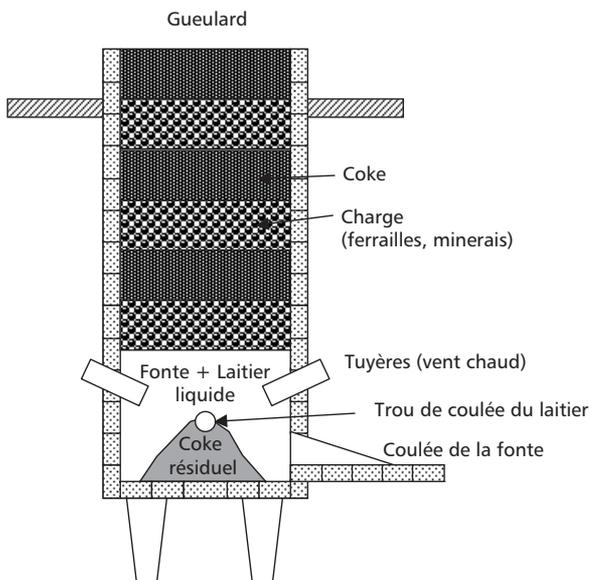
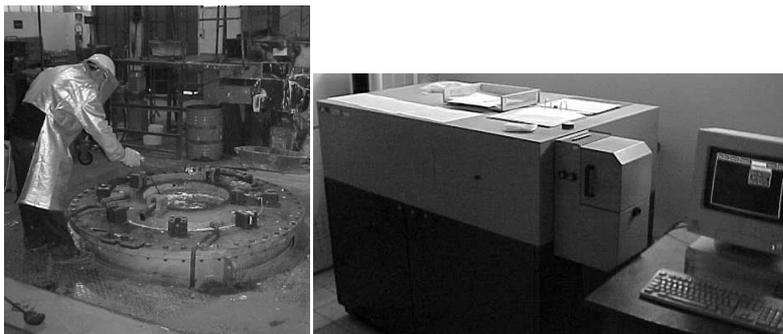


Figure 1.1 – Schéma d'un cubilot.

des réacteurs solide/gaz à contre-courant (figure 1.1). Ils ressemblent de loin à des hauts-fourneaux. On enfourne en haut du cubilot des ferrailles, du minerai de fer, des minéraux (chaux, calcaire, silice, etc.) et du charbon (ou du coke). En bas du cubilot, de l'air chaud est soufflé par des tuyères. On y récupère la fonte liquide et le laitier qui surnage.

C'est éventuellement dans le four de fusion que se fait la *mise au titre*, c'est-à-dire l'ajustement de la composition du métal pour l'ensemble de l'usine ou d'un gros atelier. Cette mise au titre est réalisée après une mesure de contrôle de la composition, avec un *spectro* ou encore spectromètre à décharge lumineuse. Un échantillon est coulé dans une petite lingotière (figure 1.2) et apportée au spectro. La mesure est très rapide et se fait à la demande. En fonction du résultat et de l'alliage visé, l'opérateur en charge de la mise au titre peut ajouter certains composés manquants (sous forme de composé pur ou souvent de composées comme des ferro-alliages pour les fontes). Il arrive aussi qu'il doive retirer certains éléments trop concentrés. Il le fait généralement en ajoutant des *flux* et en les malaxant dans le bain. Ces flux sont des mélanges de minéraux savamment étudiés afin de leur assurer une forte affinité pour certains éléments pour des raisons purement thermodynamiques (ou chimiques). À chaque élément à retirer, correspond un flux spécifique. Les flux pollués par



**Figure 1.2** – Prélèvement d'alliage pour le spectro, coulé dans une lingotière spécifique et photographie d'un spectro (Fonderie Honsel-Messier).

les éléments absorbés sont ensuite évacués à la louche depuis la surface du bain où ils surnagent.

C'est aussi dans le cubilot que se fait la mise au titre de la fonte. Les proportions et la composition des ferrailles, du minerai de fer et des minéraux sont primordiales pour la mise au titre de la fonte. Comme il s'agit d'un procédé continu, le recours aux flux pour corriger le tir n'est qu'une solution de secours. Il est préférable de régler la mise au titre au cubilot directement, et d'économiser ainsi des opérations supplémentaires et coûteuses.

Une fois le métal fondu, on le déverse dans un *four de maintien*. Celui-ci a pour fonction de mettre et de maintenir le métal à la température visée pour la coulée. Le contrôle est réalisé le plus souvent avec une *canne pyrotechnique* (figure 1.3). C'est aussi là que se prépare la mise au titre finale (figure 1.2) lorsque les alliages ont une forte perte au feu; c'est-à-dire que leur composition varie vite à l'état liquide par évaporation (comme Zn, Pb pour les alliages cuivreux) ou par réaction chimique avec l'atmosphère de certains éléments (comme C pour la fonte). C'est également dans ce four que le fondeur fait le *traitement du bain* (voir partie B) : *inocu-*



Figure 1.3 – Traitement d'un bain d'alliage d'aluminium et contrôle de la température avec une canne pyrométrique (Fonderie Honsel-Messier).

lation, modification de l'alliage, soufflage du bain (figure 1.3) ou *calmage* du bain, *décassage* du bain, etc., autant d'opérations qui doivent être réalisées juste avant la coulée. De la qualité du traitement du bain dépendra en grande partie la *santé métallurgique* et la *structure* du matériau fabriqué. Il arrive aussi que la mise au titre se fasse dans le four de maintien, suivant l'organisation de l'atelier. Dans la partie C, sont mentionnés la taille de grain, la structure de l'eutectique, la propreté inclusionnaire, le taux de porosité... qui dépendent fortement du traitement du bain.

### 1.2.2 Opération de coulée

Il s'agit de remplir la cavité du moule. En fonction des procédés, le métal est déversé à la louche dans un orifice (coulée gravité, figure 1.4), sous pression pneumatique à travers un tube de coulée (coulée basse pression), sous pression hydraulique à travers un cylindre de coulée (coulée sous pression), le long d'une goulotte de coulée (coulée centrifuge), etc.

Le métal passe de l'instrument de coulée (louche, tube, cylindre) à l'empreinte de la pièce en passant par un nombre de *canaux de coulée et de*



Figure 1.4 – Coulée gravité (Fonderie Honsel-Messier).