

TN50



procédés de fabrication
jantes moulés

INTRODUCTION

Nous tenons tout d'abord à remercier M⁵ Rodary et Delsert, *enseignants des procédés de fabrication à l'UTBM*, pour les points de vue apportés dans les domaines respectifs de la fonderie et de l'emboutissage. Nous tenons à remercier tout particulièrement M^r Maneloff, *de l'entreprise SRF (Sudrad Roues France - Sultz matt, 68)*, pour son entière disponibilité, la richesse des documents qu'il nous a apporté ainsi que pour la transmission de son savoir-faire dans le domaine du moulage des jantes automobiles.

Dans le cadre de l'unité de valeur TN50 (*technologies de production non conventionnelles*), nous avons étudié la gamme de fabrication des jantes automobiles moulés en aluminium. Dans une première partie, nous nous sommes efforcés de définir les généralités et les spécificités d'une jante automobile puis dans une seconde partie nous en avons défini la gamme de fabrication.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
SOMMAIRE.....	2
1. GENERALITES ET SPECIFICATIONS.....	3
1.1. Généralités	3
1.1.1 Historique	3
1.1.2 Composants.....	3
1.1.3 Exigences.....	4
1.2. Spécifications	4
1.2.1 Marketing	4
1.2.2 Cycle de vie	4
1.2.3 Vitesse de rotation	4
1.2.4 Charges Et sollicitations.....	4
1.2.5 Géométrie	5
1.2.6 Maintenance Et entretien	6
2. PROCEDES DE FABRICATION.....	7
2.1. Procédés de moulage.....	7
2.1.1 Procédés existants.....	7
2.1.2 Avantages et inconvénients.....	7
2.1.3 Choix du procédé	7
2.2. Moulage par basse pression	8
2.2.1 Définition.....	8
2.2.2 Analyse éléments finis	8
2.2.3 Installation.....	8
2.2.4 Le four de maintien	8
2.2.5 Système d'injection.....	8
2.2.6 Système de mise en pression.....	9
2.2.7 Le moule.....	9
2.3. Etude d'un production : 100-150 000 jantes /an.....	10
2.3.1 Introduction.....	10
2.3.2 Fonderie.....	10
2.3.3 Moulage.....	10
2.3.4 Usinage et finition	11
2.3.5 Peinture	11
2.3.6 Contrôles qualité.....	11
2.3.7 Exceptions et stockage.....	11
2.4. Production : 600-800 000 jantes/an	12
2.4.1 Introduction.....	12
2.4.2 Fabrication de l'alliage	12
a. Matières premières.....	12
b. Cuve de maintien.....	12
c. Convoyage.....	12
d. Contrôle du métal.....	12
2.4.3 Fonderie.....	12
a. Presse.....	12
b. Moules	13
c. Contrôle.....	13
2.4.4 Usinage	13
2.4.5 Peinture.....	13
a. Première couche	13
b. Deuxième couche.....	13
c. Troisième couche.....	13
d. Quatrième couche	13
e. Traitement optionnel	13
2.4.6 Stockage.....	14
2.5. Argumentation du choix des matières premières	14
2.5.1 Matériaux mis en oeuvre	14
2.5.2 Analyse de l'alliage Al-Si7 Mg0.3	14
a. Composition	14
b. Rôle des constituants.....	14
2.5.3 Analyse de l'alliage Al-Si11.....	14
a. Composition	14
2.5.4 Traitements.....	15
a. Traitement par azote liquide	15
b. Traitement thermique	15
c. Traitement de revêtement.....	15
CONCLUSION.....	16
ANNEXES	17

1. GENERALITES & SPECIFICATIONS

1.1. Généralités

1.1.1 Historique

En 1986, a été célébré le premier centenaire de la fabrication industrielle d'aluminium. Longtemps, l'aluminium fut coulé. Cependant, au niveau industriel, la percée de la fonderie d'aluminium ne se fit qu'après la découverte des alliages aluminium-silicium et de leur perfectionnement. En exemple, des roues en aluminium étaient déjà fabriquées dans les années vingt. Toutefois, le grand succès des roues automobiles ne s'impose qu'à partir des années 70.

Le développement des quantités d'aluminium coulé est impressionnant : quatrième place en 1950, la fonderie d'aluminium dépasse la fonte malléable en 1953 et l'acier moulé vers 1960. Sur l'ensemble de la production de fonte, la part d'aluminium coulé, toujours exprimée en m³, est passée de 4% à 40% au cours de cette période. En 1953, la diminution de production occasionnée par une conjoncture difficile touche moins l'aluminium que les autres métaux.

Presque 75% de la production de fonderie d'aluminium sont utilisés par l'industrie automobile. Une des plus grande pièce moulée en aluminium connu mesure 6 m de diamètre, pèse 4 tonnes environ et sert de support à miroirs dans un simulateur qui permet de tester la résistance aux rayonnements solaires de composants qui seront utilisés dans l'espace,

1.1.2 Composants



La roue, organe de sécurité, se matérialise par trois zones principales :

- le moyeu
- la jante
- le voile

Le moyeu est la partie qui se fixe sur le véhicule : son épaisseur est généralement la plus importante de la roue. La jante est la partie qui est en contact avec le pneumatique. Elle présente à ses deux extrémités une excroissance appelée « bord de jante ». Cette zone doit résister aux chocs et notamment aux coups de trottoir. Le voile relie le moyeu à la jante. C'est la partie la plus sollicitée de la roue puisqu'elle doit résister aux efforts radiaux et latéraux du sol sur le pneumatique. La contrainte maximale de la roue intervient en virage. Le voile est alors soumis à une flexion rotative.

Tous les procédés de moulage classiques utilisant les moules permanents sont pratiqués, c'est-à-dire :

- le moulage par gravité
- le moulage sous basse pression
- le moulage sous haute pression
- le moulage par contre-pression
- le moulage par centrifugation.

n.b. : quel que soit le type de moulage employé, le processus de fabrication reste quasiment le même.

1.1.3 Exigences

La roue doit être :

- parfaitement *étanche* à l'air afin de maintenir le pneumatique en place
- très *robuste* pour supporter le poids de la voiture et résister aux forces de freinage, aux accélérations et aux irrégularités de la route
- être aussi *légère* que possible pour faciliter les démarrages, les arrêts et ne pas grever le poids non suspendu de la voiture car la roue est un organe non suspendu et la qualité de la suspension dépend du rapport entre le poids suspendu et le poids non suspendu

1.2. Spécifications

n.b. : les données marquées de * correspondent à des valeurs déduites ou calculées pour ce rapport.

1.2.1 Marketing

Prix de vente et de revient des jantes (production série)* :

	jante embouties tôle	jante moulées aluminium
vente	23-46 € (150-300 F)	76-457 € (500-2000 F)
revient	4-8 € (25-50 F)	24-75 € (150-500 F)

Tuning, part annuelle du marché des jantes* : 38 M€ (250 MF) – concerne 30 000 véhicules

Jantes moulées (série) : 25 % de la production (France) – 70 % (Allemagne)

Production annuelle en France* : 19 000 000 jantes

1.2.2 Cycle de vie

Le cycle de vie des 4 jantes est lié à celui de la voiture, elles ont – *en théorie* – la même durée de vie.

Durée de vie* : 300 000 km ou 12 ans

Renouvellement du parc constructeur* : 7 ans

Cycles de virages* : vitesse moyenne (60 km/h) 30 km/jour, 150 virage/jour (55 000 virages/an)

1.2.3 Vitesse de rotation

Vitesse de pointe maxi* : VM=230 km/h

Vitesse de rotation maxi (18")* : VrM=2700 tr/min

Vitesse moyenne d'une voiture* : Vm=60 km/h

Vitesse de rotation maxi (18")* : Vrm=700 tr/min

$$N = \frac{656 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

N : vitesse de rotation (trs/min)
V : vitesse linéaire (km/h)
D : diamètre roue (*)

1 pouce = 2,54.10⁻² m

divers : les jantes de Tuning produisent moins de bruit en fonctionnement

1.2.4 Charges et sollicitations

Masse d'une voiture* : 1,5 T – 2 T

Efforts roues avants* : 4710 N/roue (480 kg/roue)

Efforts roues arrières* : 5100 N/roue (520 kg/roue)

Pression interne : 200 KPa

Déséquilibre maxi admissible : 2000 cmg

Effort sur moyeu* : voiture à 60 km/h, courbure de virage de 20 m, force centrifuge 17 kN/virage

ZONE	R (MPa)	R _{0,002} (MPa)	A (%)
Bord de jante	185-195	95-105	10-15
Moyeu	165-175	95-105	4-6

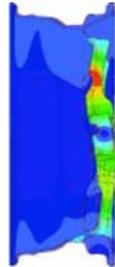
Réponses aux sollicitations :

- rigidité de torsion entre moyeu et jante
- rigidité axiale contre les contraintes latérales dues aux virages
- élasticité radiale pour absorber les efforts dynamiques dus aux inégalités de la route
- voilage

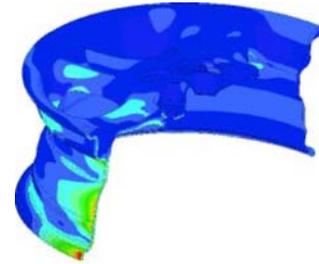
modèle éléments finis :



géométrie déformée :



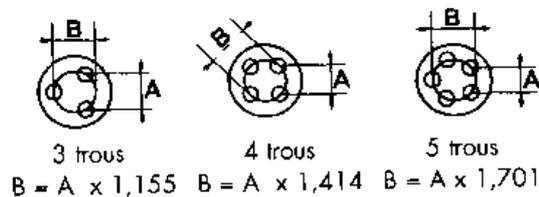
distribution des efforts :



1.2.5 Géométrie

Poids : entre 10 et 13 kg

Fixation : vis (parité peu importante) ou écrous fixent la roue et exercent une force uniforme sur le moyeu. trous à chanfreins conique, vis à tête sphérique (effort important sur cercle donc frottement important, donc serrage mécanique)



Tolérances :

- ondulation : 0,15 mm
- inclinaison : 0,20 mm

Montage :

- les **roues fixes** à jantes amovibles, dans lesquelles le voile reste solidaire du moyeu. La jante est boulonnée sur le voile par des boulons ou taquets
- les **roues amovibles** à jante fixe; le voile est alors fixé au moyeu par des écrous ou des dispositifs divers.

Esthétisme : caractère dominant pour les jante de type Tuning

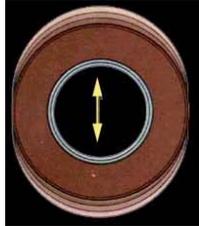
1.2.6 Maintenance Et entretien

Equilibrage : la masse mal répartie autour de l'axe de rotation (centre de gravité) :

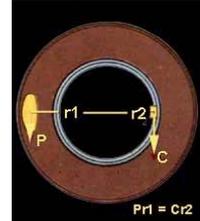
- excentricité des pneumatiques
- décentrage radial ou latéral
- position de la valve
- usure irrégulière

n.b. : 50 g sur la périphérie provoque à 70 km/h une force de 400 N

étape 1 : repérer point lourd (balourd)



étape 2 : compensation par masselottes

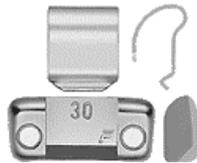


Masselottes d'équilibrage :
masse à enfoncer



- + facilité et rapidité de montage
- détérioration revêtement jantes

masse à clipper (dans support)



- + fixation parfaite et sûre
- difficulté de montage

masse adhésive



- + courbure adaptée, rapidité de montage

2. PROCÉDES DE FABRICATION

2.1. Procédés de moulage

2.1.1 Procédés existants

Trois procédés de moulage sont aujourd'hui principalement utilisés pour la fabrication des jantes automobiles :

- **La basse pression** est la plus répandue
- **la centrifugation** et
- **la coquille par gravité** sont également largement répandus

2.1.2 Avantages et inconvénients

Il y a vingt ans, par rapport au moulage sous basse pression, le procédé de **centrifugation** offrait une meilleure qualité de pièce au niveau de la jante et était donc employé pour leur fabrication. La force centrifuge qui se crée au moment de la rotation du moule agit directement sur les éléments de surface et permet d'obtenir une bonne compacité des éléments de volume correspondant. Cependant la matière était non homogène à l'intérieur de la jante avec une répartition sur la périphérie.

En 1984, l'ensemble de l'investissement correspondant au moulage (fours de maintien et machine à mouler) était inférieur à celui de la basse pression, ainsi pour un même volume de production, l'investissement engagé dans le cas décrit était de 1 alors que celui de la basse pression était de 1,6.

Désormais, l'amélioration de la technique poussée par le constat que le moulage par centrifugation ne répondait pas suffisamment aux spécificités des jantes a standardisé le moulage basse pression.

Ce procédé, en pleine expansion, est de plus en plus utilisé dans l'industrie automobile pour la fabrication des culasses en aluminium (masse de 10 Kg environ) ou de carters de transmission. On peut considérer ce procédé comme une amélioration de la coulée par gravité.

2.1.3 Choix du procédé

Par rapport à la coulée en coquille ou sous pression, le procédé **basse pression** présente les caractéristiques suivantes:

- **les cadences de coulée** sont plus élevées qu'en coquille gravité (le temps de remplissage compris entre 3 et 8 s.) d'où une plus grande productivité.
- **les caractéristiques mécaniques des alliages** sont améliorées de 10% environ et on peut traiter thermiquement les pièces.
- **la précision dimensionnelle** des pièces se rapproche de celle de la coulée sous pression (les conditions de remplissage et d'alimentation sont semblables).
- **la mise au mille** est moins élevée qu'en coquille (environ 1,3).
- **l'investissement en machines** est plus élevé qu'en coquille ainsi que le coût des outillages.

Ce procédé, en pleine expansion, est de plus en plus utilisé dans l'industrie automobile pour la fabrication des culasses en aluminium (masse de 10 kg environ) ou de carters de transmission. On peut considérer ce procédé comme une amélioration de la coulée par gravité.

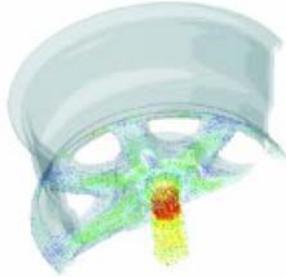
2.2. Moulage par basse pression

2.2.1 Définition

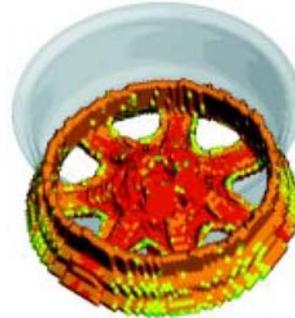
Ce procédé est le plus récent des procédés de coulée en moules permanents. Le moule est monté sur une machine spéciale qui permet la mise en mouvement des éléments mobiles. Un four étanche de maintien ($\approx 500^\circ\text{C}$) alimente le moule en alliage liquide. Pour cela, on soumet la surface du bain à une pression d'air, de 0,1 à 0,2 bar, qui pousse l'alliage de bas en haut. Le remplissage terminé, on applique une surpression de masselottage de 0,4 à 1 bar. Lorsqu'on a la pression, l'alliage liquide retombe dans le four et l'éjection de la pièce peut se faire.

2.2.2 Analyse éléments finis

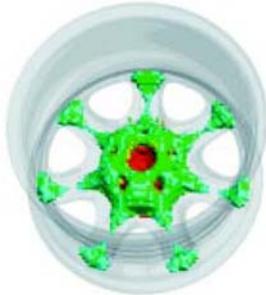
1. *vélocité de remplissage :*



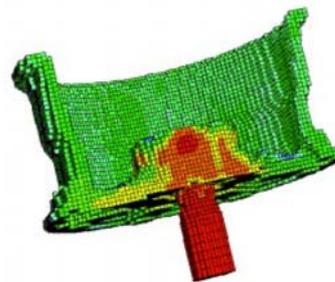
2. *distribution de température durant le remplissage :*



3. *distribution de température durant la solidification :*



4. *température de surface après remplissage :*



2.2.3 Installation

Une installation comprend:

- un four de maintien.
- une machine portant le moule.
- un système d'éjection.
- un système de mise sous pression.
- un moule métallique ou semi-métallique.

2.2.4 Le four de maintien

On utilise des fours à creuset en graphite électrique, les fours à induction sont utilisés pour des fabrications importantes et continues. Quel que soit le type de four, celui-ci doit être étanche (pression intérieure de 1 bar). Cette étanchéité est réalisée sur le creuset ou sur le four lui-même. La capacité de ces fours est de 500 Kg d'alliages d'aluminium, soit environ une quarantaine de jantes (12 kg par unité).

2.2.5 Système d'injection

Ce système est composé d'un tube plongeur et d'une buse appelée col d'alimentation qui assure la liaison entre le tube et le moule. En outre, la séparation entre métal liquide et solide se fait dans ce col. Le tube est une pièce très sollicitée thermiquement et chimiquement. Pour des raisons d'économie on a abandonné les matières très réfractaires mais chères (carbure de silicium, diborure de titane). Les tubes sont en fonte grise moulée ou en acier étiré. Ils sont protégés toutes les 10h à 20h de fonctionnement, extérieurement et intérieurement. La partie inférieure du tube est souvent amovible, car c'est la zone la plus sollicitée. Sur le haut du tube plongeur se place un filtre que l'on vient changer avant chaque nouvelle injection d'alliage liquide. Il permet bien sûr d'empêcher les impuretés d'être injectées dans le moule.

2.2.6 Système de mise en pression

Le fluide de mise en pression est de l'air sec et dépoussiéré. Un système permet de contrôler l'opération de remplissage et d'alimentation du moule. Cette opération comprend quatre phases :

- remplissage rapide du tube jusqu'aux attaques de coulée du moule.
- remplissage lent du moule pour éviter turbulences et gouttes froides.
- suppression de masselotage en fin de remplissage pour permettre à la matière de bien venir remplir les zones à risques (nœuds thermiques) qui sont refroidis plus particulièrement.
- après solidification de la pièce, mise en dépression pour récupérer l'alliage liquide qui reste dans le haut du tube.

2.2.7 Le moule

Le moule est composé des éléments suivants :

- un bloc est bridé sur le plateau mobile de la machine.
- un bloc sur le plateau fixe.
- des noyaux fixes ou mobiles complètent l'empreinte.
- un système d'éjection, semblable à celui de la coulée sous pression, éjecte la pièce
- des canaux de refroidissement assurent l'équilibre thermique du moule.

Des vérins hydrauliques assurent la mise en mouvement des éléments mobiles. Les matériaux constitutifs utilisés sont la fonte perlitique pour les blocs, les aciers au chrome pour les parties moulantes, du sable aggloméré pour certains noyaux. Le moule est entièrement mécanisé et le cycle de fabrication est automatique.

2.3. Etude d'un production : 100-150 000 jantes /an

2.3.1 Introduction

Dial Europe est le seul fabricant français de jantes alu de deuxième monte, basée en Seine-et-Marne, cette société est spécialisée dans le tuning.

2.3.2 Fonderie



La matière première est constituée de lingots d'alliage de première fusion Péchiney

En 1999, Dial Europe avait utilisé quelques 2 000 tonnes d'aluminium

La première fusion des lingots se fait entre 740 et 750°C



L'alliage est ensuite coulé dans le creuset.

Il est dégazé et maintenu à température (740-750°C) par des résistances électriques

Le métal est injecté par basse pression pour remplir le moule. Il faudra de 3 à 6 min pour que la jante soit moulée avec 10 à 17 kilos d'alliage.

2.3.3 Moulage



Première coulée de l'alliage dans le bac. Celle-ci est "décrassée" par l'apport d'azote. Les impuretés sont ôtées...

Voici le résultat brut de fonderie, est-on tenté de dire! Cette jante "première étape" est automatiquement contrôlée par radioscopie.

La jante passe ensuite à l'usinage sur un tour à commande numérique. C'est lors de cette intervention que le profil de la jante, le passage du freinage, le déport mais aussi l'alésage central sont effectués.

2.3.4 Usinage et finition



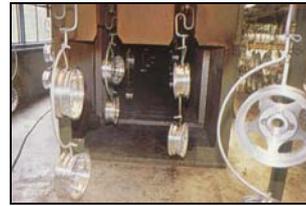
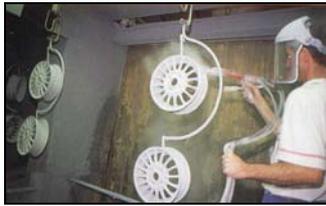
Un contrôle visuel est réalisé sur toutes les jantes. On élimine ici les dernières bavures d'alliage, grâce à un ponçage ou à un léger coup de fraise.



La jante passe ensuite un test d'étanchéité dans des bacs spéciaux. Les fuites éventuelles seront détectées par les bulles formées par l'air qui s'échappe.



2.3.5 Peinture



tour à tour la peinture et le vernis. Si le bord de la jante est diamanté, le vernis n'est pas appliqué tout de suite.

Elle est passée au tour à diamanter, lavée, puis vernie grâce à un vernis poudre époxy cuit à 200°C.

2.3.6 Contrôles qualité



Avant la mise en fabrication d'une jante, elle subit des tests de résistance, de fatigue du métal, d'écrasement.



La qualité de l'alliage est elle aussi constamment contrôlée grâce à la radioscopie.

2.3.7 Exceptions et stockage



Sur certaines versions, il faut encore ajouter quelques interventions, comme ici l'installation manuelle de visserie en aluminium aspect titane.



Certaines jantes sont livrées directement du Japon sans perçage afin que celui-ci soit effectué sur place à Montereau.



Une partie du stock entreposé à Montereau. Dial Europe avait fabriqué 150000 jantes en 1999.

2.4. Production : 600–800 000 jantes/an

2.4.1 Introduction

La société Sudrad Roues France réalise des jantes moulés en aluminium pour la France et l'étranger. SRF est un équipementier pour Peugeot, Volkswagen, Citroën ou Renault. Son CA annuel est de 300 M€ et de 60k€ par mois et produit 600 à 800 000 jantes/an. SRF conçoit les moules pour les constructeurs automobiles et en délègue la fabrication à des entreprises spécialisées.

2.4.2 Fabrication de l'alliage

EXPLICATION

Deux choix sont possibles :

- achat de l'alliage sous forme de lingots
- fabrication de l'alliage

La seconde possibilité demande un investissement initial important (ici 2 M€) mais nécessaire compte tenu de la production. Cet investissement est amorti en moins de 1 an car la dépense d'énergie est la même pour les 2 procédés, sachant que l'achat des matières premières séparées est moins onéreux que l'achat de lingots d'alliage. Suppression de la marge du fournisseur.

a. Matières premières

4 tonnes de lingots d'aluminium et de silicium sont versés dans un four central qui fond l'ensemble à 750°C. C'est ce four qui permet l'alimentation de toutes les presses. En moyenne, à peu près 40 tonnes de métal est fondu par jour.

b. Cuve de maintien

Transfert du métal dans une cuve de maintien par élévation du four (par des vérins pneumatiques). Ajout de magnésium et autres éléments d'alliages durant le transfert vers la cuve qui maintient le métal à 730° en attendant d'être distribué à direction des presses de moulage.

c. Convoyage

La cuve de maintien est inclinée (par des vérins pneumatiques) afin de verser 400 kg de métal en fusion dans une plus petite cuve qu'un fenwick transporte ensuite pour l'alimentation d'une presse.

d. Contrôle du métal

Opérations de dégazage et de désoxydation. De l'azote est versé dans cuve de transport afin d'enlever les oxydes du métal. Les oxydes en suspension sont jetés. 3 échantillons de métal sont prélevés afin de mesurer la qualité du métal ; on trace le diagramme $T=f(t)$ pour déterminer la composition, on mesure la densité du métal à l'air et sous vide pour déterminer la teneur en gaz et une analyse spectrométrique permet de séparer tous les éléments de l'alliage.

2.4.3 Fonderie

EXPLICATION : cf. Choix du procédé

a. Presse

Un fenwick amène la cuve de métal devant la presse pour être versé dans un creuset réfractaire. Ce creuset est nettoyé avant versage et durant le versage des barres d'aluminium sont ajoutées. Ce creuset est translaté sous la presse. Le moulage s'effectue sous basse pression, le métal est « aspiré » dans le moule situé au dessus du creuset. C'est par le centre que s'effectue le remplissage. Une première pression de 0,1 bar permet d'étaler le métal dans le moule puis une seconde pression de 1 bars facilite le remplissage dans les endroits les moins accessibles ainsi que pour accélérer la solidification est éviter les retassures. Le moule est refroidit par air sous pression avant éjection de la pièce par des éjecteurs qui poussent la jante sur sa périphérie. Un bras vient chercher la jante nouvellement moulée, un évacurage grossier est ensuite réalisé.

b. Moules

Les moules sont en métal et constitués de 4 tiroirs et 2 empreintes (supérieure et inférieure). Ce sont les constructeurs qui financent l'achat des moules (200 k€ - ils en sont ensuite propriétaires et peuvent les réutiliser). Chaque moule peut produire 40 000 pièces avant de subir des opérations de maintenance. L'empreinte inférieure permettent le moulage de 40000 pièces (s'use plus vite compte tenu de pression appliquée), la partie supérieure 80 000 pièces, les tiroirs 150 000 pièces. Sur toute la jante est pulvérisé une poudre de céramique, ceci permet d'augmenter la durée de vie du moule et d'obtenir un aspect quasi-final. L'opérateur doit en rajouter par pulvérisation tous les 1000 cycles.

c. Contrôle

Une jante sur 5 subit un premier contrôle aux rayons X afin de vérifier la qualité du métal à la mise en route des presses pour rectification. Plus tard toutes les jantes subissent ce type de contrôle, elles sont convoyés par tapis roulant et passent devant une caméra à rayons X. Une opératrice examine la structure interne de la jante. L'examen porte sur le centre de la jante, sur chaque rayon, puis sur la périphérie.

2.4.4 Usinage

EXPLICATION : La tolérance de surface n'est pas obtenue brut de fonderie, il est nécessaire de faire un usinage.

Le décarottage s'effectue par perçage. La jante subit un traitement thermique (cf. *Argumentation du choix des matières premières*). S'ensuivent les opérations d'usinage, un bras robotisé conduit la jante à 3 postes de rectification, une première unité consiste à percer les trous du moyeu et ceux de fixation, la seconde réalise l'usinage de l'intérieur de la jante afin d'ébavurer les excès de métal, enfin un tour usine la périphérie de la jante (quelques μm) pour ôter le plan de joint extérieur. Un test d'équilibrage de la jante est effectué en sortie de finition (défaut accepté : 30 g) de même qu'un test d'étanchéité.

2.4.5 Peinture

EXPLICATION : cf. *Traitement de revêtement*

a. Première couche

Une ligne de convoyeurs achemine les jantes, celles-ci passent dans un « couloir » de 35 m dans lequel suivent les opérations de dégraissage (huile machines, acidité mains, ...) suivit d'un rinçage. un dérochage permet d'enlever les oxydes et d'attaquer l'état de surface, un second rinçage s'ensuit avant l'étape de chromatation qui constitue la première couche de la jante comme un rempart contre l'oxydation. Les trous de perçage et du moyeu sont protégés pour ne pas être recouverte de peinture qui pourrait empêcher le serrage et le frottement des boulons.

b. Deuxième couche

Une poudre époxy est pulvérisé sur l'ensemble de la jante en rotation, le maintien est possible par électrostatisme. Une cuisson à 180° fond pour donner la seconde couche de peinture qui s'adapte à toute la jante.

c. Troisième couche

La troisième couche de peinture, principalement pour l'esthétisme, est grise à paillettes. Elle est projetée sur la jante et en priorité sur sa partie supérieure.

d. Quatrième couche

La quatrième couche déposée est un vernis. Une cuisson finale est réalisée à 220°C, immédiatement refroidie et abaissée à 40°C, la jante passe en contrôle qualité ; un contrôle visuel permet de déceler les imperfections ou les chocs sur les parties visibles, si la pièce contient un défaut elle recommence toutes opérations de peinture. L'épaisseur totale constituée par les 4 couches de peinture est de 100 μm .

e. Traitement optionnel

Il est possible sur certaines jantes d'effectuer un diamantage (tour avec pointe en diamant) l'état de surface est purement esthétique et donne un aspect opaque, cette opération supplémentaire fragilise cependant la jante puisqu'elle est plus à même des oxydations. Une jante normale peut résister 1500 h en milieu salin.

2.4.6 Stockage

Les constructeurs fournissent les logos (généralement en plastique) qui doivent être collés ou clipsés aux jantes. Les jantes finies sont ensuite emballées par palette pour production série ou dans des boîtes pour vente « individuelle ».

2.5. Argumentation du choix des matières premières

2.5.1 Matériaux mis en oeuvre

Les roues moulées sont généralement réalisées suivant un des trois alliages suivants :

- Al-Si7 Mg0.3 affiné à l'antimoine non traité thermiquement (non développé ici)
- Al-Si7 Mg0.3 modifié au sodium ou au strontium, traité thermiquement
- Al-Si11 modifié au strontium, non traité thermiquement

2.5.2 Analyse de l'alliage Al-Si7 Mg0.3

a. Composition

Si (6,7 – 7,3), Mg (0,30 – 0,40), Fe (< 0,4) + divers éléments d'alliage

Cet alliage est modifié au strontium et traité thermiquement est utilisé dans 95% des cas.

b. Rôle des constituants

Silicium (Si) : L'aluminium étant un matériau très mou et sans aucune tenue mécanique, on vient ajouter du silicium, matériau très dur, pour augmenter ses propriétés mécaniques. Le silicium augmente de plus la coulabilité de l'Aluminium, il est donc utilisé pour la plupart des alliages d'Aluminium de fonderie. Son pourcentage varie suivant les caractéristiques recherchées. Le point eutéctoïde du diagramme Al-Si est à 12,5 % de Si, les alliages constitués de Si > 0,13%, sont très durs et servent généralement pour les pistons ou les cylindres. L'augmentation de Si abaisse l'allongement.

Magnésium (Mg) : En quantité suffisante dans cet alliage pour permettre un traitement thermique. (se met en solution Mg₂Si lors du chauffage du matériau). De plus ce composant améliore la résistance et la limite élastique de l'alliage.

Fer (Fe) : < 0,15% car diminue l'allongement

Sodium : Pour la modification de la structure de l'alliage, permet d'obtenir une structure fibreuse qui possède de meilleures caractéristiques mécaniques. Mais ce traitement a un effet limité puisque le sodium est gazeux à la température de coulée de l'alliage et s'évapore rapidement.

Strontium : a les mêmes caractéristiques que le sodium mais avec une durée plus longue.

Phosphore : peut permettre l'affinage des grains de Silicium, mais il augmente également la température de solidification de l'alliage, ce qui entraîne une structure aciculaire. De plus il s'oppose au sodium ou au strontium. Sa quantité doit donc être très réduite : < 0,005%

Titane ou Bore : affine la structure d'où de meilleures propriétés mécaniques. On trouve environ 0,12% de Titane dans cet alliage.

2.5.3 Analyse de l'alliage Al-Si11

a. Composition

Si (6,7 – 7,3), Mg (<0,30), Fe (< 0,14) + divers éléments d'alliage.

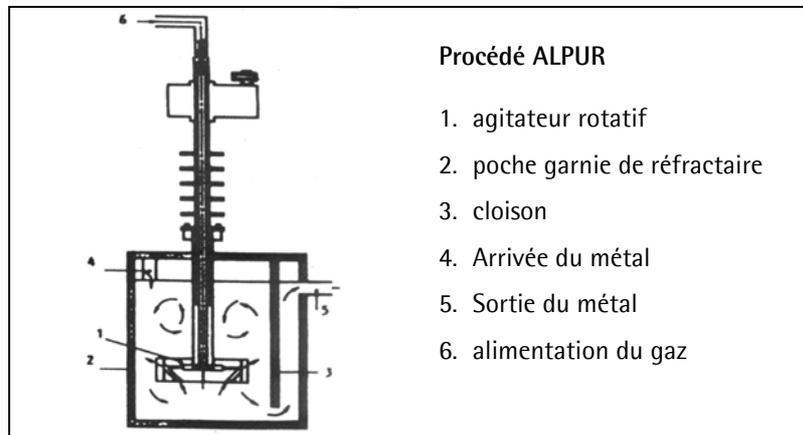
Se coule mieux que l'alliage précédent, mais ses caractéristiques sont limitées car sa faible teneur en magnésium interdit un traitement thermique. De plus, le magnésium a des caractéristiques décrites précédemment permet une augmentation de la résistance à la fatigue du matériau.

2.5.4 Traitements

a. Traitement par azote liquide

Ce procédé permet :

- un dégazage (H₂ contenu dans l'alliage)
- d'enlever les oxydes



b. Traitement thermique

Cette opération permet de conserver en solution dans la matrice d'aluminium une fraction non négligeable de magnésium et de silicium, éléments qui auraient précipités hors solution au cours d'un refroidissement naturel lent. Ces éléments en solution permettent d'augmenter les propriétés mécaniques de l'alliage. Toutefois si un traitement thermique permet généralement d'augmenter la résistance à la rupture du matériau, il en abaisse son allongement. Tout traitement thermique doit donc être un compromis entre ces deux caractéristiques.

opération du traitement thermique :

- mise en solution de magnésium et de silicium : Mg₂Si
- trempe à l'eau pour figer la structure
- revenu pour durcir le matériau (vient presser le réseau cristallin)

Industriellement la norme en vigueur pour un traitement thermique des alliages d'aluminium est la suivante :

Traitement T6 : mise en solution de 10 heures à 540°C, trempe à l'eau et revenu de 6 heures à 160°C

c. Traitement de revêtement

Un revêtement ayant pour fonction d'isoler le métal du milieu corrosif, il doit être continu, adhérent et inerte par rapport à l'environnement. A cet effet, il faut préparer soigneusement les surfaces à traiter, c'est-à-dire éliminer toute trace d'oxydation, de graisse ou de tout autre corps étranger, afin que le revêtement joue totalement son rôle de barrière au passage des électrons.

En ce qui concerne les revêtements par peinture, il faut en appliquer au moins deux types différents : une couche de fond et des couches de finition. La peinture utilisée pour les couches de fond doit mouiller parfaitement la surface à peindre et y adhérer fortement.

Pour ces raisons le revêtement des jantes se fait donc en plusieurs étapes :

- **dégraissage**
- **rinçages** (x2)
- **dérochage** (enlever les oxydes et préparer la surface à recevoir la peinture)
- **rinçages** (x2)
- **chromatation** (modification chimique de la surface de la pièce (meilleure résistance à la corrosion))
- **peinture** :
 - poudre époxy* : peinture de fond
 - peinture paillettes* : projection sur la surface extérieure uniquement
 - vernis* : projection et cuisson
- **refroidissement** (par air pour une manipulation aisée)

CONCLUSION

Il existe d'autres procédés de fabrication, d'une part liés au moulage (gravité ou centrifugation), on trouvera en annexe des informations techniques sur les procédés de moulage. D'autre part il existe d'autres techniques, notamment l'emboutissage et le galetage qui permet la réalisation des jantes à partir de plaques de tôle (2 mm), moins chères et plus répandues en production série. Existe également d'autres techniques d'usinage – très onéreuses – qui permettent l'obtention de jante à partir d'un bloc massif de métal (cela reste un cas très isolé).

Cependant, il nous paru plus intéressant d'étudier la conception des jantes moulées car les données recueillies nous permettaient de mieux appréhender ce procédé de fabrication. En effet les sources concernant les jantes moulées sont plus nombreuses. Enfin, la proximité des établissements PSA offrent des nombreux équipementiers dans la région d'Alsace-Franche-Comté, nous avons ainsi essentiellement compris le procédé de moulage et ses subtilités après nous être entretenus longuement avec le responsable fonderie de l'entreprise *Sudrad Roues France*.

En conclusion les jantes moulées en aluminium se répandent de plus en plus sur le marché automobile, au détriment de la jante tôle en production série. Il nous a donc naturellement paru plus judicieux d'étudier cette production d'avenir.

Béatrice Couvel
Thomas Metier
David Perrin
Guillaume Schnebelen

UTBM
Génie Mécanique et Conception
(dossier réalisé en mai 2002)

ANNEXES

- Annexe 1: Moulage sous pression
- Annexe 2: Moulage par gravité
- Annexe 3: Informations
- Annexe 4: Normes
- Annexe 5: Sources

Annexe 1: Moulage sous pression

Principe

On injecte par l'intermédiaire d'un piston, en un temps très court un alliage en fusion dans un moule métallique. Une surpression pouvant atteindre 1000 bars est alors appliquée au métal pour compenser le retrait de solidification. Les moules subissent des efforts mécaniques et thermiques élevés. La mécanisation de ces moules est totale. Ils sont montés sur des machines spéciales automatiques qui fonctionnent suivant un cycle de fabrication réglable.

Caractéristiques des pièces moulées sous pression

La fonderie sous pression ne met en œuvre que des alliages non-ferreux.

- Précision dimensionnelle beaucoup plus importante que par les procédés classiques. Le moule très rigide, très précis et les conditions de remplissage expliquent cet avantage.
- La tolérance d'une cote de 100 mm obtenue en coulée sous pression est de l'ordre de 0.5mm. D'autre part, l'empreinte est nue, donc non enduite d'un poteyage comme en coulée en coquille. La pièce est la réplique exacte de l'empreinte métallique au retrait linéaire près.
- Très bon état de surface obtenu du fait que l'empreinte est nue et que le degré de finition d'un moule est excellent.
- Possibilité de supprimer de nombreux usinages par obtention directe de la forme dans les tolérances fonctionnelles requises. En particulier, les trous de passage et les surfaces d'appui d'éléments de fixation sont brutes de fonderie.
- Obtention de pièces légères par diminution des épaisseurs. C'est la caractéristique la plus évidente des pièces coulées sous pression. La pièce est conçue sans masse inutile de métal.
- Mise au mille très faible (rapport entre la masse de métal injecté et la masse de la pièce brute).
- Caractéristiques mécaniques excellentes des alliages sans traitements thermiques.
- Possibilités de décoration par polissage et revêtements divers.

Conditions de choix du procédé

- Importance de la série à fabriquer.
- Les avantages techniques apportés aux pièces.
- Les moyens de production de la fonderie.

La durée de vie d'un moule pour les alliages aluminium: 75000 à 130000 pièces en alliage.

Application de la fonderie sous pression

Ce procédé de moulage est très utilisé pour la fabrication de pièces en construction automobile: carters de boîte de vitesses, carters de moteur, corps de carburateur sont des pièces coulées sous pression.

Annexe 2: Moulage par gravité

Définition

Le souci pour le fondeur est de pouvoir utiliser plusieurs fois un même moule, et a fait rechercher la permanence de l'empreinte moulante. Les conditions thermiques très contraignantes étant donné que l'alliage se trouve à l'état liquide et qu'il faille, lors de l'injection, préserver les formes et les dimensions de la pièce solidifiée, imposent les métaux comme matériaux constitutifs pour le moule. L'introduction de l'alliage dans la coquille est déterminée par l'action de la pesanteur, ce qui fait donner le nom de coulée en coquille par gravité à ce procédé.

Les éléments qui constituent la coquille doivent permettre la réalisation des opérations de moulage, remplissage, alimentation et éjection. En fait, les coquilles conçues sont de véritables machines où mécanisation et automatisation sont très poussées.

Les caractéristiques d'une coquille sont les suivantes :

- Rigidité de l'empreinte,
- Grande précision dimensionnelle et l'état de surface des éléments moulants,
- Conductibilité thermique élevée des mêmes éléments.
- Par rapport au moulage en moules permanents, il en découle pour les pièces moulées :
 - Un meilleur état de surface. (Il faut noter que celui-ci n'est pas la réplique exacte de l'empreinte métallique puisque cette empreinte est recouverte d'un enduit protecteur (le poteyage) qui affecte l'état de surface de la pièce.
 - Des caractéristiques de l'alliage plus élevées. Ceci est la conséquence de la vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée de l'alliage : le grain est plus petit et l'édifice cristallin s'en trouve consolidé. Par contre, des contraintes résiduelles à l'état brut de coulée demande un traitement thermique de stabilisation de la pièce.
 - Une plus grande précision des dimensions. La rigidité de la coquille et les moyens d'usinage utilisés pour la fabrication de celle-ci explique cette caractéristique.

D'autre part, certaines formes habituellement usinées, sont obtenues brutes de moulage : trous de fixation et surfaces d'appui de têtes de vis en particulier. On peut noter aussi la réduction générale des sur - épaisseurs d'usinage.

Pour une même fabrication, le chantier de moulage en coquille est moins encombrant, consomme moins d'énergie que le chantier de moulage en sable qui demande beaucoup plus de manutention.

Choix du procédé

Le choix de la technique de moulage à utiliser pour la fabrication d'une pièce est soumis à de nombreux facteurs qui constituent une partie du cahier des charges :

- Caractéristiques mécaniques minimales.
- Alliage métallique composant de la pièce.
- Précision dimensionnelle générale et particulière.
- Etat de surface.
- Importance de la série à fabriquer.

Ces facteurs sont à prendre en compte dès la conception de la pièce. Ils sont évalués conjointement par le bureau d'étude et le bureau des méthodes fonderie.

Parallèlement, il faut aussi évaluer les facteurs spécifiques à la fabrication d'une pièce moulée :

- Moyens de production et possibilités d'adaptation à la fabrication demandée.
- Dimension de la pièce et complexité des formes.
- Coût d'entretien de l'outillage.
- Dépenses d'énergie.
- Importance relative de l'ébarbage.
- Importance relative de la main d'œuvre à utiliser.

Ainsi il s'agit d'optimiser tous ces éléments pour une pièce dont on connaît exactement la qualité demandée. Si l'on représente l'évolution des coûts de fabrication, en fonction des séries de pièces fabriquées en moules permanents et en coquille, il apparaît un nombre N qui représente théoriquement la série minimum à partir de laquelle on peut envisager le moulage en coquille. D'autres part, les coûts d'usinage sont plus faibles sur pièce coulée en coquille.

Malheureusement ce type de moulage est relativement usuel pour des pièces moulées à partir d'alliage autre qu'aluminium. En effet de part les caractéristiques intrinsèque à l'aluminium, il y a formation d'alumine. Et donc lorsque deux flux de matières se rencontrent l'alumine se trouve coincé dans la matière nommé « repli froid », ce qui représente une amorce de rupture.

Le moulage par gravité est de plus difficilement automatisable, il doit garder en effet une grosse partie de main d'œuvre humaine. Enfin les résultats ne sont pas très homogènes du fait du non contrôle de la coulée de matière.

Annexe 3: Informations

Equipement automobile des ménages

ménages	1980	1990	1999	2010
non motorisés	29,2	23,2	19,8	17,4
motorisés	70,8	76,8	80,2	82,6

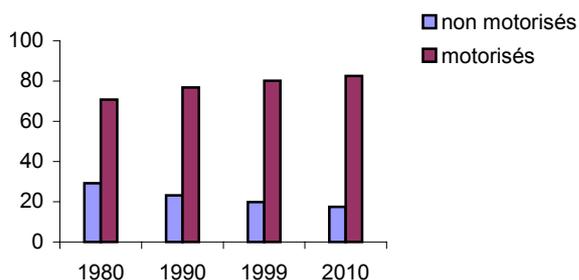
SESSI

Taux d'équipement des ménages

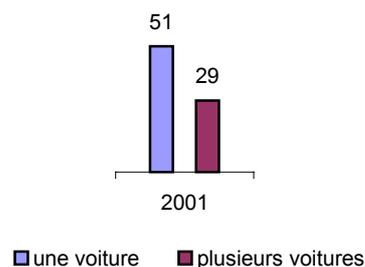
ménages	2001
une voiture	51
plusieurs voitures	29

CHELEM-CEPII

Motorisation des ménages



Nombre de véhicules par ménage



Productions mensuelles, janvier 2002

unités/mois	01/2002	augmentation
PSA	64932	6,3%
Renault	50734	0,2%
Total (France)	192268	

INSEE

Productions annuelles françaises

production auto (Fr)	1997	1998
Citroën	755	797,3
Peugeot	1070,3	1147,2
Renault	1645,5	1942,7
Prod. française (Monde)	3495,9	3932,2

(milliers de pièces)

SESSI

Principales entreprises en 1997

General Motors	Daimler
Ford	Chrysler
Volkswagen	Fiat
Toyota	Honda

SESSI

Augmentations des productions

augmentation	2001
Volkswagen	7,2%
General Motors	3,5%
Ford	-6,6%
Fiat	-2,6%
BMW	19,1%
Daimler Chrysler	18,6%

HUMA

Annexe 4: Normes

Loi sur la sécurité automobile (tout type de véhicule) :

extraits des articles de la codification des règlements du Canada relatifs aux jantes

- norme 110 :** (2) Tout véhicule automobile doit être muni de jantes qui figurent sur la liste fournie par le fabricant des pneus de ce véhicule comme étant des jantes qui peuvent être utilisées avec ces pneus.
(3) La charge maximale d'un pneu de véhicule ne doit pas dépasser la limite de charge nominale indiquée sur le flanc du pneu.
(4) La charge normale, pour un pneu de véhicule ne doit pas dépasser la charge d'essai à laquelle le pneu a été soumis lors des essais de comportement à haute.
(7) Dans le cas du dégonflement rapide d'un pneu d'un véhicule qui se déplace en ligne droite à une vitesse de 100 km/h, la jante doit retenir le pneu dégonflé jusqu'à ce que le véhicule puisse être arrêté par un freinage contrôlé.
- norme 120 :** (3) Le total des charges nominales maximales des pneus installés sur un essieu doit être au moins égal au poids nominal brut sur l'essieu (PNBE) correspondant aux dimensions de ces pneus .
(6) Les jantes adaptées à un véhicule possèdent un « marque » contenant la zone géographique, les dimensions, le type (si jantes à plusieurs pièces), leur fabricant et la date de fabrication.
(7) Ces marques doivent avoir au moins 3 mm de hauteur; et au moins 0.13 mm de creux ou de relief.
(8) Les marques doivent figurer sur la surface de la jante exposée au intempéries.
(10) S'il s'agit de roues en une seule pièce, les marques peuvent figurer sur le voile de roue.
(11) S'il s'agit d'une jante à plusieurs pièces, les marques doivent figurer sur la base de jante.

Annexe 5: Sources

- [1] Quillet.- *Encyclopédie technique*.- Mécanique, appliquée aux transports.
- [2] Industries Et Techniques.- Le duo matériau/procédé clé de l'allongement.- n° 828, juillet 2001, p 62-63.
- [3] Visite Dial Europe.- Gti Mag.- n°38, mai-juin 2000, p 88-91.
- [4] Fonderie.- *fondeur d'aujourd'hui*.- n°31, janvier 1984, p 11-17