

PIÈCES BONNES, PIÈCES SAINES EN FONTE GS

moulées en sables auto-durcissants et à vert *

Hubert DEVAUX

Centre Technique des Industries de la Fonderie

1. Introduction

Les fontes à graphite sphéroïdal ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche orientés les uns vers la compréhension du phénomène de gonflement dû à la précipitation du graphite, les autres vers l'exploitation de ce phénomène pour garantir la santé des pièces moulées.

Pour sa part, le CTIF a réalisé plusieurs campagnes d'essais, véritables études de l'alimentation (masselottage) des pièces (1) (2), afin de vérifier la répercussion de ce gonflement sur les variations volumétriques des empreintes en sable (sables auto-durcissants et sables à vert) ainsi que les possibilités d'auto-alimentation qui en découlent selon le type de pièce et la nuance de fonte testée.

Il y a une dizaine d'années, nous avons pris position en matière de masselottage des pièces en fonte à graphite sphéroïdal en proposant des règles pratiques spécifiques à cette famille d'alliage qui s'intégraient dans notre méthode générale de masselottage des pièces (3).

Depuis lors, de nouvelles données ont été acquises à la fois par le CTIF et par des expérimentateurs français et étrangers, que nous avons rassemblées, dans le présent article, sous la forme d'une étude de ce qui se passe côté pièce pour différentes nuances de fonte dans différentes natures de sable et, dans un second article, qui paraîtra ultérieurement, sous la forme d'une étude bibliographique concernant la rigidité des moules, sa nécessité et sa modulation en fonction de la taille des pièces ; les moyens de serrage du sable à mettre en œuvre et les contrôles appropriés pour l'assurer, la mesurer et garantir ainsi la santé des pièces.

2. Rappel des résultats acquis au cours d'études antérieures

2.1. Variations de volume pendant la solidification

Il y a plus de 30 ans, W.-S. Pellini et ses coéquipiers (4) ont montré que la fonte grise à graphite lamellaire avait la faculté de s'auto-alimenter et que cette faculté était pres-

H. DEVAUX

Pièces bonnes, pièces saines en fonte GS. (moulées en sables auto-durcissants et à vert).

L'auteur établit une synthèse des résultats acquis, durant ces quinze dernières années, au cours d'études anciennes et nouvelles sur l'alimentation des fontes GS.

Il rappelle quelles sont les variations de volume, qui ont lieu pendant la solidification des fontes grises et précise la nécessité d'emploi du moule rigide en sables auto-durcissants ou en sables à vert concurrentement à l'utilisation de masselottes et celle du moule « super-rigide » pour dans certains cas éviter le masselottage.

A partir de critères de sélection des défauts décelés sur pièces expérimentales, des classes de qualité ont été établies, qui permettent une comparaison générale de la santé des différentes pièces testées et en finale d'en tirer des conséquences pratiques pour la fabrication.

H. DEVAUX

Good, sound SG Iron castings (in self-hardening and green sand moulds).

The author sums up the results established over the last fifteen years by old and new investigations of the feeding of SG irons.

He reviews the changes of volume that occur during the solidification of grey irons and points out the necessity of using the rigid mould of self-hardening sand or green sand together with the use of risers, and that of the « super-rigid » mould to avoid risering in certain cases.

From selection criteria applied to the flaws detected in experimental castings, quality classes have been established; these allow for a general comparison of the soundness of the various castings tested and finally make it possible to draw practical conclusions applicable to production.

H. DEVAUX

Gute, einwandfreie Gusstücke aus Guss Eisen mit Kugelgraphit (in selbsthärtendem und in Grünsand geformt).

Der Verfasser erläutert synoptisch die in den vergangenen fünfzehn Jahren anhand älterer und neuerer Untersuchungen zur Frage der Speisung bei Guss Eisen mit Kugelgraphit gesammelten Erfahrungen.

Er schildert die volumemässigen Veränderungen während der Erstarrung von Grauguss und spricht über den notwendigen Einsatz einer starren Form aus selbsthärtendem oder Grünsand bei gleichzeitiger Verwendung von Speisern und einer « superstarren » Form zur Vermeidung der Speisung in manchen Fällen.

Anhand von Auswahlkriterien für an Probestücken festgestellte Gussfehler wurden Güteklassen definiert zum allgemeinen Vergleich der Fehlerfreiheit der gegossenen Gusstücke und zur Erarbeitung von praxenahen Schlussfolgerungen für die Fertigung.

que inexistante pour les fontes à graphite sphéroïdal hypoeutectiques : leurs essais avaient été réalisés sur des jets de 100 mm d'épaisseur coulés dans des moules en sable silico-argileux (figures 1 et 2).

Qu'en était-il des fontes à graphite sphéroïdal de composition hypereutectique plus couramment coulées en fonderie ?

(*) Exposé prononcé dans le cadre du groupe de travail « masselottage des fontes GS ».

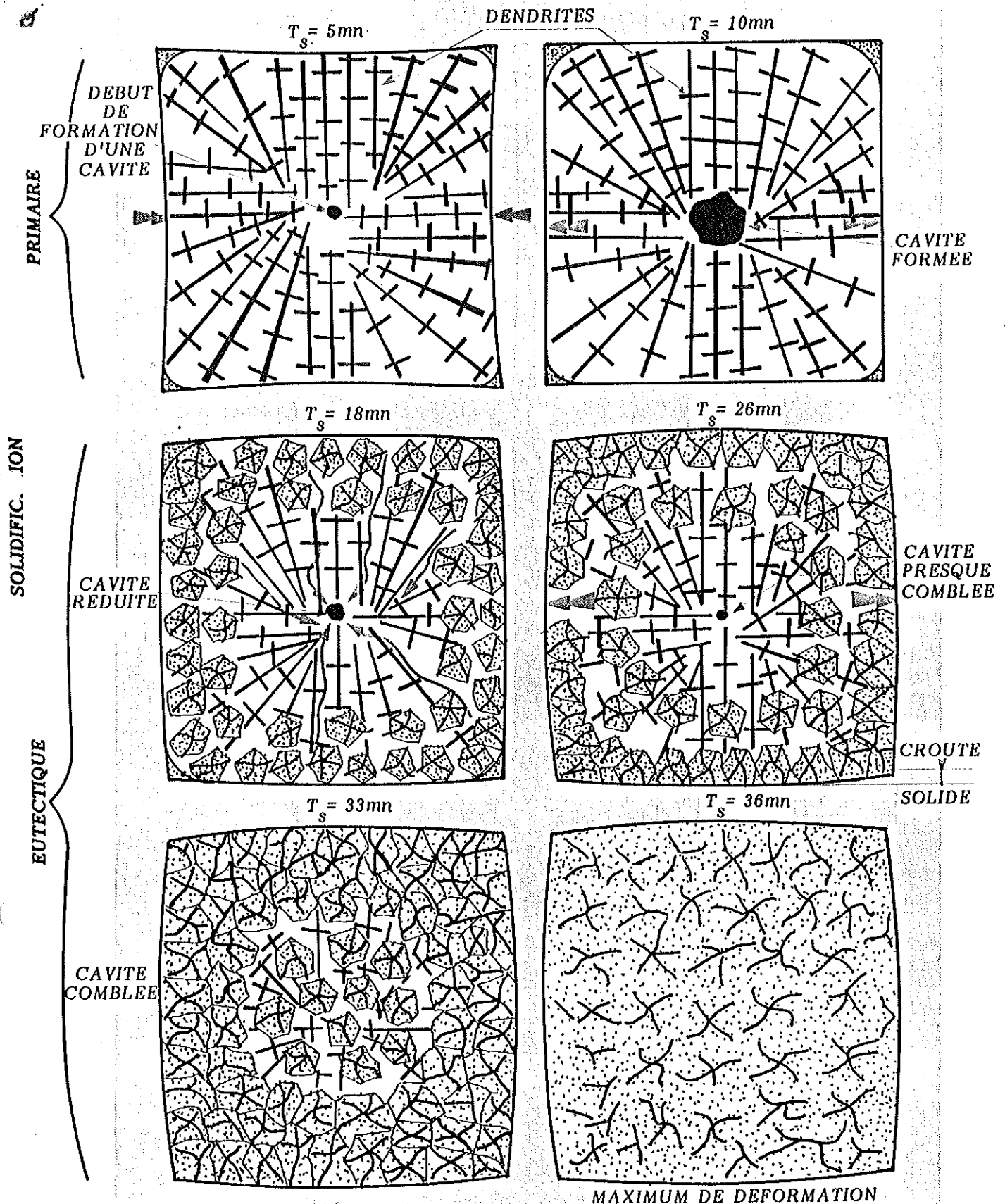


fig. 1 - Schématisation (d'après les travaux de (4), représentée sur coupe transversale d'un jet de section carrée de 100 mm de côté, de la solidification et de l'auto-alimentation par transfert d'une fonte grise à graphite lamellaire hypoeutectique coulée à 1 427 °C.

a) Solidification primaire dendritique et formation d'une cavité aux temps $T_s = 5$ et 10 mn.

b) Solidification eutectique ensuite aux temps : $T_s = 18, 26$ et 33 mn, sous forme de cellules avec lamelles de graphite. Comblement progressif de la cavité, par transfert de liquide résiduel (lignes sinueuses bleues) jusqu'au centre thermique.

Les flèches indiquent le sens des mouvements de parois de l'empreinte en sable.

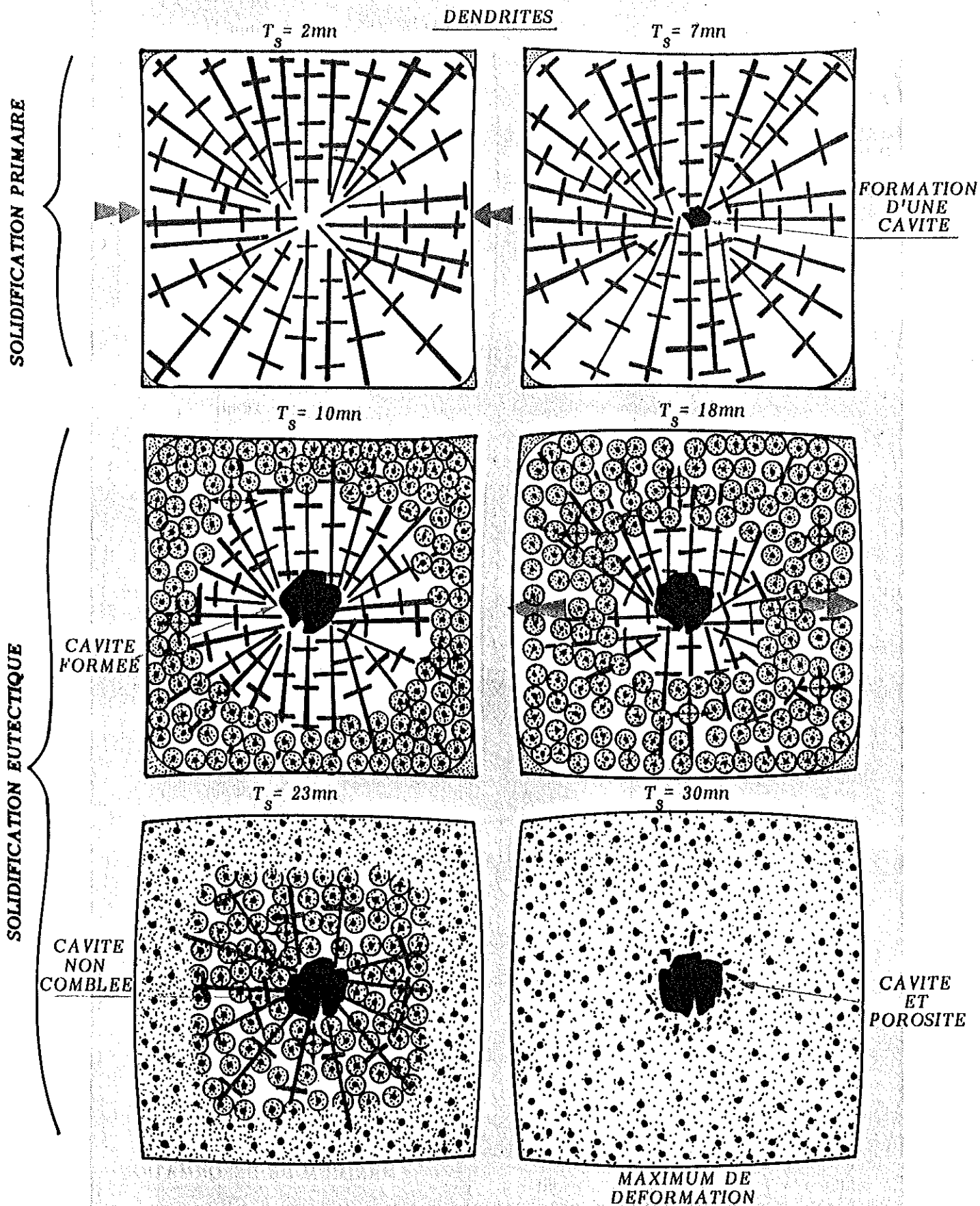


fig. 2 - Schématisation (d'après les travaux de (4)), représentée sur coupe transversale d'un jet de section carrée de 100 mm de côté, de la solidification d'une fonte grise à graphite sphéroïdal hypoeutectique coulée à 1 327 °C.

a) Solidification primaire dendritique et formation d'une cavité aux temps $T_s = 7mn$.

b) Solidification eutectique ensuite aux temps : $T_s = 10, 18$ et $23mn$, sous forme de sphéroïdes de graphite dans une enveloppe d'austénite. Pas de comblement de la cavité.

Les flèches indiquent le sens des mouvements de parois de l'empreinte en sable.

Pour répondre à cette question, nous avons enregistré, en fonction du temps, les demandes de fourniture d'alliage ou de rejet éventuel d'une éprouvette cylindrique en fonte à graphite sphéroïdal coulée dans un moule-carapace en matière céramique amorphe** ensermé dans un sable auto-durcissant et soumise au cours de sa solidification à des gradients thermiques voisins de ceux qui règnent à l'extrémité de barres donc de ce fait suffisamment élevés pour que cette éprouvette soit obtenue sans défaut (5).

Nous avons ainsi enregistré pour chaque nuance de fonte étudiée une courbe de variation volumique ΔV rapportée au volume V_0 de l'éprouvette de mesure. La figure 3 reproduit trois courbes typiques de cette variation avec, en rappel, les courbes d'évolution de la température mesurée en trois points disposés dans le sens de la solidification. Les résultats de ces mesures sont rappelés ci-après. Précisons, ici, que dans nos essais expérimentaux nous avons admis comme expression du carbone équivalent :

$$\text{Céq} = C + \frac{\text{Si}}{4} \quad (6)$$

2.11. Fontes grises à graphite lamellaire

Avant et au cours de la période de solidification primaire et jusqu'à la fin de cette période, dont la durée est sensiblement égale au quart du temps total de solidification, il y a fourniture d'alliage par la zone d'alimentation située en partie supérieure de l'éprouvette.

Lorsque les premières couches de la solidification eutectique progressent vers la zone d'alimentation, $\frac{\Delta V}{V_0}$ est

quasiment nul, le gonflement dû à la précipitation du graphite eutectique compensant, dans l'espace et dans le temps, le retrait volumique dû à la croissance de l'austénite.

Après cette période et jusqu'à la solidification complète, on observe un net reflux de liquide résiduel vers la zone d'alimentation qui se solidifie en dernier.

2.12. Fontes grises à graphite sphéroïdal

Au cours de la période de solidification primaire, il y a comme pour les fontes à graphite lamellaire fourniture d'alliage.

Avec les fontes hypoeutectiques, la fourniture d'alliage, bien que moins accentuée, se poursuit pendant toute la période de solidification eutectique.

Avec les fontes hypereutectiques, il peut se produire un léger reflux de liquide résiduel vers la zone d'alimentation, mais lorsque c'est le cas, ce reflux est suivi d'une variation $\frac{\Delta V}{V_0}$ négative.

2.13. Conséquence pratique

Ces résultats montrent que les possibilités d'auto-alimentation par transfert de liquide vers les zones de dernière solidification, caractéristique des fontes grises à graphite lamellaire, sont pratiquement inexistantes avec les

(**) Pour minimiser les mouvements de parois de l'empreinte.

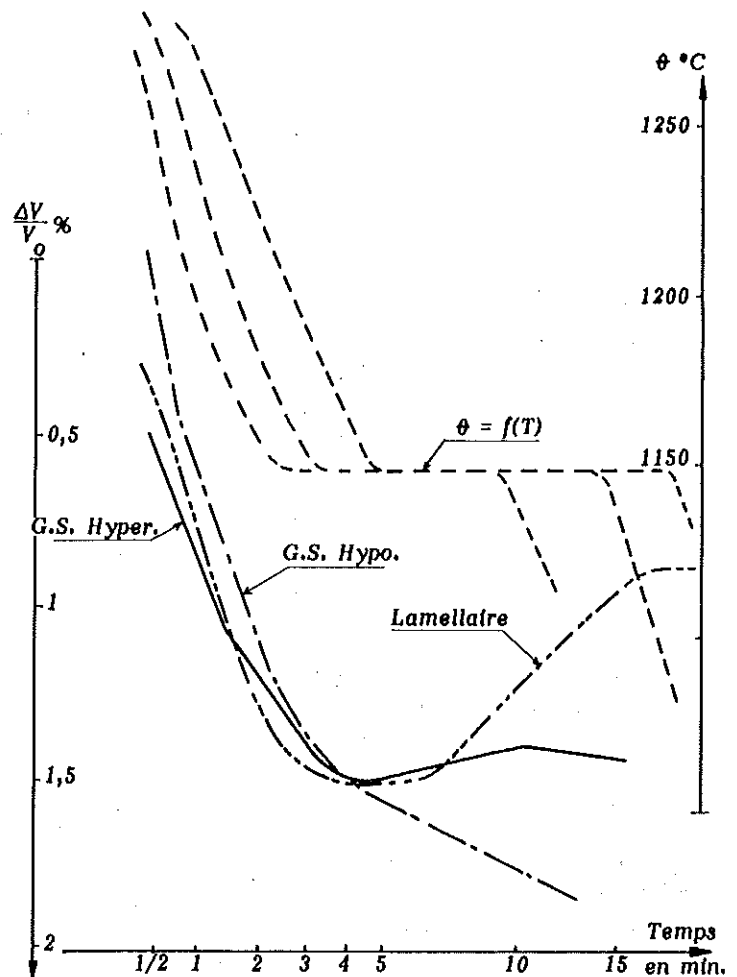


fig. 3 - Variations volumiques relatives au cours de la solidification de 3 types de fonte grise et courbes d'évolution de la température en 3 points de l'éprouvette testée.

fontes à graphite sphéroïdal. Il paraît donc nécessaire pour alimenter celles-ci de mettre en place des masselottes dont le temps de solidification est supérieur à celui des pièces.

2.2. Masselottage des pièces épaisses en fonte à graphite sphéroïdal (petites et moyennes séries)

D'après ce qui précède, pour réaliser des pièces saines, c'est-à-dire des pièces sans défaut de retassure à l'examen micrographique (*), il convient de recourir à l'emploi de masselottes. L'influence de la nature du sable étant primordiale sur la santé interne, concurremment à l'emploi de masselottes, il faut aussi faire appel à un moule rigide en sable auto-durcissant. Le sable à vert employé pour la production de petites pièces, généralement en grande série, étant un sable constituant des moules non rigides pour fabriquer des pièces moyennes et épaisses.

2.2.1. Pièces coulées et nature des moules

Notre intention est ici de rappeler les résultats que nous avons obtenus, d'une part sur des barres et des jets carrés d'épaisseurs moyennes et fortes figurant des parties de pièce compactes telles que brides, raccords de parois, d'autre part sur des plaques importantes représentant des parois étendues de pièces de grande taille. A l'exception des barres et des plaques non masselottées, les

(*) Contrôle de qualité à considérer comme très sévère à la réception des pièces industrielles.

Forme de pièce coulée		Barre				Jet	Plaque		
Dimensions mm	Epaisseur	25	40	60	100	60	25	40	60
	Longueur	750	1 000			200	750	1 000	
Module masselotte M_M		Sans masselotte ; Masselotte réduite ; Masselotte normale = 0 M_p = 0,6 M_p = 1,25 M_p							
Sables mis en œuvre		Autodurcissants liés au silicate de soude					Autodurcissants liés par résines isocyanates ou par ciment		

Tableau 1 - Forme et dimensions des pièces coulées avec indication du module des masselottes et la nature du sable employé.

pièces ont été alimentées à une seule extrémité par une masselotte borgne cylindro-sphérique de rapport de modules :

$$\frac{M_M}{M_p} = \frac{\text{Module masselotte}}{\text{Module pièce}} = 0,6 \text{ ou } 1,25$$

Comme matériau de moulage, on a eu recours à des sables autodurcissants à liant silicaté et à liants organique et hydraulique. Toutes ces données sont précisées au tableau 1.

Pour être rigides, les moules comportaient tous des châssis très solides dans lesquels le sable bien que flou avait été serré. En outre, pour être « super-rigides », certains moules ont-ils été équipés d'armatures extérieures en fers profilés.

2.22. Défauts considérés

Les défauts internes décelés au cœur des pièces appartiennent à la famille des défauts de retassure. Nous avons dénommé :

- macrocavités, les cavités concentrées de dimensions supérieures à plusieurs mm,
- porosités, des nuages de cavités ténues dont chacune d'elles est de dimension inférieure à 2 mm, voire nettement inférieure à 1 mm.

Toutes les pièces ont été radiographiées. Chaque défaut étant d'abord examiné sur cliché radiographique puis sur coupe de pièce usinée et polie ensuite, afin de créer des classes de qualité basées sur les critères de sélection du tableau 2.

Les résultats sont condensés au tableau 3, sous la forme d'un classement des défauts de retassure établi à partir des critères du tableau 2. Un code d'appréciation de leur santé interne est visualisé à la figure 4.

2.23. Conséquences pratiques pour la fabrication des pièces

Si l'on se réfère aux résultats reproduits au tableau 3, on note qu'en moule rigide :

- les parties de pièce compacte, testées sous la forme de barres et de jets peuvent être obtenues saines (*) sur de

grandes distances (jusqu'à 1000 mm pour des épaisseurs de 40 mm, avec effet d'extrémité) en étant alimentées par une masselotte normale de module : $M_M = 1,25 M_p$;

- les parois étendues de pièce, testées sous la forme de plaques avec et sans masselotte, n'atteignent pas le même niveau de santé, il y demeure des porosités à cœur généralement situées au tiers central de leur épaisseur et susceptibles d'être mises à jour si ces parois sont par exemple percées de trous.

Par rapport au moule rigide, le moule « super-rigide » (avec châssis renforcé) améliore la santé interne des deux formes compactes et étendues testées sans masselotte mais

Classe de qualité	Critères de sélection
A	Aucun défaut décelable à l'examen radiographique
B	Rares porosités à peine décelables sur coupe polie
C	Petites porosités visibles sur coupe usinée
D	Plages de porosités visibles sur coupe brute
M	Macrocavités
P	Poquette importante ne disparaissant pas après usinage
p	Faible poquette disparaissant après usinage

Tableau 2 - Classes de qualité des pièces testées.

Fonte à graphite sphéroïdal : $4,10 < C_{\text{éq}} < 4,6$ avec $C_{\text{éq}} = C + \frac{Si}{4}$									
Forme pièce	Barre		Jet	Plaque					
Qualité Moule	Rigide		« Super rigide »	Rigide			« Super-rigide »		
$\frac{M_M}{M_p}$	1,25	0	0	0	0,6	1,25	0	0,6	1,25
Défaut décelé	A	D	B	D	D	C	B	B	B

Tableau 3 - Classement des défauts de retassure suivant les critères de sélection du tableau 2.

(*) Sans défaut décelable dans les zones soumises à un contrôle radiographique.

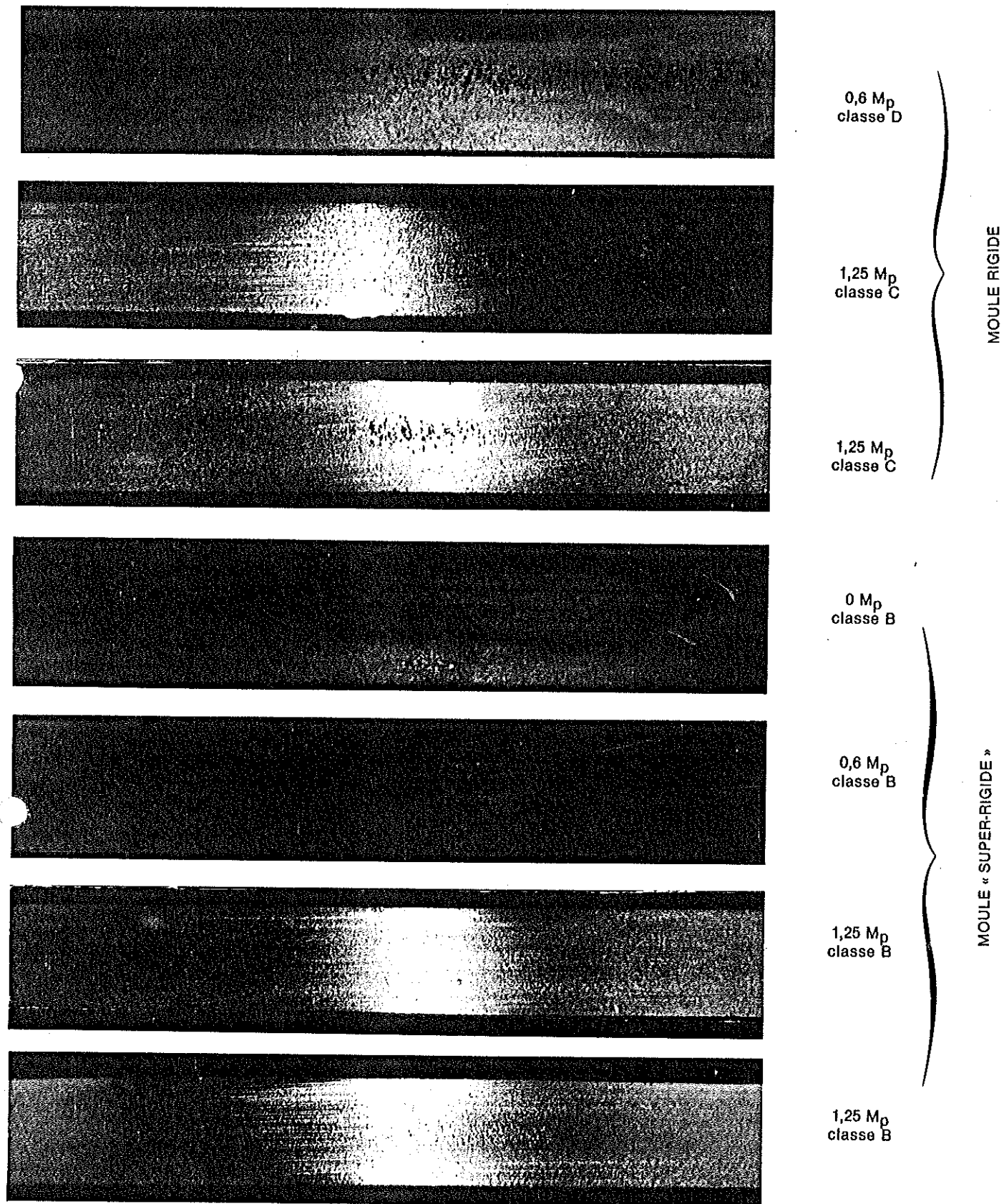


fig. 4 - Code d'appréciation de la santé interne.

aucune d'elles n'a pu être obtenue saine (*). On ne relève toutefois que quelques rares porosités à peine décelables à l'œil nu sur coupe de pièce polie. Les formes étendues, même normalement masselottées ($M_M = 1,25 M_p$), présentent encore ce défaut très peu réduit.

2.3. Masselottage des petites pièces pour fabrication en grande série

2.31. Pièces coulées et sables expérimentés

Le type de pièce d'essai utilisé comprenait une partie étendue en forme de plaque et une partie compacte en forme de barre raccordées entre elles pour former un dièdre de sable surchauffé au voisinage duquel se situait un point chaud.

Pour représenter la gamme des épaisseurs de pièces coulées dans les ateliers de moulage en grande série, quatre éprouvettes homothétiques ont été disposées dans un même moule, avec des épaisseurs de plaque de 5, 8, 13 et 21 mm et des épaisseurs de partie compacte de respectivement 10, 16, 26 et 42 mm (figure 5).

Leur remplissage a été réalisé par l'intermédiaire d'un système comportant des attaques minces de façon qu'elles jouent le rôle d'ailette de refroidissement au cours de la période de solidification. Les masselottes borgnes cylindro-sphériques lorsqu'elles ont été employées étaient placées

(*) Sans défaut décelable dans les zones soumises à un contrôle radiographique.

latéralement en bout de barre. Le module de chacune d'elles, rapporté à celui de la forme alimentée, a été :

$$\frac{M_M}{M_B} \text{ c'est-à-dire : } \frac{\text{Module masselotte}}{\text{Module barre}} = 1,25$$

Il en était de même du module de la barre par rapport au module de la plaque $\frac{M_B}{M_p} = 1,25$, de sorte que la première joue le rôle de masselotte pour la seconde.

Le sable de moulage dans les unités de production en grande série étant généralement un sable à vert, on a donc opéré avec des sables silico-argileux synthétiques à vert.

Les moules ont été obtenus de manière conventionnelle, soit en serrant par secousses et pression un sable peu chargé en argile mais renfermant une proportion notable de bral et de farine de bois, soit en serrant par haute pression un sable à forte teneur en bentonite, chargé en bral, mais contenant une faible quantité d'eau.

Au tableau 4 sont rapportées les données dimensionnelles des éprouvettes et les données concernant la serre des sables employés.

2.32. Défauts externes, défauts internes constatés

Des déformations (gonflement et poquette) plus ou moins marquées ont été relevées sur les éprouvettes ainsi qu'une augmentation très nette de leur poids lorsqu'elles ont été obtenues dans un sable faiblement serré ($60 < \Delta < 75$).

Chaque défaut interne a été décelé par cliché radiographi-

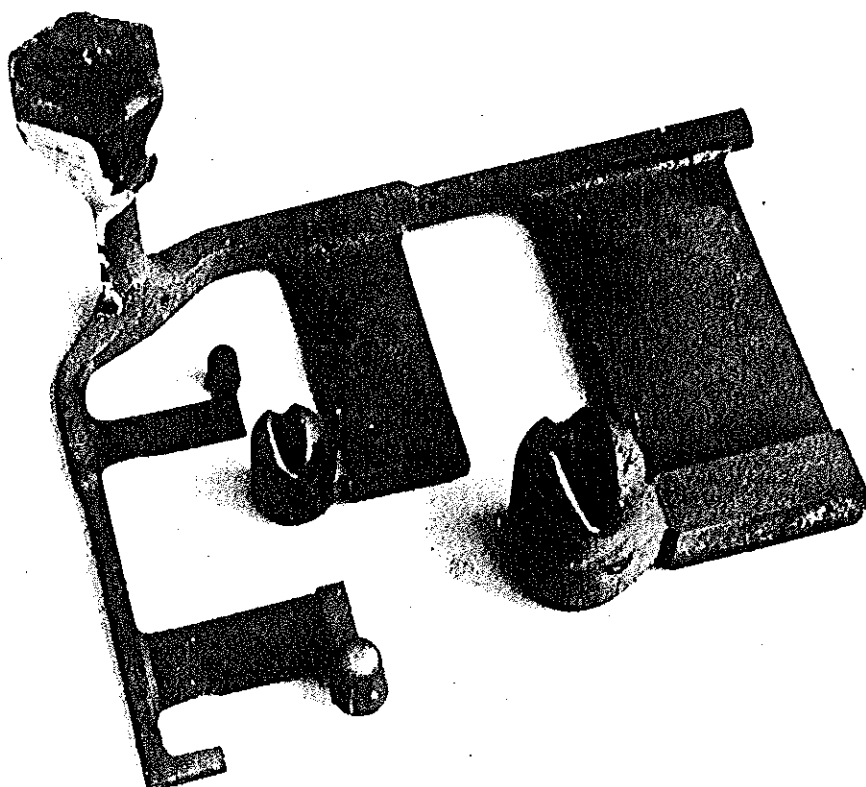


fig. 5 - Disposition des quatre éprouvettes dans le moule, avec leur système de remplissage et leur masselotte

$$\left(\frac{M_M}{M_B} = 1,25 \right)$$

Forme éprouvette	Partie compacte (barre)				Partie étendue (plaque)			
Epaisseur	10	16	26	42	5	8	13	21
Rapport modules	Sans masselotte $\frac{M_M}{M_B} = 0$ Masselotte normale $\frac{M_M}{M_B} = 1,25$				$\frac{\text{Module barre}}{\text{Module plaque}} = 1,25$			
Serrage sable	Secousses et pression $\begin{cases} 60 < \Delta < 75 \\ 85 < \Delta < 95 \end{cases}$ Haute pression : $P \approx 10 \text{ kg/cm}^2$							

Tableau 4 - Dimension de l'éprouvette, rapport des modules et mode de serrage du sable à vert.

Fonte à graphite sphéroïdal $C_{6q} \geq 4,3$ avec $C_{6q} = C + \frac{Si}{4}$						
Forme éprouvette			Partie compacte (barre)	Partie étendue (plaque)		
Défaut décelé			Macrocavités	Porosités	Poquette	
Rapport modules		$\frac{M_M}{M_B}$	0	1,25		
		$\frac{M_B}{M_P}$			1,25	1,25
Serrage sable	Secousses et pression	$60 < \Delta < 75$	M	A	B	P
		$85 < \Delta < 95$	M	A	B	P
	Haute pression		M	A	B et A (1)	p

Tableau 5 - Classement des défauts dus au retrait relevés sur éprouvettes à partir des critères de sélection du tableau 2.

(1) Absence totale de porosité dans les plaques d'épaisseur 13 ; 8 et 5 mm.

que puls, à raison d'une éprouvette sur trois, sur coupe usinée d'abord et polie ensuite dans le but d'établir des classes de qualité pour se servir des critères de sélection du tableau 2.

Les résultats obtenus sont reproduits au tableau 5 suivant

le même classement des défauts de retassure que celui utilisé pour les pièces épaissées.

2.33. Conséquences pratiques pour la fabrication des pièces

2.331. Eprouvettes coulées sans masselottage

Lorsque l'on augmente le degré de serrage d'un même sable de moulage serré par secousses et pression, on constate notamment que l'excès de poids est réduit d'au moins 80 % (passage d'une dureté : $60 < \Delta < 75$ à une dureté : $85 < \Delta < 95$).

Comparativement à un sable fortement serré ($85 < \Delta < 95$) par secousses et pression, un sable serré par haute pression :

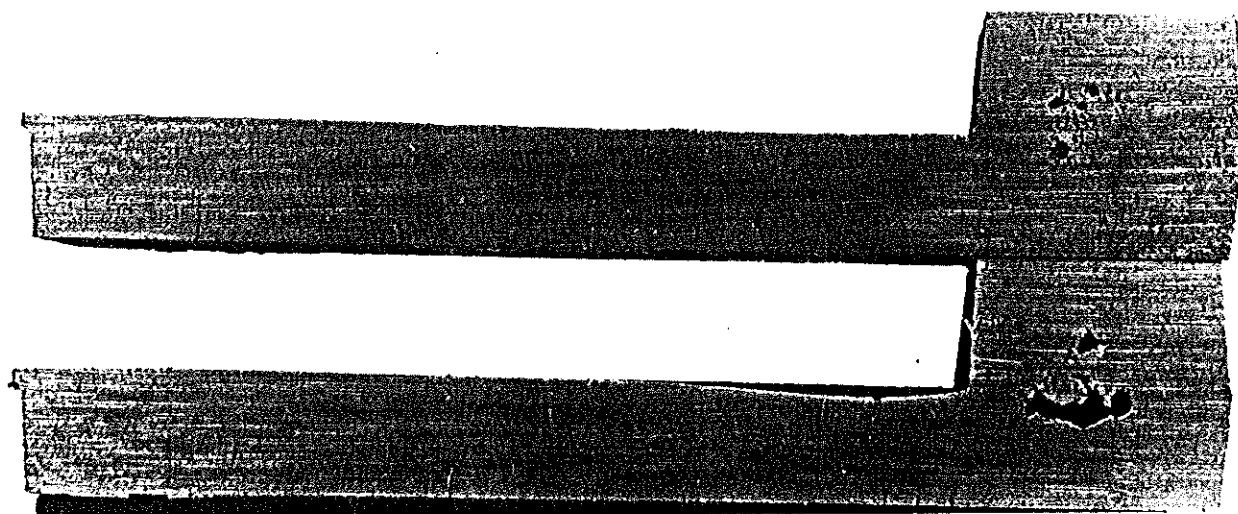
- ne modifie pas de façon appréciable la masse des pièces ;
- réduit les déformations d'au moins 60 % ;
- diminue grosso-modo les porosités de 50 % et jusqu'à 100 % dans les épaisseurs inférieures ou égales à 13 mm ;
- n'a pas d'effet sensible sur les macrocavités.

La figure 6 illustre les améliorations apportées par ce sable.

fig. 6 - Suppression des poquettes et réduction des cavités par le sable serré par haute pression.

a) sable serré par secousses et pression.

b) sable serré par haute pression.



2.332. Eprouvilles masselottées. Action des masselottes

Le sable serré par haute pression, plus rigide, étant pris comme référence, les masselottes :

- suppriment radicalement les macrocavités des parties compactes ;
- réduisent encore les poquettes.

3. Recherche pour l'obtention de pièces saines en fonte à graphite sphéroïdal (*)

Des travaux de recherche ont été entrepris, dans le but de compléter les données expérimentales acquises, pour étudier la tendance aux défauts de retassure de quatre nuances de fonte à graphite sphéroïdal : hypoeutectique, eutectique, hypereutectique ainsi qu'une fonte austénitique (N.M. 13-7).

3.1. Nuances de fontes expérimentales

Vingt fuslons au four à induction ou à résistances ont été réalisées à partir de charges constituées essentiellement de fonte neuve avec en mélange, du fer suédois, pour les

(*) Nous remercions M. DYREK de l'Institut Odlewnictwa à Cracovie, Pologne, qui a mené cette étude au CTIF.

trois nuances d'alliage non allées. Pour élaborer la fonte austénitique, on ajoutait aux constituants essentiels du nickel et du ferro-manganèse à 75 %. Ces fontes ont été obtenues à graphite sphéroïdal par traitement au ferro-silico-magnésium ou au nickel magnésium. L'inoculation était effectuée par addition de ferro-silicium à 75 ou 98 %.

Le tableau 6 fournit quelques précisions sur la composition des charges, le traitement de la fonte liquide ainsi que les teneurs finales en éléments tels que le carbone total, le silicium, le manganèse et le magnésium.

Les analyses, réalisées à partir de médailles spectrographiques prélevées à la poche de coulée après traitement et inoculation, ont permis, si l'on se réfère à la formule simplifiée $C_{eq} = C + \frac{Si}{4}$, d'assortir les nuances de fonte coulées.

3.2. Expériences réalisées sur éprouvilles épaisses non masselottées

3.2.1. Type d'éprouvette testé.

La recherche du « savoir-faire » pour obtenir des pièces saines à l'examen radiographique, nous a conduit à couler, dans une première phase, des éprouvilles de forme sphérique de 100 mm de diamètre dans un sable au silicate de soude enserré dans un châssis pour former un ensemble suffisamment rigide. Ces pièces étaient remplies « en chute » par l'intermédiaire d'un conduit cylindrique ou

Nuance de fonte	Lit de fusion				Mode de traitement	Composition chimique %						
	Fonte neuve %	Fer suédois %	FeMn75 %	Ni %		C	Si	Mn	P	Ni	Mg	$C_{eq} = C + \frac{Si}{4}$
Hypoeutectique	80	18			Plongeur (Fe Si Mg)	3,3 à 3,35	2,55 à 2,6	0,4 à 0,37	0,04		0,025 à 0,03	3,94 à 4
Eutectique	87	11			Plongeur (Fe Si Mg)	3,55 à 3,6	2,8 à 2,75	0,34	0,035		0,015 à 0,03	4,25 à 4,28
Hypereutectique	94	4			Plongeur (Fe Si Mg)	3,85 à 3,9	2,85 à 2,9	0,38	0,04		0,010 à 0,03	4,57 à 4,63
Austénitique	74	3	8	13	Au Four (Ni Mg)	3,18 à 3,2	3,05	7,2 à 7,4	0,04	13,6	0,078 à 0,053	3,94 à 3,96
Hypoeutectique à bas Mn (*)	85	15			Au Four (Ni Mg)	3,57	2	0,1	0,04		0,055	4,07

Tableau 6 - Diverses nuances de fonte expérimentées.

(*) Fonte spécialement élaborée pour bloc parallélépipédique.

○ Nuance fonte	Hypoeutectique	Eutectique	Hypereutectique	Austénitique NM 13-7
$C_{eq} = C + \frac{Si}{4} \%$	3,8 à 4	4,18 à 4,28	4,38 à 5,04	3,9 à 3,96
Indice de retassure $I_R \%$	0,82	0,76	0,75	3,9
Défaut décelé	B	B	B	D
Surchauffe $^{\circ}C$ Solidus	150	200	220	150
Qualité du moule	Rigide			

Tableau 7 - Valeurs comparées de l'indice de retassure, mesurées sur sphères non masselottées, et classement du défaut selon les critères de sélection du tableau 2.

« crayon » de 18 mm de diamètre (figure 7). Nous avons ensuite coulé un bloc parallélépipédique en visant à respecter certaines données métallurgiques préconisées par (7). Ce bloc a été obtenu sans masselotte dans un moule muni d'artifices de maintien du sable pour renforcer sa rigidité (figure 8). Son remplissage était assuré par un système de pulvérisation « en source » comprenant : une descente convergente, un canal distributeur à section constante muni de deux attaques perpendiculaires amincies en bout.

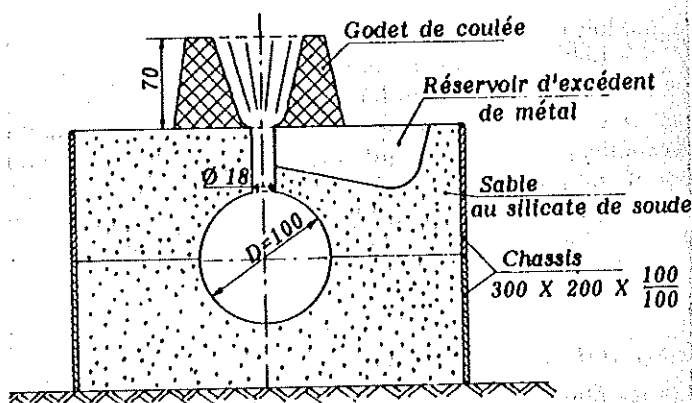


fig. 7 - Éprouvette de retassure de forme sphérique.

3.22. Défauts considérés

Aucun défaut externe du genre poquette n'a été relevé sur les sphères. Les défauts internes, à associer à une phase de retrait de l'alliage, ont été évalués par ce que nous avons dénommé « Indice de retassure », qui a pour expression :

$$I_R = \frac{\text{Volume de retassure Interne}}{\text{Volume apparent de l'éprouvette}}$$

le volume apparent de l'éprouvette V_{AP} est obtenu par la relation :

$$V_{AP} = \frac{P_A - P_E}{\rho_E}$$

dans laquelle P_A est le poids de l'éprouvette pesée dans l'air, P_E le poids de l'éprouvette pesée dans l'eau et ρ_E la masse volumique de l'eau.

Le volume de retassure Interne V_R est estimé de la façon suivante :

$$V_R = V_{AP} - V_M$$

V_M est le volume réel de métal donné par la relation :

$$V_M = \frac{P_A}{\rho_F}$$

où ρ_F est la masse volumique de la fonte.

Les résultats de ces mesures sont rapportées au tableau 7, sous la forme de l'indice de retassure avec classement du défaut selon les critères du tableau 2, puis indication de la surchauffe moyenne au-dessus du solidus (celui-ci admis comme étant égal à 1 150 $^{\circ}C$) pour chaque nuance de fonte, la qualité du moule est également indiquée.

Ces défauts internes sont visualisés à la figure 9 qui montre une coupe axiale de deux sphères, l'une en fonte eutectique, l'autre en fonte austénitique.

Le bloc parallélépipédique, coulé sans masselotte, ne présente aucun défaut externe. Un contrôle aux ultra-sons a prouvé que cette pièce n'était pas entièrement dépourvue de retassure.

3.23. Conséquences pratiques

Les parties de pièce compacte non masselottées, coulées en moule rigide, n'atteindront pas la santé parfaite si l'on prend comme référence la sphère de module $M \approx 1,6$ cm et le bloc parallélépipédique de module $M \approx 2,6$ cm que l'on a testés. Toutefois, notamment avec les fontes eutectique et hypereutectique expérimentées, le défaut est si ténu que ces éprouvettes considérées comme pièces donneraient, dans la plupart des cas d'utilisation, une entière satisfaction en service.

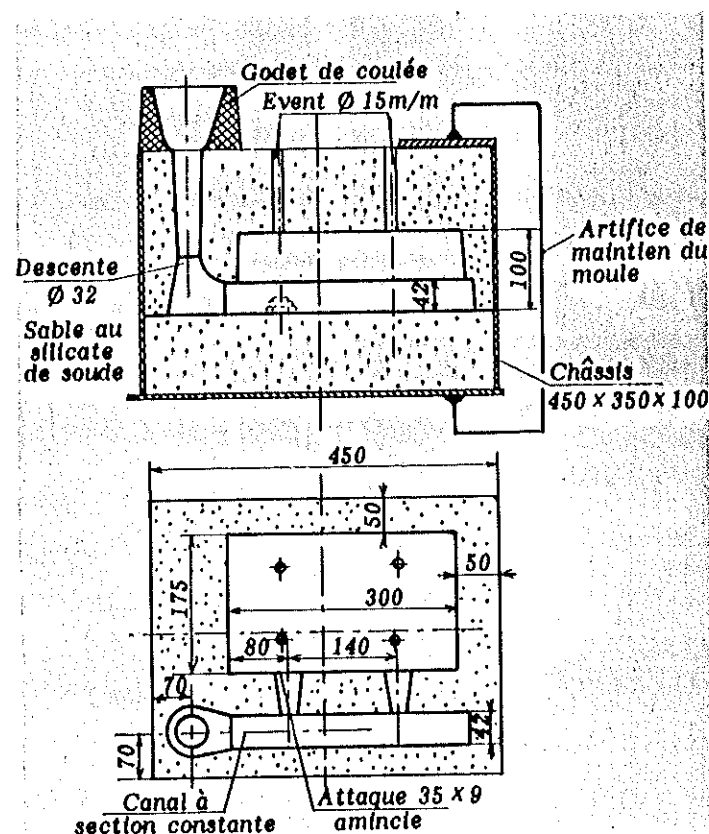
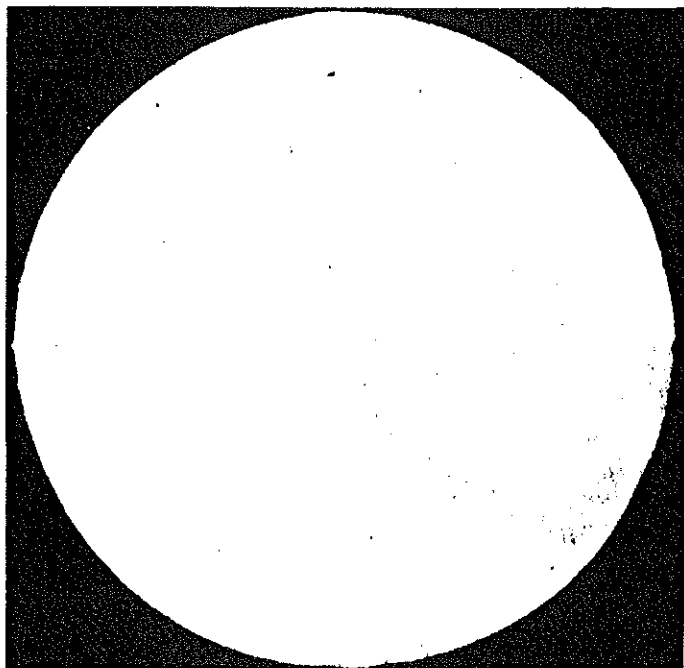
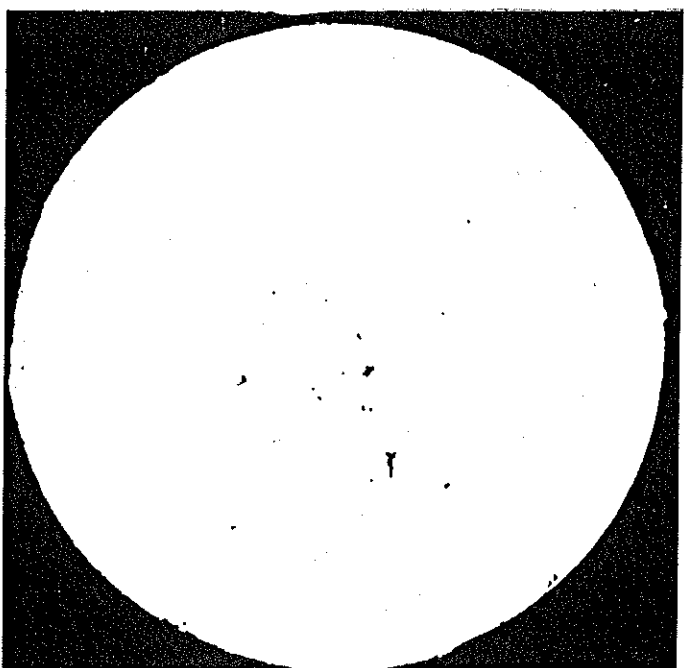


fig. 8 - Éprouvette en forme de bloc parallélépipédique.



(a)



(b)

fig. 9 - Visualisation sur coupe polie de défauts de retassure interne.

a) Fonte eutectique avec $I_f = 0,7 \%$.

b) Fonte austénitique avec $I_f = 3,9 \%$.

3.3. Expériences réalisées sur éprouvettes homothétiques pour moulage en grande série

3.31. Eprouvettes testées.

Pour refléter la même gamme d'épaisseurs de pièces coulées dans les ateliers de moulage en grande série, nous avons réutilisé les quatre éprouvettes homothétiques précédemment employées (tableau 4) visualisées avec masselottes et dispositif de remplissage à la figure 5 (chapitre 2-31).

Les masselottes étaient soit réduites, soit normales avec comme rapport de modules :

$$\frac{MM}{MB} = 0,8 \text{ et } \frac{MM}{MB} = 1,25$$

c'est-à-dire : $\frac{\text{Module masselotte}}{\text{Module forme alimentée (barre)}}$

Le module de la barre rapporté à celui de la plaque $\frac{MB}{MP}$ est égal à 1,25.

Pour des commodités de fabrication, le sable de moulage mis en œuvre a été un sable auto-durcissant lié au silicate de soude. Ce sable, bien que fournissant des moules d'une rigidité un peu supérieure à celle des moules en sable serrés par haute pression, permet de comparer la qualité des pièces confectionnées selon ces deux modes de moulage, du moins jusqu'à des épaisseurs de paroi de grosso-modo 15 mm.

3.32. Défauts constatés

Sur les éprouvettes coulées en fonte à graphite sphéroïdal austénitique, des affaissements ou poquettes ont été découverts, localisés près du point chaud où se situe le dôme de sable surchauffé. Précisons toutefois que des carbures y étaient présents, probablement dus à un évanouissement précoce de l'effet d'inoculation.

Les défauts internes ont été décelés sur chaque éprouvette par cliché radiographique ainsi que sur coupe polie avec les éprouvettes d'épaisseur 13 mm.

Le tableau 8 mentionne les résultats obtenus et classés suivant les critères de sélection du tableau 2.

3.33. Conséquences pratiques

L'examen du tableau 8 montre qu'une masselotte de module réduit $\frac{MM}{MB} = 0,8$ ne supprime pas les macro-

cavités dans la partie compacte en forme de barre de l'éprouvette et ce quelle que soit la fonte coulée. Une masselotte normale $\frac{MM}{MB} = 1,25$ supprime totalement ce

défaut sur toutes les éprouvettes.

Avec les fontes hypoeutectique, eutectique et hypereutectique testées, par rapport à un sable serré par haute pression pris comme référence, le sable au silicate de soude durci par un courant de gaz carbonique agit de manière plus efficace sur les porosités et sur les poquettes, lesquelles ne

Forme éprouvette		Partie compacte (barre)		Partie étendue (plaque)	
Défaut décelé		Macrocavités		Porosités	Poquettes
Rapport modules	$\frac{M_M}{M_B}$	0,8	1,25		
	$\frac{M_B}{M_P}$			1,25	1,25
Fonte hypoeutectique		M	A	A	Néant
Fonte eutectique		M	A	A	Néant
Fonte hypereutectique		M	A	A	Néant
Fonte austénitique		M	A	C	P
Qualité moule		Rigide			

Tableau 8 - Classement des défauts relevés sur éprouvettes avec masselottes réduite et normale, selon les critères du tableau 2.

à l'exception des fontes à bas carbone, compenser et même dépasser en valeur absolue le retrait de la matrice métallique R_S . En vertu de quoi, on devrait obtenir des pièces auto-alimentées sans le moindre défaut de retassure. Or l'expérience a montré que l'auto-alimentation n'était pas complète car il persiste toujours, du moins dans les épaisseurs testées, de très légers desserrements de grains dus à un déficit final non compensé. Ce manque de compensation

fig. 10 - Clichés radiographiques de la partie étendue (plaque d'épaisseur 13 mm) de l'éprouvette.

En haut : fonte hypoeutectique.
En bas : fonte austénitique.

sont plus présentes même dans les épaisseurs étendues les plus fortes (21 mm).

Par contre les éprouvettes coulées en fonte austénitique, non testée précédemment, présentent, elles, des porosités visibles à l'œil nu sur coupe usinée de pièce ainsi qu'une légère poquette.

Les clichés radiographiques (figure 10) visualisent, avec les fontes hypoeutectiques et austénitiques, les défauts internes constatés.

4. Considérations sur l'obtention de pièces saines sans masselotte

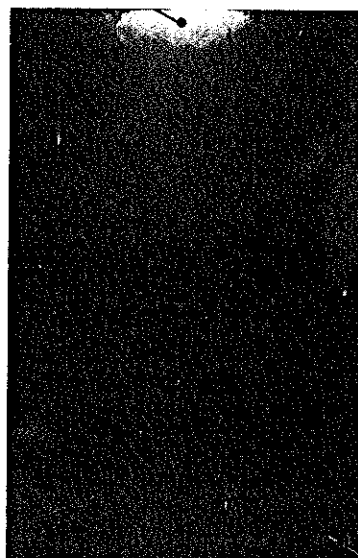
En théorie, les variations globales de volume que subissent les fontes à graphite sphéroïdal s'expriment par la relation :

$$V \% = R_L \% + R_S \% - G \%$$

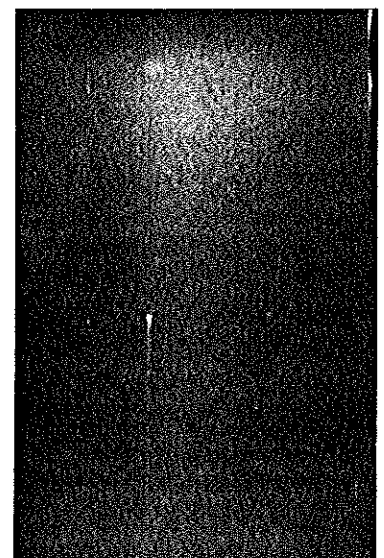
On sait, de nombreux travaux expérimentaux l'ont prouvé, que le retrait volumique à l'état liquide R_L peut être totalement compensé par des mouvements vers l'intérieur des parois d'une empreinte, qui agissent à la manière d'une presse sur le métal, lorsque le moule employé est suffisamment rigide. Au cours de la solidification, l'expansion G du graphite eutectique qui accompagne sa précipitation peut,

Macrocavité

Masselotte $\frac{M_M}{M_B} = 0,8$

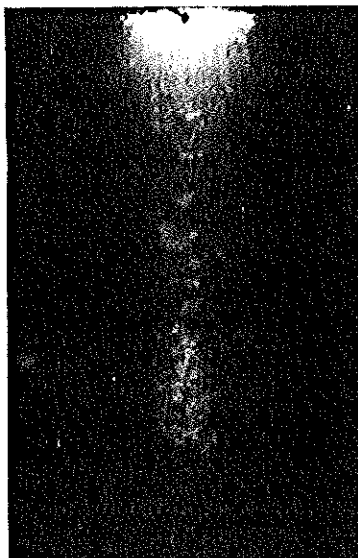


Masselotte $\frac{M_M}{M_B} = 1,25$



Macrocavité

Masselotte $\frac{M_M}{M_B} = 0,8$



Masselotte $\frac{M_M}{M_B} = 1,25$



Porosité

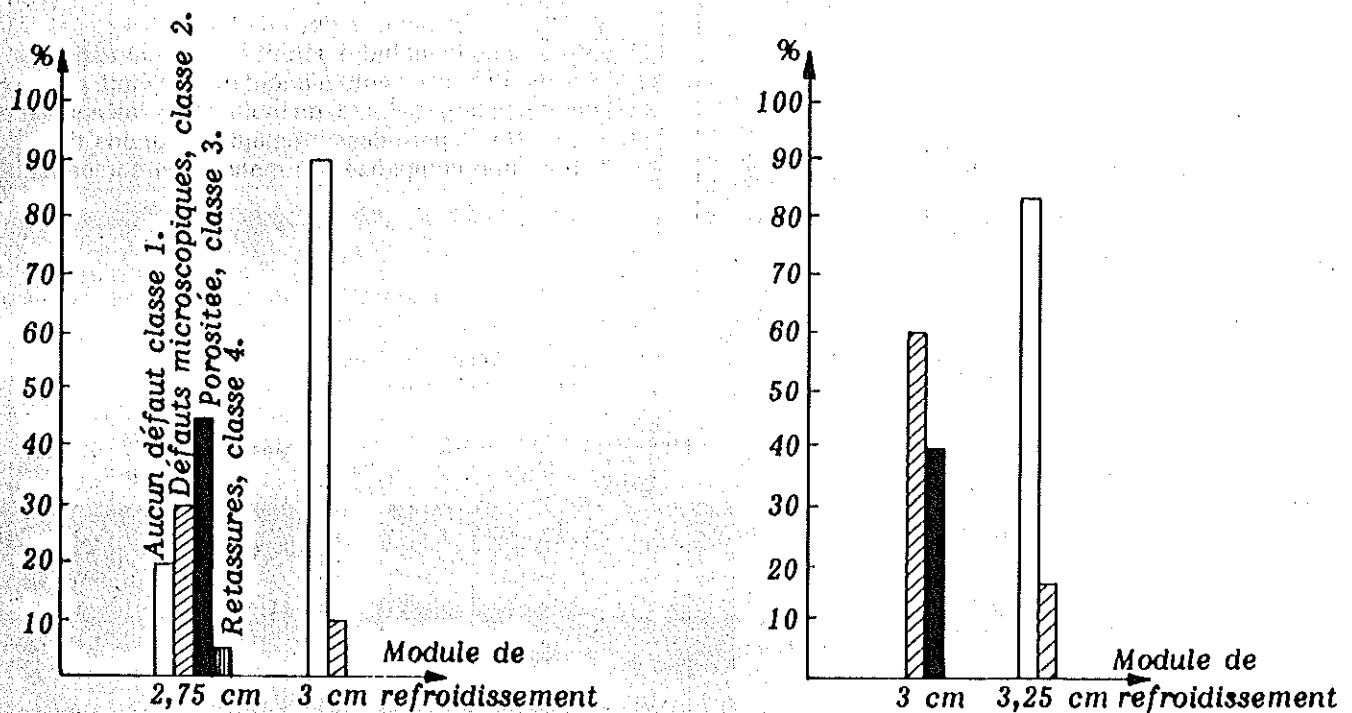


Fig. 11 - Fréquence des défauts décelés : à gauche, dans les plaques avec jonction en T ; à droite, dans les cylindres creux.

est probablement dû à un puissant mouvement d'aspiration engendré par le gonflement des sphéroïdes qui efface, dans les derniers stades de la solidification, la tendance au reflux esquissée dès le début de la réaction eutectique (8).

Sous l'égide de l'Association Japonaise des Fondateurs de Fonte de Haute Qualité, un expérimentateur japonais (9) a réalisé une série d'expériences pour trouver les conditions essentielles qui assureraient la production de pièces saines sans masselotte.

Deux types d'éprouvette ont été ainsi testés. Ils ont été coulés, dans des moules confectionnés avec un sable siliceux lié par une résine furannique ou par une résine phénolique uréthane, à partir de fonte à graphite sphéroïdal de carbone équivalent compris entre 4,1 % et 4,5 % (si l'on se réfère à la formule simplifiée : $C_{eq} = C + \frac{Si}{4}$). Leur module de refroidissement (10) s'échelonnait entre 2,5 et 3 cm pour le type en forme de plaque avec une jonction en T et 2,25 à 3,25 cm pour l'autre type en forme de cylindre creux.

Les éprouvettes furent contrôlées par ultra-sons puis par un contrôle visuel sur coupe polie de zone où un écho était détecté. Un classement des défauts décelés établi par cet expérimentateur est reproduit au tableau 9.

Les résultats obtenus sont illustrés par les diagrammes de la figure 11, qui montrent : qu'avec les plaques à jonction en T, il faut un module de refroidissement au moins égal à 3 cm

pour obtenir 90 % de pièces saines sans aucun défaut, tandis qu'avec les cylindres creux, il faut un module égal ou supérieur à 3,25 cm pour qu'au moins 80 % des pièces atteignent le même degré de qualité.

5. Conclusion

5.1. Pièces épaisses fabriquées par petites et moyennes séries

Si l'on prend comme référence le degré de défectuosité relevé sur les barres, les sphères et les plaques (*) non masselottées coulées, à partir de diverses nuances de fonte à graphite sphéroïdal, dans un moule rigide confectionné en utilisant un sable auto-durcissant convenablement serré et entouré d'un châssis robuste, il a été constaté que l'augmentation de la rigidité par emploi d'un moule **super rigide** (avec châssis renforcé) améliore la santé interne des pièces sans qu'elles atteignent toutefois la santé parfaite. Néanmoins, les défauts décelés dans la zone axiale des éprouvettes en fontes eutectique et hypereutectique notamment étaient si tenus que des pièces coulées dans les mêmes

(*) Formes que l'on peut assimiler à des parties de pièce : compactes pour les deux premières et étendues pour les autres.

Classe de qualité	Critères de sélection
1	Aucun défaut décelable à l'examen aux ultra-sons
2	Défauts microscopiques non visibles à l'œil nu sur coupe polie
3	Porosités dont chaque cavité est de longueur < 4 mm
4	Retassures dont chaque cavité est de longueur > 4 mm

Tableau 9 - Critères de sélection des défauts de retassure selon (9).

conditions donneraient, dans la plupart des cas d'utilisation, une entière satisfaction en service.

Les masselottes de module réduit (0,6 Mp) n'améliorent en aucune façon la santé interne des éprouvettes en forme de barre et de plaque. Par contre, les masselottes normales de module 1,25 Mp suppriment de façon radicale les défauts internes mais uniquement dans les barres.

En résumé, si l'on se réfère aux travaux plus récents d'un expérimentateur japonais, qui a montré que pour obtenir des pièces entièrement saines sans masselotte il fallait qu'elles aient un module de refroidissement supérieur à 3 cm, il semble bien que les modules de refroidissement des éprouvettes que l'on a testées, qui ne dépassaient pas 2,5 cm pour les épaisseurs les plus fortes, n'étaient pas assez élevés pour réaliser ces pièces sans le moindre défaut de retassure en moule super rigide.

5.2. Pièces minces fabriquées en grande série

Pour éliminer la plupart des défauts dus aux variations volumiques dans les pièces en fonte à graphite sphéroïdal d'épaisseurs couramment obtenues en moulage à vert, il est essentiel de mettre simultanément en œuvre :

- des moules en sable silico-argileux fortement serrés par haute pression ;
- des masselottes normales dont le temps de solidification est supérieur à celui de la partie de pièce alimentée ;
- un procédé d'inoculation ou de post-inoculation efficace ■

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) H. Devaux, M. Jeancolas. - *Etude expérimentale sur l'alimentation des pièces épaisses en fonte à graphite sphéroïdal*. Fonderie n° 301, mai 1971, p. 155-162 et n° 302, juin 1971, p. 201-208.
- (2) H. Devaux, M. Jeancolas. - *Etude expérimentale sur l'alimentation des pièces en fonte à graphite sphéroïdal moulées à vert*. Fonderie n° 327, octobre 1973, p. 329-338 et n° 328, novembre 1973, p. 355-362.
- (3) H. Devaux, M. Jeancolas. - *Particularités du masselottage des pièces en fonte à graphite sphéroïdal moulées en sable*. Hommes et Fonderie, décembre 1974, p. 19-29.
- (4) R.-P. Dunphy, C.-G. Ackerrind, W.-S. Pellini. - *Caractéristiques comparées de solidification et d'alimentation des fontes grises et des fontes à graphite sphéroïdal*. Foundry, June 1954. Traduction C.T.I.F. n° 2616.
- (5) H. Devaux, G. Guiny, M. Jeancolas. - *Expériences en vue de l'alimentation des pièces moulées en fonte à graphite sphéroïdal*. Première partie. Variations de volume au cours de la solidification et comportement des masselottes. Fonderie n° 331, février 1974, p. 59-69.
- (6) M. Hecht, J.-C. Margerie. - *Expériences en vue de l'alimentation des pièces moulées en fonte à graphite sphéroïdal*. Seconde partie. Formation des structures et des retassures. Fonderie n° 332, mars 1974, p. 107-120.
- (7) S.-I. Karsay. - *Ductile Iron production*. Part. I, 1976, Québec Iron and Titanium Corporation.
- (8) J.-M. Théret, G. Lesoult. - *Déroulement de la solidification des fontes à graphite sphéroïdal (conséquences prévisibles pour l'alimentation des pièces de fonderie)*. Hommes et Fonderie n° 142, février 1984, p. 19-30.
- (9) T. Nakano. - *Production of ductile iron castings without riser*. Transactions of the Japan Foundrymen's Society. Avril 1986. p. 6-10.
- (10) H. Devaux. - *Traité pratique de masselottage des pièces moulées en sable*. E.T.I.F., 44, avenue de la Division-Leclerc, 92310 Sèvres.

Formation en alternance

Adaptation au rôle de contrôleur en essais non destructifs appliqués aux pièces moulées

Ce stage du CTIF destiné aux techniciens supérieurs de la Profession, intéresse également les techniciens de contrôle des entreprises clientes.

Il présente l'ensemble des principes et procédés de contrôle non destructif applicables aux pièces moulées, avec travaux pratiques à l'appui.

- 160 heures de formation en 4 stages d'une semaine dans les laboratoires de Sèvres (92)
- 40 heures d'applications dans les services de fabrication de l'entreprise.

Aperçu du programme

1. But du contrôle non destructif. - 2. Principe des différentes méthodes : radiographie, ultrasons, magnétoscopie, ressuage, courants de Foucault. Rappels sur les lois physiques. - 3. Métallurgie des alliages ferreux et non ferreux. Les différents défauts des pièces de fonderie ; détection et identification. Cas des soudures de réparation. - 4. Mise en œuvre des différentes méthodes de contrôle dans le cas des pièces moulées. - 5. Exemples et applications sous forme de travaux pratiques. - 6. Normes et recommandations techniques. Niveaux de sévérité. Etablissement de spécifications relatives au contrôle non destructif des pièces moulées. - 7. Sécurité.

Dates à convenir avec l'animateur responsable : M. Boutault. Formation aux :

FOPERFIC

L'Association Foperfic est agréée à percevoir et mutualiser les fonds des entreprises de la fonderie et industries connexes pour la formation en alternance.

Pour l'établissement des contrats de formation en alternance, Foperfic aide les entreprises à remplir les dossiers correspondants.