

Propreté inclusionnaire et qualité des aciers moulés

Jean-Marcel Masson, CTIF

La structure métallographique des aciers moulés est essentiellement constituée, par les phases principales telles que l'austénite, la ferrite, la bainite, la martensite ou les carbures, ainsi que par la présence de petites particules qui sont désignées par le terme générique d'inclusions non métalliques.

LES INCLUSIONS NON MÉTALLIQUES

Schématiquement les inclusions non métalliques sont des composés définis qui se forment dans l'acier à l'état liquide ou en cours de solidification. Malgré leur petite taille qui se situe entre quelques micromètres et une centaine de micromètres, elles exercent un rôle très important sur les propriétés d'emploi des pièces en acier moulé.

La présence de certaines inclusions particulières peut être recherchée pour améliorer, par exemple, les caractéristiques à chaud ou l'usinabilité dans des applications spécifiques. Par contre, dans la plupart des cas, les inclusions non métalliques ont une influence néfaste sur les caractéristiques physico-chimiques des aciers. C'est pourquoi, les métallurgistes cherchent, le plus souvent à limiter leur présence et à obtenir le métal le plus propre possible ou au minimum à contrôler la composition chimique et la morphologie de ces particules pour en limiter la nocivité.

L'objectif de cet article consiste notamment à :

- décrire les différentes familles d'inclusions qui sont observées dans les pièces en acier moulé et à rappeler leur incidence sur les propriétés d'usage,
- présenter la genèse des principaux types d'inclusions qui se forment au cours des opérations d'élaboration du métal liquide et sa solidification comme les sulfures, les oxydes, les nitrides,
- faire le point sur les différentes méthodes d'investigation plus ou moins sophistiquées qui sont utilisées en fonderie pour identifier formellement la nature, la forme et la répartition des inclusions endogènes,
- analyser les processus métallurgiques élémentaires qui permettent d'obtenir le niveau de propreté inclusionnaire requis et d'optimiser les gammes opératoires en termes de coût et d'efficacité.

DÉFINITION DES DIFFÉRENTES FAMILLES D'INCLUSIONS

Habituellement, les métallurgistes définissent les inclusions endogènes comme des particules qui apparaissent dans le métal à l'état liquide ou à l'état pâteux au cours de sa solidification et qui présentent une composition chimique bien définie. Elles se forment notamment à partir des éléments qui se trouvent en solution dans le fer pendant les opérations métallurgiques de désoxydation et de mise à la nuance ainsi qu'au cours du refroidissement du métal après la coulée dans le moule.

Dans les aciers moulés, la population inclusionnaire est constituée essentiellement :

- d'oxydes,
- de sulfures,
- éventuellement de nitrides pour les nuances qui contiennent de l'azote ainsi que du titane, du zirconium, de l'aluminium ou du vanadium,
- d'inclusions mixtes composées par exemple de plusieurs oxydes pouvant être associés à des sulfures.

Il existe aussi des inclusions qui se forment par réoxydation des éléments facilement oxydables contenus dans le bain et qui réagissent avec les oxydes présents dans les laitiers et les réfractaires ou encore avec l'oxygène de l'air notamment au cours des opérations de coulée. Enfin, dans la pièce moulée, il est possible de retrouver des inclusions exogènes qui sont issues de l'entraînement dans le bain liquide de particules de réfractaires ou de laitier qui sont arrachées aux parois des fours, des poches des systèmes de coulée ou encore des moules.

Ces inclusions exogènes peuvent ensuite réagir avec les éléments dissous dans l'acier ou avec d'autres inclusions pour former de nouvelles particules qui présentent des compositions chimiques souvent complexes.

Le tableau I rappelle l'influence des principaux types d'inclusions sur les propriétés d'emploi des aciers.

Les moins nocives	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusions arrondies dispersées à l'intérieur des grains de solidification → Affectent relativement peu la ductilité et la ténacité 	Oxydes C1 à C10 Sulfures type I (Mn, Ce, Ca)
Les plus nocives	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusions réparties de façon hétérogène interdentritique ou intergranulaire → Leur répartition favorise la propagation d'une fissure ductile • Inclusions angulaires → L'augmentation de concentration de contraintes à l'interface matrice-inclusion (effet d'angle) Facilite l'amorçage d'une fissure fragile 	Oxydes B (Al ₂ O ₃) Sulfures type II (Mn, Ti) NAI (C, N) Ti, NZr

Tableau I : Nocivité des inclusions selon leur nature et leur morphologie issues des conditions d'élaboration et de désoxydation

LES INCLUSIONS ENDOGÈNES

Les sulfures

Compte tenu de la nocivité des sulfures, la maîtrise de la teneur en soufre dans les aciers a été un souci constant pour les métallurgistes qui ont mis au point des méthodes efficaces pour l'abaisser à un niveau acceptable. Avec les procédés modernes

d'élaboration et de métallurgie secondaire, la teneur en soufre peut atteindre quelques dizaines de ppm.

La précipitation des sulfures se produit en fin de solidification à partir du liquide interdendritique ou intergranulaire qui s'est enrichi en soufre par le phénomène de ségrégation positive.

Elle obéit aux lois de la thermodynamique qui découlent des valeurs d'enthalpies libres de formation des sulfures telles que représentées sur la figure 1.

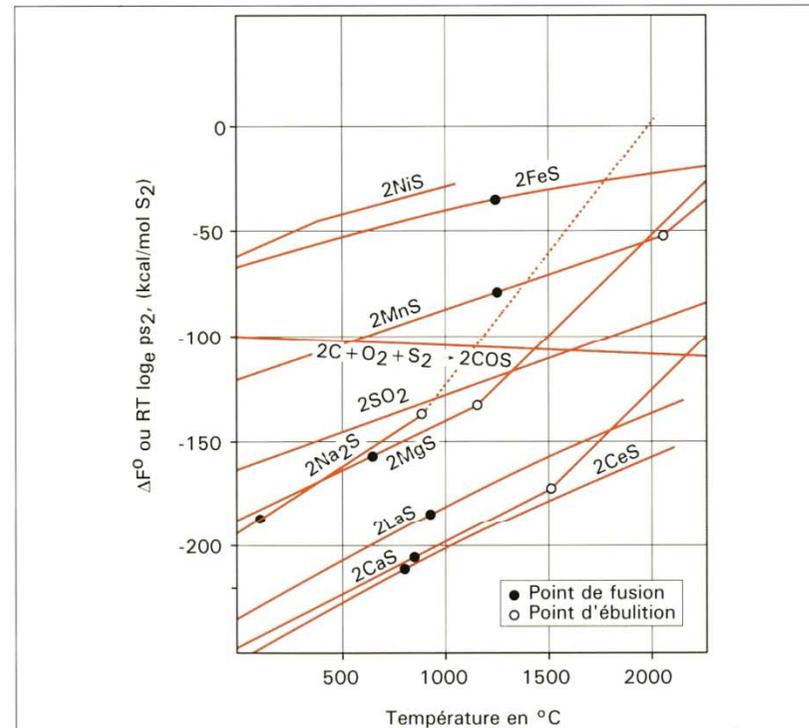


Fig. 1 : Enthalpie de formation des sulfures

En fait dans les aciers industriels calmés, on rencontre essentiellement le sulfure de manganèse MnS et beaucoup plus rarement et selon les modalités d'élaboration le sulfure de fer ou encore, les sulfures de titane, de cérium, de zirconium, de chrome ou de calcium.

Les sulfures de manganèse sont donc les plus courants et ils sont rarement à l'état pur car ils contiennent souvent d'autres éléments métalliques en substitution au manganèse. Traditionnellement, les sulfures sont classés en trois grandes familles appelées type I, type II, type III, qui se distinguent par leur morphologie qui dépend du taux de soufre et de l'activité en oxygène dissous dans le bain, ainsi que de la nature et des quantités de désoxydants mises en œuvre.

Schématiquement, selon le degré de désoxydation de l'acier, les trois principaux types de sulfures de manganèse sont susceptibles de se former :

Type I (voir figure 2)

Ce sont des sulfures globulaires repartis de manière assez dispersée dans la matrice, disposés le plus souvent dans les espaces interdendritiques.

Ils sont parfois associés à des inclusions de type C (silicates) qui peuvent servir de germinants.

Ces sulfures sont souvent observés à la surface des zones de rupture pour des matériaux sollicités en traction.



Fig. 2 : Type I - Microinclusions de sulfures dans les aciers

Type II (voir figure 3)

Ce sont des sulfures à morphologie dendritique qui se présentent sous la forme de chapelets ou de films interdendritiques disposés en réseau, ils sont à éviter car ils fragilisent le matériau, en particulier, à basse température.

La morphologie de ces sulfures résulte, en général, d'une transformation monotectique qui se produit en fin de solidification.

Certains auteurs ont subdivisé le type II en deux sous groupes :

- type II a : précipitation intergranulaire des sulfures de façon très discontinue.
- type II b : précipitation très dense de sulfures intergranulaires. Ils sont parfois associés à des inclusions de type B (alumine).



Fig. 3 : Type II - Microinclusions de sulfures dans les aciers

Type III (voir figure 4)

Ce sont des sulfures à morphologie polyédrique ou angulaire et qui présentent souvent une structure cristallisée, car il précipite sous forme solide dans le bain liquide en cours de solidification. Ce type de sulfures apparaît notamment dans les aciers qui sont correctement désoxydés et qui présentent une basse activité en oxygène dissous. Le cas échéant, ils peuvent être associés à des sulfures comportant des éléments désoxydants forts comme le calcium, le zirconium ou le cérium.

Une fois formés, ces sulfures polyédriques sont repoussés par le liquide en cours de solidification et ils sont ainsi localisés aux points triples des joints de grains.

Au-delà des calculs thermodynamiques souvent complexes, il existe quelques formules empiriques qui permettent d'estimer rapidement la nature et le type de sulfures qui sont susceptibles de se former dans l'acier, en fonction de la composition chimique du métal. (voir tableau II)

Du point de vue pratique, le métallurgiste doit rechercher les sulfures les moins nocifs, c'est-à-dire les sulfures de manganèse de type III. Pour cela, il doit ajuster la composition chimique de l'acier en éléments principaux et optimiser l'activité en oxygène dissous en ajustant la teneur en aluminium au bon niveau en s'appuyant par exemple sur le diagramme de désoxydation proposé par CTIF qui intègre notamment les teneurs en S, Al N ainsi que le module de refroidissement de la pièce. Ce diagramme permet de déterminer la quantité d'aluminium nécessaire pour obtenir des sulfures de type III tout en évitant la précipitation fragilisante des nitrures d'aluminium.



Fig. 4 : Type III - Microinclusions de sulfures dans les aciers

Aciers au carbone ou faiblement alliés		Aciers inoxydables
MnS	$\frac{Mn}{S} \geq 70$	$\frac{Cr}{Mn} \leq 6$ (Mn, Cr)S
FeS	$\frac{Mn}{S} < 28$	
(Fe, Mn)S des types I, II et III		
CrS		$\frac{Cr}{Mn} \geq 900$
Ti ₂ S	$\frac{Ti}{Mn} \geq 0,23$ de type II	
ZrS		$\frac{Zr}{Mn} \geq 0,25$ de type II
CeS	$\frac{Ce}{Mn} \geq 0,1$	
	$\frac{Si}{Mn} = 1$ à 3 de type I	
	$\frac{Si}{Mn} > 3$ de type II	
	$\frac{Si}{Mn} < 1$ MnS des types I, II et III	
Al ₂ S ₃	$\frac{Al}{Mn} \geq 0,33$	

Tableau II : Formation des sulfures selon la composition chimique

Les oxydes

En fin d'élaboration des aciers au carbone, il est possible d'estimer rapidement la teneur en oxygène dissous en fonction de la teneur en carbone, en confondant l'activité du carbone et de l'oxygène avec leur pourcentage et en faisant l'hypothèse que l'interaction avec les autres éléments désoxydants est négligeable. Dans ces conditions, l'équilibre $C + O \rightleftharpoons CO$ est défini par le produit

$$[C] \times [O] = 0,004 \text{ (en pourcentage massique, à } 1600 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Dans les conditions d'élaboration d'aciers courants la teneur en oxygène dissous peut ainsi évoluer entre 0,02 et 0,10 % environ.

Pour plus d'information, la figure 5 indique la solubilité de l'oxygène dans le fer pur, selon la température et sous une pression de un bar.

Pour éviter l'apparition de porosités gazeuses, par formation de bulles de CO au cours de la solidification, il est nécessaire de

précipiter l'oxygène sous forme d'oxydes solides de manière à ramener la teneur en oxygène dissous en dessous de 10 ppm. L'enthalpie libre de formation de ces oxydes doit être inférieure à celle des oxydes de fer et de carbone. En se reportant à la figure 6, on retrouve les principaux éléments qui peuvent être ajoutés pendant l'opération de calmage.

Habituellement, les oxydes présents dans les aciers moulés sont classés en deux grandes familles désignées par leur type, type B ou type C, qui se distinguent par leur enthalpie libre de formation. Exceptionnellement, des oxydes de type D peuvent aussi précipiter.

Oxydes de type B

Les oxydes de type B présentent une enthalpie libre de formation comprise entre - 220 Kcal et - 170 Kcal environ à 1500 °C. Il s'agit principalement d'inclusions de petite taille de type alumine, aluminate ou zirconne.

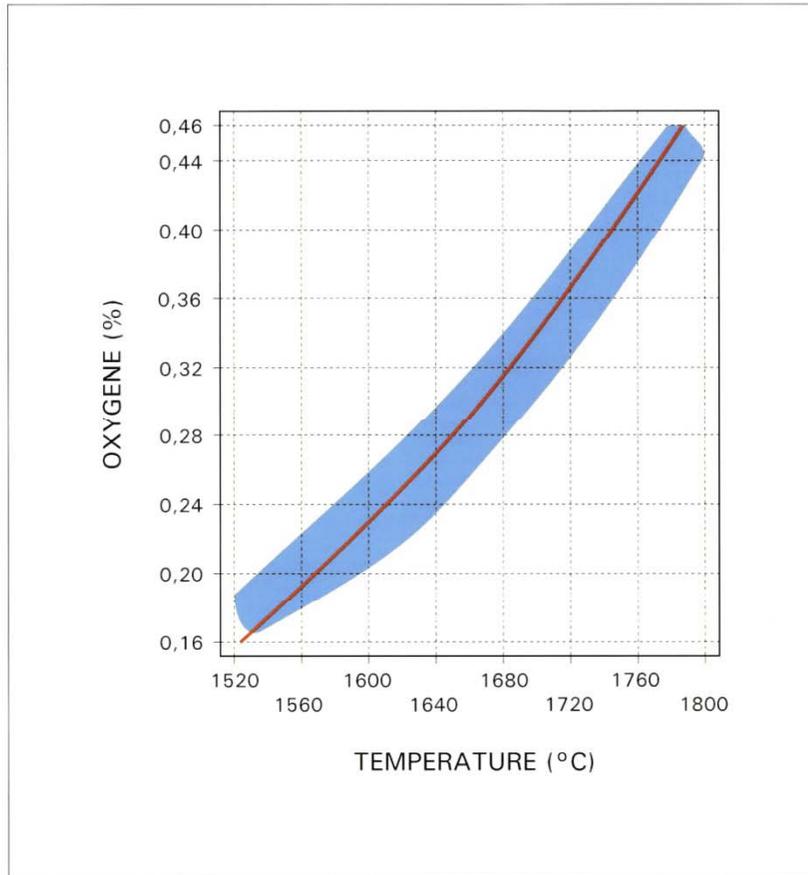


Fig. 5 : Solubilité de l'oxygène dans le fer pur

Dans les aciers calmés à l'aluminium, les alumines précipitent à l'état solide dans le métal liquide et elles présentent en général une forme polyédrique. Sur les clichés micrographiques, elles apparaissent sous forme d'amas (grappes) qui résultent de la coupe du réseau dendritique (cluster) dont elles sont issues (voir schéma figure 7).

Les planches micrographiques (figures 8) montrent l'aspect des différents types d'alumine.

Selon la teneur en silicium et en manganèse contenus dans l'acier, l'alumine peut évoluer vers la mullite voire vers les silico-aluminates. En présence, d'autres éléments fortement réducteurs, il se forme des aluminates de Ca, Ti, Ce, Mg.

Oxydes de type C

Ce sont des inclusions qui se forment à partir d'éléments dont l'enthalpie libre de formation à 1500 °C se situe approximativement entre -150 et -110 Kcal.

Les principaux oxydes de type C sont formés avec le silicium, le manganèse, le titane et le chrome.

Dans le cas des aciers désoxygénés au silicium, l'oxyde type est la silice. Il se présente sous la forme globulaire car il précipite à l'état liquide dans le métal en cours de refroidissement. (figure 9)

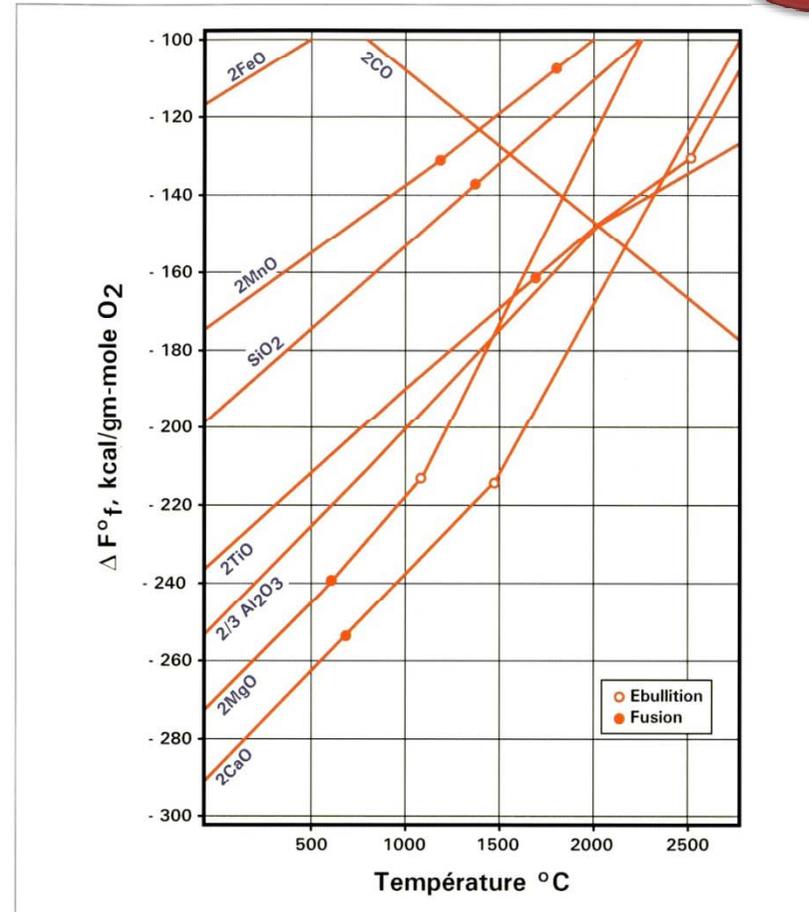


Fig. 6 : Enthalpie libre de formation des oxydes

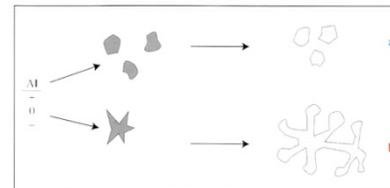


Fig. 7 : Evolution schématique de la formation des alumines isolées (a) et en grappes (b)



Fig. 8 : Microprecipitates d'oxydes du type B : alumine en grappes (x100)

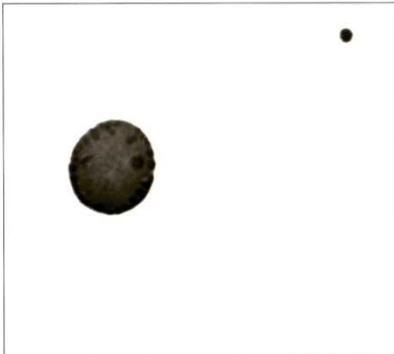


Fig. 9 : Microinclusions d'oxydes du type C : silicates globulaires (x430)

Les nitrures

Lorsque la teneur en azote dissous à l'état liquide dépasse la limite de solubilité à l'état solide, une partie de l'azote dissous est rejetée au cours de la solidification sous forme de bulles qui sont susceptibles de créer de porosités gazeuses dans la pièce moulée.

A titre d'information, la courbe de solubilité de l'azote dans le fer sous une pression de un bar est reportée sur la figure 10. Cette courbe est caractérisée par des discontinuités qui se produisent au changement de phases (α , γ , δ).

Dans le cas des aciers courants, (carbone, faiblement allié), il convient de limiter la teneur en azote dissous à une teneur de 100 ppm environ. Pour des teneurs supérieures, il faut piéger l'azote sous forme de nitrures solides, stables.

En se reportant au diagramme d'enthalpie libre de formation des nitrures (figure 11), les nitrures les plus stables se forment avec le titane et le zirconium voire l'aluminium.

Oxydes de type D

L'enthalpie de formation de ce type d'oxyde se situe entre - 80 Kcal et 0 Kcal environ. Ce type d'inclusion concerne essentiellement les oxydes de fer. Comme cela a été indiqué précédemment, on rencontre rarement des oxydes de fer dans les aciers.

Les nitrures de zirconium et de titane précipitent à l'état solide dans le fer liquide et apparaissent sur les coupes micrographiques sous la forme de petites inclusions polyédriques de couleur caractéristique jaune orangé (voir figure 12).

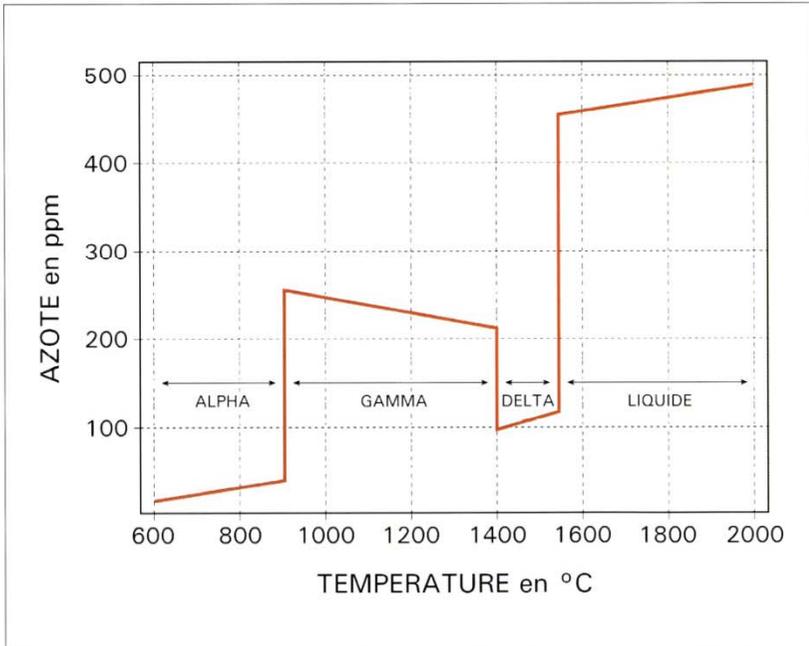


Fig. 10 : Solubilité de l'azote dans le fer pur

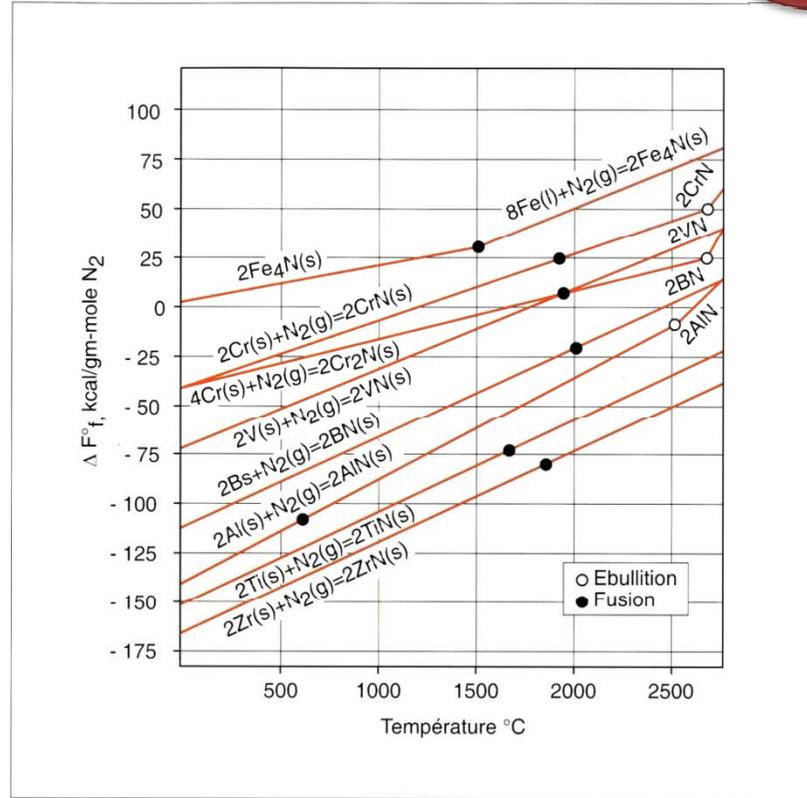


Fig. 11 : Enthalpie libre de formation de nitrures

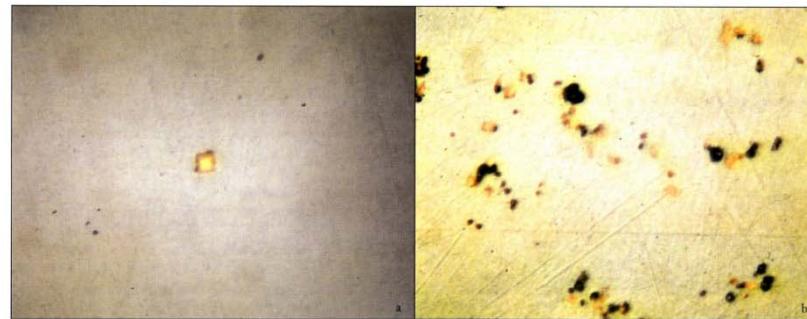


Fig. 12 : Inclusions de nitrure de zirconium (12a) et de titane (12b)

Les nitrides de zirconium et de titane se forment lorsque le produit des activités (aM X aN) dépasse le produit de solubilité du nitride. Compte tenu de l'affinité de ces éléments pour l'oxygène, leur introduction doit se faire sur un métal parfaitement désoxydé. L'aluminium peut être utilisé pour cette opération de désoxydation car il présente une affinité chimique plus grande pour l'oxygène que pour l'azote. Il faut toutefois préciser qu'en l'absence de titane ou de zirconium, et lorsqu'il se trouve en excès, par rapport à la quantité nécessaire à la désoxydation, l'aluminium se combine facilement à l'azote pour former des nitrides qui précipitent à l'état solide dans les joints de grains austénitiques au cours des refroidissements très lents dans les moules ainsi qu'au cours des traitements thermiques ultérieurs.

Dans le deuxième cas, lorsque la précipitation est fine et bien répartie les nitrides d'aluminium sont souvent invisibles à l'examen microscopique optique, mais ils sont très efficaces pour limiter le phénomène de grossissement de grain austénitique au cours des traitements thermiques d'austénitisation jusqu'à 1150 °C ce qui améliore le niveau des caractéristiques mécaniques des pièces moulées. Au-delà de 1150 °C, les nitrides d'aluminium sont remis en solution et leur action cesse.

Par contre, dans le cas des grosses pièces lorsque la teneur en aluminium est excessive, le nitride précipite au cours du refroidissement

dans le moule sous la forme de films intergranulaires très fragiles qui conduisent à des ruptures à grains grossiers appelées Rock Candy à cause de leur morphologie.

La figure 13 définit les principaux types d'inclusions rencontrées dans les aciers en fonction des éléments d'alliages dissous et elle indique aussi leur désignation courante.

PRINCIPALES MÉTHODES D'INVESTIGATION ET DE COMPTAGE

Le métallurgiste dispose de différentes méthodes qui permettent d'identifier et de dénombrer les inclusions non métalliques endogènes qui sont présentes sur un échantillon. Il faut cependant signaler que le profil inclusionnaire dépend très souvent de la position de l'échantillon qui a été prélevé sur la pièce moulée.

Ces différentes méthodes d'investigation sont parfois complémentaires par affiner l'identification des inclusions.

	Métal de base	Types d'inclusions rencontrées	Désignations
Oxydes	Fe	Oxyde de fer : oxyde de fer, oxyde de fer et de manganèse	D
	Si	Oxyde de silicium : silice, silicate globulaire homogène et hétérogène	C1 à C9
	Ti	Oxyde de Titane : oxyde de titane et d'aluminium	C10 à C19
	Mn	Oxyde de manganèse	C20 à C29
	Cr	Oxyde de chrome	C30 à C39
	Al	Oxyde d'aluminium : aluminates de transition, alumine alpha en grains, en grappe ou en réseau, aluminates de calcium, aluminates de calcium complexes, aluminates de titane	B1 à B19
Sulfures	Zr	Oxyde de zirconium	B20 à B29
	Mn	Sulfure de manganèse	A
	Fe Ce	Sulfure de fer et de cérium	
	Ti Ca	Sulfure de titane et de calcium	
Zr Cr	Sulfure de zirconium et de chrome		
Nitrides	Al	Sulfure d'aluminium	E
	Ti	Nitride et carbonitride de titane	
	Zr	Nitride et carbonitride de zirconium	

Fig. 13 : Classification des inclusions dans les aciers.

Essais macrographiques

L'essai le plus connu est l'empreinte Baumann qui permet notamment d'établir la cartographie des sulfures de manganèse par une attaque sélective pratiquée sur une coupe sommairement polie. Cette coupe peut contenir une section complète de la pièce et permet de visualiser les éventuelles ségrégations chimiques et structurales entre la peau et le cœur du produit.

Microscopie optique

Ces examens pratiqués par microscopie optique par réflexion sont très couramment réalisés dans les laboratoires de métallurgie pour identifier et déterminer la population inclusionnaire des échantillons.

Comme tout examen, la micrographie pose le problème de la représentativité des prélèvements ainsi que leur fréquence.

Dans le cas des pièces en acier moulé, il n'existe pas de norme spécifique pour fixer la position des échantillons à analyser. Il est donc nécessaire que celle-ci soit définie d'un commun accord entre le fondeur et son client au moment de la commande, en fonction de la géométrie de la pièce et des exigences métallurgiques.

Après découpe soignée, les échantillons sont souvent enrobés dans une résine polymérisable qui assure une bonne conservation et facilite les opérations de polissage ultérieures.

Compte tenu de leurs petites tailles les inclusions ne peuvent être observées qu'après un polissage très fin de la surface à examiner. L'objectif du polissage est d'obtenir une surface parfaitement plane présentant une rugosité inférieure à 0,1 micromètre et d'éviter tout arrachement. Il est réalisé en général, mécaniquement à l'aide d'abrasifs.

Pour observer les inclusions, les échantillons ne subissent pas d'autre préparation que le polissage (observation sans attaque) et ils sont posés directement sur la platine du microscope.

En lumière réfléchie, ce qui est le cas le plus fréquent, le micrographe doit identifier les inclusions uniquement à partir de leur morphologie et de leur répartition ainsi que de leur aspect optique avec une coloration qui va du gris noir au gris clair pour les inclusions d'oxydes jusqu'au jaune orangé pour les inclusions de nitrides de titane ou de zirconium. Cette tâche est très délicate et elle requiert une forte expérience et une grande dextérité pour préparer la surface sans arracher les inclusions et procéder ensuite à l'examen d'identification proprement dit.

Micro-analyse

Dans les cas les plus difficiles (inclusions complexes par exemple) où l'identification des inclusions par microscopie optique n'est pas possible, il faut avoir recours à des méthodes plus performantes comme la micro-analyse.

Selon la taille des inclusions, l'analyse peut être réalisée in situ ou pour les plus petites d'entre elles après leur extraction de la matrice.

La micro-analyse peut être qualitative ou quantitative. Elle repose en général sur la spectrométrie de RX. Une méthode efficace et assez courante dans les laboratoires de métallurgie consiste à réaliser les observations à partir d'un microscope électronique à balayage équipé d'un système EDS (Energy Dispersive Spectrometry) ou

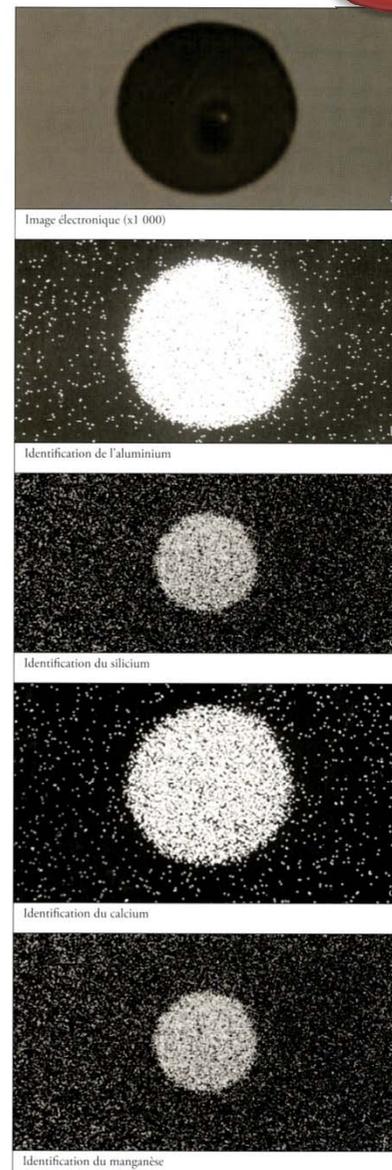


Fig. 14 : Inclusion mixte d'oxydes (Si, Al, Mn, Ca, Fe)

WDS (Wavelength Dispersion Spectrometry) qui permet d'avoir une image électronique de la surface à analyser et de préciser la composition chimique de l'inclusion.

L'exemple donné sur la figure 14 montre les différents éléments chimiques qui constituent l'inclusion.

Autres méthodes

Il existe d'autres méthodes qui peuvent être mises en œuvre pour observer et / ou identifier les inclusions non métalliques contenues dans les aciers moulés.

- Parmi celles-ci, on peut citer :
- Examen radiographique.
 - Extraction chimique ou électrolytique.
 - Ultrasons haute fréquence.
 - Refusion par bombardement électronique (RBE).

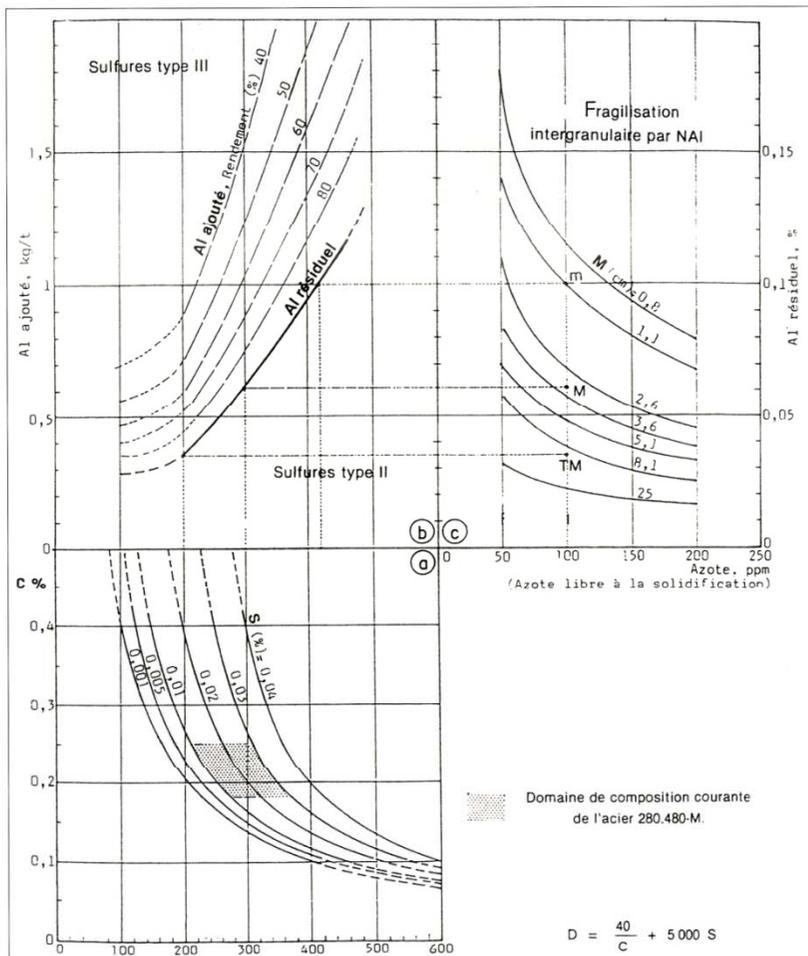


Fig. 15 : Diagramme de désoxydation à l'aluminium des aciers moulés non ou faiblement alliés, en fonction des teneurs en C, S, N et du module de refroidissement des pièces M.

OPTIMISATION DU PROCESS D'ÉLABORATION

Les équipes de CTIF ont acquis une grande expérience dans le domaine de la maîtrise et l'identification des inclusions non métalliques qui apparaissent dans les pièces en acier moulé. Il s'agit notamment :

Investigation métallurgique

CTIF dispose de laboratoires d'investigation métallurgique équipés de moyens d'essais performants mis à la disposition de personnel hautement qualifié.

Les laboratoires disposent notamment des équipements ci-dessous :

- cinq microscopes optiques,
- un analyseur d'images,
- un microscope électronique JEOL JSM avec micro-analyseur EDS,
- deux équipements radio.

Dans ce domaine, CTIF a également produit un certain nombre de documents de référence qui facilitent de l'identification et le comptage des inclusions. Ils sont indiqués dans la bibliographie jointe.

Maîtrise de l'élaboration

CTIF a mis au point et développé des procédés métallurgiques spécifiques destinés à maîtriser le niveau de propreté inclusionnaire des aciers moulés.

- Plusieurs axes ont été explorés :
- Désulfuration
 - Laitier brassé au four à induction
 - Injection de poudres riches en calcium
 - Désoxydation
 - Diagramme de désoxydation par l'aluminium (figure 15)
 - Désoxydation par les terres rares, par le silico calcium
 - Dénitruration
 - Brassage métallurgique
 - Précipitation sélective de l'azote par le titane et le zirconium
 - Déléhydrogénation
 - Brassage métallurgique sous laitier
 - Décantation et piégeage des inclusions
 - Brassage pneumatique dans le four à induction sous laitier
 - Mesure des teneurs en gaz dissous dans l'acier à l'état liquide
 - Azote, hydrogène, oxygène à l'aide d'analyseurs spécifiques.

Dans ce domaine, CTIF a également produit un certain nombre de documents de référence qui sont indiqués dans la bibliographie.

CONCLUSION

Dans les aciers moulés, la présence d'inclusions endogènes non métalliques est inévitable et lorsqu'elle devient excessive, les pièces coulées subissent une altération, parfois rédhibitoire, de leurs propriétés d'emploi. Ce phénomène concerne plus particulièrement les caractéristiques de ténacité à basse température, la résistance aux sollicitations mécaniques cycliques ainsi que les performances de tenue à la corrosion.

La maîtrise de la propreté micrographique est ainsi devenue, au cours du temps, le souci permanent du fondeur d'acier. Pour obtenir de tels résultats, il doit :

- s'assurer que les teneurs en éléments résiduels et en gaz nocifs se situent à un niveau acceptable par rapport aux exigences contractuelles,
- procéder, chaque fois que nécessaire, à des examens micrographiques approfondis pour déterminer la microstructure de l'acier et pour identifier la nature et la répartition des inclusions,
- optimiser le processus d'élaboration et de désoxydation de manière à limiter la formation d'inclusions endogènes nocives et faciliter leur décantation,
- adopter des conditions de coulée qui permettront d'éviter la formation d'inclusions secondaires par réoxydation de l'acier par l'oxygène de l'air.

RÉFÉRENCES

- ASTM E 45 standard test method for determining the inclusion content of steel.
- D. Thivillier, Usinabilité des aciers de construction, choix du mode de désoxydation et du traitement thermique - CIT 1978/1.
- H. Gaye, Clean steel, Balaton fured 3, CIT, avril 1992.
- S. Dorlencourt, F. Condet, Atlas micrographique des inclusions dans les aciers calmés, ETIF, mars 2005.
- Méthode micrographique de détermination de la teneur des inclusions non métalliques des aciers moulés. Recommandation technique BNF 500, ETIF.
- Diagramme de désoxydation par l'aluminium, notice CTIF, Ac 500.
- J.M. Masson, Fours à induction et métallurgie des aciers moulés, Fonderie Fondateur d'Aujourd'hui n° 246, 2005.
- M. Fleuriot, Mesures directes de l'hydrogène et de l'azote dans le métal liquide en fonderie d'aciers, Fonderie Fondateur d'Aujourd'hui n° 178, 1998.
- J.M. Masson, Acciai per getti legati al azoto, industria fusaria n° 2, 2000.
- J.M. Masson, L'élaboration et le traitement thermique des aciers moulés, Cyclatef Actifor, avril 2009.