

Utilisation de fonte GS à matrice ferritique renforcée pour la fabrication de pièces de fortes épaisseurs

Fabrice Wavelet ⁽¹⁾ & Jean-Baptiste Prunier ⁽²⁾
Ferry Capitain, France

⁽¹⁾ Responsable Suivi d'Affaires ; ⁽²⁾ Directeur Technique

1. Introduction

Découverte en 1943 par Keith Millis, la fonte GS n'a jamais cessé de se développer depuis, notamment avec l'invention des fontes GS à matrice ferritique renforcée en Suède dans les années 1990. L'objectif initial était alors de réduire les variations de propriétés mécaniques et donc d'usinabilité dans l'épaisseur des pièces, tout en réduisant les coûts de fabrication.

Depuis, ces nuances ont trouvé leur place dans l'industrie automobile et dans d'autres industries sur des pièces de plus grandes échelles, comme celles fabriquées par Ferry Capitain.

Ces nuances présentent de nombreux avantages (structurelles et mécaniques) et ce jusqu'à des épaisseurs très élevées (plus de 300 mm). Cet article a pour but de présenter les avantages et les utilisations possibles de ces fontes à graphite sphéroïdal à matrice ferritique renforcée (communément appelées fonte GS à haut silicium ou HSi) à travers un large spectre d'utilisation et de propriétés.

On retiendra que ces nuances, de par leur qualités statiques et dynamiques, peuvent dans certains cas constituer une alternative efficace techniquement et économiquement à l'acier, sans modification du design de la pièce.

2. Caractéristiques

La fonte GS HSi se caractérise par un taux de silicium plus élevé qu'une fonte GS classique.

Généralement de l'ordre de 2% dans une fonte GS classique, le taux de silicium montre des valeurs au-delà de 2.8% dans ces nuances HSi.

Un des premiers effets de cette addition de silicium est visible sur la micro-structure. La figure 1 montre la différence entre une fonte GS à haut silicium et une fonte GS classique type ferrito-perlitique. On y voit clairement la différence de structure : 100% ferritique pour la fonte GS HSi type EN-GJS 500-14 et 80% perlitique – 20% ferritique pour la fonte GS classique type EN-GJS 500-7.

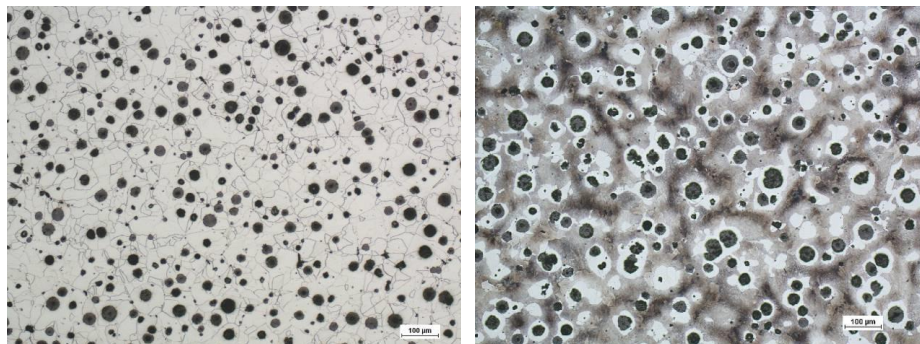


Figure 1 : (gauche) FGS à matrice ferritique renforcée ; (droite) FGS classique ferrito-perlitique

L'adjonction de silicium a aussi plusieurs effets bénéfiques sur les propriétés de la pièce, dont l'augmentation sensible de la limite élastique, de la limite de fatigue, de la ténacité / résistance à la fissuration et de la dureté (voir figure 2 et tableau 1).

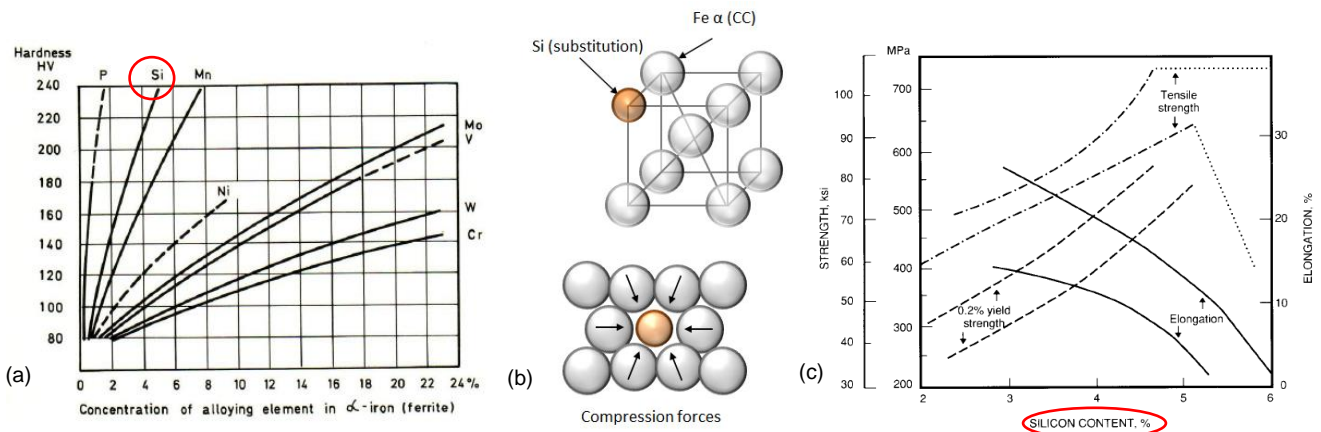


Figure 2 : influence du silicium sur (a) duretés, (b) structure et (c) propriétés mécaniques

Comme le montre la figure 2, le silicium augmente sensiblement la dureté par un phénomène de durcissement structural (déformation de maille par substitution aux atomes de fer), ce qui augmente également nettement les propriétés mécaniques, en réduisant le mouvement des dislocations à l'échelle atomique.

Il conviendra par contre d'éviter des taux de silicium au-delà de 4% où une baisse des propriétés mécaniques est constatée en pratique.

Le tableau 1 présente une comparaison de certaines propriétés statiques et dynamiques entre des nuances de fontes à graphite sphéroïdal standards (telles que décrites dans la norme EN 1563), leurs versions avec un taux de silicium plus élevée (également décrite dans l'EN 1563) et des nuances aciers équivalentes en termes d'usage (selon EN 10293).

Nuance	% Si	Rp0.2	Rm	A%	Fatigue ($5 \cdot 10^6$ cycles)	Seuil de fissuration, ΔK_{th}	Dureté
EN-GJS 400-18 (standard)	> 2%	240 MPa	370 MPa	12	190 MPa	Non mesuré	130-175 HB
EN-GJS 450-18 (haut silicium)	> 3%	340 MPa	430 MPa	16	200 MPa	Non mesuré	160-190 HB
Acier d'usage général GE 240	$\leq 0.6\%$	240 MPa	450 MPa	22	180 MPa	5 MPa. \sqrt{m}	125-155 HB
EN-GJS 500-7 (standard)	> 2%	290 MPa	420 MPa	5	210 MPa	8 MPa. \sqrt{m}	150-230 HB
EN-GJS 500-14 (haut silicium)	> 3%	370 MPa	460 MPa	14	230 MPa	10.5 MPa. \sqrt{m}	170-200 HB
Acier d'usage général GE 300	$\leq 0.6\%$	300 MPa	520 MPa	18	220 MPa	5.4 MPa. \sqrt{m}	140-180 HB
ENG-GJS 600-3 (standard)	> 2%	340 MPa	550 MPa	1	250 MPa	Non mesuré	180-270 HB
EN-GJS 600-10 (haut silicium)	> 3%	440 MPa	540 MPa	12	260 MPa	Non mesuré	190-220 HB
Acier d'usage général GE 320	$\leq 0.6\%$	320 MPa	540 MPa	17	240 MPa	5.4 MPa. \sqrt{m}	145-185 HB

Tableau 1 : exemples de propriétés de fontes GS et d'aciers
(sources : EN 10293, EN1563 et Fiches Matière Ferry Capitain)

Du fait du type de solidification propre à la fonte à graphite sphéroïdale et de sa structure micrographique mono-phasée (100% ferritique), il n'y a pas de problème de trempabilité ni de ségrégations sur ces nuances à haut silicium.

Ces particularités font que ces fontes présentent des propriétés constantes à travers l'épaisseur avec une réserve de déformation plastique / ductilité importante (voir les valeurs d'allongement A%).

A Ferry Capitain, les valeurs du tableau 1 pour ce type de pièces sont ainsi obtenues jusqu'à 370 mm d'épaisseur (ref 1). Cette constance des propriétés améliore également l'usinabilité (temps de coupe amélioré, usure d'outil réduite).

Un autre avantage important des fontes GS à haut silicium est leur ténacité (ou résistance à la fissuration).

Les annexes E et F de la norme EN 1563-2012 (ref 6) donnent des indications sur la ténacité de ces nuances. Tout comme dans le cas des tenues en fatigue, ces nuances ne subissent pas de détérioration due à la présence d'une structure mixte (ex ferrite + perlite) comme dans les nuances standards. Les seuils de début de fissuration (ΔK_{th} ou ΔK_s) des fontes GS à haut silicium sont même supérieures aux nuances standards, elles-mêmes déjà supérieures au même paramètre pour l'acier.

Des essais conduits en 2012 (voir ref 5) sur une nuance type EN-GJS 500-14 (voir figure 3) montrent des valeurs de seuils de fissuration supérieures aux valeurs des fontes à graphite sphéroïdal standard (ici 500-7), et au double des valeurs usuelles pour les aciers au carbone de résistance équivalente :

$\Delta K_{th} = 10.5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ à un rapport de conduite $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0.05$ pour l'EN-GJS 500-14

à comparer à une valeur seuil $\Delta K_{th} = 8 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ en EN-GJS 500-7

et $\Delta K_{th} = 5.4 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ en acier moulé type G20Mn5 ou GE 300

Cette résistance à la fissuration ne doit pas être confondue avec la résilience, dont l'objectif est avant tout de déterminer la température de transition ductile – fragile d'un matériau.

Toutefois, à cause de sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre, l'essai de flexion par choc est depuis longtemps utilisé pour représenter la résistance à la fissuration d'un matériau.

On lui préférera aujourd'hui la notion de ténacité car la résilience présente les limites suivantes (d'après ref 6) :

- Les vitesses de déformations lors d'un essai de flexion par choc sont environ 1000 fois supérieures à celles d'applications courantes sévères
- Le comportement ductile réel est masqué par la différence d'échelle entre l'éprouvette de flexion et la pièce réelle (différence entre état de contraintes planes et état de déformations planes où le premier état génère un champ de déformation plastique important)
- L'énergie absorbée lors de l'essai de flexion par choc (en joules) ne peut être utilisé pour dimensionner la pièce en conception, alors que la ténacité permet de déterminer une taille de défaut limite en fonction de la sollicitation appliquée à une zone

Ceci dit, des essais de résiliences sur éprouvettes de section 10x10 mm non entaillées en fontes GS à haut silicium ont été réalisés par Ferry Capitain et montrent des résultats tout à fait intéressants : 107 J pour de l'EN-GJS 450-18 et 125 J pour l'EN-GJS 500-14.

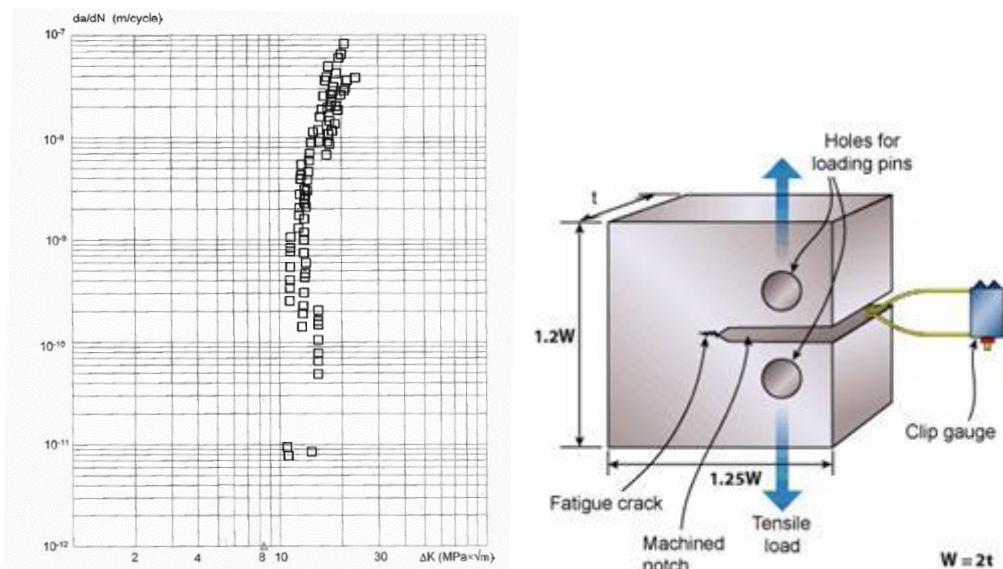


Figure 3 : détermination du seuil de fissuration sur EN-GJS 500-14 (d'après ref 5)

Un dernier avantage notable sur les nuances de fonte GS standards est la capacité des nuances à haut silicium à être réparées par soudage, sans préchauffage ni post-chauffage.

La figure 4 et le tableau 2 donne montre les résultats obtenus sur une soudure réalisée sur de l'EN-GJS 500-14.

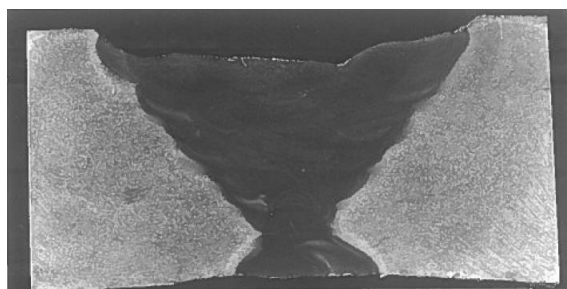


Figure 4 : coupe d'une soudure sur EN-GJS 500-14

Matériau	Limite élastique $R_{p0.2}$	Résistance à la traction R_m	Allongement A	Dureté HB
EN-GJS 500-14	370 MPa	460MPa	14%	170-200 HB
Soudure	390 MPa	420 MPa	4%	170 HB

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques métal de base, métal déposé

De par ses propriétés particulières, la fonte GS à haut silicium peut remplacer avantageusement des aciers pour certaines applications, sans modification de design car les caractéristiques statiques et dynamiques sont au moins équivalentes.

Le paragraphe suivant donne des exemples de transformations possibles sur des pièces de grandes dimensions et fortement sollicités mécaniquement sur plusieurs millions de cycles.

3. Exemples d'application

1) Couronne

Il est tout à fait envisageable de remplacer des couronnes en acier entre 160 et 200 HB par une couronne en fonte GS HSi (voir figure 5).

Délai et coûts de fabrication seront réduits sans impact sur la fonction ou la durée de vie.



Nuance	Puissance	Puissance transmissible ^{a)} (AGMA 6014-B15)	Caractéristiques	Gain
Acier	1500 kW (1x pignon)	1550 kW	200 HB Z244 m25.4 b600 β8°	/
Fonte GS HSi	1500 kW (1x pignon)	1510 kW	200 HB Z244 m25.4 b600 β8°	-10 % sur prix -6 semaines sur le délai

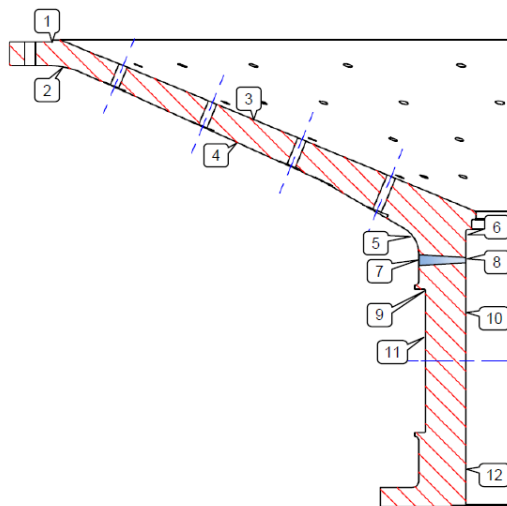
a) la puissance transmissible est dans les 2 cas supérieure au minimum requis avec des facteurs de service de 2,5 en flexion et 1,5 en pression

Figure 5 : exemples d'application pour les fontes GS à matrice ferritique renforcée : couronne

2) Pièces pour fond de broyeur

A ce jour, 7 broyeurs fabriqués depuis 2012 comportent des pièces en fonte GS à haut silicium, type 500-14, allant de SAG Mill 34' à des Ball Mill de 16.5' (au total, 12 pièces pour assiettes et tourillons).

Un fond de broyeur intégral initialement en acier a même été remplacé en urgence (10 semaines) par un fond de broyeur en fonte GS HSi, sans changement de design (voir figure 6).



Nuance	Temps de fabrication	Zone où la contrainte est la plus critique	Contrainte	Niveau acceptable	Facteur de sécurité
Acier	18 semaines	7 (soudure)	24 MPa	58 MPa (soudure !)	2.4
Fonte GS HSi	10 semaines	5 (rayon de raccordement)	39 MPa	95 MPa (matière)	2.4

Figure 6 : exemples d'application pour les fontes GS à matrice ferritique renforcée : fond de broyeur

3) Bâties de presse

Ces 2 pièces moulées sont utilisées pour réaliser le moulage de composite. Originellement en acier mécano-soudé, elles ont été réalisées en fonte GS HSi, type 450-18 (voir figure 7).



Pièce	Poids fini ^{a)}	Epaisseur maxi (mm)	Material	Caractéristiques mécaniques ^{b)}
Pièce supérieure	32 tons	200	EN-GJS 450-18	Rp0.2 ≥ 340 MPa Rm ≥ 430 MPa A% ≥ 15
Partie inférieure	51 tons	480		

a) ces pièces ont été développées conjointement avec le client, permettant de réduire le poids et les temps d'usinage grâce à des formes approchées au plus près en fonderie

b) les caractéristiques mécaniques, telles que données par la fiche matière Ferry Capitain, sont au moins égales voir supérieures à celles de l'acier mécano-soudé utilisé précédemment

Figure 7 : exemples d'application pour les fontes GS à matrice ferritique renforcée : bâtis de presse

4. Conclusion

Les fontes GS à haut silicium, aussi appelées à matrice ferritique renforcée (par solution solide de silicium), sont un ajout très intéressant aux choix des nuances disponibles pour la réalisation de pièces mécaniques.

Ses propriétés mécaniques supérieures à la fonte GS classique, voir même à certains aciers, permettent de réaliser des pièces de remplacement rapidement et facilement, sans modification du design d'origine, à moindre coût qu'une pièce en acier, et tout en restant soudable au besoin.

Autre caractéristique très importante, les fontes GS à haut silicium présente des ténacités (résistance à la fissuration) bien plus élevée que l'acier ou la fonte GS classique (voir tableau 1). La conséquence de cela sera une initiation de fissure plus difficile dans la fonte GS avec un développement plus lent que dans l'acier.

De plus, la ténacité, comme d'autres propriétés telles que les caractéristiques mécaniques ou la résistance à la fatigue, peut être utilisée pour dimensionner une pièce (voir annexe F, norme EN 1563-2012).

Ces caractéristiques font des nuances de fontes GS HSi un choix très intéressant pour des pièces soumises à la fatigue sous chargements cycliques (en flexion pure ou alternée par exemple).

5. Références / References

- (1) Fiches Matière Ferry Capitain FM 08005 rev 2
- (2) Sorelmetal, «Ductile iron data for design engineers,» Rio Tinto Iron and Titanium Inc, Montréal, 1990
- (3) K. Hamberg, M. Mörtzell, A. Bjorkblad et J. Samuelsson, «Fatigue crack growth in ductile iron,» VTT Symposium, 2005
- (4) R. Larker, «Solution strengthened ferritic ductile iron ISO1083/JS/500-7 provides superior consistent properties in hydraulic rotators,» *China Foundry*, November 2009
- (5) Université de Vilnius - Lituanie, «Fatigue test on Ferry Capitain samples made of EN-GJS 500-14,» Recherche conjointe Metso USA - Ferry Capitain, 2012
- (6) Comité Européen de Normalisation, «EN 1563 - Fonderie, Fontes à graphite sphéroïdal,» AFNOR, 2012 et 2018
- (7) U. De la Torre, A. Loizaga, J. Lacaze et J. Sertucha, «As cast high silicon ductile irons with optimized mechanical properties and remarkable fatigue properties,» 2014
- (8) A. Alhussein, M. Risbet, A. Bastien, J.P. Chobaut, D. Balloy et J. Favergeon, «Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron,» *Materials Science and Engineering A605* (2014) p222-228, Elsevier, 2014
- (9) L. Song, E. Guo, L. Wang et D. Liu, «Effects of silicon on mechanical properties and fracture toughness of heavy section ductile cast iron,» *Metals* 2015, n°5, p150-161, 2015
- (10) T. Borsato, P. Ferro, F. Berto et C. Carollo, «Mechanical and fatigue properties of heavy section solution strengthened ferritic ductile iron castings,» *Advanced Engineering Materials* 2016, 18, n° 12 p2070-2075, 2016
- (11) M. Benedetti, E. Torresani, V. Fontaneri et D. Lusuardi, «Fatigue and fracture resistance of heavy section ferritic ductile cast iron,» *Metals* 2017, 7, 88, 2017