

# Les nouveaux aciers pour l'industrie automobile



Les nuances d'aciers qui composent la structure de la Porsche Panamera (© Motor Trend).

## Objectif

La Commission européenne, souhaitant lutter contre le changement climatique, a fixé des objectifs d'émissions – exprimées en grammes de CO<sub>2</sub> émis par kilomètre : gCO<sub>2</sub>/km – aux constructeurs automobiles. L'objectif pour 2015 est de 120 gCO<sub>2</sub>/km pour un poids de 1 500 kg. Pourtant jugé modeste par certains, il est très difficile à atteindre. L'industrie automobile étudie plusieurs réponses, et l'industrie sidérurgique contribue à relever ce défi en proposant de nouveaux aciers permettant un allègement très significatif des carrosseries et des organes mécaniques.

Les constructeurs automobiles envisagent d'autres matériaux tels que les alliages d'aluminium, les plastiques techniques et les composites. Cependant, au cours des années précédentes, les principaux gains d'allègement ont été encore obtenus en changeant d'acier plutôt qu'en recourant à d'autres matériaux.

## Quelques rappels de métallurgie

Comme chacun sait, les aciers sont des alliages fer-carbone avec quelques éléments d'addition tels que le manganèse, le silicium, l'aluminium, etc. Les deux formes allotropiques du fer ont des énergies relativement proches : l'austénite ( $\gamma$ ), cubique à faces centrées, de 912 à 1 394 °C, et la ferrite ( $\alpha$ ), cubique à faces centrées, au-dessous de 912 °C et au-dessus de 1 394 °C (ferrite  $\delta$ ). En conséquence, de nombreux facteurs peuvent avoir une influence importante sur leur stabilité relative. En particulier, le carbone est très peu soluble dans la ferrite. La transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  se fait donc à plus basse température et conduit à une transformation eutectoïde<sup>(1)</sup> à 727 °C. Celle-ci donne un mélange de très fins alignements de fer et de carbure de fer (ou cémentite, Fe<sub>3</sub>C) : la perlite. Cette transformation s'effectue en phase solide

et à relativement basse température. La vitesse de refroidissement, les contraintes mécaniques, les autres éléments d'alliage et l'hétérogénéité du carbone conduisent à l'apparition de nouvelles phases hors d'équilibre : la martensite ( $\alpha'$ ), une espèce de maille  $\gamma$  déformée coinçant le carbone, et la bainite, intermédiaire entre perlite et martensite. Dans certains cas, la concentration locale de carbone dans  $\gamma$  est suffisante pour la stabiliser à température ambiante : on parle d'austénite résiduelle ( $\gamma_{res}$ ).

En définitive, les nouveaux aciers sont basés sur la maîtrise de ces différentes phases en jouant sur leur proportion, leur taille et leur répartition. Pour simplifier : la martensite et la cémentite sont dures et fragiles, tandis que la ferrite est douce et ductile. La bainite est un composé complexe, faisant encore l'objet de débats académiques, dont les propriétés mécaniques peuvent être assez variables selon la façon dont elle est obtenue. La martensite est parfois adoucie par un réchauffage à température modérée : on parle alors de martensite revenue, dont la structure est finalement assez proche d'une bainite obtenue à température plus faible.

## Les nouveaux aciers à haute résistance dans l'automobile

Pour alléger les structures, il faut durcir l'acier afin de diminuer les épaisseurs, tout en maintenant le cahier des charges des constructeurs en termes de rigidité, de résistance aux chocs ou à la fatigue. Suivant la pièce considérée, c'est l'un ou l'autre de ces objectifs qui dicte les propriétés de l'acier à optimiser. Ici, nous parlerons surtout des pièces devant résister aux chocs ou à la fatigue. Il faut pouvoir les mettre en forme et les assembler, et donc conserver une déformabilité et une soudabilité suffisantes. Très classiquement, on représente les différents aciers dans le diagramme résistance mécanique<sup>(2)</sup> (Rm) et allongement réparti (Ag %). Ce deuxième paramètre donne une idée de la possibilité de mise en forme sans rupture. C'est ce compromis que l'on cherche à optimiser, tout en gardant une bonne soudabilité. Cette dernière contrainte oblige à utiliser de bas « carbonés équivalents »<sup>(3)</sup>. Les principaux types de métallurgies qui ont été développés dans ce but sont représentés sur la figure 1 :

- *Aciers « dual phase » (DP)* : il s'agit d'aciers avec une matrice ferritique à grains fins, avec une proportion variable de phase dure (martensite, martensite revenue ou bainite). Ces aciers ont un bon compromis déformabilité/résistance avec un ajout relativement limité d'éléments d'alliage.

- *Aciers « complex phases » (CP)*, où l'on retrouve toutes les phases possibles, avec des compromis de propriétés intéressants.

- *Aciers martensitiques revenus (MART)* : ces aciers ont une proportion élevée de martensite obtenue par trempé suivie d'un revenu, de façon à les adoucir un peu pour retrouver une capacité de déformation suffisante permettant de fabriquer certaines pièces pas trop difficiles. Dans cette catégorie, il faut citer le cas des aciers au Mn-B qui sont mis en forme par

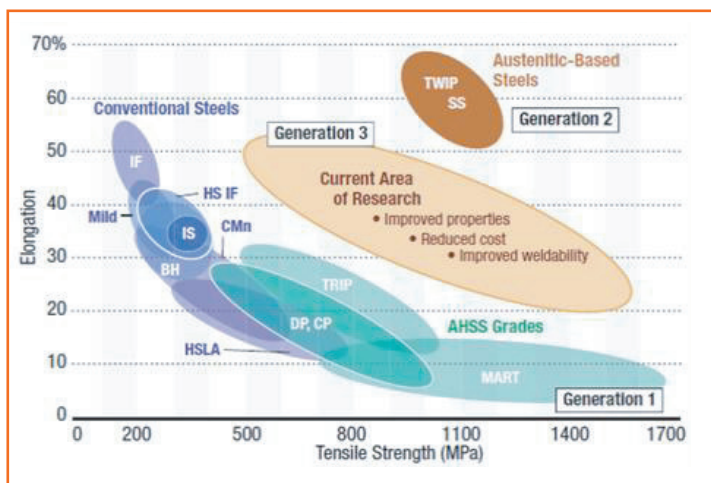


Figure 1 - En abscisse : la résistance mécanique en MPa ; en ordonnée : l'allongement réparti en %. Les nouveaux aciers pour l'automobile sont répartis en trois générations : la première, en vert clair, les « advanced high strength steels » déjà commercialisés ; la seconde, en marron foncé, les aciers TWIP ; et la troisième, en marron clair, les aciers en cours de développement. En bleu, ce sont les aciers courants : aciers très déformables, presque du fer pur, dits « interstitial free » (IF), aciers doux (Mild), aciers IF renforcés (HS IF), aciers isotropes (IS), aciers dits « bake hardening » (BH) qui durcissent pendant la cuisson peinture, aciers HSLA (« high strength low alloyed ») qui sont durcis par de très faibles additions de niobium ou de titane. Source ArcelorMittal.

emboutissage à chaud. L'acier est transformé en martensite au cours de l'étape de mise en forme chez le client. On peut ainsi atteindre des déformations importantes à chaud, tout en gardant une grande résistance après refroidissement.

- Aciers dits « TRIP » (pour « transformation induced plasticity ») : ces aciers comportent une proportion importante d'austénite résiduelle en utilisant des éléments

d'addition. Celle-ci se transforme en martensite sous l'effet de déformations importantes en consommant beaucoup d'énergie. Ces aciers ont un excellent comportement lors d'un choc. Les aciers dits « TWIP » (« twinning induced plasticity ») de 2<sup>e</sup> génération utilisent une philosophie assez proche : la teneur en manganèse est ici beaucoup plus élevée pour être austénitique à température ambiante. Cette austénite se déforme par des cisaillements localisés appelés maillage (« twinning » en anglais) consommant également beaucoup d'énergie. Les aciers de 3<sup>e</sup> génération ont une teneur en manganèse intermédiaire et utilisent surtout les phases bainite, martensite revenue et austénite résiduelle. Ils présentent de bons compromis mais sont plus alliés, plus difficiles à réaliser, et donc plus onéreux. Les nuances commercialisées actuellement ont plutôt des résistances entre 600 et 1 000 MPa. Les nouvelles nuances cherchent à aller encore plus loin : 1 100, 1 300, voire même 1 500 MPa. Néanmoins, à ces très fortes résistances, les risques de rupture avec de faibles déformations (rupture par clivage) ainsi que de sensibilité à l'hydrogène deviennent importants et doivent être maîtrisés. Pour les prendre en compte, de nouvelles techniques de caractérisation et de calcul des pièces doivent être utilisées. Ceci justifie de gros efforts de reconception des pièces pour pouvoir tirer, sans risque, tout le parti des très hautes résistances, comme le montre l'exemple de la figure 2 : les gains de masse sont, à sécurité et confort équivalents, d'une vingtaine de pourcents.

Réaliser ces aciers sur des lignes industrielles demande beaucoup de mise au point en usine. Outre la maîtrise de la chimie, celle des traitements thermiques est primordiale. De petits écarts génèrent des dispersions importantes sur les caractéristiques. La présence de silicium, d'aluminium et de manganèse complique le soudage, mais rend également le revêtement anticorrosion par passage dans un bain de zinc liquide très délicat, des oxydes de surface perturbant l'adhérence.

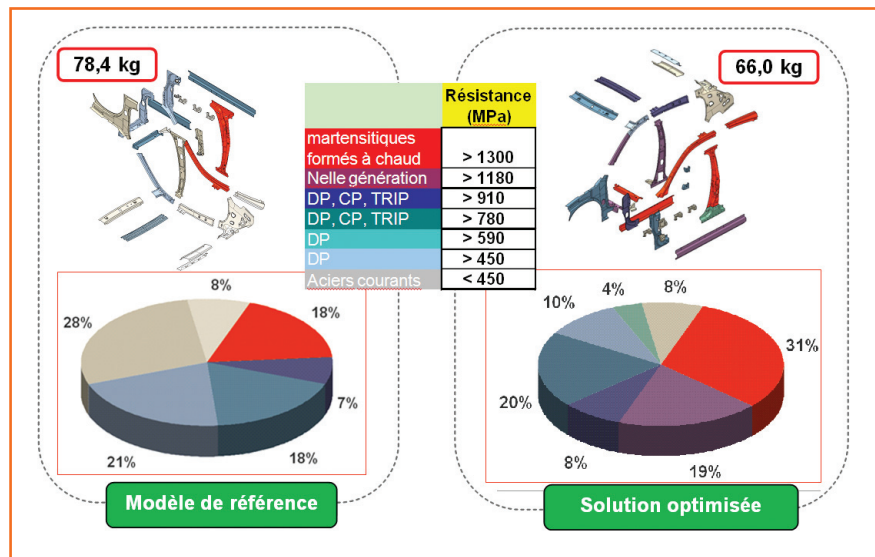


Figure 2 - Exemple de gain de poids réalisable avec des aciers très récents sur un modèle de référence actuel (projet « S-in motion »). Source ArcelorMittal.

Pour en savoir plus

- Béranger G., *The Book of Steel*, Tec & Doc/Lavoisier, 1995.
- Bouaziz O., *Aciers avancés pour applications automobiles : forces motrices et logique de développement*, Les Techniques de l'Ingénieur, Dossier M4620, 2012.

Notes

- (1) Comme la réaction se passe entre trois phases solides  $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ , on parle d'eutectoïde et non d'eutectique.
- (2) La résistance mécanique se mesure en déformant un acier jusqu'à la rupture et en divisant la charge maximale atteinte par la surface de l'échantillon normale à l'effort de traction (en mégapascal, MPa). L'allongement réparti mesure l'allongement de l'échantillon à ce moment (en % d'allongement).
- (3) Formules calées à partir d'essais, utilisées pour évaluer la soudabilité en fonction de la composition chimique où le carbone « pèse » 1. Il y en a beaucoup. Exemple :  $C_{eq} (\%) = [\% C] + 0,0146 [\% Mn] - 0,0027 [\% Si]$ , etc.



Cette fiche a été préparée par François Mudry, directeur scientifique chez ArcelorMittal, 5 rue Luigi Chérubini, F-93212 La Plaine Saint-Denis Cedex (francois.mudry@arcelormittal.com). Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon, Véronique Nardello-Rataj et Michel Quarton (contact : bleneau@lactualitechimique.org).

