

Préface

David EMBURY

McMaster University, Hamilton, Canada

Pour présenter un nouvel ouvrage sur la métallurgie des aciers modernes, il convient de placer le sujet dans son contexte historique et économique. En 1900, la production mondiale d'acier était de l'ordre de 50 millions de tonnes, en 1950, elle était de 200 millions de tonnes, et en 2018, de 1 800 millions de tonnes. L'examen de la production relative des différents pays reflète la complexité de la concurrence économique et, hélas, parfois militaire qui a eu lieu au cours du XX^e siècle et des vingt premières années du XXI^e siècle. Ainsi, si l'on considère un indicateur économique tel que la production mondiale d'automobiles, elle est aujourd'hui de l'ordre de 90 millions de véhicules dont chacun contient environ 900 kg d'acier. Ce chiffre reflète deux aspects essentiels de cet ouvrage. En ce qui concerne l'utilisation de l'acier dans les automobiles, il n'est plus simplement une matière première, et la nature détaillée de l'acier est intégrée dans la conception de l'automobile. L'accent mis sur le processus de conception, tant du matériau que du produit technique, est évident à la lecture des titres des différents chapitres de ce livre et du nom de leurs auteurs. Ceux-ci sont issus à la fois d'institutions universitaires et de l'industrie sidérurgique. Ensemble, ils ne présentent pas un manuel standard sur la métallurgie des aciers modernes, mais une analyse très large et profonde d'une grande gamme de propriétés dans le contexte de l'utilisation de l'acier, de son comportement au cours de la séquence complexe des processus de fabrication, et de la fonctionnalité du matériau. Ce livre est donc d'une grande utilité tant pour les étudiants que pour les ingénieurs et les concepteurs pratiquant dans un grand nombre d'industries.

Fondamentalement, la métallurgie physique des aciers modernes combine les informations de la microstructure, des propriétés et de la conception, et tous les chapitres de ce livre traduisent cette approche. Ils reflètent également les progrès réalisés tant dans les méthodes d'analyse expérimentales que dans la modélisation mathématique. Ceci est

Le développement des aciers à très haute résistance,

coordonné par Mohamed GOUNÉ, Thierry IUNG et Jean-Hubert SCHMITT. © ISTE Editions 2022.

illustré très clairement dans le chapitre 2 où l'anisotropie élastique et plastique est traitée afin de prévoir la forme détaillée de la surface d'écoulement, vitale dans l'analyse des opérations de formage de tôle. Un changement majeur dans l'analyse des microstructures des aciers s'est produit depuis 1950 grâce au développement d'une variété de techniques en microscopie électronique à balayage et en microscopie à transmission, et de nouvelles techniques telles que la tomographie par sonde atomique (*Atomic Probe Tomography*, APT). La puissance et le potentiel de ces avancées sont bien illustrés dans le chapitre 9 sur l'hydrogène dans les aciers, où une image remarquable montre la ségrégation de l'hydrogène dans une petite particule de carbure de vanadium dans un acier à haute résistance. L'étude et la caractérisation des microstructures de l'acier sont devenues beaucoup plus quantitatives. Au lieu de caractériser les aciers par leurs phases dominantes telles qu'austénite, ferrite, perlite, bainite ou martensite, il est maintenant possible de définir de manière quantitative les échelles de longueur dominantes dans la microstructure comme la taille des grains, la taille et l'espacement des secondes phases, ou l'épaisseur, le rapport d'aspect et l'orientation spatiale des macles et d'une variété de phases lamellaires, ou encore la densité des défauts tels que les dislocations. Les échelles de longueur permettent de relier directement la microstructure aux propriétés mécaniques essentielles de base comme la limite d'élasticité et le potentiel d'écrouissage. En outre, une variété de modes de rupture tels que le clivage, la rupture ductile et la rupture intergranulaire peuvent être caractérisés par des contraintes critiques liées à l'échelle de la microstructure. Ce lien essentiel entre la microstructure et les propriétés est développé de manière claire et élégante dans les chapitres sur l'écrouissage (chapitre 1), la résistance à la rupture (chapitre 3) et la fatigue (chapitre 4), ainsi que dans les modélisations basées sur l'accumulation et la restauration dynamique des dislocations ou sur les modèles fondés sur la mécanique de la rupture.

Deux aspects de la microstructure, plus difficiles à étudier et à quantifier, sont la nature et les propriétés des diverses interfaces et des gradients de microstructure. Cependant, ces points sont essentiels à la compréhension et au développement technique des procédés de revêtement, tels que la galvanisation, et de soudage. Ces sujets sont traités dans ce livre d'une manière qui relie les aspects importants des microstructures aux paramètres détaillés des processus.

Il a été dit précédemment que l'important changement de paradigme dans le domaine des aciers de construction à haute résistance était le passage des aciers et de leurs structures à une vision intégrée de la relation entre la microstructure, les propriétés et la conception. C'est l'intégration de la conception qui représente le plus grand défi, car elle implique non seulement la conception dans le contexte du processus et du produit, mais aussi un changement d'échelle, du microscopique (et même du nanoscopique) au macroscopique à grande échelle. Cet aspect est traité dans les chapitres sur la résistance aux chocs (chapitre 7) et la formabilité (chapitre 8). Pour la résistance aux chocs, le comportement

du matériau sous déformation à très grande vitesse doit être pris en compte et la connaissance détaillée des propriétés mécaniques et des critères de rupture pour une grande diversité d'aciers à haute résistance est requise pour les modèles aux éléments finis simulant le comportement de composants automobiles spécifiques. De la même manière, l'évaluation du formage est beaucoup plus complexe que le test de traction uniaxiale, car elle implique l'interaction de l'acier avec le processus de formage et des séquences d'états de contrainte complexes. Le traitement de ces thèmes dans cet ouvrage constitue un lien intellectuel précieux entre le métallurgiste et le concepteur du produit.

En résumé, cet ouvrage n'est pas un texte métallurgique standard : il examine le développement et l'utilisation des aciers modernes à haute résistance d'une manière très complète, qui intègre la structure et l'utilisation de ces aciers, apportant une valeur fondamentale pour un très large public et durable pour la communauté technologique.

Introduction

Mohamed GOUNÉ¹, Thierry IUNG² et Jean-Hubert SCHMITT³

¹ *ICMCB, CNRS, Université de Bordeaux, Pessac, France*

² *Product Research Center, ArcelorMittal Research SA, Maizières-lès-Metz, France*

³ *LMPS, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France*

La volonté de disposer d'aciers plus résistants remonte probablement aux origines des premières transformations d'un mélange de minerai et de charbon de bois en fer. Elles apparaissent chez les Chalybes et les Hittites dans le sud du Caucase. Les Hittites furent certainement les premiers à utiliser le fer dans l'armement, car des tablettes cunéiformes hittites du XVIII^e siècle avant notre ère signalent une production d'armes en fer. Quant aux Chalybes, ils seraient au début du premier millénaire avant notre ère les premiers métallurgistes à produire de l'acier : « le fer dur des Chalybes » très recherché pour sa dureté. La volonté de posséder des aciers plus résistants s'affirme au cours de l'âge du fer. On découvre qu'un traitement thermique dans des résidus carbonés suivi d'une trempe permettait de fabriquer des armes et des outils très résistants. Il est nécessaire de rappeler qu'à cette époque, les armes étaient coulées principalement en bronze, et celui qui maîtrisait la fabrication d'armes plus résistantes possédait un avantage stratégique qui lui permettait d'asseoir sa domination.

Les aciers, une métallurgie riche

Cette utilisation antique du fer et de l'acier a été possible du fait de la forte présence de minerai de fer dans l'écorce terrestre et des caractéristiques spécifiques de cet alliage qui le rendent en même temps ductile et résistant. Ces propriétés viennent principalement de quelques spécificités des aciers, alliages basés sur le couple fer-carbone. Tout d'abord, le fer présente différentes structures en fonction de la température : la ferrite, ou

Le développement des aciers à très haute résistance,

coordonné par Mohamed GOUNÉ, Thierry IUNG et Jean-Hubert SCHMITT. © ISTE Editions 2022.

fer α , de structure cubique centrée, pour des températures inférieures à 912 °C ; l'austénite, ou fer γ , de structure cubique à faces centrées, pour des températures comprises entre 912 et 1 394 °C ; enfin, à nouveau la phase de structure cubique centrée entre 1 394 et 1 538 °C, température de fusion du fer pur. Les aciers héritent de ces différentes phases et la teneur en carbone et en différents éléments d'alliage permet de jouer sur la taille des domaines d'existence de ces différentes phases et sur les températures critiques. Par ailleurs, si la solubilité du carbone dépasse les 2 % en poids dans l'austénite à 1 154 °C, elle est extrêmement réduite dans la ferrite et de l'ordre de quelques ppm à la température ambiante. De plus, la petite taille des atomes de carbone par rapport à celle des atomes de fer conduit à une solution solide d'insertion, c'est-à-dire que les atomes de carbone se positionnent au sein du réseau constitué par les atomes de fer.

Enfin, il peut se former un composé eutectoïde, la perlite, formé d'une alternance de lamelles parallèles de fer presque pur et de carbure de fer, la cémentite, Fe_3C . Ce constituant est de fait un composite lamellaire associant une phase déformable et une phase dure.

Ce sont ces particularités microstructurales des aciers qui leur confèrent des propriétés aussi différentes en matière de dureté, de déformabilité, de ténacité, entre autres. Jouant sur la composition chimique et sur les procédés thermomécaniques, l'ingénieur dispose de la palette complète des mécanismes métallurgiques. En ajustant la teneur en carbone, il est possible de développer différentes familles d'acier, depuis les plus doux, les aciers ferritiques IF (*Interstitial Free*) dont la limite d'élasticité est à peine supérieure à 100 MPa, jusqu'aux nuances perlitiques dans lesquelles la résistance croît lorsque l'espacement entre les lamelles de cémentite se réduit. Le carbone étant peu soluble dans la ferrite, il est possible d'obtenir une fine précipitation durcissante en ajoutant du titane et du niobium. Dans les aciers HSLA (*High Strength Low Alloyed*), la présence de carbonitrides d'une dizaine de nanomètres et la faible taille de grain dont le grossissement est limité par les précipités conduisent à des résistances mécaniques pouvant atteindre 800 MPa. Enfin, en augmentant la teneur en carbone de l'alliage, il est possible de développer toute une gamme d'aciers biphasés composés d'une matrice ferritique et d'une fraction volumique de plus en plus importante d'îlots de perlite. Les caractéristiques mécaniques de ces aciers sont directement fonction de cette fraction volumique de phase dure.

En parallèle, l'existence d'une phase austénitique à plus haute température permet de jouer sur les vitesses de refroidissement après une déformation à chaud ou un traitement thermique afin d'obtenir des phases métastables. La martensite et la bainite sont ainsi durcies par une teneur en carbone en sursaturation et par de nombreuses dislocations résultant d'une transformation hors équilibre. Ces phases de trempe atteignent des limites d'élasticité supérieures à 1000 MPa. En combinant la composition de l'acier et la cinétique de refroidissement depuis la phase austénitique, il est possible d'obtenir des aciers *Dual Phase* (DP) où la martensite est une phase dure dans une matrice ferritique ou bainitique plus déformable.

L'ajout de certains éléments d'addition comme le nickel ou le manganèse augmente considérablement la taille du domaine austénitique au point que, pour certaines compositions chimiques, les aciers peuvent conserver une structure cubique à faces centrées à température ambiante. C'est le cas des aciers inoxydables austénitiques pour lesquels l'ajout de plus de 11 % en poids de chrome confère une protection de surface tandis que l'addition complémentaire de 8 à 10 % de nickel stabilise l'austénite. Ainsi, la nuance 18-10 (18 % Cr et 10 % Ni) a été la plus développée pour la coutellerie et les articles ménagers. Le coût du nickel et sa variabilité ont conduit à rechercher d'autres éléments d'alliage susceptibles de stabiliser l'austénite, qui présente l'intérêt d'un taux d'écroutissage important induisant un allongement potentiel supérieur à 50 % en traction. Des aciers à haute teneur en manganèse (de l'ordre de 22 % en poids) et en carbone (autour de 0,6 %) ont représenté la deuxième génération d'aciers à très haute résistance, les aciers TWIP (*TWin Induced Plasticity*).

Enfin, plus récemment, sont apparus des aciers combinant une matrice ferritobainitique et des îlots d'austénite métastables, c'est-à-dire pouvant se transformer en martensite sous l'effet d'une contrainte ou d'une déformation : les aciers TRIP (*Transformation Induced Plasticity*). Ces aciers présentent un nouveau mode de durcissement dans la mesure où la fraction de seconde phase durcissante augmente au cours de la déformation. Ce mécanisme permet de combiner des valeurs élevées de la résistance mécanique – supérieure à 1 200 MPa – à un allongement en traction supérieur à 15 %. Le pilotage précis des cycles thermomécaniques, en particulier des refroidissements fractionnés, permet d'industrialiser ces nouvelles nuances à très haute résistance utiles pour l'allègement des structures et l'accroissement de leur sécurité.

Ces quelques exemples, non exhaustifs, montrent clairement que la richesse et les particularités de la métallurgie des aciers ont permis un développement qui se poursuit encore aujourd'hui.

Les aciers, une histoire dense

Jusqu'au XVII^e siècle, les aciers ont peu évolué et le principal mode de durcissement est resté la trempe, sans que les mécanismes de durcissement aient fait l'objet d'études. On doit l'un des premiers modèles de durcissement à René Descartes en 1639. Il introduit le concept de « particules de feu » à haute température, de « particules d'air » lors d'un refroidissement lent et de « particules d'eau » lors d'un refroidissement rapide. Le durcissement de l'acier résulterait donc du remplacement des « particules de feu » par les « particules d'eau » plus petites. En 1671, Jacques Rohault utilise la théorie de Descartes pour expliquer qu'un refroidissement « soudain » empêche les particules de revenir à leur position originelle. Elles apparaissent alors comme figées, conduisant à un acier plus dense et plus « fort ». L'ouvrage de René Antoine Ferchault de Réaumur publié en 1722 et intitulé *L'Art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu* marque un

tournant. À partir de l'observation de la structure du métal révélée par les faciès de rupture, il propose une explication du mécanisme de durcissement de l'acier basée sur des « transformations moléculaires » produites par la chaleur. Dans les molécules, il distingue les « particules de fer » et les « particules de sulfures et de sels » et explique que l'acier devient plus dur car les « particules de sulfures et de sels » ne peuvent être évacuées et restent figés dans l'acier lors d'un refroidissement rapide. Cependant, Réaumur ne parvient pas à définir la nature des « particules de sulfures et de sels ». Elles furent renommées successivement « phlogiston », « plumbago » et « carbone » en 1800. L'ensemble de ces travaux académiques donnèrent une forte impulsion à une meilleure compréhension des aciers et à leur industrialisation. L'industrie des « aciers cimentés » se développe dans toute l'Europe et en Amérique au cours du XVIII^e siècle et dans la première moitié du XIX^e siècle. Ils répondaient aux besoins de l'industrie mécanique, qui réclamait des pièces possédant une grande dureté superficielle. Les aciers trempés étaient également très recherchés du fait de leur dureté dans le domaine militaire, comme en atteste le traité de Gaspard Monge publié en 1794 *Description de l'art de fabriquer des canons*. Cependant, jusqu'au début du XIX^e siècle, l'élaboration des aciers ne repose que sur des éléments empiriques.

En 1868, dans une communication à la Société technique de Russie intitulée « La structure de l'acier », Tchernov, ingénieur aux aciéries Oboukhov à Saint-Petersbourg, démontre l'existence de températures critiques de transformation de l'acier à l'état solide. Il définit la température critique à partir de laquelle il est nécessaire de chauffer un acier si l'on veut le durcir par refroidissement rapide. C'est une étape importante qui est franchie, car les travaux de Tchernov permettent à Johan Brinell de décrire, en 1885, le mécanisme de durcissement au refroidissement comme un processus de conservation du « carbone durcissant » en « carbone durcissant », pour des vitesses de refroidissement élevées, ou de conversion du « carbone durcissant » en « carbone ciment », pour des vitesses de refroidissement faibles. Le « carbone ciment » est identifié en 1881 et 1888 par Abel et Muller comme étant le composé Fe_3C . Floris Osmond lui donnera le nom de cémentite quelques années plus tard. D'ailleurs, les travaux d'Osmond revêtent une importance capitale. En 1885 et 1887, il établit l'importance des différents états du carbone et montre l'existence de deux variétés allotropiques du fer : le fer α et le fer β . Il attribue les propriétés de durcissement à la capacité de l'acier à conserver à température ambiante la phase stable haute température β , qui sera nommée « hardenite ». Cependant, la phase β haute température et la phase β basse température ne peuvent pas avoir la même composition et la même structure, car l'une est amagnétique et l'autre magnétique. Pour résoudre cette contradiction, Albert Sauveur propose de regarder la phase haute température comme une solution solide et non comme un composé défini, cette solution solide pouvant se décomposer lors d'un refroidissement en carbures dispersés dans une matrice ferritique magnétique. C'est une étape importante, car le durcissement de l'acier n'est plus vu comme un processus de rétention de la phase haute température β , mais comme la décomposition de cette dernière.

En 1897, Le Chatelier expose la théorie élaborée en commun avec Osmond et conclut qu'au-dessus de 900 °C, l'acier est composé d'une solution solide homogène amagnétique de carbone dans le fer γ . Au refroidissement lent, cette solution se comporte comme une solution aqueuse comportant un eutectoïde à 0,8 % C, la perlite. Par un refroidissement rapide, on évite la formation de perlite et on forme une solution solide magnétique. Cette solution solide sera nommée martensite en l'honneur du métallographe Adolf Martens et le fer γ austénite par Osmond. Pendant ce temps, un premier diagramme de phase Fe-C est proposé par Roberts Austen en 1895. En appliquant la règle des phases explicitée par J. W. Gibbs en 1878, Roozeboom propose en 1900 dans « Le fer et l'acier au point de vue de la doctrine des phases » un diagramme Fe-C très ressemblant à celui que nous utilisons actuellement. À la fin du XIX^e siècle, on peut considérer que les mécanismes de durcissement des aciers trempés sont élucidés.

À la même période, les aciéries de grande production basée sur le procédé Bessemer-Thomas ou Siemens-Martin sont performantes, les métaux d'alliage sont disponibles en grande quantité, et la demande est croissante dans des domaines aussi variés que l'armement, la construction des voies de chemin de fer, de machines-outils, d'avions. Toutes les conditions à la base de la mutation de la filière sidérurgique et du développement des aciers au cours du XX^e siècle sont réunies. Dès 1880, l'acier supprime le fer puddlé. On s'intéresse très rapidement aux aciers alliés dits spéciaux, car on constate que l'ajout d'éléments d'alliages confère aux aciers des propriétés remarquables, dont les débouchés concernent principalement la fabrication d'obus, de canons et de blindage. Les aciéries concernées se lancent dès 1880 dans le développement d'aciers spéciaux de plus en plus résistants, alimenté par un processus auto-entretenu : la résistance et la ténacité des obus augmentent au fur et à mesure que la dureté des plaques de blindage augmente et inversement. On produit des obus en acier au chrome dès 1882, des blindages en acier au nickel dès 1891. D'un point de vue du développement des aciers alliés, on peut citer le brevet déposé en 1882 par sir Robert Hadfield sur un acier révolutionnaire à 1,2 % C et 12 % pds de manganèse, le brevet déposé par les aciéries du Creusot relatif à la fabrication des ferrochromes, les aciers inoxydables au nickel dont on trouvera un descriptif exhaustif dans l'ouvrage de Léon Guillet publié en 1902 et intitulé *Étude micrographique et mécanique des aciers au nickel*. En outre, les Américains Taylor et Maunsel White découvrent les aciers à outils rapides autotrepants composés de chrome et de tungstène en 1899, et dont la production industrielle sera effective aux États-Unis dès 1910.

La découverte de la diffraction des rayons X par Max von Laue en 1912 et la construction du premier microscope électronique en transmission (MET) en 1932 par Knoll et Ruska vont accompagner le développement des aciers. Cette période marque le passage de la métallurgie empirique à la métallurgie scientifique. Le concept de dislocation est introduit dès 1934 par Orowan, Taylor et Polanyi. Le rôle joué par les dislocations sur la déformation plastique, le durcissement par précipitation, par solution solide et par taille

de grain est appréhendé bien avant la date de leur observation directe en MET par Hirsch et Whelan en 1952. Le premier critère de contrainte de rupture basé sur la théorie de l'élasticité est publié par Griffith en 1921 sous le titre *The phenomena of rupture and flow in solids*. Ces travaux, repris par Irwin en 1948 et Orowan en 1949, seront consolidés et donneront les bases de la mécanique de la rupture moderne.

Une meilleure connaissance des relations entre la microstructure et les propriétés des aciers, le développement industriel ainsi que les besoins de l'après-guerre permettent le développement d'aciers dont les propriétés mécaniques sont constamment améliorées. À la fin de la Première Guerre mondiale, les gouvernements en Europe prennent conscience que le secteur de l'acier est stratégique. Le secteur de l'automobile devient le poumon du commerce et des industries nationales dans les années 1920. En Europe, à partir de 1930, on produit l'acier en lingots, mais également des laminés, des tôles, des poutrelles, des rails, des tubes, des fils, des bandages de roues, des éclisses, des essieux.

Les années 1970 marquent une rupture dans le modèle de développement des aciers suite à la conjonction de plusieurs facteurs. D'une part, la hausse des prix de l'énergie liée aux chocs pétroliers de 1973 et 1979 a des répercussions importantes sur la consommation énergétique, les coûts de production, de transport et de recyclage. D'autre part, l'apparition, dès 1970, des premières normes européennes relatives aux rejets de particules polluantes et nocives par les véhicules motorisés. Enfin, la prise de conscience internationale en matière environnementale. En 1970, le rapport Meadows alerte sur l'épuisement des ressources en matières premières et la conférence de Stockholm en 1972 place pour la première fois les questions écologiques au rang de préoccupations internationales. Ces tendances se sont depuis accentuées : les coûts énergétiques sont plus élevés, les normes d'émission imposées sont de plus en plus drastiques et les instances gouvernementales sanctionnent financièrement les émissions de CO₂. Dans ce contexte particulier, l'allègement des structures en acier est devenu un enjeu prégnant pour la sidérurgie. Pour tenter de répondre à un tel défi, la stratégie choisie a reposé principalement sur une réduction des épaisseurs des produits développés. Elle nécessite cependant de mettre au point des aciers de plus en plus résistants, principalement pour des raisons de rigidité et/ou de résistance aux chocs. En effet, à iso-énergie absorbée, toute diminution relative d'épaisseur doit être compensée par une augmentation relative plus importante de la résistance mécanique. C'est ce changement de paradigme qui est à la base du développement de nouveaux aciers à très haute résistance.

Les aciers, un développement continu

Cette tendance, observée dans de nombreux secteurs tels que l'automobile, l'emballage, la construction et l'énergie, impose la recherche de nouveaux compromis entre la résistance mécanique et les propriétés de mise en forme et d'usage.

Nous pouvons citer l'effort d'allègement fait dans les aciers pour emballage. Au cours des vingt dernières années, les épaisseurs de ces aciers ont été réduites de 33 % en moyenne. À titre d'exemple, l'épaisseur moyenne d'une boîte de conserve a été réduite de 0,20 mm en 1986 à 0,13 mm actuellement.

Le secteur du transport automobile a également suivi cette tendance. Dans les années 1990, le besoin d'allègement a conduit à l'utilisation massive des aciers HSLA micro-alliés au niobium et titane. Leur résistance était de l'ordre de 750 MPa. Maintenant, des aciers à ultra-haute résistance (1 500 MPa) sont largement utilisés. Une analyse macroscopique montre que ces derniers représentent actuellement plus de 15 % des aciers constituant les véhicules. L'objectif de résistance à atteindre pour les véhicules est maintenant de 2 000 MPa. Différentes familles de produits ont été développées pour satisfaire ce besoin de haute résistance. Les aciers multiphasés de type *Dual Phase* ou TRIP ont de bonnes propriétés de déformabilité. Ils sont principalement utilisés pour la mise en forme à froid de pièces complexes. Les niveaux de résistance atteignent 1 200 MPa, avec des développements vers 1 500 MPa. Dans le cas des pièces forgées ou embouties à chaud, on utilise principalement des nuances bainitiques ou martensitiques. Elles permettent de couvrir la gamme allant de 1 000 à 2 000 MPa.

Dans le marché de l'énergie, l'évolution des températures d'utilisation (une augmentation des températures dans le cadre des centrales thermiques, ou une diminution dans le cadre des fluides de type gaz naturel ou hydrogène liquéfié) demande que les aciers à haute résistance améliorent leurs propriétés d'usage comme la tenue à haute température ou la résistance à la rupture (ténacité) à froid. Nous pouvons citer les exemples des nuances bainitiques ou martensitiques revenues utilisées pour les tubes de transport de gaz ou les centrales. Ces nuances sont développées pour leur excellente résistance à la rupture. Une attention particulière est donnée à leur soudabilité, qui peut nécessiter une forte limitation de la teneur en carbone. Dans le cas de l'utilisation à très basse température (gaz naturel ou hydrogène, par exemple), des produits à forte teneur en nickel (7 à 9 % pds) sont proposés.

Pour donner un ordre de grandeur de l'essor des aciers à très haute résistance, l'exemple du secteur automobile est très illustratif. À partir des années 1990, leur utilisation commerciale s'est développée pour répondre aux enjeux de sécurité et d'allègement. La vente de ces aciers¹, de résistance maximale supérieure à 450 MPa et pouvant atteindre 2 000 MPa, représentait 1,3 million de tonnes en 2010 en Europe. Avec un taux de croissance annuel à deux chiffres, plus de 4 millions de tonnes d'aciers à très haute résistance ont été vendues en Europe en 2018. Sachant que l'Europe représente environ 20 % de la

1. D'un point de vue commercial, les aciers à très haute résistance regroupent les aciers multiphasés (hors HSLA), les aciers DP, TRIP, CP, ferrite/bainite, les nuances bainitiques et les aciers martensitiques. En 2018, la production d'aciers TWIP ne représente qu'un pourcentage marginal de la production des aciers à très haute résistance.

production automobile mondiale, on peut raisonnablement estimer que le chiffre global de 20 millions de tonnes sera dépassé au cours des années 2020.

Les années à venir ouvriront de nouvelles perspectives au développement des aciers. Il faudra en effet répondre aux préoccupations environnementales (réduction du CO₂ émis et augmentation du taux d'utilisation d'acier recyclé lors de la production de l'acier). L'acier, matériau de choix dans la construction, contribuera par exemple aux objectifs de durabilité dans ce domaine. De nouveaux procédés de fabrication émergents, comme la fabrication additive, offrent également de nouveaux débouchés à ce matériau. Ainsi, les performances et progrès des aciers, validés par des décennies d'expérience, ont de belles perspectives de développement.

Ce livre, dédié principalement aux aciers à très haute résistance, s'articule autour des compromis réalisés entre la résistance mécanique et certaines propriétés telles que l'érouissage, l'anisotropie, l'endommagement et la rupture, la résistance à l'usure et la tenue en fatigue, la résistance au fluage et à l'oxydation, la résistance au crash, la tenue en bords, la tenue à l'hydrogène et la soudabilité. Partant d'un rappel des mécanismes physiques à la base des différentes propriétés recherchées, cet ouvrage doit permettre de mieux appréhender les développements métallurgiques en ce qui concerne la microstructure, la composition chimique et les procédés d'élaboration qui ont été nécessaires pour l'émergence de ces nouvelles générations d'aciers. Ainsi, principalement destiné aux étudiants et aux jeunes ingénieurs, ce livre veut aussi proposer une démarche de développement et d'innovation qui pourra s'avérer un guide utile pour leurs futurs besoins de spécialistes des matériaux.