

# Les tôles fortes à hautes performances

et leur utilisation  
dans des ouvrages innovants

Les aciers à hautes performances jouent un rôle essentiel dans de nombreux segments de marché, que ce soit pour les pipelines, les plateformes offshore, les équipements sous pression, les réservoirs de stockage, les ouvrages d'art, les éoliennes offshore, voire les stades et autres grands bâtiments.

Pour tous ces marchés, l'industrie sidérurgique a constamment cherché à pousser au maximum les limites technologiques et à développer des aciers toujours plus performants, tant en termes de propriétés mécaniques que d'aptitudes améliorées à la mise en œuvre.

Cet exposé démontre la robustesse de tels aciers en se référant à des utilisations dans des secteurs de marché extrêmement exigeants.

# High performances heavy plates and their use in innovating constructions

*High performances steels play an essential part in many market segments, such as: pipelines, offshore platforms, pressure equipments, storage tanks, bridges, offshore wind mills, even stadiums and other large buildings.*

*For all these markets, steel industry has continuously developed steels showing higher strength and enhanced fabrication properties. This presentation shows the robustness of such steels while referring to references of use in extremely demanding market sectors.*

Falko Schröter  
Cécile Manuelli  
Nicolas Torlotting  
*Dillinger Hütte GTS*



Photo 1 : le projet « Alpha ventus » / « Alpha ventus » project

## 1 INTRODUCTION

Les aciers à hautes performances jouent un rôle essentiel dans de nombreux segments de marché, que ce soit pour les pipelines, les plateformes offshore, les équipements sous pression, les réservoirs de stockage, les ouvrages d'art ou encore les éoliennes offshore. Pour tous ces marchés, l'industrie sidérurgique a constamment cherché à pousser les limites technologiques au maximum et à développer des aciers toujours plus performants, en termes de propriétés mécaniques notamment. Les progrès réalisés sur les dernières décennies ont permis d'ouvrir de nouveaux horizons vers des utilisations en zones extrêmes, avec des conditions environnementales de plus en plus sévères. La question du choix des aciers et de leurs propriétés est primordiale. Le meilleur compromis entre des niveaux de résilience suffisants, de bonnes propriétés de traction, mais aussi de bonnes propriétés de mise en œuvre doit être trouvé. Nombre d'ouvrages et d'installations dans des milieux extrêmes n'existe-

raient pas sans les aciers à hautes performances. Cet article vise à donner une vue d'ensemble des aciers de construction à hautes performances et de leurs utilisations, à travers les exemples des centrales hydroélectriques et de l'éolien offshore. Les différents procédés de fabrication, les caractéristiques de l'acier, ainsi que le comportement au soudage sont expliqués afin de guider l'utilisateur dans son choix de matériau.

## 2 BESOINS POUR LE MARCHÉ OFFSHORE ET LA CONSTRUCTION HYDRAULIQUE

Les besoins en aciers pour le marché offshore et la construction hydraulique sont liés aux contraintes environnementales, qui sont bien plus sévères que celles rencontrées habituellement.

Pour les éoliennes offshore, par exemple, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

- Économiquement, les installations doivent être rentables et nécessitent l'utilisation de turbines lourdes,

d'hélices de grand diamètre et de mâts de plus grande taille. Ainsi, les premières éoliennes de 5 MW de puissance voient aujourd'hui le jour au large des côtes européennes, comme illustré par l'exemple du projet « Alpha ventus », avec douze éoliennes implantées en mer du Nord (Photo 1).

– Les aciers doivent être capables de résister aux pressions résultant des courants marins et des vents forts.  
– Les zones marines pouvant accueillir des éoliennes offshore sont souvent profondes. Les exigences concernant les structures de fondations sont de ce fait plus sévères.

– Les installations doivent pouvoir résister à la corrosion en milieu marin.

– La production doit pouvoir être automatisée, sécurisée et économiquement rentable.

– Les périodes d'installation sont limitées par les conditions climatiques et la maintenance se fait dans des conditions difficiles.

Si l'on relie ces facteurs environnementaux et économiques aux caractéristiques de l'acier, différents besoins apparaissent. Tout d'abord, les matériaux sont soumis à des contraintes statiques et dynamiques, avec de ce fait un intérêt pour la limitation du poids de l'acier mais des besoins d'épaisseurs plus fortes à cause des dimensions des ouvrages. Ensuite, il est nécessaire d'avoir des niveaux de résilience élevés (résistance à la rupture fragile) pour une sécurité de fonctionnement optimale et des coûts de production et de maintenance réduits. Des tôles plus longues et plus larges sont nécessaires pour limiter les opérations de mise en œuvre, en particulier de soudage. Et enfin, cela demande des capacités de production suffisantes pour pallier les défaillances éventuelles des composants.

Pour tous les aciers, il est important de prendre en compte les paramètres suivants :

– La gamme de températures d'utilisation est généralement de  $15\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$  (fonctionnement entre  $10\text{ °C}$  et  $+40\text{ °C}$ ) : pour les aciers ferritiques, pour lesquels la résilience chute brutalement à basse température, seule la limite inférieure de température est décisive. Une température de  $-10\text{ °C}$  est courante pour les constructions offshore. Il faut également tenir compte du fait que la mise en œuvre, en particulier le soudage, détériore la résilience. C'est pour cela que la plupart des fournisseurs de tôles fortes dans le domaine de



Photo 2 : Schéma d'une centrale hydroélectrique / Hydroelectric power plant layout

L'offshore qualifie les aciers à l'aide de l'essai CTOD (Crack Tip Opening Displacement) qui consiste à suivre l'ouverture du fond d'une fissure et à déterminer la valeur critique de ce paramètre correspondant au moment où la fissure commence à se propager.

> La nuance, avec plusieurs catégories en fonction de la limite d'élasticité :

> les nuances standard jusqu'à 275 MPa de limite d'élasticité minimum Reh (selon la norme EN 10025 [1]) ;

– les nuances plus élevées, au-delà de 275 et jusqu'à 355 MPa de limite d'élasticité minimum Reh (selon la norme EN 10025) ;

> les nuances à haute limite d'élasticité (HLE) avec Reh > 355 MPa (selon norme EN 10025).

Les nuances offshore pour la mer du Nord sont souvent livrées dans cette gamme de limite d'élasticité, et même jusqu'à 500 MPa. Dans des cas particuliers, tels que les crémaillères, des aciers jusqu'à 690 MPa de limite d'élasticité minimum sont même utilisés. La charge en fatigue guide le choix pour ce critère. Pour les sites d'éoliennes offshore, c'est même le critère décisif.

– Les propriétés dans le sens travers court (sens de l'épaisseur) : les aciers servant à la construction de structures qui subissent des contraintes dans cette direction doivent être commandés avec des propriétés Z (Z15, Z25, Z35) (selon la norme EN 10164). Les sidéurgistes sont à même de garantir ces propriétés également pour l'offshore.

– La soudabilité, exprimée par une valeur maximale de carbone équivalent, par exemple le carbone équivalent CE, couramment utilisé dans les aciers de construction, mais aussi le CET ou le Pcm :

- CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15
- CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40
- Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Mo/15 + V/10 + Ni/60 + 5B

- Le formage : un formage à froid au-delà de 3 % n'est admis que si les tests destructifs sont réalisés sur le matériau de base. Les tests destructifs doivent normalement être effectués avec 5 % de formage à froid. Si les taux de déformation sont plus élevés, l'essai est souvent réalisé avec le taux de déformation réel.

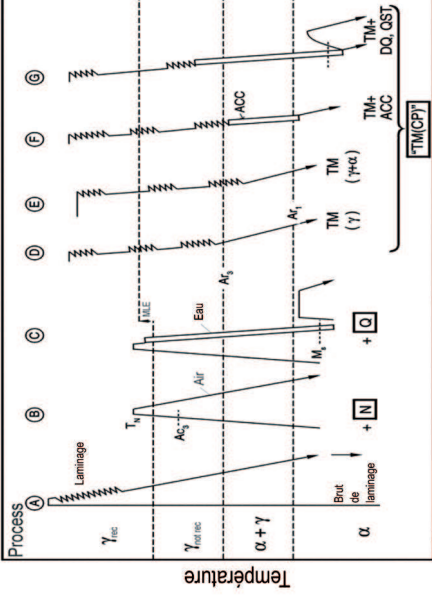


Fig. 1 : Comparaison des différents procédés de fabrication des tôles fortes - Laminage normalisé (A + B), trempé et revenu (A + C), laminage thermomécanique (D à G) / Comparison of various fabrication processes of heavy plates - As rolled (A + B), quenched and tempered (A + C), thermomechanically rolled (D to G)

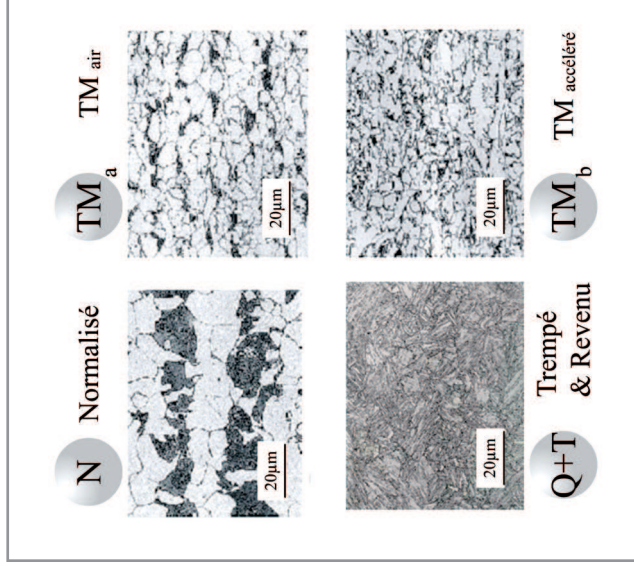


Fig. 2 : Comparaison des microstructures typiques des aciers à l'état normalisé N (process B de la figure 1), trempé et revenu Q + T (process C) et obtenus par laminage thermomécanique TMCP (process D) et TMCP + ACC (accelerated cooling ou refroidissement accéléré) (process F) / Comparison of typical microstructures of steels in the normalized condition (process B in figure 1), quenched and tempered Q + T (process C), thermomechanically rolled TMCP (process D) and TMCP + ACC (+ accelerated cooling) (process F)

Dans le domaine de la construction hydraulique, de nombreux composants nécessitent l'utilisation d'acier, comme par exemple les conduites forcées ou les bifurcations des centrales hydroélectriques ou encore les vannes, les turbines ou les conduites d'aspiration (Photo 2). Des limites d'élasticité jusqu'à 690 MPa sont couramment rencontrées pour des tôles fortes destinées à la réalisation de conduites forcées, avec des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 80 mm. Pour autant, bien que les aciers S690 puissent être mis en œuvre en toute sécurité aujourd'hui, même avec des conditions sur sites difficiles (dans des cavités présentant des niveaux de pente élevés), il peut être parfois intéressant d'utiliser des aciers de limite d'élasticité inférieure qui offrent de meilleures conditions de soudabilité. Cela peut présenter des avantages aussi bien pour le procédé de fabrication qu'en termes de coût et de vitesse de mise en œuvre. Ainsi, les aciers thermomécaniques (TM) jusqu'à 500 MPa sont de plus en plus utilisés pour ces applications.

### 3 LES PROCÉDÉS DE FABRICATION DES TÔLES FORTES

Les tôles fortes peuvent être livrées suivant différents états de livraison, schématisés sur la figure 1 : état normalisé, état trempé-revenu ou état obtenu par laminage thermomécanique [2]. Les microstructures respectivement obtenues sont illustrées, à titre indicatif, sur la figure 2.

Pour les nuances d'acier nécessitant des caractéristiques mécaniques (traction, résilience) peu ou moyennement élevées, un laminage à chaud, suivi d'un traitement de normalisation (ou un laminage normalisant), est suffisant pour obtenir les valeurs mécaniques demandées. Cette filière est utilisée pour des aciers allant jusqu'à S460N. L'opération de laminage est généralement réalisée à des températures élevées (process A de la figure 1). Cette opération de mise en forme conduit la plupart du temps à une structure grossière avec des caractéristiques mécaniques moyennes, qu'il est nécessaire d'améliorer par un recuit de normalisation (process B de la figure 1). Ce traitement thermique, souvent effect-

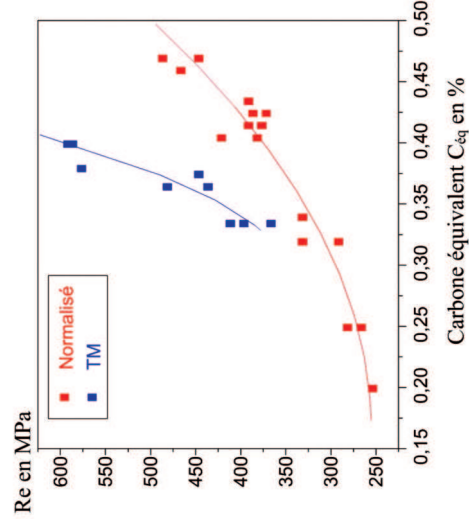


Fig. 3 : Limite d'élasticité en fonction du carbone équivalent CE / Yield strength as a function of equivalent carbon CE

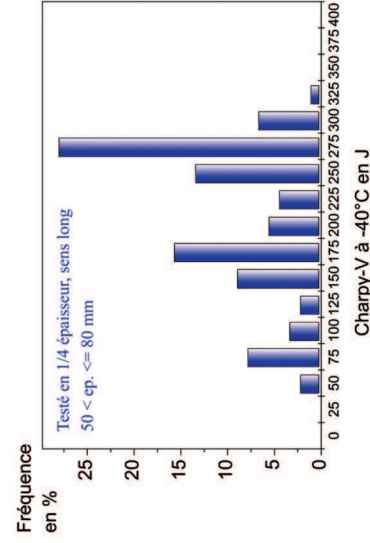


Fig. 4 : Énergies de rupture d'essais Charpy-V d'un acier S500M / Charpy-V impact test values of S500M grade

tué autour de 900 – 910 °C, permet d'assurer une certaine finesse au grain sur le produit final. Le refroidissement se fait à l'air libre. Les propriétés mécaniques des plaques ainsi traitées sont contrôlées par la composition chimique de l'acier et l'épaisseur du produit. Le laminage normalisant est un laminage contrôlé qui procure à l'acier la même structure et les mêmes caractéristiques mécaniques que l'opération décrite précédemment. Les températures de fin de laminage sont, dans ce cas, peu sévères.

La filière de traitement par trempe et revenu conduit à des limites d'élasticité allant jusqu'à 1 100 MPa. Ce traitement thermique (process C de la figure 1) consiste, après austénitisation de l'acier, à le refroidir brutalement (trempe) de façon à créer des structures martensitiques et bainitiques très résistantes mais

également peu ductiles, qu'il est nécessaire d'adoucir par revenu.

L'objectif du laminage thermomécanique (TM ou TMCP) est d'obtenir une structure à grains très fins par un contrôle très précis des différentes phases de laminage et des températures. Les schémas de laminage comportent généralement deux ou trois phases (process D à G), dont les températures de début/fin de laminage et les temps d'attente sont parfaitement maîtrisés. Ces schémas varient en fonction de la composition chimique, des caractéristiques mécaniques requises et de l'épaisseur de la tôle. Pour les tôles épaisses, un refroidissement accéléré après le laminage final est souvent nécessaire.

Le laminage thermomécanique est utilisé aussi bien pour obtenir des caractéristiques mécaniques (traction et résilience) plus élevées qu'après normalisation ou laminage normalisant, mais aussi, pour une nuance donnée, pour réduire les teneurs en carbone et en éléments d'alliage. Le gain qui en résulte en termes de soudabilité est un des principaux avantages des aciers TMCP.

Des tôles laminées thermomécaniquement avec des limites d'élasticité supérieures à 500 MPa ont déjà été livrées jusqu'à des épaisseurs de 100 mm pour la construction hydraulique, les plateformes offshore ou même certains types de navires. Des valeurs jusqu'à 690 MPa peuvent même être obtenues par cette filière, mais avec des épaisseurs plus restreintes.

#### 4 LES ACIERS THERMOMÉCANIQUES

Le principal avantage des aciers thermomécaniques, en comparaison avec des aciers conventionnels de même épaisseur, est leur excellente soudabilité. Celle-ci est caractérisée, d'une part par le préchauffage réduit des tôles d'acier thermomécanique de forte épaisseur (et même sa suppression dans certains cas) avec une réduction significative des temps et des coûts de fabrication, et d'autre part par des valeurs de résilience élevées et des valeurs de dureté faibles dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) après soudage [3].

Ces performances sont dues aux faibles teneurs en alliage (en particulier la teneur en carbone), qui découlent du procédé de fabrication particulier qu'est le laminage thermomécanique. La figure 3 présente les

valeurs de limite d'élasticité pouvant être obtenues en fonction du carbone équivalent CE, soit avec un procédé de laminage TMCP, soit avec un procédé de laminage normal suivi d'un recuit de normalisation.

De par leurs excellentes propriétés mécaniques et propriétés de mise en œuvre, les aciers TM constituent une alternative sûre et efficace aux aciers normalisés ou trempés-revenus pour les centrales hydroélectriques. Une spécification typique d'acier TM pour ces applications, avec des exigences de résilience jusqu'à - 50 °C, est illustrée dans le tableau 1.

Épaisseur de tôle (mm)	Limite d'élasticité minimale $R_{eH}$ (MPa)	Résistance à la traction $R_m$ (MPa)	Allongement à la rupture minimal (%)	Énergie de rupture Charpy - V minimale à - 50 °C (J)
ép. ≤ 16	500	610 - 750	17	30
16 < ép. ≤ 50	490	610 - 750		
50 < ép. ≤ 75	480	600 - 750		

**Remarque :**  $R_{p0,2}$  est mesuré si  $R_{eH}$  n'est pas mesurable. Les essais de flexion par choc (Charpy) sont réalisés dans le sens long.

**Comments :**  $R_{p0,2}$  is measured if  $R_{eH}$  is not. Impact test properties (Charpy) are measured in the rolling direction.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques minimales d'un acier TM de limite d'élasticité 500 MPa (S500ML) / Minimum mechanical properties of a TM steel 500 MPa grade (S500ML)

La composition chimique est déterminée de telle sorte que de faibles teneurs en alliages sont garanties, pour une meilleure soudabilité. Une teneur en carbone égale ou inférieure à 0,09 % peut être obtenue en utilisant de manière limitée des éléments durcissants tels que le nickel ou le cuivre, et en ajoutant des éléments de microalliage.

Épaisseur de tôle	20 mm	60 mm
C	0,08	0,08
CEV <sub>1</sub>	0,43	0,44
CEV <sub>2</sub>	0,44	0,45
CET	0,28	0,28
Pcm	0,21	0,21

Tableau 2 : Valeurs typiques de carbones équivalents des aciers TM S500M en fonction de l'épaisseur de la tôle / Typical equivalent carbon of TM S500M steel plate as a function of thickness

Le tableau 2 indique les valeurs typiques de plusieurs carbones équivalents utilisés pour évaluer la soudabilité de l'acier :

- CEV<sub>1</sub> = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14
- CEV<sub>2</sub> = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15
- CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40
- Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B

Les valeurs obtenues sont similaires aux nuances S355 conventionnelles et donnent une bonne indication de l'excellente soudabilité de ces aciers.

La figure 4 montre la distribution des valeurs d'énergie de rupture sur éprouvettes Charpy-V pour un projet livré avec des exigences minimales d'énergie de rupture de 34 J à - 40 °C dans le 1/4 épaisseur pour une gamme d'épaisseur de tôle comprise entre 50 et 80 mm. Les valeurs réelles de production sont, en moyenne, significativement plus élevées que les valeurs spécifiées, avec pour conséquence une excellente résistance à la rupture fragile. De ce fait, il est possible d'obtenir les niveaux de résilience requis, même après les procédés de mise en œuvre utilisés pour la fabrication des conduites forcées, tels que le formage à froid et le soudage.

## 5 LE SOUDAGE DES ACIERS À HAUTES PERFORMANCES

Les cycles thermiques de soudage ont un effet significatif sur les propriétés mécaniques d'un joint soudé. Généralement, le temps de refroidissement entre 800 °C et 500 °C ( $t_{8/5}$ ) est choisi pour caractériser les

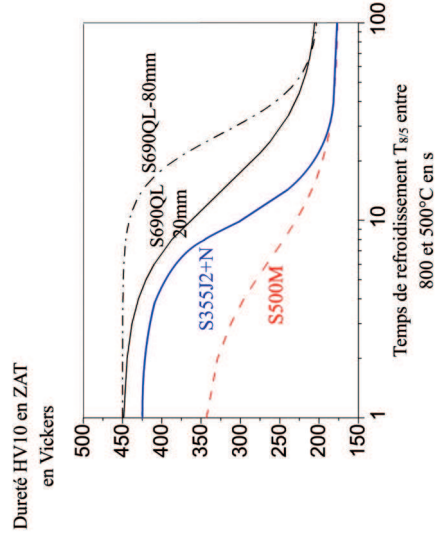


Fig. 5 : Dureté dans la zone à gros grains de la ZAT en fonction du temps de refroidissement  $t_{8/5}$  pour différentes structures d'acier et pour les mêmes conditions de soudage / Hardness in the coarse grain HAZ as a function of the cooling rate  $t_{8/5}$  for different steels types in the same welding conditions

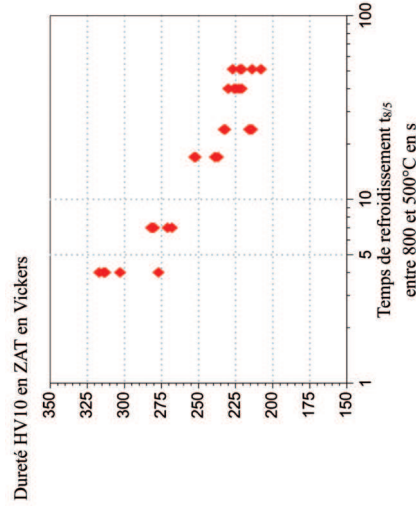


Fig. 6 : Dureté mesurée dans la zone à gros grains de la ZAT en fonction du temps de refroidissement après soudage du S500M, épaisseur 30 mm / Hardness in the coarse grain HAZ as a function of the cooling rate  $t_{8/5}$  for S500M steel, 30 mm thick

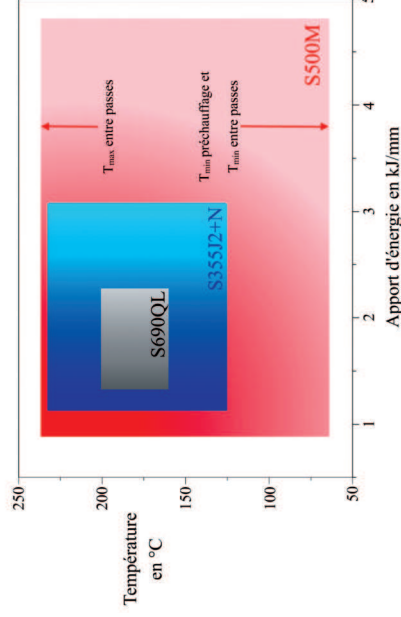


Fig. 8 : Fenêtres typiques de soudage des aciers de construction S355J2+N (80 mm d'épaisseur), S500M (50 mm d'épaisseur), S690QL (30 mm d'épaisseur) / Typical welding windows of construction steels S355J2+N (80 mm thick), S500M (50 mm thick) and S690QL (30 mm thick)

conditions de refroidissement d'une passe de soudage pour le métal de base et la ZAT correspondante. Une augmentation de l'apport de chaleur et de la température entre passes entraîne un refroidissement plus lent et, de ce fait, des temps de refroidissement  $t_{8/5}$  plus longs. Le temps  $t_{8/5}$  peut être déterminé à partir des paramètres de soudage et de la géométrie (EN1011-2:2001 [4])

La détermination de la dureté de la ZAT est le seul test conventionnel permettant de mesurer localement les caractéristiques lors d'un soudage multipasse complexe. Les évolutions de structure, dont les mesures de dureté dans la zone à gros grains du cordon de soudeure permettent d'avoir une estimation, dépendent principalement de la composition chimique, de la vitesse de refroidissement, et du traitement thermique éventuellement réalisé après soudage. Des courbes indiquant la dureté en fonction du paramètre  $t_{8/5}$ , telles que celles présentées dans la figure 5, peuvent être utilisées pour comparer les caractéristiques de transformation de différents aciers.

Afin d'obtenir des caractéristiques satisfaisantes pour le métal soudé, les paramètres de soudage doivent être limités lorsque la limite d'élasticité augmente. Des propriétés satisfaisantes peuvent être normalement obtenues pour l'acier S690 en choisissant des conditions de soudage de telle sorte que la durée de refroidissement  $t_{8/5}$  soit comprise entre 6 et 20 secondes. Dans cet intervalle, la zone à gros grains de la ZAT d'un acier S690Q de 80 mm d'épaisseur se

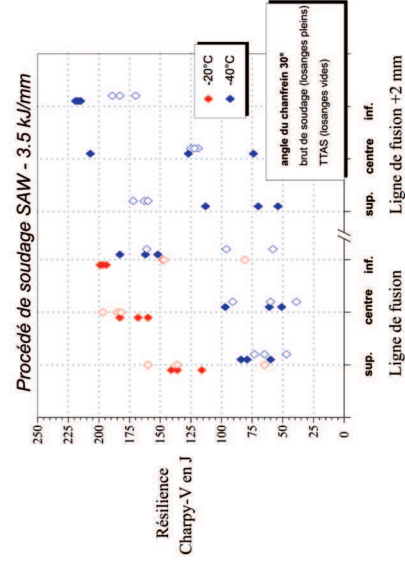


Fig.7 : Énergies de rupture d'essais Charpy-V dans la ZAT après soudage d'un acier S500M / Charpy-V values in the HAZ of S500M steel

transforme principalement en martensite, d'une dureté supérieure à 400 HV. Dans les mêmes conditions, un S690Q de 20 mm d'épaisseur, avec une teneur inférieure en alliage, se transforme en une combinaison de martensite et de bainite d'une dureté d'environ 350 HV. Contrairement aux aciers S690Q, la nuance S500M présente des duretés inférieures à 300 HV, pour toutes les conditions habituelles de soudage. Ceci est dû au fait que la teneur en carbone est nettement inférieure (0,07 % au lieu de 0,17 %) et que la teneur en éléments d'alliage est également limitée. On peut voir sur le tableau 3 que la trempabilité de l'acier S500M est même plus faible que pour un acier conventionnel normalisé S355J2 (0,18 % C – 1,50 % Mn).

	Épaisseur (mm)	CE	CET	P <sub>cm</sub>
S355J2	80	0,44	0,33	0,25
S500M/ML	60	0,44	0,28	0,21
S690QL	20	0,44	0,29	0,24
S690QL	80	0,70	0,39	0,32

Tableau 3 : Valeurs typiques de carbone équivalent caractérisant la trempabilité (CE) et la résistance à la fissuration à froid dans la ZAT (CET) pour différentes nuances et qualités d'acier / Typical carbon equivalents characterising the hardenability (CE) and the HAZ cold cracking resistance (CET) for various steel grades and qualities

La figure 6 montre les résultats de mesures de dureté en ZAT (cordon de soudure) pour l'acier S500M. On peut observer une bonne corrélation avec la courbe correspondante de la figure 5.

Pendant l'opération de soudage, l'apport de chaleur – et donc le temps de refroidissement – doit également être maintenu en dessous d'une certaine valeur. En effet, un apport de chaleur plus élevé augmente la tendance au grossissement des grains, avec pour conséquence une baisse du niveau de résistance et un risque de rupture fragile dans la ZAT. Les valeurs d'énergies de rupture d'essais Charpy-V obtenues à différents endroits dans la ZAT d'un assemblage soudé bout à bout en acier S500M d'épaisseur

30 mm (soudage à l'arc sous flux SAW 3,5 kJ/mm) sont indiquées sur la figure 7. Les résultats des tests dans des conditions brut de soudage sont comparés à ceux obtenus après traitement thermique après soudage (580 °C / 4h).

Un traitement thermique après soudage a une influence mineure sur la résilience. On peut dire qu'un niveau de résilience de 50 J à - 40 °C peut facilement être atteint, même avec des apports d'énergie importants de 3,5 kJ/mm, ce qui permet au fabricant d'appliquer des techniques de soudage à haute performance et donc de réduire le temps de travail.

La figure 8 compare les domaines de travail typiques pour le soudage de plusieurs aciers de limites d'élasticité différentes. La valeur minimum d'apport en énergie est fixée de façon à limiter la fissuration à froid induite par l'hydrogène. La valeur maximale de l'apport d'énergie et celle de la température entre passes sont fixées pour optimiser les propriétés mécaniques (traction et résilience). On peut voir que le domaine de travail des aciers HLE S690 est fortement réduit de façon à obtenir des valeurs de traction suffisantes dans la soudure. L'acier TM présente, de loin, le plus large domaine de travail, ce qui permet d'utiliser des procédés de soudage performants [5].

Pour les conduites forcées et les tubes de construction destinés aux plateformes offshore, les tôles sont généralement pliées dans le sens travers et sont soudées dans le sens long. La résilience de l'acier est influencée par le formage à froid, et ce, d'autant plus si la zone formée à froid est ensuite chauffée, comme c'est le cas avec l'opération de soudage. Ce phénomène peut être simulé par des tests de mise sous contrainte et de vieillissement artificiels. La figure 9 présente les courbes de transition Charpy-V d'un acier S500M dans les conditions de livraison et après l'application d'une déformation de 5 % et d'un vieillissement artificiel à 250 °C. Il est clairement démontré que la courbe de transition Charpy-V est déplacée vers les températures plus élevées si la tôle subit une déformation à froid, et qu'elle se déplace à nouveau dans le même sens si cette opération est suivie d'un vieillissement artificiel. Cependant, même sous ces conditions d'utilisation très sévères, les valeurs de résilience restent excellentes, ce qui indique un très bon comportement au formage à froid.

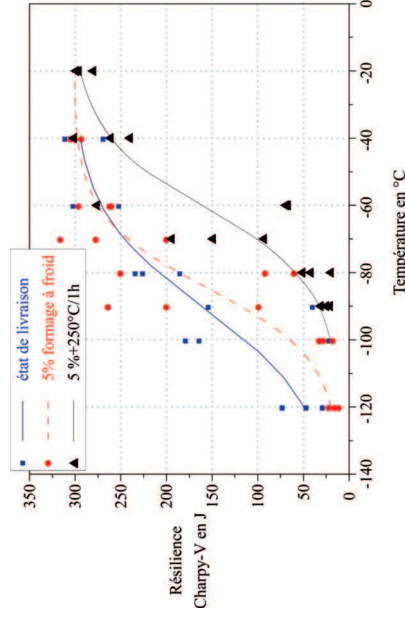


Fig. 9 : Évolution des valeurs d'essai de flexion par chocs du S500M après vieillissement / Impact test properties evolution after ageing of S500M

bilité était un critère essentiel pour un assemblage optimal de la conduite et de la bifurcation. Les aciers de construction thermomécaniques à grains fins de limite d'élasticité 355 et 460 MPa ont donc été utilisés. Des tôles fortes allant de 15 à 120 mm ont été livrées. Une tôle en acier trempé et revenu de limite d'élasticité 690 MPa (Dillimax 690) d'épaisseur 210 mm avec des propriétés de déformation Z35 a également été utilisée pour la bifurcation.

– Société d'exploitation : Nordostschweizerische Kraft NOK.

### 6.3 LE PROJET « ALPHA VENTUS » (PHOTOS 6, 7 ET 8)

Le parc d'éoliennes offshore « Alpha ventus » a été construit à 45 km au nord de l'île de Borkum dans la mer du Nord, au large des côtes allemandes. On peut considérer que c'est le premier projet d'éoliennes véritablement « offshore », c'est-à-dire implantées en pleine mer et non au large des côtes. L'expérience acquise grâce à ce projet de référence, sera mise à profit pour les futures installations d'exploitation commerciales. Afin de pouvoir réaliser ce projet hors norme, la société Deutsche Offshore Testfeld – und Infrastruktur GmbH & Co KG (DOTI) a été créée. Au total, douze éoliennes de 5 MW chacune ont été implantées, les plus grandes et les plus puissantes jamais construites dans l'industrie du vent. Les éléments de fondation, appelés « tripodes » pèsent 700 t et mesurent 45 m de haut. Ils sont positionnés sur des pieux de 30 m de haut.

## 7 CONCLUSION

À travers cet article, une vue d'ensemble des aciers de construction à hautes performances et de leurs utilisations dans l'industrie offshore et la construction hydraulique a été donnée. Les différences entre les états de livraison ont été explicitées et les particularités des aciers thermomécaniques ont été détaillées. Le niveau de performance des matériaux disponibles à l'heure actuelle a été illustré à travers des résultats d'essais et des graphiques. Des tôles fortes en acier jusqu'à 690 MPa de limite d'élasticité sont déjà utilisées pour les conduites forcées et certains composants offshore. Toutefois, certains grades d'acier de limite d'élasticité plus faible, par exemple l'acier S500M, peuvent apporter des avantages considérables du fait de leurs excellentes propriétés de mise en œuvre, notamment concernant le soudage. Ainsi, il est possible de réaliser des opérations de soudage sécurisées, même dans des conditions sur site difficiles.

## 6 EXEMPLES D'OUVRAGES INNOVANTS UTILISANT DES TÔLES À HAUTES PERFORMANCES

### 6.1 LA CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE DE KÁHRANJÚKAR (PHOTOS 3 ET 4)

Les deux conduites forcées verticales de 420 m de long qui sont au cœur de ce projet situé dans l'est de l'Islande sont, à ce jour, les plus hautes du monde. Leur diamètre intérieur est de 3,4 m. Pour la construction des conduites forcées, les constructeurs (DSD Noell) ont opté pour les aciers thermomécaniques en raison de leur excellente soudabilité. Trois nuances d'acier thermomécanique de marque DI-MC ont été utilisées pour réaliser la plupart des pièces nécessaires pour cet ouvrage exceptionnel : DI-MC 355, DI-MC 420 et DI-MC 460. Des épaisseurs allant jusqu'à 102 mm ont été livrées. Les éléments exigeant une résistance plus élevée ont été réalisés avec un acier trempé et revenu, le Dillimax 690 jusqu'à des épaisseurs de 150 mm.

- Maître d'ouvrage : Landsvirkjun,
- Entreprisse générale : Fosskraft, consortium de Hochtief, Pihl & Sön, Istak, Íslenskir aðalvirktakar.

### 6.2 LE PROJET NESTIL (PHOTO 5)

En vue de l'extension de la centrale hydroélectrique de Tierfehd, située dans la vallée de Linth dans le canton suisse de Glaris, une nouvelle conduite forcée a été ajoutée. Pour cela, il a fallu également intégrer une nouvelle bifurcation dans la conduite forcée déjà en place, dont la hauteur atteint 1 200 m. La centrale Tierfehd est désormais en mesure de réagir rapidement à une variation des besoins en énergie et de répondre aux pics d'énergie. Une excellente aptitude à la souda-



Photo 3 : Centrale hydroélectrique de Káhranjúkar en Islande. Soudage en atelier d'une bifurcation en S420, S460, S690 / Iceland Káhranjúkar hydroelectrical power plant. Shop welding of a bifurcation, S420, S460, S690



Photo 4 : Centrale hydroélectrique de Káhranjúkar en Islande. Soudage sur site d'une bifurcation S420, S460, S690 / Iceland Káhranjúkar hydroelectrical power plant. Site welding of a bifurcation, S420, S460, S690



Photo 5 : Projet de conduite forcée Nestlé en Suisse, Bifurcation S460 et S690 Z35 / Swiss Nestlé project penstock, S460 and S690 Z35 plates for a bifurcation



## 8 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme européenne NF EN 10025:2005, « Produits laminés à chaud en aciers de construction »
- [2] « Propriétés d'emploi des tôles fortes en acier », M. LaFrance, Revue de métallurgie, novembre 2000
- [3] F. Schröter, « Steels for modern steel construction and offshore applications », 10th Nordic Steel Construction Conference, Copenhagen, juin 2004
- [4] Norme européenne EN 1011-2 :2001, « Welding – Recommendations for welding of metallic materials », annexe D
- [5] F. Hanus, F. Schröter, W. Schutz, « State of the art in the production and use of high-strength heavy plates for hydropower applications », High strength steel for hydropower plants, juillet 2005, Graz



Photos 6 et 7 : Projet éolien offshore « Alpha Ventus » en Allemagne. Embase tripode et fût. Préfabrication et transport. / Offshore project in Germany. Basement and mast. Prefabrication and transportation.