

# Un facteur d'économie trop méconnu : l'Acier à haute limite élastique résistant à la corrosion

par C. SCAILTEUR,  
Ingénieur à la S. A. Cockerill-Ougrée.

La lutte contre la corrosion atmosphérique ne semble pas avoir retenu, autant qu'elle le mérite, l'attention de nos milieux industriels.

Depuis de longues années pourtant, les milieux scientifiques britanniques, français, hollandais, belges, ont attribué une grande importance à ce problème et ont constitué une véritable équipe de travail.

Dans ces recherches, menées principalement par les chimistes des divers pays, il semble naturel que l'orientation tende plus spécialement vers les moyens de protection, soit par peintures à base des pigments les plus variés, soit par revêtements métalliques à base d'aluminium, de zinc, d'étain, de nickel, de cadmium ou de plomb, ou enfin, plus récemment, à base de résines et substances plastiques.

Dans le domaine qui nous préoccupe, cette protection par revêtement, si elle convient parfaitement pour les constructions métalliques fixes, apparaît par contre souvent insuffisante dans les constructions soumises à des efforts localisés de vibrations, de chocs, d'impacts divers.

A titre d'exemple, nous citerons les ossatures et revêtements de véhicules sur rails et sur routes, les engins de travaux publics, les appareils de manutention dans la mine : berlines, chaînes à godets, couloirs transporteurs, couloirs oscillants, norias, tamis, trémies, etc....

Dans ces applications, les conditions d'utilisation entraînent fréquemment la rupture ou l'arrachement local du revêtement protecteur. De ce fait, la corrosion prend naissance en certains endroits et, si le métal de base n'est pas résistant à la corrosion, il y a un grave danger de voir l'ouvrage périr ou tout au moins se détériorer profondément et rapidement en certains points où finalement cet effet destructeur s'accroît suivant un phénomène souvent constaté.

A notre avis, l'exploitant est actuellement enclin à subir d'une façon trop passive ces méfaits comme un mal inévitable qui lui paraît n'avoir trop souvent d'autres palliatifs que la réparation locale du dommage et le remplacement de son matériel à une cadence plus ou moins rapide.

Quelles sont les raisons de ce désintéressement relatif? Nous pensons qu'elles doivent être recherchées, non tant dans l'attrait des solutions de facilité, la routine ou le souci de réduire au maximum les frais d'investissements en matériel neuf, mais plutôt dans l'ignorance de ce que coûtent, en fait, au pays, les méfaits de la corrosion.

Subissant cette loi commune, nous avons été étonnés de constater à quel point, aux États-Unis — et cela depuis plus de 20 ans —, cette question est à l'ordre du jour et apparaît comme un souci constant, objet des recherches les plus attentives. Ces dernières, axées sur la qualité de l'acier, sont menées parallèlement à celles citées plus haut, orientées, elles, vers les moyens de protection extérieurs.

Les organismes officiels de tous genres, puissamment aidés par les métallurgistes, se sont penchés sur le problème et les statistiques y fourmillent, qui sont de nature à faire réfléchir les plus incrédules.

Le lecteur ne nous en voudra pas de citer quelques chiffres :

Les résultats publiés en 1949 montrent que, pour les États-Unis, la corrosion atmosphérique a coûté annuellement plus de 2 milliards de dollars et, dans ce total monstrueux, le matériel roulant des compagnies de chemins de fer figure à lui seul pour plus de 10 %.

En 1950, l'American Association of Railroads estimait à 199.000.000 \$ la part des réparations nécessitées par les méfaits de la corrosion. Le même organisme a publié l'année dernière les chiffres de 1953 d'où nous extrayons que, sur un total de frais de réparations de 631.414.135 \$, 210.471.000 \$ représentent des réparations nécessitées par la seule corrosion atmosphérique.

Les matériels qui souffrent le plus sont, comme il fallait s'y attendre, les wagons trémies et les wagons ouverts, pour lesquels 58 à 64 % du montant total des frais de réparation sont provoqués par la corrosion.

Si l'on veut bien retenir l'incidence favorable de l'emploi étendu des aciers anti-corrosion dans la construction du matériel de chemins de fer aux

Etats-Unis (actuellement plus de 80 %), on se rendra compte de l'importance qu'atteindraient les chiffres cités plus haut avec nos aciers de construction courants : ils seraient au minimum doublés comme nous le montrerons plus loin.

Ce préambule nous amène à examiner le problème sous l'angle plus particulier du matériel de mines pour la manutention et le transport du charbon.

Dans ce domaine, lutter contre la corrosion par le choix du matériau de base : acier ou alliage léger, n'a de sens qu'à la condition de pouvoir utiliser un matériau relativement bon marché et de mise en œuvre aisée, et c'est encore et toujours vers l'acier que les recherches se sont orientées d'abord.

Parmi les nombreuses formules proposées, les métallurgistes ont retenu essentiellement les aciers faiblement alliés à haute limite élastique, résistant à la corrosion, susceptibles d'être produits économiquement; parmi ceux ayant prévalu sur le marché mondial, nous nous étendrons sur l'acier « COR-TEN » produit par United States Steel Corp. et dont la Société Anonyme John Cockerill avait acquis la licence depuis plusieurs années déjà.

Il est produit dans cette Société par le procédé Thomas-oxygène, aussi bien que par le procédé Siemens-Martin.

Cet acier est également produit en Angleterre, en Italie, et bientôt en France.

Il se classe dans la catégorie suivante :

« Aciers auxquels une quantité modérée d'éléments d'alliage a été ajoutée dans le but d'obtenir à l'état de produits laminés à chaud une limite élastique minimum d'environ 50.000 lbs/sq. in. (35 kg/mm<sup>2</sup>) dans les épaisseurs de 1/2" et moins et pour lesquels l'expérience indique qu'il y a lieu

» de compter sur une résistance à la corrosion atmosphérique de quatre à six fois supérieure à celle de l'acier doux ».

Cette définition un peu longue, mais complète, fut donnée il y a plus de 20 ans par la United States Steel Corp. et, à ce jour, plusieurs millions de tonnes de cet acier utilisé dans le monde entier en ont prouvé la justesse.

Le tableau I donne la composition chimique de cet acier, ainsi que ses principales propriétés mécaniques minima. Quelques observations s'imposent : les teneurs en phosphore, silicium, chrome et cuivre, qui sont les éléments déterminants de cette augmentation considérable de la résistance à la corrosion atmosphérique, contribuent à l'obtention des propriétés mécaniques élevées de cet acier.

Le nickel n'est pas indispensable et n'a été ajouté à la formule initiale que pour faciliter le laminage des bandes à chaud avec un bel aspect de surface. La teneur en carbone est volontairement choisie très basse dans le but d'assurer de bonnes propriétés de formage à froid et de soudabilité.

La mise en œuvre de cet acier ne pose pas de problèmes particuliers, comme le prouvent plusieurs milliers de tonnes déjà utilisées en Belgique depuis 4 ans par divers constructeurs spécialisés en matériel ferroviaire, routier, fluvial, minier, etc...

En particulier, en soudure à l'arc jusqu'à 12,5 mm d'épaisseur, le constructeur peut utiliser les mêmes électrodes enrobées et le même mode opératoire qu'avec l'acier doux classique. Le durcissement de la zone influencée est suffisamment faible pour ne pas nécessiter de préchauffe ni de recuit de détente après soudure. La résistance à la corrosion atmosphérique d'un tel joint soudé a été prouvée par des

Tableau I

Composition chimique (en %) et propriétés mécaniques de l'acier COR-TEN.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni
0,12 max.	0,20/0,50	0,07/0,15	0,05 max.	0,25/0,75	0,25/0,55	0,30/1,25	0,65 max.
Epaisseur mm	Résistance à la traction minim. kg/mm <sup>2</sup>	Limite élastique minim. kg/mm <sup>2</sup>	Allongement minimum en %		Pliage à froid à 180° Diamètre du mandrin		
			Lo = 50 mm	Lo = 200 mm			
1,2 à 4,75	49	35	22		1 fois l'épaisseur 1 fois l'épaisseur		
4,76 à 12,5	49	35	22	$\frac{1050}{R_t}$			

Le tableau II rappelle quelques caractéristiques intéressantes pour le calcul et la mise en œuvre.

Tableau II  
Caractéristiques intéressant les bureaux d'études.

Résistance à la corrosion atmosphérique ... ..	4 à 6 fois celle de l'acier au carbone
Limite élastique à la compression ... ..	égale à la limite élastique à la traction
Résistance au cisaillement ... ..	égale aux $\frac{3}{4}$ de la résistance à la traction
Module d'élasticité kg par mm <sup>2</sup> ... ..	20.000 à 21.000
Limite de fatigue kg par mm <sup>2</sup> ... ..	30
Résilience Charpy (entaille forée) à température ambiante kgm/cm <sup>2</sup> ...	11
Coefficient de dilatation par ° C entre 20° et 100 ° C ... ..	0,0000114

RECOMMANDATIONS POUR LE FORMAGE A FROID

*Epaisseur des produits*

*Valeur minimum recommandée pour le rayon intérieur*

inférieure ou égale à 1,6 mm  
comprise entre 1,6 et 6,3 mm  
comprise entre 6,3 et 12,5 mm

$r = e$   
 $r = 2 e$   
 $r = 3 e$

Pour les épaisseurs supérieures à 6,3 mm, il est recommandé d'adopter le formage à chaud.

expositions, durant près de dix années, dans diverses atmosphères. La soudure à l'arc sous flux est également employée avec succès. Quant à la soudure par points, il est de pratique courante aux U.S.A. de l'employer sans préchauffe ni post-chauffe pour des épaisseurs jusque 3 mm.

La résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion atmosphérique a été mise en évidence, en exposant pendant de nombreuses années (près de 20 ans) des échantillons d'acier dans divers centres de recherches implantés en atmosphères rurales, marines et industrielles.

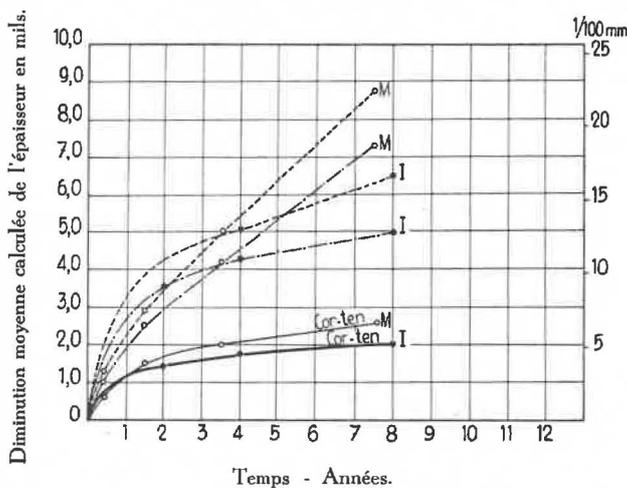


Fig. 1. — Courbes temps-corrosion de trois aciers en atmosphères marine et industrielle.

- Acier S.M. (0,04 % Cu).
- - - - - Acier S.M. (0,20 % Cu).
- Acier à haute résistance et faiblement allié.
- o - M Atmosphère marine à une distance de 800' (244 m) de l'Océan-Kure Beach N. C.
- - I Atmosphère industrielle — Kearny N. J.

N.B. — 1 Mil. = 0,001 pouce ou 0,0254 mm.

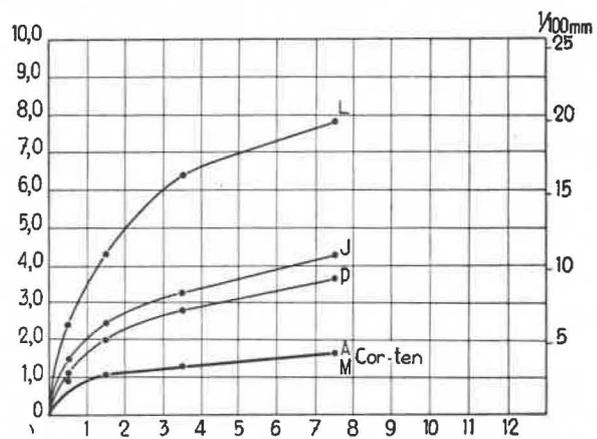


Fig. 2. — Courbes temps-corrosion d'aciers dans une atmosphère industrielle à Kearny, N. J.

Exposés le 29 octobre 1942. J. et L. sont, respectivement, des aciers de construction au cuivre et au carbone. Les autres sont des aciers à haute résistance et faiblement alliés (compositions dans le tableau figurant en dessous de la figure 3).

Les diagrammes des figures 1, 2, 3 et 4 illustrent les résultats obtenus dans la première décade. Ils sont extraits des résultats globaux publiés dans Cor-

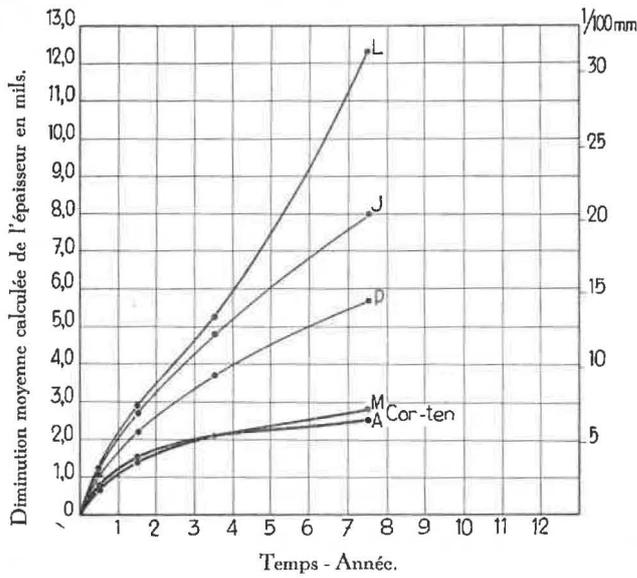


Fig. 3. — Courbe temps-corrosion d'aciers dans une atmosphère marine à Kure Beach, N. C.

Exposés le 14 novembre 1942. J. et L. sont, respectivement, des aciers de construction au cuivre et au carbone. Les autres sont des aciers à haute résistance et faiblement alliés. (Composition au tableau ci-dessous).

Compositions d'aciers exposés à Kearny et Kure Beach. Pour cent (voir fig. 2 et 3).

Identification	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
A*	0,09	0,24	0,15	0,024	0,80	0,43	0,05	1,1
M** Cor-Tern	0,06	0,48	0,11	0,050	0,54	0,41	0,51	1,0
P*	0,23	1,5	0,018	0,021	0,19	0,29	0,04	0,08
J**	0,19	0,52	0,008	0,059	0,01	0,29	0,05	0,05
L**	0,16	0,42	0,013	0,021	0,01	0,02	0,02	0,01

\* Aciers à haute résistance et faiblement alliés.

\*\* Aciers de construction au carbone et au cuivre.

rosion Magazine — août 1953, par C.P. Larrabee (U.S.S. Corp.), sous le titre : « Corrosion Resistance of High Strength Low-Alloy Steels as Influenced by Composition and Environment ».

Ils montrent l'évidente supériorité de cet acier, tant sur l'acier ordinaire que sur l'acier au cuivre, et confirment bien la règle approximative adoptée par certaines compagnies de chemins de fer européennes, à savoir qu'une tôle d'acier ordinaire de

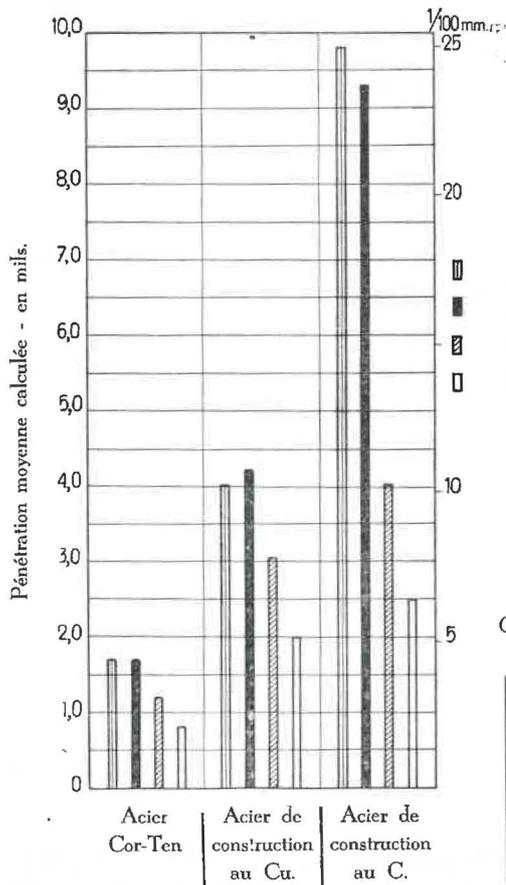


Fig. 4. — Corrosion comparée de trois aciers dans quatre atmosphères. 3, 5 ans d'exposition. (Composition au tableau ci-dessous).

- ▨ Atmosphère marine — Kure Beach N. C.
- Atmosphère industrielle — Kearny N. J.
- ▤ Atmosph. semi-rurale — South Bend P. A.
- Atmosphère rurale — Truitsburg, P. A.

Compositions d'aciers exposés dans des atmosphères marine, industrielle, semi-rurale et rurale — Pour cent.

Types d'acier	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
Acier Cor-Ten	0,08	0,49	0,09	0,028	0,63	0,44	0,46	0,92
De construction au Cu.	0,20	0,46	0,005	0,034	0,005	0,25	—	0,04
De construction au C.	0,23	0,40	0,005	0,017	0,005	0,020	0,04	0,05

wagon perd par année et par face 5/100 de mm d'épaisseur par corrosion, se trouvant ainsi réduite en 10 ans de 1 mm, dans les conditions les plus défavorables.

#### La limite élastique

La limite élastique de cet acier dépasse 35 kg/mm<sup>2</sup>, supérieure ainsi de 50 % environ à celle d'un acier doux ordinaire. Cet acier présente donc une résistance nettement plus grande aux déformations dues à la charge, aux chocs, tamponnements, éboulements, etc... Elle permet encore un allègement important du matériel.

#### La résistance à l'abrasion

Des essais comparatifs ont été faits dans des goulottes de chargement de péniches à coke réalisées en diverses nuances d'acier et dans lesquelles on a fait passer successivement des lots pesés de 100.000 tonnes de coke.

Les résultats obtenus ont montré que, dans ce cas d'abrasion sèche, pratiquement exempte de corrosion, si l'on affecte à l'acier ordinaire la valeur 1 comme facteur de résistance à l'abrasion, l'acier COR-TEN atteint le coefficient 1,35 qui n'est atteint qu'avec des aciers, avec ou sans cuivre, contenant environ 0,35 % de carbone.

#### Application au matériel de mines

On conçoit qu'il ait été possible de réaliser, dans des conditions d'ailleurs variées, un matériel de mines (berlines, couloirs, godets de chaînes, trémies, tamis, cribles, etc...) profitant de l'ensemble de ces qualités.

L'application la plus importante nous paraît être la berline de mines, ce matériel étant peut-être de tous les équipements industriels connus, celui qui est soumis au travail le plus dur et le plus brutal, et qui est le plus exposé.

L'acier COR-TEN apportera les avantages, à épaisseurs égales, d'une meilleure résistance à la corrosion et d'une meilleure résistance aux chocs, déformations, formation de ventre, due à la haute limite élastique de l'acier.

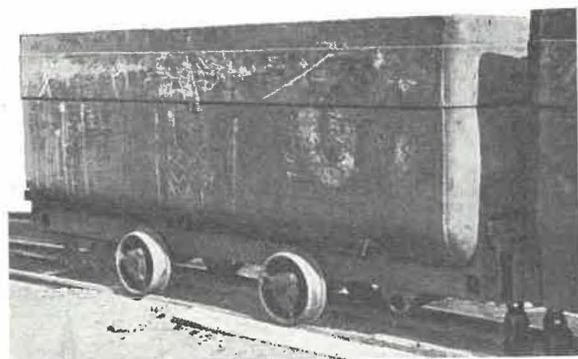


Fig. 5. — Berline en acier Cor-Ten de 1900 litres, après quatre années de service intensif.

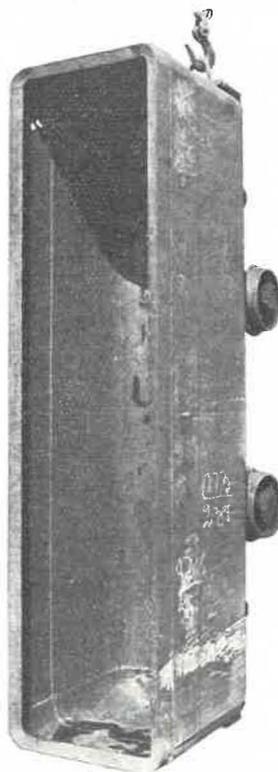


Fig. 6. — Vue intérieure de la même berline qu'à la figure 5, montrant les effets réduits de la corrosion après quatre années de service.

Un cas type de réalisation de ce genre est illustré par les figures 5 et 6.

Les berlines de l'espèce, en service dans une mine campinoise, ont été exécutées, caisse et longérons, avec des tôles en acier COR-TEN de même épaisseur que celles qui étaient prévues pour l'acier ordinaire.

Examinées après trois ans d'un service particulièrement dur, elles n'ont montré aucune trace de déformation systématique (ventre). Un premier lot de 500 berlines sur 1.120 en service ont pu être ultérieurement rehaussées de 200 mm, ce qui a porté leur capacité de 1.500 à 1.900 litres, et cela sans aucune difficulté, le bordé supérieur étant réutilisé (fig. 5).

Les figures 5 et 6 montrent la tenue de ces caisses à la corrosion et l'absence de déformations après quatre années de service.

Nous citons ci-dessous un exemple typique de réalisation de ce genre, aux U.S.A.

Une compagnie minière construit une berline de 2.700 kg, avec une capacité de 6.700 litres, pour remplacer la berline en acier ordinaire, pesant 2.050 kg et d'une capacité de 3.850 litres. Le même tonnage fut ainsi assuré par un parc de 200 berlines nouvelles remplaçant 344 berlines anciennes mises hors service. Le poids mort rapporté au litre de capacité tombant de 530 g/litre à 400 g/litre, soit une réduction de 25 %.

Ainsi, non seulement le parc fut réduit de 144 berlines, mais encore le poids mort fut diminué de quelque 160 tonnes.

#### *Entretien*

L'acier COR-TEN se travaille comme un acier ordinaire.

Il est soudable à lui-même et à toute autre nuance d'acier, avec les électrodes enrobées classiques, utilisées pour les aciers doux.

De telles soudures (à l'arc) présentent une résistance et une limite élastique au moins équivalentes à celles de l'acier de base; leur tenue à la corrosion reste excellente et n'est jamais un point faible des assemblages soudés devenus classiques.

Cet acier présente une excellente aptitude au formage à froid et se prête à l'exécution des caisses, châssis, longerons et traverses.

Nous signalerons, pour terminer, l'heureuse répercussion qu'a eue, dans le domaine de la production de cet acier, le nouveau procédé d'élaboration de l'acier Thomas par le soufflage à l'air suroxygéné.

Les expériences menées depuis deux ans sur le plan industriel ont permis de produire l'acier COR-TEN à partir de ce nouveau procédé et, par voie de conséquence, d'offrir un produit contrôlé de très haute qualité à un prix nettement compétitif.

---