

Les ressources

NOTE D'INFORMATION

ACIERS AUTOPATINABLES

**Recommandations pour leur utilisation
en structure des tabliers des ponts et passerelles**
Édition 2023

PRÉSENTATION

L'acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique, dit acier autopatinable et également souvent désigné par le terme « patinable » ou par l'une de ses marques commerciales (Corten, Indaten®, Diweten® ou Arcorox®, etc.), présente l'avantage de ne pas nécessiter l'application d'un système de protection anticorrosion car il possède la particularité de se couvrir d'une couche de patine qui le protège de la corrosion.

Parce qu'il permet de se passer de mise en peinture, cet acier présente de nombreux avantages en termes de développement durable, d'hygiène et sécurité des personnes ainsi que de contraintes et de coûts de maintenance. Ceci explique le développement de son utilisation dans la conception des ouvrages d'art en France depuis les années 2000.

Compte tenu de l'absence de revêtement anticorrosion, les structures en acier autopatinable doivent respecter un certain nombre de prescriptions relatives à la conception, la mise en œuvre et l'inspection afin de garantir leur durabilité.

L'utilisation des aciers autopatinables dans les ouvrages d'art fait l'objet de recommandations en France depuis 1982 et celles-ci ont été révisées une première fois en 2015 dans la note d'information n°2 Cerema-UGE. La nouvelle version de cette note prend en compte les évolutions normatives récentes et apporte des précisions concernant les dispositions à prendre vis-à-vis de la fatigue et des environnements des ouvrages.

Apparu à la fin des années 1960 dans les ouvrages d'art, l'acier autopatinable fait l'objet d'un réel engouement depuis une vingtaine d'années du fait de ses avantages. En effet, l'absence de peinture limite ou supprime les contraintes de mise en œuvre, les coûts de maintenance ainsi que la production de déchets liés à la protection anticorrosion des ouvrages.

L'emploi de cet acier dans les ouvrages d'art nécessite cependant le respect de règles strictes concernant la conception et la mise en œuvre afin d'assurer la formation d'une patine protégeant efficacement l'acier. Le comportement vis-à-vis de la corrosion doit par ailleurs être suivi par des inspecteurs ayant des connaissances et une expérience de ce matériau.

La note d'information n°2 parue en 2015 est mise à jour pour intégrer les apports suivants :

- des recommandations relatives à la prise en compte de la fatigue dans les ouvrages afin de garantir leur pérennité ;
- la mise à jour du corpus normatif concernant les aciers autopatinsables ;
- des précisions sur l'environnement des ouvrages, leur conception, leur exécution et l'inspection.

La présente note s'appuie sur la norme matériaux NF EN 10025-5:2019 [1], la norme d'exécution des structures métalliques NF EN 1090-2:2018 [2], la norme de conception NF EN 1993 [3] (en particulier sa partie 1-9:2005 pour le calcul à la fatigue) ainsi que sur les retours d'expérience acquis par toute la profession sur le sujet.

Elle détaille les préconisations de conception, de mise en œuvre ainsi que d'inspection des tabliers de ponts et passerelles en acier autopatinable. Elle est établie à partir des connaissances disponibles sur le sujet à sa date de parution.

SOMMAIRE

1 ■ Généralités	p 4
2 ■ Prise en compte de l'environnement de l'ouvrage	p 6
3 ■ Dispositions assurant la durabilité	p 9
4 ■ Approvisionnement des aciers	p 15
5 ■ Exécution de la structure	p 17
6 ■ Traitement de surface	p 18
7 ■ Transport et mise en place <i>in situ</i>	p 19
8 ■ Entretien et inspections	p 19

1 • GÉNÉRALITÉS

1.1 - Portée de la note

Cette note d'information précise les limites d'utilisation de l'acier autopatinable et détaille les dispositions essentielles qui doivent être mises en œuvre sur les tabliers de ponts et de passerelles.

Ce document vient compléter la réglementation en vigueur pour les structures métalliques : l'Eurocode 3 [3], l'Eurocode 4 [4], la norme NF EN 1090-2 [2] et le fascicule 66 [5] du Cahier des Clauses Techniques Générales (C.C.T.G.).

Il porte sur les ouvrages à structure métallique à poutres sous chaussée, y compris ceux à poutrelles enrobées ou à caissons. Par expérience, l'acier autopatinable est particulièrement bien adapté à ces ouvrages très courants, en particulier aux caissons qui ne présentent pas de surfaces horizontales susceptibles d'accumuler les polluants et qui sont plus facilement visitables.

D'autres structures peuvent être envisagées moyennant la prise en compte des spécificités de l'acier autopatinable mais pour certaines, comme les dalles orthotropes, leur emploi est à envisager avec précaution compte tenu du faible retour d'expérience disponible. En milieu fermé, à l'intérieur des caissons, il n'y a cependant pas de risques particuliers à redouter pour ce type de dispositions.

Si une application de protection anticorrosion est décidée, qu'elle soit totale ou partielle, elle doit être exécutée conformément au fascicule 56 du C.C.T.G. [6] Cependant, les garanties prévues par ce fascicule ne s'appliquent pas, les aciers autopatinsables étant exclus de son champ d'application (commentaires de l'article 1.1 du fascicule 56).

Suite à des dégradations graves survenues sur des équipements de la route, la Directive de 1985 [7] proscrivait l'acier autopatinable pour cette utilisation. En l'état actuel des connaissances, il apparaît nécessaire de maintenir cette interdiction.

Enfin, bien que les retours d'expérience internationaux et les règlements [8] ne fassent pas mention de défaillances liées à la fatigue sur des structures

en acier autopatinable et que les essais réalisés sur le sujet [9], [10] permettent d'être optimiste, il convient de conserver une certaine prudence pour son utilisation dans le cadre d'ouvrages considérés comme stratégiques afin de garantir une bonne formation de la patine et ainsi la pérennité de l'ouvrage à long terme.

1.2 - Principales modifications

Les principales modifications apportées à la note d'information ouvrages d'art n°2 de 2015 concernent les points suivants :

- mise à jour du corpus normatif, en particulier concernant les produits disponibles ;
- précisions relatives à la fatigue des aciers autopatinsables du point de vue de la conception et de la surveillance ;
- précisions relatives aux atmosphères des ouvrages, en particulier pour ce qui concerne la teneur en dioxyde de soufre de l'environnement et la végétation aux abords de l'ouvrage ;
- précisions relatives à la conception et l'exécution des structures ;
- ajouts relatifs à l'inspection des ouvrages.

1.3 - Rappels sur les aciers autopatinsables

Selon la norme NF EN 10025-5 [1], l'acier autopatinable est un acier auquel un certain nombre d'éléments d'alliage, tels que phosphore, cuivre, chrome, nickel ou molybdène ont été ajoutés afin d'accroître la résistance à la corrosion atmosphérique par la formation d'une couche auto protectrice d'oxydes sur le métal de base sous l'influence de bonnes conditions atmosphériques. Cette couche auto protectrice compacte et adhérente appelée patine présente une coloration qui varie de l'orange au brun très foncé en fonction de la durée d'exposition, de la composition chimique de l'acier et de l'environnement¹.

La patine se forme lorsque l'acier est soumis à des cycles alternant humidité et séchage. Cette protection réduit progressivement la vitesse de corrosion de l'acier jusqu'à des valeurs négligeables.

1 La couleur ne peut être maîtrisée par le sidérurgiste ou le constructeur métallique et ne peut donc pas faire l'objet d'un critère à atteindre.

Contrairement à l'acier conventionnel, l'acier autopatinable est donc en mesure de s'auto-protéger vis-à-vis de la corrosion atmosphérique et peut être utilisé à l'état nu dans les structures d'ouvrages d'art ou de bâtiments².

La présence d'humidité persistante à la surface de l'acier peut conduire à une dégradation des performances de la patine. Il est donc important de mettre en œuvre des règles de conception visant à limiter les stagnations d'eau. La figure 1 illustre la mise en œuvre de dispositions constructives prévues par la note d'information de 2015 sur un ouvrage dans le but de protéger les abouts de la structure.

Afin de tenir compte du retour d'expérience des premières réalisations, la construction des ouvrages d'art en acier autopatinable sur le réseau

des routes nationales a commencé à être encadrée par la lettre du Directeur des Routes du 26 septembre 1985 « Recommandations relatives à l'utilisation d'aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique » [7].

Au cours des années 1980, de nouvelles études ont été menées dans différents pays afin de déterminer l'origine des dégradations observées et d'édicter de nouvelles recommandations. Ces études ont mis en évidence que les documents rédigés à la fin des années 1970 et au début des années 1980 étaient conservateurs à certains égards et incomplets à d'autres.

En France, la prise en compte des retours d'expérience nationaux et internationaux a conduit à la rédaction d'une première version de la présente note d'information en 2015.



Figure 1 : Suppression des murets caches sur les culées et mise en peinture des extrémités de poutres sur un ouvrage à Conches sur Ouche (Source : Univ. Eiffel)

² On rappelle ici que l'acier autopatinable ne convient pas à un usage enterré ou immergé.

2 • PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Si l'acier autopatinable est très performant lorsqu'il est soumis à des cycles alternant humidité et séchage, il se dégrade comme un acier conventionnel lorsqu'il reste constamment humide ou qu'il est soumis à des niveaux élevés de dioxyde de soufre ou de chlorures.

Sur la base des retours d'expérience français et internationaux, cette partie décrit les environnements particulièrement agressifs pour lesquels l'usage de l'acier autopatinable est à exclure ou à limiter.

2.1 - Atmosphères urbaines et industrielles

Les ouvrages en acier autopatinable peuvent être utilisés sans justification dans les atmosphères pour lesquelles la teneur annuelle en moyenne journalière en dioxyde de soufre (SO_2) ne dépasse pas $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valeur haute de la classe C4 du tableau C.1. de la norme NF EN ISO 9223 [11]).

En pratique, cette limite est aujourd'hui bien supérieure aux teneurs observées dans les villes françaises, comme l'illustre l'évolution de la teneur en dioxyde de soufre à Paris présentée à la figure 2.

En cas de doute, la teneur en dioxyde de soufre peut être déterminée sur la base de données fournies par la station de mesure de la qualité de l'air la plus proche ou par des mesures sur site.

2.2 - Ouvrages au-dessus d'un cours d'eau

Pour les structures en acier autopatinable, un tirant d'air de 2,5 m au minimum par rapport au niveau moyen annuel du cours d'eau ou de l'étendue d'eau est conseillé, sans que cette valeur ne puisse descendre en dessous de 1 m en cas de crue annuelle. Si ce critère n'est pas rempli, l'emploi de l'acier autopatinable doit être dûment justifié du point de vue des conditions locales ainsi que de la surveillance et de la maintenance de la structure.

2.3 - Ouvrages à proximité de la mer

Les chlorures dégradent très fortement la résistance à la corrosion des aciers et l'environnement marin n'est donc pas propice à l'utilisation de l'acier autopatinable. Le transport des chlorures à l'intérieur des terres dépend fortement de la topographie des lieux mais l'essentiel de ces dépôts se produit généralement sur les premières centaines de mètres à partir de la côte. Les ouvrages à charpente en acier autopatinable sont donc exclus sur une bande côtière de 2 km pour la mer du Nord, la Manche et l'Océan Atlantique et de 1 km pour la mer Méditerranée.

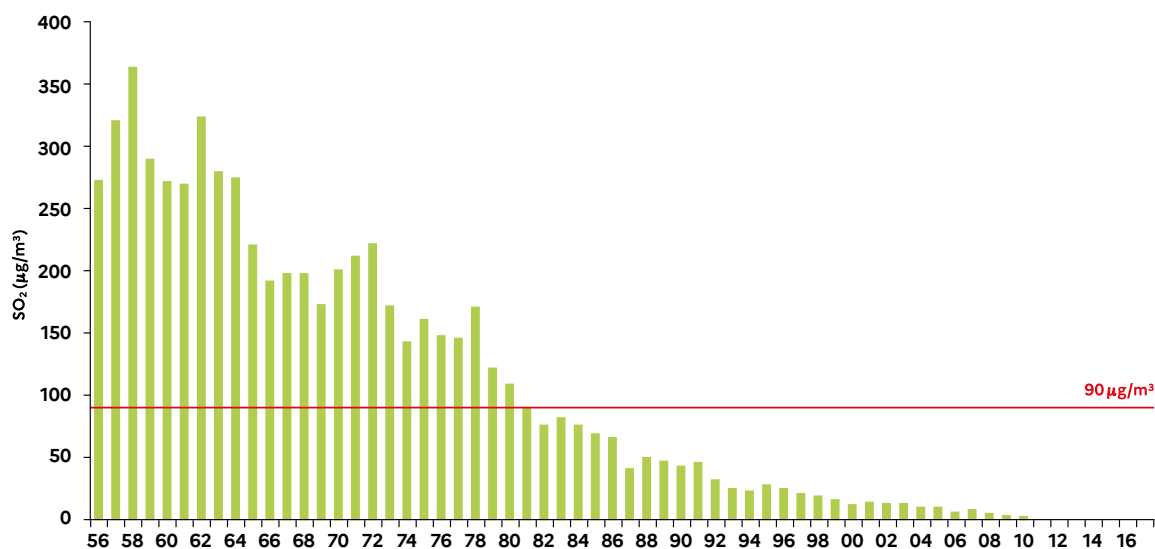


Figure 2 : Exemple de la teneur en SO_2 d'une atmosphère urbaine - Atmosphère de Paris entre 1956 et 2001
(Source : Airparif)

Ces distances sont également valables pour les estuaires, rias, abers et autour de la partie du cours des rivières que la mer ou l'océan remonte périodiquement (communes littorales au titre de la loi « littoral »). Il est cependant possible de restreindre ces distances si le suivi de l'état d'ouvrages métalliques non protégés à proximité de la zone envisagée montre que la proximité du cours d'eau n'affecte que peu la corrosivité du site.

2.4 - Départements et territoires d'outre-mer

Compte tenu des atmosphères particulières rencontrées dans ces régions et en l'absence de retour d'expérience nationale, la possibilité de recourir à l'acier autopatinable est à évaluer au cas par cas, en fonction de l'environnement du site envisagé pour implanter l'ouvrage, par un spécialiste du matériau intervenant régulièrement dans la conception d'ouvrages d'art de cette nature.

2.5 - Atmosphères abrasives

L'utilisation de l'acier autopatinable ne doit pas être envisagée pour la conception d'ouvrages situés en atmosphères abrasives. Les atmosphères abrasives sont caractérisées par la présence au sol de particules dures, en particulier de sable, dans un environnement pouvant être soumis à des vents très forts, qui pourraient altérer la couche de patine. En cas de doute, le risque doit être évalué en observant l'état des structures peintes à proximité du lieu prévu de l'implantation de l'ouvrage.

2.6 - Faune

L'effet des déjections aviaires sur la patine demeure un sujet d'étude. Ces éventuels dépôts doivent faire l'objet d'attention lors de l'inspection des structures. Ceci concerne plus particulièrement les zones urbaines.

2.7 - Abords de l'ouvrage

EFFET DE TUNNEL

L'effet de tunnel est caractérisé par la tendance qu'ont certaines portions de route construites en déblai à limiter la dissipation du brouillard formé par les projections d'eau lors du déplacement des véhicules et à ralentir le séchage de la structure. Un facteur aggravant est celui de la formation de brouillard salin lorsque l'itinéraire est soumis à l'utilisation de sels de déverglaçage.

Cet effet de tunnel se retrouve en particulier sur les ouvrages dont la voie franchie est délimitée par des murs de soutènement ou des écrans antibruit et dont le tablier présente un faible tirant d'air. Les ouvrages assimilés à des tranchées couvertes ou des trémies sont donc exclus du champ d'utilisation de l'acier autopatinable.

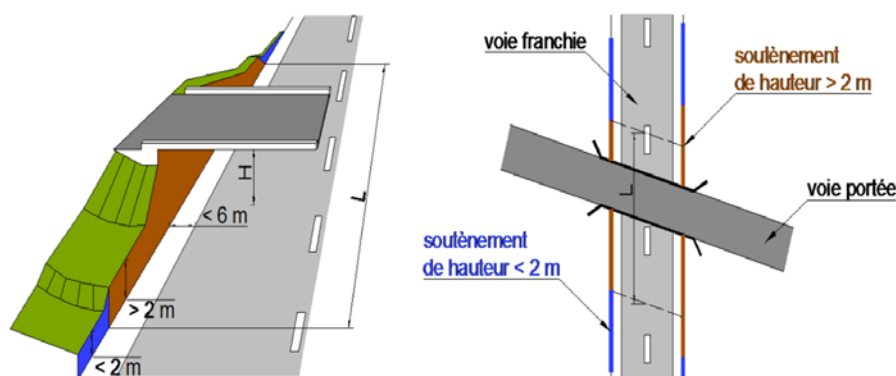


Figure 3 : Illustration de la longueur des murs de soutènement à prendre en compte (Source : Cerema)

Afin d'éviter ce phénomène, le tirant d'air minimal conseillé de l'ouvrage (H) est donné par la relation suivante :

$$H > \text{Min} (4,3+L/25 ; 7,50) \text{ m}$$

Dans cette relation, L est la longueur des murs de soutènement exprimée en mètres et déterminée selon la figure 3. Sa valeur correspond à la longueur de la voie franchie bordée de part et d'autre par des murs de soutènement situés à moins de 6 mètres du bord de la chaussée et ayant une hauteur au moins égale à 2 m.

Les écrans antibruit, si leur hauteur est supérieure à 2 m, et les murs de front sont ici assimilés à des murs de soutènement.

De manière générale, le franchissement d'axes routiers fortement circulés et soumis fréquemment aux sels de déverglaçage est à analyser avec attention. L'emploi de l'acier autopatinable pour toutes autres parties de l'ouvrage que le tablier

et directement soumises à ce type de projections sous l'effet du passage des poids lourds est à éviter. En pratique, cela pourrait concerner les piédroits de portiques métalliques ainsi que les parties basses des béquilles ou des arcs.

VÉGÉTATION

La végétation présente aux abords de l'ouvrage, et plus particulièrement les arbres, peut influencer notablement la performance de la patine, en particulier au niveau des culées, du fait qu'elle favorise la rétention d'humidité en limitant l'ensoleillement et la ventilation de la structure ainsi que par les dépôts qu'elle occasionne sur la structure.

À cet égard, il convient de veiller à maintenir les troncs d'arbre et les arbustes à une distance minimale de 15 m de la structure, en particulier au niveau des culées.



Passerelle sur le Rhin à Constance en Allemagne (Source : J.-M. Morel)

3 • DISPOSITIONS ASSURANT LA DURABILITÉ

Afin d'assurer la durabilité de l'ouvrage pendant sa durée d'utilisation de projet, certaines dispositions constructives doivent être prises en compte lors de la conception de l'ouvrage.

3.1 - Choix du type de structure

La conception des ouvrages en acier autopatenable peut classiquement s'appuyer aussi bien sur des structures porteuses de type pont-mixte acier béton à poutres sous chaussées (y compris les ponts à poutrelles enrobées) que sur des structures porteuses de type caisson-mixte acier-béton. Les avantages respectifs de ces choix sont connus et ne diffèrent pas fondamentalement des structures en acier protégées par peinture (coût de fabrication, facilités de visites et d'entretien, emprises des appuis, etc.).

Si l'acier autopatenable n'influence généralement pas le choix de la structure, certaines dispositions lui sont particulièrement favorables et apportent un gain de durabilité lorsque le maître d'ouvrage souhaite un niveau renforcé (ouvrages considérés comme stratégiques ou pour lesquels la maintenance serait particulièrement difficile) :

- les structures en caisson car elles ne présentent pas de surfaces horizontales directement exposées et susceptibles d'accumuler les polluants ;

- les ouvrages dits intégraux (avec une connexion monolithique entre la culée et le tablier, se passant de joints de chaussée et d'appareils d'appui) ou semi-intégraux (se passant du joint de chaussée seulement) car ces dispositions préviennent de toute venue d'eau depuis la chaussée.

Les ouvrages en caissons doivent rester visitables à l'exception des caissons métalliques hermétiques (les caissons mixtes ne sont pas ici considérés comme hermétiques).

Si le caisson ne peut être considéré comme hermétique, un système de ventilation et de drainage efficace doit être prévu au moyen notamment de trous de dimensions suffisantes permettant d'éviter l'accumulation d'humidité au niveau des diaphragmes et des raidisseurs transversaux. Le diamètre des tuyaux de drainage se trouvant à l'intérieur des caissons doit être au minimum de 150 mm pour limiter les risques d'obstruction.

3.2 - Résistance à la fatigue

La formation de la patine à la surface de l'acier autopatenable est corrélée à la création d'une rugosité à la surface de l'acier. Cette rugosité génère localement des concentrations de contraintes affectant la résistance à la fatigue de ces aciers. Ceci a fait l'objet de différentes



Figure 4 : Structure de type multi-caissons de l'ouvrage supportant la ligne C du tramway au-dessus de la rocade de Bordeaux (Source : Univ. Eiffel)

études [9] [10], qui ont démontré que cette rugosité diminue la résistance à la fatigue par rapport à des éprouvettes non patinées, mais que cette diminution ne concerne pas les assemblages soudés. En effet, les soudures génèrent des défauts de géométrie qui masquent l'effet de la rugosité. Ces résultats ont par ailleurs mis en évidence que la réduction de la tenue à la fatigue est directement liée à la géométrie de la rugosité de l'interface.

L'Eurocode 3 [3] traite du sujet de la fatigue des aciers autopatinables ; quelques précisions utiles doivent cependant être apportées :

- les aciers autopatinables sont bien couverts par l'Eurocode 3, partie 1-9. Comme l'indique l'alinéa (4) du paragraphe 1.1., "Les méthodes de vérification données dans cette partie sont applicables [...] aux aciers à résistance améliorée à la corrosion non protégés..." En effet, les aciers dénommés couramment « autopatinables » sont normalisés sous le vocable d'aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique dans la norme NF EN 10025-5 [1] ;
- dans l'Eurocode 3, partie 1.9, la spécificité des aciers autopatinables réside dans l'abattement d'une catégorie de détail (les catégories de détail prévues dans ce texte sont 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160 MPa)

pour les cinq premiers détails constructifs mentionnés dans le tableau 8.1 (Figure 5). Ces détails concernent les tôles, profilés ou tubes constitutifs des structures en dehors des zones d'assemblage et se fondent sur des essais ayant démontré que les aciers autopatinables présentent une plus faible tenue à la fatigue que les aciers conventionnels du fait de la rugosité de l'interface acier-patine qui peut engendrer localement des concentrations de contraintes. Dans le cas des assemblages, et en particulier des assemblages soudés, les effets liés à la géométrie de cette interface sont bien inférieurs à ceux provoqués par l'assemblage en lui-même, il n'y a donc pas d'abattement pour ces détails constructifs ;

- dans le cas de dispositions constructives autres que les assemblages soudés et dont la catégorie de détail ne figurerait pas dans les tableaux de la partie 1-9 de l'Eurocode 3, la catégorie de détail à prendre en compte dans le cas de l'acier autopatinable doit être déterminée en accord avec l'annexe B de l'Eurocode 3, partie 1-9, puis réduite d'un niveau (exemple : 56 à la place de 63) ;
- la rugosité de l'interface acier-patine étant étroitement liée aux conditions de formation de la patine, l'alinéa (7) du paragraphe 1.1 de la partie 1-9 de l'Eurocode 3 limite l'application de cette partie aux « structures dans des conditions

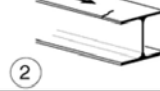
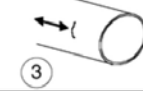
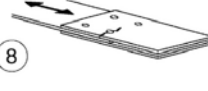
Catégorie de détail	Détail constructif	Description	Exigences
160	NOTE La courbe de résistance à la fatigue associée à la catégorie 160 est la plus haute. Aucun détail ne peut atteindre une meilleure résistance quelque soit le nombre de cycles.   	Produits laminés et extrudés : 1) Plaques et larges plats. 2) Profilés laminés. 3) Tubes sans soudure, soit rectangulaires soit circulaires.	Détails 1) à 3) : Arêtes vives, défauts de surface et de laminage améliorés par meulage jusqu'à élimination et réalisation d'une transition régulière.
140		Plats oxycoupés ou cisailés : 4) Oxycoupage ou cisailage avec parachèvement consécutif ; 5) Oxycoupage automatique, avec lignes de fusion peu profondes et régulières ; ou oxycoupage manuel avec élimination consécutif de tout défaut de bord.	4) Élimination de toute trace visible de défaut de bord. Les bords de coupe doivent être usinés ou meulés et toutes les bavures enlevées. Toute strie produite p. ex. par meulage doit être parallèle aux contraintes.
125		Pour l'oxycoupage automatique, qualité selon EN 1090.	Détails 4) et 5) : Amélioration des angles rentrants par meulage (pente $\leq 1/4$) ou évaluation avec les coefficients de concentration de contraintes appropriés. Pas de réparation par rechargement.
100 m = 5	 	6) et 7) : Produits laminés et extrudés, comme les détails 1), 2), 3).	Détails 6) et 7) : $\Delta \sigma \text{ calculé à partir de : } \sigma = \frac{VS(r)}{Ir}$
Pour les détails 1 – 5 en acier à résistance améliorée à la corrosion, utiliser les catégories immédiatement inférieures.			
112		8) Assemblages à double recouvrement avec boulons HR précontraints. 8) Assemblages à double recouvrement avec boulons précontraints injectés.	8) $\Delta \sigma$ à calculer sur la section brute. 8) ... section brute. Pour assemblages boulonnés (Détails 8) à 11) en général : Pince:

Figure 5 : Extrait du tableau 8.1. de l'Eurocode 3, partie 1.9 (la spécificité des aciers autopatinables est encadrée en rouge)

atmosphériques normales, suffisamment protégées contre la corrosion et régulièrement entretenues ».

Par ces termes qualitatifs il faut comprendre :

- que « les conditions atmosphériques normales » écartent les atmosphères exclues ou limitées par le paragraphe 3 du présent document et en particulier les atmosphères comportant une teneur annuelle en moyenne journalière en dioxyde de soufre supérieure à $90\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- que le terme « suffisamment protégées contre la corrosion » indique qu'il est nécessaire de vérifier que la patine formée est suffisamment protectrice. Ceci est réputé satisfait si la cotation de la patine établie suivant le paragraphe 9 du présent document est au maximum de 2.

En complément de ces dispositions, on rappelle que, pour les ouvrages neufs, la justification à la fatigue doit être effectuée suivant la méthode d'évaluation de la durée de vie sûre telle que définie dans le paragraphe 3 de l'Eurocode 3 partie 1-9 relative à la fatigue.

3.3 - Dispositions favorisant le séchage de la structure

À l'image de l'acier conventionnel, l'acier autopatinable se dégrade assez rapidement lorsqu'il reste constamment humide. Le système de recueil et d'évacuation des eaux du tablier doit donc être conçu et réalisé avec soin, en particulier au niveau des culées, car la majorité des désordres a été constatée à ce niveau sur les ouvrages.

L'esprit général des dispositions constructives décrites ci-dessous est d'éviter les stagnations d'eau sur la charpente métallique.

AU DROIT DES CULÉES

Les ouvrages à culées semi-intégrales et intégrales sont à privilégier car ils se caractérisent par une absence de joints de chaussée dont la dégradation peut conduire à des infiltrations et écoulements d'eau. À défaut, une retombée de dalle à l'about des poutres peut également assurer cette protection. Les ouvrages présentant ce type de conception permettent de s'affranchir des dispositions décrites ci-après et représentées à la figure 6.

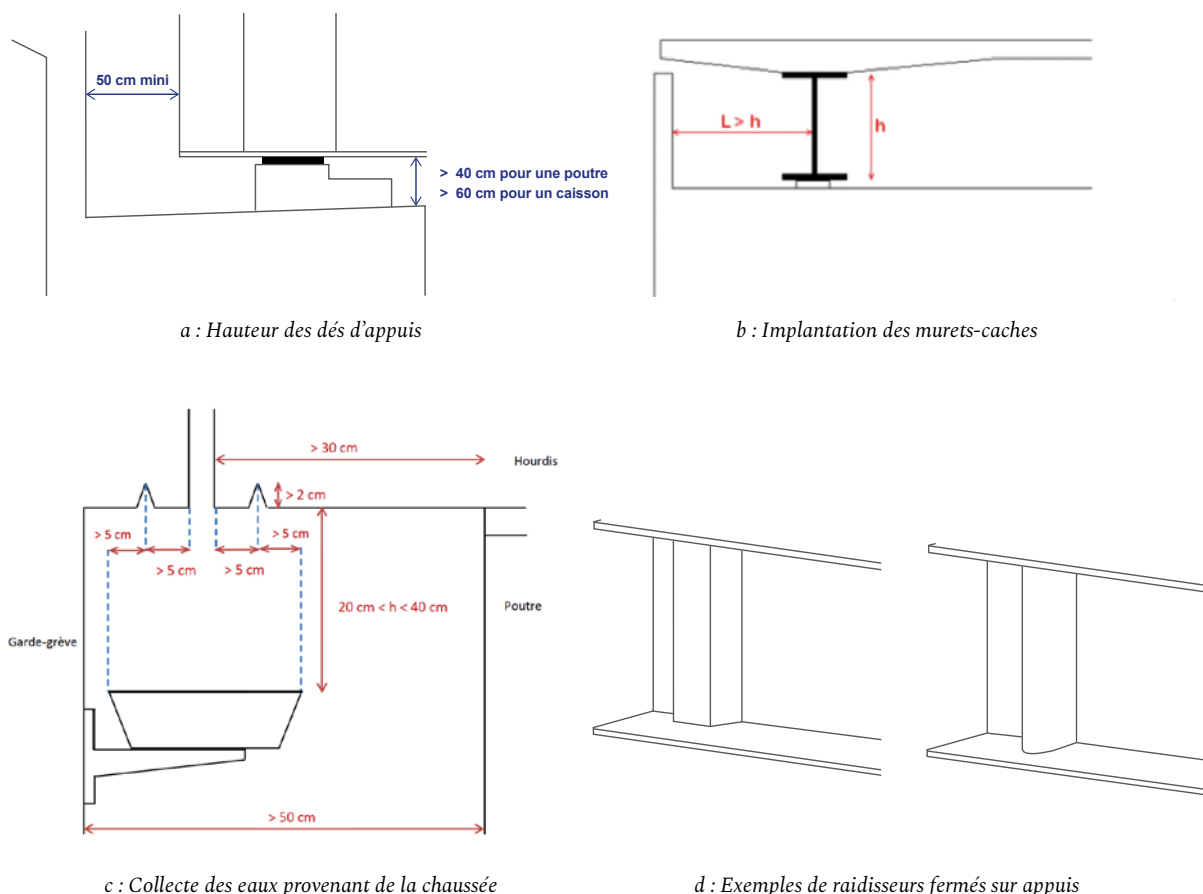


Figure 6 : Dispositions favorisant le séchage de la structure sur culée

Les dispositions constructives à adopter suivantes relèvent du guide ponts mixte du Sétra [12] pour les deux premières (et sont donc applicables à tous les ouvrages) tandis que les autres sont spécifiques aux aciers autopatinables :

- la distance entre l'about des poutres et le mur garde-grève doit être au minimum de 50 cm ;
- les dés d'appuis doivent présenter une hauteur suffisante de façon à ce que la distance entre le sommier d'appuis et la semelle inférieure des poutres soit au minimum de 40 cm. Dans le cas des caissons, la hauteur minimale est portée à 60 cm (Figure 6a) ;
- les murets caches sont à éviter dans la mesure du possible. Le cas échéant, ils doivent se trouver à une distance supérieure à la hauteur de la poutre pour permettre une bonne aération (Figure 6b) ;
- un chéneau doit être fixé sous le joint de chaussée car la durabilité de ce dernier et surtout son étanchéité ne peuvent être garanties. Ce chéneau doit préférentiellement être en acier inoxydable de nuances 1.4401 ou 1.4404 suivant la norme NF EN 10088 [13] pour sa structure (ces nuances sont également connues sous les dénominations 316 et 316L) et en nuance A4 suivant l'ISO 3506-1 [14] pour les fixations mécaniques. La pente du chéneau doit être d'au moins 2% (Figure 6c). L'extrémité de la dalle doit également présenter une goutte d'eau qui permette d'assurer que l'eau provenant du joint de chaussée ne puisse ruisseler le long de la sous-face de la dalle et atteindre les poutres ;
- le système d'évacuation des eaux ne doit pas pouvoir être obstrué par des débris de végétaux et doit pouvoir être entretenu facilement. Aussi, tous les coudes des évacuations doivent rester accessibles³ ;
- les raidisseurs extérieurs sur appuis doivent présenter un profil fermé qui évite la stagnation d'eau (Figure 6d).

Pour les ouvrages de type intégraux ou semi-intégraux pour lesquels l'about des poutres est noyé dans le béton, celui-ci doit être peint avant mise en place de la charpente sur une longueur telle que le revêtement soit visible sur une longueur minimale de 50 cm une fois l'ouvrage terminé et sur une longueur d'au moins 10 cm dans le béton. Cette disposition vise à renforcer la protection anticorrosion au point triple acier-air-béton.

Par ailleurs des cordons de soudure anti-ruissellement doivent impérativement être exécutés sur les abouts de poutres sur les semelles inférieures et supérieures à une distance d'environ 30 cm du béton.

SUR LA STRUCTURE MÉTALLIQUE

Les dispositions constructives à adopter sont les suivantes :

- la largeur des encorbellements de la dalle béton doit être au moins égale à la hauteur non protégée des poutres pour limiter les venues d'eau directes par temps de pluie (Figure 8a). Cette disposition s'applique également aux extrémités des consoles de pièce de pont lorsque l'ouvrage en comporte.



Figure 7 : Exemples de détail de l'about des poutres d'un ouvrage de type semi-intégral à Wirkowice en Pologne et sur un pont intégral sur la route DP-2510R à Jasło en Pologne (Source : ArcelorMittal)

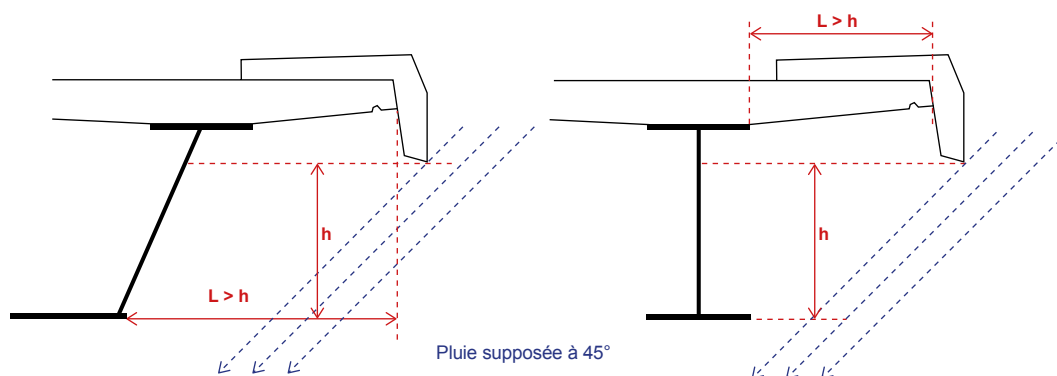
³ D'une façon générale, le nombre de coudes que forme le système d'évacuation doit être réduit au minimum, car ils sont régulièrement dégradés lors des opérations d'entretien.

Les encorbellements doivent par ailleurs présenter un dispositif de type goutte d'eau sur toute leur longueur ;

- les extrémités des consoles de pièces de pont doivent comporter une platine permettant d'empêcher l'eau de venir ruisseler sur leurs semelles (Figure 8b) ;
- des cordons de soudure doivent être réalisés en biais sur le pourtour des semelles inférieures afin d'éviter que l'eau qui ruisselle le long des semelles ne vienne s'écouler sur le béton des appuis et occasionner des coulures de rouille inesthétiques. L'épaisseur de ce cordon doit être au minimum de 5 mm, orienté de façon à diriger l'eau vers l'extérieur de la semelle et être réalisé à environ 1 m de l'aplomb des structures en béton à protéger (Figure 8c).

Le même type de dispositif peut être mis en œuvre sur les semelles des consoles pour éviter un marquage inesthétique de l'âme des poutres. Il peut également être utilisé pour se prémunir de possibles retenues d'eau au niveau des variations d'épaisseur de semelles opérées par l'intérieur lorsque la pente locale des semelles est inversée par rapport à la variation d'épaisseur. Le cordon de soudure doit alors être réalisé avec une orientation à 45° de l'âme sur le dessus de la semelle inférieure ;

- lorsque l'épaisseur d'un cordon de soudure peut conduire à la création de pièges à eau, ce cordon sera arasé ;
- les raidisseurs longitudinaux doivent présenter une géométrie qui évite la rétention d'humidité (Figure 8d) ;



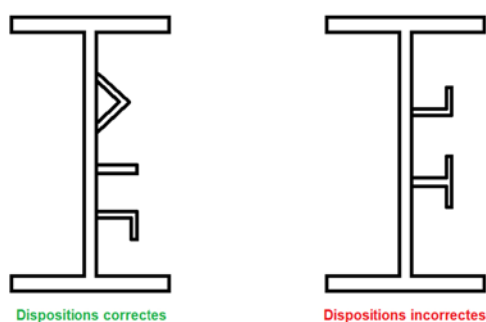
a : Illustration de la largeur des encorbellements (À gauche pour un caisson - À droite pour un pont à poutres sous chaussée)



b : Platines d'extrémité de console



c : Cordons de soudure anti-ruissellement



d : Géométrie des raidisseurs longitudinaux



e : Tôle inclinée soudée sur la semelle inférieure de la poutre

Figure 8 : Dispositifs favorisant le séchage de la structure en travée (Source : UGE)

- en cas de recours à des tôles inclinées soudées entre le dessus de la semelle inférieure et l'âme des poutres en tant que dispositifs anti-cheminement ou de résistance aux chocs⁴ (Figure 8e), ces dispositifs doivent être soudés de façon continue et fermés à leurs extrémités par une tôle inclinée à 45° par rapport à l'axe de la poutre ;
- pour les ouvrages de type multi-poutres sous chaussée, la distance minimale entre les semelles des poutres de l'ouvrage doit au minimum être égale à la hauteur des poutres.

3.4 - Platelage bois

Les platelages en bois des passerelles ou des trottoirs en encorbellement par exemple ne doivent pas être en contact direct avec la structure et doivent respecter les dispositions constructives de base de ce type de structure, en particulier :

- les lattes doivent être espacées de 8 mm au minimum les unes des autres ;
- les lattes du platelage (et les éventuelles lambourdes) doivent se situer au minimum à 10 mm au-dessus de la semelle supérieure des poutres principales. Cette distance est obtenue par le recours à des cales en polymère.

3.5 - Surépaisseurs

Par mesure de précaution, une surépaisseur d'acier est demandée pour les aciers structuraux compte tenu des vitesses de dégradation qui peuvent être élevées lorsque l'ouvrage se trouve dans un environnement agressif. Cette disposition vise à laisser le temps au maître d'ouvrage de constater la dégradation et d'intervenir, c'est-à-dire mettre la structure en peinture, au moins partiellement, dans le cas où il n'y aurait pas stabilisation de la patine.

Pour les ouvrages situés dans un environnement adéquat, cette réserve d'acier n'a pas vocation à être consommée et elle est donc unique quel que soit l'environnement considéré.

La surépaisseur doit être de 1,0 mm par face exposée, à l'exception des éléments suivants pour lesquels aucune surépaisseur n'est requise :

- la surface intérieure des caissons métalliques fermés hermétiquement ;
- les surfaces en contact avec le béton ;
- les surfaces de contact acier-acier dans le cas des assemblages par éclisses ;
- le corps des boulons précontraints.

Pour la justification de la charpente métallique, la résistance des sections doit être calculée en retirant les surépaisseurs aux épaisseurs de tôles retenues. En revanche, pour la détermination du poids propre de la structure, toute l'épaisseur des tôles est à prendre en compte.

Ce principe de justification s'applique également aux cordons de soudure en angle. Pour ces cordons, la gorge minimale de 5 mm spécifiée par le fascicule 66 du C.C.T.G. [5] continue à s'appliquer. Il en découle que les soudures qui peuvent être vérifiées avec une gorge de 4 mm seront exécutées avec une gorge de 5 mm au minimum.

3.6 - Boulonnage

Les normes en vigueur relatives aux joints boulonnés de charpentes métalliques s'appliquent aussi à l'acier autopatinable. On rappelle que la partie 1-8 de l'Eurocode 3 [3], relative au calcul des assemblages, donne dans son paragraphe 3.5 les exigences spécifiques en matière de règles de pinces et entraxes pour les aciers relevant de la norme NF EN 10025-5 [1].

⁴ S'ils empêchent la stagnation de polluants sur le dessus de la semelle inférieure sur la longueur du dispositif, ces dispositifs complexifient la structure et interdisent l'examen ultérieur des parties de poutres masquées. Ces dispositifs sont généralement mis en œuvre sur des longueurs très limitées de la structure.

4 • APPROVISIONNEMENT DES ACIERS

4.1 - Aciers structurels

L'acier doit être choisi parmi les nuances et qualités définies dans la norme NF EN 10025-5 : 2019 [1].

Les produits doivent répondre aux caractéristiques techniques spécifiées au §5.3 du fascicule 66 [5], en particulier :

- l'utilisation d'aciers à l'état de livraison +AR (brut de laminage) est interdite ;
- l'utilisation d'aciers S355J0WP ou S355J2WP (nuances à teneurs plus élevées en phosphore et par conséquent moins aptes au soudage) est interdite pour les éléments structurels ainsi que les éléments soudés sur la structure ;

- les aciers constitutifs de la charpente métallique doivent disposer du droit d'usage de la marque NF Acier suivant le référentiel de certification NF 138 [15], annexe 2B (secteur Bâtiment-Travaux Publics), gammes 20 ou 21 (construction métallique d'ouvrages d'art et de bâtiments non courants). Exceptionnellement et pour les cas listés au chapitre 5.3.2.2. du fascicule 66 [5], des produits non certifiés peuvent être autorisés. Dans ce cas ils doivent être commandés suivant les dispositions de l'annexe A de ce même fascicule.

Tableau 1 : Correspondance entre les caractéristiques des aciers autopatinables selon EN 10025-5:2019 et les aciers conventionnels selon EN 10025-2/-3/-4:2019

Aciers conventionnels		Aciers autopatinables		
Norme	Nuance ⁵ , qualité et état de livraison	Norme ⁶	Nuance, qualité et état de livraison	Exigences complémentaires
NF EN 10025-2	S235J2 +N/+M* S355J2 +N/+M* S355K2 +N/+M* S460J2 +N/+M* S460K2 +N/+M*	NF EN 10025-5	S235J2W +N/+M S355J2W +N/+M S355K2W +N/+M S460J2W +N/+M S460K2W +N/+M	-
NF EN 10025-3	S355N S355NL S420N S420NL S460N S460NL		S355K2W +N S355J5**W +N S420K2W +N S420J5**W +N S460K2W +N S460J5**W +N	● Garantie de finesse de grain*** ● Essai de résilience sur éprouvettes longitudinales prélevées au quart de l'épaisseur ****
NF EN 10025-4	S355M S355ML S420M S420ML S460M S460ML		S355K2W +M S355J5**W +M S420K2W +M S420J5**W +M S460K2W +M S460J5**W +M	● Garantie de finesse de grain*** ● Essai de résilience sur éprouvettes longitudinales prélevées au quart de l'épaisseur ****
* L'état de livraison + M (thermomécanique) n'est pas défini pour les tôles quarto dans la partie 2 de la norme NF EN 10025:2019. ** La qualité J5 (résilience garantie de 27J à -50°C) n'est pas définie pour les produits longs dans la norme NF EN 10025-5:2019. *** Garantie du producteur conformément au paragraphe 3.3 de la NF EN 10025-3:2019 pour les aciers à l'état normalisé/laminage normalisant et au paragraphe 3.2. de la NF EN 10025-4:2019 pour les aciers thermomécaniques. Cette garantie doit être indiquée sur le document de contrôle. **** Cet essai de résilience (flexion par choc) est réalisé en plus de celui spécifié dans la norme NF EN 10025-5:2019 [1] et uniquement pour les produits plats d'épaisseurs ≥ 40 mm. La méthode d'essai est celle définie au paragraphe 10.2.2 de la norme NF EN 10025-5:2019 et les résultats attendus dans le tableau 5 de cette même norme.				

5 Les nuances autopatinables au phosphore (WP) sont exclues par le Fascicule 66 du CCTG pour les éléments structurels. Les qualités inférieures à J2 sont exclues par l'alinéa 3.2.3(2) de l'annexe nationale de l'Eurocode 3 partie 2 (NF EN 1993-2/NA : 2007).

6 Les épaisseurs indiquées dans le tableau 1 de la norme NF EN 10025-5:2019 sont applicables (≤ 150 mm pour les produits plats et ≤ 63 mm pour les profilés).

NUANCES, QUALITÉS ET ÉTATS DE LIVRAISON

Les tôles fortes en acier conventionnel utilisées en ouvrage d'art relèvent des parties 2, 3 et 4 de la norme NF EN 10025 tandis qu'une seule partie de cette norme est consacrée aux tôles fortes en acier autopatinable.

Le tableau 1 indique les équivalences retenues entre nuances et qualités des aciers conventionnels d'une part (parties 2, 3 et 4) et celles des aciers autopatinsables d'autre part (partie 5) avec, le cas échéant, des exigences complémentaires. Les résultats des essais correspondant à ces exigences doivent figurer sur le document de contrôle 3.1.

SOUDABILITÉ

L'ajout d'éléments d'alliage nécessaires à la formation de la patine, tels que Cu, Cr, Ni et/ou Mo a un impact négatif (augmentation) sur la valeur de carbone équivalent (CEV). Lors de l'établissement du cahier de soudage (QMOS notamment), il convient de prendre en compte les valeurs maximales relativement élevées de CEV autorisées par la norme NF EN 10025-5 [1], en particulier lorsque les aciers présentent de fortes épaisseurs. Des valeurs inférieures peuvent être garanties par certains sidérurgistes. Il est à noter que l'état de livraison thermomécanique (+M), pris en compte dans la version 2019 de la norme EN 10025-5 [1] permet d'obtenir des valeurs de carbone équivalent significativement inférieures aux maximums autorisés, à propriété mécaniques équivalentes.

COMPOSITION CHIMIQUE ET COULEUR DE LA PATINE

La couleur de la patine est affectée par la composition chimique de l'acier et l'environnement dans lequel celui-ci est exposé. Du fait des gammes de compositions chimiques autorisées par la norme NF EN 10025-5 et de l'effet non maîtrisé de l'environnement sur la teinte de la patine, la couleur finale de la patine et son homogénéité ne peuvent être maîtrisées par le sidérurgiste ou le constructeur métallique et ne peuvent donc pas faire l'objet d'un critère à atteindre.

4.2 - Assemblages

Les produits d'apport de soudage à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique doivent être conformes à une des options du tableau 6 de la norme NF EN 1090-2 §5.5 [2].

Les boulons en acier conventionnel (appelés aussi boulons « noirs ») sont exclus. Les boulons structuraux doivent être conformes au paragraphe 5.6.6 de la norme NF EN 1090-2:2018 [4] tandis que les boulons non structuraux sont en acier autopatinable ou en acier inoxydable. Les boulons non structuraux en acier autopatinable doivent être de classe 8.8 au minimum ou relever de la norme ASTM F3125M, Type 3⁷ [16]. Les boulons non structuraux en acier inoxydable doivent être de type A4-80 [14].

(Source : J.-M. Morel)



7 Le présent document fait référence à des normes américaines car il n'existe pas d'équivalent européen ou français

5 • EXÉCUTION DE LA STRUCTURE

5.1 - Découpe, perçage, cintrage, chaudes de retrait

Les opérations de découpe, perçage et cintrage ne présentent pas de spécificités liées à l'utilisation de l'acier autopatinable.

Les chaudes de retrait (chauffage local de l'acier pour réduire ou produire des déformations) n'affectent pas les performances de la patine mais peuvent affecter l'aspect de la patine au moins sur les premiers temps d'exposition. Il est nécessaire de procéder à un décapage de la zone affectée pour atténuer au maximum cet effet.

5.2 - Soudage

Toutes les soudures⁸, y compris les cordons de soudure anti-ruissellement, doivent disposer d'une Qualification de Mode Opératoire de Soudage (QMOS) et d'un Descriptif de Mode Opératoire de Soudage (DMOS) et être réalisées par un soudeur qualifié.

Préalablement à l'exécution de la soudure, la patine éventuellement déjà formée doit être retirée sur 10 à 20 mm de part et d'autre du joint à souder.

En complément du tableau 6 de la norme NF EN 1090-2 [2], les procédés de soudage 136 et 138 sont autorisés sous réserve qu'ils satisfassent aux mêmes exigences que les produits d'apport du procédé 135.

Le produit d'apport utilisé pour les passes de remplissage peut être un produit d'apport conventionnel mais celui mis en œuvre pour la passe finale de toutes les surfaces des cordons, y compris leurs tranches pour les cordons en bout à bout, doit être conforme au paragraphe 4.2 du présent document. Afin d'assurer la protection de la tranche des soudures bout à bout, il est nécessaire de réaliser un grugeage sur une profondeur d'au moins 3 mm avant l'exécution de la passe de finition sur cette surface, conformément à la figure 9.

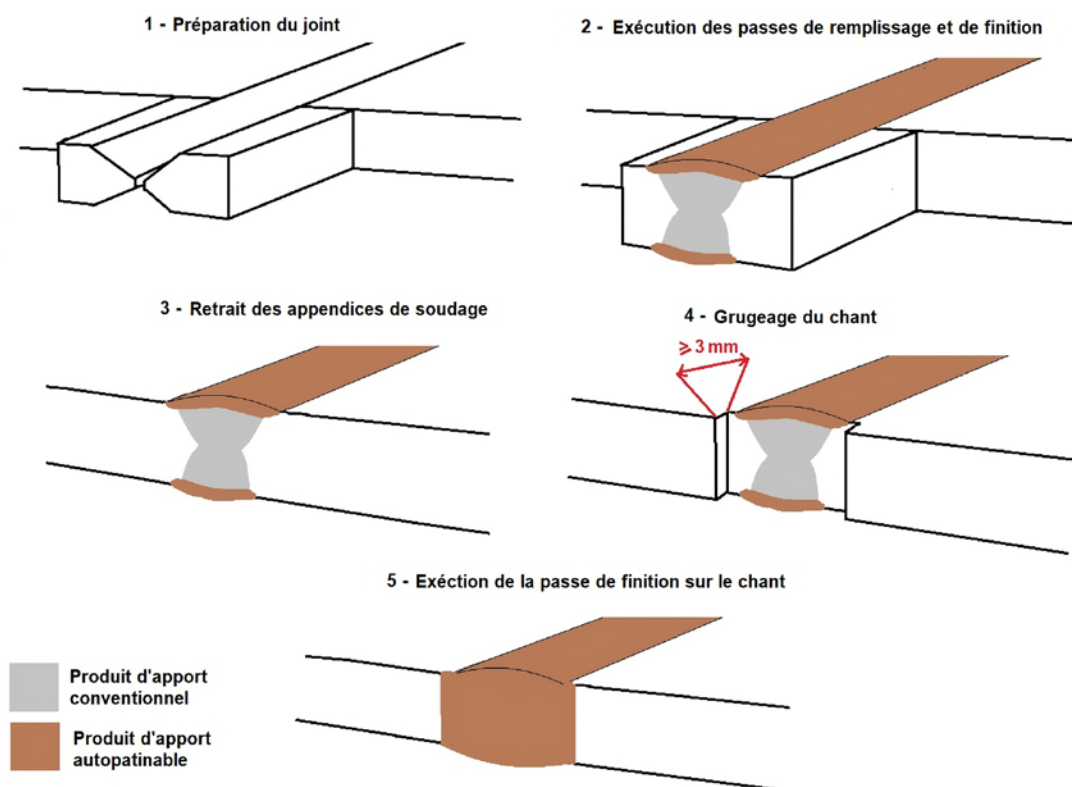


Figure 9 : Étapes d'exécution d'une soudure bout à bout avec produit d'apport autopatinable utilisé seulement pour la passe de finition

8 L'assemblage par soudage d'un élément en acier autopatinable avec un élément en acier conventionnel ne pose pas de difficulté.

Dans le cas de soudures mixtes (passes de remplissage en métal d'apport conventionnel et passes de finition en métal d'apport autopatinable), les essais de résiliences de la QMOS doivent être réalisés pour les passes de remplissage et pour les passes de finition.

5.3 - Boulonnage

Dans le cas des platines d'about et des éclisses boulonnées exposées aux intempéries, il est recommandé de prévoir une étanchéité par un joint souple sur leur périphérie.

5.4 - Aspect de la structure

L'aspect de la patine est affecté par les traces des produits appliqués lors des opérations de contrôles non destructifs, en particulier dans les cas de la magnétoscopie et du ressuage (fond et révélateur ainsi que le couplant utilisé pour les contrôles par ultra-sons). Afin d'assurer une homogénéité des parties vues, les couplants gras sont proscrits et les traces des produits appliquées lors des contrôles non destructifs doivent être éliminées de ces surfaces, au moyen d'un dégraissant alcalin dans le cas de la graisse et par un ponçage léger de la surface dans le cas des produits de ressuage. Ces opérations sont suivies d'un nettoyage à l'eau des surfaces.

6 • TRAITEMENT DE SURFACE

6.1 - Décapage

Afin d'obtenir une patine homogène et de la meilleure qualité possible, les tronçons de la structure doivent être décapés à l'abrasif en atelier après achèvement. Le degré de soin du décapage est de niveau Sa2½ selon la norme NF EN ISO 8501-1 [17], mais il n'y a pas d'exigence ni sur le type d'abrasif ni sur la rugosité pour toute la partie de la structure qui n'est pas peinte.

6.2 - Protection anticorrosion

L'intérêt premier de l'acier autopatinable est d'éviter la mise en peinture de l'ouvrage. Cependant, plusieurs raisons peuvent inciter à mettre en peinture l'acier autopatinable de façon partielle ou totale :

- pour protéger l'ouvrage d'une éventuelle défaillance des joints de dilatation. Il est ainsi recommandé de mettre en peinture les extrémités de l'ouvrage sur une longueur correspondant à la hauteur de la poutre ou du caisson ou, dans le cas des ouvrages intégraux ou semi-intégraux, sur une longueur d'au moins 50 cm pour la partie émergeant du béton et 10 cm pour la partie encastrée. Il n'y a pas lieu,

en revanche, de mettre en peinture le dessus de la semelle supérieure en contact avec la dalle béton dans le cas des ouvrages mixtes ;

- pour protéger les zones confinées ou mal aérées ;
- pour protéger l'acier si l'environnement se révélait plus agressif qu'envisagé lors du projet et venait à mettre en péril la durabilité de l'ouvrage.

Si une application de protection anticorrosion est prévue, elle doit être appliquée conformément au fascicule 56 du C.C.T.G. [6]. Cependant il est rappelé que la garantie prévue par ce dernier ne s'applique pas. En effet les aciers autopatinoles sont exclus du champ d'application de ce document.

6.3 - Accélérateurs de la formation de patine

En l'état actuel des connaissances, l'application de produits autres que les systèmes de peinture, et en particulier de produits visant à accélérer la formation de la patine, n'est pas autorisée sur la structure de l'ouvrage.

7 • TRANSPORT ET MISE EN PLACE *IN SITU*

Les traces de graisse laissées sur la structure par les opérations de transport et de montage, en particulier le lançage⁹, ainsi que les traces de contrôles non destructifs (couplant pour les contrôles ultra-sonores et fond et révélateur pour les contrôles par ressuage), doivent être

éliminées des surfaces vues. Ces traces sont éliminées en ayant recours à un dégraissant alcalin dans le cas de la graisse et un ponçage léger de la surface dans le cas des produits de ressuage. Ces opérations sont suivies d'un nettoyage à l'eau des surfaces concernées.

8 • ENTRETIEN ET INSPECTIONS

Le bon entretien, qui est la base de la bonne gestion de tout ouvrage, ne peut en aucun cas être négligé. La présence de débris sur l'acier autopatinable peut être source de persistance d'humidité à même de provoquer la corrosion de l'acier. Les dispositions constructives recommandées visent à limiter la création de tels dépôts mais c'est le suivi de l'ouvrage qui permet de s'assurer de leur bonne efficacité. À l'occasion d'une inspection détaillée, l'inspecteur doit relever la présence d'éventuels dépôts, en analyser la nature et l'origine (mousse, fientes, pollens, etc.), et évaluer l'état de la patine et de l'acier à son contact. Si nécessaire, il propose les actions d'entretien à planifier (nettoyage), les actions correctives éventuelles à entreprendre (remise en état des dispositifs de drainage aux abouts de l'ouvrage, dispositifs évitant le nichage, etc.) ou curatives (mise en peinture localisée). Le maître d'ouvrage dispose ainsi des éléments de choix permettant de retenir le meilleur processus de gestion adapté à son ouvrage, à ses moyens et à son organisation.

Le suivi des ouvrages du réseau routier national non concédé géré par l'État est réalisé conformément à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO) [18]. Cette instruction définit les inspections détaillées initiales (IDI), les Evaluations IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) et les inspections détaillées périodiques (IDP). L'inspection des ouvrages donne lieu par ailleurs à l'établissement d'une note IQOA [19] reflétant l'état de l'ouvrage.

Le présent document se réfère à l'ITSEO [18,20] et aux notes IQOA [19], mais ces prescriptions peuvent être utilement mises en œuvre par les collectivités pour la surveillance de leurs ouvrages sous réserve d'adaptations, principalement sur le mode de cotation.

Le tableau 2 indique les cinq niveaux de dégradations définis par l'IQOA pour les ouvrages « État » :

Tableau 2 : Niveaux de dégradation définis par l'IQOA

1	Bon état apparent
2	Défauts sur équipements ou éléments de protection ou défauts mineurs de structure sans risques immédiats
2E	Défauts sur équipements ou éléments de protection ou défauts mineurs de structure avec risque d'évolution pouvant à court terme affecter la structure
3	Structure altérée ne présentant pas de risques à court terme
3U	Structure altérée présentant des risques à court terme

⁹ Le coefficient de rugosité de l'acier étant plus important que celui de la peinture, le lançage des ouvrages en acier autopatinable ne peut généralement pas être réalisé à l'aide de patins de téflon comme dans le cas des ouvrages peints. Les solutions généralement adoptées sont les chaises à galets ou les plaques en acier inoxydables.

Seules les particularités propres à l'acier autopatrinable sont développées ci-après, les documents existants sur les ouvrages à structure métallique continuant à s'appliquer.

La performance de l'acier autopatrinable peut être évaluée de deux façons différentes : indirectement par l'évaluation de l'aspect et de l'épaisseur de la patine (une patine inhomogène et épaisse est caractéristique d'une patine instable) et directement par la mesure de l'épaisseur résiduelle d'acier.

Malgré les spécificités de cet acier, une périodicité identique à celle pratiquée pour les ouvrages en acier conventionnel paraît adaptée, soit 6 ans en régime normal pour les IDP, auxquelles viennent s'ajouter les évaluations IQOA triennales.

Les paragraphes suivants décrivent les opérations à entreprendre au cours des IDI, des évaluations IQOA, des IDP ainsi que des campagnes de mesures ciblées qui comprennent des mesures directes de l'efficacité de la patine (épaisseurs résiduelles d'acier) et la recherche de fissures de fatigue, qui interviennent en cas de dégradations observées sur l'ouvrage ou à l'initiative du gestionnaire de l'ouvrage.

L'inspection des ouvrages à structure métallique en acier autopatrinable doit être réalisée par une personne disposant des connaissances de base des particularités de cet acier et une expérience de ce type d'inspection, ou se faisant assister par une personne qui possède cette expérience.

Conformément aux bonnes pratiques de l'ITSEOA, l'inspecteur ne doit pas être empêché d'évaluer l'état de la structure par la présence, même locale, de dépôts. Par ailleurs, si ces dépôts apparaissent néfastes pour la durabilité de la structure et qu'ils ne peuvent pas être retirés régulièrement, les zones identifiées devront être expertisées, afin de prendre en compte cet aléa. Les résultats de ces expertises peuvent conduire à une mise en peinture locale (par exemple du dessus de la semelle inférieure), voire générale.

8.1 - Inspection Détaillée Initiale au sens de l'ITSEOA (IDI)

La spécificité de l'IDI réside dans le choix des zones témoins pour l'évaluation de la performance de la patine par méthodes CND (contrôle non destructif). C'est sur ces zones témoins que seront réalisés les suivis d'épaisseur de patine (§9.3.2) et les suivis d'épaisseur résiduelle d'acier (§9.4).

- Dans le cas des ouvrages à poutres, l'inspecteur délimitera sur la partie extérieure de chacune des poutres externes :

- 1 surface de 10x10 cm et 1 surface de 20x20 cm sur l'âme de la poutre,
- 1 surface de 10x10 cm et 1 surface de 20x20 cm sur le dessus de la semelle inférieure.

La plus petite surface servira de zone de référence pour la perte d'épaisseur de l'acier, et la plus grande de surface de référence pour l'épaisseur de la patine.

Ces surfaces devront se trouver à une distance de l'extrémité de la poutre comprise entre 30 cm et 2,5 fois la hauteur de la poutre et, dans le cas des surfaces situées sur l'âme, à une distance minimale de 15 cm du bas de l'âme.

Ces zones de référence peuvent être définies sur l'une ou l'autre des culées, au choix de l'inspecteur.

- Dans le cas des ouvrages de type caisson, les zones de référence sur le dessus de la semelle inférieure sont remplacées par des surfaces de référence situées sous la tôle de fond de caisson à une distance comprise entre 30 cm et 2,5 fois la hauteur de la poutre de l'about du caisson et à une distance supérieure à 30 cm des bords du caisson.
- Dans le cas des ouvrages à poutrelles enrobées, les surfaces de référence seront définies sous la semelle des poutres de rives externes à une distance comprise entre 15 cm et 2 m de l'about des poutres (50 cm à 2 m de l'encastrement dans le béton dans le cas des ouvrages intégraux) et au milieu de la largeur de la semelle.

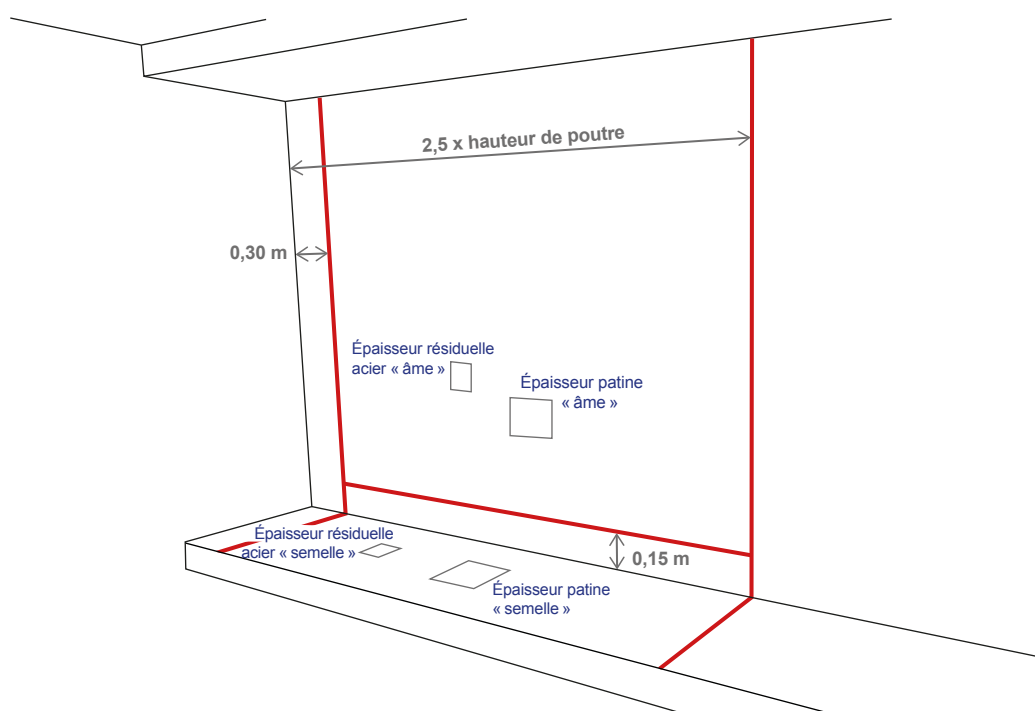


Figure 10 : Illustration des zones de référence sur une poutre

La position précise des zones de mesures pour les deux types d'investigation ainsi que les résultats des mesures d'épaisseur résiduelle d'acier doivent être renseignés de façon précise dans le rapport et être reportés sur les plans certifiés conformes à l'exécution inclus dans le dossier des ouvrages exécutés (DOE).

8.2 - Inspection IQOA triennale

Les inspections triennales comportent classiquement la recherche de désordres concernant la géométrie et le fonctionnement des assemblages. En complément de ces observations, l'inspection IQOA triennale comporte la recherche de traces de venues d'eau et/ou de corrosion foisonnante. Le cas échéant, la note IQOA est portée à 2E. Le rapport devra indiquer par ailleurs les zones pour lesquelles la patine n'était pas visible (présence de débris, de déjections d'oiseaux) ainsi que les zones pour lesquelles la patine présentait manifestement une coloration différente de l'aspect global.

8.3 - Inspection Détaillée Périodique au sens de l'ITSEO (IDP)

Les IDP comportent l'enregistrement sous forme de photographies de l'aspect général de la patine (évaluation visuelle d'ensemble), la mesure de l'épaisseur générale de la patine (mesure de l'épaisseur de la patine) ainsi que la recherche de dégradations localisées (évaluation visuelle locale).

L'analyse des résultats permet alors d'attribuer une note à la patine.

8.3.1 - ÉVALUATION VISUELLE D'ENSEMBLE

La couleur de l'acier autopatinable évolue normalement de l'orangé au brun au cours des premières années, puis se stabilise au bout de 3 à 5 ans.

L'apparence générale de la patine est le premier indicateur de l'adéquation de l'acier avec son environnement.

Cet indicateur n'a pas vocation à quantifier la performance mais à servir de référence pour l'évaluation des dégradations locales de la patines (§9.3.4).

Lors de l'évaluation d'ensemble, l'aspect de la patine est enregistré par des photos représentatives dont des exemples sont donnés à la figure 11. Sur ces images doivent figurer une référence colorimétrique (idéalement les RAL 8011, 8008, 8007 et 8004) et dimensionnelle (d'une longueur de l'ordre de 10 cm) pour rendre possible le suivi de l'aspect de la patine d'une inspection à l'autre.



Figure 11 : Exemples d'images présentant l'aspect de la patine (le nuancier RAL figurant sur les photos correspond aux couleurs 8011, 8008, 8007 et 8004 respectivement de gauche à droite) (Source : Cerema)

8.3.2 - MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PATINE

L'épaisseur de la patine reflète la cinétique de corrosion de l'acier : une épaisseur importante de patine traduit une vitesse de corrosion importante [21]. Du fait de son caractère non destructif, de sa simplicité de mise en œuvre et de sa précision, la mesure de l'épaisseur de la patine est la technique mise en œuvre lors des IDP pour évaluer la performance de la patine. Toutefois, il convient de noter que l'épaisseur de la patine ne correspond pas à la perte d'épaisseur par corrosion de l'acier sur laquelle elle est formée.

L'objet de cette mesure n'est pas d'obtenir l'épaisseur dans des zones particulières de l'ouvrage, mais de déterminer une valeur représentative de l'ensemble de la patine.

La mesure de l'épaisseur de patine est effectuée à l'aide d'une jauge d'épaisseur de revêtements à induction électromagnétique sur les zones de 20 cm de côté repérées lors de l'IDI (§9.1.). Pour chaque zone, 30 points de mesure sont répartis sur l'ensemble de la surface. Le matériel et la méthode de mesure sont décrits dans la norme ISO 19840 [22]. Cependant, dans le cas des aciers autopatinables, la calibration doit être obligatoirement réalisée sur cale lisse et, d'autre part, il n'y a pas de correction à apporter pour tenir compte de la rugosité. Cette dernière fait partie intégrante de la mesure.

La surface ne doit pas être brossée préalablement à la mesure mais un soufflage doit permettre d'éliminer les poussières non adhérentes qui viendraient perturber la mesure. Les écailles de rouille qui peuvent apparaître à la surface de la patine font partie de la mesure et ne doivent donc pas être éliminées.

Une note d'efficacité de la patine est attribuée en fonction de la valeur moyenne relevée et suivant le tableau 3.

Tableau 3 : Niveaux d'efficacité de la patine basés sur son épaisseur

Épaisseur de la patine (μm)	Niveau
< 100	1
100 < e < 400	2
> 400	2E

8.3.3 - ÉVALUATION VISUELLE

Cette évaluation visuelle a pour but de mettre en évidence la présence de zones localisées pour lesquelles la patine présente un aspect plus dégradé que la patine prise dans son ensemble ainsi que d'éventuelles fissures. Le cas échéant, l'inspecteur doit rechercher la source de ces dégradations localisées.

Les endroits propices à l'apparition de dégradations localisées de la patine sont :

- les zones proches des systèmes d'évacuation des eaux, en particulier les culées ;
- les zones confinées, par exemple au pied des raidisseurs ;
- les zones propices à la nidification des oiseaux, surtout en milieu urbain, comme les semelles inférieures des bipoutres.

Enfin, il est également nécessaire de porter une attention particulière aux soudures lors des deux premières inspections afin de détecter un éventuel comportement différent de la patine formée sur les soudures par rapport au reste de la patine.

La localisation précise des défauts ainsi que leur origine avérée ou supposée doivent apparaître explicitement dans le rapport d'inspection.

Pour ces zones spécifiques, l'inspecteur procédera à une cotation particulière.



Figure 12 : Exemples de dégradations donnant lieu à une aggravation de la note de la patine (Source : UGE)

8.3.4 - NOTE D'ÉVALUATION DE LA PATINE

La note d'évaluation de la patine est obtenue à partir de la note attribuée aux épaisseurs de patine (Tableau 3) qui peut être aggravée si des dégradations localisées ont été observées.

Les dégradations localisées, pouvant donner lieu à aggravation de la note de la patine, sont les zones d'écaillage de la patine avec modification de couleur, de formation de mousse, de stagnation d'humidité sur la structure ou de présence de déjections aviaires importantes. La cotation définitive doit résulter d'une investigation particulière qui quantifie le défaut en termes d'épaisseur de patine voire de perte de section.

Le tableau 4 présente les notes globales pouvant être attribuées au caractère protecteur de la patine de la structure ainsi que l'interprétation associée dans le cas d'un ouvrage « État ».

8.3.5 - RAPPORT D'INSPECTION

Le rapport d'inspection doit contenir, outre les éléments requis par l'ITSEOA, les informations suivantes :

- les observations et les mesures réalisées au cours de l'inspection sur la patine et l'acier ;

- le report de la localisation exacte des zones de mesure ;
- le résultat des essais pour chaque zone examinée ;
- la synthèse des résultats par type d'essai et sa comparaison avec celle du rapport précédent intégrant des photos représentatives de la patine avec des références colorimétriques et dimensionnelles ;
- l'indication de la présence ou non de dégradations localisées de la patine en indiquant leur gravité, leur étendue et leur emplacement ;
- la note globale attribuée au matériau. En cas de dégradation de la qualité de la patine par rapport à l'inspection précédente, l'inspecteur doit indiquer dans son rapport s'il lui a été possible d'identifier les causes des désordres, voire les modifications de l'environnement pouvant l'expliquer (modification notable du nombre de jours de salage, pluviométrie exceptionnelle, détérioration de l'assainissement...) ;
- les prescriptions sur les opérations d'entretien, les propositions de modification à apporter au système d'évacuation des eaux et/ou aux joints de chaussée....

Tableau 4 : Note globale relative à la patine pour les ouvrages « État »

Note IQOA liée au matériau	Interprétation
1	Patine de bonne à très bonne qualité
2	
2E	Patine susceptible d'être localement ou globalement moins efficace que ce qui est attendu et de conduire à des réductions d'épaisseur de l'acier et/ou des crevasses. L'état de l'acier doit faire l'objet d'une évaluation spécifique suivant les méthodes décrites au paragraphe 8.4.

- si l'observation de la patine laisse penser que celle-ci pourrait ne pas être pleinement efficace (note 2E pour les ouvrages « État »), **il est nécessaire de faire réaliser des mesures complémentaires d'épaisseurs résiduelles d'acier conformément à la partie 8.4.1 de cette note** ainsi qu'une détection d'éventuelles fissures de fatigue suivant la partie 8.4.2 dans les zones de dégradations localisées, pour les assemblages dimensionnés par le phénomène de fatigue ;
- dans le cas où la cotation 2E provient d'une venue d'eau sur l'ouvrage et que le maître d'ouvrage n'est pas en mesure d'en supprimer la cause, il convient d'appliquer localement une protection anticorrosion.

8.4 - Campagnes de mesures ciblées

Les campagnes de mesures ciblées visent à mettre en œuvre des mesures directes de l'état de l'acier au travers de mesures d'épaisseurs résiduelles de patine et de recherche de fissures de fatigue.

Cette campagne de mesures ciblées peut être associée à une IDP ou faire l'objet d'une campagne spécifique.

Ces campagnes de mesures sont déclenchées par une cotation 2E de la patine à l'issue d'une IDP, ou à l'initiative du gestionnaire de l'ouvrage suivant une périodicité qu'il doit définir : idéalement lors de la première IDP à 6 ans, puis toutes les trois inspections, soit tous les 18 ans.

L'inspection est l'occasion d'une recherche systématique de fissures de fatigue à l'aide de contrôles non destructifs sur les zones sensibles de l'ouvrage, en particulier pour les ouvrages soumis à une forte circulation (ponts autoroutiers ou ponts ferroviaires de lignes à grande vitesse par exemple).

Les zones sensibles de la structure métallique sont définies par un taux de travail des aciers supérieur à 0,8 sous la combinaison de vérification à la fatigue et doivent être identifiées dans le dossier d'ouvrage exécuté (DOE).

8.4.1 - MESURES DES ÉPAISSEURS RÉSIDUELLES D'ACIER

Les mesures des épaisseurs résiduelles nécessitent un mesureur ultra-sons ayant une précision au moins égale à 0,01 mm.

La mesure s'effectue sur les quatre surfaces de 10 cm de côté repérées lors de l'IDI (§8.1) ou sur les zones de dégradations localisées présentant une cotation 2E déterminée lors de l'IDP de la patine (Cotation liée à la mesure de son épaisseur (§8.3.2) ou à l'observation de dégradations localisées (§8.3.3)).

Les mesures nécessitent un décapage manuel ou mécanique préalable de la patine recouvrant les deux faces de la zone considérée. Si plusieurs campagnes de mesures sont nécessaires, les mesures sont toujours réalisées sur la même zone bien que celle-ci ait déjà subi un décapage. La perte d'épaisseur d'acier s'en trouvera légèrement surestimée.

Les résultats permettent une cotation suivant le tableau 5. Ces résultats et la cotation associée doivent être consignés dans le rapport.

Si les valeurs enregistrées sont supérieures ou égales à 1,0 mm par face exposée, il est nécessaire d'évaluer l'impact de cet affaiblissement sur l'ouvrage, de mettre provisoirement cet ouvrage sous surveillance (par exemple avec une fréquence biannuelle) et d'évaluer l'opportunité de réparer ou de mettre en peinture partiellement ou totalement l'ouvrage.

Tableau 5 : Note relative à la dégradation de la structure pour les ouvrages « État »

Perte d'épaisseur par face (mm)	Note IQOA liée au matériau
$\Delta e < 0,25$	1
$0,25 \leq \Delta e < 1$	2
$\Delta e \geq 1,00$	3 à 3U

8.4.2 - DÉTECTION DE FISSURES

Les méthodes non destructives couramment mises en œuvre sur les ouvrages d'art pour détecter des fissures (en surface ou internes) sont influencées par la présence de la patine¹⁰ (bruit de fond, atténuation du signal). Cette influence s'apparente à celle occasionnée par un revêtement de type peinture.

Afin de permettre la recherche de fissures, la patine sera préalablement ôtée par une méthode appropriée, permettant de garantir un état de surface compatible avec la méthode de contrôles non destructifs envisagée.

Dans le cas de contrôles par ultrasons, il sera ainsi nécessaire d'ôter la patine sur les surfaces auscultées et, le cas échéant, sur les surfaces de rebond de l'onde ainsi que de limiter le plus possible la rugosité de ces surfaces.

Des méthodes de contrôles non destructifs compatibles avec la présence de la patine, telle la technologie EMAT (ElectroMagnetic Acoustic Transducer), une méthode non-destructive basée sur les ultrasons, sont en cours de développement. Des recherches récentes [23] montrent que cette technique permet la détection de

fissures dans les aciers autopatinables avec une patine protectrice déjà formée. Des fissures et rayures d'une profondeur de 0,3 mm peuvent ainsi être détectées sur des surfaces planes.

La recherche de fissures par une méthode de contrôle non destructif de surface ou de santé interne doit être réalisée par un opérateur certifié COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs) N2 secteur CIFM au minimum.

8.5 - Schéma de synthèse de l'organisation des inspections

La figure 13 synthétise sous forme de logigramme l'évaluation des structures en acier autopatinable par les IDP (§9.3) et les campagnes de mesures ciblées (§9.4.).

Comme pour tout ouvrage, en cas de doute ou de risques avérés pour l'ouvrage et/ou les tiers, il peut se révéler nécessaire d'ajouter d'autres actions dites de surveillance renforcée ou de haute surveillance décrites en détail dans les fascicules 2 et 3 de l'ITSEOA [19].

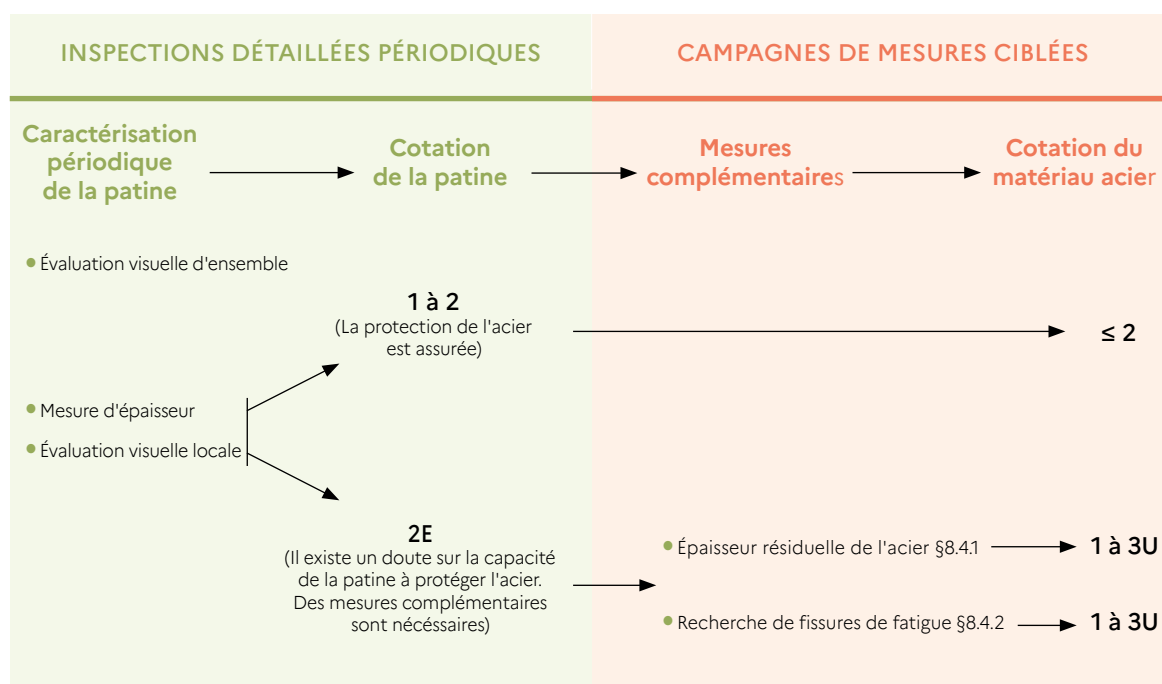


Figure 13 : Logigramme de l'inspection des ouvrages en acier autopatinable

¹⁰ Les méthodes conventionnelles les plus couramment utilisées en ouvrage d'art sont le contrôle visuel, le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons. Le contrôle par radiographie est de plus en plus rarement utilisé compte tenu des contraintes très fortes qui y sont associées en termes notamment d'hygiène et de sécurité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NF EN 10025-5 "Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 5 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique", AFNOR, août 2019, 35 p.
- [2] NF EN 1090-2 "Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier", AFNOR, juin 2018, 206 p.
- [3] Eurocode 3 "Calcul des structures en acier", AFNOR
- [4] "Recommandations relatives à l'utilisation d'aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique", Circulaire du 26 septembre 1985. (disponible sur <http://dtrf.cerema.fr>)
- [5] "European design guide for the use of weathering steel in bridge construction", 2nd edition, ECCS, 2021 (disponible sur www.steelconstruct.com)
- [6] Flossdorf, F.-J., Ehl, J., Müller, F., "Schwingfestigkeit wetterfester Baustähle nach langjähriger Bewitterung", Stahl und Eisen, 1997.
- [7] Kunz, L., Lukas, P., Klusak, J., "Fatigue strength of weathering steel", Materials Science, 2012.
- [8] Eurocode 4 "Calcul des structures mixtes acier-béton", AFNOR
- [9] Fascicule 66 "Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés publics de travaux – Fascicule 66 – Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier", 28 p. (En cours de révision). (disponible sur www.economie.gouv.fr)
- [10] Fascicule 56 "Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés publics de travaux – Fascicule 56 – Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion", 90 p. (En cours de révision) (disponible sur <https://piles.cerema.fr>).
- [11] NF EN ISO 9223, "Corrosion des métaux et alliages – Corrosivité des atmosphères – Classification, détermination et estimation", AFNOR, mars 2012, 25 p.
- [12] Sétra "Ponts mixtes acier-béton – Guide de conception durable", septembre 2010, 200 p. (disponible sur doc.cerema.fr)
- [13] NF EN 10088-1, "Aciers inoxydables-Partie 1 : Liste des aciers inoxydables", AFNOR, décembre 2014, 68 p.
- [14] NF EN ISO 3506-1, "Fixations – Caractéristiques mécaniques des fixations en acier inoxydable résistant à la corrosion – Partie 1 : Vis, goujons et tiges filetés de grades et classes de qualité spécifiés", AFNOR, 52 p.
- [15] NF 138 "Référentiel de certification NF-Acier", AFNOR, mise à jour régulière (dernière date de mise en application : 07/03/2022, révision n°14+A3).
- [16] ASTM A3125/F3125M-22 – Standard specifications for high strength structural bolts and assemblies, steel and alloy steel, heat treated, Inch dimensions 120ksi and 150ksi minimum tensile strength, and metric dimensions 830MPa and 1040MPa minimum tensile strength, ASTM International, 2022, 15 p.
- [17] NF EN ISO 8501-1 "Préparation des subjectiles d'acier avant application de peintures et de produits assimilés – Evaluation visuelle de la propreté d'un subjectile – Partie 1 : Degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non recouverts et des subjectiles d'acier après décapage sur toute la surface des revêtements précédents", AFNOR, septembre 2007, 96 p.
- [18] Sétra "Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO) Fascicule 0 – Dispositions applicables à tous les ouvrages", 2010, 32 p. (disponible sur <http://dtrf.cerema.fr> et sur doc.cerema.fr)
- [19] Sétra "Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA) Catalogue des principaux désordres des ponts mixtes acier-béton de type bi-poutre", 1998, 28 p. (disponible sur <http://dtrf.cerema.fr> et sur doc.cerema.fr)

- [20] Sétra "Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO) - Fascicule 2 – Généralités sur la surveillance", 2010, 63 p. (disponible sur <http://dtrf.cerema.fr> et sur doc.cerema.fr)
- [21] Morel, J.M., "Rôle de la structuration des patines formées sur acier autopatinable vis-à-vis de la résistance à la corrosion atmosphérique : Influence de la diminution des teneurs en SO₂ dans les atmosphères post-industrielles", thèse de doctorat, 2022, 234 p.
- [22] ISO 19840, "Peintures et vernis – Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture – Mesure et critères d'acceptation de l'épaisseur d'un feuil sec sur des surfaces rugueuses". Genève, septembre 2012.
- [23] Ungermann, D., Hatke, P., Walther, F., Knyazeva, M., Friedrich, S., Lebelt, P. (2021). Innovations for the optimal use of weathering steel in steel and composite bridge construction (Final report of research project FOSTA P1200 / IGF 18655 BG), Düsseldorf: FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.

LE CEREMA, DES EXPERTISES AU SERVICE DES TERRITOIRES

Le Cerema est un établissement public qui apporte son expertise pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires. Grâce à ses 26 implantations partout en France, il accompagne les collectivités dans la réalisation de leurs projets. Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

> Téléchargez nos publications sur doc.cerema.fr

ACIERS AUTOPATINABLES

Recommandations pour leur utilisation en structure des tabliers des ponts et passerelles

Édition 2023



CONTRIBUTEURS

Coordinateurs :

Jean-Michel Morel (Université Gustave Eiffel) - Tél : 33 (0)2 40 84 57 80 - mél : jean-michel.morel@univ-eiffel.fr
Jacques Berthelley (Cerema) - Tél : 33 (0)7 60 83 36 91 - mél : jacques.berthelley@cerema.fr

Rédacteurs :

Nicolas Caillet, Mike Tibolt, Riccardo Zanon (Arcelor Mittal), Stéphane Pauvert (Baudin-Châteauneuf), Eric Collet, Gregor Kozlowski (Berthold), Marjorie Bourquencier, Pierre Corfdir (Cerema), Daniel Bitar (CTICM), Cécile Merlin (Dillinger France), Pascal Lepers (Eiffage), Marie Panattoni (Matière), Pierre Peyrac (Ministère de la Transition écologique/DIT/MARRN), Hui Lestrelin (RATP), Patrick Canu (SNCF), Laurent Gaillet (Université Gustave Eiffel)

Relecteurs :

Philippe Jandin, Virginie Perier, David Pajak, Mathieu Desperes (Cerema), Christian Tessier (Université Gustave Eiffel)

CONTACT

<https://www.cerema.fr/fr/contact>



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT
| MOBILITÉS | **INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT** |
ENVIRONNEMENT & RISQUES | MER & LITTORAL



www.cerema.fr

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Cité des mobilités - 25 avenue François Mitterrand - CS 92803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30 - Achevé d'imprimer :
Novembre 2023 - Dépôt légal : Novembre 2023 - ISSN : 2969-1036 - Imprimeur : Dupliprint - Tél : 02 43 11 09 00 / Conception
graphique : Farénis / Réalisation : Cerema / Crédit photo : couverture : J.-M. Morel.