



Ministère
de l'Équipement,
des Transports
et du Logement



Travaux de construction des PONTS en ACIER



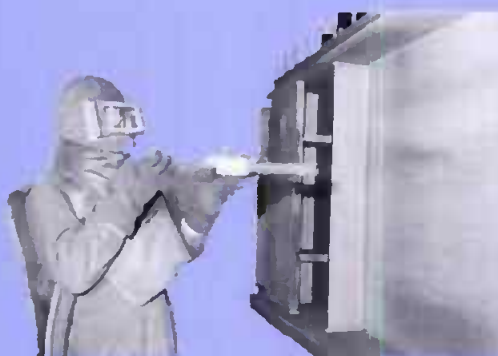
Guide du Maître d'Œuvre



Travaux de construction des PONTS en ACIER



Guide
du Maître
d'Œuvre



Mars 2001

Document réalisé et diffusé par le



service d'études techniques des routes et autoroutes
Centre des Techniques d'Œuvres d'Art
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 BAGNEUX CEDEX - FRANCE
Tel. 01 46 11 31 53 - Fax 01 46 11 33 55 - www.setra.equipement.gouv.fr

CONTRIBUTIONS :

Daniel André	LCPC
Bernard Bouvy	AIOA de l'autoroute A75 (DDE de l'Aveyron)
Bernard Favre	SETRA / DREX
Jacques Fuchs	CETE de l'Est / LRPC de Nancy
Jean-Paul Gourmelon	LCPC
Guy Maire	CETE Normandie-Centre / LRPC de Blois
Jean Piccardi	CETE de Lyon / LRPC de Lyon
Joël Raoul	SETRA / CTOA
Yves Vénec	CETE Normandie-Centre / LRPC de Blois

RÉDACTION :

Jacques Roche	SETRA / CTOA
---------------	--------------

COMPLÉMENTS, MISES AU POINT :

Christian Binet (Inspection Ouvrages d'art), Pierre Brevet (LCPC),
Michel Dekyndt (Baudin-Chateauneuf), Robert Dubois (Baudin-Chateauneuf),
Pierre Dugas (Ets. J. Richard-Ducros), Michel Fagnat (SETRA / CTOA),
Jean Garrigues (Ets. J. Richard-Ducros), Pierre Méhue (SETRA / CTOA),
Marc Thénoz (Inspection Ouvrages d'art).

PHOTOGRAPHIES :

Gérard Forquet (SETRA / CTOA),
avec l'aimable autorisation de l'entreprise Berthold pour les photos en atelier.

AVANT-PROPOS



Ce guide s'adresse aux maîtres d'œuvre publics chargés de la construction d'un pont en acier⁽¹⁾, et à leurs intervenants (bureaux d'études, inspecteurs de travaux...).

Il traite certains aspects de la maîtrise d'œuvre, notamment la consultation des entreprises et la surveillance des travaux.

Il ne traite pas la conception des ouvrages ; cependant, certaines indications, par exemple celles relatives au choix des aciers et aux types de soudures, peuvent être utiles dès la phase de projet.

Seuls les sujets spécifiques aux ponts en acier sont traités.

Les chapitres 1 à 4 sont consacrés aux produits de construction et à leur mise en œuvre. Ils portent sur les aspects technologiques auxquels sont le plus souvent confrontés les maîtres d'œuvre lors de la mise au point du marché et de l'exécution des travaux.

Le chapitre 5 passe en revue les textes de référence utilisables pour les spécifications techniques des marchés : CCTG, normes, autres textes.

Les chapitres 6 et 7 décrivent les dispositions visant à assurer la conformité aux spécifications : certification des produits et des services, assurance de la qualité.

Les chapitres 8, 9 et 10 fournissent des éléments pour l'application pratique par le maître d'œuvre. Ils correspondent chacun à une phase des opérations : consultation des entreprises, préparation des travaux, exécution des travaux.

Seules sont exposées les dispositions conformes aux textes en vigueur en France lors de la rédaction du document⁽²⁾. Par exception, les indications relatives au fascicule 4, titre III du CCTG (aciers laminés pour constructions métalliques) portent, non sur le texte de 1975 en vigueur lors de la rédaction du guide, mais sur le projet de texte révisé (projet du 26 octobre 1998).

Dans le domaine traité par ce guide, d'importants changements devraient être apportés, au cours des prochaines années, par la mise en application de normes et de dispositions réglementaires nouvelles. Il s'agit notamment des eurocodes 3 et 4, de la norme européenne 1090 sur l'exécution des structures en acier, de la certification européenne des produits de construction.

(1) On entend par "ponts en acier" aussi bien les ponts à tablier mixte acier-béton que les ponts à tablier entièrement en acier.

(2) Soit en mai 2000.

Page laissée blanche intentionnellement

SOMMAIRE GÉNÉRAL



LES PRODUITS ET LEUR MISE EN ŒUVRE



1	Produits en acier	7
2	Assemblages soudés.....	43
3	Assemblages boulonnés.....	83
4	Protection contre la corrosion.....	103

SPÉCIFICATIONS, CONFORMITÉ AUX SPÉCIFICATIONS



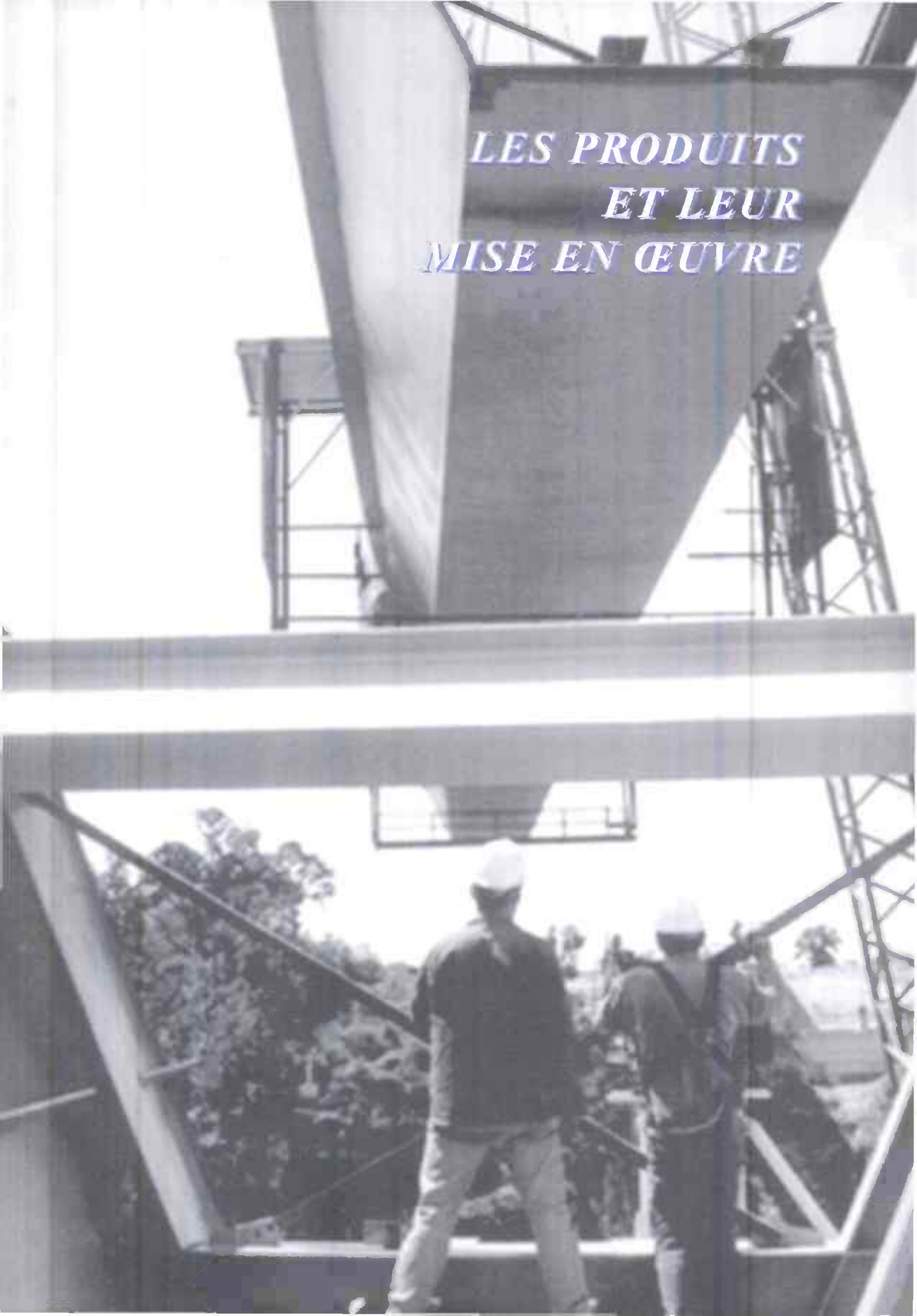
5	Textes de référence pour les spécifications techniques des marchés.....	125
6	Certifications.....	147
7	Assurance de la qualité.....	159

APPLICATION



8	La consultation des entreprises.....	167
9	La préparation des travaux.....	205
10	L'exécution des travaux.....	219

*LES PRODUITS
ET LEUR
MISE EN ŒUVRE*



SOMMAIRE

1 - PRODUITS EN ACIER

1.1	Forme et dimensions des produits	9
1.2	Caractéristiques mécaniques mesurées par l'essai de traction	11
1.2.1	Limite d'élasticité	11
1.2.2	Résistance à la traction	14
1.2.3	Allongement à la rupture	14
1.3	Rupture fragile, classes de qualité des aciers	15
1.3.1	Généralités sur la rupture fragile	15
1.3.2	Règles françaises pour la sécurité à la rupture fragile	17
1.3.3	Les classes de qualité des aciers définies dans les normes	22
1.3.4	Récapitulation des précautions contre la rupture fragile	24
1.4	Soudabilité des aciers	25
1.4.1	Définition de la soudabilité	25
1.4.2	Fissuration à froid	26
1.4.3	Fissuration à chaud	29
1.4.4	Arrachement lamellaire	29
1.5	Les produits en acier laminé définis dans les normes	32
1.5.1	Normes de base des produits laminés	32
1.5.2	États de livraison	33
1.6	Les produits en acier laminé utilisables pour les ponts	37
1.6.1	Tableau des nuances, qualités et épaisseurs utilisables	37
1.6.2	Nuances	37
1.6.3	Qualités minimales et épaisseurs maximales pour la sécurité vis-à-vis de la rupture fragile	37
1.6.4	Épaisseurs maximales certifiées	38
1.6.5	Limites d'épaisseur à retenir	38
1.6.6	Choix de la norme de base et de l'état de livraison	40
1.6.7	Aciers autopatinables	41
	Références du chapitre 1	42

Page laissée blanche intentionnellement

PRODUITS EN ACIER



1.1 - FORME ET DIMENSIONS DES PRODUITS

La plupart des tabliers métalliques sont construits principalement à partir de produits plats, désignés sous le terme de "tôles" dans le présent document.

Les épaisseurs maximales utilisables sont un paramètre important pour le projecteur. Elles dépendent principalement de deux facteurs, le comportement de l'acier à l'égard du risque de rupture fragile d'une part, les possibilités d'assemblage d'autre part. Sur ces deux points, les méthodes d'élaboration de l'acier et les techniques de soudage ont accompli des progrès considérables au cours des vingt dernières années. Ces progrès ont permis d'augmenter considérablement l'épaisseur maximale des tôles pour les ponts soudés, jusqu'à 150 mm en France actuellement. Ces fortes épaisseurs permettent de concevoir des structures plus simples et plus économiques : au lieu des tabliers multipoutres d'autrefois, il est possible maintenant d'avoir dans la plupart des cas des tabliers à deux poutres seulement, même pour les grandes portées et les grandes largeurs ; cette simplification est décisive pour la compétitivité des ponts métalliques.

Le [tableau 1.7](#), à la fin de ce chapitre, indique les épaisseurs maximales utilisables de chaque acier.

Les techniques actuelles de laminage autorisent aussi les tôles "profilées en long", c'est à dire livrées avec des variations linéaires d'épaisseur dans le sens longitudinal. Le profilage est obtenu en utilisant des laminoirs "quarto" (à quatre cylindres) de forte puissance, pilotés par ordinateur. Ces tôles ont un coût unitaire un peu plus élevé, et un délai de livraison un peu plus long que les tôles classiques, mais elles permettent une optimisation du poids d'acier, une diminution du nombre des assemblages soudés, et un meilleur aspect. Le taux maximal de variation d'épaisseur prévu par la norme NF A 36-270 est de 7 mm/m, et la variation totale pour une tôle est limitée à 50 mm. Ces limites évoluent, et les valeurs maximales réalisables actuellement sont un peu supérieures. Ces variations d'épaisseur sont souvent suffisantes pour que la courbe des moments résistants puisse épouser de façon continue la courbe enveloppe des moments sollicitants. Les épaisseurs maximales de tôle sont les mêmes que pour les aciers de base.

La longueur, la largeur et le poids des tôles sont limitées par les possibilités de l'aciérie, par la capacité du transporteur (la SNCF le plus souvent), et par les équipements de manutention du constructeur. Il est utile de connaître un ordre de grandeur des dimensions maximales lors de la conception, afin par exemple de ne pas imposer inutilement des joints longitudinaux dans le cas des poutres-caissons et des dalles orthotropes. Pour l'aciérie, le domaine économique est limité à une largeur de 4 à 5 mètres, et à une masse de l'ordre de 18 tonnes. Les valeurs maximales de la longueur et de l'épaisseur d'une tôle s'en déduisent.

Des produits longs sont parfois adoptés pour certaines parties d'ouvrage. Des profilés en I ou en H, dits "poutrelles", peuvent être utilisés comme éléments secondaires de tabliers (montants de poutres principales, entretoises, connecteurs en cornières, contreventements provisoires de montage). Ces produits sont utilisés quelquefois comme poutres principales pour des ponts de faible portée. Ils sont également utilisés pour la structure métallique des ponts à poutrelles enrobées.

Les hauteurs de section disponibles atteignent 600 mm dans le cas des IPE, 1100 mm dans le cas des H. On se reportera aux normes de dimensions, qui fournissent également les caractéristiques mécaniques des sections.

Les tôles et les poutrelles sont obtenues par laminage à chaud.

Un autre type de produit long, le profil creux (de section circulaire, carrée ou rectangulaire) est utilisé parfois, par exemple pour la construction d'ouvrages légers tels que les passerelles pour piétons et cycles.

Les profils creux sont fabriqués par formage et soudage de tôles laminées. Il en existe deux catégories :

- les profils creux "finis à froid" sont obtenus par formage à froid et ne subissent ensuite aucun traitement thermique ;
- les profils creux "finis à chaud" sont obtenus soit par formage à chaud, soit par formage à froid suivi d'un traitement thermique.

Ce sont les profils finis à chaud qui sont utilisés pour les ouvrages de génie civil : ils existent dans de plus fortes épaisseurs ; les allongements à la rupture sont plus importants ; ils n'ont pas de contraintes résiduelles, ce qui évite les déformations après coupe ; les zones de pliage ne sont pas écrouies et se comportent donc comme les zones courantes pour les assemblages soudés.

Les plus fortes sections ont une dimension de 400 ou 500 mm, suivant leur forme, et une épaisseur pouvant atteindre 17 mm.

Les goujons de connexion sont obtenus par formage à froid de barres ou de fils étirés. Actuellement, leur diamètre est limité en France à 22 mm, valeur maximale figurant dans la norme NF E 25-140 qui définit le couple goujon - bague réfractaire.

Quant à l'acier moulé, il est utilisé exceptionnellement pour réaliser sur mesure des pièces de géométrie complexe, qu'il ne serait pas possible de réaliser en acier laminé. De telles pièces servent par exemple d'appareils d'appui ou de nœuds d'assemblage dans certains projets d'architectes.

1.2 - CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MESURÉES PAR L'ESSAI DE TRACTION

1.2.1 - Limite d'élasticité

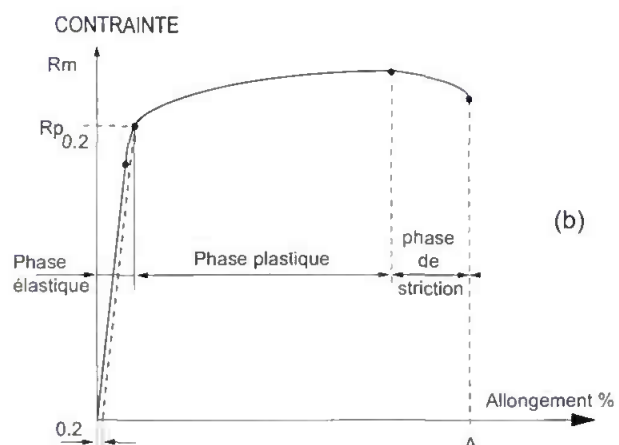
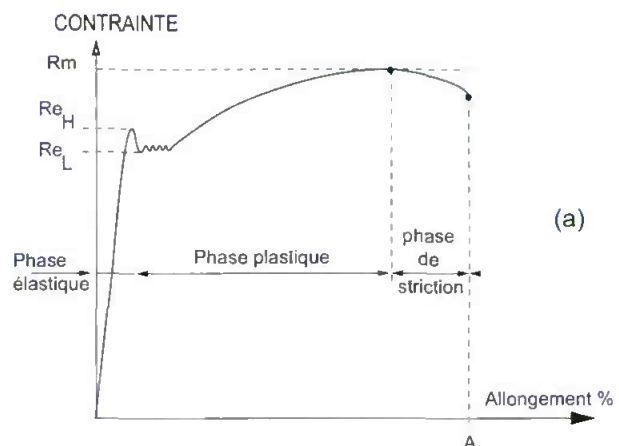
Deux caractéristiques mécaniques interviennent principalement dans les calculs : la limite d'élasticité et le module d'élasticité. Le module d'élasticité est pratiquement constant pour tous les aciers : $E = 210000 \text{ N/mm}^2$. Au contraire, la limite d'élasticité est différente suivant les types d'acier.

Pour élever la limite d'élasticité (et la résistance à la traction), un premier type de méthode a consisté à agir sur la composition chimique : augmentation de la teneur en carbone, incorporation de manganèse ou d'autres éléments tels que vanadium, niobium, molybdène... qui jouent sur le mécanisme de durcissement.

Ces actions sur la composition chimique sont limitées par la nécessité de ne pas trop élever le carbone équivalent, afin de conserver une soudabilité suffisante (le carbone équivalent est défini dans les normes par l'expression $CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$, dans laquelle les symboles représentent des teneurs en pourcentage).

Figure 1.1
Courbes contrainte de traction - allongement

a - courbe avec palier
b - courbe sans palier



Plus récemment, on a mis au point des techniques consistant à optimiser les conditions de laminage et de refroidissement (aciers thermomécaniques), ou bien comportant une opération de trempe et revenu. Ces nouveaux aciers sont évoqués en 1.5.2 ci-après.

La limite d'élasticité est notée R_e dans les normes de produits, avec parfois un indice supplémentaire. En effet, la limite d'élasticité peut être définie de plusieurs façons, chaque définition donnant des valeurs légèrement différentes. La valeur spécifiée dans les normes de produits est généralement la valeur minimale de la limite supérieure d'écoulement R_{eH} ; elle correspond au pic supérieur, facile à mesurer, qui apparaît avant le palier plastique (figure 1.1a).

Une autre limite d'élasticité est la limite inférieure R_{eL} , correspondant au pic inférieur observé après le passage par R_{eH} .

On peut définir également une limite conventionnelle d'élasticité R_p , valeur de la charge unitaire pour une valeur faible, mais mesurable de l'allongement rémanent. L'allongement habituellement retenu est 0,2 %, et la limite d'élasticité correspondante est notée $R_p 0,2$. Cette limite d'élasticité présente l'intérêt d'être définie même pour des aciers ayant une courbe sans palier, avec passage progressif de l'élasticité linéaire à la déformation plastique (figure 1.1b).

Les valeurs R_{eL} et R_p sont les plus représentatives du comportement de l'acier dans une section plastifiée à l'état-limite ultime, mais elles sont plus difficiles à mesurer que R_{eH} . C'est pour cette raison que, généralement, les normes de produits spécifient seulement R_{eH} .

Dans les règlements de calcul récents (les eurocodes notamment), la limite d'élasticité est notée f_y , et sa valeur est prise égale à R_{eH} .

Les valeurs spécifiées dans les normes sont contrôlées par le fournisseur à partir d'essais de traction sur éprouvettes normalisées. Le nombre et l'emplacement des prélèvements sont aussi normalisés.

Pour les produits plats, le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG (article 6.2) impose qu'un essai de traction et un essai de flexion par choc soient effectués sur chaque tôle-mère ou chaque bobine-mère. Ainsi, les valeurs spécifiées dans les normes peuvent être considérées comme des valeurs minimales, et non comme des valeurs caractéristiques ayant seulement une certaine probabilité d'être atteintes.

Afin de classer les aciers suivant leur limite d'élasticité (et leur résistance à la traction), on utilise la notion de nuance. La nuance est exprimée par la valeur de la limite d'élasticité spécifiée pour la gamme d'épaisseur la plus faible. Ainsi, pour les tôles, la nuance est la limite d'élasticité spécifiée pour les épaisseurs inférieures ou égales à 16 mm.

La nuance est exprimée en N/mm^2 , ce nombre étant précédé de la lettre S dans le cas des aciers de construction (initiale du mot anglais "structural"). À chaque catégorie d'acier est attribuée une lettre différente : B pour les aciers pour béton armé, E pour les aciers pour construction mécanique...

Les nuances normalisées des aciers de construction sont S235, S275, S355, S420 et S460.

L'expression "aciers à haute limite d'élasticité" (HLE) n'a pas de définition précise, et englobe des nuances très différentes suivant les domaines de construction et suivant les époques ; dans le domaine des ponts métalliques, cette expression a tendance à désigner maintenant les nuances à partir de S420.

Les limites d'élasticité spécifiées dans les normes décroissent quand l'épaisseur du produit augmente (la composition chimique restant constante). En effet, pour les fortes épaisseurs, les températures de fin de laminage sont plus élevées, et les vitesses de refroidissement plus faibles ; l'affinage du grain durant le laminage est donc moindre. Ces limites d'élasticité sont indiquées au tableau 1.1 pour les tôles d'épaisseur constante.

	$t \leq 16 \text{ mm}$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 150$
S235	235	225	215	215	215	195
S275	275	265	255	245	235	225
S355	355	345	335	325	315	295
S420	420	400	390	370	360	340
S460	460	440	430	410	400	-

Tableau 1.1

Limite d'élasticité (en N/mm^2) des produits d'épaisseur constante

Pour les tôles profilées en long, la limite d'élasticité est, dans chaque nuance, une fonction continue de l'épaisseur de la tôle, qui est fournie dans la norme NF A 36-270. Les valeurs sont explicitées au tableau 1.2.

S235	$t \leq 40 \text{ mm} : R_e = 225$	$t > 40 \text{ mm} : R_e(t) = 225 - 70 \log_{10}(t/40)$
S275	$t \leq 40 \text{ mm} : R_e = 265$	$t > 40 \text{ mm} : R_e(t) = 265 - 70 \log_{10}(t/40)$
S355	$3t \leq 35 \text{ mm} : R_e = 345$	$t > 35 \text{ mm} : R_e(t) = 345 - 70 \log_{10}(t/35)$
S420	$t \leq 35 \text{ mm} : R_e = 400$	$t > 35 \text{ mm} : R_e(t) = 400 - 70 \log_{10}(t/35)$
S460	$t \leq 35 \text{ mm} : R_e = 440$	$t > 35 \text{ mm} : R_e(t) = 440 - 70 \log_{10}(t/35)$

Tableau 1.2

Limite d'élasticité (en N/mm^2) des tôles profilées en long

Pour les goujons de connexion des ponts mixtes, le formage à froid entraîne une augmentation par écrouissage de la limite d'élasticité de l'acier d'origine. Les valeurs à introduire dans les formules de résistance sont fournies dans la norme NF E 25-140. Ces valeurs sont les suivantes, pour des goujons fabriqués à partir d'acier S235 :

- dans le cadre du règlement de calcul des ponts mixtes, la valeur minimale de la limite d'élasticité du goujon, soit 350 N/mm^2 ;
- dans le cadre de l'eurocode 4, partie 2, la valeur minimale de la résistance à la traction du goujon, soit 450 N/mm^2 .

1.2.2 - Résistance à la traction

La résistance à la traction est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction, rapportée à l'aire de la section initiale de l'éprouvette (figure 1.1) :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

La résistance à la traction est notée R_m dans les normes de produit, qui spécifient une fourchette de valeurs (valeur minimale et valeur maximale) en fonction de la nuance et de l'épaisseur. Elle est notée f_u dans les eurocodes ; en l'absence de précision, c'est la valeur minimale qui est considérée.

Les règlements de calcul français ne font pas intervenir explicitement la résistance à la traction dans les vérifications. Par contre, les eurocodes la font intervenir dans les vérifications à l'état-limite ultime de certaines sections, des assemblages boulonnés ou soudés, des connecteurs en goujon, etc.

1.2.3 - Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture, noté A , est la valeur rémanente de l'allongement après rupture de l'éprouvette, exprimée en pourcentage de la longueur initiale (figure 1.1) :

$$A = 100 \frac{L_r - L_0}{L_0}$$

Une valeur donnée de l'allongement à la rupture est d'autant plus difficile à obtenir que la résistance à la traction est plus élevée. Les moyens dont dispose le sidérurgiste pour augmenter l'allongement à la rupture consistent à affiner la taille du grain et à améliorer l'état inclusionnaire.

L'allongement à la rupture est une quantification de la ductilité de l'acier, c'est à dire de sa capacité à se déformer plastiquement.

En cas de dépassement local d'effort, la ductilité prévient la rupture en permettant un écoulement plastique localisé et une redistribution des efforts vers des zones moins sollicitées. La ductilité est donc une condition indispensable à la validité des calculs usuels : c'est elle qui permet d'ignorer les contraintes résiduelles dues au laminage, à l'oxycoupage et au soudage, de calculer les sections en plasticité, de vérifier les assemblages avec des modèles simples...

L'eurocode 3 exige $A \geq 15 \%$ (soit un allongement plastique d'environ cent fois l'allongement élastique f_y/E pour un acier S355). Les normes de produit spécifient une valeur minimale, qui est variable suivant la nuance et suivant l'épaisseur ; cette valeur satisfait, pour les aciers utilisés dans les ponts, à la condition de l'eurocode.

Par ailleurs, lorsqu'une fissure se forme, la ductilité autorise l'existence d'une zone plastifiée dans la zone de concentration des contraintes, en fond de fissure, ce qui accroît l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure : une amélioration de la ductilité améliore donc la ténacité. Cette autre caractéristique de l'acier, la ténacité, fait l'objet de la section 1.3 suivante.

1.3 - RUPTURE FRAGILE, CLASSES DE QUALITÉ DES ACIERS

1.3.1 - Généralités sur la rupture fragile

Les calculs de structure classiques permettent de se prémunir contre la ruine par écoulement plastique et dépassement de la résistance, telle qu'elle se produit dans l'essai de traction d'une éprouvette.

Mais il faut se prémunir aussi contre le risque de rupture fragile sous l'action de charges inférieures à la charge ultime des calculs classiques.

Ce type de rupture se produit par propagation quasi instantanée d'une fissure, sans déformation plastique sauf dans une zone très réduite à la pointe de la fissure. Le phénomène a le caractère d'une instabilité : l'énergie mécanique libérée par l'extension de la fissure est supérieure à l'énergie nécessaire pour créer de nouvelles surfaces de rupture.

L'aspect de la surface de rupture permet de distinguer son caractère fragile ou ductile : une rupture fragile se caractérise par une cassure plane et un faciès à grains, alors qu'une rupture ductile présente d'importantes zones de déformation plastique et un faciès fibreux.

Les facteurs qui influent sur le risque de rupture fragile sont de deux sortes : ceux liés à la structure et à ses conditions d'exploitation d'une part, et ceux propres à l'acier d'autre part.

Les facteurs favorisant le risque de rupture fragile, liés à la structure et à ses conditions d'exploitation, sont les suivants :

- contraintes de traction élevées, qu'elles proviennent de bridages ou de charges appliquées ;
- multiaxialité des contraintes de traction, empêchant les écoulements plastiques ; le risque d'avoir des contraintes triaxiales dans une pièce augmente avec l'épaisseur de la pièce ;
- présence, dans l'acier ou dans les assemblages soudés, de défauts de nature géométrique ou mécanique tels que :
 - . changement brusque de section d'une pièce, angle rentrant ou autre irrégularité structurale ;
 - . manque de pénétration, ou autre défaut technologique d'une soudure ;
 - . amorce de fissure (par fatigue, fissuration à froid ou à chaud, corrosion...) ;
 - . zone affectée thermiquement, zone de vieillissement consécutif à une déformation plastique telle qu'un formage à froid ;
- basse température d'exploitation ;
- vitesse de mise en charge élevée, existence d'actions dynamiques.

Les défauts sont nocifs par la concentration de contraintes triaxiales qu'ils produisent à leur voisinage (effet d'entaille). Ces contraintes peuvent atteindre localement plusieurs fois la contrainte appliquée ; le coefficient d'amplification est d'autant plus élevé que l'entaille est plus aiguë et que les dimensions du défaut sont plus importantes. Le maximum d'acuité est obtenu avec les fissures de fatigue.

À partir d'une taille critique du défaut, une fissure instable se propage, conduisant à la rupture brutale de la pièce.

Les constructions soudées sont plus vulnérables que les constructions non soudées : les soudures provoquent des contraintes de bridage, peuvent amener des amorces de fissure, et créent une continuité entre les pièces qui permet la propagation des fissures.

Quant au rôle propre de l'acier vis-à-vis de la rupture fragile, il est exprimé par la ténacité. Ce caractère intrinsèque d'un matériau est sa capacité à absorber l'énergie nécessaire à l'extension d'une fissure. Il est défini dans le cadre de la mécanique de la rupture (voir 1.3.2 ci-après).

Pour une taille fixée du défaut critique, plus les facteurs liés à la structure et à son environnement sont défavorables, plus l'acier constitutif doit avoir de ténacité.

Inversement, pour une structure et un environnement donnés, plus la ténacité est élevée, plus la taille du défaut critique est importante. La ténacité, facteur de résistance à la rupture fragile, peut être considérée aussi comme un facteur de tenue à la fatigue : la durée de la phase de propagation des fissures, avant la rupture, est d'autant plus longue que la taille critique des défauts est plus grande. Cet effet bénéfique n'est cependant pas pris en compte dans les règles de calcul à la fatigue : les courbes d'endommagement $\Delta\sigma - N$ sont déterminées expérimentalement sur de petits échantillons, en considérant un critère conventionnel de taille de fissure.

Pour obtenir la ténacité nécessaire, le sidérurgiste peut :

- modifier la composition chimique de l'acier dans le sens d'une diminution du carbone équivalent ;
- agir sur la structure métallographique, notamment affiner la taille du grain en jouant sur les conditions de laminage et de refroidissement.

On connaît des cas de rupture brutale, de type fragile, ayant entraîné la destruction instantanée de grandes structures (navires et ponts notamment). Elles sont survenues généralement par grand froid, à partir d'un défaut de petite taille resté inaperçu auparavant. Ces destructions catastrophiques sont toujours venues de l'emploi d'un acier inadapté au type de construction concerné.

En France, un exemple typique de ce genre d'accident est celui du pont suspendu de Sully-sur-Loire. L'ouvrage s'est effondré le 16 janvier 1985 à la suite de la rupture des étriers d'attache d'un câble de tête. Les ruptures se sont produites dans les parties filetées des étriers : ces zones étaient le siège de contraintes de traction élevées, et le fond des filets constituait une entaille, prolongée probablement par de petites fissures de fatigue ou de fatigue-corrosion. La température ambiante était de -23°C . L'acier, mis en œuvre en 1946, avait une très faible ténacité : il s'agissait d'un acier pour construction mécanique, qui aurait dû subir un traitement thermique, mais qui avait été utilisé à l'état brut.

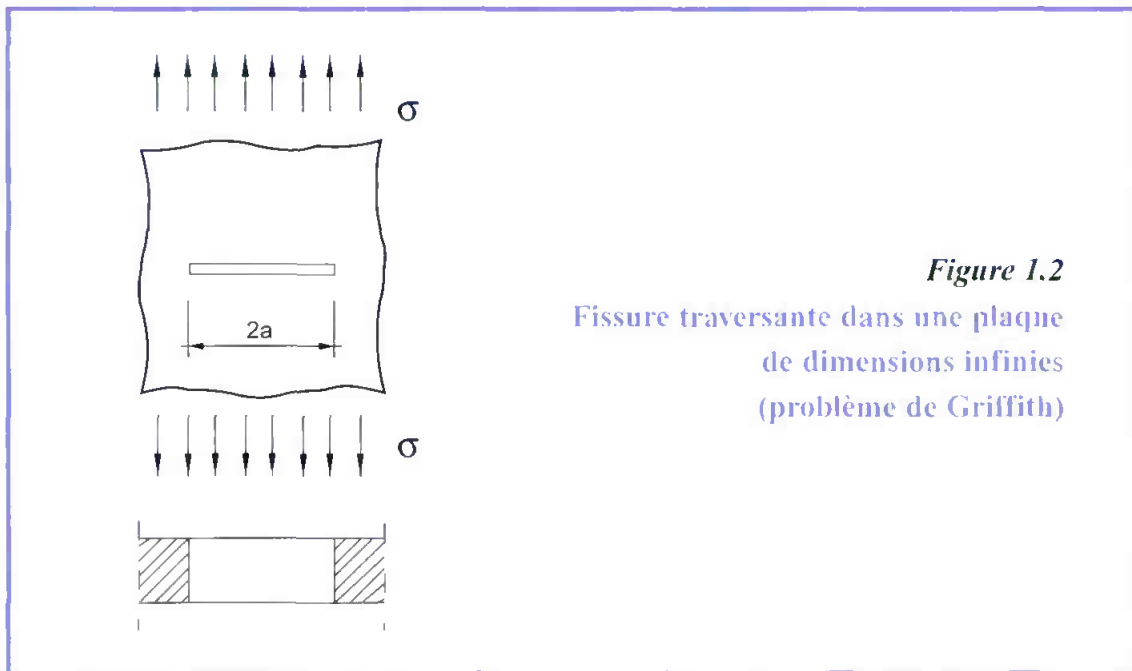
De nos jours, avec les qualités d'acier utilisées pour les ponts (voir ci-après), une rupture fragile ne pourrait se produire qu'à partir d'une fissure préexistante de taille très importante. Il est exclu qu'une telle fissure échappe aux contrôles d'exécution. Elle ne pourrait apparaître qu'après une longue durée d'évolution sous l'action de charges de fatigue. Les dispositions réglementaires en matière de calcul, de conception et de choix des matériaux visent à garantir que la durée d'évolution d'une fissure éventuelle, avant atteinte de la taille critique, sera au moins égale à la "durée de vie de calcul" des ouvrages (cent ans). Les inspections périodiques des ouvrages sont une mesure de sécurité complémentaire.

1.3.2 - Règles françaises pour la sécurité à la rupture fragile

La mécanique de la rupture permet d'analyser les contraintes en fond de fissure et d'en déduire le degré de nocivité des défauts. Il existe plusieurs théories ; la théorie linéaire élastique, qui a été établie la première, néglige tout phénomène de plastification, et fournit donc une approximation du côté de la sécurité.

Cette théorie fait intervenir un paramètre appelé facteur d'intensité de contrainte, qui rassemble les termes de chargement et de géométrie. Ce paramètre est noté K_I dans le cas de forces de traction tendant à ouvrir la fissure, K_{II} et K_{III} dans le cas de forces de cisaillement.

Le cas théorique le plus simple est celui d'une plaque plane, de dimensions infinies, tendue par un champ uniforme de contrainte, et comportant une fissure traversante de longueur $2a$ perpendiculaire à ce champ de contrainte (problème de Griffith, figure 1.2). On démontre que le facteur d'intensité de contrainte est dans ce cas : $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ (à noter que la dimension est celle du produit d'une contrainte par la racine carrée d'une longueur).



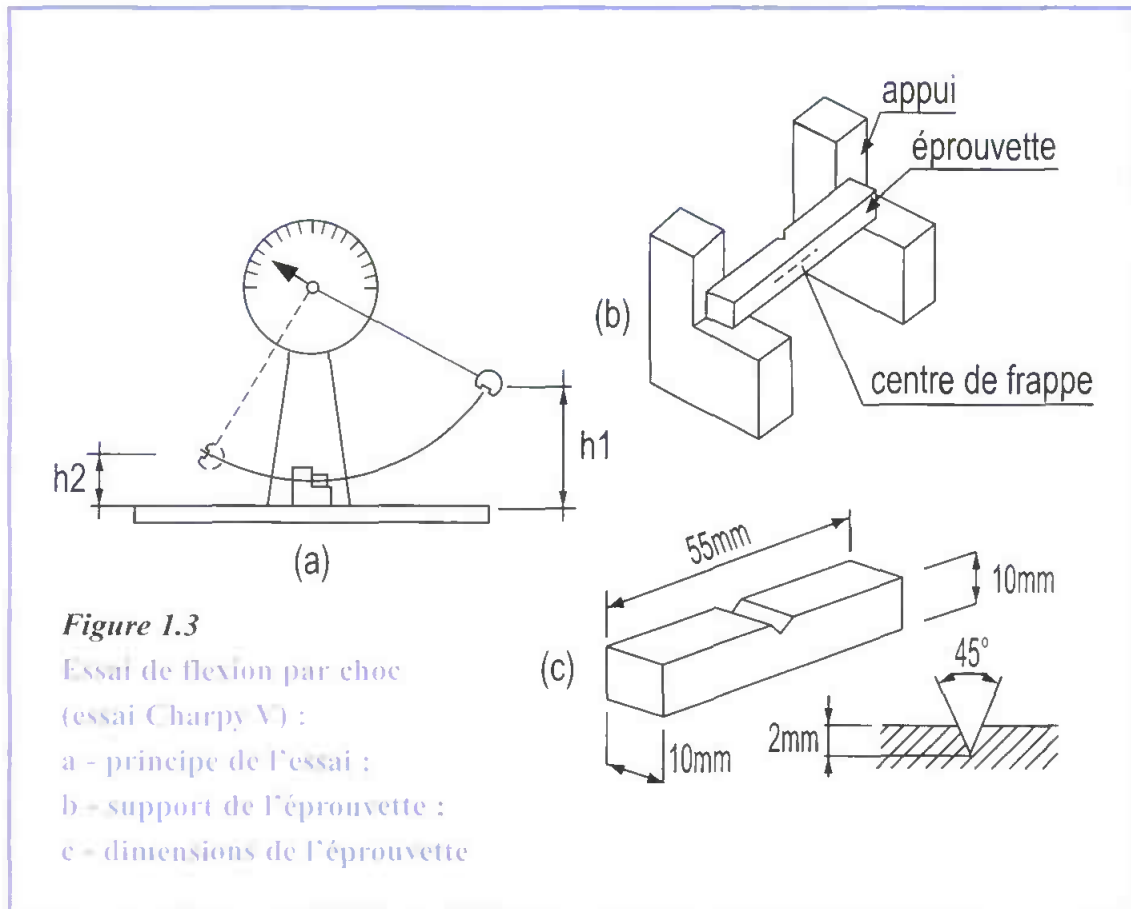
Lorsque le facteur d'intensité de contrainte atteint ou dépasse une valeur critique K_{Ic} , la fissure se propage quasi instantanément. Il est donc vital d'avoir $K_I < K_{Ic}$.

K_{Ic} est la ténacité du matériau. Comme les autres caractéristiques mécaniques, la ténacité varie avec la température. Contrairement à la limite d'élasticité, elle diminue quand la température diminue.

On peut mesurer la ténacité d'un acier sur une éprouvette préalablement fissurée par fatigue, suivant une méthode normalisée (NF A 03-180). Mais c'est une opération longue et coûteuse, qui n'est pas effectuée couramment.

On utilise en fait, pour le contrôle industriel des aciers, un essai conventionnel beaucoup plus simple : l'essai de flexion par choc qui permet de mesurer une énergie de rupture par choc, ou résilience (figure 1.3). La ténacité d'un acier et sa résilience sont deux caractéristiques distinctes (les unités mêmes sont différentes). Cependant, on constate expérimentalement une corrélation entre les deux grandeurs, et on peut les relier par une relation empirique.

L'essai de flexion par choc consiste à rompre d'un seul coup, avec un marteau pendulaire, une éprouvette reposant sur deux appuis. L'éprouvette comporte une entaille en son milieu, dont le rôle est de créer, sous l'action du choc, un système triaxial de contraintes de traction.



La section de l'éprouvette est fixée. Les deux grandeurs variables servant à caractériser le comportement de l'acier sont la température de l'éprouvette lors de l'essai, et l'énergie de rupture en joules (déduite du poids du marteau et de $h_1 - h_2$, hauteur de chute moins la hauteur de remontée après le choc).

Il existe diverses variantes de l'essai de flexion par choc. C'est l'essai dit Charpy V, déjà utilisé dans les anciennes normes françaises, qui a été retenu dans les normes européennes actuelles. L'éprouvette a une section hors entaille de 10 mm x 10 mm ; l'entaille, en forme de V, a une profondeur de 2 mm.

L'évolution de l'énergie de rupture en fonction de la température d'essai est décrite par une courbe qui a l'allure indiquée à la Figure 1.4. La rupture est fragile ou ductile suivant que la température de l'éprouvette est basse ou élevée. L'énergie absorbée varie peu dans chacune des deux zones de température, mais elle varie rapidement entre les deux, dans une plage de température appelée zone de transition, dont l'étendue est de l'ordre de 30°C.

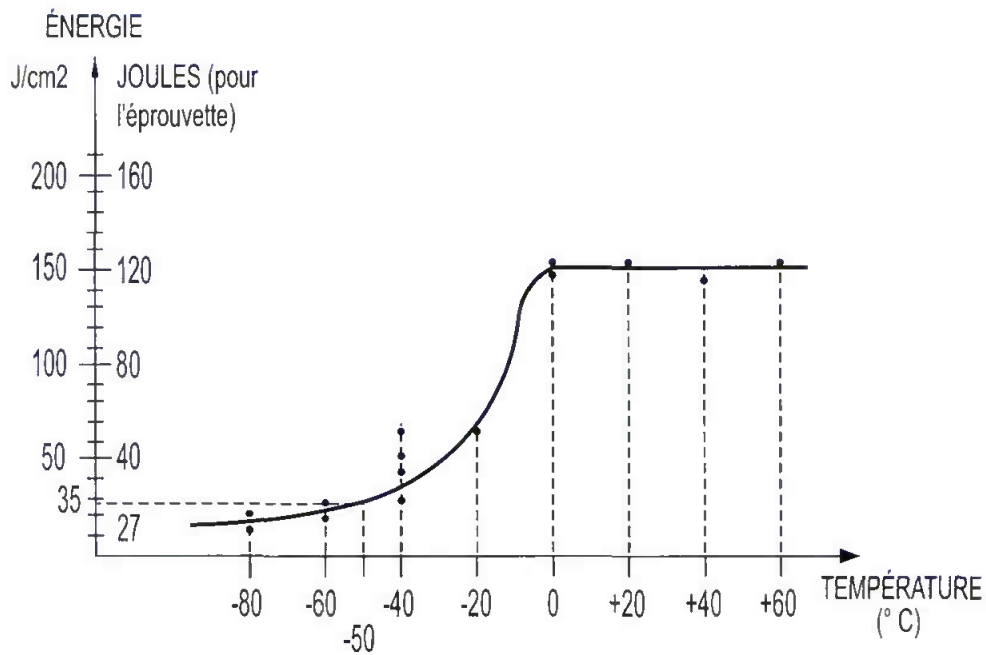


Figure 1.4
 Courbe de transition Charpy V d'un acier de qualité L.

Il reste à établir, à partir de ces principes, une méthode d'application pratique.

Toutes les méthodes comprennent les étapes suivantes :

- choix d'une théorie d'analyse à la rupture ;
- définition de la taille maximale du défaut (défaut critique), et des conditions de service les plus défavorables pour les ouvrages (contrainte maximale perpendiculaire au défaut, température minimale de service, épaisseur maximale des pièces, vitesse maximale de mise en charge) ;
- relation empirique entre la ténacité de l'acier d'une part, et les résultats de l'essai de flexion par choc d'autre part.

La méthode utilisée en France actuellement a été conçue par Germain Sanz à l'IRSID à la fin des années 1970 ; elle a été publiée en 1980 dans le fascicule de documentation de l'AFNOR :

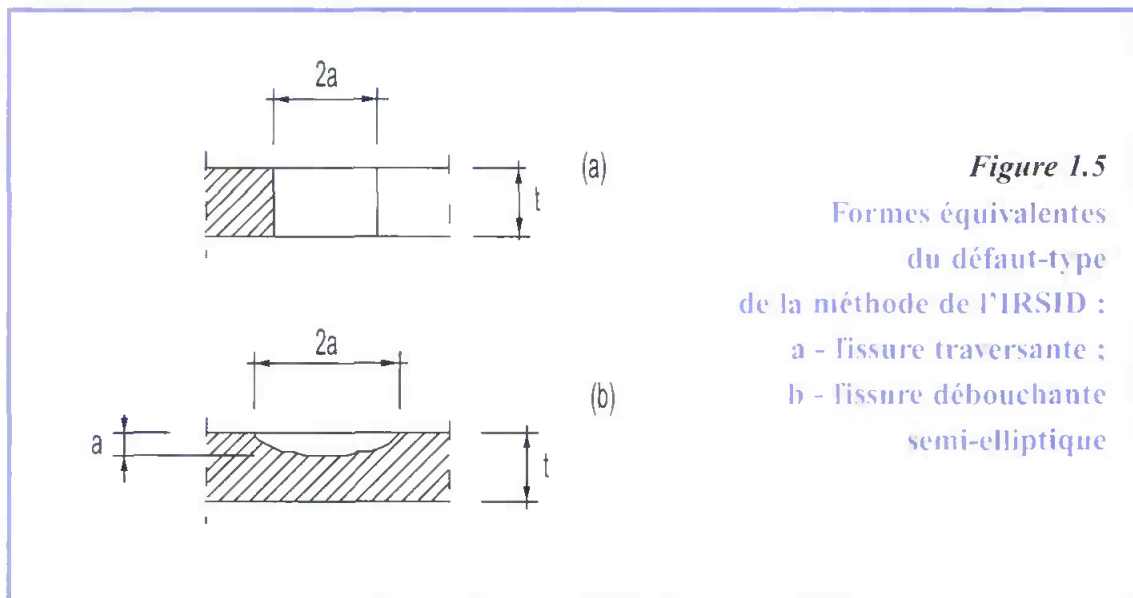
FD A 36-010 : choix des qualités d'aciers pour construction métallique ou chaudronnée vis-à-vis du risque de rupture fragile.

C'est d'après cette méthode qu'ont été fixées les qualités et les limites d'épaisseur des produits dans le fascicule 66 du CCTG (article 11.2.1).

Cette méthode est basée sur la mécanique de la rupture linéaire élastique, qui néglige l'effet des plastifications. L'écart avec la réalité, qui est du côté de la sécurité, est plus important avec des pièces minces qu'avec des pièces épaisses.

Le défaut critique adopté n'est pas un paramètre modulable suivant les applications : il est fixé une fois pour toutes dans la méthode. Ses dimensions ont été choisies suffisamment grandes pour qu'il ne risque pas d'échapper aux contrôles lors de la construction, ni aux inspections après la mise en service. Il peut revêtir deux aspects équivalents : fissure traversante, ou défaut superficiel de forme semi-elliptique débouchant en surface (figure 1.5). Les dimensions dépendent de l'épaisseur de la tôle.

Pour une tôle épaisse ($t \geq 110$ mm), la fissure traversante critique a une longueur $2a = 28$ mm ; le défaut superficiel équivalent a une longueur $2c = 50$ mm et une profondeur $a = 25$ mm. Les dimensions critiques sont plus faibles pour une tôle plus mince. Dans tous les cas, la tôle est supposée infiniment large.



Les paramètres correspondant aux conditions de service sont modulables suivant les applications.

La contrainte de traction maximale à adopter pour les ponts est la limite d'élasticité nominale des normes de produits majorée de 50 N/mm^2 . La majoration tient compte de ce que la valeur nominale est une valeur minimale, qui est donc habituellement dépassée.

La température minimale de service des ponts est prise égale à -20°C pour les environnements courants. Dans cette méthode, la température minimale de service des ouvrages n'a pas de rapport avec la température de l'éprouvette dans l'essai de flexion par choc, laquelle n'est qu'une température repère choisie arbitrairement pour situer par rapport à elle la température de transition de l'acier.

La vitesse de mise en charge $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta\sigma}{E \cdot \Delta t}$ exprime le mode d'application de la charge, mais aussi la réponse du pont et divers autres facteurs. La valeur recommandée pour les ponts, correspond à la valeur-type intermédiaire de la méthode de l'IRSID, qui en définit trois :

$$\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$$

- sollicitations statiques : 0,0001 s⁻¹
- sollicitations lentes : 0,1 s⁻¹
- sollicitations dynamiques : 10 s⁻¹.

Les résultats sont présentés dans le fascicule de documentation de l'AFNOR sous forme d'abaques directement utilisables par les projeteurs, donnant l'épaisseur maximale des pièces en fonction de la température minimale de service et des autres paramètres.

Ces abaques s'appliquent aux constructions de toutes natures. Pour fournir dans le présent guide des valeurs numériques correspondant au cas particulier des ponts, les calculs ont été repris avec les données recommandées pour les ponts.

Les résultats de ce calcul sont fournis au [tableau 1.3](#), sous forme d'épaisseurs d'acier à ne pas dépasser pour éviter la propagation du défaut-type, en fonction des nuances d'acier normalisées et de quatre valeurs de la température d'essai.

Les températures d'essai de la méthode de l'IRSID s'entendent pour des essais effectués avec une énergie de rupture de 28 joules. Cette énergie est différente des énergies de référence adoptées pour définir les classes de qualité dans les normes actuelles de produits (voir 1.3.3 ci-après). Il s'ensuit que les températures d'essai indiquées dans la première colonne du [tableau 1.3](#), et considérées dans la méthode de l'IRSID, ne sont pas celles effectivement pratiquées dans les essais normalisés actuels. Il faut donc établir des équivalences entre les couples de paramètres température d'essai, énergie de rupture ; elles ne sont qu'approximatives, de sorte que les correspondances avec les classes de qualité indiquées dans le tableau sont elles-mêmes approximatives.

Le [tableau 1.3](#) montre que, pour un même niveau de sécurité d'une structure, on doit augmenter la ténacité de l'acier, exprimée par sa classe de qualité, lorsqu'on augmente la nuance de l'acier ou l'épaisseur du produit. Cela est conforme à ce qui a été vu précédemment : une nuance plus élevée augmente le niveau des contraintes susceptibles d'être présentes ; une épaisseur plus forte augmente le degré de triaxialité des contraintes. En ce qui concerne les épaisseurs, les valeurs "illimitées" qui apparaissent dans le tableau correspondent au fait que les tôles, au-delà de 110 mm, sont censées être en état de déformation plane dans la méthode de l'IRSID. L'épaisseur n'influe donc plus sur la triaxialité des contraintes au-delà de cette valeur.

Temp ^{re} d'essai (énergie de 28 J)	Classes de qu. des normes (correspondance approx ^{ve})		Épaisseurs maximales				
	NF EN 10025 NF EN 10155	NF EN 10113	S235	S275	S355	S420	S460
0°C	J0	-	47 mm	35 mm	23 mm	18 mm	15 mm
-20°C	J2	-	90 mm	68 mm	46 mm	36 mm	31 mm
-40°C	K2	qual. de base	illimitée	illimitée	90 mm	70 mm	61 mm
-50°C	-	L	illimitée	illimitée	illimitée	97 mm	87 mm

Tableau 1.3

Sécurité vis-à-vis de la rupture fragile : épaisseur maximale des pièces tendues calculée suivant le fascicule de documentation A 36-010 de l'AFNOR, pour une température minimale d'exploitation de -20°C. Les températures d'essai des deux dernières lignes ne sont pas les températures d'essai adoptées actuellement, mais celles qui devraient être adoptées si les essais étaient effectués avec l'énergie de référence de la méthode de l'IRSID, soit 28 joules.

1.3.3 - Les classes de qualité des aciers définies dans les normes

Les normes de produits définissent des classes de qualité, à chacune desquelles correspond une valeur minimale de l'énergie de rupture suivant l'essai Charpy V, pour une température d'essai spécifiée. Bien entendu, toutes les modalités de l'essai sont normalisées.

Les niveaux d'énergie et les températures d'essai, ainsi que la symbolisation des classes, sont différentes actuellement suivant les normes.

Dans le cas des normes NF EN 10025 et NF EN 10155, choisir une classe de qualité revient à choisir entre deux niveaux d'énergie et entre trois températures d'essai, dont la valeur et la symbolisation sont :

- énergies de rupture par choc :

27 joules : J

40 joules : K

- températures d'essai :

+20°C : R (initiale de "room temperature")

0°C : 0

-20°C : 2

Une classe est codifiée en juxtaposant les symboles de ces deux paramètres ; K2, par exemple, représente une valeur garantie de 40 joules à -20°C (tableau 1.4).

	27 J	40 J
+20°C	JR	KR
0°C	J0	K0
-20°C	J2	K2 qual. de base
-50°C	J5 L	K5

Tableau 1.4

Classes de qualité des aciers : valeur minimale d'énergie de rupture et température d'essai spécifiées

Dans le cas de la norme NF EN 10113, on a le choix entre deux classes, sauf spécification différente dans les marchés :

- l'une, 40 joules à -20°C, est dite qualité de base et n'est codifiée par aucun symbole,
- l'autre, 27 joules à -50°C, est codifiée par la lettre L.

La norme prévoit en fait différentes températures d'essai, et spécifie une valeur minimale de l'énergie de rupture pour chacune d'elles ; mais, dans le cadre de l'application du fascicule 66 du CCTG (article II.2.1), c'est la valeur garantie pour la température la plus basse qui est spécifiée.

Les énergies de rupture effectives des aciers certifiés sont souvent nettement supérieures aux valeurs normalisées, notamment pour les aciers thermomécaniques. Cette différence dans le sens de la sécurité est voulue par les sidérurgistes : elle leur permet d'éviter les risques de non-conformité et de mise au rebut.

Les énergies de rupture de 27 et 40 joules qui servent à définir les classes de qualité dans les normes actuelles (tableau 1.4) sont différentes de la valeur 28 joules qui avait été adoptée dans la méthode de l'IRSID (tableau 1.3). Pour les classes de qualité basées sur 27 joules, les deux niveaux d'énergie sont suffisamment voisins pour pouvoir être confondus sans correction. Pour les classes de qualité basées sur 40 joules, il est nécessaire de définir une équivalence. Il n'existe pas de méthode scientifique pour cela, et une telle équivalence a donc un caractère un peu arbitraire. On a admis en France, pour l'application de la méthode de l'IRSID dans le cadre des normes actuelles, que 40 joules à -20°C équivalent à 27 joules à -40°C (voir par exemple [1.1], paragraphe 4.1.7). C'est ce qui a été adopté pour calculer les épaisseurs maximales du tableau 1.3 (l'eurocode 3 a retenu une équivalence plus défavorable : 40 joules à -20°C équivalent à 27 joules à -30°C)

On notera que l'énergie de rupture de l'essai Charpy V est exprimée maintenant pour l'éprouvette avec son entaille ; alors que dans les anciennes normes françaises, elle était rapportée à la section brute, entaille non déduite. Ainsi, pour un même acier, le nombre de joules est maintenant égal à 0,8 fois l'ancienne valeur.

Dans le cas où l'on aurait besoin de connaître la correspondance entre les nuances et qualités des normes en vigueur, et celles des anciennes normes françaises, on se reportera au tableau 5. Ces correspondances ne peuvent qu'être approximatives puisque les définitions sont différentes. Pour être complet, le tableau inclut la qualité JR, bien qu'elle ne soit pas admise pour les ponts.

Anciennes normes	Normes en vigueur
------------------	-------------------

Normes	NF A 35-501	NF EN 10025
Nuances	E 24	S235
	E 28	S275
	E 36	S355
Qualités	2	JR
	3	J0
	4	S235, S275 : J2N / S355 : K2N

Normes	NF A 35-504 et NF A 36-201	NF EN 10113
Nuances	E 355	S355
	E 420	S420
	E 460	S460
Qualités	R	N
	FP	NL

Normes	NF A 35-502	NF EN 10155
Nuances et	E 24 W3	S235J0W
	E 24 W4	S235J2W
Qualités	E 36 WB4	S355K2G1W

Tableau 1.5

Correspondance entre les anciennes et les actuelles normes, nuances et qualités d'acier.

1.3.4 - Récapitulation des précautions contre la rupture fragile

Le choix d'une qualité d'acier appropriée est la mesure essentielle contre le risque de rupture fragile. Les dispositions à adopter, basées sur les considérations qui précèdent, sont détaillées en 1.6 ci-après.

Les électrodes et fils-électrodes pour soudage doivent être choisis également de façon à ce que les assemblages aient une ténacité suffisante (voir 2.6 au chapitre suivant).

Les dispositions constructives, y compris les détails d'exécution, doivent être conçus par le projecteur de façon à éviter les discontinuités pouvant produire un effet d'entaille : ainsi, il est recommandé d'arrondir les angles rentrant des découpes avec un rayon d'au moins 5 mm.

L'exploitant de l'ouvrage, de son côté, doit veiller à ce que les inspections périodiques permettent de détecter les fissures éventuelles initiées par un défaut, puis développées par la fatigue. La dimension d'une fissure non détectée doit être suffisamment faible pour que cette fissure ne puisse pas atteindre la taille critique avant l'inspection suivante.

1.4 - SOUDABILITÉ DES ACIERS

1.4.1 - Définition de la soudabilité

Les propriétés qu'on vient de voir (propriétés en traction, énergie de rupture par choc) sont des caractéristiques mécaniques de l'acier. On peut les définir et les mesurer avec précision, et les spécifier quantitativement par référence à des normes.

La soudabilité, par contre, est un concept technologique.

Elle dépend pour une part de l'acier à souder. Ce rôle intrinsèque de l'acier est lié essentiellement à la quantité de martensite qui se forme dans la zone affectée thermiquement par le soudage. Les normes de produits spécifient une valeur maximale du carbone équivalent, qui est un indicateur de cet aspect de la soudabilité, dit soudabilité métallurgique.

L'épaisseur du produit joue un rôle défavorable : la zone affectée thermiquement refroidit plus vite par conduction si elle fait partie d'une pièce massive, composée de tôles épaisses ; il y a plus de risque alors d'obtenir des zones fragiles.

La soudabilité, d'autre part, est fonction des dispositions constructives et notamment des contraintes de bridage. Ces contraintes dépendent de nombreux facteurs tels que :

- la limite d'élasticité de l'acier de base et du métal d'apport ; une valeur élevée augmente la rigidité globale, et élève par ailleurs le niveau d'écrêtement par plastification des contraintes locales ;
- la conception de l'assemblage et son degré de bridage ; l'épaisseur des produits joue à nouveau un rôle défavorable en augmentant la rigidité ;
- le type de soudure, la forme des chanfreins...

La soudabilité dépend également des conditions de soudage. Par exemple, l'apport d'hydrogène favorise la fissuration à froid.

La soudabilité est donc une notion relative et complexe, qu'on ne peut pas spécifier de façon simple.

Physiquement, il y a un lien entre la résistance à la rupture fragile et la soudabilité d'un acier ; mais cela n'apparaît pas dans la définition des classes de qualité : une qualité d'acier donne une garantie pour la résistance à la rupture fragile, mais pas pour la soudabilité. Par exemple, si l'on considère un acier S355 de qualité K2 de la norme NF EN 10025, un acier S355 N de la qualité de base de la norme NF EN 10113, et un acier thermomécanique S355 M de la qualité de base de cette même norme, ces trois aciers sont de nuance identique, et appartiennent à des classes de qualité équivalentes (ils apparaissent sur la même ligne du tableau 1.3).

Ils ont donc des valeurs garanties identiques pour la limite d'élasticité, la résistance à la rupture fragile... Mais ces caractéristiques sont obtenues par des compositions chimiques et des structures métallographiques différentes, de sorte que les soudabilités sont différentes, le troisième acier étant bien meilleur que le premier sur ce point.

Une meilleure soudabilité a deux conséquences pratiques :

- un risque moins élevé de désordre dans les assemblages dû aux altérations du métal par le soudage ;
- des précautions moins contraignantes lors du soudage pour éviter ces désordres.

Ces risques de désordre, et les précautions à prendre, sont passés en revue ci-après.

1.4.2 - Fissuration à froid

Causes de la fissuration à froid

La fissuration à froid, ou fissuration différée, est l'incident le plus fréquent parmi ceux liés à un défaut de soudabilité. Elle se produit sous les cordons de soudure, dans les zones affectées thermiquement, du moins dans le cas des aciers classiques, c'est à dire à l'état normalisé (figure 1.6).

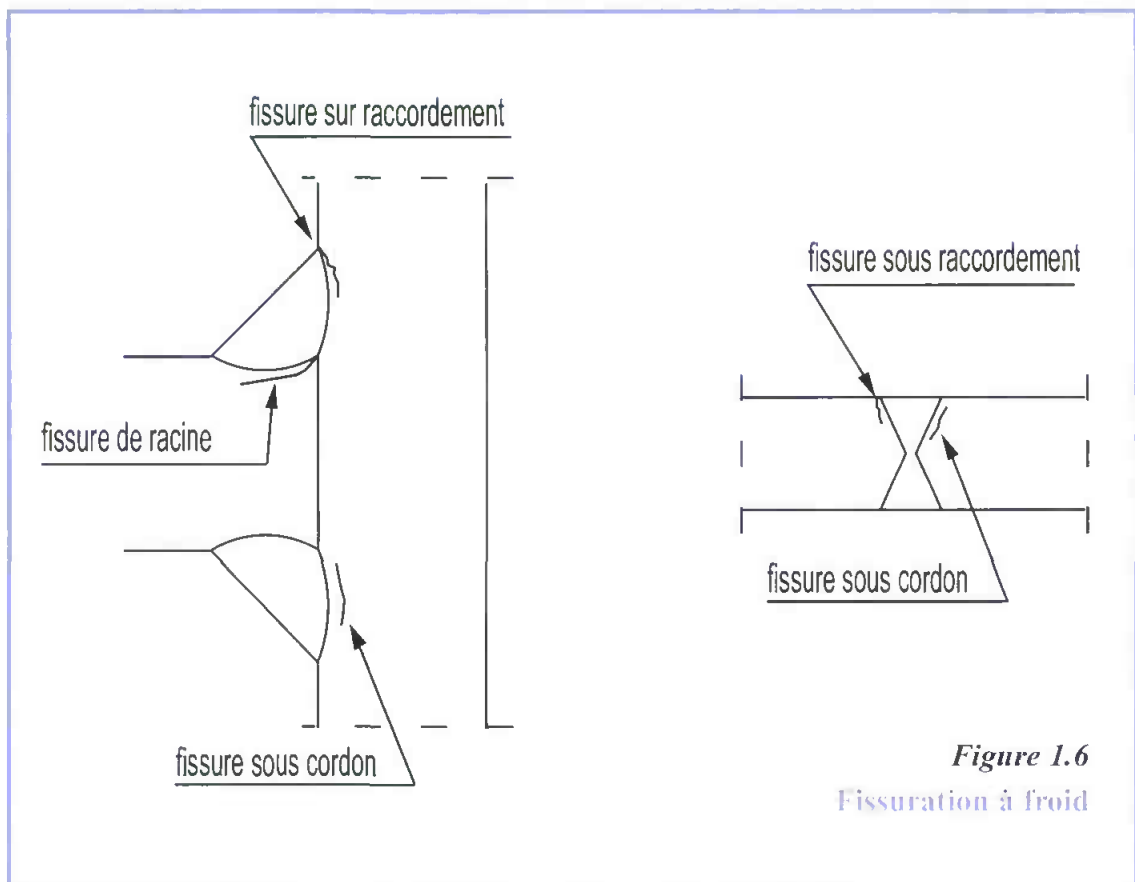


Figure 1.6
Fissuration à froid

Son mécanisme résulte de l'action de l'hydrogène sur une microstructure métallographique fragile soumise à des contraintes. Il y a donc trois sortes de facteurs, liés respectivement à l'acier, à l'état de contraintes des pièces, et aux conditions de soudage :

- Acier de base (ou métal fondu) ayant un carbone équivalent élevé, et contenant des impuretés. Il peut en résulter une structure métallographique fragile de type martensitique après soudage, si le refroidissement est trop rapide.
- Contraintes de traction élevées dans la zone affectée thermiquement par le soudage (bridage du retrait).
- Présence d'hydrogène dans le cordon de soudure. Cet hydrogène provient de la décomposition, dans l'arc électrique, de l'humidité contenue dans les enrobages et dans les flux (eau résiduelle de fabrication, reprise d'humidité après l'ouverture du paquet...). Il provient aussi, dans une moindre mesure, de l'humidité contenue dans l'atmosphère de soudage, et de celle éventuellement présente sur les pièces à souder.

L'hydrogène naissant monoatomique est retenu en solution sursaturée dans la zone de métal fondu. Cet hydrogène est "diffusible", c'est à dire que, après refroidissement, il tend à diffuser du métal fondu vers la zone affectée thermiquement. S'il y a formation de martensite, cet hydrogène se concentre dans les dislocations du réseau de la structure métallographique, et donne lieu à de fortes pressions locales, qui s'ajoutent aux contraintes de bridage. Une fissuration peut s'amorcer grâce à la faible ténacité de la martensite, et progresser durant quelques heures ou quelques jours après le soudage, jusqu'à ce que la concentration locale d'hydrogène ait suffisamment diminué.

Précautions contre la fissuration à froid : dispositions concernant les matériaux

En ce qui concerne l'acier de base, diverses dispositions visant à prémunir contre la fissuration à froid sont imposées dans les normes, dans le CCTG, et au moyen des certifications.

Les normes de produits indiquent, à titre optionnel, des valeurs maximales du carbone équivalent. Le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG contient une clause imposant le respect de ces valeurs maximales.

D'autre part, des essais permettent d'évaluer l'aptitude d'un acier au soudage :

- l'essai de fissuration sur implant permet de quantifier la sensibilité de l'acier de base au risque de fissuration, en fonction de la teneur en hydrogène du métal d'apport ;
- la mesure de la dureté de la zone affectée thermiquement ("dureté sous cordon") en fonction d'un paramètre caractérisant le refroidissement permet d'évaluer la tendance de l'acier à générer des structures dures, donc fragiles.

De tels essais et des résultats minimaux sont requis dans le cadre de la certification NF-Acier (voir le chapitre 6 ci-après).

En ce qui concerne les produits pour soudage, des conditions sur leurs caractéristiques mécaniques et sur leur teneur en hydrogène sont aussi à respecter (voir le chapitre Soudage ci-après). L'utilisation de tôles en acier thermomécanique (paragraphe 1.5.2 ci-après) amoindrit le risque de fissuration à froid dans la zone affectée thermiquement, composée de métal de base ; mais le risque demeure dans la zone de métal fondu, composée de métal de base et de métal

d'apport. Pour bénéficier des avantages des aciers thermomécaniques, il convient d'utiliser des produits d'apport à basse ou très basse teneur en hydrogène, comme spécifié dans le fascicule 66 du CCTG (article II.5.2).

Précautions contre la fissuration à froid : conception et exécution des assemblages

Lors de la conception et de l'exécution des assemblages soudés, l'entrepreneur doit prendre certaines précautions :

- Minimiser les contraintes dues au bridage, en étudiant la conception des assemblages (qui ne doivent pas être excessivement rigides), la géométrie des chanfreins, les modalités de soudage (ordre de soudage, etc.).
- Éviter les apports d'hydrogène dans le bain de fusion (en respectant les recommandations des fabricants de produits consommables concernant le stockage de ces produits à l'abri de l'humidité et leur étuvage avant utilisation ; en veillant à ce que les pièces à souder soient propres et sèches).
- Diminuer, si nécessaire, la vitesse de refroidissement après soudage, dans la plage de 800 à 500°C, afin d'éviter la formation de structure martensitique fragile.

Le moyen habituellement utilisé pour diminuer la vitesse de refroidissement est le préchauffage, qui consiste à chauffer avec des chalumeaux ou une rampe à gaz, à une température déterminée, une certaine zone autour de l'assemblage avant de souder, et à maintenir cette température pendant le soudage. Outre l'effet sur la vitesse de refroidissement, le préchauffage disperse l'hydrogène de la zone affectée thermiquement. La température de préchauffage est déterminée à l'aide d'abaques dans lesquels sont introduits les différents paramètres ; elle peut atteindre 150 °C.

Un préchauffage est toujours nécessaire avec les aciers à l'état normalisé de nuance S 355 et au-dessus. Ses conditions doivent être définies dans le descriptif du mode opératoire de soudage. Les aciers à l'état thermomécanique permettent souvent de se dispenser de préchauffage (voir en 1.5.2 ci-après).

Parfois, en complément du préchauffage, un post-chauffage est effectué durant quelques heures : l'hydrogène s'élimine par diffusion tant que l'acier est à la température de post-chauffage ; en outre, la vitesse de refroidissement est encore diminuée.

On peut aussi bâcher ou installer toute autre sorte d'abri comme disposition complémentaire. La température ambiante joue évidemment un rôle : plus la température d'ensemble des éléments est basse, plus la zone soudée se refroidit rapidement par conduction. La norme NF P 22-471, article 8.2.1, interdit les travaux de soudage quand la température au poste de travail est inférieure à -5°C.

Le risque de fissuration à froid dépend aussi du procédé de soudage : il existe avec le soudage à l'électrode enrobée gazeuse ; il est très faible avec le procédé sous flux en poudre.

1.4.3 - Fissuration à chaud

Causes de la fissuration à chaud

La fissuration à chaud est causée par l'action des contraintes de retrait lorsque le métal est encore très chaud après le soudage et que sa ductilité est insuffisante. Elle apparaît donc sans délai, et se manifeste sous forme de fissures longitudinales, localisées le plus souvent dans la partie centrale de la zone de métal fondu. Elle peut être amplifiée par la présence d'hydrogène.

Précautions contre la fissuration à chaud

On sait éviter la fissuration à chaud en veillant aux points suivants :

- composition chimique du métal fondu (mélange de métal de base et de métal d'apport) : les teneurs en soufre et en phosphore doivent être suffisamment faibles, et le rapport Mn/S doit être suffisamment élevé (>20), afin d'éviter la formation de composés à bas point de fusion ; les aciers de construction et les métaux d'apport actuels satisfont aisément à ces conditions ;
- configuration du cordon de soudure : la largeur du cordon doit être suffisante par rapport à sa profondeur (rapport recommandé usuellement supérieur à 0,7).

Les incidents de fissuration à chaud sont rares. Ils sont en principe facilement décelables par le contrôle des soudures à la fabrication, et les cordons défectueux peuvent être refaits immédiatement.

1.4.4 - Arrachement lamellaire

Causes de l'arrachement lamellaire

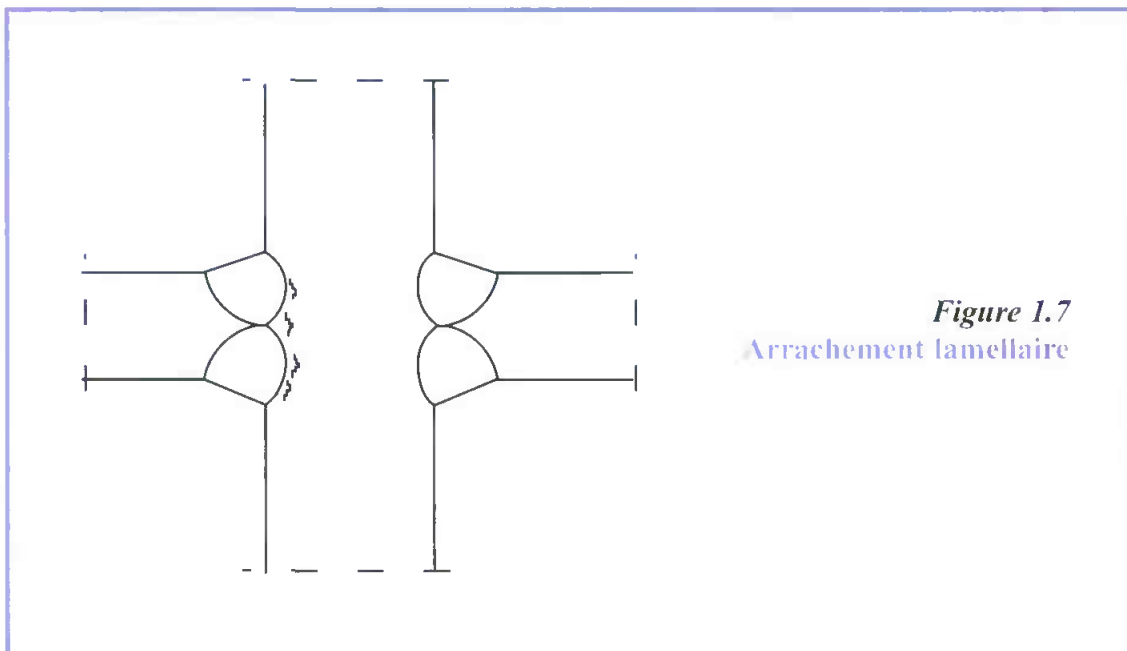
L'arrachement lamellaire est une décohésion qui se produit parallèlement au plan de laminage d'un produit, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le produit en traction perpendiculairement à sa surface.

Les fissures peuvent être amorcées par de la fissuration à froid ou par des inclusions. Elles se propagent dans le métal de base, généralement en dehors de la zone affectée thermiquement, et suivent un tracé "en marches d'escalier" parallèlement à la limite de la zone fondue (figure 1.7). Elles peuvent demeurer entièrement sous la surface, ce qui les rend impossibles à détecter par inspection visuelle, ou bien émerger en pied de cordon.

Plusieurs catégories de facteurs peuvent favoriser l'arrachement lamellaire :

- Acier - Certains produits laminés peuvent avoir une ductilité relativement faible dans la direction perpendiculaire à la surface. En outre, ils peuvent contenir des inclusions non métalliques (sulfides...) provenant de l'élaboration en aciérie. Ces inclusions sont aplaties parallèlement à la surface de la tôle lors du laminage, ce qui favorise la décohésion.
- Conditions de soudage - Ce facteur est lié notamment aux caractéristiques du métal déposé : une limite d'élasticité élevée et une ductilité faible sont défavorables.

- Dispositions constructives - L'arrachement lamellaire est à craindre dans les assemblages en T, en croix ou en L comportant des tôles épaisses, des formes lourdes, des soudures à pleine pénétration : le bridage du retrait des soudures, lors du refroidissement, peut provoquer d'importantes contraintes de traction dans le sens transversal de l'élément.
- Charges appliquées - Des efforts de traction provoqués par les charges peuvent s'ajouter aux autocontraintes de retrait mentionnées précédemment. La répétition des charges augmente leur nocivité.



Précautions contre l'arrachement lamellaire

Il convient en premier lieu de rechercher une bonne conception des dispositions constructives : il faut éviter dans la mesure du possible les dispositions qui sollicitent fortement les tôles en traction perpendiculairement à leur surface.

Lors de la construction, l'entrepreneur doit prendre certaines précautions quand un risque est prévisible :

- effectuer la soudure avec un métal d'apport ayant une limite d'élasticité égale (et non supérieure) à celle de l'acier de base, pour absorber les déformations ; cette disposition est prescrite dans le fascicule 66 du CCTG (commentaires de l'article 11.5) ; bien entendu, la ductilité de ce métal d'apport doit être la plus élevée possible ;
- choisir le procédé de soudage et l'ordre des séquences pour limiter les contraintes dues au bridage.

Une méthode d'amélioration parfois utilisée consiste à déposer, avant exécution de l'assemblage, du métal d'apport sur la surface de la tôle sollicitée transversalement (rechargement, appelé familièrement "beurrage") ; ce métal d'apport, dont la limite d'élasticité et la ductilité doivent remplir les conditions qui viennent d'être indiquées pour les cordons de soudure, absorbe les déformations et répartit les contraintes.

Au lieu de déposer simplement ce métal d'apport à la surface de la tôle, on peut aussi gouger la tôle avant de la recharger, ce qui augmente l'épaisseur de matériau ductile et élimine les inclusions éventuelles. Dans le domaine des ponts, cette technique est appliquée à des tôles dont l'épaisseur ne dépasse pas 20 mm ; le gougeage est effectué sur la moitié environ de l'épaisseur de la tôle.

Dans tous les cas, l'entrepreneur doit appliquer un mode opératoire dont il possède la qualification.

Lorsque les dispositions qui viennent d'être indiquées apparaissent insuffisantes, il reste la solution des aciers "à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface", dits "aciers Z" en raison de la notation adoptée pour le taux de striction. La spécification de ces aciers, qui s'ajoute à celles des normes de base, doit être formulée par référence à la norme NF EN 10164 : aciers de construction à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface du produit. Cette norme définit trois classes de qualité, notées Z15, Z25 et Z35. Les nombres 15, 25, 35 correspondent à la valeur minimale spécifiée du taux de striction.

Le taux de striction est une caractéristique de ductilité, qui évolue à l'inverse de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction. Mesuré par essai de traction sur des éprouvettes prélevées dans le sens de l'épaisseur du produit, ce taux est défini par :

$$Z = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

S_0 est l'aire de la section initiale de l'éprouvette ;

S_u est l'aire minimale de la section après rupture.

Outre le taux de striction garanti, les aciers Z doivent présenter des caractéristiques suffisantes de compacité (propreté inclusionnaire, absence de délaminage, etc.). Pour cela, la norme NF EN 10164 impose au producteur d'effectuer un contrôle des produits par ultrasons.

L'entrepreneur, de son côté, peut aussi contrôler par ultrasons, avant soudage, l'absence de délaminage ou d'inclusion dans la tôle à l'emplacement de la soudure.

On notera que les essais de striction et les contrôles par ultrasons visent deux objectifs distincts et sont donc complémentaires : un taux de striction élevé ne garantit pas l'absence d'inclusion ; inversement, une parfaite compacité contrôlée par ultrasons n'indique rien sur le taux de striction.

Les aciers modernes (du moins ceux certifiés) ont une faible teneur en soufre et un haut degré de propreté inclusionnaire, de sorte qu'en fait, une grande partie de ces produits satisfait aux critères de la qualité Z15, même en l'absence d'exigence particulière.

Les classes Z25 et Z35 nécessitent généralement des traitements complémentaires dans l'élaboration de l'acier : désulfuration dans un four après élaboration, réduction de la teneur en hydrogène en effectuant un dégazage. Ces traitements complémentaires augmentent évidemment le coût.

Quelle que soit la classe Z, le fait de demander l'option oblige le producteur à effectuer des contrôles par ultrasons, et à mesurer le taux de striction par un essai sur éprouvette.

Ainsi, dans tous les cas, la spécification d'une qualité Z entraîne un supplément de coût. Ce supplément est de l'ordre de 500 à 1 000 francs par tonne suivant la classe Z et l'épaisseur de la tôle.

Des aciers Z ne sont que rarement nécessaires dans le cas des ponts, si l'on adopte des dispositions constructives correctes.

Les assemblages concernés peuvent être identifiés avec de l'expérience : il existe aussi des "barèmes" pour quantifier l'influence des différents facteurs (voir le fascicule de documentation E 83-100-3 de l'AFNOR, ou l'eurocode 3).

Lorsque la garantie est exigée dans un marché, le fascicule 66 du CCTG conseille de s'en tenir à la classe Z15 (commentaire de l'article II.2.1). Mais, depuis la rédaction du fascicule, les aciers ont évolué et, comme indiqué précédemment, ils satisfont presque toujours en fait à la classe Z15. Dans ce contexte, si l'on souhaite des caractéristiques réellement améliorées, c'est la classe Z25 ou Z35 qu'il convient de spécifier.

1.5 - LES PRODUITS EN ACIER LAMINÉ DÉFINIS DANS LES NORMES

1.5.1 - Normes de base des produits laminés

Les produits laminés (tôles et poutrelles) utilisés pour la construction des ponts sont définis actuellement dans les trois normes de base citées ci-après.

Lors de la rédaction du présent guide, ces normes sont en cours de révision : certaines des indications ci-après risquent de ne plus être conformes aux futures normes révisées.

NF EN 10025 : produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés

Les aciers non alliés, ou aciers dits "au carbone", sont ceux dont aucune teneur en éléments métalliques (tels que manganèse, molybdène, niobium, vanadium...) ne dépasse une certaine valeur limite.

Les produits de cette norme qui sont utilisables pour les ponts sont de nuance S235, S275, et S355. Les autres nuances qui apparaissent dans la norme ne font l'objet d'aucune spécification sur la composition chimique, ni sur l'énergie de rupture, et ne peuvent donc pas être utilisées pour les ponts.

La norme traite les épaisseurs jusqu'à 250 mm actuellement (400 mm pour les produits plats dans la prochaine édition révisée). Cependant, la composition chimique et la structure métallographique de ces aciers ne leur confèrent pas une soudabilité très élevée : les produits ne peuvent pas être soudés en n'importe quelle épaisseur avec des conditions opératoires courantes.

NF EN 10113 : produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins

- partie 1 : conditions générales de livraison
- partie 2 : aciers à l'état normalisé
- partie 3 : aciers obtenus par laminage thermomécanique

Les tôles épaisses utilisées pour les ponts soudés sont du domaine de cette norme. Les nuances traitées sont S275, S355, S420 et S460.

La partie 1 de la norme traite les dispositions générales.

La partie 2 est consacrée aux aciers livrés à l'état normalisé. Les épaisseurs des produits plats vont actuellement jusqu'à 150 mm pour les nuances jusqu'à S420, et jusqu'à 100 mm pour la nuance S460. Ces limites devraient être relevées respectivement à 250 mm et 200 mm dans la prochaine édition de la norme.

La partie 3 est consacrée aux aciers livrés à l'état thermomécanique, qui bénéficient de conditions particulières de laminage et de refroidissement. Les épaisseurs des produits plats à l'état thermomécanique sont limitées actuellement à 63 mm dans la norme ; cette limite devrait être relevée prochainement à 120 mm.

L'état normalisé et l'état thermomécanique sont évoqués en 1.5.2 ci-après.

NF EN 10155 : aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Ces aciers, appelés couramment aciers "autopatinables", sont semblables aux aciers de la norme NF EN 10025, mais contiennent en plus des éléments d'alliage tels que cuivre, phosphore... Grâce à ces éléments, ils présentent la particularité de se recouvrir, après un certain temps d'exposition à la corrosion atmosphérique et si certaines conditions sont remplies, d'une couche d'oxyde homogène et compacte qui ralentit la corrosion. Les conditions nécessaires à la formation de cette couche protectrice sont indiquées dans la circulaire de 1985 [5.11]. L'aspect est d'abord couleur rouille et marbré de coulures pendant la période de formation ; il évolue vers une couleur "tabac" (brun clair à brun foncé) au cours des années.

Suivant leur composition chimique, ces aciers sont classés en deux catégories, symbolisées respectivement par "W" et "WP". "W" est l'initiale du mot anglais "weathering", et "P" signale une teneur plus élevée en phosphore. La catégorie WP est interdite pour les ponts (fascicule 66 du CCTG, article II.2.1).

Les nuances définies dans la norme sont S235 et S355.

1.5.2 - États de livraison

L'état de livraison est déterminé par les modalités de laminage et par les éventuels traitements thermiques finaux. À composition chimique identique, un acier a des performances différentes suivant son état de livraison.

Produits livrés bruts de laminage

L'état brut de laminage résulte d'un laminage conduit à haute température, avec de grandes déformations à chaque passe, dans le seul but d'effectuer une mise en forme rapide. Du fait de la température élevée, il se produit une recristallisation rapide des grains entre chaque passe, et un grossissement de ces grains, ce qui empêche d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées. Les produits des qualités JR et J0 de la norme NF EN 10025 sont livrés bruts de laminage si aucun autre accord n'est passé entre le constructeur et son fournisseur.

Produits livrés à l'état normalisé ou équivalent

Le traitement de normalisation a pour objet d'homogénéiser la structure et d'affiner le grain, car cela conditionne la résistance à la traction et la ténacité. C'est un traitement thermique comprenant un chauffage aux alentours de 900°C (dans le domaine austénitique), puis un refroidissement à l'air libre.

On peut aussi obtenir un état équivalent par un laminage normalisant : la déformation finale est effectuée dans la gamme de température de normalisation de l'acier, de façon à obtenir directement à la sortie du laminoir, sans traitement thermique ultérieur, une structure métallographique et des caractéristiques équivalentes à celles obtenues par le traitement de normalisation. Le laminage normalisant est pratiqué actuellement pour des produits dont l'épaisseur ne dépasse pas 50, 60 ou 70 mm, selon les nuances et les usines productrices.

Une grande partie des aciers de construction sont livrés par les fournisseurs à l'état normalisé ou équivalent. Avant l'avènement des aciers thermomécaniques, c'était le cas de tous les aciers utilisés pour les ponts. Actuellement, c'est le seul état de livraison disponible pour les tôles profilées en long.

L'état normalisé ou équivalent est indiqué dans les normes par le symbole "N", juxtaposé au symbole de la qualité *tableaux 10 et 11*. Seule, la norme NF EN 10155 a conservé une symbolisation différente.

On prendra garde à ne pas confondre les deux sens possibles, complètement différents, de l'expression "acier normalisé" : il peut s'agir soit d'un acier défini dans une norme, soit d'un acier livré à l'état normalisé.

Produits livrés après traitement thermomécanique

Le domaine d'utilisation des aciers thermomécaniques, d'abord limité à certains secteurs de construction comme les plates-formes de forage en mer, les tubes..., s'est étendu aux ponts il y a quelques années. Cette extension du domaine d'utilisation a été favorisée par l'augmentation des épaisseurs disponibles, et par la publication, en 1993, d'une norme définissant ces aciers (NF EN 10113, partie 3).

Les aciers thermomécaniques sont obtenus en contrôlant :

- les conditions thermiques et mécaniques du laminage ;
- et, suivant les procédés, le refroidissement après la dernière passe de laminage.

Le laminage des aciers thermomécaniques nécessite des cages de laminoir puissantes. Les phases finales doivent être effectuées dans un domaine de température suffisamment bas (entre 850 et 750°C environ), pour que l'austénite ne soit pas recristallisée, ou ne le soit que faiblement.

Le refroidissement après laminage peut être :

- un refroidissement à l'air libre, ou un refroidissement accéléré (par pulvérisation d'un brouillard air-eau ou par aspersion par jets d'eau) ; dans les deux cas, les aciers sont dits "TM" ;
- un traitement thermique plus complexe consistant en une trempe superficielle suivie d'un auto-revenu (utilisant la chaleur résiduelle demeurée à l'intérieur du produit) ; ces aciers sont dits "QST", de l'anglais "quenched and self-tempered" ; ils sont commercialisés sous forme de poutrelles de forte épaisseur.

Les dénominations "TM" et "QST" sont des appellations courantes, et non des symboles normalisés. Dans les deux cas, il s'agit d'aciers thermomécaniques, définis dans la norme NF EN 10113, partie 3, et désignés par le symbole normalisé "M" (tableaux 1.6 et 1.7).

Les traitements thermomécaniques permettent, pour une nuance donnée, d'avoir une composition chimique avec un carbone équivalent plus faible. Le risque de fissuration à froid est donc atténué : pour l'acier S355, le préchauffage peut souvent être supprimé. Inversement, à soudabilité identique, les aciers thermomécaniques permettent d'obtenir des nuances plus élevées, S420 et S460.

Par contre, ainsi que le rappelle la norme NF EN 10113, un chauffage au-dessus de 580°C peut abaisser la limite d'élasticité et la résistance à la traction de ces aciers, car ce chauffage provoque une austénitisation qui modifie définitivement l'état structural du matériau. Le formage à chaud par le constructeur doit donc être interdit. Cet inconvénient est peu gênant en pratique, car il est peu fréquent d'avoir à former des éléments de forte épaisseur ; le formage d'éléments peu épais, comme les raidisseurs trapézoïdaux de dalle orthotrope, ou les montants d'appuis tubulaires, peut être effectué à froid. Certains constructeurs, dont l'activité est orientée vers la chaudronnerie, sont d'ailleurs équipés pour le formage à froid de pièces d'assez forte épaisseur.

Quant aux chaudes de retrait qui sont pratiquées pour rendre leur planéité aux tôles déformées, elles nécessitent des précautions qui ne diffèrent pratiquement pas de celles qui sont adoptées (ou qui devraient l'être) pour les aciers à l'état normalisé classiques : personnel qualifié, utilisation d'une procédure pré-établie, contrôle de la température de l'acier.

Bien que le symbole de l'état de livraison (N, M...) soit juxtaposé à celui de la qualité, il n'a pas de signification sur le niveau de résistance à la rupture fragile, du moins en ce qui concerne les valeurs garanties : il n'y a pas de différence à cet égard entre un acier NL et un acier ML.

Le bulletin [1.2] est consacré aux aciers thermomécaniques.

Type de traitement	Désignation de l'état de livraison	Abréviation usuelle	Codif. normalisée	Normes de produit
laminage ordinaire et refroidissement à l'air libre	brut de laminage	-	-	NF EN 10025 NF EN 10155
laminage ordinaire, refroidissement à l'air libre et recuit de normalisation	normalisé	N	N	NF EN 10025 NF EN 10113.2 NF EN 10155
laminage normalisant et refroidissement à l'air libre	équivalent à normalisé			
laminage contrôlé et refroidissement à l'air libre ou refroidissement accéléré	thermomécanique	TM	M	NF EN 10113.3
laminage contrôlé, trempe superficielle et autorevenu		QST		
laminage ordinaire trempe et revenu	trempe et revenu	QT	Q	NF EN 10137.2
laminage ordinaire ou contrôlé, et durcissement par précipitation	durci par précipitation	-	A	NF EN 10137.3

Tableau 1.6
États de livraison des aciers

Autres états de livraison

Le tableau 1.6 mentionne aussi deux autres états de livraison, correspondant aux produits de la norme NF EN 10137 (il s'agit de produits plats uniquement) :

- état trempé et revenu : le symbole normalisé de ces aciers est "Q" (la désignation courante, "QT", provient de l'anglais "quenched and tempered") ; les nuances définies dans la norme sont étagées de S460 à S960 ; les épaisseurs peuvent aller jusqu'à 150 mm ;
- état durci par précipitation : le symbole normalisé est "A" ; les nuances atteignent S690, les épaisseurs ne dépassent pas 70 mm.

Les aciers trempés et revenus n'ont fait l'objet, jusqu'à présent, d'aucune demande de certification en France ; ils ne figurent donc pas dans le [tableau 1.7](#) ci-après. Ils ont cependant été utilisés pour la construction de ponts dans certains pays (Allemagne, Suède).

Quant aux aciers durcis par précipitation, ils n'ont pas suscité d'intérêt dans le domaine des ponts, soit à cause d'une soudabilité jugée insuffisante, soit à cause de leur épaisseur relativement limitée.

1.6 - LES PRODUITS EN ACIER LAMINÉ UTILISABLES POUR LES PONTS

1.6.1 - Tableau des nuances, qualités et épaisseurs utilisables

Le [tableau 1.7](#) indique les nuances et qualités des aciers laminés utilisables pour les ponts, ainsi que différentes limites d'épaisseur. Le critère de soudabilité n'est pas considéré : ce sujet fait l'objet du paragraphe 1.6.6 ci-après.

Ce tableau traite principalement les produits plats ; les produits creux de la norme NF EN 10210 n'y apparaissent donc pas.

1.6.2 - Nuances

La colonne 1 du [tableau 1.7](#) indique les trois normes de base actuelles définissant les produits utilisés.

La colonne 2 indique la liste des nuances disponibles pour chacune de ces normes. La nuance classique est S355. Les nuances supérieures sont intéressantes dans certaines circonstances pour diminuer les épaisseurs nécessaires. Les nuances inférieures à S355 ne présentent de l'intérêt que pour certains éléments de structure ou pour des équipements.

1.6.3 - Qualités minimales et épaisseurs maximales pour la sécurité vis-à-vis de la rupture fragile

La colonne 3 du tableau reproduit les qualités spécifiées dans le fascicule 66 du CCTG (article II.2.1) pour assurer la sécurité vis-à-vis de la rupture fragile. La qualité JR de la norme NF EN 10025, qui ne pourrait être utilisée qu'avec des épaisseurs très faibles, est interdite pour les ponts, et ne figure donc pas dans le tableau.

Dans le cas de la norme NF EN 10113, la qualité "de base" n'est codifiée par aucun symbole, l'autre qualité est codifiée par la lettre L. La lettre N ou M est le symbole de l'état de livraison.

Les colonnes 4 et 5 du tableau indiquent les épaisseurs maximales pour lesquelles ces qualités sont valides.

La colonne 4 reproduit les trois limites d'épaisseur que le fascicule 66 stipule pour la qualité de base des aciers S355, S420 et S460 de la norme NF EN 10113.

La colonne 5 reproduit les limites d'épaisseur indiquées dans le [tableau 1.3](#) ci-avant.

1.6.4 - Épaisseurs maximales certifiées

Les aciers entrant dans la construction des ouvrages d'art doivent être certifiés par l'AFNOR pour le secteur d'application "bâtiment-travaux publics - construction métallique d'ouvrages d'art et de bâtiments non courants", ou être couverts par une certification reconnue équivalente (projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG). La colonne 6 du tableau indique, dans le cas des tôles, l'épaisseur maximale pour laquelle il existe au moins un produit certifié par l'AFNOR. Ces indications sont tirées de la liste des produits certifiés en date du 10 janvier 2000.

1.6.5 - Limites d'épaisseur à retenir

Les limites d'épaisseur des produits certifiées (colonne 6) sont différentes des limites d'épaisseur liées à la rupture fragile (colonnes 4 et 5) parce que les domaines d'application et les statuts sont différents :

- les limites de la colonne 4 sont spécifiées dans le fascicule 66 du CCTG (article II.2) : leur domaine d'application est donc celui du fascicule : ponts, passerelles...
- les limites de la colonne 5 résultent d'un calcul effectué avec la méthode de l'IRSID pour le cas des ponts ; elles dépendent des hypothèses adoptées ; elles n'ont pas de caractère réglementaire ;
- les limites d'épaisseur certifiées s'appliquent à des produits destinés aux ouvrages d'art (ponts, passerelles...), mais aussi aux bâtiments.

C'est la plus petite limite d'épaisseur des colonnes 4, 5 et 6 du tableau qui doit être retenue. Cette valeur est repérée en bleu dans le cas des aciers de la norme NF EN 10113. Dans le cas des aciers de la norme NF EN 10025, des considérations de soudabilité peuvent conduire à des limites d'épaisseur plus faibles que celles du tableau.

1	2	3	4	5	6
Norme	Nuance	Qualités autorisées par le fascicule 66	Épaisseur maxi autorisée par le fascicule 66	Épaisseur maxi par la méthode de l'IRSID	Épaisseur maxi des produits plats certifiés
NF EN 10025 aciers non alliés	S235	J0	non stipulée	47 mm	250 mm
		J2	non stipulée	90 mm	250 mm
	S275	J0	non stipulée	35 mm	250 mm
		J2	non stipulée	68 mm	250 mm
	S355	K2	non stipulée	90 mm	250 mm
NF EN 10113 aciers soudables à grain fin ; partie 2 : état normalisé	S275	N	non stipulée	non limitée	150 mm
		NL	non stipulée	non limitée	150 mm
	S355	N	80 mm	90 mm	150 mm
		NL	non stipulée	non limitée	150 mm
	S420	N	50 mm	70 mm	120 mm
		NL	non stipulée	97 mm	120 mm
	S460	N	50 mm	61 mm	120 mm
		NL	non stipulée	87 mm	120 mm
NF EN 10113 aciers soudables à grain fin ; partie 3 : état thermomécanique	S275	M	non stipulée	non limitée	100 mm
		ML	non stipulée	non limitée	100 mm
	S355	M	80 mm	90 mm	100 mm
		ML	non stipulée	non limitée	100 mm
	S420	M	50 mm	70 mm	100 mm
		ML	non stipulée	97 mm	100 mm
	S460	M	50 mm	61 mm	100 mm
		ML	non stipulée	87 mm	100 mm
NF EN 10155 aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique	S235	J0W	non stipulée	47 mm	120 mm
		J2W	non stipulée	90 mm	120 mm
	S355	K2G1W	non stipulée	90 mm	120 mm

Tableau 1.7

Nuances, qualités et épaisseurs maximales des produits plats. Les épaisseurs maximales certifiées sont celles de la liste AFNOR du 10 janvier 2000. Des considérations de soudabilité peuvent conduire à des limitations d'épaisseur plus sévères.

Ainsi, actuellement, les sections de tôle de résistance maximale (par exemple pour des membrures de poutre fortement sollicitées) peuvent être en acier :

- S355 NL de 150 mm d'épaisseur ;
- S420, NL ou ML, de 95 mm d'épaisseur ;
- S460, NL ou ML, de 85 mm d'épaisseur.

Bien entendu, il existe toujours la possibilité de composer une membrure avec deux plats superposés.

Les épaisseurs de 95 mm et 85 mm qui viennent d'être indiquées correspondent au cas habituel où les tôles sont fabriquées spécialement pour une commande. Il est alors possible de commander n'importe quelle épaisseur dans les limites du programme de fabrication de l'aciérie. Les projets sont généralement établis pour des tôles d'épaisseur multiple de 10 mm, mais des épaisseurs multiples de 5 mm peuvent être obtenues.

Les indications qui précèdent ont été rédigées pour le cas des produits plats.

Les poutrelles définies dans les trois normes de base, et les profils creux finis à chaud définis dans la norme NF EN 10210, sont soumis également au fascicule 4, titre III, du CCTG, doivent se conformer aux mêmes règles de sécurité vis-à-vis de la rupture fragile, et doivent aussi être certifiés. Les indications précédentes leur sont donc applicables, moyennant les adaptations nécessaires.

Ces règles concernent tous les éléments de la structure proprement dite (y compris les connecteurs de ponts mixtes, comme rappelé dans le fascicule 66 du CCTG, article II.6).

Elles concernent aussi les éléments accessoires et les supports d'équipements s'ils sont soudés à la structure et restent sur l'ouvrage en service : une fissuration de ces éléments se transmettrait à la structure par les joints soudés.

Les éléments accessoires et les équipements qui ne sont pas soudés à la structure ne font pas partie du domaine d'application de ces règles.

Bien que le risque de rupture fragile ne concerne théoriquement que les éléments susceptibles d'être tendus, les règles correspondantes sont applicables à tous les éléments, quelles que soient les contraintes de calcul (sauf exception mentionnée dans le marché).

1.6.6 - Choix de la norme de base et de l'état de livraison - soudabilité

Pour les aciers S355 et S275, il existe des produits suivant la norme NF EN 10025 (aciers de construction non alliés) et des produits suivant la norme NF EN 10113 (aciers soudables à grains fins). Les premiers sont plus économiques à l'achat ; ils sont suffisants pour le soudage d'éléments de faible épaisseur. Les seconds sont plus coûteux à l'achat, mais ils ont une valeur garantie du carbone équivalent (CEV) plus basse, ce qui permet le soudage d'éléments de forte épaisseur sans précaution excessivement onéreuse.

Autrefois, dans le cadre des agréments accordés par la CIPACAS (commission interministérielle permanente d'agrément et de contrôle des aciers soudables), les produits plats en acier S355 de la norme NF EN 10025 ne faisaient l'objet d'aucun agrément pour des épaisseurs supérieures à 30 mm. Les constructeurs étaient donc conduits à adopter les produits de la norme NF EN 10113 au-delà de 30 mm.

Depuis le passage effectif à la certification en 1999-2000, des produits de la norme NF EN 10025 ont été certifiés dans de fortes épaisseurs, ce qui pose le problème de la soudabilité de ces produits.

Pour le constructeur, l'objectif est de choisir les aciers les plus économiques dans le cadre des spécifications du marché, l'économie s'appréciant à partir du prix d'achat des produits, mais aussi du coût de leur mise en œuvre.

Une complication supplémentaire provient du fait que les performances effectives des aciers sont supérieures aux valeurs-limites spécifiées dans les normes (au moins pour les produits certifiés). Ainsi, les produits commandés par référence à la norme NF EN 10025 ont fréquemment une soudabilité suffisante pour des épaisseurs de produits nettement supérieures à 30 mm.

Pour le maître d'œuvre, le problème est de décider, lors de la rédaction ou de la mise au point du marché, s'il doit laisser libre ou limiter, et à quelle valeur, l'épaisseur des produits de la norme 10025. Les dispositions concernant la soudabilité font partie des méthodes de l'entreprise et sont donc en principe du ressort de celle-ci, mais une soudabilité très insuffisante peut évidemment avoir des conséquences sur le résultat final.

Lors de la publication du présent guide, cette question n'ont pas encore reçu de réponse définitive.

Ce sont aussi des considérations de soudabilité qui orientent le choix entre les aciers à l'état normalisé et les aciers à l'état thermomécanique de la norme NF EN 10113 : les premiers sont plus économiques à l'achat, les seconds ont une meilleure soudabilité. Mais le problème du choix est ici différent de celui évoqué précédemment : les aciers à l'état normalisé, qui étaient les seuls disponibles jusqu'à une époque récente, sont soudables avec des dispositions courantes.

Il semble donc qu'il n'y ait pas d'inconvénient à ce que le maître d'œuvre laisse à l'entreprise le choix entre l'état normalisé et l'état thermomécanique, dans les cas où les épaisseurs nécessaires permettent l'utilisation des aciers thermomécaniques.

1.6.7 - Aciers autopatinables

Le tableau 1.7 mentionne aussi les aciers "autopatinables" de la norme NF EN 10155. Ces aciers sont assez peu utilisés en France. Ils ne doivent cependant pas être écartés systématiquement, par exemple si l'on prévoit que les remises en peinture seront particulièrement difficiles ou onéreuses en raison des conditions d'exploitation.

Avant d'adopter les aciers de cette norme sur le réseau routier national, on doit vérifier que les conditions de la circulaire de 1985 [5.11] sont remplies.

En dehors du problème de la durabilité, l'aspect de ces aciers, et son évolution dans le temps, nécessitent certaines précautions. Ainsi, pour que la surface garde un aspect homogène, il faut qu'elle soit entièrement exposée à la pluie ou pas du tout : il est donc préférable que les parties latérales de dalle en console aient une largeur suffisante (au moins égale à la hauteur de la poutre).

Références du chapitre 1

- [1.1] - **Bases de choix des aciers en construction métallique** (OTUA, 1985)
- [1.2] - **Les aciers thermomécaniques** (AFPC-OTUA, mai 1997)

SOMMAIRE

2 - ASSEMBLAGES SOUDÉS

2.1	Types d'assemblages soudés, types de soudures	45
2.2	Choix du type de soudures dans les assemblages en T, en croix ou en L transmettant des efforts	47
2.2.1	Types de soudures dans les assemblages en T, en croix ou en L	47
2.2.2	Soudures d'angle sans chanfrein	47
2.2.3	Soudures en bout à pénétration partielle «non pleinement efficace»	49
2.2.4	Soudures en bout à pénétration partielle «pleinement efficace»	50
2.2.5	Soudures en bout à pleine pénétration garantie	51
2.2.6	Récapitulation des critères de choix du type de soudure dans les assemblages en T, en croix ou en L	52
2.3	Choix du type de soudure dans les assemblages bout à bout	53
2.3.1	Assemblages bout à bout avec soudures en bout à pleine pénétration garantie	53
2.3.2	Autres assemblages bout à bout	55
2.4	Choix de la classe de qualité des assemblages soudés	56
2.5	Les procédés de soudage	58
2.5.1	Principes généraux	58
2.5.2	Soudage à l'arc avec électrode enrobée	59
2.5.3	Soudage à l'arc avec fil-électrode fourré, sans protection de gaz	61
2.5.4	Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode massif	62
2.5.5	Soudage à l'arc sous protection de gaz	64
2.5.6	Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire en tungstène (TIG)	66
2.5.7	Soudage à l'arc des goujons	67
2.6	Choix des produits consommables pour soudage	69
2.7	Les défauts des soudures	70
2.8	Contrôle des soudures : les procédés de contrôle non destructif	71
2.8.1	Généralités	71
2.8.2	Le contrôle visuel	71
2.8.3	Le ressuage	72
2.8.4	La magnétoscopie	73
2.8.5	La radiographie	74
2.8.6	Les ultrasons	76
2.8.7	Le contrôle des goujons de connexion	77

2.9	Contrôle des soudures : dispositions normatives	78
2.9.1	Généralités	78
2.9.2	Critères d'acceptation des défauts	78
2.9.3	Domaines d'utilisation des procédés de contrôle non destructif	78
2.9.4	Étendue des contrôles	79
2.9.5	Réparations	80
2.9.6	Le cas des goujons de connexion	81
 <i>Références du chapitre 2</i>		81

ASSEMBLAGES SOUDÉS

2



2.1 - TYPES D'ASSEMBLAGES SOUDÉS, TYPES DE SOUDURES

La plupart des ponts métalliques construits en France sont assemblés entièrement par soudage, aussi bien en atelier que sur chantier.

On distingue divers types d'assemblages soudés, caractérisés par la position des pièces assemblées l'une par rapport à l'autre. Dans le cas des ponts, on utilise uniquement :

- les assemblages bout à bout ;
- les assemblages en T (ou en croix, ou en L).

Pour les soudures proprement dites, on doit distinguer, suivant la terminologie de l'eurocode 3 (voir tableau 2.1 ci-après) :

- les soudures d'angle ;
- les soudures en bout.

Il est conseillé d'adopter dès maintenant cette terminologie, qui présente l'avantage de bien distinguer les types d'assemblages d'une part, les types de soudures d'autre part.

Les assemblages bout à bout utilisent nécessairement des soudures en bout. Les assemblages en T, en croix ou en L utilisent soit des soudures d'angle, soit des soudures en bout.

Les soudures d'angle, au sens de l'eurocode 3, sont les soudures déposées sur la surface des pièces assemblées, sans chanfreinage des bords, dans les assemblages en T, en croix, ou en L. Elles étaient appelées "soudures d'angle sans chanfrein" dans les normes françaises antérieures à l'eurocode. Dans le présent guide, nous conserverons la précision "sans chanfrein" pour plus de clarté.

On utilise les soudures d'angle par deux, une sur chaque face de la tôle assemblée. On admet cependant d'avoir une soudure unique si les trois conditions sont réunies : le côté non soudé du joint ne tend pas à s'ouvrir sous les efforts appliqués, il n'est pas accessible au soudeur, il est à l'intérieur d'une partie fermée non exposée à la corrosion atmosphérique. L'assemblage d'un raidisseur tubulaire à une tôle est un exemple de ce cas.

Les soudures en bout, au sens de l'eurocode 3, sont celles disposées dans l'épaisseur des tôles assemblées, que la pénétration soit partielle ou totale. Elles nécessitent généralement une préparation du bord des pièces par chanfreinage.

On retiendra donc que, suivant la terminologie des normes européennes, une "soudure d'angle" est effectuée sans chanfrein, alors qu'une "soudure en bout", au contraire, nécessite généralement un chanfrein, sans toutefois que cette correspondance soit systématique.

Le tableau 2.1 ci-après reproduit cette classification. Il est extrait de l'eurocode 3, partie 1-1, en conservant seulement ce qui concerne les ponts. Les chanfreins sont représentés à titre indicatif ; de nombreuses autres formes géométriques sont pratiquées (voir la norme NF EN 29692).

Pour les dispositions constructives et le calcul des soudures sous charges statiques, le fascicule 61, titre V, du CCTG, la norme NF P 22-470 et l'eurocode 3 contiennent des règles très voisines, mais avec des degrés de précision différents. Dans l'état actuel de la réglementation, il convient de viser la norme dans les marchés et de la faire appliquer. On peut consulter l'eurocode à titre indicatif pour préciser certains points.

Quant au calcul à la fatigue, il n'est pas traité dans la norme NF P 22-470. On doit utiliser, aussi bien pour les ponts-routes que pour les ponts-rails, le "Guide fatigue" [2.1], qui s'appuie sur l'eurocode 3, partie 1.

Les dispositions constructives et le calcul des soudures ne sont pas traités dans le présent guide. Deux points particuliers, cependant, sont évoqués ci-après, parce qu'ils sont en étroite relation avec les spécifications, l'exécution et les contrôles : ils concernent le choix du type de soudure, et le choix de la classe de qualité des assemblages soudés.


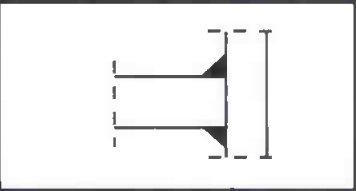
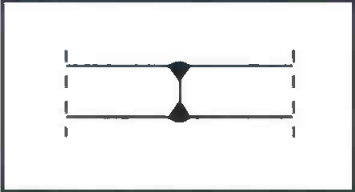
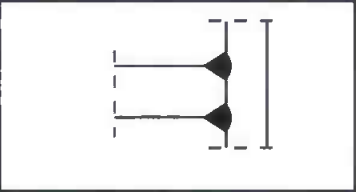
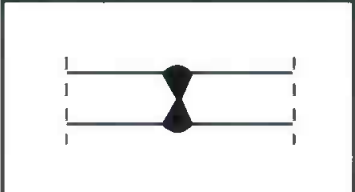

Types de soudures	Types d'assemblage	
	assemblages bout à bout	assemblages en T en croix ou en L
soudure d'angle (sans chanfrein)		
soudure en bout à pénétration partielle		
soudure en bout à pleine pénétration		

Tableau 2.1
Classification des soudures et des assemblages soudés
suivant l'eurocode 3

2.2 - CHOIX DU TYPE DE SOUDURE

DANS LES ASSEMBLAGES EN T, EN CROIX OU EN L TRANSMETTANT DES EFFORTS

2.2.1 - Types de soudures dans les assemblages en T, en croix ou en L

Les trois types de soudures indiqués au [tableau 2.1](#) correspondent à des degrés de pénétration croissants. Pour les soudures à pénétration partielle des assemblages en T, en croix ou en L, il est commode de distinguer en outre deux sous-catégories. Ainsi, pour ces assemblages, il y a en tout quatre types de soudures :

- les soudures d'angle (sans chanfrein) ;
- les soudures en bout à pénétration partielle, la pénétration pouvant être :
 - . "non pleinement efficace" ;
 - . "pleinement efficace" ;
- les soudures en bout à pleine pénétration garantie.

L'aptitude de ces quatre types de soudures à transmettre des efforts augmente avec leur degré de pénétration.

2.2.2 - Soudures d'angle sans chanfrein

L'épaisseur de ces soudures doit être modérée pour éviter que les déformations des pièces consécutives au retrait (ou les efforts en cas de bridage) deviennent trop importantes. L'épaisseur maximale autorisée par la norme NF P 22-470 (article 8.3.2) dépend de l'épaisseur de la tôle assemblée la plus mince, sans pouvoir dépasser 15 mm. En pratique, les soudures d'angle sans chanfrein peuvent difficilement dépasser une épaisseur d'environ 12 mm sans risque de désordre.

La norme fixe aussi une épaisseur minimale, qui est de 5 mm dans les cas courants.

Lorsque l'élément soudé transmet des efforts, on doit vérifier la résistance de la soudure sous charges statiques et sous charges de fatigue.

Pour la résistance sous charges statiques, les formules de base sont indiquées en 9.3.1 de la norme NF P 22-470. Elles résultent de l'application du critère de von Mises aux différentes contraintes. Après rétablissement du coefficient 3 qui a été omis dans la norme, les expressions à vérifier sont (dans le cas des aciers de nuance S355 ou au-dessus) :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq f_y$$

et $\sigma_{\perp} \leq f_y$

Pour la résistance à la fatigue, on doit adopter la classe 36 lorsque l'élément soudé transmet des efforts transversaux par rapport à la soudure. La vérification porte sur les variations de contrainte dans la soudure. Cette vérification pénalisante tient compte du fait que le défaut de pénétration joue le même rôle qu'une amorce de fissure.

Lorsque l'élément soudé transmet principalement des efforts de cisaillement (cas des assemblages âme / semelle), la vérification à la fatigue est beaucoup moins pénalisante : on a la classe 80 pour les contraintes de cisaillement dans la soudure, avec une forme de courbe $\Delta\tau - N$ plus favorable également.

Dans ces calculs, les contraintes sont déterminées en rapportant les efforts à la section de gorge $(a_1 + a_2)$ des soudures.

La règle générale, pour les soudures d'angle sans chanfrein, est de ne tenir compte d'aucune pénétration pour déterminer l'épaisseur des soudures, et donc d'adopter, dans les calculs :

$$a_1 = a_{\text{nom } 1}$$

$$a_2 = a_{\text{nom } 2}$$

a_1, a_2 : épaisseur utile, ou gorge, prise en compte dans les calculs ;

$a_{\text{nom } 1}, a_{\text{nom } 2}$: épaisseur nominale, soit, dans le cas des soudures d'angle sans chanfrein, hauteur du plus grand triangle inscrit entre les faces à souder et la surface de la soudure, mesurée perpendiculairement au côté extérieur (figure 2.1).

En fait, les soudures d'angle sans chanfrein peuvent avoir une certaine pénétration, mais celle-ci, qui n'est pratiquement jamais totale avec les épaisseurs de pièces utilisées pour les ponts, ne peut pas être mesurée avec les procédés de contrôle habituels. Les ultrasons, qui permettent les contrôles en profondeur, ne sont pas focalisés pour une distance déterminée, du moins dans la pratique courante, de sorte qu'ils permettent de distinguer s'il y a, ou non, pénétration totale, mais pas de mesurer le manque de pénétration.

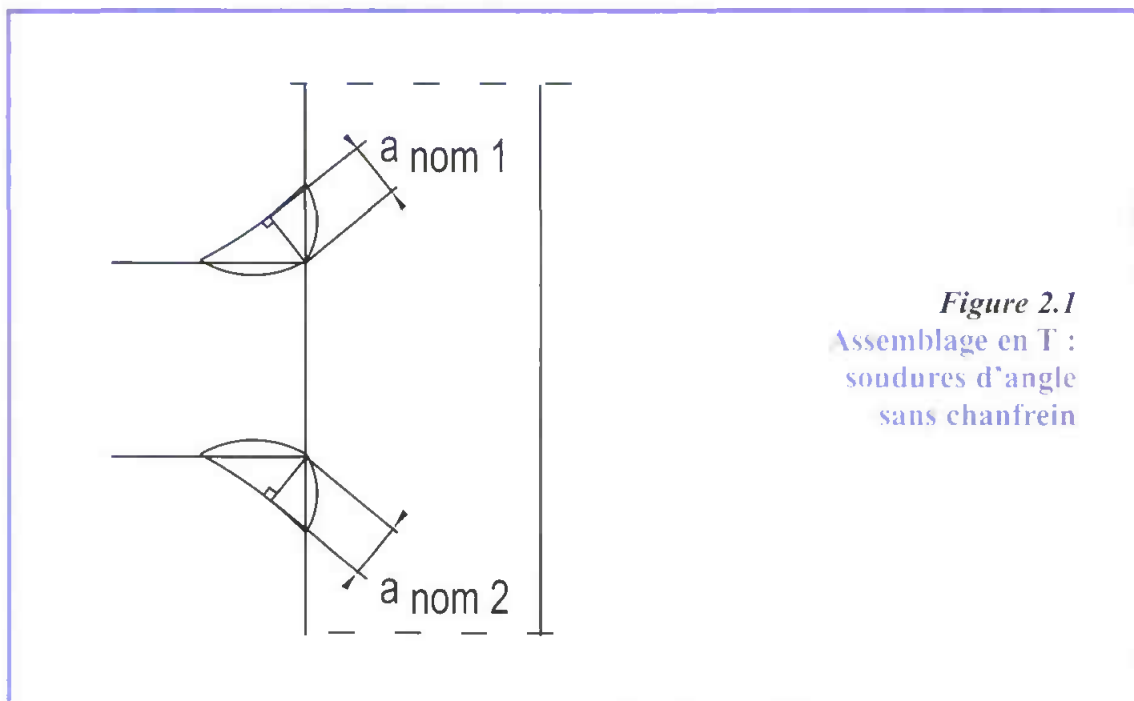


Figure 2.1
Assemblage en T :
soudures d'angle
sans chanfrein

La possibilité de prendre en compte une certaine pénétration est mentionnée dans la norme NF P 22-470 (article 9.5.2), mais aucune règle d'application n'est fournie.

En France, on adopte généralement la règle suivante, valable uniquement dans le cas de soudures d'angle exécutées avec le procédé sous flux en poudre (procédé n° 121 de la norme NF EN 24063). Pour de telles soudures, on admet :

$$a_1 = a_{\text{nom } 1} + e_1$$

$$a_2 = a_{\text{nom } 2} + e_2$$

$$\text{avec : } e_1 = \inf(0,20 a_{\text{nom } 1}, 2 \text{ mm})$$

$$e_2 = \inf(0,20 a_{\text{nom } 2}, 2 \text{ mm})$$

à condition que la qualification du mode opératoire de soudage montre une pénétration égale ou supérieure à e . Si la pénétration, lors de la qualification, n'atteint pas e , on conserve les épaisseurs nominales sans aucune majoration.

Le soudage sous flux en poudre est un procédé automatique, pratiqué en atelier. En raison de ses conditions de réalisation, ce procédé ne permet d'exécuter que des joints en position horizontale. Les soudures d'angle concernées sont essentiellement celles des assemblages âme/semelle, et raidisseurs longitudinaux/âme.

Cette disposition figure aussi dans l'eurocode 3, partie 1-1, article 6.6.5.2, mais sans être subordonnée aux résultats des essais de qualification.

Outre les soudures, on doit vérifier aussi l'élément soudé et l'élément continu.

Pour l'élément soudé, la vérification à la fatigue doit être effectuée pour la section de l'élément en pied de cordon. Actuellement, l'eurocode 3, partie 1-1, indique la classe de fatigue 71 lorsque l'exécution de la soudure est conforme à la classe de qualité 1. Il n'envisage pas l'éventualité de la qualité 2 : on admet dans ce cas, en France, la classe de fatigue 56 ("Guide fatigue" [2.1], paragraphe B 3.2.5).

Pour l'élément continu, l'eurocode 3 indique différentes classes de fatigue en fonction de l'importance de la discontinuité causée par la présence de l'élément soudé.

2.2.3 - Soudures en bout à pénétration partielle "non pleinement efficace"

Si l'épaisseur utile permise par les soudures d'angle sans chanfrein est insuffisante pour assurer la résistance aux charges statiques ou à la fatigue, ou si l'on veut diminuer les déformations, on doit préparer le bord des tôles en les chanfreinant (figure 2.2). La forme des chanfreins est choisie en fonction de la position de soudage, des conditions d'accès, de la recherche du volume minimal de métal déposé, du coût de la préparation, des problèmes de retrait et de déformation.

Si les chanfreins ne satisfont pas aux conditions indiquées en 2.2.4 ci-après pour assurer une pénétration "pleinement efficace", le calcul de la résistance de la soudure aux charges statiques et aux charges de fatigue est identique, dans son principe, à celui des soudures d'angle sans chanfrein.

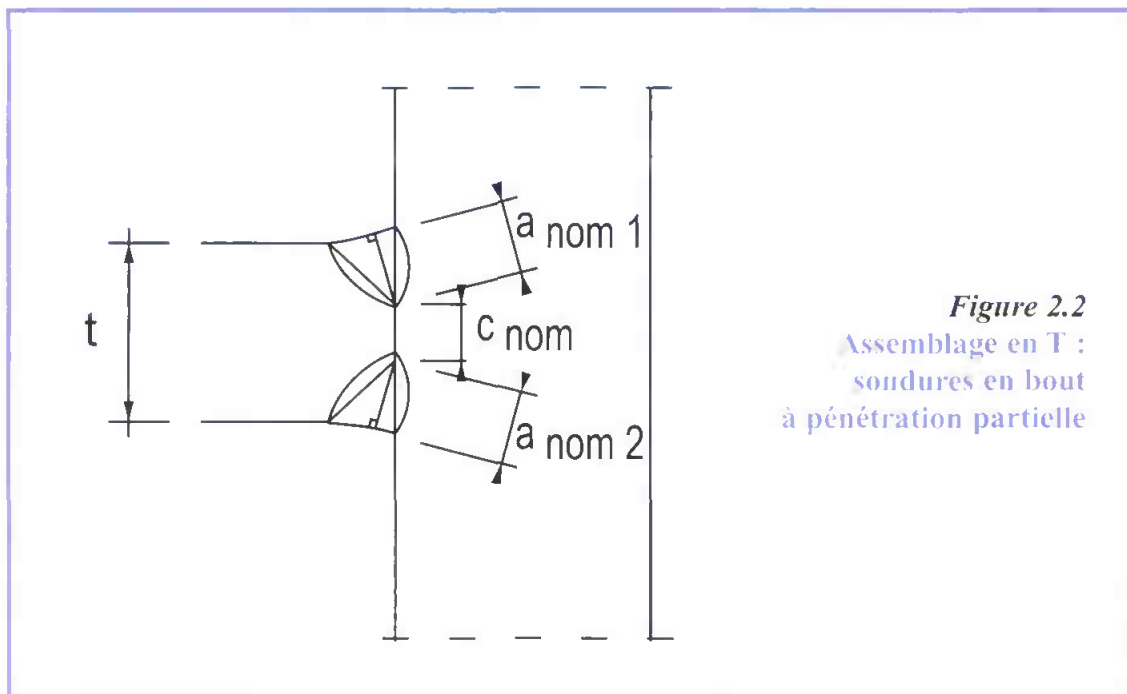


Figure 2.2
Assemblage en T :
soudures en bout
à pénétration partielle

Cependant, contrairement au cas précédent, il n'est pas admis ici de tenir compte d'une pénétration supplémentaire au-delà du sommet de l'angle dièdre du chanfrein.

L'eurocode 3, partie 1 (article 6.6.6.3) prescrit même d'appliquer, dans certains cas et en l'absence de justification, une réduction de 2 mm pour tenir compte du défaut éventuel de fusion à la racine, que le talon ne permet pas de gouger :

$$a_1 = a_{\text{nom } 1} - 2 \text{ mm}$$

$$a_2 = a_{\text{nom } 2} - 2 \text{ mm}$$

Les vérifications à la fatigue de l'élément soudé et de l'élément continu sont les mêmes que précédemment.

2.2.4 - Soudures en bout à pénétration partielle "pleinement efficace"

Ces soudures sont celles qui vérifient simultanément (norme NF P 22-470, article 9.4.1) :

$$a_1 + a_2 \geq t$$

$$c_{\text{nom}} \leq t/5$$

$$c_{\text{nom}} \leq 3 \text{ mm (figure 2.2), avec :}$$

avec :

$$a_1 = a_{\text{nom } 1}$$

$$a_2 = a_{\text{nom } 2}$$

L'eurocode 3-1-1, article 6.6.3.3 donne la même définition, mais en recommandant d'adopter dans ce cas également une réduction de 2 mm, sauf justification :

$$a_1 = a_{\text{nom } 1} - 2 \text{ mm}$$

$$a_2 = a_{\text{nom } 2} - 2 \text{ mm}$$

L'appellation "pleinement efficace" signifie que la résistance statique de l'assemblage n'est pas limitée par la résistance statique des soudures, et n'a donc pas besoin d'être vérifiée (sous réserve que les soudures satisfassent aux conditions mécaniques mentionnées en 2.2.5 ci-après pour les soudures à pleine pénétration).

Il n'en est pas de même pour la résistance à la fatigue : la pénétration n'étant pas totale, les soudures doivent être vérifiées à la fatigue comme précédemment, en calculant les contraintes pour les épaisseurs a_1 et a_2 .

Comme la classe de fatigue 36 est pénalisante, ce type de soudure ne présente pas beaucoup d'intérêt si la fatigue est dimensionnante, et il vaut mieux alors adopter la pleine pénétration garantie (voir ci-après).

Les vérifications à la fatigue de l'élément soudé et de l'élément continu sont les mêmes que précédemment.

2.2.5 - Soudures en bout à pleine pénétration garantie

La pleine pénétration nécessite une préparation des pièces (chanfreinage), un mode opératoire adéquat, et un contrôle aux ultrasons sur 100 % de la longueur des soudures (norme NF P 22-471).

Les soudures à pleine pénétration peuvent transmettre des charges statiques et des charges de fatigue au moins égales à celles des pièces assemblées, sous réserve que le métal déposé ait une limite d'élasticité et une résistance à la traction au moins égales aux valeurs correspondantes spécifiées pour le métal de base.

Ces soudures n'ont donc pas besoin d'être calculées, ni sous charges statiques, ni sous charges de fatigue ; les vérifications n'ont à porter que sur la pièce attachée et sur la pièce continue.

En ce qui concerne la fatigue, cela n'est valable en toute rigueur que pour les éléments soudés transmettant des efforts normaux aux soudures. Lorsque les soudures sont soumises à des efforts de cisaillement importants, elles sont à vérifier à la fatigue avec la classe de fatigue 100 pour les contraintes de cisaillement.

2.2.6 - Récapitulation des critères de choix du type de soudure dans les assemblages en T, en croix ou en L

On est souvent confronté, dans la pratique, au problème du choix entre soudures d'angle sans chanfrein et soudures à pleine pénétration, dans le cas d'assemblages en T, en croix ou en L transmettant des efforts faibles. De tels assemblages sont nombreux par exemple dans les éléments transversaux des tabliers bipoutres.

Ce choix est effectué en considérant les critères suivants.

- Résistance aux charges statiques et aux charges de fatigue

On a vu que les différents types de soudures ont des capacités de résistance très différentes. Les calculs de sollicitations peuvent nécessiter une modélisation de la zone de tablier autour de l'assemblage par un modèle à barres ou par un modèle aux éléments finis. Pour certains cas, il existe des méthodes simplifiées permettant un calcul manuel (voir par exemple le numéro 11 et le numéro 18 du bulletin "ponts métalliques" de l'OTUA).

- Possibilités de contrôle

Les soudures à pleine pénétration sont contrôlables en profondeur par ultrasons, et les normes imposent un contrôle sur 100 % de leur longueur. Les soudures à pénétration partielle ne permettent que des contrôles superficiels (ressuage, magnétoscopie), et les normes n'imposent de contrôler que 10 % de leur longueur (voir le [tableau 2.2](#) ci-après). Ce point est à considérer dans certains cas : soudures vitales pour la sécurité d'un ouvrage, soudures difficilement accessibles pour les inspections périodiques et les réparations éventuelles, etc.

- Faisabilité du soudage

Il s'agit de considérations technologiques telles que l'accessibilité (sur une ou deux faces), la soudabilité, la maîtrise des déformations, la maîtrise des tolérances...

- Coût d'exécution

De la solution la moins performante (soudures d'angle sans chanfrein) à la solution la plus performante (soudures en bout à pleine pénétration garantie), le coût de la soudure est multiplié par un facteur de 4 à 6, à effort attaché identique. Cela provient de ce que les soudures à pleine pénétration garantie nécessitent un chanfreinage des pièces, un volume de métal déposé supérieur, un gougeage avant reprise à l'envers pour éliminer les parties pouvant comporter des manques de fusion, des contrôles beaucoup plus étendus...

Un cas particulier est celui des assemblages transmettant surtout des efforts de compression. Des soudures d'angle suffisent alors, même avec des efforts importants, si ceux-ci peuvent transiter par contact direct des pièces. L'hypothèse du contact direct nécessite des conditions de réalisation appropriées. Pour le lançage de poutres sur des galets, ces conditions de réalisation peuvent consister à plaquer la semelle inférieure sur l'âme de la poutre, avant soudage. Pour les montants d'appui, le placage de la semelle inférieure sur l'âme de la poutre, et un ajustage du bas du montant sur la semelle, sont généralement considérés comme suffisants pour permettre l'utilisation de soudures d'angle.

Ce qui précède concerne les assemblages transmettant des efforts perpendiculairement aux soudures.

En ce qui concerne les assemblages principalement cisailés, il n'est pas nécessaire, sauf dispositions constructives inhabituelles, de rechercher la pleine pénétration pour les assemblages :

- âme /semelle ;
- raidisseur longitudinal/âme ;
- montant de poutre / âme.

La conception des soudures étant liée à celle des assemblages, de bonnes dispositions constructives des assemblages peuvent permettre d'éviter des problèmes de soudure (fatigue, arrachement lamellaire...). Par exemple, le passage des raidisseurs longitudinaux de fond de caisson ou de nervures de dalle orthotrope à travers les éléments transversaux, sans interruption de ces éléments longitudinaux, permet d'éviter des assemblages en croix sensibles à la fatigue.

2.3 - CHOIX DU TYPE DE SOUDURE DANS LES ASSEMBLAGES BOUT À BOUT

2.3.1 - *Assemblages bout à bout avec soudures en bout à pleine pénétration garantie*

Les assemblages bout à bout utilisent le plus souvent des soudures en bout à pleine pénétration garantie, assurant la continuité de la pleine section des éléments assemblés.

Avec les épaisseurs des pièces utilisées pour les ponts, ces assemblages nécessitent pratiquement toujours une préparation des bords par chanfreinage.



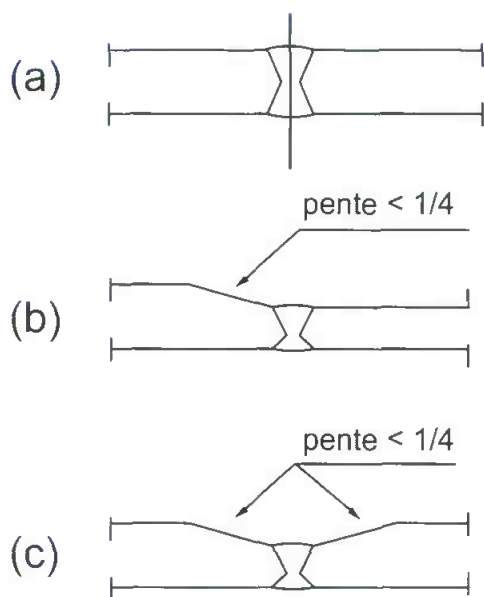


Figure 2.3
Assemblages bout à bout
avec soudures
à pleine pénétration

On prolonge généralement le joint, à son origine et à son extrémité, par des appendices provisoires intégrés aux pièces à souder ; en éliminant ces appendices après soudage, on élimine le début et la fin du cordon, qui sont plus susceptibles de présenter des défauts que les parties courantes, et on a des possibilités supplémentaires de contrôle.

Les éléments assemblés ont même épaisseur (figure 2.3 a), ou bien l'on se ramène à la même épaisseur d'about en amincissant progressivement l'élément le plus épais. La pente ne doit pas dépasser $1/4$, condition de validité des classes de fatigue (figure 2.3 b).

Le coût de l'assemblage croît à peu près proportionnellement au nombre de passes de soudage (ou au volume de soudure à déposer), donc proportionnellement au carré de l'épaisseur de la tôle la plus mince.

Parmi ces assemblages, figurent notamment les assemblages transversaux entre tronçons de poutres principales, pour rabouter :

- les semelles de poutre en I ;
- les membrures de poutre-caisson, y compris leurs raidisseurs longitudinaux ;
- les âmes de poutre ;
- les platelages de dalle orthotrope.

Les assemblages longitudinaux entre éléments de dalle orthotrope, ou entre éléments de membrure dans les poutres-caissons larges, nécessitent aussi des soudures en bout à pleine pénétration garantie.

Il peut arriver, dans ce cas, que la membrure soit épaisse pour résister aux efforts longitudinaux, et que les soudures longitudinales à pleine pénétration soient très surabondantes vis-à-vis des efforts transversaux. Pour diminuer l'épaisseur et le coût de ces soudures, on peut amincir progressivement, en respectant la condition de pente maximale, la membrure au voisinage du joint longitudinal (figure 2.3 c).

Comme on l'a vu à propos des assemblages en croix, en T ou en L, les soudures à pleine pénétration peuvent transmettre des charges statiques et des charges de fatigue au moins égales à celles des pièces assemblées ; elles n'ont donc pas besoin d'être calculées.

Les vérifications n'ont à porter que sur le corps des pièces. Le classement en fatigue est très différent suivant les dispositions constructives : il s'étage de la classe 112 à la classe 36, cette dernière s'appliquant à une pièce avec soudure en bout exécutée d'un seul côté, sans support à l'envers.

2.3.2 - Autres assemblages bout à bout

Dans des cas exceptionnels, des assemblages bout à bout peuvent comporter des soudures qui ne sont pas à pleine pénétration.

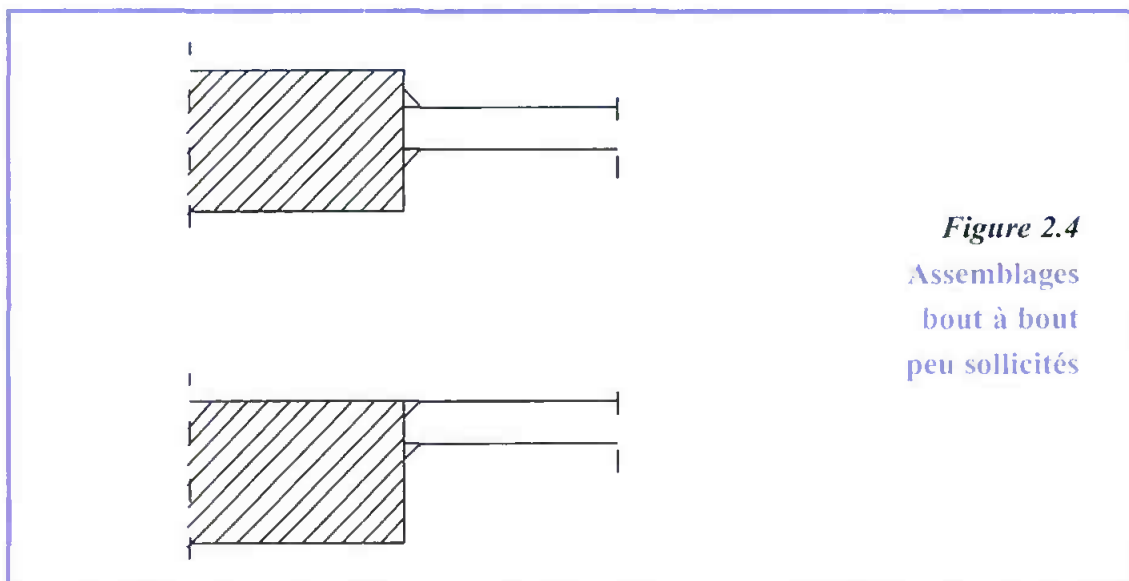
Par exemple, pour assembler une pièce mince très peu sollicitée à une pièce nettement plus épaisse, on peut utiliser de simples soudures d'angle, ou bien une soudure d'angle et une soudure en bout si les pièces doivent être alignées suivant une face (figure 2.4).

De telles dispositions sont parfois acceptées pour les assemblages semelle supérieure de pièce de pont/semelle supérieure de poutre principale si les efforts de calcul, notamment en fatigue, sont suffisamment faibles ("Guide fatigue" [2.1], paragraphe C 3.3).

Ces soudures doivent être calculées sous efforts statiques et sous efforts de fatigue. Les règles sont les mêmes que pour les assemblages en T. En particulier, en présence de chanfreins n'assurant qu'une pénétration partielle, on doit adopter dans les calculs :

$$a = a_{\text{nom}} - 2 \text{ mm.}$$

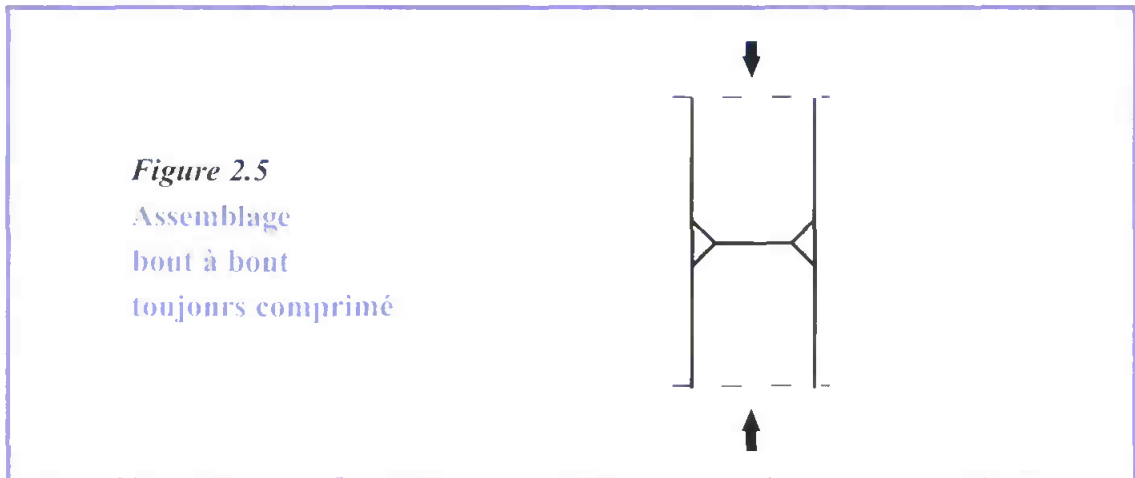
Pour le calcul à la fatigue, l'eurocode ne traite pas explicitement ce cas. Ces soudures sont assimilables à des soudures d'angle et il convient donc d'adopter, ici aussi, la classe 36 vis-à-vis des variations de contrainte dans la soudure.



Un autre cas exceptionnel est celui d'assemblage bout à bout de pièces transmettant uniquement des efforts de compression, par exemple des descentes de charges sur appui.

Si l'épaisseur des pièces est suffisamment différente, on peut utiliser des soudures d'angle comme précédemment.

Si l'épaisseur des pièces est identique, il est possible d'utiliser des soudures en bout à pénétration partielle (figure 2.5).



Dans de tels assemblages, une partie des efforts de compression doit passer par contact direct entre les pièces, ce qui nécessite une préparation convenable des surfaces d'about.

2.4 - CHOIX DE LA CLASSE DE QUALITÉ DES ASSEMBLAGES SOUDÉS

La norme NF P 22-471 sur la fabrication des assemblages soudés contient des prescriptions dont la sévérité est modulée suivant trois classes de qualité. Ces classes de qualité s'appliquent à tous les types de soudures (soudures d'angle et soudures en bout).

Les classes 1 et 2 diffèrent essentiellement par la sévérité des critères d'acceptation des imperfections, la classe 1 étant la plus sévère. Les pourcentages de soudures à contrôler, définis par la norme NF P 22-473, sont identiques pour ces deux classes (tableau 2.3).

La classe 3 est très tolérante pour les imperfections ; elle ne prévoit aucun contrôle autre que visuel ; elle n'impose ni programme de soudage, ni qualification de mode opératoire de soudage. Elle est applicable au domaine de la serrurerie, et non aux structures de ponts.

Toute référence à la norme NF P 22-471 nécessite donc de choisir la classe de qualité de chaque assemblage soudé. Pour guider dans ce choix, l'AFNOR a publié le fascicule de documentation P 22-474 : un "indice de risque", évalué à partir de divers paramètres, conduit à la classe de qualité à adopter pour l'assemblage considéré.

Pour les ponts métalliques, ce fascicule de documentation n'a pas lieu d'être appliqué, car des règles plus précises, spécialement adaptées aux ouvrages de génie civil, sont indiquées dans le CCTG.

Le fascicule 66 (article III.5.3) fixe ainsi le classement minimal des assemblages soudés :

- la classe de qualité 1 est à retenir pour les assemblages transversaux tendus en situation d'exploitation, sous charge de calcul à l'état-limite de service, des membrures de poutres principales des tabliers de ponts ; les membrures s'entendent au sens large : semelles de poutres (y compris rails de lancement soudés sous les poutres et laissés en place), fonds de caissons, dalles orthotropes ;
- la classe de qualité 2 est à retenir pour tous les autres assemblages soudés des structures porteuses, y compris ceux fixant des éléments accessoires à la structure (pour éviter que des défauts de soudure ne se transmettent à la structure) ;
- la classe de qualité 3 ne peut être utilisée que pour des assemblages soudés entre éléments accessoires ne participant pas à la résistance ni à la stabilité de la structure.

Le fascicule 66 du CCTG donne ce classement comme une base minimale, que le CCTP du marché doit compléter, s'il y a lieu, en spécifiant une classe de qualité plus sévère pour certains assemblages.

Il y a lieu par exemple de spécifier pour un assemblage la qualité 1 à la place de la qualité 2 :

- Lorsque cet assemblage est vital pour la sécurité de l'ouvrage ; un tel cas est exceptionnel (le fascicule 66 cite comme exemple des assemblages transmettant en traction les réactions des haubans dans un pont à haubans) ;
- Lorsqu'on a besoin de la classe de fatigue 71 pour un assemblage en T, en croix ou en L, avec soudures à pleine pénétration transmettant des efforts ; la qualité 2 ne donne droit qu'à la classe 56, comme indiqué en 2.2.2 ci-avant (pour les autres assemblages, la qualité 1 n'apporte aucun avantage utilisable dans les calculs à la fatigue, par rapport à la qualité 2).

En dehors de ces cas particuliers, il est conseillé de ne pas imposer la qualité 1 plus que ne le prévoit le fascicule 66. La qualité 1 augmente fortement le coût de fabrication des assemblages. En outre, les critères d'acceptation des imperfections sont sévères, ce qui conduit assez souvent à des réparations, lesquelles peuvent entraîner des risques plus importants que la non-élimination du défaut. La norme NF P 22-471 (article 10.2) rappelle ce point.

Le CCTP peut spécifier aussi un "sureclassement" en qualité 2 pour certains assemblages entre éléments accessoires, au lieu de la classe 3 qui résulterait de l'application à la lettre du fascicule 66. Il est conseillé de procéder ainsi pour tous les assemblages dont la rupture pourrait mettre en danger des personnes, qu'il s'agisse d'usagers ou bien d'agents d'exploitation ou de maintenance. Des soudures concernées sont par exemple celles conditionnant la tenue des dispositifs de visite et d'entretien.

Ces règles ont été établies pour les tabliers de ponts. Elles peuvent habituellement être étendues aux passerelles pour piétons et cycles, non mentionnées dans le fascicule 66.

Dans le domaine ferroviaire, où les conditions d'exploitation des ouvrages sont plus contraignantes, des règles plus sévères sont appliquées.

Les procédés de soudage des métaux sont nombreux, et basés sur des techniques très diverses.

Cependant, dans le domaine des ponts en acier, on utilise uniquement le soudage à l'arc, et les principes de base adoptés sont toujours les mêmes, à quelques exceptions près : l'arc électrique est entretenu entre une électrode et les éléments à souder ; il y a fusion du métal de base, ainsi que de l'électrode ; celle-ci est donc consommable et fournit du métal, dit métal d'apport. Le soudage à l'arc nécessite une protection contre l'air : à la température de fusion, le fer se combine avec les constituants de l'air (oxygène et azote), pour donner des oxydes et des nitrures qui rendraient la soudure extrêmement fragile. Cette protection est assurée par des produits introduits sous différentes formes : enrobage des électrodes, flux en poudre, garnissage intérieur des fils-électrodes, gaz... C'est essentiellement par le mode de protection que se différencient les procédés de soudage des ponts.

Deux procédés de soudage à l'arc utilisés pour les ponts font exception à ces principes :

- le soudage des goujons de ponts mixtes, dans lequel l'arc est entretenu entre le goujon et la tôle support, sans utilisation d'électrode ni apport de métal ;
- le soudage TIG, utilisé exceptionnellement pour les ouvrages d'art, dans lequel le métal d'apport est fourni en dehors de l'électrode, laquelle n'est donc pas fusible.

Le procédé de soudage est choisi par l'entrepreneur en fonction de divers facteurs tels que :

- les caractéristiques de l'assemblage (type d'assemblage, type de soudure, épaisseur utile des soudures...) ;
- les conditions d'exécution (exécution en atelier ou sur chantier, disposition des éléments...) ;
- les moyens disponibles (en personnel et en qualifications de modes opératoires) ;
- le prix de revient.

Le prix de revient du soudage est la somme de différents postes : main d'œuvre, masse de métal d'apport réellement consommée (compte tenu des longueurs d'électrodes et de fils non fondus), énergie électrique, amortissement de l'équipement, etc. Le coût de la main d'œuvre en constitue la part essentielle. Il dépend de la productivité du procédé, qu'on peut définir par :

$$\text{productivité} = \frac{m}{T_r} = \frac{m}{T_a} \times \frac{T_a}{T_r}$$

avec :

m : masse de métal à déposer

T_r : temps nécessaire à la réalisation de la soudure

T_a : temps de fonctionnement effectif de l'arc, ou durée du soudage proprement dit

Le rapport m/T_a est le taux de dépôt. Il peut varier de 1 à 4 kg/h suivant les procédés.

Le rapport T_a/T_r est appelé facteur de marche ; il peut descendre jusqu'à 0,3 pour les procédés manuels.

Au coût du soudage proprement dit s'ajoutent ceux de la préparation des bords à souder, des contrôles, etc.

Nous indiquons ci-après les procédés utilisés pour les ponts, en mentionnant pour chacun d'eux le numéro d'identification suivant la norme NF EN 24063 : cette norme fournit un classement systématique des procédés de soudage des métaux, avec pour chacun une désignation normalisée et un numéro d'identification.

2.5.2 - Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme)

C'est la première solution mise au point pour le soudage à l'arc, utilisée dès 1907. Il s'agit d'un procédé manuel : le soudeur tient et guide à la main le porte-électrode (figure 2.6).

Les électrodes sont constituées d'une âme métallique et d'un enrobage. Le diamètre, enrobage compris, est de l'ordre de 6 mm.

L'âme conduit le courant électrique et fond en fournissant le métal d'apport.

L'enrobage fond en même temps. Sa composition est complexe (produits minéraux, métalliques et organiques), car il doit assurer plusieurs fonctions :

- Fonctions chimiques et métallurgiques :

- produire des gaz (par exemple, gaz carbonique par décomposition de carbonates) pour protéger le bain de fusion des effets de l'oxygène et de l'azote atmosphériques ;
- épurer le bain de fusion par apport d'éléments désoxydants et dénitruants ;
- fournir au métal déposé, si nécessaire, des éléments d'alliage pour améliorer ses caractéristiques mécaniques ;

- Fonctions physiques :

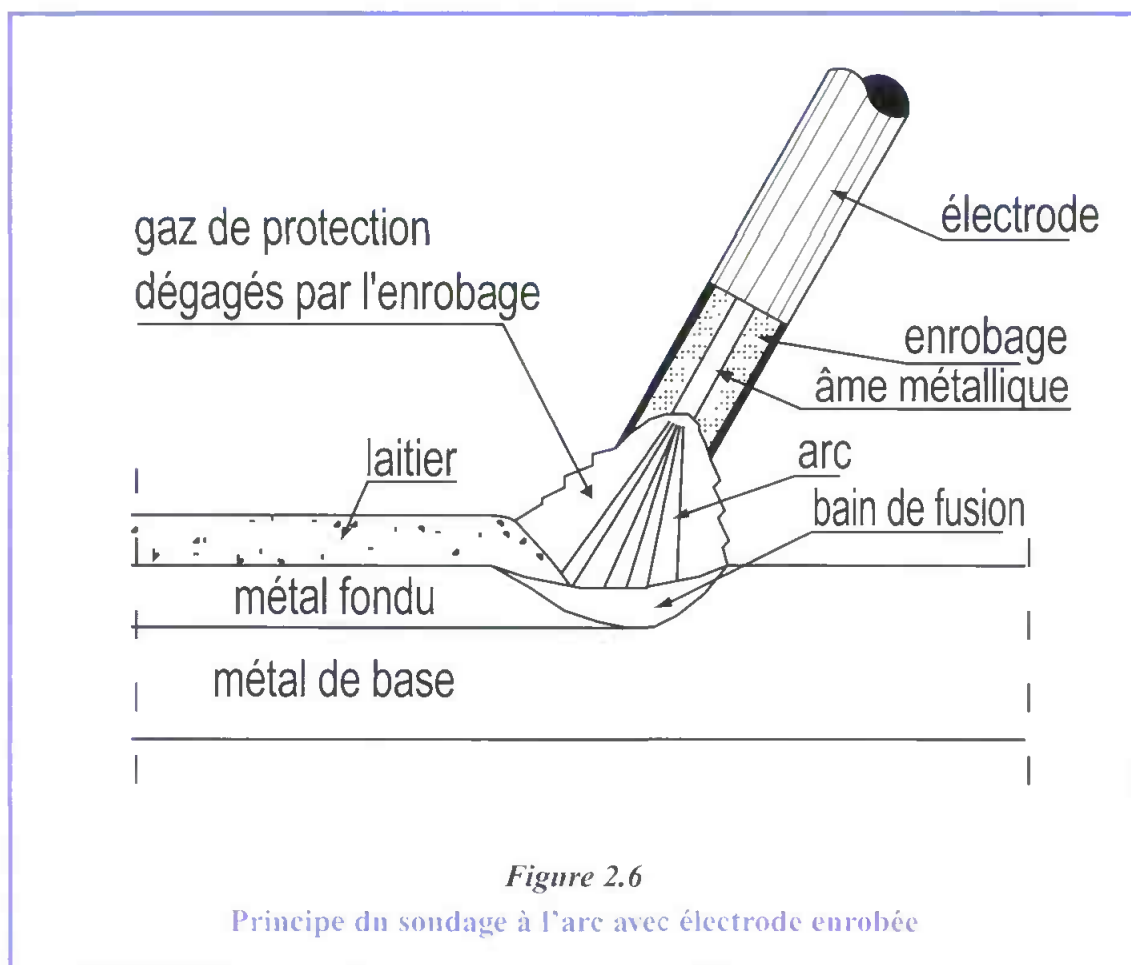
- former par fusion un laitier liquide qui se solidifie à la surface du métal déposé, lui apportant une protection physico-chimique, en particulier le protégeant d'un refroidissement trop rapide qui entraînerait un risque de fragilisation par trempe ;
- favoriser l'amorçage et la stabilité de l'arc ;
- canaliser les gouttelettes de métal fondu, grâce au jet de gaz incandescent produit, ce qui est utile en particulier lorsqu'il faut souder en position verticale, au plafond...

Il existe plusieurs natures d'enrobage : basique, rutile, cellulosique... C'est l'enrobage basique qui doit être utilisé pour les aciers de nuance S355 et au-dessus (fascicule 66 du CCTG, article II.5.2) : il permet les meilleurs résultats en ténacité, en ductilité, et en faible teneur en hydrogène diffusible à condition d'être convenablement séché.

Ces électrodes nécessitent du courant continu.

L'enrobage basique ayant tendance à absorber de l'humidité (nocive parce qu'elle fournit de l'hydrogène au bain de fusion), il est nécessaire de sécher les électrodes à la chaleur et de les conserver à une certaine température jusqu'au moment de leur utilisation, en se conformant aux instructions du fabricant.

Il existe aussi maintenant des électrodes à enrobage basique livrées sous vide dans des étuis étanches, qui peuvent être utilisées sans séchage préalable pendant un certain temps après ouverture de l'étui. Les électrodes non utilisées pendant le délai imparti peuvent être utilisées ultérieurement après avoir suivi le même étuvage que les produits classiques.



Le soudage à l'électrode enrobée ne nécessite qu'un équipement peu coûteux. Il est relativement simple à mettre en œuvre, le soudeur n'ayant que deux paramètres à régler : la tension et l'intensité du courant. Il permet de réaliser les différents types d'assemblages dans toutes les positions de soudage, avec une bonne liberté de mouvement, et pour une large gamme d'épaisseurs.

Il est utilisé en atelier et surtout sur chantier (il a été longtemps le seul procédé possible sur chantier).

Son inconvénient est un coût de main d'œuvre élevé : le taux de dépôt peut être deux ou trois fois plus faible qu'avec d'autres procédés ; le facteur de marche est faible également, car il faut insérer fréquemment une nouvelle électrode, ce qui est pénalisant avec les soudures longues. Le

soudage à l'électrode enrobée n'est donc adopté que lorsque les procédés plus productifs ne peuvent pas être utilisés, par exemple parce que la zone de soudage est d'accès difficile.

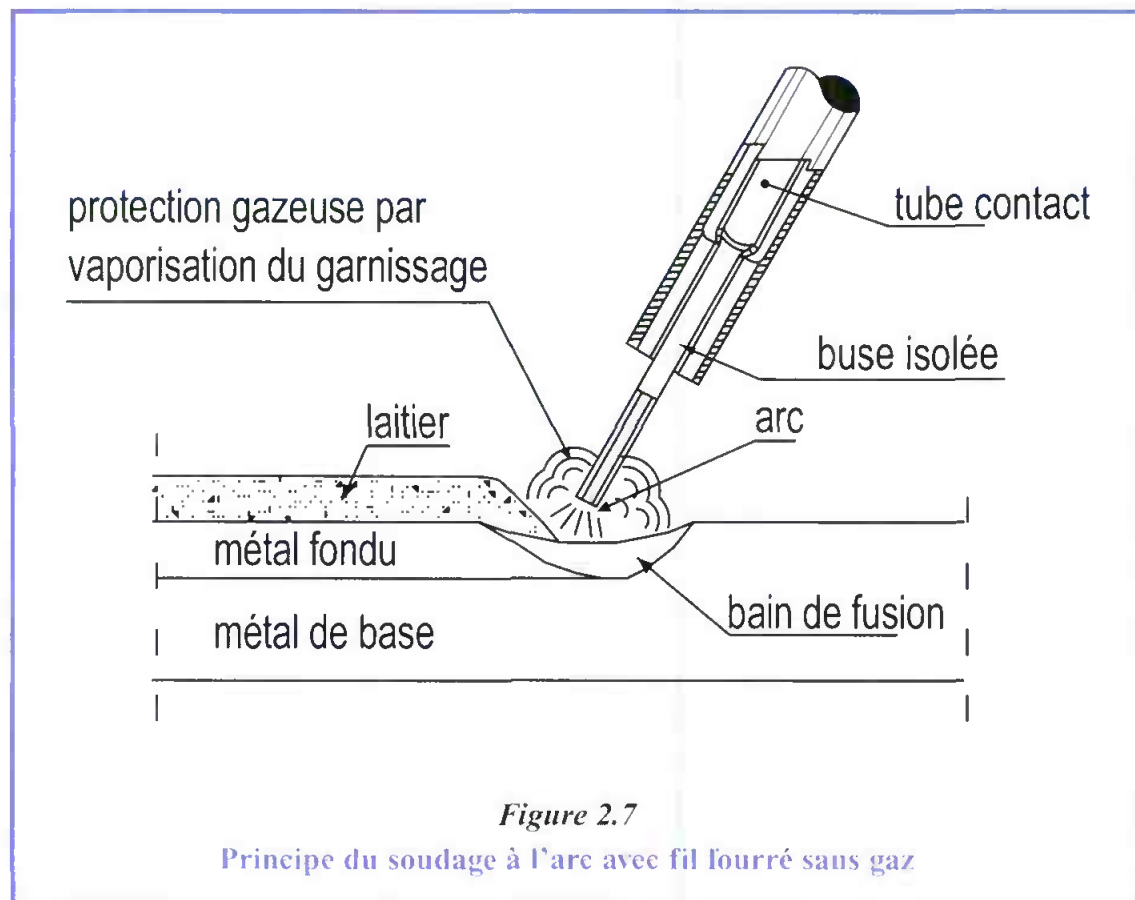
Il demeure un procédé complémentaire indispensable.

2.5.3 - Soudage à l'arc avec fil-électrode fusible fourré, sans protection de gaz (n° 114)

Le procédé "Innershield" (appellation commerciale propre à la Société Lincoln Electric) appartient à cette catégorie. Mis au point vers 1959, il a été appliqué pour la première fois à un ouvrage d'art (en France) pour la reconstruction du pont de Sully-sur-Loire, en 1986. Depuis, il est couramment utilisé pour les ponts-routes comme pour les ponts-rails.

Il utilise un fil-électrode continu qui fournit le métal d'apport. Ce fil, creux, contient un garnissage qui remplit les mêmes fonctions que l'enrobage des électrodes enrobées. Le diamètre extérieur du fil est compris habituellement entre 1,8 et 2 mm (figure 2.7). Il n'y a pas à effectuer d'étuvage : le fil creux contenant le garnissage est étanche.

Le procédé est semi-automatique : le soudeur guide à la main, le long du joint, un pistolet qui débite à vitesse constante le fil provenant d'un dévidoir. Les paramètres à régler avant soudage sont la tension électrique, la longueur de fil sortie du pistolet et la vitesse de déroulement du fil.



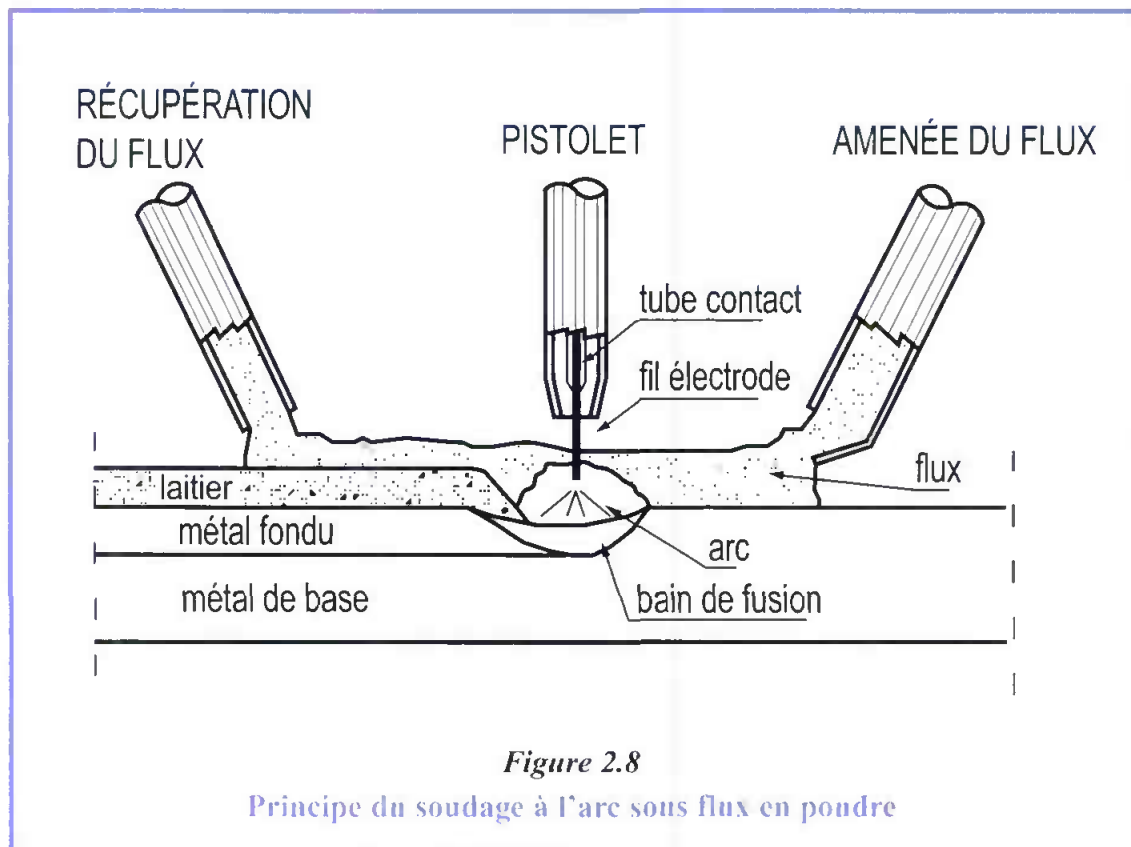


La protection est plus localisée que dans le cas des autres méthodes avec fil et protection gazeuse, ou que dans le cas de l'électrode enrobée (le fil contient moins de garnissage que l'électrode ne comporte d'enrobage). Le soudeur doit donc être formé spécialement et, bien entendu, avoir la qualification pour le procédé et pour les positions de soudage nécessaires.

Du fait qu'il n'y a aucun apport de gaz de protection (en dehors de celui fourni par le garnissage), le procédé est beaucoup moins sensible au vent que ceux avec protection gazeuse évoqués ci-après. Il peut donc être pratiqué sur chantier, avec seulement un minimum de précautions pour s'abriter du vent. L'utilisation est possible pour les différents types d'assemblages, dans toutes les positions de soudage. Le procédé a donc des possibilités analogues à celles du soudage à l'électrode enrobée, tout en permettant un taux de dépôt plus élevé.

2.5.4 - Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode fusible massif (n° 121)

Ce procédé utilise un flux indépendant de l'électrode. Mis au point aux États-Unis, et introduit en Europe vers 1935, il a marqué les débuts du soudage à l'arc mécanisé. Du fait que l'arc n'est pas visible, le procédé est généralement pratiqué sur des bannes entièrement automatiques, en atelier : l'opérateur règle préalablement les paramètres électriques, la vitesse de déroulement du fil-électrode et la vitesse de progression du pistolet, puis il met en route et surveille l'exécution.



Il existe aussi des versions semi-automatiques.

Le fil, massif, a un diamètre de l'ordre de 4 millimètres.

Le flux, sous forme de poudre ou de granulé, est déposé en avant de l'arc par une goulotte.

L'arc, entièrement submergé, crée dans le flux une cavité remplie de gaz (CO et CO_2) qui est entourée de flux fondu. Ce dernier étant électroconducteur, une partie de la chaleur est obtenue par effet Joule. Il y a fusion de l'électrode, du métal de base et d'une partie du flux. La partie du flux qui n'a pas fondu est récupérée à l'arrière par aspiration et peut être réutilisée.

Du fait que l'arc est submergé, de fortes intensités peuvent être utilisées, ce qui permet des taux de dépôt élevés. Le courant est continu ou alternatif.

En raison de la présence du flux dont une partie est en poudre et l'autre à l'état fondu, le procédé n'est applicable qu'aux joints en position horizontale ou faiblement inclinée. Il permet de réaliser avec un rendement élevé, donc économiquement, des soudures de grande longueur telles que les soudures d'angle des assemblages âme sur semelle, ou des assemblages raidisseurs longitudinaux sur âme ; il permet également d'assembler bout à bout des semelles épaisses par soudure à pleine pénétration.

Le procédé étant automatique, les résultats sont sûrs : ils ne dépendent pas de l'habileté de l'opérateur, qui a seulement à afficher les réglages. Ils sont aussi reproductibles, à condition d'utiliser le même couple fil-flux. Cela est mis à profit pour les soudures d'angle : on admet de prendre en compte une partie de la valeur de pénétration obtenue lors de la qualification du mode opératoire de soudage (voir 2.2.2 ci-avant).

Les flux en poudre, comme les électrodes enrobées, doivent être convenablement séchés pour obtenir de basses teneurs en hydrogène. Dans ce procédé également, les flux basiques donnent les meilleurs résultats en ténacité et en ductilité.



2.5.5 - Soudage à l'arc sous protection de gaz, avec fil-électrode fusible

Cette appellation générale recouvre différents procédés. Dans tous les cas, un fil-électrode est débité à travers un pistolet, lequel distribue également un gaz par une buse concentrique au fil.

L'utilisation sur banc automatique est courante. Elle peut être aussi semi-automatique : le soudeur guide à la main, le long du joint, le pistolet qui débite le fil à vitesse constante.

Le gaz de protection peut être inerte (argon, ou mélange riche en argon) : ou bien actif, c'est à dire qu'il se décompose (gaz carbonique). La première famille de procédés est appelée couramment soudage MIG (de l'anglais metal inert gas welding), la seconde, soudage MAG (metal active gas welding).

Tous ces procédés ne sont pratiquement utilisables qu'en atelier, car la protection gazeuse nécessite l'absence de vent ou de courant d'air latéral.

Le poste de soudage comprend le générateur de courant, le dévidoir de fil, et des bouteilles de gaz reliées au pistolet par des conduites d'alimentation. Ce matériel n'est pas très maniable, les réglages sont assez complexes, et les dimensions du pistolet ne permettent pas toujours d'accéder facilement à l'assemblage. Mais ces procédés sont adaptables à une grande diversité de conditions, ils permettent généralement le soudage en toutes positions, et ils peuvent avoir une productivité élevée.

Suivant que le fil-électrode est massif ou fourré, et suivant la nature du gaz de protection, on distingue les procédés suivants :

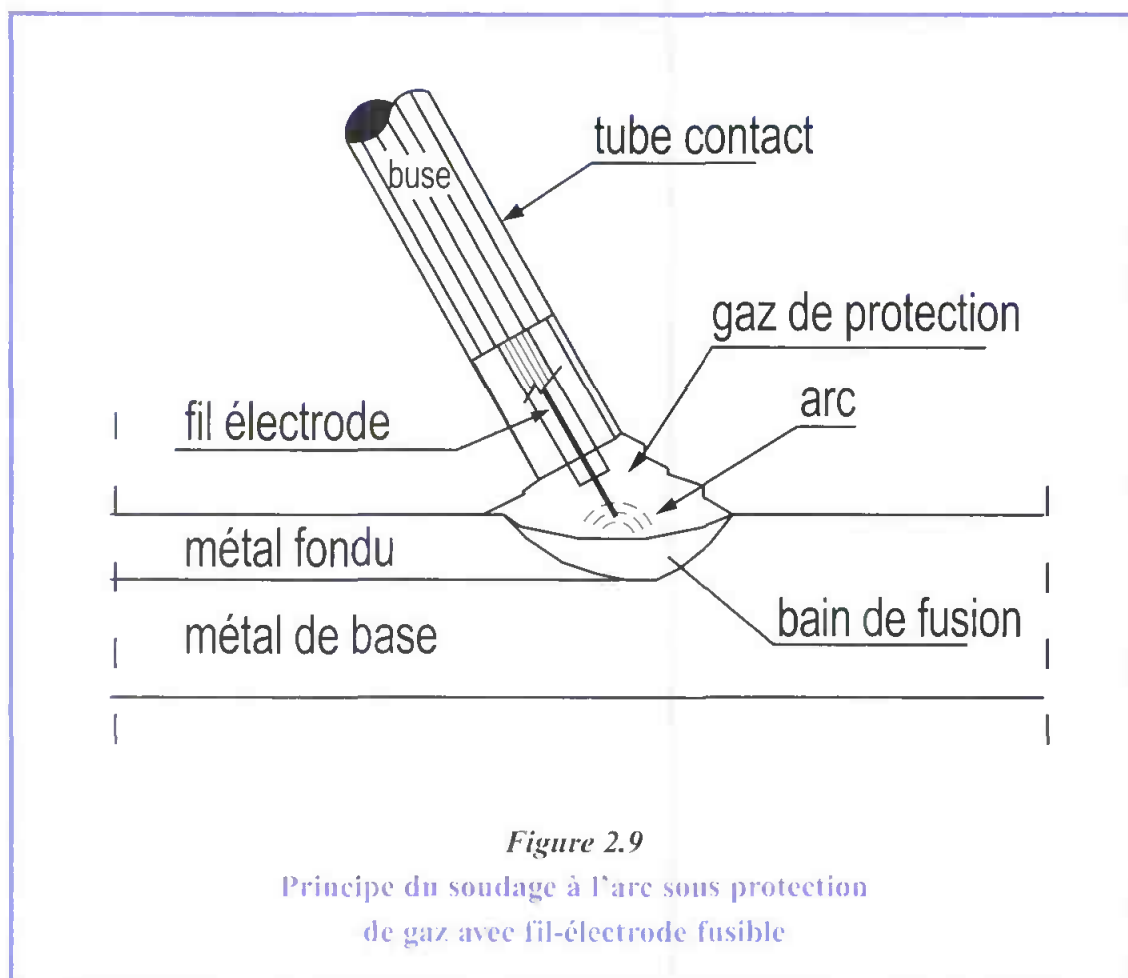
Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible massif (131)

Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible massif (135)

Le fil, massif, a un diamètre compris généralement entre 1,2 et 1,6 mm. Il est obtenu par tréfilage d'un fil machine produit par la sidérurgie.

Il n'y a aucun flux et la protection est assurée uniquement par un gaz, qui améliore également la stabilité de l'arc (figure 2.9). Il n'y a donc pas de laitier à enlever après soudage.

Le transfert du métal d'apport peut s'effectuer soit en régime de court-circuit, avec un bain de fusion de faible dimension, soit en régime de pulvérisation axiale, avec un bain de fusion important qui restreint l'utilisation aux joints en position horizontale, soit en régime intermédiaire. L'arc est alimenté en courant continu.



Le régime intermédiaire est maintenant de plus en plus pratiqué avec des courants "pulsés" produits par des générateurs électroniques. Ces courants sont composés d'une suite de créneaux entre une tension basse maintenant l'arc, et une tension haute assurant le régime de pulvérisation axiale. On bénéficie ainsi à la fois d'un transfert stable et d'un bain de fusion peu important, permettant le soudage en toutes positions.

Avec les équipements récents, le comportement de l'arc est analysé par un microprocesseur qui réagit instantanément sur le réglage du générateur de courant.

Ces procédés avec fil massif nécessitent un respect strict des paramètres d'exécution, pour éviter d'avoir des défauts tels que manques de fusion ou collages. Les procédés ci-après, avec fils fourrés, ne présentent pas cet inconvénient :

Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible fourré (n° 137)

Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible fourré (n° 136)

Ces procédés diffèrent des précédents par le fil-électrode, qui consiste en une gaine tubulaire, d'un diamètre extérieur compris entre 1,6 et 2,4 mm, contenant un garnissage. Ce garnissage peut être un flux ou une poudre métallique. Il assure la protection contre l'air, le gaz n'ayant ici qu'un rôle complémentaire. Il permet aussi d'améliorer la composition chimique du dépôt.

Contrairement au procédé avec fil massif, il n'y a pas d'avantage ici, dans l'état actuel de la technologie, à utiliser des courants pulsés.

2.5.6 - Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire en tungstène (TIG) (141)

Ce procédé manuel, appelé usuellement soudage TIG (tungsten inert gas welding), s'est développé initialement aux Etats-Unis durant la seconde guerre mondiale dans le domaine de l'aéronautique.

L'électrode en tungstène, non consommable, a seulement pour rôle de produire l'arc électrique. Le métal d'apport est fourni en dehors du pistolet de soudage, sous la forme d'un fil ou d'une baguette amenée manuellement dans le bain de fusion, en avant de celui-ci. La protection contre l'air est assurée par un gaz inerte tel que l'hélium ou l'argon, amené par une buse concentrique à l'électrode (Figure 2.10).

Le procédé a une productivité extrêmement faible, mais il permet une très grande qualité de compacité et de forme. Il n'est utilisé qu'exceptionnellement pour les ponts, par exemple pour effectuer la première passe d'une soudure dont on ne peut pas faire la reprise à l'envers, et pour laquelle on cherche donc à obtenir directement le meilleur résultat possible.

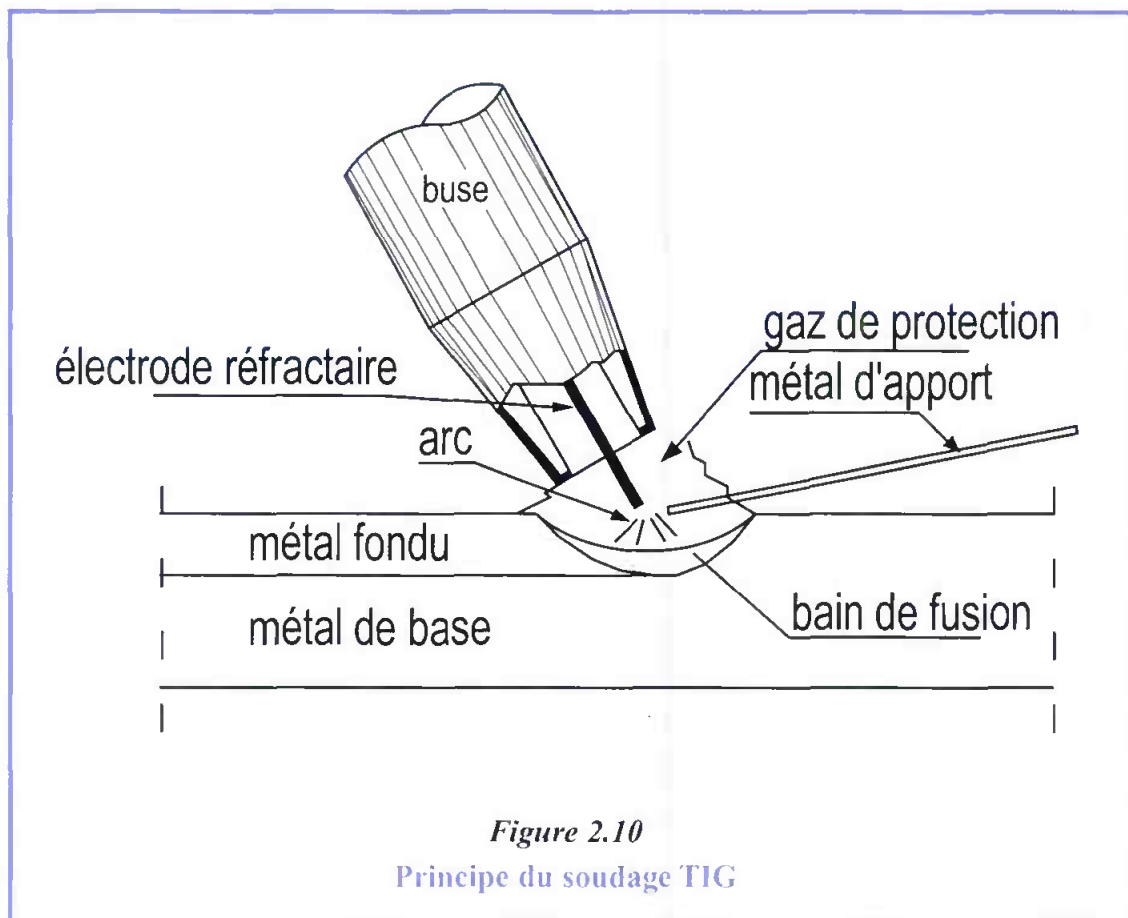


Figure 2.10
Principe du soudage TIG

2.5.7 - Soudage à l'arc des goujons

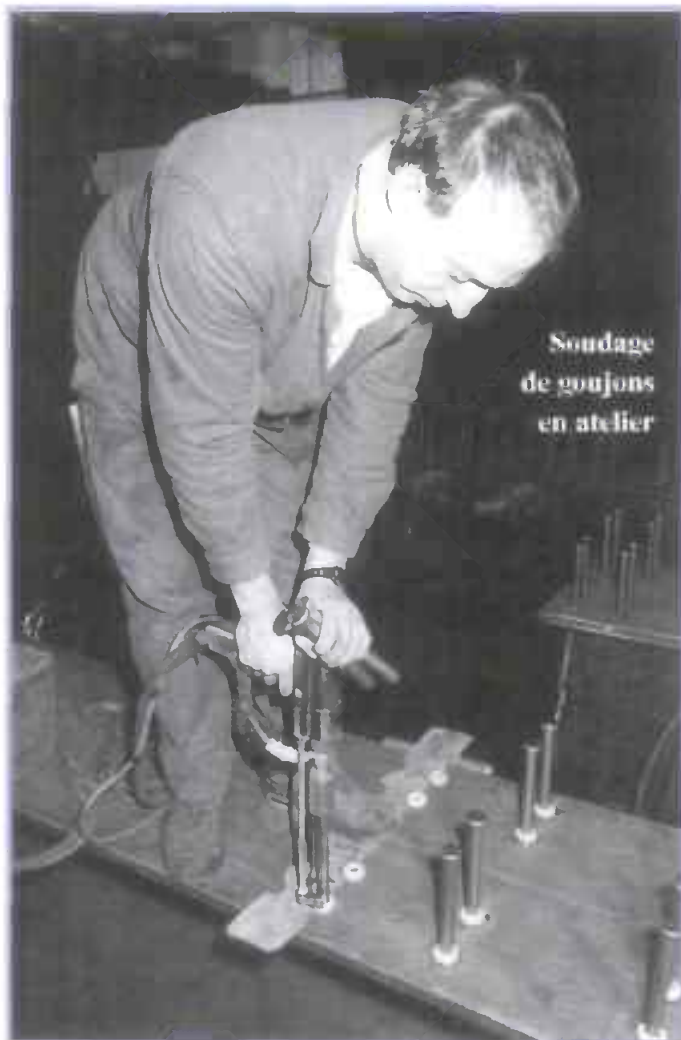
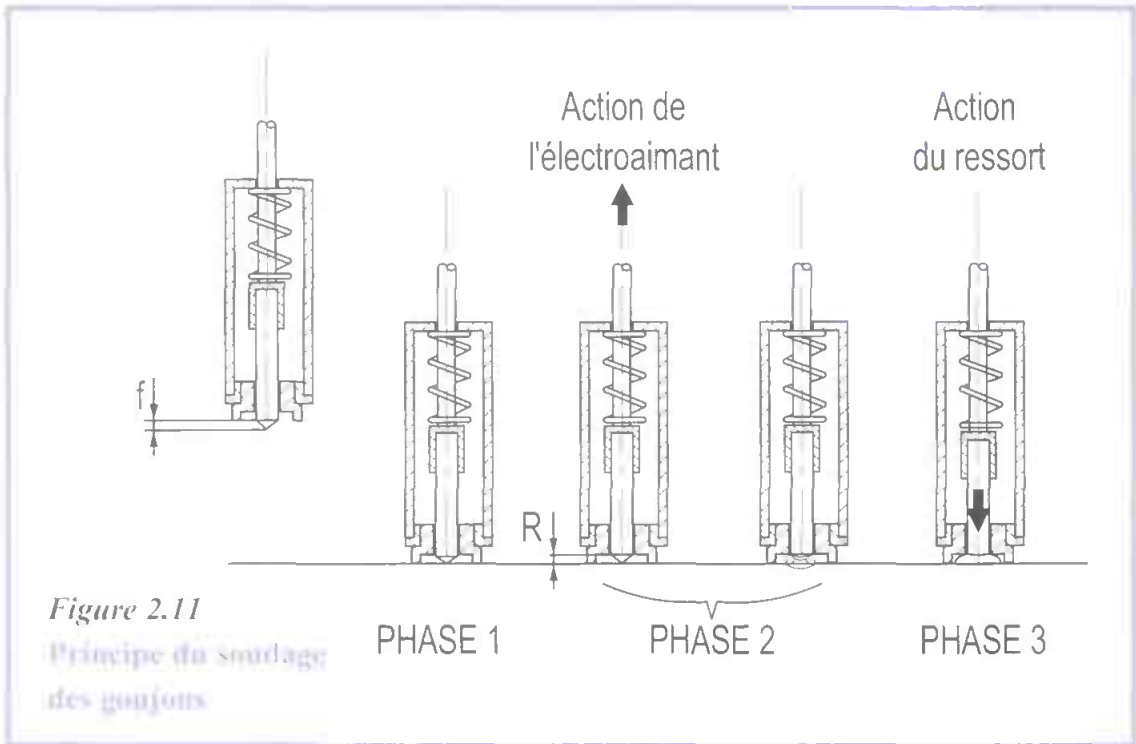
Les goujons de connexion des ponts mixtes peuvent avoir un diamètre jusqu'à 22 mm, maximum considéré par la norme NF E 25-140 qui définit le couple goujon - bague réfractaire.

L'opérateur conduit le soudage à l'aide d'un pistolet dans lequel est maintenu le goujon à souder. Le pistolet est connecté à l'alimentation électrique de façon à ce que le goujon joue le rôle d'électrode.

Le pistolet comporte des dispositifs mécaniques et électroniques qui commandent automatiquement le passage du courant électrique et les mouvements nécessaires. Avant le soudage, les réglages sont effectués par l'opérateur en conformité avec le descriptif du mode opératoire de soudage.

Les trois phases représentées à la figure 2.11 correspondent aux opérations suivantes :

- 1 - Positionnement du goujon par l'opérateur, avec le pistolet, sur la membrure support ; le ressort est comprimé par la remontée f du goujon.
- 2 - Après déclenchement du pistolet, nouvelle remontée du goujon, par un électro-aimant, de la hauteur R nécessaire à l'obtention de la bonne longueur d'arc ; amorçage de l'arc ; fusion de la tôle et de l'extrémité inférieure du goujon.
- 3 - Interruption du courant ; enfoncement du goujon, par l'action du ressort, dans le métal fondu.



La bague en matériau réfractaire assure une protection par confinement qui limite l'oxydation et maintient le métal fondu. Elle doit être éliminée après le soudage.

Le soudage des goujons est le plus souvent exécuté en atelier. Si nécessaire, le procédé est utilisable sur chantier à condition de disposer d'un groupe électrogène puissant et à réponse rapide.

2.6 - CHOIX DES PRODUITS CONSOMMABLES POUR SOUDAGE

L'entrepreneur utilise, pour la construction, des produits consommables (électrodes, fils-électrodes, gaz de protection, flux...) conformes au descriptif des modes opératoires de soudage. C'est donc lors de la mise au point du mode opératoire qu'il choisit les produits.

Le choix des produits doit être conforme aux spécifications du CCTG et des normes : ces spécifications concernent les caractéristiques mécaniques du métal d'apport, la nature des produits (rutile ou basique), la teneur en hydrogène diffusible.

Pour les caractéristiques mécaniques (limite d'élasticité, résistance à la traction, allongement à la rupture, énergie de rupture par choc dans l'essai Charpy V) le principe général est que les valeurs nominales du métal d'apport doivent être égales ou supérieures aux valeurs spécifiées du métal de base (fascicule 66 du CCTG, article II.5, norme NF P 22-470, et eurocode 3, partie 1.1, article 3.3.5).

Les valeurs nécessaires sont facilement obtenues pour les caractéristiques de traction, du moins avec les nuances d'acier utilisées couramment. Il est plus difficile d'obtenir l'énergie de rupture par choc, les valeurs de l'acier de base étant relativement élevées dans le cas des fortes épaisseurs.

S'il y a risque d'arrachement lamellaire, le fascicule 66 du CCTG (commentaire de l'article II.5) spécifie que la limite d'élasticité du métal d'apport ne soit pas supérieure à celle du métal de base : les limites d'élasticité doivent donc être égales dans ce cas. Cette condition ne peut être satisfaite que pour les aciers de base de nuance S355 et au-dessus : il n'existe pas, actuellement, de métal d'apport ayant une limite d'élasticité inférieure à 320 N/mm^2 .

Il est à noter que les caractéristiques mécaniques du métal d'apport sont mesurées sur des éprouvettes confectionnées en déposant du métal dans un moule. Les valeurs garanties par le fabricant de produit portent sur ce métal déposé, qui n'est influencé par aucun enrobage ni flux, et qui n'est pas dilué dans le métal du moule. Ce sont donc des valeurs conventionnelles, qui peuvent différer sensiblement de celles obtenues réellement sur les assemblages soudés. L'entrepreneur doit en tenir compte lors du choix des produits et de la mise au point de ses modes opératoires.

En ce qui concerne la nature des produits, le fascicule 66 (article II.5) spécifie, pour le soudage des aciers de nuance S355 et au-dessus, des produits de nature basique, à basse ou à très basse teneur en hydrogène suivant l'épaisseur des pièces à assembler. C'est seulement pour les aciers de nuance S235 et S275 en faible épaisseur qu'il autorise les produits rutiles.

Enfin, le fascicule spécifie, pour le soudage des aciers "autopatinables", des produits d'apport ayant une tenue à la corrosion atmosphérique similaire à celle de l'acier de base. Dans le cas des soudures multipasses, cette exigence est limitée au nombre de passes superficielles permettant d'obtenir une profondeur suffisante de protection contre la corrosion.

2.7 - LES DÉFAUTS DES SOUDURES

Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons. Ils peuvent :

- affaiblir la résistance statique de l'assemblage ;
- initier une fissure de fatigue ;
- provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

La nocivité des défauts dépend de leur taille et de leur forme géométrique. Une forme de défaut est d'autant plus nocive à l'égard de la rupture fragile qu'elle produit un effet d'entaille plus marqué (voir 1.3.1 ci-avant).

On peut classer les défauts en six groupes suivant la norme :

NF EN 26520 : classement des défauts dans les soudures par fusion des métaux

- 1 **Fissures** - Elles peuvent être dues à de la fissuration à froid ou à chaud. Ce sont les défauts les plus nocifs, et toute fissure est interdite quelle que soit la classe de qualité de la soudure.
- 2 **Cavités** - Il s'agit notamment des soufflures dues à des inclusions gazeuses. Elles sont plus ou moins nocives en elles-mêmes ; elles peuvent aussi gêner la détection d'autres défauts. Les soufflures débouchantes sont interdites dans les classes de qualité 1 et 2, les autres sont tolérées dans certaines limites.
- 3 **Inclusions solides** - Elles peuvent être constituées de résidu de laitier ou de flux emprisonné dans la soudure. Elles ont les mêmes conséquences que les soufflures.
- 4 **Manques de fusion ou de pénétration** - Les manques de fusion sont un défaut de liaison entre le métal déposé et le métal de base, ou entre deux couches contiguës de métal déposé. Les manques de fusion ou de pénétration sont dus à un mode opératoire inadapté. Comme ils peuvent avoir un effet d'entaille analogue à celui des fissures, ils sont interdits dans les classes de qualité 1 et 2.
- 5 **Défauts de forme** - Ils peuvent concerner soit la position des éléments l'un par rapport à l'autre (défaut d'alignement, défaut angulaire...), soit la soudure elle-même (défaut de raccordement des soudures aux éléments, surépaisseur, manque d'épaisseur, effondrement, caniveau, bombement excessif, dissymétrie d'une soudure d'angle, etc.). Les défauts de forme des soudures sont dus soit à un mode opératoire inadapté, soit, dans le cas des soudures d'angle, à une mauvaise tenue de l'électrode ou du pistolet par le soudeur. Les caniveaux sont interdits en classe 1 et limités en classe 2, les manques d'épaisseur sont interdits en classes 1 et 2.

2.8 - CONTRÔLE DES SOUDURES : LES PROCÉDÉS DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

2.8.1 - Généralités

Outre le contrôle visuel, quatre procédés de contrôle non destructif sont pratiqués. Ce sont, en allant du plus superficiel au plus pénétrant :

- le ressuage
- la magnétoscopie
- la radiographie, par rayons X ou par rayons gamma
- les ultrasons.

Ces procédés permettent non seulement de détecter les défauts, mais aussi d'obtenir des indications sur leur taille, leur forme, leur orientation et leur situation dans la soudure. Ils sont complémentaires, chacun d'eux n'étant utilisable que pour certains types de défauts et certains types de soudures.

Le contrôle des soudures doit être effectué avant application de la protection contre la corrosion, bien que certains procédés s'accoutument de la présence de peinture.

2.8.2 - Le contrôle visuel

Le contrôle visuel effectué avant soudage porte sur la forme et les dimensions de la préparation des pièces (chanfreins), sur l'état de propreté des bords et des surfaces avoisinantes, sur l'alignement des pièces, sur leur fixation, ...

Le contrôle visuel effectué entre deux passes successives de soudage, ou après achèvement, porte sur :

- la propreté des soudures (absence de laitier inclus dans le métal déposé, ou restant sur les côtés de la soudure) ;
- la position des soudures, leur forme, la forme de la transition entre les passes ainsi qu'entre la soudure et le métal de base ;
- l'épaisseur des soudures d'angle, à contrôler avec un calibre ;
- l'absence de défauts visibles tels que manques de pénétration, caniveaux, fissures, porosités débouchantes... ;
- l'absence de traces d'amorçage d'arc et de projections de soudure sur les pièces.

L'autocontrôle par examen visuel fait partie intégrante du travail du soudeur manuel ou de l'opérateur. Son rôle est essentiel, notamment pour les soudures d'angle en raison des difficultés d'application des autres moyens de contrôle.

L'obligation de contrôler visuellement toutes les soudures sur toute leur longueur, qu'elles soient de classe de qualité 1, 2 ou 3, est imposée dans la norme NF P 22-471, qui fixe les critères d'acceptation des défauts.

Les modalités du contrôle visuel sont codifiées dans la norme NF EN 970. La fiabilité de ce contrôle dépend évidemment beaucoup des conditions matérielles, de l'éclairage notamment, et du soin qui lui est consacré.

2.8.3 - Le ressuage

Le ressuage permet de détecter les défauts débouchants (cavités débouchantes, fissures) sur les faces accessibles des soudures. Son domaine d'utilisation est donc voisin de celui du contrôle visuel, mais il a une sensibilité bien meilleure ; il permet par exemple de révéler des fissures d'une ouverture de 10 microns.

Les principes généraux du contrôle par ressuage sont définis dans la norme NF EN 571 : examen par ressuage.

Le procédé consiste à appliquer sur la surface à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide coloré ou fluorescent de faible tension superficielle, qui a donc tendance à pénétrer par capillarité dans les anfractuosités de faible taille. Après un temps variable selon le produit (de cinq minutes à une heure), on essuie la surface et on la recouvre avec un révélateur. Celui-ci est généralement une poudre, par exemple un talc. Le produit qui a pénétré dans un défaut remonte par capillarité dans le révélateur qu'il colore. Les indications apparaissent sous forme de points ou de lignes qui reproduisent la forme du défaut, et qui s'élargissent progressivement. La lecture est possible pendant un certain temps, de l'ordre d'une demi-heure.

Un meulage des soudures peut obturer les cavités débouchantes et les fissures, donc empêcher la pénétration du produit.



De même, il n'est pas recommandé d'effectuer un contre-essai au même endroit, car le produit pénétrant du premier essai, difficile à éliminer, risque d'empêcher la pénétration lors du second essai.

Le procédé est simple, peu onéreux, et relativement rapide ; il peut être mis en œuvre par le soudeur lui-même, et le résultat est obtenu immédiatement, ce qui permet de contrôler les soudures en cours de réalisation.

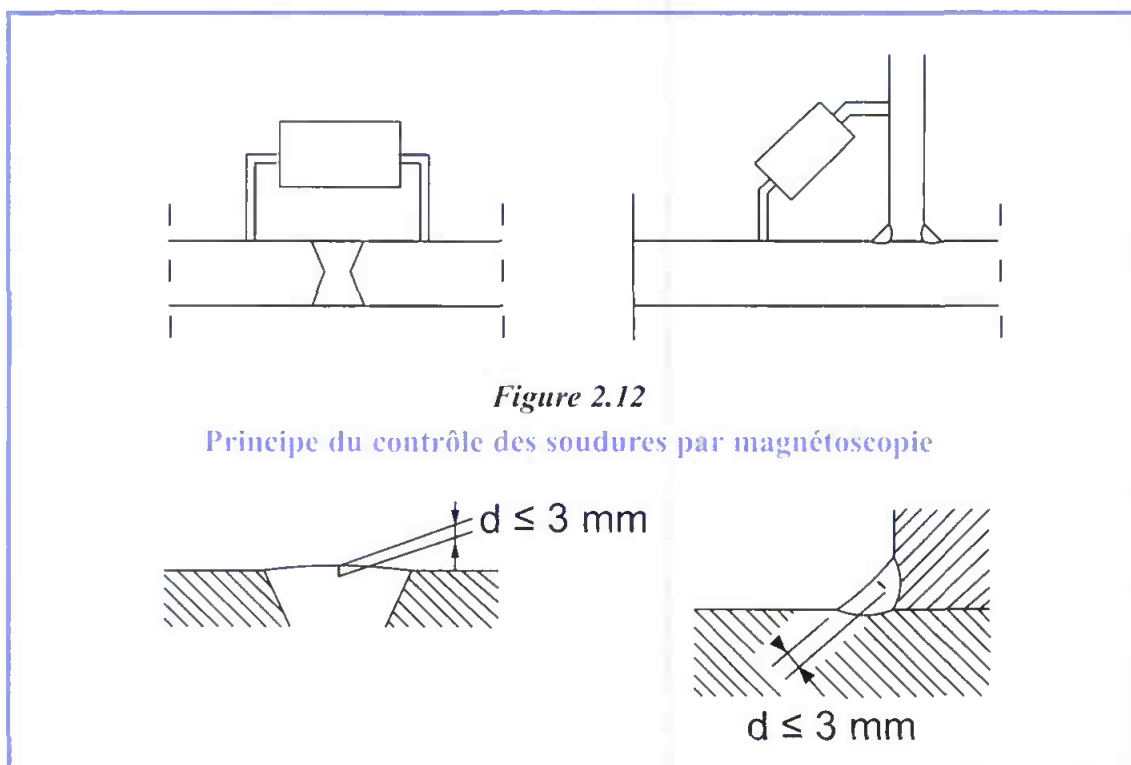
2.8.4 - La magnétoscopie

Ce procédé permet de détecter les défauts débouchants ou très proches de la surface. Les modalités de mise en œuvre sont définies dans la norme :

NF EN 1290 : contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés

Le principe consiste à faire passer le champ magnétique produit par une bobine électrique dans l'assemblage à contrôler (figure 2.12). La présence d'un défaut produit une distorsion des lignes de force du flux magnétique. La détection est effectuée en visualisant ces lignes de force au moyen d'une limaille à grains fins, en suspension dans un liquide répandu ou vaporisé sur la surface de la pièce. La visibilité est améliorée en appliquant auparavant sur la pièce une peinture claire à séchage rapide. Bien entendu, la lecture n'est plus possible dès la suppression du champ.

La sensibilité est maximale quand les lignes de force du champ sont perpendiculaires au défaut, nulle quand elles sont parallèles ; il est donc nécessaire d'effectuer deux contrôles avec des champs magnétiques perpendiculaires. En pratique, la plupart des magnétoscopes sont équipés de deux circuits de magnétisation perpendiculaires.



La sensibilité et les possibilités d'interprétation décroissent très rapidement lorsque la distance entre la partie supérieure du défaut et la surface de la pièce augmente. L'état de surface joue un rôle : la détection est possible jusqu'à 3 mm de profondeur environ lorsque la surface de la soudure est régulière, jusqu'à 1 mm seulement dans le cas contraire. Un meulage local de la soudure peut permettre d'améliorer la détection.

Le procédé est utilisable sur acier peint, ou revêtu d'un produit non magnétique de faible épaisseur. Pour les soudures d'angle et les soudures en bout à pénétration partielle, la magnétoscopie est utilisée (avec le ressuage) comme procédé principal.

Pour les soudures à pleine pénétration, elle peut être utilisée en complément de l'examen visuel, des ultrasons et de la radiographie pour la détection et le positionnement des défauts débouchants ou de faible profondeur, dans certains cas difficiles ou lorsqu'il subsiste un doute.

La magnétoscopie peut être utilisée aussi pour détecter les fissures sur les bords oxycoupés.

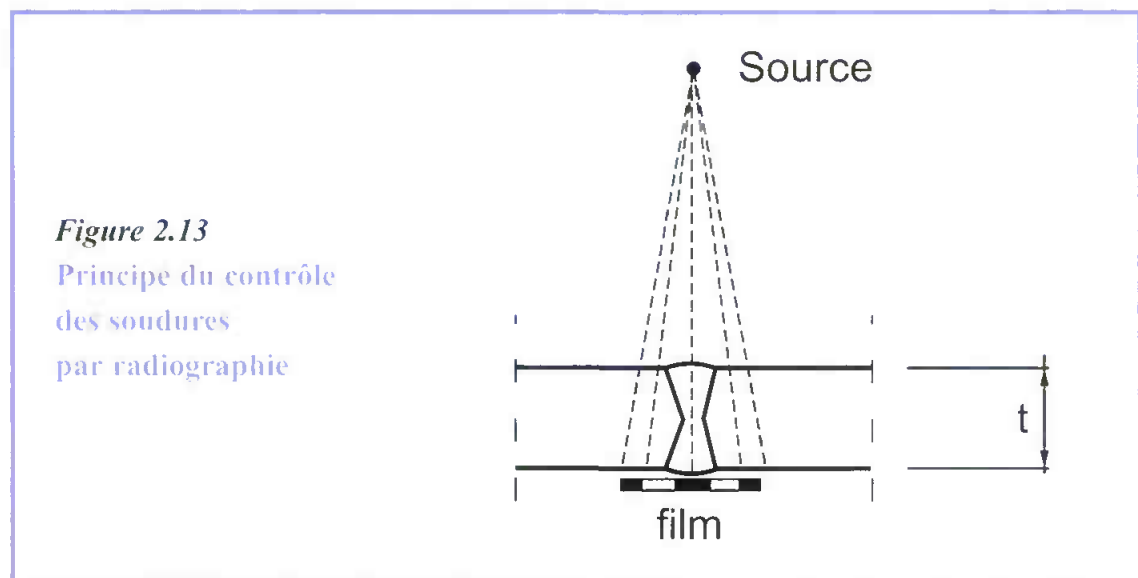
Le procédé, de mise en œuvre relativement simple et rapide, fournit le résultat immédiatement, mais l'interprétation peut être délicate, et il n'y a pas de possibilité d'enregistrement, à moins de prendre une photo.

2.8.5 - La radiographie

La radiographie permet de détecter les défauts internes ou superficiels des soudures lorsque les épaisseurs traversées sont faibles. Les modalités de mise en œuvre sont définies dans la norme :

NF EN 1435 : contrôle par radiographie des assemblages soudés

La source de rayonnement peut être un tube émetteur de rayons X, ou bien une petite quantité d'un isotope radioactif (iridium, cobalt) émettant en permanence des rayons gamma. Dans les deux cas, le rayonnement est de nature électromagnétique comme la lumière visible, mais de longueur d'onde plus courte.



Chaque source a ses avantages et ses inconvénients.

Les rayons X sont supérieurs en sensibilité ; leur rayonnement peut être interrompu, ce qui est favorable à la sécurité.

Les rayons gamma sont supérieurs en maniabilité et en possibilités d'utilisation quand l'accès est difficile : la tête émettrice est de dimensions réduites, n'est pas fragile, et ne nécessite pas d'alimentation électrique. Les rayons gamma sont également supérieurs en pouvoir pénétrant dans les tôles épaisses, du fait de leur plus petite longueur d'onde. Ils sont généralement plus économiques.

La source est placée d'un côté de la tôle, un film sensible est plaqué sur l'autre face (figure 2.13). Les deux faces doivent donc être accessibles : dans le cas de l'assemblage bout à bout de deux tronçons de semelle de poutre, cela nécessite de réserver une ouverture dans l'âme de la poutre pour placer le film. Les défauts sont détectés grâce à leur différence de densité par rapport à celle du métal environnant, qui se traduit par une différence d'absorption du rayonnement, donc par une tache claire ou sombre visible sur le film après développement.

Une qualité minimale des clichés est définie dans la norme NF P 22-471. Cette qualité est quantifiée en radiographiant un "indicateur de qualité d'image", plaque normalisée comportant des zones d'épaisseurs différentes, percées de trous de diamètre égal à l'épaisseur.

Le procédé est utilisable même si l'acier est peint ou recouvert d'un autre revêtement.

La radiographie, par rayons X ou par rayons gamma, permet de détecter les défauts aussi bien internes que proches de la surface. Elle convient davantage pour les défauts volumiques (cavités, inclusions solides...) que pour les défauts plans. La sensibilité est maximale pour un défaut orienté parallèlement au rayonnement, elle est nulle pour un défaut perpendiculaire (tel qu'une inclusion plane). Cependant, un grand nombre de défauts peuvent être détectés : leur identification est facilitée par les radiographies de référence établies par les organismes spécialisés.

Il peut être nécessaire d'associer la radiographie et l'examen visuel, pour savoir par exemple si un défaut est interne ou superficiel.

La radiographie n'est utilisable qu'avec les soudures à pleine pénétration, pour lesquelles elle permet de détecter, entre autres, les défauts de pénétration.

Avec les soudures à pénétration partielle, le signal provenant d'un défaut éventuel est noyé dans le signal provenant de la zone de non-pénétration.

Le domaine d'utilisation est essentiellement celui des assemblages bout à bout. Les meilleures conditions sont obtenues avec des épaisseurs traversées inférieures à 20 mm ; au-dessus de cette épaisseur, la finesse de détection diminue, mais le procédé est encore utilisable entre 20 et 40 mm en complément des ultrasons. Il ne s'agit que d'ordres de grandeur, la pénétration des rayons étant différente suivant leur nature.

La radiographie convient mal aux soudures à pleine pénétration des assemblages en T, en croix ou en L, car elle ne permet pas de détecter de façon sûre les défauts de pénétration lorsque le rayonnement ne peut pas être orienté parallèlement au défaut.

Ce procédé est le seul qui laisse un document pouvant être interprété en différé par d'autres personnes. Mais il est lourd, et plus coûteux que les ultrasons, surtout sur chantier. La mise en œuvre n'est pas complexe en elle-même, mais elle nécessite des mesures de sécurité vis-à-vis de

l'exposition aux radiations : pendant l'exposition, qui peut durer jusqu'à une quinzaine de minutes, aucun personnel ne doit se trouver dans une zone dont le rayon dépend de la puissance de la source (de l'ordre de 15 m en dehors de la direction du rayonnement). Il peut être nécessaire d'interdire le procédé sur chantier s'il y a des habitations ou une voie publique à faible distance.

2.8.6 - Les ultrasons

Les modalités de contrôle par ultrasons sont définies dans la norme :

NF EN 1714 : contrôle par ultrasons des assemblages soudés

Un rayon étroit d'énergie ultrasonore est émis par mise en résonance d'un cristal de quartz. Les ultrasons sont de même nature que les ondes acoustiques, mais de fréquence plus élevée, de l'ordre de 2 MHz. Ils se propagent à l'intérieur des éléments et sont réfléchis par les surfaces ainsi que par les défauts internes ; cet écho est détecté par un oscilloscope cathodique (figure 2.14).

L'appareil, comportant à la fois l'émetteur et le récepteur, est disposé sur une face de l'élément ; l'opérateur lui fait décrire des va-et-vient sur la surface pour déceler l'apparition d'un écho. La position des défauts peut être estimée d'après le temps séparant l'émission de la réception.

Les ultrasons permettent de détecter des défauts dans des matériaux d'épaisseur supérieure à 20 mm, l'épaisseur maximale étant pratiquement illimitée. Au-dessous de 20 mm, la difficulté d'interprétation augmente rapidement, et la méthode n'est plus fiable pour des épaisseurs inférieures à 15 mm, dans les conditions d'utilisation habituelles.

Les ultrasons conviennent davantage pour les défauts plans que pour les défauts volumiques.

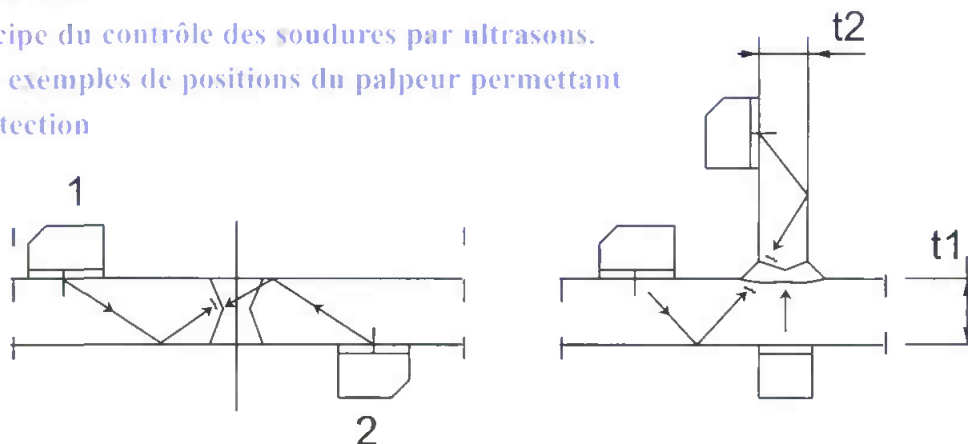
La sensibilité est maximale pour un défaut orienté perpendiculairement à la trajectoire du faisceau. Il est nécessaire en pratique d'avoir accès aux deux faces des éléments pour que la méthode soit fiable.

L'utilisation sur acier peint n'est généralement pas possible.

Figure 2.14

Principe du contrôle des soudures par ultrasons.

1, 2 : exemples de positions du palpeur permettant la détection



Les ultrasons sont utilisables :

- pour les soudures à pleine pénétration des assemblages en T, en croix ou en L ; ils constituent le principal procédé de contrôle non destructif de ces soudures ;
- pour les soudures à pleine pénétration des assemblages bout à bout : ils constituent le principal procédé de contrôle de ces soudures quand les épaisseurs de tôle sont supérieures à 40 mm ; ils peuvent être utilisés en complément de la radiographie quand les épaisseurs sont comprises entre 20 et 40 mm.

Pour les assemblages bout à bout, les possibilités des ultrasons sont donc complémentaires de celles de la radiographie, aussi bien en ce qui concerne l'orientation des défauts que l'épaisseur des tôles (voir le [tableau 2.2](#) ci-après).

Les ultrasons, comme la radiographie, sont difficilement utilisables pour les soudures à pénétration partielle à cause des difficultés d'interprétation des résultats.

Le procédé est également utilisé pour détecter les défauts internes de laminage des produits, tels que le feuilletage, ainsi que les arrachements lamellaires après soudage.

La sensibilité élevée (supérieure à celle de la radiographie) permet de révéler les défauts les plus fins. Mais les résultats peuvent être difficiles à interpréter : il est souvent difficile d'établir la distinction entre défauts "graves" et défauts "sans importance" pour les faibles épaisseurs (inférieures à 20 mm), et la taille des défauts n'est pas obtenue de façon très précise.

Le procédé, grâce à la relative simplicité de sa mise en œuvre, est souvent utilisé sur chantier. En contrepartie, le résultat repose entièrement sur la compétence de l'opérateur et sur les conditions d'étalonnage de l'appareil, et il n'y a pas de possibilité d'enregistrement.

2.8.7 - Le contrôle des goujons de connexion

Pour les goujons de connexion, des modalités de contrôle de l'assemblage soudé sont définies dans la norme expérimentale :

NP A 89-021-1 : soudage électrique à l'arc des éléments de fixation

partie 1 : goujons connecteurs de diamètre supérieur ou égal à 6 mm.

Ce contrôle fait appel à des méthodes simples :

- le contrôle visuel, portant sur l'aspect et la forme du bourrelet de soudure ;
- l'essai au marteau : la frappe sur la tête du goujon doit rendre un son clair et provoquer un rebond franc du marteau ;
- l'essai de pliage, à pratiquer en cas d'incertitude à la suite des contrôles précédents : après pliage, il ne doit apparaître ni fissure ni rupture dans la zone de raccordement.

2.9 - CONTRÔLE DES SOUDURES : DISPOSITIONS NORMATIVES

2.9.1 - Généralités

Les dispositions de cette section 2.9 concernent principalement les assemblages de classe 1 ou 2. Pour les assemblages de classe 3, il n'est pas exigé de contrôle autre que visuel.

C'est aux normes françaises d'origine nationale NF P 22-471 et NF P 22-473 que se réfère encore le CCTG, et non aux normes françaises d'origine européenne NF EN 25817 et NF EN 26520, car l'ensemble des normes d'exécution européennes n'est pas encore disponible.

Ces dispositions normatives s'appliquent aux contrôles que doit effectuer le constructeur. Le maître d'œuvre est évidemment seul juge de l'opportunité et de l'étendue de ses propres contrôles.

2.9.2 - Critères d'acceptation des défauts

Dans la norme NF P 22-471, les défauts sont présentés, non pas suivant le classement indiqué précédemment en 2.7, mais en fonction de la ou des techniques de contrôle dont les défauts sont justiciables. Trois listes sont données :

- défauts détectables par examen visuel, ressuage, ou magnétoscopie ;
- défauts détectables par radiographie ;
- défauts détectables par ultrasons.

Les critères d'acceptation sont plus ou moins sévères suivant la classe de qualité 1 ou 2 de l'assemblage.

Le respect des critères d'acceptation de la classe de qualité 2 suffit dans la plupart des cas pour valider le classement en fatigue des détails constructifs de l'eurocode 3.

2.9.3 - Domaines d'utilisation des procédés de contrôle non destructif

Les domaines d'utilisation de chaque procédé de contrôle sont fixés dans les norme NF P 22-471 et NF P 22-473. Ces dispositions sont résumées dans le [tableau 2.2](#) ci-après.

Types de soudures	Types d'assemblages	
	assemblages bout à bout	assemblages en T, en croix ou en L
soudures d'angle		ressuage ou magnétoscopie : 10 %
soudures en bout à pénétration partielle	assemblage non envisagé dans la norme	ressuage ou magnétoscopie : 10 %
soudures en bout à pleine pénétration	- ultrasons si $t > 20$ mm - radiographie si $t \leq 40$ mm pourcentage de contrôle : <i>voir tableau 2.3 ci-après</i>	ultrasons : 100 %

Tableau 2.2

**Domaines d'utilisation des procédés de contrôle non destructif
et étendue minimale du contrôle
(normes NF P 22-471 et NF P 22-473)**

2.9.4 - Étendue des contrôles

L'étendue minimale du "contrôle normal" est définie dans la norme NF P 22-473. Cette étendue est exprimée en pourcentage de la longueur de soudure ; elle est identique pour les classes 1 et 2, qui diffèrent donc essentiellement par la sévérité des critères d'acceptation. Les pourcentages de soudure à contrôler sont reproduits dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Pour les soudures à pleine pénétration des assemblages en T, en croix ou en L, les contrôles doivent toujours porter sur 100 % de la longueur.

Pour les soudures à pleine pénétration des assemblages bout à bout, la norme prévoit des pourcentages de contrôle variables (tableau 2.3) suivant différents paramètres :

- localisation des soudures : nœuds et croisements, ou bien soudures transversales et longitudinales pour la constitution des poutres en partie courante ;
- orientation des soudures par rapport aux efforts ;
- niveau des contraintes de traction, défini dans la norme par le rapport :
 $k = \text{rapport contrainte de calcul à l'état limite ultime} / \text{limite d'élasticité de l'acier de base}$;
- lieu de soudage (atelier ou chantier).

	soudage en atelier	soudage sur chantier
nœuds et croisements	100 %	100 %
soudures transversales tendues :		
$0,8 \leq k$	100 %	100 %
$0,3 < k < 0,8$	50 %	100 %
$k \leq 0,3$	10 %	20 %
soudures transversales comprimées	10 %	20 %
soudures longitudinales		

Tableau 2.3
Soudures à pleine pénétration des assemblages bout à bout :
étendue minimale du contrôle
(d'après le tableau 1 de la norme NF P 22-473)

Ces dispositions sont valables pour les assemblages soumis uniquement à des efforts statiques ; la note du paragraphe 6.1 de la norme renvoie aux documents particuliers du marché pour les sollicitations de fatigue. Une clause prenant en compte l'effet de la fatigue est proposée dans le guide "Fatigue" [2.1] (annexe 4, paragraphe 7). Elle conduit à augmenter la valeur de k en fonction de l'étendue de contrainte due au passage du convoi de fatigue.

2.9.5 - Réparations

Les conditions de réparation des défauts hors tolérances sont définies dans la norme NF P 22-471.

Les défauts géométriques et d'aspect sont corrigés par meulage ou rechargement, suivant les cas. Lorsqu'il y a rechargement, il doit être effectué sur une longueur minimale de 100 mm dans le cas des aciers S355 et au-dessus.

Les défauts internes sont éliminés, puis la soudure est réparée suivant un mode opératoire qualifié, et elle est à nouveau contrôlée.

Si l'entrepreneur estime que la réparation apportera un risque plus important que la non-élimination du défaut, il doit soumettre une proposition écrite de non-réparation à l'inspecteur du maître d'œuvre

Le fascicule 66 du CCTG, article III.5.5, prévoit par ailleurs des dispositions :

- dans le cas où un défaut nécessiterait plusieurs réparations successives ;
- dans le cas où plusieurs réparations seraient nécessaires dans un même assemblage.

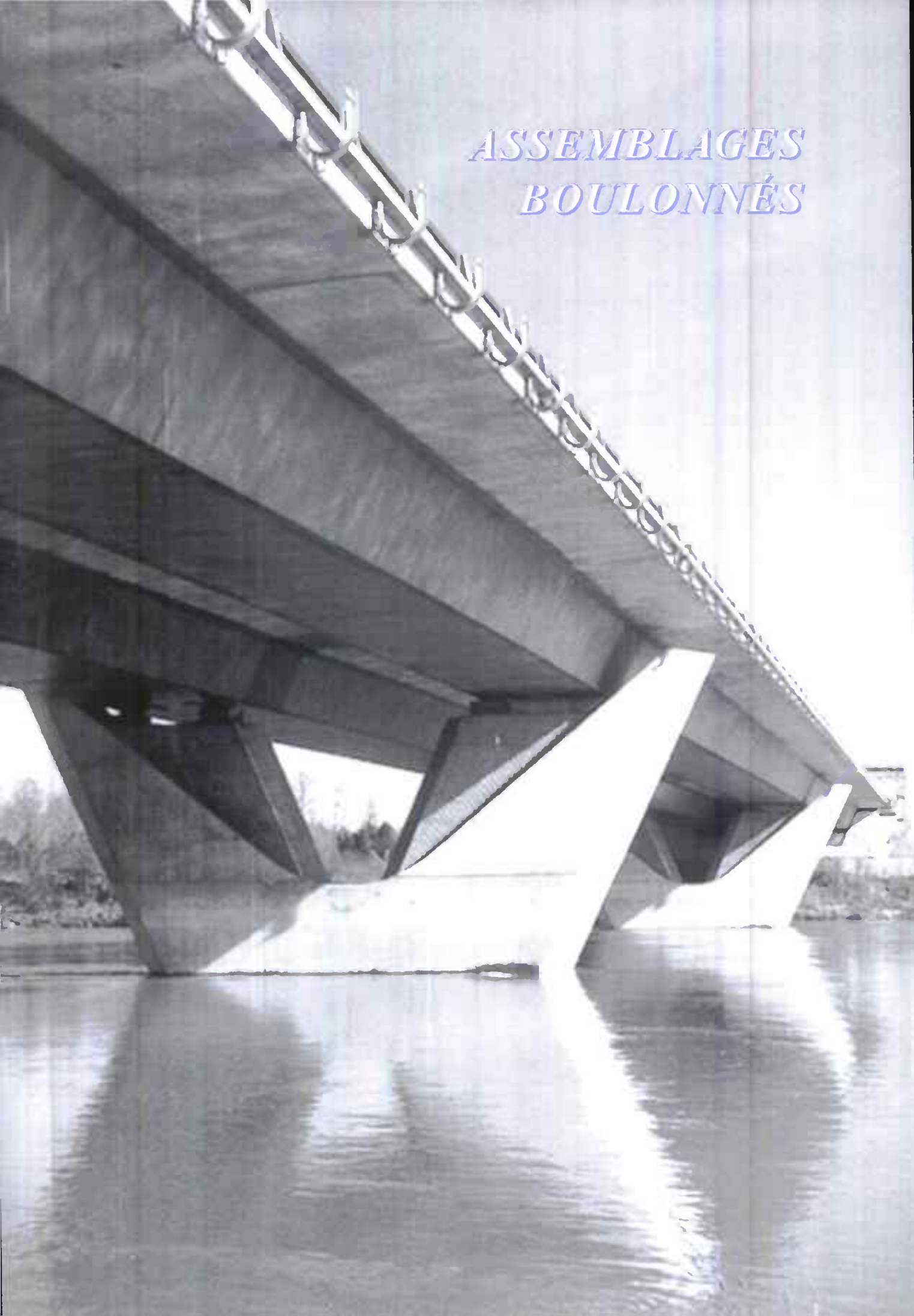
2.9.6 - Le cas des goujons de connexion

Les dispositions contractuelles sont à définir par référence à la norme expérimentale XP A 89-021-1, déjà citée. Deux classes sont prévues ; les ponts, ouvrages soumis à des sollicitations dynamiques, nécessitent la classe 1, la plus sévère.

Références du chapitre 2

- [2.1] - **Ponts métalliques et mixtes - Résistance à la fatigue - Guide de conception et de justifications** (SETRA - CTICM - SNCF, mai 1996)
- [2.2] - **Soudage et techniques connexes** (bulletin paraissant tous les deux mois, publications du soudage et de ses applications, 93420 Villepinte)
- [2.3] - **Exécution des assemblages soudés en construction métallique** (Pascal Macquet, CTICM, mars 2000)

*ASSEMBLAGES
BOULONNÉS*



SOMMAIRE

3 - ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3.1	Généralités	85
3.2	Catégories d'assemblages boulonnés	85
3.2.1	Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de sollicitation	85
3.2.2	Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de fonctionnement : assemblages non précontraints, assemblages précontraints	88
3.2.3	Récapitulation des différentes catégories d'assemblages boulonnés	90
3.3	Assemblages boulonnés à utiliser pour les ponts	91
3.3.1	Assemblages non précontraints	91
3.3.2	Assemblages précontraints sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons	91
3.3.3	Assemblages précontraints sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons	92
3.4	Produits pour assemblages boulonnés	92
3.4.1	Boulons ordinaires	92
3.4.2	Boulons à haute résistance	93
3.4.3	Indications normalisées et marquage NF des boulons	95
3.4.4	Production étrangère	96
3.5	Calcul des assemblages boulonnés	96
3.5.1	Calcul des assemblages non précontraints	96
3.5.2	Calcul des assemblages précontraints	96
3.6	Exécution des assemblages boulonnés	98
3.6.1	Exécution des assemblages non précontraints	98
3.6.2	Exécution des assemblages précontraints	98
3.7	Contrôle du serrage des boulons après exécution des assemblages précontraints	100
3.7.1	Généralités	100
3.7.2	Contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou	101
3.7.3	Contrôle par surserrage de l'écrou	101

Page laissée blanche intentionnellement

ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3



3.1 - GÉNÉRALITÉS

Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts-rails rivés. Leur utilisation s'est étendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 60. Sur certains ouvrages, tous les assemblages étaient des assemblages boulonnés ; sur d'autres, les assemblages en atelier étaient soudés, ceux sur chantier boulonnés. Quand le soudage s'est généralisé en atelier et sur chantier, l'usage des boulons a été restreint aux assemblages difficiles, par exemple ceux des ponts à poutres triangulées. Puis, ces ponts eux-mêmes ont pu être entièrement soudés, ce qui a diminué encore le champ d'utilisation des boulons.

Dans le cas de grands ouvrages, le boulonnage convient mal à l'assemblage des pièces épaisses et fortement sollicitées : il nécessite un nombre élevé de boulons, et n'assure qu'un placage imparfait. Les assemblages boulonnés, quand ils sont utilisés, servent donc surtout à assembler sur chantier les entretoises ou les pièces de pont aux poutres principales. Le boulonnage est aussi utilisé pour assembler aux tabliers des éléments secondaires (rails de passerelles de visite) et des éléments provisoires (avant-becs de lancement, entretoisements de montage).

Pour certains petits ouvrages, le boulonnage peut permettre d'éviter tout assemblage soudé.

Dans ce qui suit, on désigne par boulon l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une vis à tête hexagonale, d'un écrou hexagonal et de rondelles.

3.2 - CATÉGORIES D'ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3.2.1 - Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de sollicitation

Assemblages sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages de continuité des poutres. Les efforts sollicitant les éléments assemblés peuvent être principalement des efforts normaux (assemblage des membrures), ou des efforts de cisaillement (assemblages des âmes). La continuité des pièces est assurée par des couvre-joints (figure 3.1).

Assemblages sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons

C'est le cas des assemblages poutre-poteau de bâtiment avec platine d'about. Généralement, il s'exerce à la fois un moment fléchissant et un effort tranchant, et on a une combinaison d'efforts parallèles et d'efforts perpendiculaires à l'axe des boulons (figure 3.2).

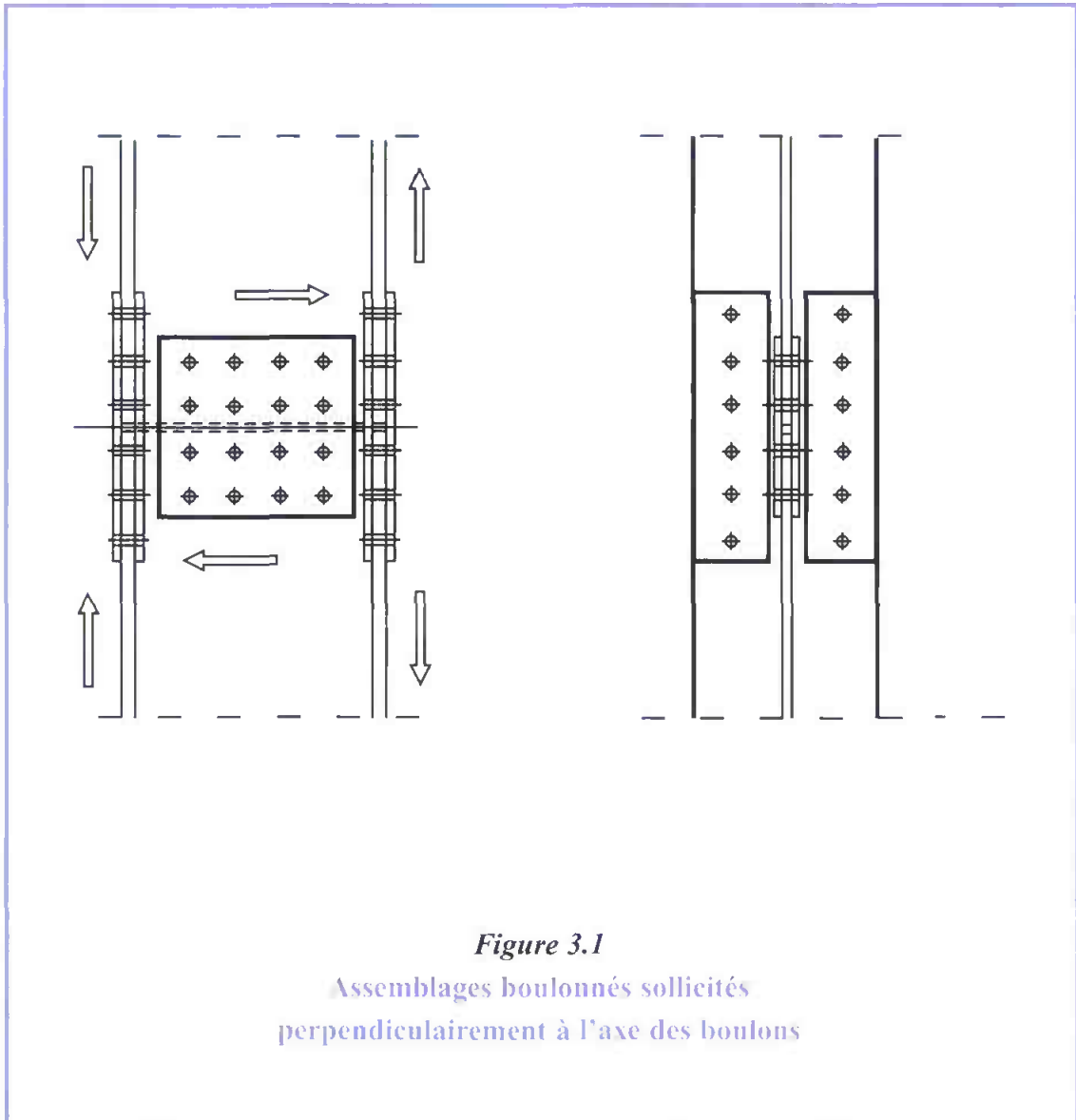
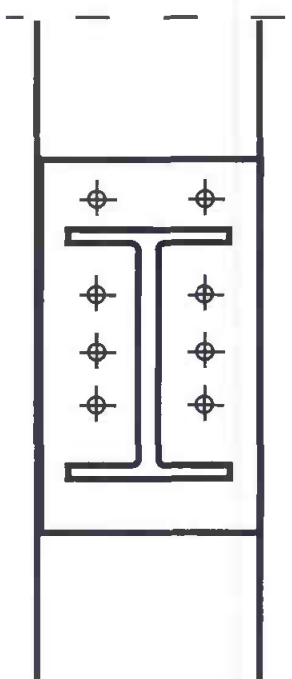
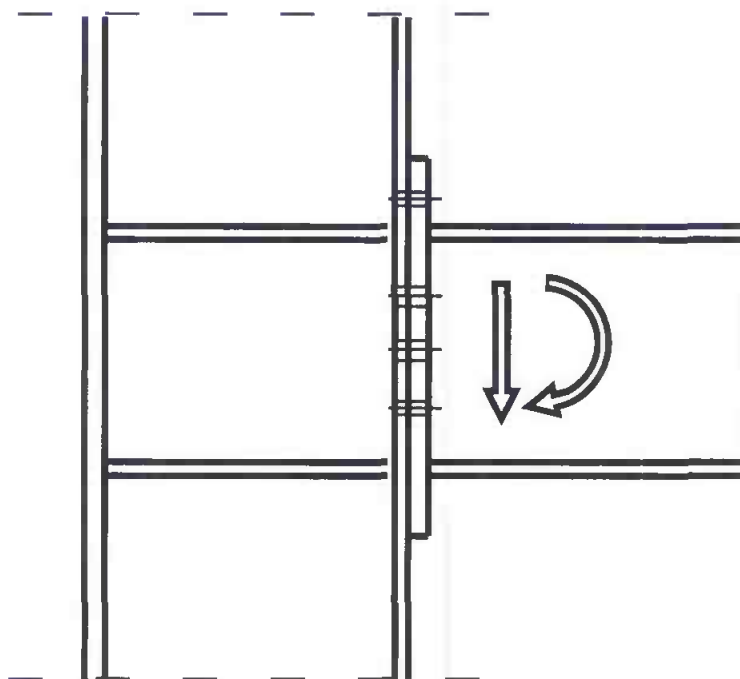


Figure 3.2

Assemblage boulonné sollicité parallèlement à l'axe des boulons
(déconseillé pour les poutres)



3.2.2 - Catégories d'assemblages boulonnés suivant le mode de fonctionnement : assemblages non précontraints, assemblages précontraints

Assemblages non précontraints

Les boulons de ces assemblages sont mis en œuvre avec un serrage peu important, et non spécifié de façon précise.

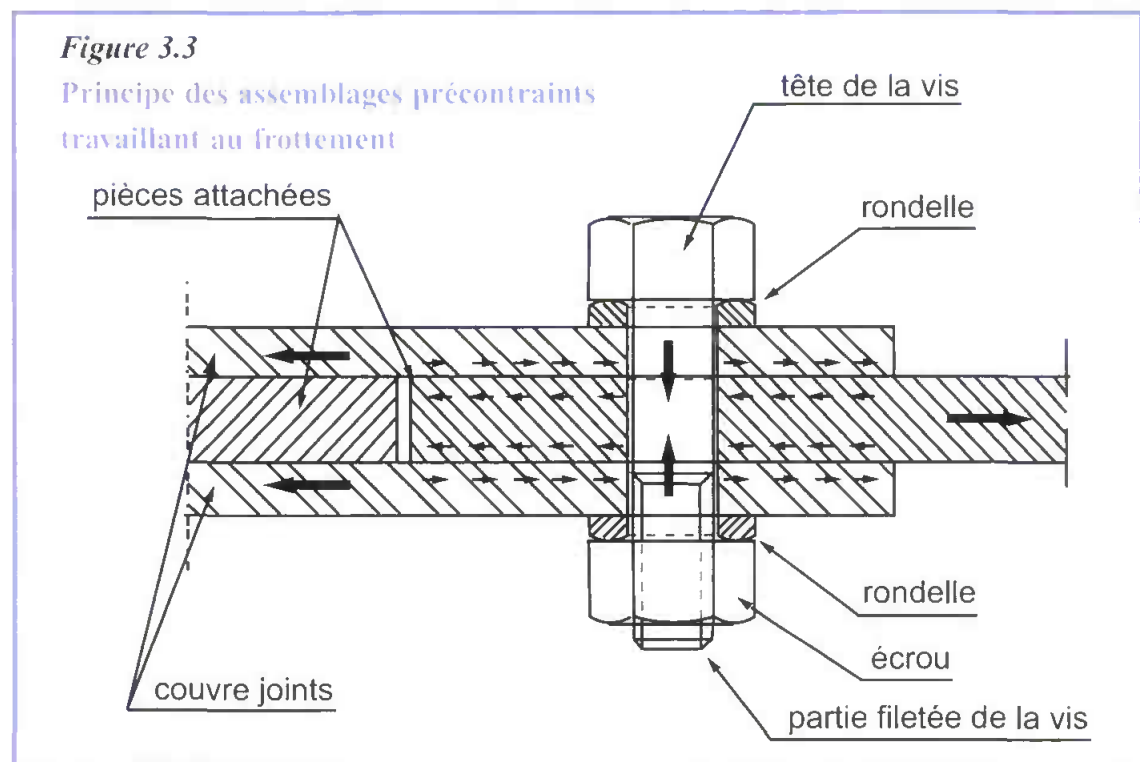
Sous des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons, les pièces assemblées glissent l'une par rapport à l'autre pour rattraper le jeu entre le trou et la vis ; les efforts appliqués sont alors transmis par la pression diamétrale que les vis exercent sur les pièces assemblées, et par le cisaillement de ces vis (tableau 3.1, catégorie A).

Sous des efforts parallèles à l'axe des boulons, les efforts de traction appliqués soient transmis directement par traction des vis (tableau 3.1, catégorie D).

Assemblages précontraints

Les boulons de ces assemblages sont mis en œuvre avec un serrage contrôlé, de façon à ce qu'une pression importante et définie agisse sur les surfaces en contact des pièces.

Dans le cas d'efforts appliqués perpendiculairement à l'axe des boulons, ces efforts sont transmis d'une pièce à l'autre par le frottement que la force de précontrainte permet de développer entre les surfaces en contact, sans qu'il y ait glissement des pièces ni cisaillement des vis (figure 3.3). Ainsi, ces assemblages fonctionnent sans déformation importante, et résistent aux variations répétées de sollicitations.

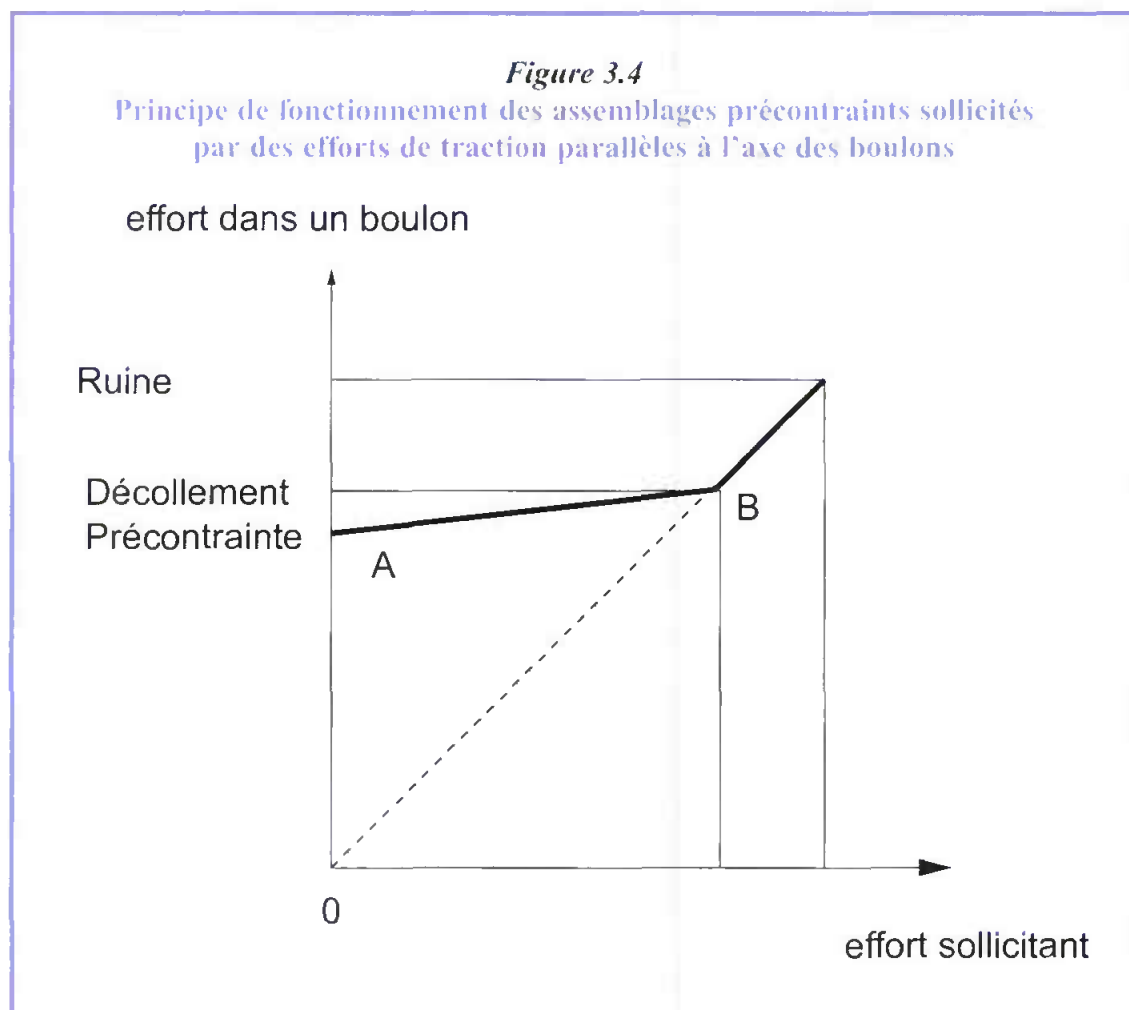


L'eurocode 3 subdivise ce type d'assemblage en deux catégories, B et C (tableau 3.1). L'assemblage de catégorie B a un mode de fonctionnement intermédiaire : le glissement des pièces est exclu jusqu'à l'état-limite de service, mais il est admis au-delà ; ainsi, à l'état-limite ultime, le mode de fonctionnement est proche de celui d'un assemblage non précontraint. Au contraire, l'assemblage de catégorie C fonctionne sans aucun glissement des pièces jusqu'à l'état-limite ultime (qui ne correspond donc plus, dans ce cas, à un critère de ruine effective de l'assemblage), et les boulons ne sont jamais sollicités par les charges.

L'assemblage de catégorie B n'est pas pratiqué en France : les assemblages précontraints sont toujours de catégorie C.

Dans le cas d'efforts appliqués parallèlement à l'axe des boulons, la force de précontrainte est déterminée pour qu'il n'y ait pas décollement des pièces assemblées sous les efforts de traction maximaux appliqués. Ainsi, les efforts extérieurs appliqués sont équilibrés essentiellement par la décompression des pièces, et très peu par une surtension des boulons. Ce mode de fonctionnement correspond au segment de droite AB, de pente très faible, de la figure 3.4. Au-delà du point B, il y a décollement des pièces et tout accroissement de l'effort de traction appliqué s'ajoute intégralement à la tension de précontrainte du boulon, ce qui entraîne rapidement sa ruine.

D'après ce modèle, les boulons tendus travaillant dans le domaine AB pourraient résister sans dommage à des sollicitations de fatigue.



En réalité, le comportement de ces assemblages est difficile à garantir. Il est influencé en particulier par les défauts de contact des platines, et par les déformations des platines en flexion sous l'action des charges. Ces facteurs peuvent amener de la fatigue, des pertes de précontrainte et de la corrosion. Des conditions idéales, platines d'about parfaitement planes et suffisamment épaisses par rapport aux dimensions des pièces assemblées, permettent d'éviter ces inconvénients, mais sont difficilement réalisables dans le cas des ponts.

3.2.3 -Récapitulation des différentes catégories d'assemblages boulonnés

En combinant les critères de classement qu'on vient de voir, il apparaît (tableau 3.1) cinq catégories d'assemblages boulonnés, que l'eurocode 3 désigne par une lettre de A à E. Ces cinq catégories couvrent les différents cas qu'on peut trouver dans les divers domaines de la construction métallique.

Tableau 3.1

Catégories d'assemblages boulonnés

(seule, la catégorie C est admise pour les éléments structuraux des ponts)

	assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons	assemblages sollicités parallèlement à l'axe des boulons
assemblages non précontraints	A vis sollicitées au cisaillement par les efforts appliqués	D vis sollicitées en traction par les efforts appliqués
assemblages précontraints	B pas de glissement des pièces avant l'état-limite de service : au-delà, fonctionnement comme en catégorie A	E vis sollicitées en traction par la force de précontrainte
	C pas de glissement des pièces avant l'état-limite ultime : vis sollicitées en traction par la force de précontrainte	

3.3 - ASSEMBLAGES BOULONNÉS À UTILISER POUR LES PONTS

3.3.1 - Assemblages non précontraints

Les assemblages non précontraints (catégories A et D du tableau 3.1) sont fréquemment utilisés en bâtiment. Mais ils ne conviennent pas pour les ponts :

- les charges variables et les vibrations provoquent le glissements des pièces, entraînant des déformations de profil en long, des redistributions indésirables des efforts, et le desserrage des boulons ;
- ces assemblages ne résistent pas à la fatigue ; c'est particulièrement le cas des assemblages non précontraints avec platine d'about (catégorie D du tableau 3.1), dans lesquels les vis sont sollicitées en traction directement par les efforts appliqués ;
- ils sont sensibles à la corrosion, car ils laissent pénétrer l'humidité et les autres agents de corrosion.

Le fascicule 66 du CCTG (article II.4) n'admet les assemblages non précontraints que pour les utilisations suivantes :

- pour assembler entre elles des parties d'éléments accessoires (mais pas pour les fixer à la structure des ouvrages) ;
- pour assembler des éléments provisoires, y compris pour les fixer provisoirement à la structure.

Les éléments accessoires sont des éléments n'ayant aucun rôle dans la résistance ou la stabilité de la structure. Il s'agit par exemple des dispositifs de visite fixes ou mobiles, des échelles d'accès, des supports de canalisation. L'interdiction d'assemblages non précontraints entre ces éléments et la structure est liée au risque de corrosion.

Les éléments provisoires sont des éléments participant généralement à la résistance ou à la stabilité de la structure durant la construction, mais qui sont démontés avant la mise en service de l'ouvrage. Ce sont par exemple les contreventements et les entretoisements de montage, les avant-becs de lancement, les oreilles de fixation des câbles de montage... Comme ces éléments ne demeurent pas sur la structure en service, l'absence de précontrainte des assemblages est sans grand inconvénient, et elle facilite le démontage.

3.3.2 - Assemblages précontraints sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons

C'est la seule catégorie d'assemblages boulonnés admise dans les cas autres que ceux mentionnés précédemment. Ils sont donc à utiliser pour les assemblages définitifs :

- des éléments de structure entre eux ;
- des éléments accessoires à la structure.

Comme indiqué précédemment, seule la catégorie C du tableau 3.1 (non-glisement à l'état-limite ultime) est admise en France.

3.3.3 - Assemblages précontraints sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons

Les assemblages précontraints avec platine d'about (catégorie E du tableau 3.1) ont parfois été utilisés pour les ponts, par exemple pour assembler des entretoises à des montants de poutres principales. En France, la réglementation actuelle déconseille cette utilisation, en raison des risques de désordre évoqués précédemment.

Ces assemblages sont cependant traités dans le fascicule 61, titre V, du CCTG. Cela provient de ce que le titre V était applicable, avant 1977, aussi bien au bâtiment qu'au génie civil. Lorsque ce texte a été retiré de la liste des fascicules applicables au bâtiment, les dispositions qu'il contenait sur les assemblages boulonnés ont été conservées sans modification ; mais la circulaire ministérielle du 18 février 1978, qui figure en tête de la version actuelle du titre V du fascicule 61, a inclus une mise en garde contre l'utilisation de ces assemblages dans les ponts.

3.4 - PRODUITS POUR ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3.4.1 - Boulons ordinaires

Les boulons ordinaires (appelés parfois boulons d'usage général, ou encore boulons normaux) sont les boulons aptes à être utilisés seulement pour les assemblages non précontraints.

Leurs caractéristiques mécaniques sont définies dans la norme :

NF EN 20898 : caractéristiques mécaniques des éléments de fixation

partie 1 : boulons, vis et goujons.

partie 2 : écrous avec charges d'épreuve spécifiées.

Cette norme s'applique pour des diamètres de vis jusqu'à 39 mm. Elle définit des classes de qualité, qui sont symbolisées par deux nombres :

- le premier représente 1/100 de la résistance nominale à la traction R_m en N/mm^2 ;
- le second représente $10 R_p/R_m$ (R_p étant la limite d'élasticité nominale).

Les valeurs effectives sont égales ou supérieures à ces valeurs nominales.

La norme spécifie une résilience minimale des vis pour certaines classes de qualité, mais pour une température d'essai de +20 C° seulement.

Le fascicule 66 du CCTG (article II.4) restreint le choix de la classe à la classe 8.8 au minimum dans le cas d'utilisation pour des éléments provisoires de structure, ce qui laisse le choix, dans ce cas, entre des boulons 8.8 et 10.9 (tableau 3.2).

Les caractéristiques géométriques des produits sont définies dans des normes spécifiques.

classe	R_m (N/mm ²)	R_p (N / mm ²)
8.8	800	640
10.9	1 000	900

Tableau 3.2

Boulons ordinaires et boulons à haute résistance :
résistance à la traction R_m et limite d'élasticité R_p
(valeurs nominales)

3.4.2 - Boulons à haute résistance

Les boulons à haute résistance (appellation de l'eurocode 3), ou boulons à serrage contrôlé (appellation des normes françaises actuelles), sont les boulons aptes à être utilisés pour les assemblages précontraints. Ils sont conçus pour être serrés avec une force de précontrainte élevée (voir 3.5.2 ci-après). Ils ne doivent pas périr par arrachement du filetage, ce qui donnerait une perte brutale de résistance en traction, mais par allongement plastique du corps de la vis.

Bien entendu, il est possible d'utiliser des boulons à haute résistance à la place de boulons ordinaires dans des assemblages non précontraints. Cela peut être utile pour fixer au tablier un élément provisoire important, tel qu'un avant-bec de lancement ou un contreventement provisoire, qui sera démonté en fin de construction.

Les boulons à haute résistance utilisés en France sont définis dans des normes qui sont encore d'origine purement nationale lors de la rédaction du présent document. En effet, l'approche française, basée sur des produits de haute qualité, n'est pas adoptée partout, et l'harmonisation européenne des produits pour assemblages boulonnés précontraints reste à établir.

Ces normes françaises sont les suivantes (elles sont applicables pour des vis de diamètre jusqu'à 30 mm) :

NF E 27-701 : spécifications techniques - conditions de commande, de contrôle et de livraison

NF E 27-702 : essai d'aptitude à l'emploi des boulons

NF E 27-711 : boulons à tête hexagonale - dimensions et tolérances

Chacune de ces normes traite l'ensemble du boulon, c'est à dire la vis, l'écrou et la rondelle, et non chaque élément séparément comme c'est le cas pour les normes sur les boulons ordinaires.

La norme NF E 27-701 retient les deux classes de qualité 8.8 et 10.9 (tableau 3.2).

La classe 10.9 est seule admise par le fascicule 66 du CCTG (article II.4.2), afin de minimiser le nombre de boulons par assemblage.

La norme précitée prévoit un contrôle des produits par des essais portant, suivant les caractéristiques contrôlées, sur les vis, les écrous, les rondelles, ou sur les ensembles complets. Ces essais sont spécifiques, c'est à dire qu'ils doivent être effectués sur des spécimens prélevés dans le lot homogène de fabrication dont font partie les boulons livrés.

Parmi ces essais figure un essai de résilience sur éprouvette prélevée sur les vis. À la température d'essai de -20°C, on doit obtenir une valeur d'au moins 35 J/cm².

Un autre essai, dit d'aptitude à l'emploi, est destiné à préciser le comportement mécanique de l'ensemble vis-écrou-rondelles au cours du serrage. Cet essai, dont les modalités sont définies dans la norme NF E 27-702, consiste à déterminer :

- la courbe traction-allongement du boulon complet, afin de vérifier qu'il peut supporter la charge de précontrainte prévue sans dépasser sa limite d'élasticité ;
- la courbe traction-couple de serrage, qui donne la valeur du coefficient de rendement du couple de serrage ; ce coefficient est utilisé pour régler la force de serrage de l'outil de pose (voir 3.6.2 ci-après).

La liste des essais à effectuer par le producteur est fixée dans le règlement de la certification NF [6.6]. Dans le cadre de l'application du CCTG, seuls des boulons certifiés "NF - Boulons à serrage contrôlé" (ou couverts par une certification reconnue équivalente) peuvent être utilisés pour les assemblages précontraints (fascicule 4, titre IV, du CCTG).

Les boulons sont disponibles en deux états de livraison : sans revêtement (boulons dits "noirs"), et galvanisé à chaud. Dans ce dernier cas, le décapage avant galvanisation est effectué maintenant par voie mécanique (grenailage) ; la voie chimique, avec décapage dans un bain acide, est interdite dans le règlement de la certification NF parce qu'elle entraînait un risque de fragilisation par l'hydrogène.

Les produits sont fournis lubrifiés.

Les vis, écrous et rondelles sont livrés dans des boîtes assurant la protection contre la poussière, l'humidité et les chocs. Les trois composants sont livrés ensemble dans une même boîte.

L'étiquetage de la boîte doit indiquer les caractéristiques des produits, parmi lesquelles le coefficient de rendement du couple de serrage (voir 3.6.2 ci-après).

Le numéro du lot de fabrication doit aussi être indiqué sur l'étiquetage. Ce lot doit être homogène, c'est à dire qu'il doit être composé de vis d'un même lot de fabrication, d'écrous d'un même lot de fabrication, et de rondelles d'un même lot de fabrication. Le changement de lot d'un des composants doit entraîner un nouveau numéro de lot de boulons. À partir du numéro de lot, le fabricant de boulons doit être en mesure d'assurer la traçabilité des composants, c'est à dire de retrouver leurs caractéristiques et les résultats des contrôles.

Sur certaines fabrications de boulons à haute résistance, le numéro du lot de boulons est maintenant inscrit de façon indélébile sur la tête des vis, grâce à des procédés tels que la micropercussion, le laser, etc. La lecture est possible soit directement, soit par un procédé de révélation spécifique.

Il est souhaitable que cette disposition se généralise, car elle favorise la traçabilité des produits ; à défaut, l'entrepreneur doit reporter les numéros de lot des boulons sur les plans d'exécution destinés au dossier d'ouvrage. Cette disposition facilite également la définition de l'échantillonnage soumis aux contrôles de serrage (voir 3.7.1 ci-après).

3.4.3 - Indications normalisées et marquage NF des boulons

Les boulons ordinaires doivent porter les indications suivantes :

- sur la tête des vis : la classe de qualité de la vis et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les écrous : la classe de qualité de l'écrou (définie par le premier nombre seulement) ;

Sur les rondelles, aucune indication n'est exigée.

En outre, pour les produits certifiés NF, les lettres "NF" doivent figurer sur les vis et les écrous.

Pour les boulons à haute résistance, les indications doivent être les suivantes :

- sur la tête des vis : les lettres "HR", la classe de qualité de la vis et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les écrous : les lettres "HR", la classe de qualité de l'écrou (définie par le premier nombre seulement) et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les rondelles : les lettres "HR" et le symbole d'identification du fabricant.

Ces dispositions sont celles de la norme NF E 27-701.

En outre, pour les boulons certifiés NF, les lettres "NF" doivent figurer sur les vis, les écrous et les rondelles.

Il résulte de ce qui précède que, dans le cas des ponts, et dans le cadre de l'application du CCTG, les produits doivent porter les indications suivantes :

- sur la tête des vis : "HR 10.9 NF" et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les écrous : "HR 10 NF" et le symbole d'identification du fabricant ;
- sur les rondelles : "HR NF" et le symbole d'identification du fabricant.

3.4.4 - Production étrangère

Comme pour les autres produits dont on exige la certification, la clause d'équivalence de la certification s'applique.

On notera à ce sujet qu'on peut trouver en France des boulons portant l'indication "HV" (initiales de "haute résistance" en allemand). Ces boulons sont parfois utilisés dans le cadre de marchés privés de bâtiment. D'un coût plus bas que les boulons "HR", ils correspondent à des spécifications nettement moins sévères que celles des normes françaises. Ils ne supportent pas la même précontrainte ; en outre, leur mode de rupture est souvent par arrachement du filetage et non, comme il est souhaitable, par rupture ductile du corps de la vis.

Ces boulons ne peuvent évidemment pas être revêtus de la marque NF, et ils ne doivent en aucun cas être utilisés pour les assemblages précontraints des ponts. En les écartant, on n'enfreint pas les règles de reconnaissance mutuelle des certifications dans l'espace économique européen, puisque ces produits ne sont pas équivalents à ceux définis par les normes françaises.

3.5 - CALCUL DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3.5.1 - Calcul des assemblages non précontraints

Le calcul des assemblages non précontraints est traité dans la norme :

NF P 22-430 : assemblages par boulons non précontraints - dispositions constructives et calculs des boulons

Pour les assemblages sollicités par des efforts perpendiculaires à l'axe des boulons, les vérifications portent sur la résistance au cisaillement des vis et sur la résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées.

Pour les assemblages sollicités par des efforts parallèles à l'axe des boulons, les vérifications portent sur la résistance des vis à la traction.

3.5.2 - Calcul des assemblages précontraints

Le calcul des assemblages précontraints est traité dans la norme :

NF P 22-460 : assemblages par boulons à serrage contrôlé - dispositions constructives et vérification des assemblages

La vérification de base des assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons porte sur l'absence de glissement des pièces à l'état-limite ultime. On doit vérifier aussi, à titre de sécurité complémentaire, la résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées.

La norme base les calculs sur la limite d'élasticité nominale R_p (alors que l'eurocode 3 se réfère à la résistance à la traction). La résistance de calcul au glissement, par boulon et par plan de glissement, est prise égale à φP_v , avec :

$$P_v = 0,80 A_s \cdot R_p$$

φ : coefficient de frottement des surfaces en contact

A_s : aire de la section résistante de la vis

R_p : limite d'élasticité nominale de l'acier de la vis, égale à 900 N/mm² pour la classe 10.9.

La même règle figure dans l'article 29 du fascicule 61, titre V, du CCTG.

Le choix du coefficient de frottement φ dépend de l'état des surfaces en contact. Il existe plusieurs types d'états de surface, que nous classerons en deux grands groupes :

a - Surfaces décapées par projection d'abrasif, et conservées indemnes de corrosion jusqu'au boulonnage.

Le décapage peut être effectué juste avant le boulonnage ; ou bien il peut être effectué à l'avance en atelier, les surfaces étant ensuite protégées de la corrosion jusqu'au boulonnage. Cette protection provisoire, qui doit être complètement éliminée avant le boulonnage, peut être par exemple une pellicule de plastique auto-adhésive, un vernis "pelable", ou une couche légère de peinture qu'on décape au dernier moment. S'il s'est formé un début d'oxydation ("fleur de rouille"), elle doit être éliminée par brossage à la brosse métallique.

Dans ce cas, on peut adopter dans les calculs le coefficient de frottement standard $\varphi = 0,45$ indiqué dans le fascicule 61, titre V, du CCTG, sans qu'il soit indispensable de procéder à des mesures du coefficient de frottement.

b - Autres états de surfaces :

Il peut s'agir de surfaces peintes ou métallisées, ou au contraire de surfaces non protégées et corrodées, avec présence éventuelle de calamine.

Le coefficient de frottement est alors difficile à prévoir, et un simple brossage ne permet pas d'obtenir un état de surface défini. Il est préférable de mesurer le coefficient de frottement par des essais sur éprouvette. La méthode de détermination est définie dans la norme NF P 22-461.

EXÉCUTION DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

3.6.1 - Exécution des assemblages non précontraints

La mise en œuvre de ces assemblages est traitée dans les normes :

NF P 22-430 : dispositions constructives et calculs des boulons

NF P 22-431 : exécution des assemblages

Ces normes ne contiennent aucune exigence particulière sur le serrage des boulons. Il est sous-entendu que le serrage est celui pouvant être réalisé avec une clé ordinaire, sans rallonge, ou avec une clé à choc après le premier choc.

Il n'est rien imposé sur le coefficient de frottement des surfaces. Il n'est pas exigé de rondelle, sauf dans des conditions d'emploi particulières précisées dans les normes.

Pour l'exécution, deux classes de qualité sont prévues, qui diffèrent par le mode de perçage des trous et par les tolérances géométriques. Le fascicule 66 du CCTG (article III.4.1) prescrit la classe la plus sévère.

3.6.2 - Exécution des assemblages précontraints

Les normes concernant la mise en œuvre de ces assemblages sont :

NF P 22-460 : dispositions constructives et vérification des assemblages

NF P 22-461 : détermination du coefficient conventionnel de frottement

NF P 22-462 : usinage et préparation des assemblages

NF P 22-463 : exécution des assemblages

NF P 22-464 : programme de pose des boulons

NF P 22-466 : méthodes de serrage et de contrôle des boulons

NF P 22-468 : serrage par rotation contrôlée de l'écrou - détermination de l'angle de rotation

La norme NF P 22-462 définit deux classes ; le fascicule 66 du CCTG (article III.4.2) prescrit la classe la plus sévère.

Les normes NF P 22-463 et NF P 22-466 définissent également deux classes ; sauf prescription contraire du marché, c'est la classe la moins sévère qui s'applique, comme prévu à l'article premier de ces normes.

Les boulons doivent être montés avec deux rondelles, l'une sous l'écrou, l'autre sous la tête de la vis.

La préparation des surfaces de frottement doit permettre d'atteindre le coefficient ϕ qui a été pris en compte dans les calculs (voir 3.5.2 ci-avant).

Le serrage des boulons est effectué en tournant l'écrou (exceptionnellement la tête) et en maintenant la partie opposée.

Il est évidemment essentiel que le serrage définitif ait une valeur correcte. Un serrage trop faible peut entraîner une insuffisance de la résistance au glissement de l'assemblage. Un serrage trop fort risque d'endommager la vis ou son filetage, et d'entraîner une chute de la précontrainte du boulon (c'est un principe, en France, d'éviter toute plastification du boulon au serrage). Deux méthodes sont retenues dans la norme NF P 22-466 :

- méthode du couple de serrage (couple prédéfini) ;
- méthode du "tour d'écrou" (rotation prédéfinie).

La méthode pratiquée pour les ponts est celle du couple de serrage. Elle est effectuée avec une clé dynamométrique étalonnée, réglée pour une valeur de couple donnée par (norme NF P 22-466) :

$$C = k \cdot d (k_0 \cdot A_s \cdot R_p)$$

- C : couple de serrage appliqué
- k : coefficient de rendement du couple
- d : diamètre nominal de la vis
- k_0 : coefficient minorateur fixé à 0,88
- A_s : aire de la section résistante de la vis
- R_p : limite d'élasticité nominale de l'acier de la vis, égale à 900 N/mm² pour la classe 10.9.

La valeur de k, coefficient de rendement du couple, dépend du coefficient de frottement des surfaces en contact. Dans le cas des ponts, il est exclu d'adopter une valeur conventionnelle de k, relevée par exemple dans la littérature technique, en raison de l'incertitude sur le serrage qui en résulterait. C'est pourquoi la valeur de k est déterminée par le fabricant de boulons au cours de l'essai d'aptitude à l'emploi prévu dans le cadre de la certification NF ; cette valeur doit figurer sur l'étiquetage des produits.

La valeur de k est déterminée normalement pour le cas où les boulons sont serrés par rotation de l'écrou. Elle n'est pas valable pour le serrage par rotation de la tête de la vis : le frottement plus élevé conduirait à un important sous-serrage. Lorsque le constructeur est amené à serrer par la tête parce que l'écrou est inaccessible, il doit demander la valeur correspondante de k à son fournisseur.

De faibles valeurs de k facilitent la mise en œuvre : l'effort de serrage est réduit. Les techniques de fabrication et de lubrification actuelles permettent de descendre à 0,10, voire à des valeurs inférieures. Mais des valeurs trop basses aggravent la dispersion du couple de serrage appliqué. Aussi est-il recommandé de respecter la condition $k \geq 0,12$, aussi bien pour les boulons noirs que pour ceux galvanisés. Cette disposition sera introduite dans la prochaine édition du règlement de la certification NF.

Le produit $0,88 A_s R_p$ figurant dans la formule du couple de serrage exprime la valeur initiale de la force de précontrainte de la vis. On a vu précédemment que le calcul de la résistance au glissement est basé sur une force de précontrainte $0,80 A_s R_p$: la réduction, dans le rapport $1/1,10$, a pour objet de prendre en compte la relaxation de la vis (et le fluage de la peinture quand les surfaces de frottement sont peintes).

Un préserrage des boulons est utile pour assurer un placage des pièces avant le serrage définitif. Actuellement, en France, ce préserrage n'est obligatoire que lorsqu'on utilise la méthode de serrage par contrôle de la rotation, ou lorsque le programme de pose le prévoit ; la valeur préconisée pour la force de précontrainte de ce préserrage est de 40 % de la valeur définitive (norme NF P 22-466).

En fait, il est recommandé de pratiquer le préserrage dans tous les cas, et de porter sa valeur à 60 % de la valeur définitive.

Les assemblages boulonnés doivent être protégés contre la corrosion par des mesures visant à empêcher l'humidité de pénétrer jusqu'aux surfaces en contact et aux trous des boulons. Cette protection, par exemple un mastic étanche, doit être appliquée dès l'exécution des assemblages. Après le serrage définitif et le contrôle des assemblages, le système de protection contre la corrosion prévu pour l'ouvrage est appliqué sur le joint suivant les conditions définies dans le marché.

3.7 - CONTRÔLE DU SERRAGE DES BOULONS APRÈS EXÉCUTION DES ASSEMBLAGES PRÉCONTRAINTS

3.7.1 - Généralités

Après la mise en œuvre des boulons, leur serrage doit être contrôlé. L'objectif est de vérifier qu'on a effectivement la précontrainte prise en compte dans les calculs de dimensionnement.

Deux méthodes sont définies dans la norme NF P 22-466 :

- contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou ;
- contrôle par surserrage de l'écrou.

La méthode par surserrage est obligatoire pour les boulons qui ont reçu une protection contre la corrosion (galvanisation...), et pour les boulons qui ont été serrés par contrôle de la rotation. Elle présente l'avantage d'être appliquée aux écrous dans leur état de pose définitif. Par contre, elle est mal adaptée à la détection d'un excès de serrage (il en est de même, mais dans une moindre mesure, de la méthode par desserrage - resserrage).

Dans les deux méthodes, il doit être fait usage de clés dynamométriques.

Le contrôle doit être effectué :

- avant que les boulons ne reçoivent leur protection contre la corrosion définitive (peinture ou autre) ;
- dans les 24 heures qui suivent le serrage des boulons si la méthode de contrôle retenue est celle par desserrage - resserrage de l'écrou ;
- immédiatement après le serrage si la méthode de contrôle retenue est celle par surserrage.

Le contrôle doit être confié à des agents expérimentés dans le contrôle des assemblages métalliques boulonnés.

L'échantillon de boulons sur lequel porte le contrôle doit répondre aux deux conditions :

- les boulons sont d'un même lot ;
- la clé de serrage n'a subi aucune modification de réglage pendant une même opération de pose.

3.7.2 - Contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou

La position de l'écrou est repérée sur la pièce assemblée, et l'écrou est desserré d'environ 30° (un douzième de tour) en maintenant fermement la tête de la vis. Il est ensuite resserré au couple de contrôle C_c , ou à la précontrainte de contrôle P_c .

Après resserrage de l'écrou, l'écart par rapport à la position initiale doit être dans l'étendue $[-25^\circ, +12^\circ]$ (pour des boulons de classe 10.9).

3.7.3 - Contrôle par surserrage de l'écrou

Après avoir repéré la position de l'écrou sur la pièce à assembler, on applique un couple moyen ou une précontrainte moyenne de contrôle, dont la valeur est précisée à l'article 8.5 de la norme NF P 22-466.

L'écart positif par rapport à la position initiale doit être dans l'étendue $[+5^\circ, +12^\circ]$ (pour des boulons de classe 10.9).



*PROTECTION CONTRE
LA CORROSION*

SOMMAIRE

4 - PROTECTION CONTRE LA CORROSION

4.1	Les procédés de protection contre la corrosion.....	105
4.2	Catégories d'éléments d'ouvrage.....	106
4.3	Décapage des surfaces pour mise en peinture ou pour métallisation	106
4.4	Mise en peinture sur acier nu.....	109
4.4.1	Systèmes de peinture.....	109
4.4.2	Environnement des ouvrages.....	110
4.4.3	Garanties.....	111
4.4.4	Certification des systèmes de peinture.....	113
4.4.5	Mise en œuvre d'une protection par peinture.....	116
4.4.6	Critères de choix d'un système de peinture.....	118
4.5	Métallisation suivie de mise en peinture.....	120
4.6	Galvanisation à chaud.....	121
	<i>Références du chapitre 4.....</i>	<i>123</i>

Page laissée blanche intentionnellement

PROTECTION CONTRE LA CORROSION



4.1 - LES PROCÉDÉS DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Le fascicule 56 du CCTG traite les procédés suivants :

- mise en peinture sur acier nu (chapitre 2.3 du fascicule) ;
- mise en peinture sur acier grenailé et prépeint par traitement automatique (chapitre 2.4) ;
- métallisation au pistolet sur acier nu suivie de mise en peinture (chapitre 2.3) ;
- galvanisation à chaud (chapitre 2.1) ;
- galvanisation à chaud suivie de mise en peinture (chapitre 2.5) ;
- zingage électrolytique (chapitre 2.2).

La mise en peinture sur acier nu est le procédé de protection de loin le plus utilisé pour les tabliers métalliques.

La métallisation est utilisée exceptionnellement pour les ponts-routes, un peu plus fréquemment pour les ponts-rails en raison de conditions d'exploitation plus contraignantes qui font rechercher une protection plus facile à entretenir.

La galvanisation à chaud et le zingage électrolytique nécessitent le recours à des installations industrielles. Ce sont des procédés utilisés surtout pour les équipements.

Le fascicule 56 du CCTG a été mis en révision lors de l'achèvement du présent guide. Après mise en vigueur du fascicule révisé, il conviendra de vérifier que les indications du présent chapitre sont encore valables.

4.2 - CATÉGORIES D'ÉLÉMENTS D'OUVRAGE

Le choix du type de protection et sa durabilité dépendent des possibilités de préparation des surfaces à protéger. Or, les possibilités de préparation, notamment le degré de soin du décapage, sont liées à la rigidité des tôles et à l'épaisseur des soudures. Le paramètre adopté pour quantifier ces données est l'épaisseur de la tôle. Le fascicule 56 du CCTG définit donc 3 catégories d'éléments en fonction de leur épaisseur (plus une quatrième catégorie réservée aux câbles de ponts suspendus et de ponts à haubans) :

Catégorie 1 : éléments d'épaisseur ≥ 8 mm si les deux faces sont à protéger ;
éléments d'épaisseur ≥ 6 mm si une seule face est à protéger ;

Catégorie 2 : éléments d'épaisseur ≥ 4 mm ;

Catégorie 3 : éléments d'épaisseur < 4 mm.

La catégorie d'un élément détermine le degré de soin du décapage dans le cas de mise en peinture, l'épaisseur de la couche de zinc dans le cas de galvanisation, etc.

La catégorie a par ailleurs une influence sur la durée des garanties.

Le maître d'œuvre doit préciser, dans le marché, le classement des éléments suivant ces catégories. Les éléments structuraux des ponts doivent être classés en catégorie 1 ; les équipements tels que les dispositifs de visite et d'entretien sont à classer en catégorie 2 ou 3, suivant leur épaisseur.

4.3 - DÉCAPAGE DES SURFACES POUR MISE EN PEINTURE OU POUR MÉTALLISATION

Pour les ouvrages neufs, seuls considérés ici, le décapage doit être effectué en projetant de l'abrasif par voie sèche.

Les procédés entièrement manuels tels que grattage, piquage, brossage, ne donnent pas une aussi bonne qualité de préparation de surface. Aussi ne sont-ils admis que pour les éléments de catégorie 3 : ces éléments, de faible épaisseur, pourraient se déformer sous la projection de l'abrasif.

En atelier, le décapage est généralement effectué par "grenailage" : l'abrasif, constitué de grenaille d'acier ou de fonte, est projeté par un jet d'air comprimé ou, plus rarement, par l'effet mécanique d'une machine rotative.

La grenaille comporte des grains de forme angulaire et des grains de forme ronde. La proportion entre les deux types de grain, ainsi que leur grosseur (granulométrie), sont déterminées pour obtenir la qualité de préparation requise.

La grenaille est recyclée : après projection, elle est récupérée, filtrée, dépoussiérée, sa granulométrie est éventuellement rétablie par ajout de grosses particules, puis elle est remise automatiquement dans le circuit.

Sur chantier, le décapage est le plus souvent effectué par projection d'abrasif non recyclé. Les abrasifs métalliques étant trop coûteux sans recyclage, on utilise par exemple du laitier de haut-fourneau, ou des silicates d'alumine naturels ou artificiels. La projection est effectuée à l'air comprimé.



Ce mode de décapage est, encore maintenant, appelé parfois "sablage" parce qu'on utilisait autrefois du sable comme abrasif. Depuis le décret du 6 juin 1969, l'emploi de sable contenant plus de 5 % de silice libre est interdit à cause de sa nocivité pour les voies respiratoires.

Le décapage par voie humide, où l'abrasif est entraîné par de l'eau sous pression, permet d'échapper au décret de 1969, mais il n'est pas autorisé par le CCTG : malgré l'addition d'inhibiteur de corrosion, ce procédé entraîne un risque de corrosion du support.

Le constructeur peut travailler à partir de tôles brutes. Dans ce cas, le décapage doit débarrasser l'acier de la rouille, ainsi que de la calamine adhérente qui résulte de l'oxydation de l'acier après laminage ; il doit permettre en outre d'obtenir l'état de rugosité nécessaire à l'adhérence de la peinture (ou de la métallisation).

Le constructeur peut aussi commander au sidérurgiste des produits grenailés. Le décapage à effectuer avant mise en peinture est alors allégé, la calamine consécutive au laminage ayant déjà été éliminée. Cela permet au constructeur de gagner du temps et de la place dans son atelier.

Le constructeur a également la possibilité de commander des produits grenailés et prépeints (PGP). Une mince couche de peinture, déposée en chaîne automatisée, assure la protection contre la corrosion pendant quelques mois.

Actuellement, dans le cadre des systèmes de peinture de catégorie A (systèmes certifiés), le constructeur qui utilise des produits grenailés et prépeints doit quand même effectuer de la "mise en peinture sur acier nu" : il n'existe pas, pour l'instant, de système de peinture certifié applicable sur la protection d'origine de ces produits. Le constructeur doit donc, avant application de la peinture définitive, éliminer la protection provisoire par un décapage général. Ce décapage est très réduit, puisqu'il n'y a ni calamine, ni corrosion à éliminer. Il doit cependant être suffisant pour assurer, comme dans le cas des produits non prépeints, la qualité de préparation de surface requise dans la fiche de certification du système de peinture ou dans la fiche technique du produit.

La qualité de préparation d'une surface est définie par le degré de soin du décapage et par la classe de rugosité de la surface.

Le degré de soin est exprimé par référence à la norme internationale :

ISO 8501 : évaluation 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.

La valeur nécessaire est fixée dans le fascicule 56 du CCTG en fonction du système de protection et de la durée des garanties. Les systèmes de peinture de catégorie A nécessitent SA 2 1/2 ou SA 3. Le choix entre ces deux valeurs est fixé dans la fiche de certification du système de peinture, ou dans la fiche technique du fabricant de peinture.

La classe de rugosité est exprimée par référence à la norme :

NF EN ISO 8503 : caractéristiques de rugosité des subjectiles d'acier décapés

- partie 2 : méthode pour caractériser un profil de surface en acier décapé par projection d'abrasif - utilisation d'échantillons de comparaison viso-tactile ISO.

La classe exigée, fixée dans la fiche de certification ou dans la fiche technique du fabricant, est toujours la classe "moyen G".

Le degré de soin du décapage et la rugosité de surface nécessaires sont obtenus en jouant sur la durée de l'opération, ainsi que sur la forme, la granulométrie et la dureté des grains d'abrasif.

4.4 - MISE EN PEINTURE SUR ACIER NU

4.4.1 - Systèmes de peinture

On considère comme un produit, non une peinture prise individuellement, mais un système de peinture. C'est un ensemble de couches ayant des propriétés différentes, compatibles entre elles, chaque couche assurant des rôles spécifiques. La première couche assure la protection contre la corrosion. La ou les couches suivantes renforcent et protègent la couche primaire, la dernière couche ayant en plus un rôle décoratif.

L'évolution actuelle va dans le sens d'une simplification des systèmes. Les couches sont plus épaisses, leur nombre diminue : généralement trois couches pour les parties vues, deux couches pour les parties non vues. Par ailleurs, les fabricants de peintures développent maintenant des produits ayant une grande tolérance à une ou plusieurs conditions d'utilisation : basse température, forte hygrométrie, longs délais entre couches, absence de toxicité...

Le fascicule 56 du CCTG (article 6) définit trois catégories de systèmes, désignées par les lettres A, B, C. La catégorie du système doit être choisie en fonction de la catégorie de l'élément d'ouvrage, selon les possibilités indiquées au tableau 4.1 :

Catégorie d'éléments d'ouvrage	Catégorie de systèmes de peinture
1	A ou B
2	A, B ou C
3	C

Tableau 4.1

Catégories de système de peinture suivant la catégorie d'élément d'ouvrage

L'adoption d'une catégorie de système a plusieurs conséquences. En particulier, ce choix influe sur la durée des garanties : elle est la plus élevée avec les systèmes de catégorie A. De plus :

- les systèmes de catégorie A sont des systèmes certifiés ; ils subissent des contrôles continus chez le fabricant dans le cadre de la procédure de certification ;
- les systèmes de catégorie B ont une composition identique ou analogue à celle des systèmes de catégorie A, et ils ont une même épaisseur globale, mais ils ne sont pas certifiés.

Le maître d'œuvre doit préciser dans la marché la catégorie du système de peinture.

Pour les structures d'ouvrages de génie civil, le fascicule 66 du CCTG (article II.8) impose à l'entrepreneur d'utiliser uniquement des systèmes de catégorie A, sauf indication contraire du marché.

4.4.2 - Environnement des ouvrages

Les environnements peuvent être classés en différentes catégories de corrosivité atmosphérique selon la norme :

NF EN ISO 12944 : anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture

- partie 2 : classification des environnements.

Les trois catégories “corrosivité faible”, “corrosivité moyenne”, “corrosivité élevée”, symbolisées respectivement par C2, C3, C4, ont été retenues pour les systèmes de peinture certifiés. Des exemples typiques d’environnement correspondant à ces catégories sont indiqués au **tableau 4.2** (extrait du texte de présentation des systèmes de protection anticorrosion certifiés par l’ACQPA).

Il existe aussi une catégorie “immersion” qui ne concerne pas les ponts.

Le maître d’œuvre doit préciser dans le marché la catégorie de corrosivité de l’environnement, qui influe sur le choix du système de peinture.

Catégorie de corrosivité atmosphérique	Environnements
C2 (corrosivité faible)	Zones rurales
C3 (corrosivité moyenne)	Zones urbaines Zones industrielles avec pollution modérée en SO ₂ Zones côtières avec faible salinité
C4 (corrosivité élevée)	Zones industrielles Zones côtières avec salinité normale

Tableau 4.2
Catégories de corrosivité atmosphérique
et types d’environnement correspondants

4.4.3 - Garanties

Généralités

Le fascicule 56 du CCTG (article 4.4) définit deux sortes de garanties contractuelles :

- une garantie d'efficacité contre la corrosion ;
- des garanties d'aspect.

Les durées de garantie dépendent de divers paramètres :

- catégorie (1, 2 ou 3) de l'élément à protéger (voir 4.2 ci-avant) ;
- catégorie A, B ou C du système de peinture (voir 4.4.1 ci-avant) ;
- mode de préparation des surfaces dans le cas des éléments de catégorie 3.

Ces durées ne dépendent pas de la catégorie de corrosivité atmosphérique du site : l'entrepreneur doit choisir le système de peinture en fonction de l'environnement, de façon à pouvoir garantir toujours la même durée. Pour les systèmes de catégorie A, ce choix a été fait au niveau de la certification : la fiche de certification ACQPA de chaque système indique la catégorie de corrosivité pour laquelle le système est valable.

Pendant la durée de la garantie, l'entrepreneur est tenu d'effectuer des travaux de reprise si les objectifs correspondants ne sont pas atteints ou cessent de l'être.

Garantie d'efficacité contre la corrosion

Cette efficacité est définie dans le fascicule 56 du CCTG par référence à l'une des photographies-types fournies dans la norme :

NFT 30-071 : dégradation des surfaces peintes - principes généraux d'évaluation de la quantité et de la dimension des types courants de défauts - désignation du degré de cloquage et d'enrouillement.

Dans les conditions habituelles pour les tabliers de ponts (éléments d'ouvrages de catégorie 1, systèmes de peinture de catégorie A), il s'agit du "cliché Ri 1", qui correspond à un très faible pourcentage d'oxydation.

Dans ces mêmes conditions, le fascicule 56 fixe la durée de garantie à 7 ans.

Bien entendu, les durées de vie effectives, c'est à dire les durées d'efficacité anticorrosion avant qu'une réfection soit nécessaire, sont généralement bien supérieures à la durée de la garantie. Ces durées effectives ont des valeurs assez dispersées en raison des nombreux paramètres qui jouent : conditions plus ou moins favorables lors de la mise en œuvre, nature, nombre et épaisseur des couches du système de peinture, corrosivité effective de l'atmosphère, etc. Un ordre de grandeur moyen des durées de vie effectives est de 2,5 fois la durée garantie, soit environ 18 ans dans le cas considéré ci-dessus.

Garanties d'aspect

Les garanties d'aspect prévues dans le fascicule 56 du CCTG concernent plusieurs sortes de défauts :

- pour toutes les surfaces à protéger : décollements, pelages, cloquages ;
- seulement pour les surfaces définies comme vues dans le marché :
 - . altérations non uniformes du film de peinture ;
 - . altérations non uniformes de la couleur de finition ;
 - . altérations uniformes de la couleur de finition.

Pour les garanties spécifiques aux parties vues, il existe une option "garantie normale" ou "garantie spéciale". La garantie spéciale apporte en plus une garantie de stabilité de la couleur par rapport à la couleur initiale.

Les durées de garantie correspondantes sont fixées dans le fascicule. Elles sont reproduites dans le **tableau 4.3** pour le cas des tabliers de ponts (éléments d'ouvrage de catégorie 1, systèmes de peinture de catégorie A).

On constate que certaines garanties d'aspect ont des durées beaucoup plus faibles que la garantie d'efficacité contre la corrosion. Il en est évidemment de même pour les durées réelles.

Toutes surfaces	Garantie anticorrosion	7 ans	
	Garanties d'aspect	normale	spéciale
Toutes surfaces	Décollements, pelages, cloquages	6 ans	6 ans
Surfaces vues	Altération non uniforme du film de peinture	3 ans	5 ans
	Altération non uniforme de la couleur (évolution différente de zones visibles ensemble)	5 ans	5 ans
	Altération uniforme de la couleur (évolution par rapport à la couleur initiale)	-	3 ans

Tableau 4.3

Peinture ou métallisation plus peinture :
durée des garanties dans le cas d'éléments d'ouvrage de catégorie 1
avec système de peinture de catégorie A

Pour les deux premiers défauts d'aspect mentionnés dans le tableau, l'importance des dégradations à partir de laquelle joue la garantie est définie dans le fascicule 56.

Pour les deux autres défauts, qui concernent la couleur de la couche de finition, le fascicule se réfère à des normes. Celles-ci ont été remplacées en 1998 par la norme :

NFT 34-554 : systèmes de peinture anti-corrosion - stabilité dans le temps
des caractéristiques colorimétriques d'une peinture de finition
pour ouvrage métallique

- partie 1 : critères de performance
- partie 2 : détermination sur ouvrage en service

La partie 1 est la base référentielle pour la certification par l'ACQPA de la stabilité des couleurs de finition. Elle comporte deux tables, l'une pour les couleurs "RAL", l'autre pour les couleurs "AFNOR", donnant les écarts colorimétriques Δ_{ab} au-delà desquels une couleur de finition n'est plus considérée comme "stable".

Suivant la couleur considérée, Δ_{ab} va de 5 à 14 unités. Cet écart sert de base à la définition des garanties aussi bien contre l'altération non uniforme de la couleur (défaut de "stabilité relative") que contre son altération uniforme (défaut de "stabilité absolue"). Ces notions sont définies dans la partie 2 de la norme susvisée, qui définit également les méthodes de mesure sur ouvrage en service, pour déterminer les cas où la garantie doit jouer.

Les durées de garantie du fascicule sont à conserver sans modification.

Tant que le fascicule 56 révisé n'est pas disponible, il convient de viser la nouvelle norme dans les marchés, et de mentionner la dérogation au CCTG correspondante (voir 8.3.3 ci-après).

4.4.4 - Certification des systèmes de peinture

Les systèmes de peinture de catégorie A, qui sont ceux normalement utilisés pour les éléments structurels des ponts, doivent être certifiés. L'utilisation d'un système certifié donne la présomption que les résultats garantis seront effectivement atteints, à condition que le système soit adapté aux conditions de service de l'ouvrage, et que les paramètres de préparation de surface et d'application des produits soient respectés.

Il existe des systèmes certifiés par l'ACQPA pour application sur acier nu, sur acier métallisé et sur acier galvanisé [6.7].

La certification ACQPA porte sur :

- la durabilité de la protection contre la corrosion ;
- la durabilité de l'aspect dans le cas des systèmes certifiés "V", c'est à dire destinés à des surfaces vues.

Bien que chaque couche et chaque produit constituant le système soit identifié, c'est sur la performance globale du système que porte la certification.

FICHE DESCRIPTIVE et d'EMPLOI du SYSTEME CERTIFIE ACQPA n° : C3A NV 235

destiné à la protection des parties vues et non vues des structures situées en atmosphère de corrosivité moyenne de la norme NF EN ISO 12944-2

Fabricant :

A - Données Certifiées par l'ACQPA

Support du système de peinture : acier

Préparation de surface : décapage par projection d'abrasif Sa 3 avec une rugosité « Moyen G » $\sigma(10)$

Constitution du système	n° de certification des produits $\sigma(1)$	dénomination commerciale $\sigma(2)$	nature	épaisseur sèche (μm) $\sigma(3)$	
				contractuelle	maximale
1re couche....	ACQPA 2871		époxyde riche en zinc époxyde pigmentée acrylique polyuréthane	40	120
2e couche....	ACQPA 3881			100	
3e couche....	ACQPA 32151			40	

épaisseur contractuelle du système 180

Caractéristiques d'identification rapide des produits constituant le système $\sigma(4)$

	ACQPA 2871				ACQPA 3881				ACQPA 32151			
	comp. A	tolérance	comp. B	tolérance	comp. A	tolérance	comp. B	tolérance	comp. A	tolérance	comp. B	tolérance
masse volumique (NF T 30 020)	3,5	$\pm 0,1$	0,92	$\pm 0,05$	1,52	$\pm 0,05$	0,92	$\pm 0,05$	1,22	$\pm 0,05$	1,08	$\pm 0,05$
extrait sec (NF T 30 084)	90,0	± 2	70,0	± 2	75,0	± 2	70,0	± 2	64,2	± 2	75,3	± 2
teneur en cendres (NF T 30 012)	-		-		49,0	± 3	-		26,0	± 3	-	

B - Valeurs Spécifiées par l'ACQPA $\sigma(5)$

Conditions atmosphériques durant l'application et le séchage : température (mini/maxi) hygrométrie (mini/maxi)	+ 7°C/30°C -85 %		+ 8°C/30°C -85 %		+ 10°C/35°C -85 %	
	PR + 3°C/40°C		PR + 3°C/40°C		PR + 3°C/40°C	
Température du support (mini/maxi)	PR + 3°C/40°C		PR + 3°C/40°C		PR + 3°C/40°C	

C - Recommandations d'emploi et de mise en oeuvre

NB : toutes les données en italique ou des tableaux ci-dessous sont déclarées par le fabricant sans vérification de l'ACQPA

	T1 = 10°C		T2 = 20°C		T1 = 10°C		T2 = 20°C		T1 = 10°C		T2 = 20°C	
	durée de séchage indicative $\sigma(6)$ (apparent complet) (NF EN 3678)	2 h	1 h	15 h	12 h	12 h	6 h	12 h	6 h	12 h	6 h	12 h
délai de recouvrement mini (HR = 75 %) $\sigma(7)$	24 h	12 h	48 h	24 h	24 h	12 h	12 h	12 h	24 h	12 h	12 h	12 h
	6 mois	6 mois	18 mois	18 mois	12 mois	12 mois	12 mois	12 mois	12 mois	12 mois	12 mois	12 mois

	matériel	dilution	épaisseur réalisable	matériel	dilution	épaisseur réalisable	matériel	dilution	épaisseur réalisable
Mode d'application et dilution en volume $\sigma(8)$: mode conseillé	airless	0 à 20	oui	airless	0 à 8 %	oui	airless	0 à 10 %	oui
autres modes	pistol. à air	0 à 20	oui	pistol. à air	15 à 25 %	oui	pistol. à air	15 à 25 %	oui
	brosse	0 à 20	non	brosse	0 à 8 %	non	brosse	0 à 10 %	non
	rouleau	0 à 20	non	rouleau	0 à 8 %	non	rouleau	0 à 10 %	non

Diluant $\sigma(9)$: dénomination	67232	67232	61181
taux maximal (en volume)	20 %	25 %	25 %
Rapport de mélange	92,4 % / 7,80 %	83 % / 17 %	86,8 % / 13,2 %
Temps de mûrissement à 20°C	-	15 mn	15 mn
Épaisseur humide à appliquer pour obtenir l'épaisseur sèche contractuelle à 20°C, en mode conseillé d'application avec la dilution minimum dilution maximum	55 μm 65 μm	230 μm 245 μm	75 μm 85 μm
Délai maximal d'utilisation après mélange T1 = 10°C (HR = 75) T3 = 30°C	12 h 4 h	8 h 4 h	10 h 2 h 30
Point d'éclair	21°C < PE < 55°C	21°C < PE < 55°C	21°C < PE < 55°C

Figure 4.1

Exemple de fiche de certification ACQPA d'un système de peinture

(extrait du document [6.7])

La couche de finition des systèmes certifiés “V” est généralement grise. Pour des couleurs différentes, la certification est accordée d’après les résultats de l’exposition au soleil (en Floride) d’une plaque-échantillon pendant un an. L’écart colorimétrique entre la plaque exposée et une plaque témoin doit rester inférieur à la valeur maximale admissible indiquée dans la norme NF T 34-554, partie 1, déjà citée. Cet écart maximal admissible est différent suivant les couleurs parce que les couleurs sont plus ou moins stables : par exemple, un gris est plus stable qu’un rouge vif.

Actuellement, 23 couleurs sont essayées lors de la certification des systèmes “V” ; elles sont reproduites dans un nuancier ACQPA, avec l’indication de leur référence “RAL”. Il est recommandé de choisir la couleur des surfaces vues parmi ces couleurs, que la garantie demandée dans le marché soit “normale” ou “spéciale”.

Catégorie de corrosivité de l’environnement	faible	C2
	moyenne	C3
	élevée	C4
Type de subjectile	acier nu	A
	acier métallisé	Z
	acier galvanisé	G
Type de travaux	travaux neufs	N
	travaux de maintenance	M
Visibilité des surfaces à protéger	surface <u>v</u> ue	V
	surface non vue (invisible)	I

Tableau 4.4
Éléments définissant le domaine d’utilisation des systèmes de peinture certifiés par l’ACQPA, et désignation codée

Pour chaque système de peinture certifié, l’ACQPA établit une fiche de certification (figure 4.1). Cette fiche définit le domaine d’utilisation du système, en clair et sous forme codée. Par exemple, “C3ANV” désigne un système certifié pouvant être utilisé (voir le tableau 4.4) :

- dans une atmosphère de corrosivité moyenne ;
- sur de l’acier nu ;
- dans le cadre de travaux neufs ;
- pour des surfaces vues.

Ce code est suivi par le numéro de certification, qui permet d'identifier le système, et par le nom du fabricant.

Dans le cas d'une peinture de finition certifiée conforme à la norme NF T 34-554 après essai de stabilité colorimétrique en Floride, le numéro de certification est suivi de la lettre "T".

Un système de peinture certifié pour un type d'environnement donné est à considérer comme certifié également pour les environnements de corrosivité moindre.

De même, un système certifié pour des surfaces vues est à considérer comme certifié aussi pour des surfaces non vues.

Ainsi, le système certifié "C3ANV" est également valable en environnement C3 pour des surfaces non vues, et en environnement C2 pour des surfaces vues ou non vues.

Les indications des fiches de certification de l'ACQPA sont classées sous trois rubriques :

A - Données certifiées par l'ACQPA :

- préparation de surface nécessaire ; pour les aciers nus ou métallisés, il s'agit du degré de soin du décapage (Sa 2 1/2 ou Sa 3) et de la classe de rugosité des surfaces ;
- nombre de couches du système et, pour chaque couche, dénomination commerciale, nature et numéro d'identification ACQPA du produit, épaisseur contractuelle de la couche ;
- ...

B - Valeurs spécifiées par l'ACQPA : valeurs maximales et minimales de température et d'hygrométrie pendant l'application et le séchage.

C - Recommandations d'emploi et de mise en œuvre : dilution, délai minimal et délai maximal de recouvrement, modes d'application conseillés et modes possibles (pistolet à air, brosse...), etc.

Ces indications sont fournies avec une présentation uniforme pour tous les systèmes, ce qui facilite les consultations.

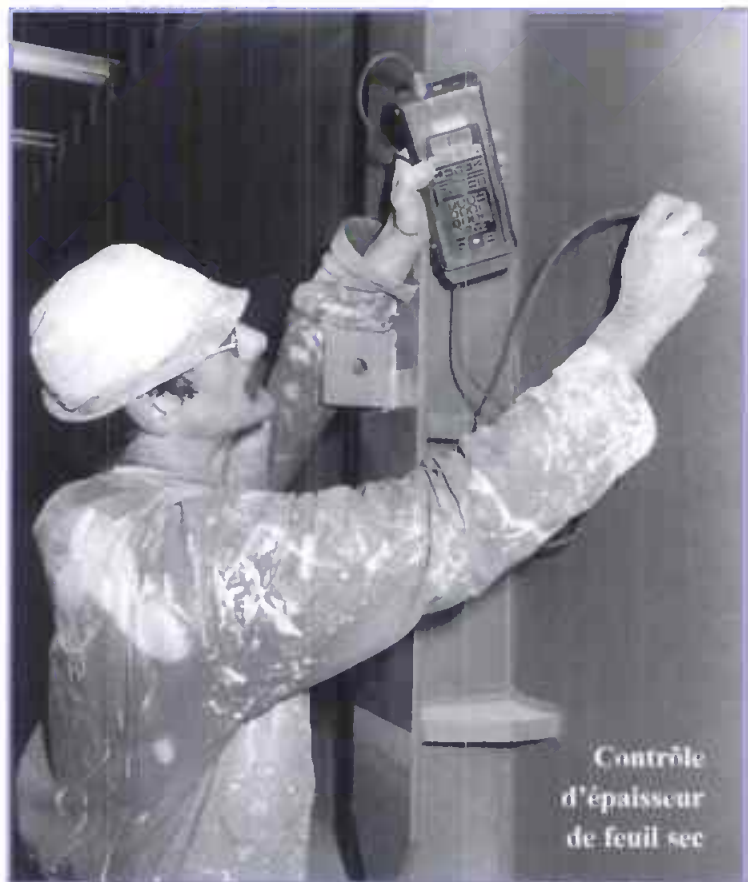
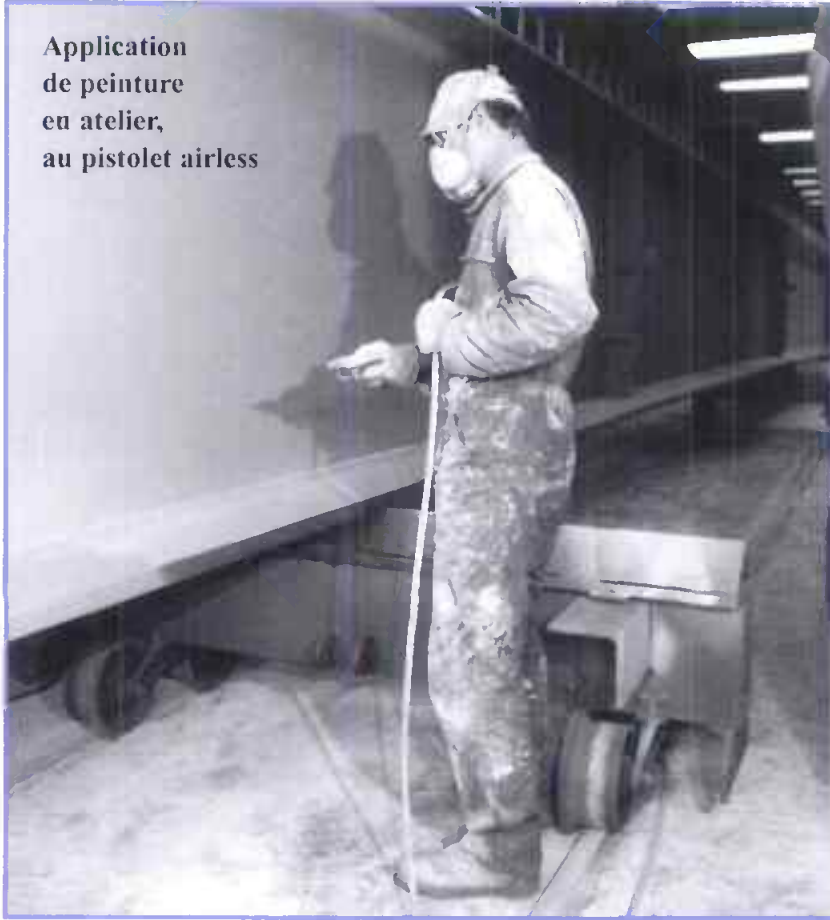
4.4.5 - Mise en œuvre d'une protection par peinture

La mise en œuvre est généralement effectuée en partie dans l'atelier du constructeur, en partie sur chantier.

Dans l'atelier, les sous-ensembles d'ouvrage achevés sont décapés et reçoivent les deux premières couches de peinture (ou seulement la première couche dans les systèmes à deux couches). Il est recommandé d'appliquer les couches en atelier toutes les fois que c'est possible, car les conditions d'application y sont toujours meilleures que sur chantier.

Après décapage, et dépoussiérage à l'air comprimé, la première couche du système de peinture doit être appliquée dans un délai très court (deux, quatre ou six heures suivant le degré hygrométrique de l'air), pour éviter un début de corrosion nuisible à l'adhérence de la peinture.

Application
de peinture
en atelier,
au pistolet airless



Contrôle
d'épaisseur
de feuil sec

La dernière couche du système est généralement appliquée sur chantier, après achèvement de toutes les opérations de montage et d'assemblage susceptibles de causer des détériorations.

Les peintures peuvent être appliquées à la brosse, ou par pulvérisation avec un pistolet.

La brosse ne convient pas pour certaines peintures trop fluides. En outre, le fascicule 56 du CCTG (article 18.3.2) interdit l'usage du rouleau, ainsi que de la brosse à long manche, ou guipon, qui ne permettent pas de maîtriser correctement les épaisseurs appliquées.

La pulvérisation peut être effectuée par différents procédés.

- Procédé pneumatique (pistolet à air) : la pulvérisation est obtenue par un jet d'air comprimé, suivant le même principe que les vaporisateurs.
- Procédé dit "airless" (pistolet sans air) : la peinture est soumise à une pression élevée à l'aide d'une pompe.
- Procédé dit "airmix" : ce système utilise complémentirement les deux principes précédents.

Le mode d'application à adopter est indiqué dans la fiche de certification ACQPA du système de peinture, ou dans la fiche technique du fabricant. Ces documents indiquent le "mode d'application conseillé", à retenir dans la majorité des cas, et les autres modes d'application possibles.

Les règles générales pour l'application des produits sont définies dans le fascicule 56 du CCTG, chapitre 2.3.

4.4.6 - Critères de choix d'un système de peinture

On a vu que le marché fixe la catégorie des éléments d'ouvrage, le caractère vu ou non vu des surfaces, la catégorie de corrosivité atmosphérique, la catégorie du système de peinture, la couleur de la couche de finition.

Souvent, le marché n'impose pas un système de peinture déterminé. Il appartient alors à l'entrepreneur de choisir un ou plusieurs systèmes parmi ceux convenant aux données du marché, et de les soumettre à l'accord du maître d'œuvre.

L'entrepreneur, pour effectuer son choix, s'assure que les conditions de mise en œuvre propres au système sont adaptées aux conditions particulières d'exécution :

- les plages de température et d'hygrométrie atmosphérique autorisées pour l'application et le séchage doivent correspondre aux conditions du chantier, et être suffisamment étendues pour éviter de trop longues interruptions ;
- la durée de séchage et le délai minimal de recouvrement doivent être les plus courts possibles pour permettre d'enchaîner rapidement les différentes phases et d'occuper l'atelier le moins longtemps possible ;
- le délai maximal de recouvrement entre couches, lié à leurs qualités d'adhérence, doit être compatible avec le délai prévu avant l'application de la dernière couche sur chantier ;
- les couches appliquées en atelier doivent être faciles à retoucher sur le chantier.

Dans le cas des systèmes de peinture certifiés, la fiche de certification établie par l'ACQPA fournit la plupart des informations utiles.

Des précisions complémentaires peuvent figurer sur la notice technique du fabricant de peinture.

Le maître d'œuvre, de son côté, est directement concerné par :

- la durabilité de la protection contre la corrosion ;
- l'aspect de la dernière couche des surfaces vues, et la durabilité de cet aspect.

La durabilité de la protection est réglée principalement par les garanties du marché et par la certification. On peut imposer dans le marché, pour des raisons particulières, une catégorie de corrosivité atmosphérique plus sévère que celle où l'ouvrage se trouve réellement : cela ne modifie pas les durées de garantie, mais influe sur le choix du système, et peut augmenter la durée d'efficacité réelle.

Le choix final du système en vue de la meilleure durabilité effective reste un travail d'ingénieur spécialisé : tous les systèmes satisfaisant aux spécifications d'un marché ne sont pas équivalents. Le maître d'œuvre associe généralement à ce choix l'agent d'inspection de la protection anticorrosion.

La durabilité de l'aspect des surfaces vues, également, est couverte par les garanties et par la certification. Le rôle du maître d'œuvre dans ce domaine est de définir dans le marché les surfaces vues et les surfaces non vues, de moduler les garanties d'aspect des surfaces vues (garantie "normale" ou garantie "spéciale"), et de choisir la couleur de finition. Il est rappelé que la certification ne porte sur la stabilité des couleurs que si l'on choisit une couleur déjà testée.

Il doit être décidé aussi du degré de brillance de la dernière couche. L'aspect mat ou brillant, qui n'a aucun rapport avec les garanties ni avec la certification, n'est pas sans conséquences. Une finition brillante rend plus apparents les défauts de planéité des tôles (dus par exemple à un raidissage sur la surface non vue). Une finition mate a tendance à être moins efficace contre la corrosion en raison de sa plus grande porosité, et à s'encrasser davantage. Une finition satinée permet un compromis.

Le maître d'œuvre est aussi concerné par les problèmes d'environnement qui pourraient se poser lors de l'application sur chantier. Pour anticiper ces problèmes, il convient de prendre connaissance à l'avance des fiches techniques des fabricants.

Lorsque des informations complémentaires sont nécessaires, on peut consulter le secrétariat permanent de l'ACQPA au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ou bien le réseau des laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées. Le cas peut se présenter, par exemple, lorsqu'un constructeur, devant effectuer des retouches sur le chantier, propose une peinture spécialement formulée, différente de celle appliquée en atelier, et non certifiée.

4.5 - MÉTALLISATION SUIVIE DE MISE EN PEINTURE

La métallisation consiste à projeter un métal en fusion sur la pièce à protéger. La projection est effectuée au pistolet, en atelier ou sur chantier.

La protection n'est efficace que si l'acier a été correctement préparé avant métallisation. Il faut une absence totale d'oxydes ou de salissures en surface, et une rugosité suffisante pour assurer une adhérence des particules de métal en fusion projetées, qui viennent se coller sur le support à température ambiante.

Le degré de soins doit être SA3, et la classe de rugosité "moyen G" suivant la norme NF EN ISO 8503, partie 2, déjà citée.

Une attention particulière doit être apportée aux tranches de tôles obtenues par oxycoupage : la trempe superficielle de l'acier conduit à une dureté plus importante, pour laquelle les techniques habituelles de décapage ne donnent pas une rugosité suffisante. La solution consiste à meuler ces surfaces pour éliminer la zone durcie ; cela conduit à un coût important. Une autre solution consiste à traiter les zones oxycoupées avec un système de peinture sans métallisation, qui se comportera correctement sur le plan de l'adhérence.

Le métal projeté est du zinc, du zinc-aluminium ou de l'aluminium afin d'assurer la protection cathodique de l'acier ; le métal d'apport, plus électro-négatif que l'acier, assure sa protection en se dissolvant préférentiellement.

Le fascicule 56 du CCTG (article 18.2.2) spécifie les épaisseurs minimales :

- 120 μm pour le zinc et pour l'alliage zinc-aluminium 85-15 ;
- 200 μm pour l'aluminium.

Ces épaisseurs sont également celles indiquées dans la norme :

NF T 34-550 : systèmes de peinture pour la protection des ouvrages métalliques - spécifications

Les modalités d'exécution et les méthodes d'essai sont définies dans la norme :

NF EN 22063 : revêtements métalliques et inorganiques - projection thermique - zinc, aluminium et alliages de ces métaux

Les revêtements obtenus par métallisation présentent une porosité importante, nécessitant une protection complémentaire par peinture pour éviter une consommation trop rapide du métal d'apport. C'est pourquoi le fascicule 56 du CCTG n'envisage la métallisation que suivie de mise en peinture. La métallisation constitue un excellent support pour les systèmes de peinture et, si l'entretien de ces couches de surface est correctement réalisé, le capital de protection qu'est le revêtement de métallisation sera toujours préservé, sans corrosion de l'acier support.

Les conditions de réalisation d'une métallisation avec peinture sont celles d'une mise en peinture sur acier nu, avec un délai très court avant l'application de la première couche de peinture (de 2 à 6 heures suivant l'hygrométrie ambiante). Cette première couche, souvent appelée bouche-pore, stoppe la dégradation du revêtement métallique par l'humidité et les agents corrosifs.

La liste des systèmes certifiés par l'ACQPA [6.7] comprend des systèmes de protection métallisation plus peinture, généralement dans les classes C3 et C4. Ces systèmes sont référencés C3Z ou C4Z.

Les systèmes comportent généralement deux couches de peinture, soit 120 μm pour C3, 140 μm pour C4, sur une métallisation zinc ou zinc-aluminium 85-15 de 120 μm .

La métallisation plus peinture est plus coûteuse que la simple mise en peinture. Les durées de garantie prévues dans le fascicule 56 du CCTG sont identiques à celles d'une mise en peinture (tableau 4.3 ci-avant), mais la durabilité effective est plus élevée, et les possibilités de maintenance, comme on l'a vu, sont très intéressantes.

4.6 - GALVANISATION A CHAUD

La galvanisation à chaud n'est possible que pour des éléments d'ouvrage et des équipements pouvant être totalement immergés dans un bain de zinc en fusion, ce qui limite leurs dimensions à environ 16 m de longueur, 2 m de largeur et 2 m de hauteur.

Le procédé consiste à immerger dans du zinc en fusion à 450°C environ la pièce en acier, après une préparation de surface comportant, par trempé dans des bains, plusieurs opérations successives. À cette température, il y a formation de couches d'alliages fer-zinc liées intimement jusqu'au zinc pur en surface, qui constituent une protection homogène de durabilité très longue.

L'acier doit être apte à la galvanisation et conforme à la norme :

NF A 35-503 : aciers pour galvanisation par immersion à chaud

Cette norme définit trois classes de teneurs-limites en silicium et en phosphore ; le but est d'éviter de trop grandes épaisseurs d'alliage fer-zinc, toujours préjudiciables à la cohésion et à l'adhérence du revêtement de galvanisation. Le fascicule 56 du CCTG spécifie la classe la plus sévère de la norme (plus faibles teneurs-limites) pour les éléments d'ouvrage de catégorie 1.

L'actuel fascicule 56 du CCTG impose, pour les éléments de catégorie 1, un dépôt minimal de zinc de 700 g/m² par face (article 4.2.3). On remarque que cette valeur est supérieure à celles indiquées dans la norme :

NF EN ISO 1461 : revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis ferreux - spécifications et méthodes d'essai

La galvanisation procure une excellente durabilité de la protection anticorrosion. Toutefois, cette protection est obtenue par sacrifice du zinc dans le processus de corrosion au contact de l'air, et les vitesses de consommation du zinc sont très différentes selon les ambiances atmosphériques dans lesquelles se trouvent les ouvrages. À titre d'exemple, la consommation du zinc est de l'ordre de 1 $\mu\text{m}/\text{an}$ en ambiance rurale, mais peut atteindre 3 à 5 $\mu\text{m}/\text{an}$ en ambiance industrielle ou marine.

Une galvanisation peut être mise en peinture, ce qui retarde le début du processus de sacrifice du zinc et procure donc une durabilité supplémentaire de la protection. La mise en peinture apporte aussi une esthétique qui peut être indispensable dans certains sites.

Les systèmes de peinture certifiés pour acier galvanisés sont de classe C4G, en ouvrage neuf comme en maintenance. Les fiches de ces systèmes, avec les conditions de mise en œuvre, figurent dans la publication ACQPA [6.7].

Les principales conditions de mise en œuvre sont les suivantes :

- les pièces ne doivent pas subir d'usinage ou de découpage ultérieur ;
- un dégraissage des pièces galvanisées est obligatoire avant la mise en peinture ;
- un dérochage chimique peut être imposé par la fiche de certification ;
- un dérochage mécanique (par projection d'abrasif...), qui améliore toujours l'accrochage des peintures sur acier galvanisé, peut être obligatoire ;
- un primaire de réparation, qui fait partie intégrante du système certifié, doit être appliqué dans les zones où la galvanisation a été détruite, après élimination de l'oxydation.

Parmi les peintures utilisables sur acier galvanisé, la liste des systèmes certifiés par l'ACQPA [6.7] inclut également des systèmes en poudre. Il s'agit d'un procédé industriel nécessitant une cuisson des pièces ; son domaine d'emploi est donc limité à des pièces de dimensions compatibles avec celles des fours-tunnels.

Toutes surfaces	Garantie anticorrosion	7 ans	
	Garanties d'aspect	normale	spéciale
Toutes surfaces	Décollements, pelages, cloquages	6 ans	6 ans
Surfaces vues	Altération non uniforme du film de peinture	3 ans	5 ans
	Altération non uniforme de la couleur (évolution différente de zones visibles ensemble)	5 ans	5 ans
	Altération uniforme de la couleur (évolution par rapport à la couleur initiale)	-	3 ans

Tableau 4.5

**Galvanisation à chaud plus peinture :
durée des garanties dans le cas d'éléments d'ouvrage
de catégorie I avec système de peinture de catégorie A**

La durée de garantie anticorrosion d'une galvanisation à chaud, et surtout d'une galvanisation à chaud suivie de mise en peinture, est très supérieures à celle d'une simple mise en peinture sur acier nu. Par exemple, cette durée est de 15 ans dans le cas d'élément de catégorie I avec système de peinture de catégorie A (tableau 4.5).

Pour la galvanisation à chaud suivie de mise en peinture, la durée des garanties d'aspect est identique ou supérieure, suivant la catégorie de l'élément, à celles d'une peinture sur acier nu ; dans ce type de protection, le risque est surtout celui de décollement dû à un mauvais dégraissage de la surface galvanisée avant application des peintures.

Références du chapitre 4

- [4.1] - **Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion. Guide d'utilisation du fascicule 56 du CCTG** (SETRA - LCPC - CETE Normandie - FIPEC - UNPVE, juillet 1989).
- [4.2]- **Protection contre la corrosion des structures métalliques de génie civil - Cahiers de l'AFPC n° 271** (janvier 1990) et n° 273 (février 1990).
- [4.3] - **Protection contre la corrosion par galvanisation à chaud des équipements des ponts - Compatibilité entre le fascicule 56 du CCTG et les normes** (D. André, M. Fragnet, SETRA/CTOA, note d'information n° 17, janvier 1994).
- [4.4] - **Mise en peinture des structures et équipements d'ouvrages galvanisés. Guide technique** (D. André, G. Maire, LCPC, septembre 1997).
- [4.5] - **Protection anticorrosion des structures métalliques** (D. André, J. Berthelley, J. Fuchs, G. Maire, SETRA/CTOA, bulletin Ouvrages d'art n° 32, juillet 1999).

*TEXTES DE RÉFÉRENCE
POUR LES SPÉCIFICATIONS
TECHNIQUES DES MARCHÉS*



SOMMAIRE

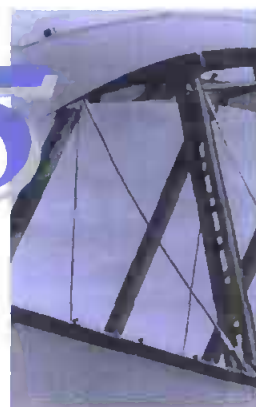
5 - TEXTES DE RÉFÉRENCE POUR LES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MARCHÉS

5.1	CCTG, autres textes de l'Administration et normes : généralités	127
5.1.1	Le CCTG.....	127
5.1.2	Les instructions et recommandations techniques.....	128
5.1.3	Les normes.....	128
5.2	Textes sur la conception et le calcul des ouvrages	131
5.2.1	Fascicule 61, titre II, du CPC : programmes de charges et épreuves des ponts-routes.....	131
5.2.2	Autres textes concernant les actions.....	131
5.2.3	Fascicule 61, titre V, du CPC : conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier.....	132
5.2.4	Règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton.....	132
5.2.5	Normes de calcul.....	133
5.3	Textes sur les produits de construction	134
5.3.1	Fascicule 4, titre III, du CCTG : aciers laminés pour construction métallique.....	134
5.3.2	Normes sur les aciers laminés.....	135
5.3.3	Normes sur les produits consommables pour soudage.....	137
5.3.4	Fascicule 4, titre IV, du CCTG : rivets en acier et boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques.....	137
5.3.5	Normes sur les boulons.....	138
5.3.6	Normes sur les goujons de connexion.....	138
5.3.7	Normes sur les autres produits en acier.....	138
5.4	Textes sur l'exécution des travaux	139
5.4.1	Fascicule 56 du CCTG : protection des ouvrages métalliques contre la corrosion.....	139
5.4.2	Normes sur la protection contre la corrosion.....	139
5.4.3	Fascicule 66 du CCTG : exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier.....	141
5.4.4	Normes d'exécution des ouvrages.....	141
	<i>Références du chapitre 5</i>	144

Page laissée blanche intentionnellement

TEXTES DE RÉFÉRENCE POUR LES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES MARCHÉS

5



5.1 - CCTG, AUTRES TEXTES DE L'ADMINISTRATION ET NORMES : GÉNÉRALITÉS

5.1.1 - Le CCTG

Le "cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux" (CCTG) est composé de deux ensembles de documents : le premier, applicable aux travaux de génie civil, comprend une cinquantaine de "fascicules". Le second, applicable aux travaux de bâtiment, comprend à peu près le même nombre de "documents techniques unifiés" (DTU). Quelques fascicules et quelques DTU sont communs au génie civil et au bâtiment, et figurent dans les deux listes de textes ; sont dans ce cas, par exemple, le fascicule 4, titre III, relatif aux aciers laminés pour constructions métalliques, les règles BAEL et BPEL du fascicule 62, le DTU "règles AL" relatif aux charpentes en alliage d'aluminium.

Les deux listes sont mises à jour périodiquement par ajout, suppression ou révision de textes. Ces mises à jour, résultant de décrets, sont publiées au Journal Officiel.

Les fascicules du CCTG sont établis à l'initiative de la puissance publique par des groupes de travail réunissant des experts internes ou externes à l'administration. Ce sont des textes interministériels approuvés individuellement par décret. Généralement, une circulaire est publiée ensuite pour préciser les conditions d'application particulières aux ouvrages relevant du ministère de l'Équipement.

Les DTU ont été établis à l'initiative de la profession. Depuis 1990, ils prennent progressivement le statut de normes.

Dans la suite du présent document, "CCTG" désigne, en l'absence de précision contraire, l'ensemble des fascicules et DTU applicables aux travaux de génie civil.

Le CCTG constitue la référence obligatoire pour les marchés publics, c'est à dire les marchés de l'Etat, des collectivités territoriales, et de leurs établissements publics autres que ceux à caractère industriel et commercial.

Il ne constitue pas un règlement au sens strict du terme, c'est à dire s'appliquant à tous : les autres maîtres d'ouvrage ne sont pas tenus de l'appliquer ; ils peuvent l'adapter librement, ou même avoir leur propre "cahier des charges". Par exemple, la SNCF, établissement public à caractère industriel et commercial, applique le CCTG à titre volontaire, et le complète par des "livrets" qui lui sont propres. L'application du CCTG peut être rendue obligatoire par une disposition

particulière d'un contrat. Par exemple, une société titulaire d'une concession est tenue d'appliquer le CCTG si le contrat de concession le prévoit.

Les marchés publics et les autres marchés qui se réfèrent au CCTG peuvent y déroger sur des dispositions particulières.

À l'origine, le CCTG contenait toutes les clauses techniques. C'était un texte autonome, indépendant des normes. Le passage aux normes a été décidé dans les années 70 : les fascicules révisés ont renvoyé systématiquement aux normes françaises sur tous les points où cela était possible. Maintenant, les clauses techniques du CCTG contiennent seulement :

- l'indication des normes à appliquer ;
- les choix à effectuer quand plusieurs possibilités sont proposées à l'intérieur d'une même norme : classes de qualités, spécifications optionnelles...
- les spécifications techniques complémentaires qui peuvent être nécessaires en raison de particularités des ouvrages non prises en compte par les normes.

Le CCTG définit en outre des relations contractuelles entre l'entrepreneur et le maître d'œuvre, en particulier des exigences en matière d'assurance de la qualité.

Dans le domaine concerné par les ponts métalliques, le passage aux normes est pratiquement achevé pour les fascicules traitant des produits de construction et pour ceux traitant de l'exécution des travaux. Pour le calcul, le passage aux normes sera réalisé lorsque les eurocodes relatifs aux ponts seront applicables.

5.1.2 - Les instructions et recommandations techniques

On trouvera en annexe au présent chapitre une liste non exhaustive des instructions et recommandations techniques susceptibles de compléter le CCTG sur des points particuliers concernant les ponts métalliques.

Ces textes sont élaborés par les services techniques du Ministère de l'Équipement, avec l'aide éventuellement de certains organismes de la profession. Suivant leur forme, ils peuvent soit être contractualisés dans les marchés, soit servir de guide pour aider à rédiger des spécifications.

5.1.3 - Les normes

Les normes sont des documents de référence qui permettent de codifier et de rationaliser les spécifications techniques. Elles sont élaborés par des commissions de normalisation composées d'experts des différentes parties concernées, puis soumises à enquête publique auprès de l'ensemble des intervenants, publics et privés.

Les normes, à la différence du CCTG, ne sont donc pas du ressort de l'autorité publique : elles résultent d'un consensus entre industriels et prescripteurs.

La normalisation a pris une importance accrue lorsque la Commission Européenne a décidé de s'appuyer sur les normes pour harmoniser les réglementations techniques en vigueur dans les États membres. L'objectif est de faire disparaître les entraves techniques aux échanges, tout en garantissant la satisfaction aux "exigences essentielles" définies dans les directives européennes.

Il existe plus de 15.000 normes françaises, dont un millier dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. On distingue les trois statuts suivants :

- les normes françaises homologuées : le numéro de la norme est alors précédé du sigle NF ;
- les normes expérimentales : ce statut est attribué à des projets de norme, pendant une période d'épreuve, avant leur mise au point définitive et leur conversion en norme française homologuée ; le numéro est précédé du sigle XP (sans NF) ;
- les fascicules de documentation : ce sont des documents fournissant des indications ou des recommandations sur un sujet technique ; le numéro est précédé du sigle FD (sans NF).

En outre, il existe encore quelques normes qui sont seulement "enregistrées" : ce statut a été supprimé par décret du 26 janvier 1984, mais les normes correspondantes continuent d'être publiées et utilisées, en attendant qu'elles soient remplacées par des normes homologuées ou par des fascicules de documentation. Dans le présent guide, nous n'avons introduit aucune différence de présentation entre les normes homologuées et les normes enregistrées : ces deux catégories de normes sont présentées comme des normes françaises, avec le sigle NF dans les deux cas.

Tous ces documents sont publiés par l'AFNOR.

Beaucoup de normes françaises sont maintenant la reproduction de normes européennes ; le numéro de référence est alors précédé par NF EN. Une norme européenne peut avoir elle-même différentes origines. Elle peut être une norme nouvelle, ou bien être issue par exemple d'une euronorme ou d'une norme ISO. Dans ce dernier cas, le numéro de la norme française est précédé par NF EN ISO.

Il existe deux statuts de norme européenne :

- la norme européenne proprement dite (EN) ;
- la prénorme européenne (ENV).

Les États membres ont l'obligation de convertir les normes EN en normes nationales et, en principe, d'annuler toute autre norme nationale en contradiction. En France, les normes EN deviennent donc des normes françaises homologuées.

Les prénormes ENV n'entraînent qu'une simple obligation de publication. En France, cette publication est faite sous la forme d'une norme expérimentale (XP ENV) ; exceptionnellement, si la prénorme n'est pas encore utilisable dans les marchés (par exemple parce qu'elle se réfère à d'autres normes non encore disponibles en France), elle est publiée dans un premier temps sous la forme d'un fascicule de documentation (FD ENV).

Les normes, dans leur principe, sont d'application volontaire. Pour qu'elles prennent un caractère obligatoire, il faut soit qu'une loi ou un décret l'impose, soit qu'une disposition contractuelle le prévoit.

En France, la législation nationale impose la référence aux normes françaises homologuées pour tous les marchés qui sont soumis au code des marchés publics. Cette obligation concerne donc, comme l'application du CCTG, l'État, les collectivités territoriales, et leurs établissements publics autres que ceux à caractère industriel et commercial. Ainsi, dans le cadre de l'application du code des marchés publics, les dossiers de consultation des entreprises et les documents des marchés doivent spécifier les produits et les prestations par référence aux normes françaises homologuées, s'il en existe dans le domaine concerné.

Pour les marchés non soumis au code des marchés publics, la référence aux normes n'est pas obligatoire en droit. Leur application ne s'impose que si une disposition contractuelle le prévoit explicitement.

Lorsqu'un marché se réfère à une norme française en vigueur qui ne résulte pas encore de la conversion d'une norme européenne, la référence à cette norme doit mentionner la possibilité de la remplacer par une autre norme reconnue équivalente (décret du 18 juillet 1990 [5.2]). Une norme reconnue équivalente est une norme en vigueur dans un autre Etat membre de l'Union Européenne, et qui a fait l'objet d'une reconnaissance entre les instituts nationaux de normalisation ou entre les autorités administratives compétentes. Des indications à ce sujet sont fournies dans la Recommandation T1-99 [5.8].

En ce qui concerne les normes expérimentales, il n'y a pas d'obligation de référence. Bien entendu, les marchés publics peuvent se référer, dans un fascicule du CCTG ou dans les pièces particulières du marché, à celles de ces normes qui seraient utiles aux spécifications. À noter que, dans le cadre des marchés privés, les compagnies d'assurance et les bureaux de contrôle technique ne reconnaissent pas aux normes expérimentales la même valeur qu'aux normes homologuées.

Quant aux fascicules de documentation, ils ne sont pas rédigés sous une forme normative et ne doivent pas, en général, être visés dans les marchés.

Les dérogations aux normes homologuées sont soumises à des règles plus strictes que les dérogations au CCTG : il faut être dans l'un des cinq cas explicitement définis, et l'AFNOR doit être informée (circulaire du 13 février 1991 [5.5], circulaire du 21 janvier 1993 [5.6]).

Les normes qui concernent la construction métallique s'appliquent à une large gamme de constructions, du hangar agricole à l'ouvrage d'art. Leur domaine d'application est donc beaucoup plus étendu que celui des fascicules du CCTG. Pour les adapter aux besoins très différents de chaque maître d'ouvrage, les normes prévoient des classes de qualité, des spécifications optionnelles...

Les normes à appliquer, et les choix à effectuer parmi les classes de qualité et les spécifications optionnelles, sont fixés en partie dans les fascicules du CCTG. Les compléments à spécifier dans les documents particuliers des marchés sont évoquées au chapitre 8.

5.2 - TEXTES SUR LA CONCEPTION ET LE CALCUL DES OUVRAGES

5.2.1 - Fasc. 61, titre II, du CPC : programmes de charges et épreuves des ponts-routes (arrêté ministériel du 28 décembre 1971 modifié par arrêté ministériel du 8 décembre 1980, et circulaires d'application)

Le titre II du fascicule 61 est un document, maintenu en vigueur, de l'ancien CPC ministériel (cahier des prescriptions communes applicables aux marchés de travaux publics relevant des services de l'Équipement). Le titre II ne figure pas dans la liste, publiée par décret, des textes interministériels composant le CCTG.

Le chapitre I définit les valeurs caractéristiques des charges d'exploitation sur les chaussées (pour les portées ne dépassant pas 200 m). Des charges militaires sont également définies. Pour les transports exceptionnels, l'article 10 a été abrogé et remplacé par l'instruction de 1983 [5.10] mentionnée ci-après.

Le chapitre II définit les charges d'exploitation sur les trottoirs.

Le chapitre III fournit, pour les effets du vent, une valeur forfaitaire de pression statique équivalente. Le maître d'œuvre doit apprécier si une telle vérification est suffisante. Lorsqu'un calcul plus scientifique est nécessaire, il convient de viser dans le marché la partie de l'eurocode I relative aux actions du vent, et d'en préciser les modalités d'application.

Le chapitre IV traite les garde-corps et les dispositifs de retenue ; sa rédaction initiale a été modifiée par l'arrêté ministériel du 8 décembre 1980.

Le chapitre V donne des spécifications pour les épreuves.

5.2.2 - Autres textes concernant les actions

Pour les transports exceptionnels sur les ponts-routes, les charges de calcul sont définies dans l'instruction de la Direction des Routes du 20 juillet 1983 et le document annexe "définition des convois types et règles pour la vérification des ouvrages d'art" [5.10].

Pour les charges d'exploitation sur les ponts-rails, des charges de calcul issues des travaux de l'UIC (Union internationale des chemins de fer) sont définies dans un livret de la SNCF.

Pour les chocs de bateaux et de véhicules routiers sur les piles de pont, des forces représentatives sont définies en annexe des règles BAEL et BPEL.

Pour les charges de fatigue, un "camion de fatigue" et d'autres dispositions permettant de représenter les effets du trafic sont définies dans le bulletin "Ponts métalliques et mixtes. Résistance à la fatigue. Guide de conception et de calcul" [5.15].

Pour les effets sismiques, les textes de base sont :

- le décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique : ce décret définit les ouvrages dits "à risque normal" et ceux "à risque spécial", et indique le zonage sismique de la France ;
- l'arrêté interministériel du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux ponts de la catégorie dite "à risque normal".

L'arrêté prescrit d'appliquer, pour la conception et le dimensionnement, l'un des deux textes suivants :

- Guide AFPS 1992 pour la protection parasismique des ponts [5.12].
- ENV 1998-2 (eurocode 8 - conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme - partie 2 : ponts), et son document d'application nationale.

Pour les ponts-rails, il existe des règles complémentaires de la SNCF.

5.2.3 - Fascicule 61, titre V, du CPC : conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier (décret du 22 juin 1977, circulaire d'application du 18 février 78)

Le titre V du fascicule 61 est issu de l'ancien cahier interministériel des prescriptions communes : il figure dans la liste, publiée par décret, des textes composant le CCTG.

La majeure partie du titre V est en fait antérieure à 1977, date du décret. Du fait de son ancienneté, il nécessite de nombreux compléments qui sont fournis par les normes de calcul (voir ci-après), par des documents-guides, et par des clauses à insérer dans les documents particuliers des marchés.

5.2.4 - Règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton

(instruction technique du Conseil Général des Ponts et Chaussées du 21 juillet 1981)

Il s'agit d'un texte du ministère de l'Équipement, qui fournit des règles de calcul spécifiques au ponts mixtes, en complément du fascicule 61, titre V, du CCTG. Bien entendu, le mot "règlement" ne signifie pas qu'il s'agit d'un règlement au sens strict du terme, c'est à dire d'un texte législatif ou réglementaire s'imposant à tous.

Les règles fournies concernent notamment le calcul des sollicitations, les vérifications des contraintes maximales en état-limite de service, les vérifications de la résistance en état-limite ultime, et les vérifications de la connexion en état-limite de service, en état-limite ultime et en fatigue.

Les vérifications au voilement sont les mêmes que celles du titre V, mais transposées à l'état-limite de service. Ce changement, purement formel, est dû au fait que les vérifications sont basées directement sur la théorie des contraintes critiques ; or, cette théorie n'a pas de sens pour les sections mixtes à l'état-limite ultime dont la plastification est autorisée sous moments positifs.

Pour le calcul des dalles en béton sous charges locales, il est renvoyé aux règlements de calcul de béton armé ou de béton précontraint.

Les règles de conception et de calcul du ferrailage des dalles en état limite de service ont été complétées dans les "Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles" [5.14].

Pour les ponts à poutrelles enrobées, des règles propres à ce type d'ouvrage sont fournies dans le bulletin "Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées, conception et calcul" [5.13].

5.2.5 - Normes de calcul

Les normes de conception et de calcul actuellement en vigueur concernent les assemblages. Il s'agit encore de normes d'origine nationale :

NF P 22-430 : assemblages par boulons non précontraints - dispositions constructives et calcul des boulons

NF P 22-460 : assemblages par boulons à serrage contrôlé - dispositions constructives et vérification des assemblages

NF P 22-470 : assemblages soudés - dispositions constructives et justification des soudures

La coexistence de ces normes avec le fascicule 61, titre V, du CCTG, ne pose habituellement pas de problème : les normes ne présentent pas de divergence importante avec le CCTG, tout en étant plus précises que celui-ci.

Ni la norme NF P 22-470, ni le CCTG ne traitent les vérifications à la fatigue. Des clauses pour le calcul des ponts-routes à la fatigue sont fournies dans l'annexe 4 du guide "Fatigue" [5.15], qui se réfère à l'eurocode 3 pour le classement des détails constructifs.

À terme, tous les textes actuels sur les règles de calcul seront remplacés par des eurocodes. Les eurocodes concernant les ponts métalliques et les ponts mixtes sont les suivants :

Eurocode 1 : bases de calcul et actions sur les structures

- partie 1 : bases de calcul
- partie 2-1 : poids volumiques, poids propres et charges d'exploitation
- partie 2-4 : actions du vent
- partie 2-5 : actions thermiques
- partie 2-6 : actions en cours d'exécution
- partie 3 : charges sur les ponts dues au trafic

Eurocode 3 : calcul des structures en acier

- partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
- partie 1-5 : règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan
- partie 1-7 : règles supplémentaires pour les plaques planes chargées hors de leur plan
- partie 1-8 : assemblages
- partie 1-9 : résistance à la fatigue
- partie 2 : ponts en acier

Eurocode 4 : calcul des structures mixtes acier-béton

- partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
- partie 2 : ponts mixtes

Eurocode 8 : conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes

- partie 1-1 : règles générales - actions sismiques et prescriptions générales pour les structures
- partie 2 : ponts

Cette liste est susceptible d'évoluer.

Lors de la rédaction du présent guide, les parties dont l'élaboration est la plus avancée sont publiées en France avec un document d'application nationale, sous le statut de norme expérimentale. Elles ne sont visées actuellement dans aucun fascicule du CCTG : elles ne sont donc applicables dans le cadre d'un marché public que si le CCTP ou le CCAP le prévoit explicitement.

5.3 - TEXTES SUR LES PRODUITS DE CONSTRUCTION

5.3.1 - Fascicule 4, titre III, du CCTG : aciers laminés pour constructions métalliques

Lors de la rédaction du présent guide, une version révisée du fascicule 4, titre III, est sur le point d'être substituée à la version précédente accompagnant le décret du 24 juillet 1975. C'est le projet daté d'octobre 1998 de cette nouvelle version qui est évoquée ici.

Le nouveau fascicule doit s'appliquer aux ouvrages de génie civil et aux bâtiments, en distinguant deux catégories :

- les ouvrages d'art et les bâtiments non courants ;
- les bâtiments courants.

Pour la première catégorie, qui seule nous intéresse ici, l'article 4 impose d'utiliser uniquement des produits certifiés.

L'article 6 arrête certaines dispositions pour lesquelles les normes laissent un choix. Ces dispositions concernent notamment :

- le respect de la valeur maximale du carbone équivalent, et l'obligation d'indiquer les teneurs en éléments d'addition entrant dans la formule ;
- le contrôle des caractéristiques mécaniques ;
- les conditions à respecter vis-à-vis des défauts de surface et des défauts internes ;
- les tolérances géométriques (spécification des classes de tolérance pour l'épaisseur et la planéité des tôles ; référence à la norme XP P 22-810 pour les tolérances géométriques des poutrelles et des profils creux).

Le projet de texte rappelle par ailleurs les caractéristiques technologiques optionnelles des normes qui ne sont nécessaires que dans des cas particuliers, et qui ne peuvent donc être spécifiées qu'au cas par cas, dans les marchés : par exemple, ductilité dans le sens de l'épaisseur, aptitude à la galvanisation à chaud...

Pour l'aptitude au soudage, qui ne résulte pas de la seule conformité aux normes, le texte renvoie à la certification des produits.

L'article 7 définit le marquage des produits, les contrôles spécifiques, et les documents de contrôle à fournir avec les produits.

5.3.2 - Normes sur les aciers laminés

Les aciers laminés utilisés pour la construction des ponts métalliques sont définis dans les trois normes de base suivantes :

NF EN 10025 : produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés

- partie 1 : conditions générales de livraison
- partie 2 : conditions techniques de livraison pour les produits plats
- partie 3 : conditions techniques de livraison pour les produits longs

NF EN 10113 : produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins

- partie 1 : conditions générales
- partie 2 : aciers à l'état normalisé
- partie 3 : aciers obtenus par laminage thermomécanique

NF EN 10155 : aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Ces trois normes spécifient la composition chimique et les caractéristiques mécaniques :

- limite d'élasticité R_{eH} (valeur minimale)
- résistance à la traction R_m (valeur minimale et valeur maximale)
- allongement à la rupture A (valeur minimale)
- énergie de rupture en flexion par choc (valeur minimale).

Les aciers dits "autopatinables" définis dans la dernière de ces trois normes sont soumis à des restrictions d'utilisation sur le réseau routier national (voir les "Recommandations relatives à l'utilisation d'aciers de construction à résistance améliorées à la corrosion atmosphérique" [5.11]).

La norme NF EN 10025 est actuellement en cours de révision. La norme révisée regroupera dans ses différentes parties les différents aciers de construction existants.

Certaines spécifications ou options des normes de base sont définies par référence à d'autres normes. On peut citer notamment :

NF EN 10163 : conditions de livraison relatives à l'état de surface des tôles, larges-plats et profilés en acier laminés à chaud - parties 1 à 3

Cette norme définit des classes de qualité de l'état de surface et, pour chacune de ces classes, les imperfections admissibles. Les classes requises pour les ponts sont spécifiées dans le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG.

NF EN 10164 : aciers de construction à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface du produit

Cette option est à spécifier lorsqu'il existe un risque d'arrachement lamellaire (voir 1.4.4 ci-avant).

NF EN 10238 : produits en aciers de construction grenailés et prépeints par traitement automatique

NF A 35-503 : produits sidérurgiques - aciers pour galvanisation par immersion à chaud

Cette norme prévoit trois classes de galvanisation, selon l'épaisseur de protection souhaitée. À chaque classe correspondent des spécifications relatives à la composition chimique des aciers, concernant notamment les teneurs en silicium et en phosphore.

Les normes qui viennent d'être citées concernent aussi bien les tôles que les poutrelles. D'autres normes, spécifiques à chaque type de produit, définissent les dimensions, la forme, les tolérances.

Pour les tôles, ces normes sont :

NF EN 10029 : tôles en acier laminées à chaud, d'épaisseur égale ou supérieure à 3 mm - tolérances sur les dimensions, la forme et la masse

NF A 36-270 : tôles profilées en long

La norme NF EN 10029 prévoit quatre classes de tolérance sur l'épaisseur (A, B, C, D) et deux classes de tolérance sur la planéité (normale et spéciale). Le fascicule 66 (article 11.2.2) et le futur fascicule 4, titre III (article 5.4) spécifient la classe requise.

La norme NF A 36-270 définit les tôles d'épaisseur variable et fournit les adaptations nécessaires permettant l'application des normes de base.

Pour les poutrelles, diverses normes définissent les dimensions des sections.

Les tolérances sont définies dans la norme :

NF EN 10034 : poutrelles en I et H en acier de construction - tolérances de forme et dimensions

La norme expérimentale XP P 22-810 fournit des compléments à cette norme pour le domaine des ouvrages d'art.

Les profils creux sont hors du domaine des trois normes de base indiquées ci-dessus. Ceux utilisables en génie civil sont définis dans la norme :

NF EN 10210 : profils creux pour la construction finis à chaud en aciers de construction non alliés et à grains fins

- partie 1 : conditions techniques de livraison

- partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques du profil.

La norme expérimentale XP P 22-810 complète la partie 2.

5.3.3 - Normes sur les produits consommables pour soudage

Les produits consommables pour soudage (électrodes enrobées, fils électrodes, gaz de protection, flux...) ne font l'objet actuellement, en tant que produits, d'aucun fascicule du CCTG. Ils sont définis dans un ensemble de normes d'origine européenne fixant les caractéristiques géométriques, physiques, mécaniques, le type d'enrobage ou de garniture... (voir [5.16] ou [5.17]).

Le fascicule 66 du CCTG (article II.5) définit les règles générales de compatibilité de ces produits avec les aciers de base.

5.3.4 - Fascicule 4, titre IV, du CCTG : rivets en acier et boulonnerie à serrage contrôlé destinée à l'exécution des constructions métalliques (décret du 29 mars 1983)

Ce fascicule renvoie aux normes pour les spécifications des produits et les conditions de livraison.

Pour les boulons à haute résistance (ou boulons à serrage contrôlé), il impose à l'entrepreneur de choisir un fournisseur titulaire du droit d'usage de la marque NF. Le fournisseur doit effectuer un contrôle spécifique des boulons et délivrer un certificat de contrôle (appelé maintenant certificat de réception, suivant la norme NF EN 10204).

5.3.5 - Normes sur les boulons

Les boulons ordinaires, ou boulons d'usage général, sont définis dans la norme :

NF EN 20898 : caractéristiques mécaniques des éléments de fixation

- partie 1 : boulons, vis et goujons

- partie 2 : écrous avec charges d'épreuve spécifiées - filetage à pas gros.

Les boulons à haute résistance (ou boulons à serrage contrôlé) sont définis dans des normes qui sont encore purement nationales, lors de la rédaction du présent document :

NF E 27-701 : spécifications techniques - conditions de commande, de contrôle et de livraison

NF E 27-702 : essai d'aptitude à l'emploi des boulons

NF E 27-711 : boulons à tête hexagonale - dimensions et tolérances

5.3.6 - Norme sur les goujons de connexion

Les goujons utilisés comme connecteurs dans les ponts mixtes sont définis dans la norme :

NF E 25-140 : goujons connecteurs à souder à l'arc

Cette norme définit les caractéristiques dimensionnelles et mécaniques des goujons jusqu'à 22 mm de diamètre, ainsi que la nuance et la composition chimique de l'acier d'origine.

5.3.7 - Normes sur les autres produits en acier

Les pièces en acier moulé font l'objet de la norme :

NF EN 1559 : fonderie - conditions techniques de fourniture

- partie 1 : généralités

- partie 2 : spécifications complémentaires pour les pièces moulées en acier.

Les fils, clairs ou revêtus de zinc, utilisés dans les câbles pour ponts suspendus ou à haubans, sont définis actuellement dans la norme :

NF A 47-242 : fils destinés aux câbles pour appareils de remontées mécaniques et structures suspendues

5.4 - TEXTES SUR L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

5.4.1 - Fascicule 56 du CCTG : protection des ouvrages métalliques contre la corrosion (décret du 25 février 1986)

Le fascicule est applicable aux travaux neufs et aux travaux d'entretien. Les subjectiles traités sont l'acier (à l'exclusion des aciers autopatinables), le fer et la fonte.

Les procédés traités sont :

- mise en peinture sur acier nu ;
- mise en peinture sur acier grenailé et prépeint ;
- métallisation au pistolet sur acier nu suivie de mise en peinture ;
- galvanisation à chaud ;
- galvanisation à chaud suivie de mise en peinture ;
- zingage électrolytique.

Outre l'exécution, le fascicule traite les produits. Dans le cas des peintures, il définit :

- les systèmes de peinture de type A, qui doivent être certifiés ;
- les systèmes de peinture de type B, non certifiés, soumis à une épreuve d'étude et à un contrôle ;
- les systèmes de peinture de type C, soumis simplement à l'acceptation du maître d'œuvre.

La réédition de 1995 autorise les peintures en poudres thermodurcissables, dont la mise en œuvre nécessite le passage des pièces dans un four (commentaire de l'article 2).

Pour chaque système de protection, des garanties sont définies, portant sur :

- l'efficacité de la protection contre la corrosion, qui concerne toutes les surfaces à protéger ;
- l'aspect, pour lequel certaines garanties portent sur toutes les surfaces à protéger, et d'autres uniquement sur les surfaces définies dans le marché comme surfaces vues.

Des normes de référence sont citées en commentaires. Leur liste est récapitulée dans l'annexe VI du fascicule.

Le fascicule 56 vient d'être mis en révision lors de la rédaction du présent document.

5.4.2 - Normes sur la protection contre la corrosion

Les normes visées dans le fascicule 56 du CCTG sont des normes d'origine française. Depuis la rédaction de ce fascicule, plusieurs normes nouvelles ont été publiées, dont une norme d'origine ISO dont les huit parties traitent de l'ensemble du domaine de la protection anticorrosion des structures métalliques par peinture :

NF EN ISO 12944 : peintures et vernis - anticorrosion des structures en acier
par systèmes de peinture (indice de classement : T 34-555).

Partie 1 : introduction générale	Définit le domaine d'application et quelques termes de base, concernant notamment les notions de durabilité haute, moyenne et basse
Partie 2 : classification des environnements	Présente un système de classification des environnements atmosphériques (6 catégories) et immergés ou enterrés (3 catégories)
Partie 3 : conception et dispositions constructives	Fournit des indications sur la manière de limiter le risque de corrosion par des dispositions de conception de la structure
Partie 4 : types et préparation de surface	Décrit les types de surface du domaine de la norme, les méthodes de préparation et d'évaluation du résultat à obtenir
Partie 5 : systèmes de peinture	Donne quelques termes et définitions relatifs aux systèmes de peinture avec des indications sur le choix des différents type de systèmes
Partie 6 : essais de performance en laboratoire	Présente une procédure permettant de choisir des systèmes de peinture en fonction de leur performance lors d'essais en laboratoire
Partie 7 : exécution et surveillance des travaux de peinture	Traite de la façon dont les travaux de peinture doivent être exécutés et surveillés
Partie 8 : développement de spécification pour travaux neufs et d'entretien	Guide ayant pour objet de faciliter l'élaboration d'une spécification pour la protection contre la corrosion.

Cette norme sera, bien entendu, prise en compte lors de la révision du fascicule 56 du CCTG. Complétée et précisée par la série des normes NF T 34-550 à NF T 34-600, elle constitue le référentiel normatif de certification des systèmes de peinture par l'ACQPA.

Parmi les autres normes récentes, il convient de citer aussi :

NF T 34-554 : systèmes de peinture anticorrosion - stabilité dans le temps
des caractéristiques colorimétriques d'une peinture de finition
pour ouvrage métallique

partie 1 : critères de performance

partie 2 : détermination sur ouvrage en service

Cette norme est utilisée pour définir les garanties de stabilité de la couleur des couches de finition, et fait partie également du référentiel de certification de l'ACQPA.

5.4.3 - Fasc. 66 du CCTG : exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier (décret du 11 octobre 1993, circulaire d'application du 31 janvier 1994)

Ce fascicule traite la construction des ouvrages neufs. Il ne s'applique pas, sans adaptations, aux travaux de réparations ou de transformation.

Les ouvrages concernés sont :

- les ponts-routes, les ponts-rails, les passerelles pour piétons et cycles, etc. ; les tabliers peuvent être entièrement en acier ou bien mixtes (acier-béton)
- les autres ouvrages de génie civil en acier tels que les portes d'écluse, les vannes et structures de barrages...

Le fascicule spécifique notamment :

- la qualité des aciers parmi celles définies dans les normes de produits ;
- la nature et certaines caractéristiques des produits pour soudage, en vue d'assurer leur compatibilité avec l'acier de base ;
- le classement de base des assemblages soudés parmi les trois classes de qualité définies dans la norme NF P 22-471 (un surclassement peut être spécifié dans les marchés pour les cas particuliers) ;
- le type et la classe des boulons à utiliser dans les assemblages boulonnés ;
- certaines dispositions constructives des dalles de ponts mixtes.

Pour les dalles de ponts mixtes, ces dispositions du fascicule ont été complétées dans les "Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles" [5.14], déjà mentionnées à propos du calcul.

Outre ces spécifications techniques, le fascicule 66 contient diverses clauses concernant les relations entre les parties, l'assurance de la qualité..., sur des points tels que :

- les documents d'exécution à fournir par l'entrepreneur
- le contenu du plan d'assurance de la qualité
- le rôle de l'agent de l'entreprise responsable des opérations de montage ("ROM")
- la définition des prestations.

5.4.4 - Normes d'exécution des ouvrages

Normes de base

Les normes de base en vigueur actuellement sont des normes de la série P 22 concernant la préparation des pièces en atelier et l'exécution des assemblages. Elles sont toutes visées dans le fascicule 66, et récapitulées dans une annexe contractuelle du fascicule.

Assemblages boulonnés non précontraints :

NF P 22-431 : exécution des assemblages

Assemblages boulonnés précontraints :

NF P 22-462 : usinage et préparation des assemblages

NF P 22-463 : exécution des assemblages

NF P 22-464 : programme de pose des boulons

NF P 22-466 : méthode de serrage et de contrôle des boulons

NF P 22-468 : serrage par rotation contrôlée de l'écrou - détermination de l'angle de rotation

Assemblages soudés :

NF P 22-471 : fabrication

NF P 22-472 : qualification d'un mode opératoire de soudage

NF P 22-473 : étendue des contrôles non destructifs

Préparation des pièces et tolérances dimensionnelles :

NF P 22-800 : préparation des pièces en atelier

XP P 22-810 : ouvrages d'art - tolérances dimensionnelles

Le dernier document cité (norme expérimentale sur les tolérances dimensionnelles des ouvrages) lève certaines options des normes NF EN 10029 et NF EN 10034 pour les tôles et les poutrelles utilisées dans les ouvrages d'art. Il fixe des tolérances complémentaires pour la préparation des assemblages soudés, pour les pièces élémentaires soudées, pour les dispositions des zones d'appui des poutres, et pour les ouvrages terminés, y compris ceux à poutres-caissons ou à dalles orthotropes.

Toutes les normes d'exécution qui viennent d'être citées sont encore d'origine nationale. Elles doivent être remplacées prochainement par une norme en plusieurs parties, transposée d'une norme européenne existant actuellement à l'état de prénorme, l'ENV 1090. L'AFNOR a déjà publié, à partir de la partie 1 de cette prénorme, deux documents concernant les travaux de bâtiment. Ces deux documents portent le même titre, mais ont un numéro de référence distinct :

FD ENV 1090 : exécution des structures en acier

- partie 1 : règles générales et règles pour les bâtiments.

XP P 22-501 : exécution des structures en acier

- partie 1 : règles générales et règles pour les bâtiments.

Le premier document (fascicule de documentation) est la traduction en français de la prénorme européenne, et porte donc le même numéro de référence.

Le second document (norme expérimentale) diffère du premier par des adaptations qui ont été introduites pour l'application nationale. Ces adaptations ne sont pas signalées (comme dans les normes expérimentales issues des eurocodes) ; c'est pourquoi le numéro de référence est distinct de celui de la prénorme européenne.

L'ENV 1090 comporte aussi une partie 5, contenant les règles supplémentaires pour les ponts. Ce texte nécessite de nombreuses adaptations avant d'être utilisable en France.

Autres normes d'exécution dans le domaine du soudage :

Il s'agit de normes récentes, d'origine européenne pour la plupart.

La qualification des soudeurs et la qualification des modes opératoires font l'objet des deux normes :

NF EN 287 : épreuve de qualification des soudeurs - soudage par fusion

- partie 1 : aciers

NF EN 288 : descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques

- partie 1/A1 : règles générales pour le soudage par fusion
- partie 2/A2 : descriptif d'un mode opératoire de soudage pour le soudage à l'arc
- partie 3/A3 : épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage à l'arc sur acier.

Le domaine d'application de la norme NF EN 288 est général. La partie 3 de cette norme est précisée, dans le domaine particulier de la construction métallique, par la norme NF P 22-472, révisée en 1994.

Ces normes, qui ne sont pas visées dans le fascicule 66 du CCTG, doivent l'être dans les documents particuliers des marchés.

Le cas des goujons de connexion est traité dans deux normes expérimentales d'origine nationale :

XP A 89-020 : épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage électrique à l'arc des éléments de fixation

- partie 1 : goujons connecteurs soumis à la fatigue dans les ouvrages d'art.

XP A 89-021 : soudage électrique à l'arc des éléments de fixation

- partie 1 : goujons connecteurs de diamètre supérieur ou égal à 6 mm.

Le premier document est visé dans le fascicule 66 du CCTG ; le second, plus récent que le fascicule, n'y figure pas.

Les procédés de contrôle non destructifs font maintenant l'objet d'un ensemble de normes d'origine européenne.

Les méthodes elles-mêmes sont définies dans les normes :

NF EN 970 : contrôle visuel des assemblages soudés

NF EN 571 : examen par ressuage

NF EN 1290 : contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés

NF EN 1435 : contrôle par radiographie des assemblages soudés

NF EN 1714 : contrôle par ultrasons des assemblages soudés

Un autre ensemble de normes définit, pour chaque procédé, les niveaux d'acceptation. On en trouvera la liste par exemple dans [5.17].

Références du chapitre 5

Textes sur le statut de la normalisation en France et sur la référence aux normes dans les marchés publics

- [5.1] - **Décret n° 84-74 du 26 janvier 1984 fixant le statut de la normalisation** (J.O. du 1^{er} février 1984).
- [5.2] - **Décret n° 90-653 du 18 juillet 1990 modifiant le décret n° 84-74 du 26 janvier 1984 fixant le statut de la normalisation** (J.O. du 25 juillet 1990).
- [5.3] - **Décret n° 91-283 du 19 mars 1991 modifiant le décret n° 84-74 du 26 janvier 1984 fixant le statut de la normalisation** (J.O. du 20 mars 1991).
- [5.4] - **Décret n° 93-1235 du 15 novembre 1993 modifiant le décret n° 84-74 du 26 janvier 1984 fixant le statut de la normalisation** (J.O. du 17 novembre 1993).
- [5.5] - **Circulaire du 13 février 1991 relative à la référence aux normes dans les marchés publics** (J.O. du 16 février 1991).
- [5.6] - **Circulaire n° 93-01 du 21 janvier 1993 relative aux dérogations aux normes dans les marchés publics.**
- [5.7] - **Circulaire du 5 juillet 1994 relative à la référence aux normes dans les marchés publics.**
- [5.8] - **Recommandation aux maîtres d'ouvrage publics, relative à l'utilisation des normes et des certifications, et à l'appréciation des équivalences.** (Recommandation n° T1-99 du Groupe permanent d'étude des marchés "Travaux et maîtrise d'œuvre", adoptée le 7 octobre 1999 par la Commission centrale des marchés).

Instructions et recommandations techniques (liste non exhaustive)

- [5.9] - **Instruction technique “règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton”** (Conseil Général des Ponts et Chaussées, 21 juillet 1981).
- [5.10] - **Instruction sur les transports exceptionnels et document annexe : “définition des convois types et règles pour la vérification des ouvrages d’art”** (Direction des Routes, 20 juillet 1983).
- [5.11] - **Recommandations relatives à l’utilisation d’aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique** (Direction des Routes, 26 septembre 1985).
- [5.12] - **Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts** (Association française de génie parasismique, Presses de l’ENPC, 1995).
- [5.13] - **Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées, conception et calcul** (SETRA-SNCF, mai 1995).
- [5.14] - **Ponts mixtes. Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles** (SETRA, septembre 1995).
- [5.15] - **Ponts métalliques et mixtes. Résistance à la fatigue. Guide de conception et de justifications** (SETRA, CTICM, SNCF, 1996).

Liste des textes

- [5.16] - **Ouvrages d’art. Répertoire des textes et documents techniques essentiels** (SETRA, édition annuelle).
- [5.17] - **Liste des documents normatifs et recommandations en construction métallique** (J.-P. Pescatore, BNCM, liste mise à jour périodiquement dans la revue Construction métallique éditée par le CTICM).

Où se procurer les documents :

- **J.O., fascicules du CCTG** : Journaux officiels, 26, rue Desaix, 75727 Paris Cedex 15.
- **Normes** : AFNOR, tour Europe, 92049 Paris La Défense cedex.
- **Instructions et recommandations techniques** : SETRA, bureau de vente des publications, 46, avenue Aristide Briand, 92225 Bagneux.
- **Guide AFPS 92** : Presses de l’ENPC, 49, rue de l’Université, 75007 Paris.
- **Revue Construction métallique** : CTICM, Domaine de Saint-Paul, 78470 Saint-Rémy-Lès-Chevreuse.

CERTIFICATIONS



SOMMAIRE

6 - CERTIFICATIONS

6.1	Principes de la certification	149
6.2	La certification des aciers laminés	151
6.3	La certification des boulons à haute résistance	151
6.4	La certification des agents de contrôle des soudures par procédés non destructifs	152
6.5	Les certifications dans le domaine de la protection contre la corrosion par peintures	153
6.5.1	Les certifications ACQPA	153
6.5.2	La certification des systèmes de peinture	153
6.5.3	La certification des opérateurs	154
6.5.4	La certification des inspecteurs	155
6.6	Autres types de certifications	155
	<i>Références du chapitre 6</i>	157

Page laissée blanche intentionnellement

CERTIFICATIONS

6



6.1 - PRINCIPES DE LA CERTIFICATION

Le cadre juridique et réglementaire de la certification a été défini en France par la loi du 3 juin 1994 [6.1] et par son décret d'application du 30 mars 1995 [6.2].

La certification peut s'appliquer à des produits industriels ou à des services. C'est une procédure par laquelle un organisme distinct du fabricant, du distributeur, ou du prestataire, atteste qu'un produit ou un service est conforme à des caractéristiques décrites dans un référentiel, et qu'il fait l'objet de contrôles.

La certification présente un caractère volontaire : c'est le fabricant (ou le distributeur, ou le prestataire) qui en fait la demande.

Lors de la demande de certification, l'organisme certificateur instruit la demande selon les étapes suivantes, dans le cas d'un produit :

- analyses et essais en laboratoire pour vérifier la conformité du produit au référentiel de certification ;
- inspection du site de production pour évaluer les moyens de production, et audit du système de contrôle et d'assurance de la qualité du demandeur ;
- décision d'accorder la certification.

Après que la certification a été accordée, le fabricant doit assurer un contrôle régulier de sa production, et enregistrer les résultats.

De son côté, l'organisme certificateur procède régulièrement à des essais de produits prélevés en usine ou dans le commerce, ainsi qu'à des inspections inopinées en usine : la surveillance ne se borne pas à un contrôle du produit fini, elle porte aussi sur le processus de fabrication. En cas d'anomalie, l'organisme peut prononcer des sanctions pouvant aller jusqu'au retrait de la certification.

La certification inclut généralement le droit d'usage d'une marque, que le titulaire s'engage à apposer sur le produit pour attester que celui-ci est certifié.

Le référentiel est un document technique définissant les caractéristiques que doit présenter le produit ou le service, et les modalités du contrôle de la conformité de ces caractéristiques.

Le référentiel s'appuie sur des normes ; il peut aussi comporter des exigences supplémentaires. C'est le cas par exemple de l'aptitude au soudage des produits en acier (voir en 6.2 ci-après). Ces

exigences supplémentaires doivent permettre de satisfaire à des catégories de besoins que les normes ne prennent pas en compte ; elles ne sont pas destinées à imposer des règles particulières à un client ou à une administration.

L'organisme certificateur doit être impartial, donc indépendant du fabricant et de l'acheteur : c'est le principe de la certification par "tiers partie". Il est également indépendant de l'autorité administrative. En France, il s'agit assez souvent de l'AFNOR, ou d'un organisme mandaté par l'AFNOR. La marque de certification est alors la marque NF.

L'organisme certificateur peut être accrédité par le COFRAC (Comité français d'accréditation), qui est une association privée.

Une instance consultative, appelée "comité particulier" dans le cas de l'AFNOR, est constituée pour chaque secteur d'application. Ce comité, qui siège au sein de l'organisme certificateur, est composé de membres représentant les différentes parties concernées : fabricants, distributeurs, utilisateurs, organismes techniques, administrations. Il est chargé de donner un avis sur le projet de règlement d'application, sur les révisions du règlement approuvé, sur les décisions à prendre en application du règlement (attribution, suspension et retrait des certifications, traitement des contestations), sur le choix des laboratoires et organismes d'inspection et d'audit, sur l'application des accords de reconnaissance...

Ces comités constituent aussi un lieu de réflexion et de dialogue régulier entre les différents partenaires sur l'analyse des incidents, les critères d'appréciation de la conformité, les normes, etc.

Les certifications permettent ainsi d'améliorer la qualité des produits. Elles permettent aussi de supprimer les inconvénients des contrôles et réceptions en usine : frais pour le client et augmentation du délai de livraison en cas de résultat négatif, aléas pour le fournisseur à cause d'un nombre d'essais nécessairement plus réduit que dans le cas de la certification.

Les certifications basées sur ces principes sont compatibles avec les directives visant à supprimer les "entraves techniques" aux échanges dans l'Union Européenne, à condition que soient acceptées les certifications équivalentes, comme dans le cas des normes (voir l'article 389 du code des marchés publics).

La Recommandation T1-99 [6.3] donne des indications générales sur l'appréciation des équivalences en matière de certification. Dans le cas des aciers laminés, le projet de titre III révisé (annexe A2) du fascicule 4 du CCTG définit des critères pour l'appréciation de l'équivalence à la certification NF-Acier.

Les certifications ont remplacé les anciennes procédures appelées "agrément" ou "homologations". Celles-ci, destinées uniquement aux marchés publics, étaient délivrées sous l'égide de l'Etat par des commissions ministérielles ou interministérielles, ce qui n'est plus conforme au principe d'indépendance exigé maintenant. Le référentiel était généralement constitué par des spécifications émanant de l'administration (un fascicule du CCTG), et non par des normes, ce qui également n'est plus conforme aux principes actuels.

Des certifications du type qui vient d'être défini existent maintenant dans des domaines très divers. Des exemples spécifiques à la construction métallique, et applicables aux ponts, sont décrits ci-après. Ils concernent les aciers laminés, les boulons à haute résistance, les agents effectuant des contrôles non destructifs de soudures, le domaine des peintures anticorrosion. Il n'existe pas, actuellement, de certification pour les produits consommables pour soudage.

6.2 - LA CERTIFICATION DES ACIERS LAMINÉS

Une certification des produits en acier, avec droit d'usage de la marque NF-acier, a été instituée par l'AFNOR pour différents secteurs d'utilisation.

Les ponts métalliques sont concernés par le secteur "bâtiment - travaux publics - construction métallique d'ouvrages d'art et de bâtiments non courants".

Cette certification s'est substituée aux agréments qui étaient accordés par la CIPACAS (Commission interministérielle permanente d'agrément et de contrôle des aciers soudables).

Les aciers laminés ainsi certifiés, ou ceux couverts par une certification reconnue équivalente, sont normalement les seuls à pouvoir être utilisés pour les ouvrages d'art (projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG). Cette obligation s'applique à toutes les nuances et qualités d'acier.

La certification et le droit d'usage de la marque sont délivrés à une usine ou à un centre distributeur déterminé, pour un produit défini par ses caractéristiques géométriques (y compris la classe de tolérance), et constitué d'un acier de nuance et de qualité données. La certification d'un produit dans une nuance et une qualité d'acier entraîne automatiquement la certification de ce produit dans les nuances moins performantes et les qualités moins nobles, pour le même état de livraison et la même limite d'épaisseur maximale certifiée.

Le règlement de la certification [6.5] fixe la liste des normes applicables, ainsi que les essais à effectuer.

Les essais à effectuer lors de la demande d'admission portent sur :

- les propriétés courantes : analyse chimique, essai de traction, essai de flexion par choc ;
- l'aptitude au soudage : essai de fissuration sur implant, courbe de variation de la dureté en fonction du paramètre de refroidissement en condition de soudage, courbes de variation de l'énergie de rupture en flexion par choc en fonction de la température ;
- l'absence de défauts préjudiciables à l'emploi : contrôle aux ultrasons.

Les essais à effectuer lors des contrôles périodiques portent uniquement sur les propriétés courantes.

Par ailleurs, les résultats des essais effectués par l'entrepreneur au titre de son contrôle intérieur doivent être transmis périodiquement à l'organisme d'inspection de l'AFNOR.

6.3 - LA CERTIFICATION DES BOULONS À HAUTE RÉSISTANCE

Une certification des boulons à haute résistance (ou boulons à serrage contrôlé), avec droit d'usage de la marque NF-Boulons à serrage contrôlé, a été instituée par l'AFNOR dans les années 80.

Les produits ainsi certifiés (ou ceux couverts par une certification reconnue équivalente) sont les seuls à pouvoir être utilisés pour les assemblages boulonnés précontraints des ponts (CCTG, fascicule 4, titre IV, article 5).

La certification et le droit d'usage de la marque sont délivrés à un producteur ou à un centre distributeur déterminé pour un produit issu d'une unité de fabrication déterminée, et défini par des références commerciales et des caractéristiques techniques précises. Le producteur ne peut donc pas fournir sous la même référence commerciale un produit certifié et un produit non certifié.

Les produits certifiés peuvent être identifiés facilement par leur marquage : la mention "NF" sur les vis, les écrous et les rondelles est ajoutée aux indications définies dans la norme NF E 27-701.

Le règlement de la certification [6.6] fixe, entre autres points, la liste des normes applicables, ainsi que la liste des essais à effectuer lors de la demande d'admission et lors des contrôles périodiques.

Ces essais portent sur :

- les propriétés mécaniques de chaque composant (vis, écrou, rondelle) ;
- l'aptitude à l'emploi de l'ensemble du boulon ; cet essai fournit par exemple la valeur du coefficient de rendement du couple de serrage, qui est utilisée pour régler la force de serrage de l'outil de pose.

L'AFNOR a institué également, en 1998, une certification des boulons ordinaires. Elle ne concerne pas les parties structurales des ponts, l'usage de ces boulons n'étant pas admis.

6.4 - LA CERTIFICATION DES AGENTS DE CONTRÔLE DES SOUDURES PAR PROCÉDÉS NON DESTRUCTIFS

La norme NF P 22-471 prévoit que les contrôles non destructifs des soudures soient confiés à des agents certifiés (qu'ils appartiennent ou non à l'entreprise). Elle renvoie à la norme NF EN 473 pour les conditions de la certification.

La certification d'un contrôleur est prononcée à l'issue d'un examen comportant des épreuves écrites et des épreuves pratiques.

En France, les centres chargés des examens et de la délivrance des certificats sont autorisés et contrôlés par la COFREND (Confédération française pour les essais non destructifs).

Une certification est valide pour une ou plusieurs méthodes de contrôle non destructif, pour un certain secteur de construction, et pour un niveau de compétence déterminé (1, 2 ou 3). Ce niveau détermine les tâches que l'agent de contrôle est autorisé à effectuer.

Un agent certifié de niveau 1 peut effectuer des contrôles sous la direction d'un agent certifié de niveau 2 ou 3.

Un agent certifié de niveau 2 peut choisir le procédé à utiliser, surveiller les essais, interpréter les résultats, rédiger les rapports d'essai...

Un agent certifié de niveau 3 peut effectuer toute opération de contrôle non destructif suivant les procédés pour lesquels il est certifié, diriger et surveiller des examens de certification (avec l'accord de la COFREND), assumer la responsabilité d'un laboratoire d'essai, etc. Actuellement, le niveau 3 n'est pas exigé, car c'est un niveau élevé pour lequel un petit nombre d'agents seulement sont certifiés.

La durée de validité d'une certification est de cinq ans, renouvelable pour une seconde période de cinq ans. A l'issue de cette seconde période, c'est à dire dix ans après la date de certification, le titulaire doit obtenir sa re-certification, et ainsi de suite.

Un certificat ou une carte atteste la certification. Ce document fournit tous les renseignements utiles sur le domaine de validité de la certification. Il est nominatif et comporte une photographie de l'agent. Le document est revêtu du timbre et de la signature de l'organisme de certification. Il doit comporter aussi la signature d'un représentant de l'entreprise qui emploie l'agent : l'entreprise atteste ainsi que celui-ci est en activité et qu'il est autorisé à opérer.

6.5 - LES CERTIFICATIONS DANS LE DOMAINE DE LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION PAR PEINTURES

6.5.1 - Les certifications ACQPA

L'ACQPA (Association pour la certification et la qualification en peinture anticorrosion) a été créée en 1994 pour la certification :

- des systèmes de peinture anticorrosion ;
- de la qualification des opérateurs appliquant ces produits ;
- de la qualification des inspecteurs des travaux d'application.

Chacune de ces activités est pilotée par un comité de certification particulier. Les trois comités fonctionnent et ont prononcé des certifications.

6.5.2 - La certification des systèmes de peinture

La certification ACQPA porte sur les systèmes de peinture correspondant à la classe "haute durabilité" de la norme NF EN ISO 12944-1, et destinés à la protection contre la corrosion des ouvrages métalliques. Les ouvrages métalliques concernés sont les ouvrages de génie civil ou de

bâtiment, ainsi que les équipements, dont l'épaisseur est au minimum de 3 mm. Il peut s'agir de travaux neufs ou de travaux de maintenance.

Dans le cadre du CCTG, les systèmes de peinture certifiés correspondent aux systèmes de catégorie A du fascicule 56 (article 6.4). Ce sont les seuls systèmes à pouvoir être utilisés pour la protection anticorrosion des tabliers de ponts, sauf indication contraire du marché (fascicule 66 du CCTG, article II.8).

Sont exclus du domaine d'application de la certification les ouvrages en acier autopatinable, ainsi que les câbles.

Il existe des systèmes certifiés pour application sur :

- acier nu ;
- acier métallisé ;
- acier galvanisé.

La certification ACQPA porte sur :

- la durabilité de la protection contre la corrosion ;
- la durabilité de l'aspect dans le cas des systèmes certifiés "V", c'est à dire destinés à des surfaces vues.

Le référentiel est constitué par les normes de produits.

Les récipients ou les emballages des produits certifiés doivent porter le logo ACQPA. Les autres mentions devant figurer sur l'étiquetage sont définies de façon précise dans le règlement de la certification.

6.5.3 - La certification des opérateurs

Cette certification a démarré début 1997. Elle est attribuée après un examen comportant des épreuves pratiques et théoriques. Le référentiel de certification définit trois niveaux :

- N1 : applicateurs exécutants
- N2 : chefs d'équipe ou de chantier
- N3 : conducteurs de travaux

et quatre options pour chaque niveau :

- 1 : préparation de surface
- 2 : application de peinture
- 3 : métallisation
- 4 : revêtements spéciaux ou spécifiques.

Pour l'instant, seuls les niveaux N1 et N2 font l'objet d'une procédure de certification.

Un certificat et un badge sont délivrés, qui précisent le niveau et la ou les options de l'opérateur. La durée de validité de ce certificat est de trois ans ; cette durée est reconductible deux fois, soit au total une durée de neuf ans à l'issue de laquelle l'opérateur doit passer un nouvel examen.

Dès 1999, 700 opérateurs étaient certifiés toutes options confondues, à raison de 2/3 en N1 et de 1/3 en N2. Un tel nombre rend possible une exigence de certification ACQPA des opérateurs sans que cela puisse constituer une clause abusive ou discriminatoire.

6.5.4 - La certification des inspecteurs

Pour la certification des inspecteurs, l'ACQPA a choisi de passer un accord avec le FROSIO, organisme norvégien certifiant des inspecteurs en anticorrosion par revêtements depuis une dizaine d'années et ayant acquis une réputation internationale.

Un label FROSIO est délivré par l'ACQPA selon une procédure conforme au référentiel norvégien. Un inspecteur certifié possède une formation initiale et/ou une expérience professionnelle minimum dans des domaines définis, et a suivi une préparation de 2 semaines à un examen, théorique et pratique, d'une journée.

Il y a deux niveaux, "inspecteur" (badge rouge) et "assistant inspecteur" (badge vert), qui diffèrent par une expérience de 2 ans dans le domaine de l'inspection.

L'inspecteur "ACQPA/FROSIO" n'effectue pas de contrôle interne ; il peut soit appartenir à l'entreprise d'application au titre du contrôle externe, soit représenter le maître d'œuvre au titre du contrôle extérieur.

Cette certification a démarré mi-1998. Début 2000, il y avait 52 inspecteurs certifiés ACQPA/FROSIO. Dès qu'un nombre suffisant sera atteint, les maîtres d'œuvre pourront exiger la certification dans les marchés pour le contrôle externe ; ils pourront l'exiger également pour les inspecteurs chargés du contrôle extérieur.

6.6 - AUTRES TYPES DE CERTIFICATIONS

Outre les certifications qu'on vient de voir, il existe d'autres types de procédures dont l'objectif est différent.

Marquage "CE"

Le texte de base est la directive européenne 89-106 du 21 décembre 1988 dite "produits de construction". Elle a été transposée en droit français par le décret du 8 juillet 1992 [6.4].

Ces textes prévoient que les produits de construction pour le bâtiment et le génie civil ne pourront être mis sur le marché européen que s'ils sont munis du marquage CE. Ce marquage sera apposé après délivrance d'une attestation de conformité à des spécifications techniques (qui pourront être contenues dans les parties dites "harmonisées" des normes européennes, ou bien dans un agrément technique européen).

L'attestation de conformité et le marquage CE doivent apporter la présomption que les produits sont aptes à être incorporés à des ouvrages satisfaisant aux six "exigences essentielles" de la directive : résistance mécanique et stabilité - sécurité en cas d'incendie - hygiène, santé et environnement - sécurité d'utilisation - protection contre le bruit - économie d'énergie et isolation thermique. L'objectif est d'interdire les produits ne respectant pas des conditions minimales de santé et de sécurité des personnes, tout en évitant les entraves techniques aux échanges (qui prenaient la forme autrefois de procédures d'homologation lourdes et discriminatoires).

Le marquage CE est un dispositif réglementaire au sens fort du terme, donc s'imposant à tous, qui se greffe sur le système normatif de caractère volontaire.

Ce n'est pas un outil de spécification, de sélection ou d'acceptation des produits.

Lors de la rédaction du présent document, le marquage CE n'est pas encore entré dans les faits pour les ponts métalliques. Il n'existe pas encore d'"organisme notifié", c'est à dire habilité par l'Etat pour accomplir des tâches d'attestation de conformité dans ce domaine. De même, il n'existe pas encore de norme européenne ayant une partie "harmonisée" : les normes actuelles sont entièrement "volontaires". Cependant, il est prévu que les normes de base des aciers laminés, actuellement en cours de révision, comporteront dans leur prochaine version une partie harmonisée.

Qualifications d'entreprises

Ces qualifications sont accordées aux entreprises par un organisme indépendant (par exemple QUALIBAT) pour une ou plusieurs classes d'activités définies dans une nomenclature.

En France, ces qualifications sont un simple élément d'information, destiné seulement à aider les maîtres d'ouvrage dans leur choix. Elles ne doivent pas constituer un critère systématique de présélection des entreprises, ni une exigence impérative du maître d'ouvrage.

Certification de système qualité des entreprises,

Ces certifications sont évoquées au chapitre suivant "assurance de la qualité".

Références du chapitre 6

- [6.1] - **Loi n° 94-442 du 3 juin 1994 : modification du code de la consommation en ce qui concerne la certification des produits industriels et des services** (J.O. du 4 juin 1994).
- [6.2] - **Décret n° 95-354 du 30 mars 1995 : certification des produits industriels et des services** (J.O. du 5 avril 1995).
- [6.3] - **Recommandation aux maîtres d'ouvrage publics, relative à l'utilisation des normes et des certifications, et à l'appréciation des équivalences** (Recommandation n° T1-99 du Groupe permanent d'étude des marchés "Travaux et maîtrise d'œuvre", adoptée le 7 octobre 1999 par la Commission centrale des marchés).
- [6.4] - **Décret n° 92-647 du 8 juillet 1992 concernant l'aptitude à l'usage des produits de construction** (J.O. du 14 juillet 1992).
- [6.5] - a - **Règlement de la marque NF-Acier** (AFNOR).
b - **Liste des produits certifiés et des centres distributeurs agréés** (AFNOR).
- [6.6] - a - **Règlement de la marque NF-Boulons à serrage contrôlé** (AFNOR).
b - **Liste des produits certifiés et des centres de distribution agréés** (AFNOR).
- [6.7] - **Protection anticorrosion des structures métalliques par système de peinture - Systèmes certifiés par l'ACQPA** (secrétariat de l'ACQPA, LCPC).
- [6.8] - **Protection des structures métalliques. Présentation de la nouvelle Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion** (D. André, J. Fuchs, G. Maire, SETRA/CTOA, bulletin Ouvrages d'art n° 27, juillet 1997).

*ASSURANCE
DE LA QUALITÉ*



SOMMAIRE

7 - ASSURANCE DE LA QUALITÉ

7.1	Qualité et assurance de la qualité : définitions.....	161
7.2	Assurance de la qualité suivant le fascicule 66 du CCTG.....	162
7.3	Assurance de la qualité en matière de protection contre la corrosion.....	164
	<i>Références du chapitre 7.....</i>	<i>165</i>

Page laissée blanche intentionnellement

ASSURANCE DE LA QUALITÉ

7



7.1 - QUALITÉ ET ASSURANCE DE LA QUALITÉ : DÉFINITIONS

La qualité d'une prestation ou d'un produit est, de façon générale, son aptitude à satisfaire des besoins.

Dans le cas des ouvrages d'art, et des produits de construction pour ouvrages d'art, les besoins du maître d'ouvrage sont spécifiés dans le marché. Ainsi, la qualité est essentiellement la conformité aux spécifications. Mais un marché ne peut pas tout spécifier, et la qualité doit porter aussi sur des besoins implicites.

La qualité est de la responsabilité de l'entreprise. Elle est due dans tous les cas, qu'il y ait, ou non, formalisation de l'assurance de la qualité.

Le système qualité d'une entreprise est l'ensemble des dispositions qu'elle met en œuvre pour appliquer sa politique de la qualité. Ces dispositions peuvent consister à définir par écrit des méthodes pour éviter l'improvisation sur le chantier ("procédures organisationnelles", "procédures opérationnelles"), à organiser des actions préventives et correctives, à mettre en œuvre des actions de formation du personnel, à effectuer des contrôles, etc. Elles sont organisées volontairement par l'entreprise, sauf si elles sont imposées dans le cadre du PAQ (voir ci-après).

Les entreprises peuvent demander la certification de leur système qualité. C'est une certification par tierce partie, analogue dans ses principes aux certifications de produits décrites au chapitre précédent ; mais il s'agit ici de certifier l'organisation d'une production, non le produit lui-même. En France, un organisme délivrant ces certificats est l'AFAQ (Association Française pour l'Assurance de la Qualité). Le référentiel de la certification est constitué par l'une des normes NF EN 29001, NF EN 29002, NF EN 29003, suivant le type d'activité de l'entreprise. La norme NF EN 29001 concerne les entreprises intervenant dans la conception, la production et l'installation. C'est donc cette norme qui sert de référentiel pour les entreprises de génie civil effectuant les études d'exécution avec leur propre bureau d'études.

Pour les marchés de travaux qui font l'objet du présent guide, il est recommandé, sauf exception, de ne pas exiger ce type de certification [6.3].

L'assurance de la qualité est l'ensemble des dispositions préétablies et systématiques qu'une entreprise ou un fabricant met en œuvre pour donner confiance au client (et à ses propres services) en la qualité de ses prestations ou de ses produits. L'assurance de la qualité est donc la partie du système qualité qui concerne les relations entrepreneur-client. Elle comprend à la fois des dispositions générales, et des dispositions particulières à chaque opération. Parmi ces dernières, figure le plan d'assurance de la qualité (PAQ).

Le plan d'assurance de la qualité est un ensemble de documents que l'entreprise établit et fournit au maître d'œuvre pour formaliser et énoncer les dispositions prises en matière d'assurance de la qualité. Il est établi spécifiquement pour chaque opération. Le degré de développement du PAQ est modulable par le maître d'œuvre dans le marché.

La terminologie relative à la qualité est définie dans différentes normes et autres documents. Il n'y a pas toujours une parfaite concordance entre les définitions proposées, car la qualité concerne un domaine d'activités extrêmement diverses. On pourra se reporter en particulier aux normes :

NF EN ISO 8402 : management de la qualité et assurance de la qualité - vocabulaire

NF X 50-164 : guide pour l'établissement d'un plan d'assurance qualité

7.2 ASSURANCE DE LA QUALITÉ SUIVANT LE FASCICULE 66 DU CCTG

Dans le cadre du CCTG, le fascicule 66 définit et contractualise les dispositions de base en matière de PAQ.

En application de l'article I.2 du fascicule, l'entrepreneur est tenu, sauf indication contraire du marché, d'établir un PAQ, et de le soumettre au visa du maître d'œuvre.

La consistance en est définie, pour les cas courants, dans l'annexe contractuelle A1 du fascicule. Un seul degré de développement est prévu.

La mention du fascicule "sauf indication contraire du marché" permet au maître d'œuvre de dispenser l'entrepreneur de formaliser l'assurance de la qualité. Une telle dispense peut être appropriée dans le cas, par exemple, d'un ouvrage de faible importance et présentant peu de difficultés d'exécution.

En raison du caractère industriel de la construction métallique, ce secteur de la construction a adopté depuis longtemps des dispositions qui s'apparentent aux méthodes modernes de maîtrise et d'assurance de la qualité, bien avant que le vocabulaire et la formalisation actuelle n'aient été introduits. On peut citer comme exemples les contrôles intérieurs de l'entreprise, les programmes d'exécution, les descriptifs de modes opératoires de soudage (qui ont une certaine similitude avec les "procédures" utilisées dans d'autres domaines).

Cependant, ces dispositions n'entrent pas dans le cadre de l'assurance de la qualité proprement dite, car elles n'ont pas le même statut.

Il convient en effet de distinguer :

- 1) les dispositions réglementaires et/ou normatives : elles sont définies avec précision dans les pièces générales du marché (le CCTG et les normes contractuelles) ; elles sont considérées comme nécessaires dans tous les cas pour assurer la sécurité des ouvrages ; l'entrepreneur doit les respecter strictement, et le maître d'œuvre lui-même ne peut pas les moduler dans le marché (sauf lorsque le CCTG laisse le choix entre plusieurs classes de performances) ;

2) les exigences en matière de PAQ : elles sont librement modulées par le maître d'œuvre suivant son appréciation des difficultés de l'ouvrage et de divers autres facteurs ; elles ne sont pas nécessairement contractuelles, certaines dispositions pouvant être mises au point en liaison avec l'entreprise après la signature du marché.

L'assurance de la qualité a donc été ajoutée à des dispositions réglementaires et normatives préexistantes, sans s'y substituer et sans les dupliquer. C'est ce qui explique que le fascicule 66 n'exclue pas l'éventualité d'une dispense de PAQ.

Comme indiqué précédemment, l'organisation de la qualité ne se réduit pas au seul PAQ : l'entrepreneur adopte volontairement tout un ensemble de dispositions dans le cadre de son système qualité.

En ce qui concerne les documents techniques que doit fournir l'entrepreneur, il convient de distinguer de même :

- 1) les documents d'études (notes de calcul, dessins d'exécution), dont la production constitue une prestation, définie dans le marché et rémunérée par un ou plusieurs prix spécifiques du bordereau des prix : ces documents d'études incluent les programmes d'exécution des travaux, dont l'établissement est codifié par le CCTG et par les normes contractuelles (par exemple, le programme de soudage prescrit dans la norme NF P 22-471 pour les assemblages soudés) ;
- 2) les documents composant le PAQ, qui ne doivent faire l'objet d'aucune rémunération spécifique.

D'après l'annexe contractuelle A1 du fascicule 66 du CCTG, un PAQ comprend :

- des documents d'organisation générale ;
- des documents préalables à l'exécution (listes des moyens qui seront mis en œuvre, des contrôles qui seront effectués...) ;
- des documents de suivi d'exécution, apportant la preuve des certifications et qualifications relatives aux moyens mis en œuvre, ou traduisant matériellement les contrôles effectués.

On remarque que l'annexe A1 du fascicule 66 mentionne, parmi les documents du PAQ, certains documents déjà rendus obligatoires par le CCTG ou les normes contractuelles, ce qui semble en contradiction avec la distinction qui vient d'être faite. En fait, la mention de ces documents dans le PAQ n'a pas pour effet de changer leur statut, mais seulement de définir des dispositions relationnelles les concernant : quand et dans quelles conditions ces documents doivent être fournis, quels sont ceux dont la production commande la levée d'un point d'arrêt, etc.

Le maître d'œuvre doit compléter les dispositions générales du fascicule 66 en matière de PAQ par des dispositions spécifiques à chaque opération dans les documents particuliers du marché.

Les documents du PAQ sont établis et fournis au maître d'œuvre en plusieurs phases :

- avec la remise des offres ;
- après la remise des offres et avant la signature du marché, lors de la mise au point de celui-ci avec l'entreprise retenue ;
- après la signature du marché, au cours de la période de préparation des travaux ;
- au cours de l'exécution des travaux.

Les éléments du PAQ mis au point avant la signature du marché peuvent être incorporés à celui-ci et devenir ainsi contractuels.

Les autres éléments, fournis ultérieurement, ne sont pas contractuels ; ce sont seulement des documents soumis au visa du maître d'œuvre, ou tenus à sa disposition, suivant les cas.

Cependant, il est sous-entendu que les dispositions du PAQ, une fois librement mises au point par l'entrepreneur et remises au maître d'œuvre, engagent l'entrepreneur, sinon juridiquement, du moins moralement, et qu'elles ne doivent pas être modifiées sans l'acceptation explicite du maître d'œuvre.

Outre le PAQ, établi par l'entrepreneur, le fascicule 66 du CCTG (article I.2.2) prévoit l'établissement d'un schéma directeur de la qualité (SDQ) par le maître d'œuvre suivant la Recommandation [7.3].

L'application pratique de ces différentes dispositions est traitée aux chapitres 8, 9 et 10 ci-après.

7.3 - ASSURANCE DE LA QUALITÉ EN MATIÈRE DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

La version en vigueur du fascicule 56 du CCTG, qui date de février 1986, ne prévoit pas l'organisation et la formalisation de la qualité suivant les principes actuels. En attendant la révision de ce fascicule, c'est donc dans les pièces particulières du marché qu'il convient de préciser les dispositions correspondantes : contenu du PAQ, points d'arrêt, etc.

En outre, le fascicule 56 actuel prévoit de soumettre toutes les surfaces préparées à l'acceptation du maître d'œuvre, avant la mise en peinture ou la métallisation (article 17.5.2). Dans la pratique, cette disposition est difficilement applicable, car elle exige du maître d'œuvre un travail considérable en un temps très court (les pièces doivent être revêtues dans un délai maximal qui varie de 2 à 6 heures après décapage, en fonction de l'hygrométrie de l'air). On estime donc maintenant que l'acceptation des surfaces ne doit pas constituer un point d'arrêt, et qu'elle doit relever plutôt du contrôle intérieur de l'entreprise.

Cela ne constitue pas une dérogation au fascicule 56 actuel, dont la rédaction mentionne "sauf disposition différente du marché"

Les indications pratiques fournies dans les chapitres suivants prennent en compte ces évolutions.

Références du chapitre 7

- [7.1] - **Norme NF X 50-164 : guide pour l'établissement d'un plan d'assurance de la qualité** (juin 1990).
- [7.2] - **Norme NF EN ISO 8402 : management de la qualité et assurance de la qualité - vocabulaire** (juillet 1995).
- [7.3] - **Recommandation aux maîtres d'ouvrages publics à propos de la gestion et de l'assurance de la qualité lors de la passation et de l'exécution des marchés de travaux** (recommandation n° T1-87 du Groupe permanent d'étude des marchés de travaux, publiée dans le BOCCRF du 29 janvier 1988).
- [7.4] - **Études de conception et d'exécution d'ouvrages de génie civil - Guide pour une démarche d'assurance de la qualité** (SETRA - SNCF, décembre 1997).

*LA CONSULTATION
DES ENTREPRISES*



SOMMAIRE

8 - LA CONSULTATION DES ENTREPRISES

8.1	L'appel d'offres	169
8.1.1	Généralités	169
8.1.2	Formes de groupement des entreprises.....	169
8.1.3	Procédures d'appel d'offres.....	171
8.2	Règlement de la consultation (RC)	171
8.2.1	Répartition des travaux en lots	171
8.2.2	Sous-traitants	172
8.2.3	Variantes	173
8.2.4	Documents à fournir avec les offres ; SOPAQ	175
8.2.5	Sous-détail des prix	177
8.3	Cahier des clauses administratives particulières (CCAP)	177
8.3.1	Pièces constitutives du marché	177
8.3.2	Clauses d'équivalence.....	179
8.3.3	Contrôles par le maître d'œuvre, points d'arrêt, acceptation de parties d'ouvrage	180
8.3.4	Garanties concernant la protection contre la corrosion	182
8.3.5	Garanties concernant les chapes d'étanchéité sur dalle en béton et les complexes étanchéité-couche de roulement sur dalle métallique	184
8.3.6	Déroghations au CCTG, au CCAG et aux normes	184
8.4	Cahier des clauses techniques particulières (CCTP) : chapitre "dispositions générales"	185
8.4.1	Description de l'ouvrage.....	185
8.4.2	Dispositions relatives au plan d'assurance de la qualité	187
8.5	Cahier des clauses techniques particulières (CCTP) : chapitre "produits de construction"	188
8.5.1	Aciers laminés : nuance, qualité, norme de base, état de livraison	188
8.5.2	Aciers laminés : certification	189
8.5.3	Aciers laminés : autres spécifications	189
8.5.4	Produits consommables pour soudage	190
8.5.5	Boulons à haute résistance	190
8.5.6	Goujons de connexion	190
8.5.7	Aciers moulés	191
8.5.8	Peintures (sur acier mis à nu, sur métallisation, sur galvanisation)	191
8.5.9	Métallisation par projection	192
8.5.10	Galvanisation à chaud	193
8.5.11	Chapes d'étanchéité sur dalle en béton, complexes étanchéité-couche de roulement sur dalle métallique	193

8.6	Cahier des clauses techniques particulières (CCTP) : chapitre "exécution des travaux"	194
8.6.1	Type de soudure, degré de pénétration	194
8.6.2	Classe de qualité des assemblages soudés	194
8.6.3	Assemblages boulonnés	195
8.6.4	Montage provisoire en atelier	195
8.6.5	Exécution de la protection contre la corrosion	196
8.6.6	Dalle en béton des ponts mixtes	196
8.7	Cahier des clauses techniques particulières (CCTP) : indications générales pour la rédaction	197
8.8	Liste des normes contractuelles	199
8.9	Bordereau des prix et détail estimatif	199
	Références du chapitre 8	203

LA CONSULTATION DES ENTREPRISES



8.1 - L'APPEL D'OFFRES

8.1.1 - Généralités

Le code des marchés publics prévoit trois formes de consultation pour les marchés de travaux : l'appel d'offres, l'adjudication et la négociation.

Le marché négocié est une procédure d'exception, utilisable seulement dans des cas énumérés limitativement.

L'adjudication ne permet de tenir compte que du seul critère de prix. Elle ne convient donc pas pour les ouvrages d'art.

L'appel d'offres est la procédure normale. Il en existe quatre sortes : ouvert, restreint, avec concours, sur performances. L'appel d'offres avec concours et l'appel d'offres sur performances sont réservés à des cas particuliers. Dans la majorité des cas, on utilise soit l'appel d'offres ouvert (toute entreprise peut remettre une offre), soit l'appel d'offres restreint (les entreprises préalablement sélectionnées peuvent seules remettre une offre).

En ce qui concerne les marchés de l'Etat, la tendance est de recommander l'appel d'offres restreint pour les ouvrages d'art non courants, surtout s'ils sont importants ou complexes, et l'appel d'offres ouvert pour les ouvrages courants.

Le présent chapitre considère uniquement le cas de l'appel d'offres ouvert et de l'appel d'offres restreint. Il fournit des indications sur certains points spécifiques aux travaux de construction des ponts métalliques. Il ne reprend pas, excepté quelques rappels, les dispositions générales applicables à tous les ouvrages.

8.1.2 - Formes de groupement des entreprises

Marchés séparés

Les travaux de ponts métalliques associent la construction métallique pour le tablier, et la construction en béton pour les fondations, les appuis, et éventuellement la dalle en béton du tablier. Le plus souvent, une même entreprise n'a pas des capacités dans ces deux domaines ; deux entreprises au moins doivent donc intervenir.

Une solution consiste à découper l'opération en lots, correspondant chacun à une nature de travaux, et à passer un marché distinct pour chaque lot.

Cette façon de procéder permet de retenir l'offre la plus intéressante pour chaque lot.

Par contre, elle conduit souvent à des difficultés considérables pour la coordination des travaux, qui incombe au maître d'œuvre. En outre, on ne peut faire jouer les garanties qu'à l'intérieur de chaque lot.

Cette solution est donc mal adaptée au cas des ouvrages d'art.

Marché unique

Il y a marché unique soit quand le maître d'ouvrage traite avec une seule entreprise, soit quand il traite avec des entreprises groupées qui souscrivent un acte d'engagement unique.

La première formule, dite marché à l'entreprise générale, oblige l'entreprise à sous-traiter ce qu'elle ne peut pas exécuter elle-même. Dans le cas des ponts métalliques, l'importance des parties en béton et des parties en métal est souvent du même ordre de grandeur : cette formule entraîne alors une sous-traitance importante, avec les inconvénients correspondants pour le maître d'ouvrage et pour les entreprises. Elle n'est acceptable que dans certains cas de petits ouvrages (par exemple, petit ouvrage de franchissement compris dans une importante opération de terrassements). Dans tous les autres cas, le marché à l'entreprise générale doit être exclu.

La règle générale est donc de recourir à des groupements d'entreprises.

Les travaux ayant été répartis en lots correspondant à une même spécialité technique, des entreprises se groupent librement et présentent une offre pour l'ensemble des travaux, chaque entreprise s'engageant pour un lot. Les entreprises d'un tel groupement doivent être "conjointes", et non "solidaires" : chaque entreprise ne peut être responsable que du lot pour lequel elle intervient, car les lots correspondent à des spécialités différentes.

Le règlement de la consultation désigne le lot considéré comme lot principal, dont le titulaire sera mandataire du groupement. Le mandataire est solidaire de chaque entreprise conjointe dans les obligations contractuelle qu'elle a vis-à-vis du maître d'ouvrage. Le code des marchés publics (article 46-1) définit les règles applicables : le mandataire doit justifier de ses habilitations : une entreprise ne peut proposer d'être mandataire que d'un seul groupement dans un même marché.

Le mandataire assure, sous sa responsabilité, la coordination de ces entreprises en assumant les tâches d'ordonnancement et de pilotage des travaux (CCAG, article 2.31). Le marché peut prévoir un prix spécifique pour rémunérer le mandataire de son action de coordination des entreprises conjointes (CCAG, article 10.12). Dans ce cas, le prix "frais de coordination" doit être défini dans le CCAP suivant la rédaction indiquée dans le CCAP-type de la Commission centrale des marchés [8.3].

Quand le lot "béton" est important par rapport à l'ensemble des travaux, c'est généralement l'entreprise titulaire de ce lot qui est mandataire. En effet, les travaux correspondants sont exécutés sur le chantier, ce qui oblige l'entreprise à être présente sur place pendant la majeure partie du délai d'exécution, et lui donne donc vocation à coordonner les travaux.

Cependant, l'entreprise de construction métallique ne doit pas être écartée systématiquement de la fonction de mandataire, surtout si le lot correspondant est important par rapport à l'ensemble des travaux.

Lorsque le volume d'un lot est important, l'offre relative à ce lot peut émaner, non d'une seule entreprise, mais d'un groupement d'entreprises de même spécialité. Dans ce cas, il s'agit d'un groupement d'entreprises solidaires. Chaque entreprise est responsable, à l'égard du maître d'ouvrage, de la totalité des prestations du lot, et doit pouvoir pallier une éventuelle défaillance de ses partenaires. L'acte d'engagement doit désigner l'une des entreprises comme mandataire du groupement.

8.1.3 - Procédures d'appel d'offres

Dans le cadre d'une consultation sur marché unique avec groupement d'entreprises conjointes, le maître d'œuvre doit veiller à ce que les dispositions de la consultation permettent une concurrence effective et assurent des conditions équitables à toutes les entreprises. Des précautions spécifiques sont nécessaires lorsque la consultation porte à la fois sur une solution en métal et sur une solution concurrente "tout béton".

Pour répondre à ces impératifs, diverses procédures particulières d'appel d'offres ont été expérimentées. Lors de l'achèvement du présent document, de réflexions sont engagées sur ce sujet : il y aura lieu de s'informer sur l'évolution de la doctrine qui en résultera.

8.2 - RÉGLEMENT DE LA CONSULTATION (RC)

8.2.1 - Répartition des travaux en lots

Dans le cas habituel qui vient d'être évoqué, marché unique avec un groupement d'entreprises conjointes, les travaux doivent être répartis en lots.

La meilleure répartition à adopter n'est pas évidente pour certaines prestations. C'est le cas par exemple pour l'étude et l'exécution des dalles en béton de ponts mixtes, ou encore pour la fourniture, la pose et le réglage des appareils d'appui.

On pourrait être tenté a priori d'inclure ces parties d'ouvrage dans le lot de construction métallique, du fait qu'elles sont en relation directe avec la structure en métal : cela devrait faciliter la coordination des études et de l'exécution, ainsi que le règlement des litiges. Mais d'autres considérations jouent en sens inverse.

Ainsi, pour les dalles en béton des ponts mixtes, leur rattachement au lot de construction métallique apporte beaucoup de lourdeur aux documents du marché (bordereau des prix et détail estimatif), et n'a pas d'utilité si la dalle est exécutée par le titulaire du lot béton, ce qui est souvent le cas. On peut donc généralement inclure la dalle dans le lot béton, tout en laissant son étude dans le lot de construction métallique.

En ce qui concerne les appareils d'appui, il faut distinguer les opérations de mise en œuvre intervenant immédiatement après la mise en place de la structure métallique, qui peuvent être incluses dans le lot de construction métallique, et les opérations à effectuer après bétonnage de la dalle, qui doivent plutôt être incluses dans le lot béton : il ne serait pas économique d'imposer à l'entreprise de construction métallique une nouvelle intervention sur le site une ou plusieurs semaines après l'achèvement du montage.

Quelles que soient les dispositions adoptées, le marché doit définir la consistance de chaque lot avec précision.

8.2.2 - *Sous-traitants*

Les entreprises soumissionnaires peuvent présenter des demandes de sous-traitance avec leur offre. Elles fournissent alors, avec leur demande, les renseignements dont la consistance est précisée dans le code des marchés publics.

L'entreprise titulaire du marché peut aussi présenter des demandes de sous-traitance postérieurement à la signature du marché. Pour les postes importants, il est souhaitable que les sous-traitants éventuels soient identifiés dès la remise des offres. Cela donne plus de crédibilité aux offres. Cela constitue aussi une indication utile pour le jugement : par exemple, il n'est pas indifférent de savoir si une entreprise soumissionnaire envisage de confier les études d'exécution à son bureau d'études intégré, ou bien si elle les sous-traitera en tout ou partie à un bureau d'études extérieur, et dans ce cas, quel sera ce bureau d'études.

Le règlement de la consultation doit donc définir une liste de prestations pour lesquelles les soumissionnaires ont à indiquer :

- s'ils ont l'intention de présenter une demande de sous-traitance postérieurement à la signature du marché ;
- dans ce cas, la nature et l'étendue de la sous-traitance, ainsi que l'identité, les qualifications et les références du ou des sous-traitants envisagés (une liste de deux ou trois noms est admissible pour certaines prestations).

Ces renseignements sont à considérer comme un élément d'assurance de la qualité, entrant dans le cadre du schéma organisationnel du PAQ (voir 8.2.4 ci-après).

La liste des prestations pour lesquelles il est souhaitable de connaître les sous-traitants éventuels dès la remise des offres peut comprendre par exemple :

- les études d'exécution ;
- l'exécution de la charpente métallique ;
- la fabrication des raidisseurs en auget des dalles orthotropes ;
- le soudage sur chantier ;
- le montage de la charpente métallique ;
- l'exécution de la dalle en béton des ponts mixtes.

Pour les prestations jugées particulièrement importantes ou délicates, le règlement de la consultation peut toujours imposer qu'elles soient effectuées, non par un sous-traitant, mais par un cotraitant conjoint.

Les prestations pour lesquelles il n'est généralement pas indispensable de connaître l'identité des sous-traitants dès la remise des offres peuvent comprendre par exemple :

- l'application de la peinture sur chantier (alors que l'applicateur en atelier est souvent titulaire d'un marché général avec l'entreprise pour tous les travaux en atelier pendant une durée déterminée, l'applicateur sur chantier au contraire peut être différent d'un chantier à l'autre ; cette pratique présente des inconvénients, notamment en ce qui concerne les responsabilités et l'application des garanties, mais il paraît difficile de l'éviter) ;
- les terrassements pour l'aire d'assemblage et de lancement ;
- la chape d'étanchéité des dalles en béton ;
- le complexe étanchéité-couche de roulement des dalles orthotropes.

Cela ne signifie pas que des sous-traitances puissent être proposées pour ces prestations sans aucun souci de programmation. Par exemple, pour les chapes d'étanchéité, le fascicule 67 du CCTG (annexe 2) recommande de désigner le sous-traitant chargé de la mise en œuvre avant d'autoriser le coulage du béton de la dalle.

Le guide "Garde-corps" du SETRA (annexe 3) fournit des indications pour la sous-traitance des travaux de pose ou de scellement des équipements.

Les prix du marché sont réputés couvrir les frais de coordination et de contrôle des sous-traitants par l'entreprise (CCAG, article 10.13).

8.2.3 - Variantes

Il y a variante en cas de modification, par rapport à la solution de base, des caractéristiques techniques de l'ouvrage.

Appel d'offres sans variantes

L'interdiction de toute variante, même limitée, peut convenir dans le cas d'un tablier de conception très simple, parfaitement optimisée et définie.

Appel d'offres avec variantes limitées

Dans beaucoup de cas, le règlement de la consultation autorise des variantes limitées sur des points particuliers définis dans le dossier. L'entreprise a l'obligation de présenter dans tous les cas une offre conforme à la solution de base.

Les dispositions modifiées par une variante limitée peuvent être plus ou moins importantes en elles-mêmes ; elles peuvent aussi interférer avec de nombreuses autres dispositions du projet, qu'il convient d'identifier avant d'autoriser la variante.

On peut citer les exemples suivants :

Variantes sur l'acier :

- acier de limite d'élasticité différente de celle de la solution de base ;
- semelle des poutres en tôles profilées en long au lieu de semelles d'épaisseur constante, ou l'inverse.

Les principales modifications du projet qui en résultent concernent, sur le plan technique, les épaisseurs de tôle nécessaires et les épaisseurs maximales utilisables et, sur le plan économique, le tonnage et le prix du kilogramme de charpente métallique.

Variantes sur les poutres principales :

- poutres de hauteur variable au lieu de poutres de hauteur constante, ou l'inverse ;
- changement du type de poutres (poutres en I au lieu de poutres-caissons, ou l'inverse).

Le premier type de variante a des conséquences importantes sur l'aspect de l'ouvrage et sur la faisabilité du lançage. Le second modifie profondément la conception d'ensemble, y compris celle des appuis.

Variantes sur les éléments transversaux :

Dans un tablier bipoutre mixte, la variante consistant à remplacer les pièces de pont par des entretoises (ou l'inverse) peut se concevoir lorsque la largeur du tablier rend les deux solutions à peu près également valables. Elle modifie assez profondément le projet, car elle conduit à changer la distance entre les poutres, donc souvent à modifier la géométrie des appuis.

Variantes sur le montage :

La solution de base doit être réalisable avec un procédé de montage déterminé (lançage, hissage...), à définir dans le marché.

Un changement de procédé de montage ou de phasage d'exécution ne constitue pas une variante en lui-même, car le changement porte sur la méthode de construction, non sur l'objectif contractuel. Un tel changement devient cependant une variante s'il conduit à augmenter les quantités à payer à l'entrepreneur, ou à diminuer la qualité de l'ouvrage (en aggravant par exemple l'état de fissuration de la dalle).

Le règlement de la consultation doit définir avec précision les points sur lesquels peuvent porter les variantes. Bien entendu, une variante ne peut être définie et jugée que par rapport à une solution de base précise.

Outre des variantes, le maître d'œuvre peut autoriser des adaptations techniques ou des choix entre des dispositions équivalentes vis-à-vis du résultat final. L'objectif est de ne pas figer inutilement des détails techniques pour lesquels les méthodes de fabrication de certaines entreprises seraient inadaptées.

On peut citer comme exemples le choix entre connecteurs en goujons et connecteurs en cornières, le choix entre aciers à l'état normalisé et aciers à l'état thermomécanique (si les épaisseurs

nécessaires permettent les aciers thermomécaniques), ou encore les dispositions constructives du raidissage, notamment du raidissage intérieur des poutres-caissons.

Pour les connecteurs, il y a lieu de prévoir systématiquement deux prix au bordereau des prix et deux quantités au détail estimatif.

Appel d'offres avec variantes larges

Une variante large est en principe une variante dont l'étendue n'est pas limitée par le règlement de la consultation. Dans la pratique, on inclut souvent dans les variantes larges les variantes "limitées majeures", c'est à dire portant sur un point important de la conception technique, bien que limité par le règlement de la consultation.

On considère par exemple qu'il y a variante large lorsque le règlement de la consultation autorise :

- le changement de type de structure (par exemple, tablier haubané au lieu de tablier non haubané) ;
- le remplacement d'un tablier en béton par un tablier en acier, et inversement ;
- un changement du nombre de travées.

Dans le cas du réseau routier national, ces variantes doivent être autorisées dans la décision d'approbation du projet d'ouvrage d'art.

Le règlement de la consultation doit préciser si les entreprises soumissionnaires ont à présenter dans tous les cas une offre conforme à la solution de base (ou aux solutions de base), ou si elles peuvent s'en dispenser.

Cette dispense doit généralement être accordée dans le cas d'une solution de base à tablier en béton, avec variante large à tablier en métal, et dans le cas inverse.

8.2.4 - Documents à fournir avec les offres ; SOPAQ

Le règlement de la consultation doit préciser quels éléments les soumissionnaires ont à fournir à l'appui de leur offre.

Ces éléments doivent permettre au maître d'œuvre de s'assurer :

- que l'entreprise (ou le groupement d'entreprises) a les moyens de répondre aux besoins du maître d'ouvrage ;
- qu'elle a réfléchi aux spécificités de l'ouvrage et a des solutions appropriées ;
- que les prix de son offre sont crédibles.

Le règlement de la consultation peut préciser que ces éléments seront utilisés pour juger la valeur technique de l'offre.

Dans le cas habituel où l'établissement d'un plan d'assurance de la qualité est prévu, le règlement de la consultation demande généralement aux entreprises de fournir un "schéma organisationnel

du plan d'assurance de la qualité" (SOPAQ). Ce document doit énoncer les principales dispositions en matière de qualité que l'entreprise à l'intention d'adopter pour l'opération concernée, si son offre est retenue.

On peut considérer que ce document est une première version du "document d'organisation générale" de l'entreprise qui devra être fourni plus tard au titre du PAQ (voir la Recommandation T1-87 du Groupe permanent d'étude des marchés de travaux [7.3], et le fascicule 66 du CCTG, commentaire de l'article I.2.1).

Le SOPAQ de l'entreprise retenue est généralement incorporé au marché, après les mises au point éventuellement nécessaires.

Les éléments à demander au titre du SOPAQ peuvent comprendre (à titre d'exemple) :

- l'identification (nom, raison sociale, adresse...) des intervenants (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises), le type de groupement des entreprises... ;
- l'organigramme (non nominatif à ce stade) de l'encadrement de l'opération, y compris pour les études d'exécution et pour les travaux sur chantier, indiquant le profil des responsables avec leur position dans les entreprises, leur qualification et leurs références ; il est important de savoir, par exemple, si un même ingénieur suivra l'opération dans toutes ses phases, depuis les études jusqu'à la fin des travaux, si un conducteur de chantier de l'entreprise sera en permanence sur le chantier, etc.
- la liste des sous-traitants et autres prestataires que le soumissionnaire envisage de proposer à l'acceptation du maître d'ouvrage postérieurement à la signature du marché, ainsi que la nature et l'étendue des prestations correspondantes ; ces renseignements sont à fournir au moins pour les postes énumérés dans le règlement de la consultation (voir 8.2.2 ci-avant) ; on admet que plusieurs sous-traitants possibles soient indiqués pour chaque poste, car l'entreprise n'a pas pu effectuer toutes ses consultations à ce stade (bien entendu, le soumissionnaire fournit par ailleurs les demandes de sous-traitance qu'il propose dès la remise de son offre, accompagnées des renseignements indiqués à l'article 2 du code des marchés publics) ;
- les modalités d'organisation et de fonctionnement des contrôles de l'entreprise pour l'opération concernée ;
- un mémoire technique sur les moyens et les méthodes d'exécution prévues pour l'assemblage en atelier (indiquant notamment s'il y aura, ou non, un montage provisoire), pour le montage sur chantier, pour la protection contre la corrosion, pour les contrôles de géométrie... avec un calendrier sommaire indiquant la durée des principales phases ;
- les moyens qui seront utilisés pour les études d'exécution (ingénieurs, logiciels, matériels, nombre d'heures d'étude prévues) ;
- une liste des documents préalables à l'exécution et des documents de suivi d'exécution que l'entreprise s'engage à fournir au titre du PAQ (un cadre-type de PAQ peut être joint au dossier de consultation des entreprises, voir les tableaux 10.1 ci-après).

La Recommandation T1-99 [5.8] prévoit le cas où une entreprise proposerait un produit d'origine étrangère couvert par une certification différente de celle demandée dans le marché, en invoquant l'équivalence de cette certification. Pour les produits représentant des enjeux techniques et

économiques importants, il convient d'éviter que l'entreprise ne fasse jouer cette clause d'équivalence en cours de travaux.

Dans ce but, les soumissionnaires doivent être invités à joindre à leur offre tous les documents permettant d'apprécier, avant la signature du marché, l'équivalence des certifications étrangères qui seront éventuellement proposées. La Recommandation T1-99 contient la clause-type à insérer dans le règlement de la consultation.

Dans le cas des ponts métalliques, les produits concernés sont les aciers laminés (certification NF-Acier), les boulons à haute résistance (certification NF-Boulons à serrage contrôlé), et les systèmes de peinture (certifications ACQPA).

8.2.5 - Sous-détail des prix

Le règlement de la consultation doit demander une décomposition des prix forfaitaires et un sous-détail des prix unitaires pour les postes les plus importants.

Cette demande peut porter par exemple sur les prix forfaitaires suivants :

- études
- installations de chantier
- montage sur chantier

et sur les prix unitaires suivants :

- exécution de la structure
- protection contre la corrosion
- béton de la dalle

Les décompositions et sous-détails de prix peuvent être contractualisés soit lors de la signature du marché, soit en cours de travaux.

8.3 - CAHIER DES CLAUSES ADMINISTRATIVES PARTICULIÈRES (CCAP)

8.3.1 - Pièces constitutives du marché

Le cahier des clauses administratives particulières doit définir la liste des pièces constitutives du marché.

Par ordre de priorité, les pièces particulières sont à citer en premier. La liste comprend généralement les rubriques suivantes :

- *Acte d'engagement*
- *Présent cahier des clauses administratives particulières*
- *Cahier des clauses techniques particulières (CCTP), et normes ou parties de normes visées dans ce cahier, ainsi que les documents ci-après :*
- *plans n° ...*
- *notes de calcul n° ...*
- *cahier de sondages*
- *dossier géotechnique*
- ...
- *État des prix forfaitaires et bordereau des prix unitaires*
- *Détail estimatif*
- *Décomposition des prix forfaitaires n° ...*
- *Sous-détail des prix unitaires n° ...*

Les pièces générales sont à citer ensuite. La liste suivante est donnée à titre d'exemple ; elle correspond au cas d'un pont-route mixte, avec application du CCTG ; elle est à compléter éventuellement pour les parties d'ouvrage en béton, pour les fondations, etc.

- *Cahier des clauses techniques générales (CCTG) applicables aux marchés publics de travaux de génie civil, et normes ou partie de normes visées par ce CCTG*
- *Fascicule du cahier des prescriptions communes (CPC) applicables aux marchés de travaux publics relevant des services de l'Équipement : fascicule 61, titre II (programmes de charges et épreuves des ponts-routes)*
- *Cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics de travaux (CCAG)*
- *Circulaire du 28 juillet 1981 transmettant l'instruction technique du 21 juillet 1981 : règlement de calcul des ponts mixtes acier-béton*
- *Circulaire du 20 juillet 1983 : transports exceptionnels - définition des convois-types et règles pour la vérification des ouvrages d'art*
- *Circulaire du 26 septembre 1985 : recommandations relatives à l'utilisation d'aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique*
- *Règlement de la marque NF-Acier*
- *Liste en vigueur des produits bénéficiant du droit d'usage de la marque NF-Acier, secteur d'application bâtiment - travaux publics - construction métallique d'ouvrages d'art et de bâtiments non courants*
- *Règlement de la marque NF-Boulons à serrage contrôlé*

- *Liste en vigueur des produits bénéficiant du droit d'usage de la marque NF-Boulons à serrage contrôlé, et liste des centres agréés pour la distribution*
- *Note de l'ACQPA sur la certification des systèmes de peinture pour la protection anticorrosion des structures métalliques*
- *Liste en vigueur des systèmes de peinture pour la protection anticorrosion des structures métalliques certifiés par l'ACQPA*

Dans cette liste, le CCTG doit être visé dans son ensemble. On peut cependant rappeler les fascicules qui s'appliquent plus particulièrement aux travaux à réaliser.

Les circulaires mentionnées ensuite dans la liste ci-avant sont données à titre d'exemples ; de nombreux autres textes peuvent être à viser suivant les particularités de chaque ouvrage. Les "directives communes" de 1971, pas plus que celles de 1979, ne sont mentionnées dans cette liste, les différents fascicules du CCTG étant autosuffisants à cet égard.

Il reste le cas des bulletins techniques et autres documents élaborés par exemple par le SETRA ou le LCPC sur un sujet particulier.

Si le document est suffisamment précis et directif, il suffit de le citer, en totalité ou en partie, dans la liste des pièces constitutives du marché, et de spécifier dans le CCTP, s'il y a lieu, les conditions d'application particulières à l'ouvrage. Le maître d'œuvre doit être en mesure de fournir un exemplaire du document aux entreprises candidates si elles en font la demande.

Le guide sur les ponts-routes à tablier à poutrelles enrobées [8.6] entre dans cette catégorie : la deuxième partie du document, consacrée au dimensionnement, est rédigée pour être contractualisée, comme indiqué dans l'avant-propos.

De même, l'annexe 4 du guide "Fatigue" [8.8] peut être contractualisée dans le cas des ponts-routes.

Si le document ne remplit pas les conditions nécessaires, il faut traiter complètement le sujet dans le CCTP, en s'aidant des indications et des clauses types que le document contient généralement. Les "Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles de ponts mixtes" [8.7] entrent dans cette catégorie.

8.3.2 - Clauses d'équivalence

En application de la Recommandation T1-99 [5.8], il y a lieu d'introduire systématiquement, dans les CCAP, des clauses sur l'équivalence aux normes françaises non issues de normes européennes, et sur l'équivalence aux certifications prononcées en France (certifications NF, Acqpa...).

Le texte de ces clauses est fourni dans la Recommandation.

8.3.3 - Contrôles par le maître d'œuvre, points d'arrêt, acceptation de parties d'ouvrage

Cet article du CCAP doit définir toutes les dispositions du maître d'œuvre (en matière de contrôles, de points d'arrêt, d'acceptation de parties d'ouvrage...) qui ont des conséquences pour l'entreprise, notamment celles qui constituent des sujétions pour celle-ci. Il s'agit donc principalement de dispositions relationnelles (les dispositions techniques devant être définies dans le CCTP).

La rédaction de cet article est aussi l'occasion pour le maître d'œuvre de réfléchir à l'organisation de ses contrôles.

Il doit être indiqué par exemple :

- la fréquence des réunions de chantier ;
- l'objet et l'étendue des contrôles du maître d'œuvre ;
- les délais demandés pour ces contrôles (par exemple, délai pour le visa des plans et notes de calcul de l'étude d'exécution de l'entreprise, étant entendu que ces documents doivent être remis au maître d'œuvre par groupes formant des parties d'études homogènes et contenant tous les éléments nécessaires à leur vérification) ;
- les organismes auxquels le maître d'œuvre a confié des missions (afin notamment que l'entreprise ne choisisse pas les mêmes organismes) ;
- les relations autorisées de tel ou tel intervenant du maître d'œuvre avec l'entreprise lorsqu'une action rapide est nécessaire...

La fréquence et l'étendue des contrôles du maître d'œuvre, ainsi que les délais, sont à définir par des valeurs maximales permettant des possibilités d'adaptation : des indications trop précises limiteraient les possibilités d'action du maître d'œuvre et pourraient conduire, en cas de dépassement, à des réclamations des entreprises pour gêne ou perte de temps.

La liste des points d'arrêt doit être indiquée. Le fascicule 66 du CCTG (annexe contractuelle A1) définit quatre phases de travaux dont le démarrage doit être subordonné à la levée explicite d'un point d'arrêt par le maître d'œuvre. Il est nécessaire d'en ajouter d'autres, notamment pour ce qui concerne la protection contre la corrosion. Dans les cas courants, on pourra adopter la liste suivante :

- avant la préparation des pièces en atelier ;
- avant une opération de soudage (en atelier ou sur chantier) ;
- avant les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- avant le transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier ;
- avant le montage sur chantier ;

- avant les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier ;
- avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier ;
- avant le repliement des échafaudages et autres moyens d'accès aux surfaces peintes ;
- avant le bétonnage d'une dalle de pont mixte.

Les ouvrages importants sont décomposés en sous-ensembles faisant chacun l'objet de points d'arrêt. Dans le cas d'un montage complexe, celui-ci peut être décomposé en phases partielles successives, le démarrage de chacune d'elles faisant l'objet d'un point d'arrêt. Les sous-ensembles et les phases partielles doivent être définis dans le CCTP.

Si d'autres points d'arrêt paraissent nécessaires, ils doivent être définis explicitement dans le CCAP, avec référence aux articles correspondants du CCTP. On doit éviter, dans la mesure du possible, d'ajouter des points d'arrêt en cours de travaux.

Le CCAP doit fixer le délai de réponse du maître d'œuvre, c'est à dire le délai de préavis au-delà duquel l'entreprise peut poursuivre l'exécution si le maître d'œuvre ne se manifeste pas.

La liste des documents du PAQ doit être récapitulée, en signalant ceux des documents dont le visa par le maître d'œuvre conditionne la levée d'un point d'arrêt (voir 8.4.2 ci-après, ainsi que le chapitre 10).

Le CCAP doit aussi récapituler les parties d'ouvrage ou les phases de travaux qui doivent faire l'objet d'une acceptation par le maître d'œuvre. Il ne s'agit pas de "réception" au sens du CCAG, et on évitera donc d'utiliser ce terme à ce propos. La liste doit comprendre au minimum :

- les assemblages soudés exécutés en atelier ;
- les assemblages soudés exécutés sur chantier ;
- la partie de la protection contre la corrosion appliquée en atelier ;
- l'ensemble de la protection contre la corrosion.

Le maître d'œuvre doit établir chaque fois un procès-verbal d'acceptation, qui conditionnera la levée de points d'arrêt avant le démarrage de certaines phases ultérieures (voir le chapitre 10).

Pour les assemblages soudés, l'acceptation par le maître d'œuvre est stipulée dans le fascicule 66 du CCTG (article III.5.6) pour tous les assemblages soudés de classe 1 ou 2.

Pour la protection contre la corrosion, l'actuel fascicule 56 du CCTG prévoit : "sauf disposition différente du marché, toutes les surfaces préparées sont soumises par l'entrepreneur au maître d'œuvre pour acceptation" (articles 17.5.2 et 18.2.4). Il est reconnu maintenant que cette disposition présente des inconvénients, ne serait ce que parce que le délai disponible est très court (deux heures à six heures, suivant l'hygrométrie, entre le décapage et la mise en peinture). Il est donc préférable de faire porter l'acceptation du maître d'œuvre sur les épreuves de convenance d'une part, et sur le résultat des travaux d'autre part. Dans ces conditions, l'acceptation par le maître d'œuvre de la préparation des surfaces est remplacée par le contrôle effectué par l'entreprise et validé par l'inspecteur du maître d'œuvre.

En attendant que cette disposition soit définie dans le fascicule 56 révisé, on indiquera dans les CCAP que les surfaces préparées ne feront pas l'objet d'une acceptation du maître d'œuvre, et

on rappellera que le contrôle de la préparation des surfaces défini dans le fascicule 56 du CCTG fait partie des contrôles de l'entreprise.

8.3.4 - Garanties concernant la protection contre la corrosion

Le CCAP doit expliciter les différentes garanties demandées. Il s'agit de garanties particulières : elles n'interfèrent pas avec la responsabilité décennale qui existe toujours.

Pour la peinture des surfaces vues des éléments de catégorie 1 ou 2, le marché doit opter entre la garantie d'aspect dite normale, et celle dite spéciale, qui sont définies dans le fascicule 56 du CCTG. Cette seconde garantie comporte, en plus de la première, une garantie de "stabilité absolue" de la couleur de finition, c'est à dire de stabilité par rapport à la couleur initiale lors de la mise en service.

Aussi bien pour la garantie normale que pour la garantie spéciale, de nouvelles définitions de la stabilité de la couleur sont fournies dans la norme NF T 34-554. Il convient que le CCAP se réfère à cette norme, et non plus à celles figurant dans les commentaires du fascicule 56.

Pour ces différents points, on peut s'inspirer de la rédaction ci-après, en ne retenant que les parties utiles et en les adaptant à chaque cas particulier (voir l'annexe IV du fascicule 56).

"Garanties particulières des systèmes de protection contre la corrosion"

"L'entrepreneur garantit la bonne tenue et l'aspect des systèmes de protection contre la corrosion pendant les délais stipulés au chapitre 1.1 du fascicule 56 du cahier des clauses techniques générales et explicitées ci-après pour chaque partie d'ouvrage. Les délais courent à partir de la date d'effet de l'acceptation des travaux correspondants.

Tous les éléments de la charpente métallique, sauf les équipements, sont de catégorie 1 au sens du fascicule 56 du CCTG.

Tous les systèmes de peinture pour éléments de catégorie 1 sont de type A."

"Protection de la charpente métallique de ... par peinture, ou par métallisation et peinture, sur acier nu"

"Pour toutes les surfaces à protéger telles que définies au CCTP :

- garantie d'anticorrosion : 7 ans au degré Ri 1 ;*
- garantie d'aspect contre les décollements, pelages et cloquages : 6 ans. "*

"Pour les surfaces vues à protéger telles que définies au CCTP (garantie d'aspect normale) :

- garantie contre les altérations non uniformes du feuill : 3 ans ;*
- garantie contre les altérations non uniformes de la couleur : 5 ans. "*

ou :

“Pour les surfaces vues à protéger telles que définies au CCTP (garantie d’aspect spectrale)” :

- garantie contre les altérations non uniformes du feuillet : 5 ans ;
- garantie contre les altérations non uniformes de la couleur : 5 ans ;
- garantie contre les altérations uniformes de la couleur : 3 ans.”

“Protection de la charpente métallique de ... par galvanisation à chaud”

“Pour tous les éléments d’ouvrage à protéger tels que définis au CCTP”

- garantie d’anticorrosion : 12 ans ;
- garantie d’aspect : 5 ans.”

“Protection de la charpente métallique de ... par galvanisation à chaud suivie de mise en peinture”

“Pour toutes les surfaces à protéger telles que définies au CCTP”

- garantie d’anticorrosion : 15 ans ;
- garantie d’aspect contre les décollements, pelages et cloquages : 6 ans.”

“Pour les surfaces vues à protéger telles que définies au CCTP (garantie d’aspect normale)” :

- garantie contre les altérations non uniformes du feuillet : 3 ans ;
- garantie contre les altérations non uniformes de la couleur : 5 ans.”

ou :

“Pour les surfaces vues à protéger telles que définies au CCTP (garantie d’aspect spéculaire)” :

- garantie contre les altérations non uniformes du feuillet : 5 ans ;
- garantie contre les altérations non uniformes de la couleur : 5 ans ;
- garantie contre les altérations uniformes de la couleur : 3 ans.”

“Ces garanties engagent l’entrepreneur, pendant le délai fixé, à effectuer ou à faire effectuer à ses frais, sur simple demande du maître d’œuvre ou du maître d’ouvrage, toutes les réparations ou réfections nécessaires pour remédier aux défauts qui seraient constatés, que ceux-ci proviennent d’une défectuosité des produits ou matériaux employés, ou qu’ils proviennent des conditions d’exécution. Les critères et les termes sont définis dans le fascicule 56 du cahier des clauses techniques générales.”

“Stabilité de la couleur de finition des peintures des surfaces vues. Définitions”

“Par dérogation au CCTG, les écarts colorimétriques du fascicule 56 (3 unités NBS pour les altérations non uniformes de la couleur, 5 unités NBS pour les altérations uniformes) sont

remplacés par l'écart colorimétrique ΔE_{ab}^* maximum admissible tel que défini dans la norme NF T 34-554 partie 1. Si la couleur choisie n'est ni une nuance RAL, ni une nuance AFNOR, l'écart ΔE_{ab}^* maximum admissible retenu pour la garantie est celui de la nuance RAL ou AFNOR la plus proche de la couleur finalement choisie.

La méthode de mesure du respect de la garantie sur ouvrage en service est donnée dans la norme NF T 34-554, partie 2.

Le critère d'"altération non uniforme de la couleur" du fascicule 56 du CCTG, qui correspond à une évolution non uniforme de la couleur entre des surfaces homogènes, est remplacé par le critère de "stabilité relative de la couleur" défini dans la norme NF T 34-554 partie 2.

Le critère d'"altération uniforme de la couleur" du fascicule 56 du CCTG, qui correspond à une évolution de la couleur entre la mise en service de l'ouvrage et un temps t donné, est remplacé par le critère de "stabilité absolue de la couleur" défini dans la norme NF T 34-554 partie 2".

8.3.5 - Garanties concernant les chapes d'étanchéité sur dalle en béton et les complexes étanchéité-couche de roulement sur dalle métallique

Pour les chapes d'étanchéité sur dalle en béton, le fascicule 67, titre 1^{er}, du CCTG (annexe 1) indique les clauses à insérer dans les CCAP.

Dans le cas des dalles métalliques (le plus souvent des dalles orthotropes), on peut s'inspirer du document [8.4] de décembre 1996, applicable aussi bien aux revêtements "minces" (moins de 10 mm d'épaisseur) qu'aux revêtements "épais" (plus de 60 mm). Ce document propose :

- la durée de la garantie, cinq ans pour les ponts-routes ;
- la liste des défauts sur lesquels doit porter la garantie ;
- la définition quantitative de l'étendue de ces défauts à partir de laquelle l'entrepreneur doit effectuer une reprise.

8.3.6 - Dérogations au CCTG, au CCAG et aux normes

Les dérogations au CCTG, au CCAG et aux normes doivent être récapitulées au dernier article du CCAP.

Pour les dérogations au CCTG ou au CCAG, il suffit de définir, dans les pièces particulières du marché, les points auxquels on déroge, et de les récapituler dans le CCAP comme il vient d'être dit.

Par contre, on ne peut déroger à une norme française homologuée que dans des cas explicitement définis, et l'AFNOR doit en être informé par écrit ([5.5], [5.6]).

Dans la pratique, il n'est jamais nécessaire de déroger aux normes : leurs exigences sont modulables grâce aux classes et aux options qu'elles prévoient ; elles sont mises à jour dès qu'une évolution technique le nécessite ; leur élaboration donne lieu à des consultations suffisamment ouvertes.

Une exigence plus sévère que celle d'une norme n'est pas une dérogation si elle est justifiée par un besoin non pris en compte dans la norme. Par exemple, on ne déroge pas à la norme NF P 22-473 en imposant, dans les CCTP, des contrôles de soudures plus étendus [8.8] : cette exigence supplémentaire est justifiée par l'existence de charges de fatigue sur les ouvrages, la norme ne considérant que des charges statiques.

8.4 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP) : CHAPITRE "DISPOSITIONS GÉNÉRALES"

8.4.1 - Description de l'ouvrage

Le CCTP doit décrire la solution prévue, en détaillant surtout les dispositions qui n'apparaissent pas dans les dessins contractuels (les dimensions et les cotes sont plutôt du domaine des dessins).

Les points suivants sont donnés à titre d'exemples de points spécifiques aux ponts métalliques et aux ponts mixtes.

Protection contre la corrosion

Le ou les procédés prévus pour la protection contre la corrosion doivent être définis :

- mise en peinture sur acier nu ;
- métallisation au pistolet sur acier nu suivie de mise en peinture ;
- galvanisation à chaud ;
- galvanisation à chaud suivie de mise en peinture.

Les surfaces à protéger doivent être définies. Pour les tabliers autres que ceux à poutrelles enrobées, le plus commode est d'indiquer que "toutes les surfaces doivent être protégées, sauf ...", et de citer la liste des surfaces à ne pas protéger. Ces dernières peuvent être, suivant les cas :

- la face des semelles de ponts mixtes en contact avec le béton, la protection devant néanmoins être appliquée sur des retours de 50 mm de chaque côté ;
- les surfaces intérieures des raidisseurs fermés, tels que les raidisseurs en auget des dalles orthotropes ;
- la face supérieure de la tôle de roulement des dalles orthotropes, etc.

En ce qui concerne la face des semelles en contact avec le béton, l'application de peinture sur des

retours de 50 mm retarde considérablement l'apparition d'oxydation au point triple métal-béton-air. Bien entendu, cela ne peut concerner que les couches appliquées avant la mise en œuvre de la dalle en béton. On peut aussi autoriser de peindre toute la face supérieure des semelles, y compris les connecteurs, si cela simplifie la mise en œuvre de la protection. On peut aussi imposer l'application de la première couche sur ces zones, lorsque l'ouvrage doit rester exposé longtemps aux intempéries avant coulage de la dalle, et qu'on craint l'apparition de coulures de rouille. La présence de peinture sur les connecteurs n'affecte pas leur efficacité.

Parmi les surfaces à protéger, celles à considérer comme vues doivent être définies (pour les éléments d'ouvrage de catégorie 1 ou 2). Cela conditionne l'existence des garanties contre l'altération du feuillet, c'est à dire du film de peinture, et contre l'altération de la couleur. Par exemple, pour un tablier bipoutre mixte, on considère généralement comme surfaces vues les parties suivantes des poutres principales :

- les faces extérieures des âmes des poutres ;
- les chants extérieurs des semelles supérieures et inférieures des poutres ;
- les faces inférieures extérieures des semelles supérieures ;
- les faces supérieures extérieures des semelles inférieures ;
- les faces inférieures des semelles inférieures ;
- les montants d'appui extérieurs.

Les autres surfaces de la charpente qui sont à protéger sont considérées comme des surfaces non vues.

On peut classer la totalité d'un tablier en surfaces vues s'il est visible par en-dessous ; on peut faire de même s'il y a peu de surfaces non vues, afin de simplifier les travaux d'application.

Équipements

Les dispositifs d'accès, de visite et d'entretien doivent être suffisamment définis. Dans le cas d'une passerelle mobile, on doit définir en particulier le système de propulsion (moteurs et dispositif de secours manuel), le système de freinage, le procédé de protection contre la corrosion.

Montage de la structure métallique

Le mode de montage prévu doit être indiqué. Dans le cas de lancement, il doit être précisé s'il est possible de lancer en une seule fois, ou si les données du projet nécessitent de procéder à des phases successives d'assemblage à l'arrière et de lancement partiel. Les principaux ouvrages provisoires nécessaires, tels que contreventements de montage, palées, dispositifs de protection, doivent être schématisés ou au moins mentionnés.

Le mode de montage prévu doit être compatible avec les données relatives au site, fournies dans un article spécifique du CCTP (possibilités de transport des éléments de structure par voie terrestre ou navigable, accès au site, emplacement et dimensions des aires disponibles, contraintes dues aux voies franchies, etc.).

Le dimensionnement du tablier, la géométrie des appuis et les autres dispositions constructives du projet doivent être cohérents avec le mode de montage.

Si le mode de montage prévu dans le projet nécessite des aciers de renfort, non nécessaires en phase d'exploitation, il est préférable de faire apparaître ces aciers à part dans le détail estimatif.

Mise en œuvre de la dalle en béton dans le cas de pont mixte

Le CCTP doit indiquer le mode de construction de la dalle (coulage en place, éléments préfabriqués...), le phasage, le type de coffrage, le poids des coffrages pris en compte dans le dimensionnement.

La nécessité éventuelle de dénivellations d'appui, et leur amplitude, doivent être indiquées. Cela peut être calculé à partir des spécifications sur la limitation de l'intensité de fissuration, mais les entreprises ne disposent généralement pas d'un temps suffisant, avant la remise de leur offre, pour effectuer ces calculs.

Si le bétonnage nécessite des contreventements spécifiques de la structure, ceux-ci doivent être mentionnés.

8.4.2 - Dispositions relatives au plan d'assurance de la qualité

Il y a lieu d'indiquer dans le CCTP les documents à fournir au titre du plan d'assurance de la qualité.

La chronologie à respecter pour la production de chaque document doit être précisée ; ce peut être :

- avant tout début d'exécution des travaux ; c'est le cas pour les documents d'organisation générale des entreprises et de leurs sous-traitants, et pour les documents préalables à l'exécution des premières phases de travaux ;
- avant tout début d'exécution de la phase concernée ;
- en cours d'exécution ;
- immédiatement après achèvement de la phase concernée.

On doit indiquer aussi pour chaque document :

- s'il doit être systématiquement remis au maître d'œuvre ;
- s'il doit être seulement tenu à sa disposition.

La liste des documents demandés doit être récapitulée dans le CCAG comme indiqué précédemment en 8.4.2.

Pour le domaine couvert par le fascicule 66 du CCTG, un cadre-type de plan d'assurance de la qualité est indiqué dans l'annexe A1 contractuelle de ce fascicule.

Pour le domaine de l'anticorrosion, le fascicule 56 actuel contient également des dispositions pour l'assurance de la qualité, mais il convient de les adapter et de les compléter dans le marché.

Des indications détaillées sont données pour les cas courants en 10.3 ci-après.

Si l'opération le nécessite, le maître d'œuvre peut demander aussi dans le marché, au titre du plan d'assurance de la qualité, l'établissement de procédures d'exécution sur des points particuliers. Cela doit rester exceptionnel, puisque des dispositions remplissant un rôle analogue à celui des procédures sont prescrites, indépendamment du PAQ, dans les documents généraux du marché :

le CCTG et les normes prévoient l'établissement de programmes d'exécution pour les différentes phases de travaux ; en outre, la norme NF P 22-471 impose l'utilisation de modes opératoires de soudage qualifiés pour toutes les opérations de soudage sur la structure métallique.

8.5 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP) : CHAPITRE "PRODUITS DE CONSTRUCTION"

8.5.1 - Aciers laminés : nuance, qualité, norme de base, état de livraison

Nuance

Le CCTP doit spécifier la nuance de l'acier qui a été adoptée pour le dimensionnement du projet (S355, S420, S460...). Si des variantes paraissent possibles, les nuances autorisées doivent être indiquées.

Qualité et épaisseur maximale

On a vu qu'une certaine qualité de l'acier (J0, J2, K2, qualité de base, L), fonction de l'épaisseur du produit, est nécessaire pour assurer la sécurité vis-à-vis de la rupture fragile.

Par ailleurs, l'épaisseur du produit ne doit pas dépasser les épaisseurs maximales certifiées.

Il convient donc de spécifier dans le CCTP la qualité du produit (colonne 3 du tableau 1.7 ci-avant), et d'indiquer l'épaisseur à ne pas dépasser dans cette qualité : c'est la plus petite valeur des colonnes 4, 5 et 6 du même tableau.

Il convient de faire appliquer ces spécifications aux éléments de la structure proprement dite (y compris aux connecteurs de ponts mixtes, comme rappelé dans le fascicule 66 du CCTG, article II.6), mais aussi aux éléments accessoires et aux supports d'équipement s'ils sont soudés à la structure et restent sur l'ouvrage en service. Il convient d'être vigilant, car il s'agit souvent de petites pièces auxquelles on ne prête pas attention : supports permanents de soudure, potelets de glissières soudés sur dalle orthotrope...

Norme de base, état de livraison

Pour chaque type de produit, la norme de base doit être spécifiée dans le CCTP. Les produits utilisés le plus couramment sont ceux de la norme NF EN 10025 et ceux de la norme NF EN 10113.

Pour les nuances S355 et S275, il existe des produits certifiés en fortes épaisseur suivant ces deux normes de base. On a vu en 1.6.6 que le choix de la norme a des conséquences sur la soudabilité des produits.

Pour les aciers de la norme NF EN 10113, on doit choisir entre l'état normalisé et l'état thermo-mécanique. Ce choix doit généralement être spécifié dans le CCTP, car il fait partie de la définition du projet : il influence sur les épaisseurs maximales utilisables.

Il y a lieu d'autoriser la variante si aucune raison technique ne s'y oppose.

Exemple de spécification

À titre d'exemple, pour de l'acier S355 à l'état normalisé, la spécification est de la forme :

“Pour les éléments structuraux du tablier et pour tous les éléments soudés définitivement au tablier, il doit être utilisé l'un des aciers suivants :

- S355 NL de la norme NF EN 10113 pour les épaisseurs jusqu'à 150 mm ;
- S355 N de la norme NF EN 10113 pour les épaisseurs jusqu'à 80 mm ;
- S355 K2 de la norme NF EN 10025 pour les épaisseurs jusqu'à 90 mm. “

La dernière limitation d'épaisseur, concernant la norme NF EN 10025, pourra être fixée éventuellement à une valeur plus faible que 90 mm pour des considérations de soudabilité.

Pour les tôles profilées en long, on doit définir la nuance suivant la norme de base, comme il vient d'être indiqué, et spécifier en outre *“tôle profilée en long suivant NF A 36-270”*.

Il est rappelé que les tôles profilées en long ne peuvent être livrées qu'à l'état normalisé.

Les dispositions servant de base à ces spécifications sont en cours de changement lors de la rédaction du présent guide : passage de l'agrément à la certification, révision des normes de produits, révision du fascicule 4, titre III, du CCTG. Il convient donc d'actualiser ces indications avant de les utiliser.

8.5.2 - Aciers laminés : certification

On peut rappeler l'obligation d'utiliser des produits certifiés en indiquant dans le CCTP :

“Il est rappelé que la commande des produits en acier doit être conforme aux spécifications du fascicule 4, titre III, du CCTG”.

8.5.3 - Aciers laminés : autres spécifications

Le marché doit fixer un certain nombre d'options qui sont prévues dans les normes de produits. Certaines de ces options, applicables dans tous les cas, sont spécifiées dans le CCTG. Par exemple, pour les constructions soudées, le respect d'une valeur maximale de carbone équivalent est demandée dans le fascicule 4, titre III (article 6.1 du projet de titre III révisé). Il n'y a alors rien à ajouter pour ces options dans le CCTP.

Il reste principalement deux options qui peuvent être à spécifier dans le CCTP :

- aptitude à la galvanisation à chaud pour les éléments à galvaniser (voir en 8.6.8 ci-après) ;
- caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface (voir en 1.4.4 ci-avant) ; la spécification du CCTP est à rédiger par référence à la norme NF EN 10164, en précisant l'une des classes Z15, Z25 ou Z35 de cette norme.

Les éléments d'ouvrage nécessitant ces options doivent être identifiés dans le marché. Cela nécessite une étude dans le cas des aciers Z : leur tonnage ne doit pas être défini forfaitairement par un simple pourcentage du tonnage total.

Les indications qui précèdent concernent les spécifications du maître d'œuvre dans le marché. L'entreprise doit les reprendre dans sa commande, et y ajouter toutes les obligations qui découlent du CCTG et du règlement de la certification (ainsi évidemment que les caractéristiques dimensionnelles des produits). Il peut y ajouter des spécifications complémentaires s'il le juge utile, en vue par exemple de bénéficier d'une meilleure soudabilité.

8.5.4 - Produits consommables pour soudage

La nature des produits consommables utilisée lors de la qualification du mode opératoire de soudage est indiquée dans le document de qualification.

Lors des travaux, l'entrepreneur doit utiliser des produits identiques. Ces produits doivent être conformes aux dispositions du CCTG (fascicule 66) et des normes. Il n'y a pas de spécification complémentaire, dans les cas courants, à ajouter dans le CCTP.

8.5.5 - Boulons à haute résistance

Le CCTP, ou les dessins contractuels, doivent spécifier le diamètre des vis et l'état de livraison (noir ou galvanisé à chaud). La classe de qualité 10.9 est spécifiée dans le fascicule 66 du CCTG (article 11.4.2).

On peut rappeler l'obligation d'utiliser des produits certifiés en indiquant dans le CCTP :

"Il est rappelé que la commande des boulons à haute résistance doit être conforme aux spécifications du fascicule 4, titre IV, du CCTG".

8.5.6 - Goujons de connexion

Pour les goujons utilisés comme connecteurs dans les ponts mixtes, la spécification doit être basée sur les indications de la norme NF E 25-140 (article 3.2). Le CCTP, ou les dessins contractuels, doivent spécifier le diamètre des goujons, leur longueur, la nuance et la qualité de l'acier d'origine (en principe S235 J0), et doivent faire référence à la norme.

En ce qui concerne le document de contrôle fourni par le producteur, la norme prévoit qu'il peut être :

- soit une simple attestation de conformité à la commande, au sens du paragraphe 2.1 de la norme NF EN 10204 ;
- soit un certificat de réception au sens du paragraphe 3.1 de la même norme.

Une attestation de conformité ne mentionne aucun résultat de contrôle, et les contrôles du producteur ne sont pas spécifiques. Au contraire, un certificat de réception comporte les résultats des contrôles, et ces contrôles sont spécifiques, c'est à dire qu'ils portent sur les produits livrés ou sur des produits de la même unité de réception.

Il est donc préférable de demander dans le CCTP un certificat de réception. Les contrôles de réception, définis dans la norme, portent sur les caractéristiques dimensionnelles des goujons et des bagues réfractaires, sur les caractéristiques mécaniques des goujons (limite d'élasticité, résistance à la traction, allongement à la rupture), et sur l'aspect de surface des goujons et des bagues.

8.5.7 - Aciers moulés

Les aciers moulés ne faisant l'objet d'aucun fascicule du CCTG, il est recommandé de prendre conseil auprès d'un spécialiste pour la rédaction des spécifications

8.5.8 - Peintures (sur acier mis à nu, sur métallisation, sur galvanisation)

Les procédés de protection à mettre en œuvre, les surfaces à protéger et, parmi celles-ci, les surfaces à considérer comme vues, ont été définies à l'article "description de l'ouvrage" du CCTP, comme indiqué précédemment.

Il reste à spécifier dans le chapitre "produits de construction" :

- la catégorie des éléments d'ouvrage à protéger ;
- la catégorie du (ou des) système de peinture ;
- la catégorie de corrosivité de l'environnement ;
- la couleur de la couche de finition.

Les éléments d'ouvrage à protéger sont à classer dans l'une des quatre catégories définies dans le fascicule 56 du CCTG (article 3). La structure des tabliers doit être classée globalement en catégorie 1. Les équipements sont à classer en catégorie 2 s'ils ont 4 mm d'épaisseur ou plus, en catégorie 3 s'ils ont moins de 4 mm. Le fascicule 56 du CCTG, dans une annexe non contractuelle, envisage, à titre indicatif, la catégorie 2 pour les passerelles de visite et d'entretien, et la catégorie 3 pour les échelles d'accès, les garde-corps, etc.

Les câbles appartiennent à la catégorie 4.

Il est rappelé que la catégorie des éléments d'ouvrage détermine le degré de décapage, ainsi que la durée des garanties contractuelles.

Les systèmes de peinture sont classés en catégorie A, B ou C (fascicule 56 du CCTG, article 6). Pour les ouvrages de génie civil, le fascicule 66 (article 11.8) impose la catégorie A. Pour les équipements, le CCTP doit définir la catégorie.

Pour les systèmes de catégorie A, le CCTP doit rappeler l'obligation d'utiliser des produits certifiés par l'ACQPA.

La corrosivité de l'environnement est à définir pour les systèmes de peinture de catégorie A. On a à choisir entre les corrosivités C2, C3 et C4 telles que définies dans le texte introductif à la liste des systèmes certifiés par l'ACQPA.

Cette spécification, contrairement aux précédentes, est sans effet sur la durée de garantie. Mais elle détermine le choix du système de peinture, ce qui influe sur la durée de vie réelle de la protection. En présence de circonstances particulières conduisant à espacer au maximum les cycles d'entretien, on a intérêt à spécifier la catégorie immédiatement supérieure à celle correspondant aux conditions réelles.

Les garanties doivent avoir été définies dans le CCAP comme indiqué précédemment. Si l'on a opté pour la garantie d'aspect spéciale des parties vues (pour les éléments de catégorie 1 ou 2), il convient de rappeler cette option dans le CCTP.

La garantie d'aspect spéciale se différencie de la garantie d'aspect normale principalement par une garantie de stabilité de la couleur au cours du temps. Cette stabilité au cours du temps a plus de probabilité d'être effectivement obtenue si l'on choisit un système certifié avec l'une des couleurs de finition soumises à l'essai d'exposition au soleil. Actuellement, 23 couleurs sont essayées en Floride lors de la certification des systèmes pour surfaces vues.

Si la couleur exacte des couches de finition n'a pas encore pu être arrêtée lors de la consultation, le CCTP doit fournir au moins une indication approximative, car cela peut avoir une influence sur le choix du système de peinture, donc sur le prix de la proposition.

Le choix du système de peinture, parmi les systèmes certifiés satisfaisant aux spécifications qui viennent d'être indiquées, est souvent laissé à l'initiative de l'entrepreneur. Il s'agit alors d'une proposition technique, qui doit être signalée dans le règlement de la consultation.

On a vu au chapitre 4 que l'entrepreneur peut souhaiter utiliser des produits grenillés et prépeints de façon automatique afin d'alléger ses opérations de décapage. Il est utile de rappeler dans le CCTP que, en cas d'utilisation d'aciers grenillés prépeints, le décapage à effectuer doit :

- éliminer complètement la peinture provisoire ;
- assurer la qualité de préparation de surface requise dans la fiche de certification du système de peinture ou dans la fiche technique du produit.

8.5.9 - Métallisation par projection

L'épaisseur minimale du revêtement métallique est fixée dans le fascicule 56 du CCTG (article 18.2). Mais cette spécification s'appuie sur la norme NF A 91-201 qui est citée en commentaire seulement, et qui en outre a été remplacée par la norme d'origine européenne :

NF EN 22063 : revêtements métalliques et inorganiques - projection thermique - zinc, aluminium et alliages de ces métaux

Il y a lieu de viser cette nouvelle norme dans les marchés.

8.5.10 - Galvanisation à chaud

On doit définir, comme pour les peintures, la catégorie des éléments à galvaniser. La quantité minimale du dépôt de zinc s'en déduit (fascicule 56 du CCTG, article 4.2).

Les normes citées dans le fascicule 56 en commentaire seulement doivent être visées dans le marché :

- **NFA 55-101** : zinc en lingots (le fascicule 56 spécifie le type normal Z7 au minimum, qui correspond à une teneur minimale en zinc de 99,5 %) ;
- **NFA 35-503** : aciers pour galvanisation par immersion à chaud (le fascicule 56 spécifie la classe la plus sévère de cette norme pour les éléments de catégorie 1).

8.5.11 - Chapes d'étanchéité sur dalle en béton, complexes étanchéité-couche de roulement sur dalle métallique

Pour les chapes d'étanchéité sur dalle en béton, des spécifications sont proposées dans le fascicule 67, titre I, du CCTG.

Une procédure d'avis technique (analogue à celle des joints de chaussées) a été créée en 1993 : les entreprises ont la possibilité (mais non l'obligation) de justifier l'aptitude d'un produit ou d'un procédé en présentant un avis technique. Une clause sur ce point est proposée dans le document [8.5].

On consultera également les Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles ([8.7], paragraphe 9.6 : spécifications relatives aux chapes d'étanchéité).

Pour les complexes étanchéité-couche de roulement sur dalle métallique, il n'existe pas de fascicule du CCTG, mais la procédure d'avis technique s'applique aussi dans ce cas. Un premier produit a fait l'objet d'un avis en mars 2000.

Pour les produits n'ayant pas encore fait l'objet d'un avis technique, le maître d'œuvre base son acceptation sur l'examen, avec l'aide du réseau technique, des résultats d'essai et autres justifications produites par l'entreprise.

8.6 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP) : CHAPITRE "EXÉCUTION DES TRAVAUX"

8.6.1 - Type de soudure, degré de pénétration

On a vu au chapitre 2 que pour certaines catégories d'assemblages soudés, le choix du type de soudure à adopter n'est pas évident. Il s'agit principalement du choix entre soudures d'angle sans chanfrein et soudures à pleine pénétration, dans le cas d'assemblages en T, en croix ou en L transmettant des efforts faibles. De tels assemblages sont nombreux, par exemple dans les éléments transversaux des tabliers bipoutres.

Des critères techniques ont été mentionnés au chapitre 2.

Du point de vue contractuel, à défaut d'exigence particulière figurant dans le CCTP, le type de soudure est choisi après la signature du marché, d'après les résultats des calculs de l'entreprise. Or, ce type de calcul peut donner lieu à des désaccords : il porte souvent sur des effets secondaires, et il utilise généralement des modèles partiels simplifiés. Le risque de désaccord est accru par l'enjeu financier : les différents types de soudures ont des coûts très différents.

Il est donc souhaitable que le maître d'œuvre effectue les calculs nécessaires avant la consultation, et désigne avec précision dans le CCTP, ou sur des dessins contractuels, au moins pour les assemblages en T, en croix ou en L, ainsi que pour les assemblages semelle supérieure de pièce de pont/semelle supérieure de poutre, ceux de ces assemblages qui doivent être soudés à pleine pénétration.

Bien entendu, le maître d'œuvre peut toujours spécifier dans le marché une soudure à pleine pénétration même si les efforts de calcul ne le nécessitent pas. Il peut s'agir par exemple d'un assemblage qu'on veut pouvoir contrôler aux ultrasons, ou qui sera peu accessible aux inspections après achèvement de l'ouvrage. En raison du coût supplémentaire, ces cas doivent être justifiés : il n'est pas admissible de multiplier les soudures à pleine pénétration dans le seul but de simplifier les calculs.

Le marché ne doit pas, sauf exception, contenir de prescription sur la préparation des bords à souder (les chanfreins et leur géométrie) : ces éléments sont fixés dans les descriptifs des modes opératoires qualifiés (voir le chapitre 10 ci-après).

8.6.2 - Classe de qualité des assemblages soudés

La classe de qualité des assemblages soudés doit être spécifiée dans les documents du marché (norme NF P 22-471, article 6.1.1).

Dans le cadre de l'application du CCTG, les règles de base sont fournies dans le fascicule 66, article III.5.3.

Il peut cependant être nécessaire, dans des cas particuliers, de spécifier dans le CCTP la classe de qualité 1 pour des assemblages qui seraient normalement en qualité 2 d'après le fascicule 66. De même, on peut avoir à spécifier la classe de qualité 2 pour certains assemblages entre éléments accessoires qui seraient normalement justiciables de la qualité 3.

Des indications à ce sujet ont été données en 2.4 ci-avant.

8.6.3 - Assemblages boulonnés

Dans le cas où des assemblages boulonnés sont prévus, les dessins contractuels doivent indiquer le nombre et la dimension des boulons.

Pour les assemblages précontraints, on a vu en 3.5.2 ci-avant que leur calcul fait intervenir le coefficient de frottement ϕ , dont la valeur est différente suivant l'état des surfaces en contact. Le CCTP ou les plans contractuels doivent indiquer l'hypothèse qui a été adoptée pour le dimensionnement.

8.6.4 - Montage provisoire en atelier

Le fascicule 66 du CCTG (article III.7) mentionne la possibilité de prescrire dans le marché un "montage provisoire en atelier de tout ou partie de la structure".

Un montage provisoire en atelier, dit "montage à blanc", était couramment pratiqué autrefois, à l'époque du rivetage, puis du boulonnage. Il permettait de percer à l'avance, au bon endroit, les pièces à assembler sur chantier, et faisait donc partie du processus normal de fabrication. Avec la généralisation du soudage, le montage provisoire a perdu cette fonction.

Actuellement, le montage provisoire, lorsqu'il est pratiqué, consiste en une présentation d'éléments, suivie ou non de mise à dimension des pièces. La position relative des éléments peut être retrouvée sur le chantier grâce à des clames soudées provisoirement. L'objectif est de s'assurer que les éléments à souder ensemble sur chantier s'ajusteront comme prévu, et que la géométrie voulue sera obtenue. Il peut être utile aussi, pour l'entreprise, de vérifier que son travail en atelier est terminé avant de passer l'ouvrage à son sous-traitant de montage.

L'utilité d'un montage provisoire dépend de divers facteurs.

- Complexité de la géométrie spatiale de la structure, de l'interface des éléments à assembler sur le chantier, du mode de montage : un tablier à poutres-caissons est plus difficile à assembler qu'un tablier bipoutre en I, un tablier à dalle orthotrope plus qu'un tablier à dalle en béton, un pont courbe plus qu'un pont rectiligne, un tablier monté avec clavage en milieu de travée plus qu'un tablier simplement lancé.

- Équipement des entreprises, méthodes de fabrication : le montage provisoire permettait de pallier les imprécisions des méthodes de fabrication anciennes ; il est moins utile lorsque les entreprises utilisent des logiciels fournissant, outre les dessins d'exécution, les données exploitables par les machines d'oxycoupage à commande numérique.
- Sous-traitance du montage sur chantier : un montage provisoire en atelier est plus utile pour l'entreprise si le montage sur chantier est sous-traité.
- Contraintes particulières du chantier : un montage provisoire peut être utile dans le cas, par exemple, où des phases de montage sur chantier doivent avoir une durée strictement limitée parce qu'elles nécessitent un arrêt d'exploitation ; un autre exemple est celui de tablier destiné à être assemblé dans un pays lointain.

Les facteurs sont donc nombreux, et certains d'entre eux sont propres à l'entreprise. Sauf raison précise, il est préférable de respecter le principe suivant lequel un marché est une obligation de résultats, et de ne pas imposer un montage provisoire, qui est une obligation de moyen.

L'expression "montage provisoire" peut désigner des opérations d'importance très différente. Il peut s'agir de la simple présentation de deux éléments adjacents (par exemple, pour s'assurer du positionnement relatif d'une pièce de pont avec son prolongement en console à l'extérieur des poutres). À l'opposé, le montage provisoire peut être total (exceptionnellement, dans le cas de petits ouvrages à géométrie complexe). Si un marché prescrit un montage provisoire, il faut donc que la prescription précise les éléments à présenter simultanément.

8.6.5 - Exécution de la protection contre la corrosion

On peut imposer :

- que les opérateurs intervenant pour la préparation des surfaces et l'application des peintures soient certifiés ACQPA niveau N1 ;
- que le personnel d'encadrement soit certifié ACQPA niveau N2.

8.6.6 - Dalle en béton des ponts mixtes

Des réflexions ont été menées dans ce domaine postérieurement à la rédaction du fascicule 66 du CCTG. Elles ont conduit à la publication des "Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles" [8.7]. Le chapitre 9 de ce document fournit des indications pour rédiger des spécifications dans les CCTP sur les points suivants :

- calcul de l'effet des actions extérieures et du retrait ;
- formulation du béton dans les dalles coulées en place ;
- limitation de l'intensité de la fissuration ;

- limitation de l'ouverture des fissures ;
- dispositions constructives des dalles connectées en deuxième phase ;
- composition, essai, exécution des chapes d'étanchéité.

Le fascicule 66 du CCTG, article III.11, spécifiait déjà certaines dispositions constructives. Compte tenu de l'amélioration des connaissances, et de la prise en compte plus fine de ces problèmes, il peut être utile de nuancer ces dispositions dans les CCTP. Par exemple, les reprises de bétonnage longitudinales ne doivent pas être systématiquement interdites si la dalle est précontrainte transversalement. Les restrictions concernant les joints transversaux tendus par la flexion générale, sous actions permanentes, doivent aussi être réexaminées au cas par cas, en tenant compte des nouvelles dispositions.

8.7 - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP) : INDICATIONS GÉNÉRALES POUR LA RÉDACTION

De nombreux autres points nécessitent des spécifications dans les CCTP. En particulier, les règles de calcul et la définition des études d'exécution ne sont pas traitées dans le présent document.

Les indications qui précèdent permettent cependant de dégager quelques principes, et d'identifier certains types d'erreur à éviter.

Éviter les erreurs ou les oublis se traduisant par des exigences insuffisantes

Ce cas n'est pas le plus fréquent, mais c'est le plus gênant pour le maître d'œuvre qui aura des difficultés à obtenir ce qui n'est pas prévu dans le marché.

Un exemple est l'absence de toute mention relative aux vérifications à l'égard de la fatigue, alors que le CCTG actuel ne prévoit pas cette vérification.

Éviter les exigences inutiles ou excessives

On peut donner les exemples suivants de telles exigences.

- Toutes les soudures en classe 1 pour les ponts-routes. Une telle disposition nécessite beaucoup de parachèvements et de réparations en raison des critères d'acceptation sévères de la classe 1, ce qui n'est pas souhaitable.
- Toutes les soudures à pleine pénétration. Il s'agit d'une exigence non réaliste pour les assemblages en T, en croix ou en L.
- Meulage systématique des soudures. Cette prescription, reproduite parfois d'après des CCTP anciens, doit être évitée. Sauf raison particulière, il est préférable de ne meuler les soudures que pour éliminer les défauts géométriques hors tolérance : un meulage systématique, bien que coûteux, peut diminuer la durée de vie en fatigue s'il est mal exécuté.

Les tolérances géométriques sont définies dans la norme NF P 22-471 en fonction de la classe de qualité. Les conditions supplémentaires imposées aux soudures des dalles orthotropes sont fixées dans la norme expérimentale XP P 22-810 en fonction de l'épaisseur du revêtement. Ces normes sont rendues contractuelles dans les marchés par le fascicule 66 du CCTG. De même, en ce qui concerne l'aspect (pour la face vue des membrures de fond de caisson ou des âmes de poutre), le meulage systématique des soudures n'est généralement pas bénéfique, comme rappelé dans le fascicule 66 du CCTG (commentaire de l'article III.13).

- Rayon minimal imposé pour le meulage des arêtes des tôles. Le fascicule 66 du CCTG prescrit un meulage pour éviter que des arêtes trop vives ne coupent le film de protection contre la corrosion. Un meulage léger est suffisant. C'est volontairement que le CCTG ne prescrit aucun rayon minimal, parce qu'il a été jugé que cela serait inutile et augmenterait sans raison les coûts d'exécution et de contrôle.
- Montage provisoire en atelier, en l'absence de raison particulière.

Les prescriptions inutiles ou excessives ne sont généralement pas appliquées lors de l'exécution, mais elles créent une incertitude qui peut se traduire par un surcoût de l'offre.

Ne pas reproduire des clauses figurant déjà dans le CCTG ou les normes contractuelles

Avant d'introduire dans un CCTP une clause ayant un caractère général, on doit se demander si elle est réellement utile et, dans l'affirmative, si elle ne figure pas déjà dans le CCTG ou dans une norme visée dans le marché. Le CCTP n'est pas un document de synthèse, il doit seulement compléter les textes généraux sur les points particuliers à l'ouvrage concerné.

En reproduisant dans le CCTP des clauses déjà fournies dans les pièces générales du marché, on court le risque d'en modifier la rédaction et d'en altérer le sens.

En outre, ces redondances imposent un travail supplémentaire aux divers intervenants qui doivent rechercher les modifications par rapport au texte réglementaire, et deviner si elles sont volontaires ou non.

Adopter un plan tenant compte des lots et des sous-traitances prévisibles

Il convient, pour des raisons pratiques, que chacun des chapitres du CCTP (dispositions générales - matériaux - exécution des travaux...) soit divisé en sous-chapitres suivant les lots (construction métallique - béton), et que le texte relatif à chaque lot soit structuré suivant les sous-traitances potentielles.

8.8 - LISTE DES NORMES CONTRACTUELLES

Il est recommandé de récapituler dans une annexe contractuelle du CCTP toutes les normes faisant partie du marché.

Certaines de ces normes sont visées dans la partie "texte" d'un fascicule du CCTG, ou bien dans une annexe contractuelle d'un fascicule. Elles sont donc contractuelles dès lors que le CCTG est applicable, sans qu'il soit nécessaire de le répéter dans les pièces particulières. Cependant, on estime généralement préférable, pour des raisons pratiques, de rappeler ces normes dans le CCTP, en se limitant évidemment à celles des fascicules concernées.

Dans une seconde liste, on indique les autres normes qu'on veut rendre contractuelles. Il peut s'agir de normes figurant dans la partie "commentaires" des fascicules du CCTG, ou bien dans des annexes non contractuelles de ces fascicules. Il peut s'agir aussi de normes qui sont ignorées par le CCTG, parce qu'elles sont récentes, ou encore parce qu'elles correspondent à des exigences particulières de l'ouvrage non prévues dans le CCTG. Seules sont à citer les normes utiles au marché.

Pour les normes de cette seconde liste, on doit vérifier que le CCTP contient bien toutes les précisions nécessaires pour l'application de la norme : classes de qualité, dispositions optionnelles, etc.

Il convient d'indiquer de façon exacte l'intitulé de chaque norme, son indice et son numéro de classement. Le maître d'œuvre doit s'assurer, lors de la signature du marché, que ces éléments sont bien à jour, compte tenu de l'évolution permanente de la normalisation.

Il n'y a pas lieu, sauf raison particulière, d'indiquer la date des normes ; il convient seulement de préciser, au début de la liste des pièces citées par le CCAP, que les références à des textes non datés concernent la version en vigueur au premier jour du mois d'établissement des prix (CCAG, article 23).

8.9 - BORDEREAU DES PRIX ET DÉTAIL ESTIMATIF

Il est reconnu que les marchés à prix forfaitaire unique ne conviennent pas pour les ouvrages dont on ne peut pas définir tous les détails à l'avance : ils font prendre un risque financier à l'entreprise et un risque de malfaçons au maître d'ouvrage. Les marchés d'ouvrages d'art sont donc rémunérés sur bordereau de prix unitaires ; seules, des prestations non mesurables, mais bien définies, font l'objet d'un prix forfaitaire.

Le découpage des prestations et la définition des prix sont indiquées en annexe des fascicules 56 et 66 du CCTG. Bien entendu, ces dispositions sont à compléter dans le marché en fonction des particularités de chaque opération.

On notera que ces listes de prix ne comportent aucun prix pour rémunérer spécifiquement les contrôles (internes ou externes) effectués par l'entrepreneur, ni les PAQ, ni les autres actions pour l'obtention de la qualité : la conformité d'une prestation aux spécifications du marché est inséparable de la prestation elle-même, et n'a pas à faire l'objet de prix particuliers.

En application de ce principe, il ne doit pas apparaître de prix spécifique pour le montage provisoire en atelier, même lorsque celui-ci est prescrit dans le marché : comme indiqué en 8.7.4 ci-avant, il s'agit d'une méthode de contrôle de l'entreprise. En outre, un prix spécifique nécessiterait que le maître d'œuvre définisse, dès l'établissement du dossier de consultation, la consistance précise des opérations à effectuer, ce qui est difficilement envisageable en raison de la diversité des moyens et méthodes des entreprises.

Habituellement, les principaux prix sont les suivants pour le lot de construction métallique.

Installations de chantier du lot de construction métallique (forfait)

Ce prix est à fractionner en deux parties dont l'importance relative doit être définie dans le marché. L'une est payée après réalisation des installations, l'autre après démontage, repliement du matériel et remise en état des lieux. La prestation inclut l'établissement du projet des installations de chantier.

Études des ouvrages définitifs du lot de construction métallique (forfait)

Ce prix rémunère la production des documents d'études concernant les ouvrages définitifs :

- programme des études d'exécution ;
- note sur les bases des études d'exécution ;
- notes de calcul et dessins d'exécution des ouvrages définitifs ;
- programme général d'exécution des travaux.

Ce prix rémunère aussi la fourniture du dossier d'ouvrage conforme à l'exécution (article 40 du CCAG).

Le paiement peut être fractionné en plusieurs parties.

En ce qui concerne l'établissement des programmes particuliers d'exécution des travaux, le CCTG n'indique pas clairement s'ils sont rémunérés par le prix "études des ouvrages définitifs", ou par chaque prix d'exécution correspondant (par exemple, le programme de soudage par le prix "exécution de la charpente métallique", le programme d'exécution de la protection contre la corrosion par le prix "protection contre la corrosion"). Les pièces particulières du marché doivent fournir cette précision.

Exécution de la charpente métallique (au kilogramme d'acier)

Ce prix rémunère la fourniture de l'acier et des produits d'assemblage, la fabrication en atelier (découpage des tôles, exécution des assemblages en atelier, préparation des assemblages de chantier, etc.), et le transport des éléments sur le site.

Le paiement est habituellement fractionné en trois parties (dont l'importance relative est à définir dans le marché) :

- la première partie, correspondant à la fourniture, est payée après la livraison de l'acier en atelier, sur présentation du document de contrôle ;
- la seconde partie, correspondant à la fabrication en atelier, est payée après la levée du point d'arrêt préalable à l'expédition des éléments de charpente sur le chantier ;
- la troisième partie, correspondant au transport, est payée à l'arrivée des éléments de charpente sur l'aire de montage.

Le marché doit contenir les précisions nécessaires pour que la propriété des aciers soit définie à tout moment, de façon à éviter une situation inextricable en cas, par exemple, de défaillance d'une entreprise.

Un prix distinct doit être prévu pour les différentes sortes d'acier de la charpente.

Dans le cas où le montage nécessite de l'acier supplémentaire, le détail estimatif doit faire apparaître séparément le tonnage nécessaire en phase d'exploitation, et la quantité supplémentaire nécessaire uniquement pour le montage. C'est l'une des raisons pour lesquelles le dossier de consultation doit être basé sur une étude de montage suffisamment réaliste et précise.

Si l'option Z15, Z25 ou Z35 est nécessaire pour certains éléments d'ouvrage (caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface), les suppléments de prix correspondants doivent être prévus dans le bordereau des prix, et le tonnage d'acier prévu doit être indiqué dans le détail estimatif.

Pour les connecteurs, le plus simple est de prévoir deux prix unitaires, l'un pour des goujons, l'autre pour des cornières, et d'indiquer les tonnages correspondants dans le détail estimatif, le soumissionnaire devant présenter une offre pour une seule solution.

Lors du paiement des travaux, le tonnage d'acier à rémunérer est déterminé par des mètres établis d'après les dessins d'exécution visés par le maître d'œuvre, en considérant que l'acier laminé a une masse volumique de 7850 kg/m^3 (fascicule 66 du CCTG, annexe contractuelle A3).

Il résulte de cette définition que le tonnage d'acier à payer, y compris pour le premier paiement rémunérant la fourniture, est inférieur au tonnage approvisionné, en raison des chutes inutilisées. La différence est d'un ordre de grandeur de 20 %.

Montage sur chantier de la charpente métallique (forfait)

Ce prix rémunère, sauf indication contraire du marché, l'étude du montage, l'étude et l'exécution des ouvrages provisoires (éléments provisoires de la structure, étaitements, dispositifs de protection), les matériels de montage, la mise en place et l'assemblage des éléments de structure. Le marché doit préciser la consistance des études, et bien définir la ligne de séparation avec la prestation "études des ouvrages définitifs".

Les éléments provisoires (contreventements et entretoisements de montage, avant-bees, etc.) sont rémunérés par ce prix forfaitaire. Si l'entrepreneur demande à les laisser en place sur l'ouvrage, le maître d'œuvre peut l'autoriser dans les conditions indiquées dans le fascicule 66 du CCTG (article III.6), mais il n'a évidemment aucune raison de rémunérer le tonnage d'acier correspondant par application du prix unitaire de charpente si le marché ne le prévoit pas.

Un cas particulier est celui des rails de lancement soudés sous les tabliers, et laissés en place sur la structure. Il est admis (sauf indication contraire du marché), de considérer ces rails comme des éléments définitifs, du fait qu'ils ont la même efficacité que les membrures lorsque l'ouvrage est en service (fascicule 66 du CCTG, annexe contractuelle A3). Cela permet au maître d'œuvre d'avoir les mêmes exigences pour ces rails laissés en place que pour les autres éléments de la structure.

Le marché peut prévoir un fractionnement du paiement en plusieurs parties, réglées sur situations mensuelles. La dernière partie (dont le montant peut être fixé par exemple à 10 % du total) est à payer lorsque le tablier est sur ses appuis définitifs, et que le relevé du profil en long a été vérifié.

Le prix de montage, forfaitaire, n'est pas affecté en cas d'ajustement, en plus ou en moins, du tonnage de charpente réellement mis en œuvre. L'ancienne disposition, avec une rémunération de la charpente entièrement proportionnelle au tonnage mis en œuvre, pénalisait le maître d'ouvrage en cas d'augmentation du tonnage, l'entrepreneur en cas de diminution.

Protection contre la corrosion (au mètre carré de surface protégée)

Pour chaque procédé de protection contre la corrosion, on doit prévoir des prix distincts pour les surfaces vues et pour les surfaces non vues.

Coffrage et bétonnage de la dalle des ponts mixtes

Les prix correspondants sont à définir par référence au fascicule 65 A du CCTG (annexe A3 contractuelle).

Il convient de prévoir un prix forfaitaire pour chaque outil coffrant si l'exécution de la dalle, telle qu'elle est prévue dans le projet, en nécessite.

Appareils d'appui

Le prix est généralement à l'unité.

Épreuves de l'ouvrage (forfait)

La consistance de cette prestation doit être définie avec précision : l'entrepreneur peut être chargé seulement de fournir les camions et de les disposer sur l'ouvrage ; ou bien il peut être chargé aussi d'effectuer les mesures. Il faut préciser également le nombre et la consistance des cas de charge, les mesures à effectuer, leur précision.

Références du chapitre 8

- [8.1] - **Code des marchés publics.**
- [8.2] - **Cahier des clauses administratives générales (CCAG) applicables aux marchés publics de travaux** (édition de juin 1991).
- [8.3] - **Marchés publics de travaux. Recueil des documents-types du dossier de consultation des entreprises. Marché unique** (Commission centrale des marchés, 1987).
- [8.4] - **Revêtements sur platelages métalliques - Définition de la garantie** (clause-type de CCAP, Pierre Méhuc, décembre 1996).
- [8.5] - **Étanchéité des ponts-routes : note de présentation des avis techniques** (SETRA, février 1997).
- [8.6] - **Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées, conception et calcul** (SETRA-SNCF, mai 1995).
- [8.7] - **Ponts mixtes. Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles** (SETRA, septembre 1995).
- [8.8] - **Ponts métalliques et mixtes. Résistance à la fatigue. Guide de conception et de justifications** (SETRA, CTICM, SNCF, 1996).
- [8.9] - **Protection anticorrosion des structures métalliques** (D. André, J. Berthelley, J. Fuchs, G. Maire, SETRA/CTOA, bulletin Ouvrages d'art n° 32, juillet 1999).

*LA PRÉPARATION
DES TRAVAUX*



SOMMAIRE

9 - LA PRÉPARATION DES TRAVAUX

9.1	La période de préparation des travaux	207
9.2	L'organisation des moyens de contrôle du maître d'œuvre.....	207
9.3	Le schéma directeur de la qualité	209
9.4	PAQ : le document d'organisation générale	210
9.5	Documents d'études : généralités	212
9.6	Documents d'études : programme des études d'exécution, note sur les bases des études d'exécution, notes de calcul et dessins d'exécution, programme général d'exécution des travaux	214
9.6.1	Le programme des études d'exécution	214
9.6.2	La note sur les bases des études d'exécution	215
9.6.3	Les notes de calcul et dessins d'exécution des ouvrages définitifs.....	216
9.6.4	Le programme général d'exécution des travaux.....	217
9.7	Le projet des installations de chantier	217
	<i>Références du chapitre 9</i>	217

Page laissée blanche intentionnellement

LA PRÉPARATION DES TRAVAUX

9



9.1 - LA PÉRIODE DE PRÉPARATION DES TRAVAUX

La période comprise entre la date de notification du marché et la date de début effectif des travaux peut avoir une existence contractuelle si le CCAP le prévoit. Lorsqu'il en est ainsi, cette période de préparation est incluse dans le délai d'exécution et sa durée est de deux mois, sauf stipulations différentes du CCAP (CCAG, article 28).

Dans tous les cas, une période de préparation effective est indispensable. Sa durée peut dépasser deux mois pour certains ouvrages complexes, afin que les études prennent une avance suffisante sur les travaux.

Le marché doit définir ce qui est demandé à l'entrepreneur pendant la période de préparation. Il peut prévoir la possibilité de commencer les travaux avant la fin de cette période, après accord du maître d'œuvre, si les prestations préparatoires sont achevées.

Dans ce chapitre, "préparation des travaux" est pris au sens large, sans référence à une durée contractuelle.

9.2 - L'ORGANISATION DES MOYENS DE CONTRÔLE DU MAÎTRE D'ŒUVRE

La mission de maîtrise d'œuvre en phase travaux consiste notamment à :

- vérifier ou examiner les documents d'études et les documents du PAQ fournis par l'entrepreneur, puis viser ceux de ces documents pour lesquels un visa est prévu ;
- s'assurer de l'application correcte, en atelier et sur chantier, du marché, des documents d'études et des documents du PAQ ;
- valider par sondages les contrôles de l'entreprise, participer à la mise au point du traitements des non-conformités, signer les procès verbaux d'acceptation, lever les points d'arrêt.

Le CCTG et les normes définissent la consistance et l'étendue des contrôles que doit effectuer l'entrepreneur ("contrôle intérieur"), mais la vocation de ces textes n'est pas de définir les vérifications et les contrôles techniques ("contrôle extérieur") que doit effectuer le maître d'œuvre. Celui-ci les module en fonction des difficultés de l'ouvrage, du comportement de l'entrepreneur, des résultats obtenus par celui-ci, etc.

Les contrôles du maître d'œuvre ont surtout pour objet de valider les contrôles de l'entrepreneur : leur rôle n'est pas, en principe, de les compléter ni de s'y substituer.

Dans cet esprit, le maître d'œuvre ne doit pas chercher à tout contrôler. À l'opposé, il ne doit pas se décharger aveuglément sur les contrôles de l'entrepreneur.

Un dosage aussi doit être trouvé entre les contrôles sur documents, et les contrôles en atelier et sur chantier.

Bien entendu, les actions de contrôle du maître d'œuvre doivent se conformer au contrat qui existe entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre quand ceux-ci sont distincts.

Pour la vérification ou l'examen des documents d'étude de l'entreprise, le maître d'œuvre peut soit utiliser ses moyens propres, soit proposer de faire appel à un ou plusieurs bureaux d'études extérieurs. Le chapitre 12 du "Guide" [9.1] fournit un exemple de CCTP pour cette seconde éventualité.

Dans tous les cas, la partie de cette tâche portant sur la structure métallique ne peut être confiée qu'à un bureau d'études compétent en construction métallique.

Pour le contrôle extérieur des travaux, il faut distinguer ce qui s'apparente à de la surveillance de chantier classique d'une part, et les contrôles spécifiques à la construction métallique d'autre part. Ces derniers nécessitent l'intervention de spécialistes.

Pour les assemblages soudés, le maître d'œuvre peut s'adresser au réseau des laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées, ou bien à un organisme qualifié tel que AIF, APAVE, Bureau Veritas, CEP, Institut de Soudure, SOCOTEC, etc.

L'inspecteur ou les inspecteurs missionnés par cet organisme doivent avoir les certifications COFREND nécessaires, en particulier des certifications de niveau 2 au moins pour les différents procédés de contrôle non destructif (voir 6.4 ci-avant). Il est souhaitable en outre qu'ils possèdent une expérience dans le domaine des ponts métalliques, pour qu'ils puissent discerner le rôle des différents éléments de l'ouvrage, et apprécier la nocivité des défauts vis-à-vis de la sécurité et de la durabilité. Les tâches d'inspection comportent une part importante de jugement et d'interprétation, et les problèmes se posent de façon très différente pour un pont et pour un récipient à pression, par exemple.

Pour la protection contre la corrosion, les contrôles constituent également une tâche spécifique, nécessitant un inspecteur spécialement formé et équipé d'appareils de contrôle. La certification ACQPA/FROSIO de l'inspecteur est un élément favorable.

Les grands maîtres d'œuvre (Équipement, SNCF...) ont généralement leur propre réseau de compétences qui peut assurer l'ensemble des inspections d'une opération (soudage, protection contre la corrosion, géométrie...).

Il est évidemment exclu que le maître d'œuvre et l'entrepreneur utilisent un même organisme pour leurs contrôles : les actions des deux contractants doivent être distinctes, et il ne doit pas y

avoir d'équivoque dans leurs responsabilités. Pour cette raison, il est bon que le maître d'œuvre indique, dans le dossier de consultation des entreprises, à quels organismes il confiera une mission.

Le maître d'œuvre doit assurer l'indispensable coordination de ses différents intervenants : bureau d'études, inspecteurs spécialisés, géomètres, etc. Cette tâche est évidemment simplifiée lorsque tout peut être confié à un réseau technique unique.

La mission de l'équipe de maîtrise d'œuvre commence dès le début de la période de préparation des travaux : il est donc indispensable de désigner les intervenants suffisamment tôt, et d'organiser dès que possible une réunion préalable.

Par exemple, en ce qui concerne le bureau d'études chargé de contrôler les documents d'études de l'entreprise et de proposer les visas ("bureau contrôleur"), il est recommandé de l'associer à l'opération dès le jugement des offres, surtout en cas de variantes.

De même, le fascicule 66 du CCTG (commentaire de l'article III.1.5.3) souligne la nécessité de faire intervenir l'organisme qui sera chargé de l'inspection des soudures pour le maître d'œuvre dès les premiers stades préparatoires de l'exécution, sans attendre la remise du programme de soudage.

Le maître d'ouvrage a la charge financière de ses contrôles. Comme ordre de grandeur, le coût du contrôle extérieur des travaux d'exécution d'un tablier métallique (y compris la protection anticorrosion) est compris généralement entre 1,5 % et 3 % du coût du tablier. Ce pourcentage est fonction de divers paramètres tels que la complexité de l'ouvrage et la fiabilité des contrôles de l'entreprise.

9.3 - LE SCHÉMA DIRECTEUR DE LA QUALITÉ (SDQ)

Le maître d'œuvre a toujours eu la charge de réunir les entrepreneurs avec ses propres intervenants et ceux du maître d'ouvrage, au début d'une opération de construction, afin d'organiser la coordination nécessaire.

Lorsque les principes de la qualité ont été introduits de façon explicite, les modalités de cette mission ont été précisées.

En particulier, la Recommandation T-1-87 du GPEMT [7.3] a introduit la notion de "schéma directeur de la qualité" (SDQ), qui a été reprise par le fascicule 66 du CCTG.

Le schéma directeur de la qualité est à établir après la notification du marché. Il a pour objet de grouper et de coordonner les PAQ des différents intervenants, ainsi que les dispositions prévues par le maître d'œuvre pour ses actions de contrôle.

Il est concrétisé sous la forme d'un document précisant notamment :

- les dispositions prises pour coordonner les PAQ des entreprises, des sous-traitants, des fournisseurs et des divers prestataires ;

- l'organisation des interfaces entre les intervenants ;
- l'identification des personnes qui ont un pouvoir de décision (sur les études, sur l'exécution...);
- le recensement des points d'arrêt et des points critiques ;
- l'organisation des contrôles du maître d'œuvre ;
- l'organisation des réunions de chantier, des circuits d'information, de la diffusion et du visa des documents, etc.

Ce contenu est évolutif : il doit être complété progressivement en fonction des PAQ, des options retenues pendant la période de préparation, et des observations faites au cours des travaux.

Le dossier de consultation des entreprises ou le marché doit préciser qui est chargé d'établir le SDQ ; il est souhaitable que ce soit le maître d'œuvre, et que la personne physique qui en a la charge soit identifiée (fascicule 66 du CCTG, commentaire de l'article I.2).

Dans le cas habituel où un plan d'assurance de la qualité est prévu, il doit toujours être établi un SDQ, car une coordination est toujours nécessaire, même si les partenaires ne sont pas très nombreux ; mais son volume doit être modulé en fonction de la complexité de l'ouvrage et du nombre des intervenants.

4.4 - PAQ : LE DOCUMENT D'ORGANISATION GÉNÉRALE

L'entrepreneur doit fournir au titre du plan d'assurance de la qualité, pendant la période de préparation des travaux :

- le document d'organisation générale, présenté ici ;
- les documents préalables à l'exécution des premières phases de travaux, présentés au chapitre 10 ci-après avec l'ensemble des documents préalables et des documents de suivi d'exécution.

Le document d'organisation générale est habituellement le premier document, ou ensemble de documents, à fournir par l'entrepreneur après la notification du marché, et avant tout début d'exécution des travaux.

Il est établi par enrichissements et mises au point successives d'éléments déjà fournis antérieurement :

- à l'appui de leur offre, habituellement, les candidats ont déjà à indiquer les principales dispositions qu'ils comptent prendre en matière de qualité (voir le SOPAQ en 8.2.4 ci-avant) ;

- lors de la mise au point du marché, ces dispositions sont revues et complétées par l'entrepreneur (ou le groupement d'entrepreneurs) sur le point d'être retenu, en accord avec le maître d'œuvre ; des dispositions complémentaires peuvent être négociées à ce stade (concernant par exemple les études, le montage...) ; après accord, ces dispositions sont introduites dans le CCTP, ou bien dans le SOPAQ qui est incorporé alors au marché ;
- pendant la période de préparation des travaux, l'entrepreneur et les sous-traitants désignés dans le marché développent les éléments déjà fournis, qui constituent alors le document d'organisation générale.

Ce document est donc habituellement mis au point après la signature du marché, et n'est pas contractuel. Il est à soumettre au visa du maître d'œuvre. En cas de modifications intervenant après le visa, les nouvelles dispositions doivent être acceptées par le maître d'œuvre ; il est donc important que chaque version soit datée.

Comme les autres documents du PAQ, le document d'organisation générale ne doit fournir que des éléments en relation directe avec la qualité, qui concernent l'opération particulière considérée, et qu'il est normal que le maître d'œuvre connaisse.

Les points à traiter dans le document d'organisation générale sont par exemple les suivants (ces éléments s'inspirent des indications figurant au début de l'annexe A1 contractuelle du fascicule 66 du CCTG) :

Identification des intervenants

Chaque intervenant doit être identifié : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entrepreneur(s), mandataire dans le cas d'un groupement d'entreprises, sous-traitants désignés dans le marché ou acceptés ultérieurement, fournisseurs principaux... Pour chacun d'eux, une personne responsable doit être désignée nominativement (nom, adresse, numéro de téléphone et de télécopie).

Répartition des tâches

Le document doit indiquer la répartition des tâches entre les différentes entreprises. Il précise également les dispositions prises pour gérer les interfaces entre lots différents, ainsi qu'entre les entreprises d'un même lot.

Désignation d'un agent responsable de chaque phase d'études et de travaux

Un agent responsable de chaque phase d'études et de travaux doit être désigné par l'entrepreneur. À ce stade, cette désignation doit être nominative ; la qualification de l'agent, ses références professionnelles, sa situation dans l'entreprise ou vis-à-vis de celle-ci doivent être indiquées.

Dans les cas courants, cette désignation doit concerner les phases suivantes :

- l'élaboration des études d'exécution ;
- l'approvisionnement (des aciers laminés, des produits consommables pour soudage...) ;
- la préparation des pièces en atelier ;
- l'établissement du programme de soudage en atelier ;

- l'exécution du soudage en atelier ;
- la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- le transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier ;
- l'établissement du programme de soudage sur chantier ;
- l'exécution du soudage sur chantier ;
- l'exécution des opérations de montage sur chantier ;
- la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier.

Le fascicule 66 du CCTG (article III.8.1) définit de façon précise le rôle de l'agent responsable des opérations de montage (le "ROM").

Désignation d'un agent responsable pour chaque domaine de contrôle

L'entreprise doit désigner un agent responsable et fournir les mêmes renseignements que précédemment pour chaque domaine du contrôle intérieur.

Les domaines concernés sont habituellement :

- la préparation des pièces en atelier ;
- les soudures exécutées en atelier ;
- la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- les soudures exécutées sur chantier ;
- la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier ;
- la géométrie du tablier.

Modalités d'organisation des contrôles

Les indications à fournir portent sur l'organisation des contrôles dans les différents domaines indiqués précédemment.

9.5 - DOCUMENTS D'ÉTUDES : GÉNÉRALITÉS

En France, les études d'exécution font presque toujours partie du marché (il n'en est pas de même dans d'autres pays européens, où le rôle de l'entrepreneur est alors réduit à celui de simple exécutant).

Dans le fascicule 66 du CCTG, le chapitre III définit la liste des documents d'études que l'entrepreneur doit fournir, et l'annexe A3 contractuelle indique la prestation correspondante du bordereau des prix à laquelle ces documents se rattachent. Ces indications sont résumées dans le tableau 9.1 ci-après.

Documents d'études	Prestation correspondante du bordereau des prix
1 - Programme des études d'exécution 2 - Note sur les bases des études d'exécution 3 - Notes de calcul et dessins d'exécution des ouvrages définitifs 4 - Programme général d'exécution des travaux	Études des ouvrages définitifs
5 - Projet des installations de chantier	Installations de chantier (sauf indication contraire du marché)
6 - Programmes particuliers d'exécution des travaux	(À préciser dans le marché)
7 - Études du montage et des ouvrages provisoires	Montage sur chantier

Tableau 9.1
Liste générale des documents d'études et prestation correspondante du bordereau des prix

Ces documents d'études sont à soumettre au visa du maître d'œuvre, sauf en ce qui concerne les ouvrages provisoires pour lesquels certains documents seulement sont soumis à visa (fascicule 66 du CCTG, commentaire de l'article III.1.1.1).

Les documents 1 à 5 du tableau 9.1 sont généralement fournis les premiers ; ils sont présentés ci-après dans le présent chapitre.

Les documents 6 et 7 sont présentés au chapitre suivant (section 10.2 pour les programmes d'exécution, section 10.18 pour les études du montage et des ouvrages provisoires).

9.6 - DOCUMENTS D'ÉTUDES :

- PROGRAMME DES ÉTUDES D'EXÉCUTION,
- NOTE SUR LES BASES DES ÉTUDES D'EXÉCUTION,
- NOTES DE CALCUL ET DESSINS D'EXÉCUTION,
- PROGRAMME GÉNÉRAL D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

9.6.1 - Le programme des études d'exécution

Ce document doit comprendre (fascicule 66 du CCTG, article III.1.2.2) :

- la liste prévisionnelle des documents à fournir ;
- le calendrier prévisionnel de production de ces documents.

Le programme des études doit évidemment être compatible avec le programme général d'exécution des travaux (paragraphe 9.6.4 ci-après) : le calendrier doit faire apparaître les délais réservés pour permettre au maître d'œuvre d'examiner les documents dans le délai convenu, et à l'entrepreneur d'effectuer les rectifications éventuelles.

Les documents d'études sont en général établis progressivement, et remis au fur et à mesure au maître d'œuvre. Il est souvent admis qu'une partie des documents soit remise après la période de préparation des travaux.

Le visa d'un document par le maître d'œuvre peut déclencher des phases d'exécution telles que :

- la commande des aciers, qui est urgente pour l'entrepreneur et qui, une fois lancée, interdit de revenir sur l'épaisseur, la nuance et la qualité des tôles (les tôles sont fabriquées en usine spécialement pour chaque ouvrage ; seuls, les profilés peuvent être achetés sur place, chez des distributeurs) ;
- le découpage des pièces, qui fixe non seulement la forme de ces pièces, mais aussi d'autres dispositions constructives ; par exemple, dans le cas des ponts mixtes, le découpage de l'âme des poutres principales suivant la contreflèche de fabrication ne permet plus de modifier librement les dessins de coffrage de la dalle.

C'est pourquoi, le marché demande souvent que le calendrier prévoie la remise des documents par "ensembles fonctionnels", dont les dispositions (épaisseur des tôles, tracé des pièces...) ne risquent pas d'être remises en cause par d'autres documents fournis ultérieurement.

Le délai d'examen de chaque ensemble de documents par le maître d'œuvre ne doit commencer à courir qu'après réception complète de l'ensemble.

Dans beaucoup de cas, l'étude du montage, le dimensionnement de la dalle en béton... doivent être inclus dans les premiers ensembles de documents, bien que cela augmente la quantité des études à effectuer et à contrôler avant de pouvoir commander les aciers.

9.6.2 - La note sur les bases des études d'exécution

L'entrepreneur doit bien entendu fournir ce document avant de commencer à élaborer les notes de calcul et les dessins d'exécution.

Le fascicule 66 du CCTG, article III.1.2.3, précise qu'il doit inclure notamment :

- les propositions techniques complémentaires de l'entrepreneur, s'ajoutant aux dispositions du marché (s'il y a lieu) ;
- les méthodes et moyens de calcul ;
- les bases numériques des calculs.

Doivent donc être explicités, dans ce document :

- la liste des actions, leurs valeurs caractéristiques, les combinaisons d'actions sous forme explicite pour les différents états-limites ;
- les valeurs des propriétés mécaniques des matériaux à adopter dans les calculs (limites d'élasticité, résistance, coefficients d'équivalence du béton par rapport à l'acier, contraintes admissibles de traction du béton en service, etc.) ;
- les méthodes de construction qui ont une influence sur les efforts (contreflèches d'usinage, phasage de construction, mode de montage, dénivellations d'appui, mode de mise en place de la dalle...) ;
- les règlements de calcul à appliquer (CCTG, autres textes visés dans le marché, règles particulières indiquées éventuellement dans le CCTP pour vérifier la résistance à la fatigue, la stabilité de forme des fonds de caisson, les dalles orthotropes, le comportement du béton des dalles de ponts mixtes...) ;
- les règles de vérification complémentaires proposées éventuellement par l'entrepreneur pour compléter ces textes ;
- les principales hypothèses simplificatrices proposées (préciser par exemple s'il est envisagé d'admettre l'indéformabilité des sections transversales dans leur plan, de négliger la torsion de Saint-Venant pour les sections ouvertes, de négliger le gauchissement des sections pour les sections fermées ; indiquer si la courbure éventuelle du tracé en plan, ou le biais des lignes d'appuis, sera négligé ou pris en compte pour calculer les poutres principales, les éléments transversaux...) ;
- la modélisation de l'ouvrage envisagée (modèle à barres, éléments finis) ; dans le cas d'un modèle à barres, il doit être indiqué s'il s'agira d'un modèle "unifilaire", en "gril plan", ou spatial... ; dans le cas d'éléments finis, l'étendue des zones qui seront modélisées est à préciser ;
- le mode de calcul des effets du retrait, du fluage, de la fissuration des dalles en béton de ponts mixtes ;
- le ou les logiciels qui seront utilisés, qu'il s'agisse d'un logiciel spécifique (par exemple, logiciel pour le calcul des ponts mixtes) ou d'un logiciel standard (par exemple, logiciel de calcul par éléments finis) ;

La plupart de ces points doivent normalement avoir été déjà définis, au moins dans leurs principes, dans le CCTP. Ils ont dû être précisés dans les documents fournis par l'entrepreneur à l'appui de son offre, et mis au point en accord avec le maître d'œuvre pendant la période de préparation des travaux. La note sur les bases des études d'exécution reprend ces différents éléments en les développant et en les complétant.

Le bureau contrôleur du maître d'œuvre doit s'assurer que les indications de cette note sont suffisamment complètes et explicites, que les dispositions envisagées sont adaptées au projet et qu'elles satisfont au marché (CCTG, CCTP...)

Avant de viser le document, il peut demander, s'il y a lieu, des justifications par le calcul pour valider les hypothèses simplificatrices proposées par l'entrepreneur.

9.6.3 - Les notes de calcul et dessins d'exécution des ouvrages définitifs

Des spécifications générales concernant les notes de calcul et les dessins d'exécution figurent dans le fascicule 66 du CCTG (articles III.1.5.1 et III.1.5.2).

Les documents sont remis au maître d'œuvre suivant le calendrier établi au préalable (paragraphe 9.6.1 ci-avant).

Ils sont vérifiés ou examinés par le bureau contrôleur du maître d'œuvre, et par les organismes d'inspection spécialisés qui doivent être associés à cet examen dès le début, sans attendre la production des documents spécifiques tels que le programme de soudage ou les plans de mise en peinture. Des indications générales sur la consistance de cette tâche sont fournies dans le Guide [9.1], chapitre 12.

Le fascicule 66 du CCTG (commentaire de l'article III.1.1.1) pose comme principe général que les documents d'études des ouvrages définitifs doivent être soumis au visa du maître d'œuvre (et non à son approbation).

Par son visa, le maître d'œuvre :

- indique au maître d'ouvrage que ses exigences sont satisfaites ;
- autorise l'entrepreneur à effectuer les travaux correspondants (sauf si un point d'arrêt est prévu, auquel cas il doit être explicitement levé).

On a vu que le programme des études d'exécution prévoit généralement la remise des documents par ensembles fonctionnels. Le maître d'œuvre doit exiger la remise complète de ces ensembles par l'entrepreneur, et leur examen complet par son bureau contrôleur, avant de commencer à les viser.

9.6.4 - Le programme général d'exécution des travaux

Ce document doit indiquer :

- la consistance des phases d'exécution ;
- le calendrier prévisionnel d'exécution des travaux.

Il fait l'objet de l'article 28.2 du CCAG, et de l'article III.1.3 du fascicule 66 du CCTG.

9.7 - LE PROJET DES INSTALLATIONS DE CHANTIER

Les principes généraux concernant les installations de chantier sont indiqués à l'article 31 du CCAG.

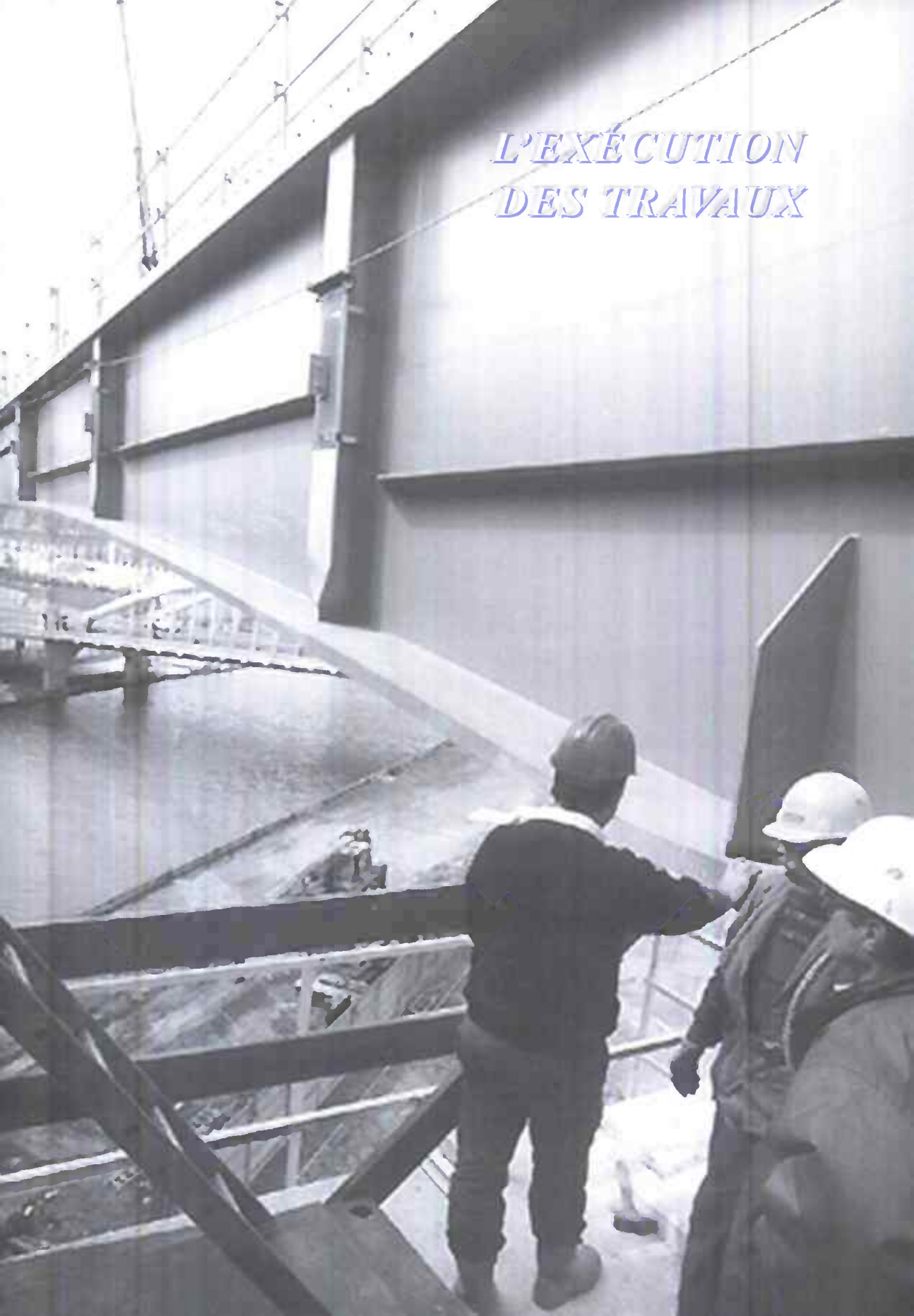
Des indications sur la consistance du projet à établir figurent à l'article III.1.4 du fascicule 66 du CCTG.

Références du chapitre 9

[9.1] - **Guide pour la commande et le pilotage des études d'ouvrages d'art** (SETRA, novembre 1997).

[9.2] - **Études de conception et d'exécution d'ouvrages de génie civil : guide pour une démarche d'assurance de la qualité** (SETRA - SNCF, décembre 1997).

*L'EXÉCUTION
DES TRAVAUX*



SOMMAIRE

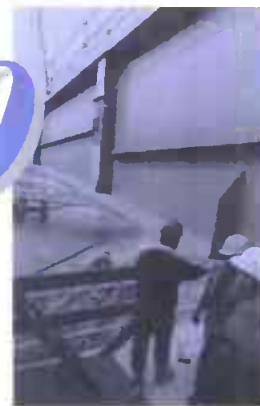
10 - L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

10.1	Généralités	221
10.2	Documents d'études : les programmes particuliers d'exécution des travaux	221
10.3	PAQ : documents préalables à l'exécution et documents de suivi d'exécution	222
10.3.1	Rappel des différents types de documents composant un PAQ	222
10.3.2	Liste des documents préalables à l'exécution et des documents de suivi d'exécution que doit comprendre un PAQ dans les cas courants	223
10.4	Fourniture des aciers laminés	234
10.4.1	Documents fournis par l'entrepreneur	234
10.4.2	Contrôles du maître d'œuvre concernant les aciers laminés	235
10.5	Fourniture des produits consommables pour soudage	236
10.6	Fourniture des boulons à haute résistance	236
10.7	Fourniture des goujons de connexion	237
10.8	Fourniture des peintures et autres produits pour la protection contre la corrosion	237
10.9	Préparation des pièces en atelier	238
10.9.1	Documents fournis par l'entrepreneur avant la préparation des pièces en atelier	238
10.9.2	Documents fournis par l'entrepreneur après la préparation des pièces en atelier	239
10.9.3	Contrôles du maître d'œuvre en atelier	239
10.10	Soudage : qualifications	239
10.10.1	Qualification de mode opératoire de soudage (QMOS), descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS)	239
10.10.2	Qualification des soudeurs	241

10.11	Soudage : documents fournis par l'entrepreneur	242
10.11.1	Programme de soudage	242
10.11.2	Documents fournis par l'entrepreneur après le soudage	244
10.12	Soudage : travaux en atelier	245
10.12.1	Contrôles par le maître d'œuvre avant le soudage	245
10.12.2	Contrôles par le maître d'œuvre pendant le soudage	246
10.12.3	Contrôles par le maître d'œuvre après le soudage	247
10.12.4	Acceptation des assemblages soudés par le maître d'œuvre	248
10.13	Montage provisoire en atelier	249
10.14	Protection contre la corrosion : travaux en atelier	249
10.14.1	Programme et dessins d'exécution fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance en atelier	249
10.14.2	Documents du PAQ fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance en atelier	250
10.14.3	Épreuves de convenance en atelier, réunion préalable, fiche de démarrage des travaux et planning d'exécution	252
10.15	Transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier	254
10.16	Soudage : travaux sur chantier	254
10.17	Boulonnage	255
10.17.1	Contrôles par le maître d'œuvre avant le boulonnage	255
10.17.2	Contrôles par le maître d'œuvre pendant le boulonnage	256
10.17.3	Contrôles par le maître d'œuvre après le boulonnage	256
10.18	Montage sur chantier : documents fournis par l'entrepreneur avant l'exécution	257
10.18.1	Programme de montage sur chantier	257
10.18.2	Ouvrages provisoires : classification	258
10.18.3	Ouvrages provisoires : études, documents d'études	259
10.18.4	Documents du PAQ fournis avant le montage sur chantier	260
10.19	Montage sur chantier : exécution	261
10.20	Protection contre la corrosion : travaux sur chantier	261
10.20.1	Documents fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance sur chantier	261
10.20.2	Épreuves de convenance sur chantier, réunion préalable, fiche de démarrage des travaux et planning d'exécution	262
10.20.3	Acceptation du système terminé	264
10.21	Dalles de ponts mixtes	265
10.22	Dossier d'ouvrage	266
	Références du chapitre 10	266

L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

10



10.1 - GÉNÉRALITÉS

Pendant l'exécution des travaux, le maître d'œuvre doit effectuer des contrôles portant sur :

- les documents fournis par l'entrepreneur ;
- l'exécution des travaux en atelier et sur chantier.

En ce qui concerne les documents, une partie d'entre eux a été présentée au chapitre 9 ci-avant. Il reste à voir dans le présent chapitre :

- les programmes particuliers d'exécution des travaux (10.2 ci-après) ;
- les documents préalables à l'exécution et les documents de suivi d'exécution constituant le PAQ, dans le cas habituel où un PAQ est demandé (10.3 ci-après) ;
- les documents d'études des ouvrages provisoires (10.18 ci-après).

10.2 - DOCUMENTS D'ÉTUDES : LES PROGRAMMES PARTICULIERS D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

L'entrepreneur doit fournir au maître d'œuvre un programme général d'exécution des travaux dès le début de l'opération, et des programmes particuliers qui le complètent en temps utile.

Le fascicule 66 du CCTG, article III.1, récapitule la liste de ces programmes particuliers :

- programme de soudage pour les opérations de soudage en atelier et sur chantier
- programme de montage provisoire en atelier (si cette opération est effectuée)
- programme de transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier
- programme de montage sur chantier
- programme de bétonnage de la dalle dans le cas de pont mixte
- programme d'exécution de la protection contre la corrosion

Dans le cas où l'ouvrage comporte des assemblages boulonnés, le marché doit demander aussi la fourniture d'un programme de boulonnage.

Bien entendu, le terme "programme" ne doit pas être pris dans son sens restrictif : il ne s'agit pas de simples listes d'opérations. La consistance des documents à fournir est définie dans le CCTG : fascicule 56, article 15, pour la protection contre la corrosion, et fascicule 66, article III.1, pour les autres programmes. Deux de ces programmes sont également prévus et définis dans des normes contractuelles : le programme de soudage dans la norme NF P 22-471 (article 7.1.1), le programme de boulonnage dans la norme NF P 22-464.

Des indications sur ces programmes sont fournies dans la suite de ce chapitre.

Les programmes d'exécution sont indépendants du plan d'assurance de la qualité, et ils doivent être établis quelles que soient par ailleurs les exigences du marché en matière de PAQ. Une phase de travaux ne peut être entreprise que lorsque le maître d'œuvre a reçu et visé tous les documents d'études relatifs à cette phase, y compris le programme d'exécution correspondant.

10.3 - PAQ : DOCUMENTS PRÉALABLES À L'EXÉCUTION ET DOCUMENTS DE SUIVI D'EXÉCUTION

10.3.1 - Rappel des différents types de documents composant un PAQ

Le fascicule 66 du CCTG (annexe contractuelle A1) définit la composition du plan d'assurance de la qualité. Il distingue trois types de documents :

- le document d'organisation générale ;
- les documents préalables à l'exécution ;
- les documents de suivi de l'exécution.

Le document d'organisation générale a été présenté au chapitre précédent.

Les deux autres types de documents sont présentés ci-après. Ils sont généralement fournis après la signature du marché, et ne sont donc pas contractuels.

Documents préalables à l'exécution

Ce sont les listes, pour l'opération concernée :

- des moyens de l'entreprise en personnels (listes nominatives des agents d'encadrement, des agents de contrôle, des soudeurs, des opérateurs anticorrosion...)
- de ses moyens en matériels ;
- des opérations de contrôle ;
- des vérifications à effectuer.

Ces listes doivent concerner uniquement l'application à l'opération considérée, et non l'ensemble des moyens et méthodes de l'entreprise.

L'entrepreneur doit soumettre ces documents au visa du maître d'œuvre avant de commencer la phase de travaux à laquelle ils se rapportent.

Documents de suivi d'exécution

Ce sont des documents :

- soit apportant la preuve des qualifications et certifications relatives aux moyens mis en œuvre ;
- soit indiquant les vérifications et les résultats des contrôles d'exécution effectués par l'entrepreneur ou par ses fournisseurs.

Certains de ces documents (par exemple, les documents de contrôle des produits en acier, les descriptifs de modes opératoires de soudage) sont codifiés par ailleurs dans le CCTG et dans les normes, et doivent être établis indépendamment de l'existence d'un PAQ. Lorsqu'il en est ainsi, la mention de ces documents dans le PAQ a seulement pour effet de formaliser le rôle du document (sa production peut être nécessaire à la levée d'un point d'arrêt) et les conditions dans lesquelles il doit être remis au maître d'œuvre.

Le fascicule 66 du CCTG (annexe contractuelle A1) distingue deux cas pour les documents de suivi d'exécution :

- certains de ces documents doivent être remis systématiquement au maître d'œuvre pour visa ; ce visa est une condition à la levée d'un point d'arrêt ;
- les autres documents doivent seulement être tenus à la disposition du maître d'œuvre ; celui-ci peut se les faire adresser sur simple demande, s'il juge utile de les consulter ; les agents d'inspection du maître d'œuvre doivent pouvoir les consulter en atelier ou sur chantier.

10.3.2 - Liste des documents préalables à l'exécution et des documents de suivi d'exécution que doit comprendre un PAQ dans les cas courants

Les tableaux ci-après indiquent les documents que doit comprendre le PAQ (en plus du document d'organisation générale), dans les cas courants.

Dans le domaine couvert par le fascicule 66 du CCTG, ces tableaux reprennent, à quelques détails près, les dispositions de l'annexe contractuelle A1 de ce fascicule.

Les travaux ont été découpés en phases successives commandées chacune par un point d'arrêt. Les points d'arrêt considérés sont les suivants (voir 8.3.3 ci-avant) :

- avant la préparation des pièces en atelier ;
- avant une opération de soudage (en atelier ou sur chantier) ;

- avant les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier ;
- avant le transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier ;
- avant le montage sur chantier ;
- avant les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier ;
- avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier ;
- avant le repliement des échafaudages et autres moyens d'accès aux surfaces peintes.

Le bétonnage des dalles de ponts mixtes n'a pas été traité, le présent guide étant limité aux aspects spécifiques à la construction métallique.

Deux tableaux sont présentés pour chaque phase de travaux.

Le premier tableau mentionne les documents qui doivent être établis avant le début des travaux de la phase considérée, en distinguant :

- *colonne 1* : les "documents préalable à l'exécution", soumis au visa du maître d'œuvre ;
- *colonne 2* : les "documents de suivi d'exécution" (établis lors de phases antérieures) soumis au visa du maître d'œuvre ;
- *colonne 3* : les autres "documents de suivi d'exécution" de phases antérieures, qui doivent exister avant le démarrage de la phase considérée, mais qui sont seulement tenus à la disposition du maître d'œuvre.

Le visa des documents des colonnes 1 et 2 conditionne la levée du point d'arrêt avant la phase de travaux considérée. Dans les tableaux ci-après, il a été mentionné aussi pour mémoire, en italique, les procès-verbaux d'acceptation de travaux, que le maître d'œuvre doit établir avant de lever certains points d'arrêt.

Le second tableau de chaque phase mentionne les documents qui doivent être établis pendant ou immédiatement après l'exécution de cette phase. Ce sont :

- *colonne 2* : les "documents de suivi d'exécution" de la phase considérée qui sont soumis au visa du maître d'œuvre, ce visa conditionnant la levée du point d'arrêt avant le démarrage d'une phase ultérieure ;
- *colonne 3* : les autres "documents de suivi d'exécution" de la phase considérée, qui sont seulement tenus à la disposition du maître d'œuvre.

Un même document peut apparaître dans différents tableaux.

Il est rappelé que ces tableaux ne contiennent que les documents du PAQ. Les documents d'études n'y figurent donc pas (voir le tableau 9.1).

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant l'approvisionnement des produits en acier		
- Note descriptive des modalités d'identification des produits		
Après l'approvisionnement des produits en acier		
	- Documents de contrôle des : <ul style="list-style-type: none"> ● aciers laminés ● produits pour soudage ● boulons HR ● goujons de connexion ● ... 	
Avant la préparation des pièces en atelier (point d'arrêt)		
- Note descriptive des modalités de repérage des pièces	- Documents de contrôle des aciers laminés	
Après la préparation des pièces en atelier		
		- Tableau de répartition des matières après vérification du repérage - Relevés d'exécution

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
---	---	--

Avant une opération de soudage en atelier (point d'arrêt)

<ul style="list-style-type: none"> - Liste des qualifications des modes opératoires de soudage à utiliser - Liste et références des descriptifs des modes opératoires de soudage - Liste nominative des soudeurs affectés à l'opération avec indication des références de leur qualification - Liste nominative des agents de contrôle affectés à l'opération avec indication des références de leur certification - Liste des opérations de contrôle du soudage - Note sur les modalités de suivi de l'exécution et sur l'organisation hiérarchique pour le traitement des non-conformités 	<ul style="list-style-type: none"> - Documents de contrôle des : <ul style="list-style-type: none"> ● aciers laminés ● produits pour soudage ● goujons de connexion - Procès-verbaux de qualification des modes opératoires de soudage - Descriptifs des modes opératoires de soudage - Certificats de qualification des soudeurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Attestation de conformité de la préparation des joints - Certificats COFREND des agents de contrôle
---	---	--

Après une opération de soudage en atelier

	<ul style="list-style-type: none"> - Relevés d'exécution - Procès-verbaux d'examen ou fiches de contrôle des soudures (NF P 22-471) - Fiches de contrôle géométrique des pièces élémentaires (XP P 22-810) - Fiches de traitement des non conformités - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés (établis par le maître d'œuvre)</i> 	
--	---	--

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
---	---	--

Avant les épreuves de convenue pour la préparation des surfaces et l'application de la protection anticorrosion en atelier (point d'arrêt)

<ul style="list-style-type: none"> - Liste nominative des opérateurs et des agents d'encadrement, avec indication des références de leur certification ACQPA (y compris niveau de certification) - Liste nominative des contrôleurs affectés à l'opération, avec indication des références de leur certification ACQPA - Cadre du journal de chantier (selon article 16 du fascicule 56) - Cadre des procès-verbaux de contrôle adaptés à l'atelier 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés (établis par le maître d'œuvre)</i> - Certificat ACQPA : <ul style="list-style-type: none"> ● du système de peinture ● de la stabilité de la couleur de finition (s'il y a lieu) - Certificats ACQPA des opérateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Fiches techniques des produits - Certificats ACQPA des contrôleurs
---	---	---

Après les épreuves de convenue pour la préparation des surfaces et l'application de la protection anticorrosion en atelier

	<ul style="list-style-type: none"> - Compte-rendu de l'épreuve de convenue pour la préparation des surfaces - Compte-rendu de l'épreuve de convenue pour l'application des produits 	
--	---	--

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier (point d'arrêt)		
<ul style="list-style-type: none"> - Fiche de démarrage des travaux en atelier - Planning d'exécution en atelier - Avis de mise en décapage de chaque élément d'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés (établis par le maître d'œuvre)</i> - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour la préparation des surfaces - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour l'application des produits 	
Pendant ou après la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion en atelier		
	<ul style="list-style-type: none"> - Procès-verbaux de contrôle de la préparation des surfaces - Procès-verbaux de contrôle des feuillets secs (absence de défauts, conformité des épaisseurs) - <i>Procès-verbal d'acceptation de la protection anticorrosion appliquée en atelier (établi par le maître d'œuvre)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Journal de chantier - Enregistrement des conditions climatiques - Fiches d'identification rapide des produits - Fiches de traitement des non-conformités

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
---	---	--

Avant le transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier (point d'arrêt)

- Liste des vérifications à effectuer

- *Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés (établis par le maître d'œuvre)*

- *Procès-verbal d'acceptation de la protection anticorrosion appliquée en atelier (établi par le maître d'œuvre)*

Après le transport des éléments de structure de l'atelier sur le chantier

- Attestations des vérifications effectuées

1 Documents préétablis à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant une opération de soudage sur chantier (point d'arrêt)		
<ul style="list-style-type: none"> - Liste des qualifications des modes opératoires de soudage à utiliser - Liste et références des descriptifs des modes opératoires de soudage - Liste nominative des soudeurs affectés à l'opération avec indication des références de leur qualification - Liste nominative des agents de contrôle affectés à l'opération avec indication des références de leur certification - Liste des opérations de contrôle du soudage - Note sur les modalités de suivi de l'exécution et sur l'organisation hiérarchique pour le traitement des non-conformités 	<ul style="list-style-type: none"> - Documents de contrôle des : <ul style="list-style-type: none"> ● aciers laminés ● produits pour soudage ● goujons de connexion - Procès-verbaux de qualification des modes opératoires de soudage - Descriptifs des modes opératoires de soudage et consignes particulières de soudage - Certificats de qualification des soudeurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Attestation de conformité de la préparation des joints - Certificats COFREND des agents de contrôle - Note descriptive sur les dispositions à prendre pour la protection contre les intempéries
Après une opération de soudage sur chantier		
	<ul style="list-style-type: none"> - Relevés d'exécution - Procès-verbaux d'examen ou fiches de contrôle des soudures (NF P 22-471) - Fiches de contrôle géométrique de l'ouvrage à chaque phase de construction - Fiches de traitement des non conformités - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés (établis par le maître d'œuvre)</i> 	

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant le montage sur chantier (point d'arrêt)		
<ul style="list-style-type: none"> - Liste nominative des agents d'encadrement, avec indication de leurs références - Liste des matériels de montage à utiliser pour l'opération - Liste des vérifications à effectuer concernant les matériels de montage, avec référence aux textes réglementaires - Note descriptive des modalités de contrôle : <ul style="list-style-type: none"> ● de la conception et de l'utilisation des ouvrages provisoires ● de la mise en place et de l'utilisation des matériels de montage ● du déroulement des opérations de montage 	<ul style="list-style-type: none"> - Attestation de contrôle des matériels de montage - Procès-verbaux des contrôles préliminaires - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés exécutés sur chantier avant montage (établis par le maître d'œuvre)</i> 	
Après le montage sur chantier		
	<ul style="list-style-type: none"> - Relevé de la géométrie du tablier avant coulage de la dalle en béton (XP P 22-810) 	

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection anticorrosion sur chantier (point d'arrêt)		
<ul style="list-style-type: none"> - Liste nominative des opérateurs et des agents d'encadrement, avec indication des références de leur certification ACQPA (y compris niveau de certification) - Liste nominative des contrôleurs affectés à l'opération, avec indication des références de leur certification ACQPA - Cadre du journal de chantier (selon article 16 du fascicule 56) - Cadre des procès-verbaux de contrôle adaptés au chantier - Note descriptive des dispositions prévues pour protéger l'ouvrage et l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés exécutés sur chantier (établis par le maître d'œuvre)</i> - Certificat ACQPA : <ul style="list-style-type: none"> ● du système de peinture ● de la stabilité de la couleur de finition (s'il y a lieu) - Certificats ACQPA des opérateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Fiches techniques des produits - Certificats ACQPA des contrôleurs
Après les épreuves de convenance pour la préparation des surfaces et l'application de la protection anticorrosion sur chantier		
	<ul style="list-style-type: none"> - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour la préparation des surfaces - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour l'application des produits 	

1 Documents préalables à l'exécution remis au maître d'œuvre	2 Documents de suivi d'exécution remis au maître d'œuvre	3 Documents de suivi d'exécution tenus à la disposition du maître d'œuvre
Avant la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier (point d'arrêt)		
<ul style="list-style-type: none"> - Fiche de démarrage des travaux sur chantier - Planning d'exécution sur chantier - Avis : <ul style="list-style-type: none"> ● de mise en décapage des joints soudés et des autres zones réservées ● d'application des produits sur l'ensemble des surfaces 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés exécutés sur chantier (établis par le maître d'œuvre)</i> - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour la préparation des surfaces - Compte-rendu de l'épreuve de convenance pour l'application des produits 	
Pendant ou après la préparation des surfaces et l'application de la protection contre la corrosion sur chantier		
	<ul style="list-style-type: none"> - Procès-verbaux de contrôle de la préparation des surfaces - Procès-verbaux de contrôle des feuillets secs des couches appliquées sur chantier (absence de défauts, conformité des épaisseurs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Journal de chantier - Enregistrement des conditions climatiques - Fiches d'identification rapide des produits utilisés - Fiches de traitement des non-conformités
Avant le repliement des échafaudages et autres moyens d'accès aux surfaces peintes (point d'arrêt)		
	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Procès-verbal d'acceptation de l'ensemble de la protection anticorrosion (établis par le maître d'œuvre)</i> 	

Tableaux 10.1

Plan d'assurance de la qualité : documents préalables à l'exécution et documents de suivi d'exécution à fournir par l'entrepreneur pour chaque phase de travaux dans les cas courants

10.4 - FOURNITURE DES ACIERS LAMINÉS

10.4.1 - Documents fournis par l'entrepreneur

Note descriptive des modalités d'identification des aciers laminés

Ce document du PAQ doit décrire les mesures prévues par l'entrepreneur pour identifier dans son atelier les produits destinés à l'ouvrage.

L'objectif est d'éviter les risques de confusion entre les aciers de différentes commandes, et d'assurer la traçabilité des aciers dès leur arrivée en atelier (dans les phases ultérieures, cette traçabilité s'appuie sur les tableaux et plans de répartition des matières, voir 10.9.1 ci-après).

Document de contrôle des aciers laminés

L'usine sidérurgique (ou le centre distributeur) établit un document de contrôle des aciers qu'il remet à l'entrepreneur au moment où il lui expédie les produits.

L'entrepreneur doit communiquer ce document au maître d'œuvre. La remise de ce document est une condition à la levée des points d'arrêt avant préparation des pièces et avant soudage (fascicule 66 du CCTG, annexe contractuelle A1).

Dans le cas normal d'un produit certifié pour les ouvrages d'art, le document est un certificat de réception, établi et signé par un représentant du producteur indépendant, hiérarchiquement, des services de fabrication (certificat de réception "3.1.B" selon la norme NF EN 10204).

Le document de contrôle doit se référer à la norme de produit visée dans le marché. Il doit se référer aussi au fascicule 4, titre III, du CCTG, pour confirmer que le producteur d'acier a bien été informé par l'entrepreneur des obligations résultant du CCTG.

Le document doit mentionner le numéro de coulée, utilisé pour assurer la traçabilité des produits au cours des différentes étapes de la construction. Il indique les caractéristiques dimensionnelles du produit (épaisseur, largeur, longueur, nombre, masse), ainsi que la nuance, la qualité et l'état de livraison (normalisé ou thermomécanique).

Le document fournit les résultats des contrôles effectués par le producteur :

- analyse chimique sur coulée et valeur des teneurs nécessaires au calcul du carbone équivalent (CEV) ;
- limite d'élasticité ;
- résistance à la traction ;
- allongement à la rupture ;
- énergie de rupture en flexion par choc sur éprouvette Charpy V, à la température spécifiée.

En application du fascicule 4, titre III, du CCTG, ces contrôles sont spécifiques, c'est à dire qu'ils portent sur les produits à livrer.

Le document doit être daté et signé par un responsable de l'usine productrice.

Des maîtres d'œuvre ont parfois voulu inclure, dans le CCTP, une clause faisant obligation à l'entrepreneur de leur communiquer le bon de commande de ses aciers. L'objectif était de vérifier la commande avant l'élaboration des produits, le document de contrôle n'étant évidemment disponible qu'a posteriori. On considère généralement qu'une telle clause est inopportune. C'est volontairement que le CCTG ne prévoit pas la remise du bon de commande : l'entrepreneur doit rester responsable de sa commande, et l'on ne doit pas lui imposer de communiquer ses propres spécifications (qui peuvent aller au-delà du strict respect du marché, par exemple pour la soudabilité).

10.4.2 - Contrôles du maître d'œuvre concernant les aciers laminés

Le maître d'œuvre vérifie que le document de contrôle des aciers est conforme au type spécifié dans le fascicule 4, titre III, du CCTG.

Il vérifie que la nuance, la qualité et l'état de livraison des produits, ainsi que les caractéristiques optionnelles s'il y a lieu, sont conformes aux spécifications du marché, que les résultats des contrôles du producteur sont dans les limites spécifiées dans la norme de produit, que les produits sont certifiés...

En atelier, l'inspecteur du maître d'œuvre examine des points tels que :

- **Marquage des produits** - Le marquage des produits (peinture, étiquette adhésive, etc.) est effectué par le producteur. Il a pour objet d'identifier la nuance et la qualité de l'acier, et d'assurer la correspondance du produit avec le document de contrôle. Le procédé de marquage et la nature des indications marquées doivent être conformes au règlement particulier de la certification et à la norme de produit. L'identité des produits doit être vérifiée en s'assurant que les références marquées correspondent à celles indiquées sur le document de contrôle.
- **Épaisseur des produits** - L'inspecteur du maître d'œuvre peut procéder à des contrôles d'épaisseur. Les tolérances sont définies dans le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG par référence à une classe de tolérance normalisée.
- **État de surface** - Les discontinuités de surface (incrustations de calamine, empreintes de laminage, rayures, repliures...) sont décrites dans la norme NF EN 10163 qui définit, pour différentes classes, les imperfections admissibles et les défauts nécessitant une réparation. Les classes à considérer pour les ouvrages de génie civil sont fixées dans le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG.

La partie du prix de charpente métallique correspondant à la fourniture des produits déjà livrés est réglée à l'entreprise après accord de l'agent d'inspection du maître d'œuvre, et au vu d'un document du fournisseur établissant que les produits sont la propriété de l'entreprise.

10.5 - FOURNITURE DES PRODUITS CONSOMMABLES POUR SOUDAGE

L'agent d'inspection du maître d'œuvre examine les indications portées sur le document de contrôle (certificat de réception 3.1.B) et sur l'emballage des produits (boîtes d'électrodes, bobines de fil, sacs de flux en poudre). Il vérifie notamment que la norme de produit est visée, et que les produits correspondent, ou sont équivalents, aux produits mentionnés dans la qualification du mode opératoire de soudage.

Il s'assure que les emballages sont en bon état, et que les conditions de stockage sont conformes aux recommandations du fabricant, notamment dans le cas d'utilisation sur chantier d'électrodes enrobées et de flux en poudre sensibles à l'humidité.

Il s'assure que les numéros de lots de fabrication ont été notés par l'entrepreneur pour permettre de retrouver ultérieurement l'origine des produits ("traçabilité").

10.6 - FOURNITURE DES BOULONS À HAUTE RÉSISTANCE

Le maître d'œuvre procède, avec son inspecteur, à l'examen du document de contrôle établi par le fournisseur.

Ce document de contrôle doit être conforme au type spécifié dans le fascicule 4, titre IV, du CCTG : certificat de contrôle des produits par l'usine, soit maintenant certificat de réception "3.1.B" selon la norme NF EN 10204. Ce document doit comporter les résultats du contrôle spécifique des lots de fabrication (la consistance de ce contrôle est définie dans le règlement particulier de la certification par référence à la norme NF E 27-701). Les produits doivent être certifiés.

Sur le lieu de stockage, l'inspecteur du maître d'œuvre s'assure du bon état des emballages et vérifie notamment que :

- les indications portées sur les emballages sont conformes à celles figurant sur le document de contrôle des produits (identité du fournisseur, dimensions, classe de qualité, état de livraison noir ou galvanisé, numéro du lot de fabrication, norme de référence, valeur du coefficient de rendement du couple de serrage, certification des produits...).
- les caractéristiques apparentes des boulons sont correctes (dimensions nominales, état de livraison noir ou galvanisé, marquage des produits conforme au règlement de la certification.).

10.7 - FOURNITURE DES GOUJONS DE CONNEXION

Le maître d'œuvre procède à l'examen du document de contrôle des goujons. Normalement, il est demandé dans le marché de fournir un certificat de réception (voir 8.5.6 ci-avant). Les résultats du contrôle sont à comparer aux spécifications de la norme NF E 25-140.

La norme précise aussi certaines précautions de stockage qu'il convient de vérifier : conservation des bagues réfractaires au sec dans leur emballage d'origine, respect des conditions préconisées par le producteur.

10.8 - FOURNITURE DES PEINTURES ET AUTRES PRODUITS POUR LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION

La vérification, quantitative et qualitative, des livraisons de peintures et autres produits fait partie du contrôle interne que doit exercer l'entreprise.

Au point de vue quantitatif, le journal de chantier ou les relevés d'exécution doivent permettre de suivre les quantités de produits utilisées ainsi que leur affectation (lots de fabrication, tronçons d'ouvrages, etc. - voir l'article 16 du fascicule 56 du CCTG).

Le contrôle qualitatif porte sur :

- la conformité à la commande,
- l'intégrité des conditionnements reçus,
- la conformité de l'étiquetage,
- la fourniture des fiches d'identification rapide (F.I.R.).

Les conditions d'étiquetage, de livraison, de stockage des produits sont précisées dans l'article 6 du fascicule 56. Par rapport aux pratiques courantes actuelles, il est utile de rappeler les points suivants :

- L'étiquetage d'une peinture doit permettre de juger clairement de la validité du produit : il doit fournir soit la date de validité en clair, soit la durée de validité si la date de fabrication est en clair. Précisons qu'il s'agit d'une date de validité, et non de péremption. Le dépassement éventuel de la date de validité ne signifie pas que le produit doit être mis automatiquement au rebut, mais qu'il faut consulter le fabricant sur la conduite à tenir.
- En cas d'application d'un système de type A certifié par l'ACQPA (cas général), les produits constitutifs de ce système doivent porter la mention "ACQPA" suivie du numéro de certification du produit (ce numéro figure sur la fiche de certification). Un produit qui n'est pas marqué "ACQPA" n'est pas un produit certifié.

- Une F.I.R. (fiche d'identification rapide) est fournie par le fabricant de peinture. Cette fiche porte les résultats des autocontrôles en usine exigés par le référentiel de certification (ces autocontrôles sont souvent appelés C.I.R. - Caractéristiques d'Identification Rapide). Il s'agit généralement de la mesure de la masse volumique et de l'extrait sec dont les résultats (avec fourchettes de tolérance) figurent sur la fiche de certification. Le fascicule 56 prévoit la réalisation de ces C.I.R. dans le cadre du contrôle interne. La fourniture de la F.I.R. par le fabricant de peinture est une procédure satisfaisante.
- Pour les systèmes de peinture des parties vues (lettre "V" dans le numéro de certification ACQPA), seules les finitions dont la stabilité de la couleur est certifiée par l'ACQPA peuvent faire l'objet d'une fourniture de F.I.R. Rappelons qu'il s'agit d'une finition dont la couleur fait partie du nuancier ACQPA (23 couleurs en 1999) et qui a passé avec succès le test d'exposition d'un an en Floride (NF T 34-554 partie 1). Le numéro de certification ACQPA d'un tel produit comporte une extension .../T devant figurer sur l'étiquetage du produit.
- Des désordres apparus lors de la mise en œuvre de systèmes de peinture avaient comme origine l'utilisation de diluants inadaptés. Il est préférable d'utiliser des produits prêts à l'emploi ; à défaut, il convient de vérifier, à la livraison comme à l'utilisation, que si un diluant est utilisé, il s'agit bien de celui indiqué dans la fiche de certification du système.

10.9 - PRÉPARATION DES PIÈCES EN ATELIER

10.9.1 - Documents fournis par l'entrepreneur avant la préparation des pièces en atelier

Note descriptive des modalités de repérage des pièces (PAQ)

Cette note constitue un "document préalable à l'exécution" du PAQ. Dans cette note, l'entrepreneur indique les dispositions qu'il adoptera pour repérer chaque pièce lors de sa fabrication, et identifier sa position dans l'ouvrage ainsi que l'acier dont elle est faite.

Généralement, chaque pièce est marquée d'un symbole ou d'un repère qui se réfère aux tableaux et plans de répartition des matières mentionnés ci-après. Le moyen de marquage doit être durable et ne pas provoquer de dégradation (le poinçonnage doit être exclu).

Ces dispositions doivent viser à éviter des erreurs telles que fabriquer une pièce dans un acier autre que celui prévu, monter un élément à l'envers, monter un élément à l'emplacement d'un autre...

Il s'agit également d'assurer la traçabilité des aciers utilisés : depuis l'approvisionnement des tôles jusqu'à la réception de l'ouvrage, il doit être possible d'identifier l'acier constitutif de chaque tôle, puis de chaque élément individuel de l'ouvrage. Le but est de pouvoir remonter au document de contrôle du fournisseur d'acier, donc au numéro de coulée et au numéro de laminage.

Tableaux et plans de répartition des matières

Ces documents font partie de l'étude d'exécution (fascicule 66 du CCTG, article III.1.5.2). Ils doivent identifier de façon unique chaque pièce élémentaire de l'ouvrage, indiquer ses dimensions, la nuance et la qualité de l'acier, la référence de la tôle ou du profilé utilisé.

10.9.2 - Documents fournis par l'entrepreneur après la préparation des pièces en atelier

Tableaux de répartition des matières après vérification du repérage (PAQ)

Ces tableaux sont obtenus en rendant conformes à l'exécution les documents mentionnés ci-avant.

Relevés d'exécution (PAQ)

Ces documents rendent compte des contrôles d'exécution effectués par l'entrepreneur.

10.9.3 - Contrôles du maître d'œuvre en atelier

L'agent d'inspection du maître d'œuvre vérifie les modalités de repérage des pièces.

Il s'assure, en effectuant des sondages, que les dispositions de la norme NF P 22-800 sont respectées (le fascicule 66 du CCTG, article III.2, impose la classe la plus sévère de cette norme, et la complète en ce qui concerne les perçages).

10.10 - SOUDAGE : QUALIFICATIONS

10.10.1 - Qualification de mode opératoire de soudage (QMOS) ; Descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS)

L'entreprise doit posséder une qualification de mode opératoire de soudage pour chaque type d'assemblage qu'elle doit exécuter. Cela concerne les assemblages de classe de qualité 1 ou 2 (norme NF P 22-471).

La qualification des modes opératoires de soudage est définie dans la norme NF EN 288, parties 1 à 3, qui s'applique aux constructions métalliques de toutes natures, et dans la norme NF P 22-472, qui donne les règles d'application pour le bâtiment et le génie civil.

La qualification d'un mode opératoire porte sur un type d'assemblage bien déterminé. Elle est prononcée par un organisme d'inspection, au vu des résultats d'une épreuve : un soudeur de l'entreprise doit exécuter, en présence de l'examineur, l'assemblage qui fait l'objet de la qualification. L'exécution doit respecter les paramètres qui sont indiqués dans la version préliminaire du descriptif de mode opératoire de soudage : type d'assemblage, épaisseur des pièces, préparation des bords, nuance et qualité d'acier, épaisseur et degré de pénétration de la soudure, disposition des passes, procédé de soudage, position de soudage, dispositions particulières éventuelles (gougeage avant reprise à l'envers, soudure exécutée d'un seul côté avec support à l'envers subsistant ou non), marque et type des produits consommables, caractéristiques du courant électrique, énergie linéaire de soudage, température du préchauffage éventuel, température entre passes, traitement thermique éventuel après soudage...

Après exécution, l'organisme d'inspection soumet l'assemblage de qualification à des contrôles non destructifs, à des essais sur éprouvettes (traction, pliage, flexion par choc pour les assemblages bout à bout, dureté pour les aciers de limite d'élasticité égale ou supérieure à 355 N/mm²), et à des examens macrographiques sur éprouvettes polies faisant apparaître la ligne de fusion, la zone affectée thermiquement, les différentes passes.

Si les résultats sont acceptés, l'organisme d'inspection délivre un procès-verbal à l'entreprise pour attester la qualification.

L'entrepreneur choisit l'organisme d'inspection parmi les organismes spécialisés dont l'indépendance et la compétence sont reconnues par le maître d'ouvrage (il est préférable qu'il soit accrédité par le COFRAC). Pour les ouvrages dépendant du Ministère de l'Équipement, il n'existe pas de liste officielle et limitative ; les organismes de contrôle indiqués au chapitre précédent sont admis.

Le procès-verbal de qualification indique les principaux paramètres de soudage appliqués lors de l'épreuve (le cadre type d'un procès-verbal figure en annexe de la norme NF EN 288-3). Ces paramètres déterminent le domaine de validité de la qualification ; les règles sont définies dans la norme NF EN 288-3 (et dans la norme NF P 22-472 pour la nuance et la qualité de l'acier de base).

Le procès-verbal de qualification doit être signé par l'examineur ou par un représentant de l'organisme d'inspection, ainsi que par un représentant de l'entreprise. La qualification est prononcée pour une entreprise déterminée. Elle n'est valable que pour les opérations de soudage exécutées dans les ateliers ou sur les chantiers de cette entreprise, ou placés sous la même supervision technique (NF EN 288-3, article 8.2). Il est sous-entendu que la relation entre l'entreprise et son atelier ou chantier doit avoir un caractère durable, et non occasionnel : ainsi, la qualification d'une entreprise n'est pas valable pour ses sous-traitants.

Le soudage de connecteurs à la structure, ainsi que le soudage d'armatures sur les connecteurs, doivent aussi être effectué suivant un mode opératoire qualifié (fascicule 66 du CCTG, article III.5.7). Pour le soudage des goujons sur la structure, c'est la norme expérimentale XP A 89-020-1 qui définit l'épreuve et le domaine de validité de la qualification.

Le projet de titre III révisé du fascicule 4 du CCTG rappelle, en commentaire, que les aciers sont souvent fournis avec des valeurs de carbone équivalent (CEV) largement inférieures aux valeurs maximales spécifiées dans les normes. Il peut en être ainsi pour l'acier utilisé aux épreuves de qualification. L'entrepreneur doit alors vérifier que l'acier utilisé pour la construction n'a pas un CEV trop supérieur à celui de l'épreuve.

La validité d'une qualification de mode opératoire de soudage n'est pas limitée dans le temps. Cependant, il est évident qu'une entreprise peut perdre le savoir-faire relatif à un mode opératoire si elle n'a pas l'occasion de le pratiquer pendant plusieurs années. En outre, les produits consommables pour soudage peuvent évoluer. Le fascicule 66 du CCTG (article III.5.4) prévoit donc la disposition suivante : lorsqu'une entreprise demande à utiliser un mode opératoire dont elle a la qualification, mais qu'elle n'a pas pratiqué depuis plus de trois ans, le maître d'œuvre peut exiger qu'elle passe une épreuve dite de reconduction. Cette épreuve est semblable à une épreuve de qualification, mais elle ne donne lieu qu'à un essai de traction et à des essais de flexion par choc.

Le descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) fait référence à la qualification, et indique de façon précise et détaillée les différents paramètres de l'épreuve. Le cadre-type figure en annexe de la norme NF EN 288-3. Ce document, comme le procès-verbal de qualification, est signé par l'examineur ou par un représentant de l'organisme d'inspection, ainsi que par l'entrepreneur.

Les DMOS peuvent paraître analogues aux "procédures d'exécution" qui sont demandées au titre de l'assurance de la qualité dans d'autres secteurs de la construction. Elles en diffèrent cependant sur plusieurs points : un DMOS est plus détaillé et plus directif, et son statut est différent.

10.10.2 - Qualification des soudeurs

La qualification des soudeurs fait l'objet de la norme :

NF EN 287-1 : épreuve de qualification des soudeurs - soudage par fusion

partie 1 : aciers.

Cette norme n'est pas visée dans le CCTG (elle est postérieure au fascicule 66) ; elle doit donc être visée dans les pièces particulières des marchés.

La norme concerne les soudeurs utilisant un procédé manuel ainsi que les opérateurs-soudeurs guidant un matériel semi-automatique. Elle ne concerne pas les opérateurs des procédés entièrement mécanisés ou entièrement automatisés.

La qualification atteste :

- l'habileté manuelle du soudeur ;
- sa capacité à appliquer les dispositions d'un descriptif de mode opératoire de soudage ;
- sa pratique régulière de soudures analogues.

La qualification est prononcée par un examinateur ou par un organisme d'examen, au vu des résultats d'une épreuve : le soudeur doit exécuter un assemblage, en présence de l'examinateur, suivant un descriptif de mode opératoire (établi éventuellement par l'entreprise). L'assemblage d'épreuve, après exécution, est soumis à des contrôles et à des essais.

La qualification est attestée par un certificat délivré par l'organisme.

Le certificat de qualification indique les paramètres de l'épreuve : procédé de soudage, type d'assemblage, nuance et qualité de l'acier de base, épaisseur de tôle, matériel de soudage, type de produit consommable, position de soudage, gougeage avant reprise à l'envers, support à l'envers subsistant ou non dans le cas d'une soudure exécutée d'un seul côté... Le cadre-type d'un certificat de qualification figure en annexe de la norme NF EN 287-1.

La qualification est valide pour le procédé de soudage et pour le type d'assemblage de l'épreuve, mais elle est valide également pour les assemblages dont la réalisation est considérée comme plus aisée. Les règles qui déterminent le domaine de validité des qualifications sont définies dans la norme précitée.

Pour un procédé de soudage et un type d'assemblage donnés, il n'y a qu'un seul niveau de qualification des soudeurs, contrairement à ce qui était prévu dans la norme NF P 22-471.

Le certificat de qualification doit être signé par l'examinateur ou par un représentant de l'organisme d'examen. Il est nominatif et doit permettre d'identifier le soudeur (il comporte habituellement une photographie d'identité).

Une qualification est valide pendant deux ans, à condition que cette validité soit prolongée tous les six mois par un visa de l'entreprise qui emploie le soudeur. Par ce visa, l'entreprise atteste que le soudeur effectue régulièrement des travaux de soudage dans le cadre de sa qualification, et que son habileté manuelle et sa compétence technologiques n'appellent aucune réserve.

La qualification peut être reconduite tous les deux ans par l'organisme d'examen au vu d'un dossier comportant, par exemple, des résultats de contrôles non destructifs concernant des assemblages exécutés par le titulaire de la qualification.

Pour le soudage des connecteurs en goujons, c'est la norme expérimentale XP A 88-020-1 qui définit l'épreuve de qualification des opérateurs, et le domaine de validité des qualifications.

III.1 - SOUDAGE : DOCUMENTS FOURNIS PAR L'ENTREPRENEUR

10.11.1 - Programme de soudage

Généralités

L'entrepreneur doit fournir un programme de soudage pour tous les assemblages soudés de classe de qualité 1 ou 2 (norme NF P 22-471), y compris pour l'assemblage d'éléments provisoires à la structure (fascicule 66 du CCTG, article III.6).

La consistance du programme de soudage est définie dans la norme NF P 22-471 (article 7), à laquelle renvoie le fascicule 66 du CCTG (article III.1.5.3). Ce programme comprend divers documents, qui peuvent être fournis à des époques différentes.

Pour chaque assemblage, le programme doit inclure :

- la description de l'assemblage ;
- la description des soudures ;
- la référence des qualifications des modes opératoires de soudage ;
- les descriptifs de modes opératoires de soudage ;
- les modalités d'exécution particulières du soudage qui ne figurent pas dans le descriptif de mode opératoire ;
- les conditions d'exécution particulières à l'assemblage (séquences de soudage, retournement d'éléments, mesures éventuelles contre l'arrachement lamellaire...) ;
- la référence des qualifications des soudeurs et opérateurs ;
- la nature et l'étendue des contrôles non destructifs ("cahier des contrôles").

La production du programme de soudage doit évidemment être une condition à la levée du point d'arrêt avant soudage.

Description des soudures et modalités d'exécution particulières

Ces éléments sont généralement fournis sous la forme d'un cahier comportant le schéma de tous les types d'assemblages soudés prévus pour l'ouvrage. Les indications comprennent :

- l'emplacement de l'assemblage dans l'ouvrage ;
- le lieu d'exécution du soudage (atelier ou chantier) ;
- la classe de qualité de la soudure ;
- l'épaisseur des pièces ;
- la pente des zones de raccordement dans le cas d'assemblage bout à bout de pièces d'épaisseurs différentes ;
- l'épaisseur utile des soudures ;
- en cas de soudure pénétrée, le type de pénétration (partielle non pleinement efficace, partielle pleinement efficace, pleine pénétration garantie) ;
- la préparation des bords (forme et dimensions des chanfreins) ;
- les modalités d'exécution particulières (gougeage avant reprise à l'envers, support à l'envers subsistant ou non dans le cas d'une soudure exécutée d'un seul côté...) ;
- le jeu entre les pièces avant le début du soudage, et après un soudage partiel (par exemple, jeu entre les âmes après soudage des semelles) ;
- les dispositions particulières pour les contrôles non destructifs (par exemple, découpe de l'âme pour la radiographie d'une semelle).

De façon générale, le cahier des soudures doit définir, pour chaque assemblage soudé, toutes les dispositions importantes pour lesquelles il est souhaitable que l'entrepreneur obtienne l'accord préalable du maître d'œuvre ; il doit contenir en outre tous les paramètres nécessaires au calcul des assemblages sous efforts statiques et de fatigue.

Ce document doit donc être établi par l'entrepreneur, fourni au maître d'œuvre, et visé par celui-ci suffisamment tôt.

Cahier des contrôles

Ce document est établi par l'entrepreneur à partir de réductions de plans d'exécution ou de schémas ; il indique la nature et l'étendue des contrôles non destructifs prévus pour chaque assemblage soudé de l'ouvrage (fascicule 66 du CCTG, article III.1.5.3).

L'entrepreneur doit compléter ce document au fur et à mesure de l'exécution en y mentionnant, pour chaque assemblage soudé, l'emplacement précis des contrôles effectués et, pour chaque contrôle, un numéro permettant d'identifier le procès-verbal de contrôle correspondant.

Autres documents du programme de soudage

Les autres documents (qualifications des modes opératoires de soudage, descriptif des modes opératoires de soudage, qualifications des soudeurs) ont été évoqués en 10.10 ci-avant.

10.11.2 - Documents fournis par l'entrepreneur après le soudage

L'entrepreneur remet au maître d'œuvre, après le soudage, ceux des documents du programme de soudage qui ont été mis à jour ou complétés au cours des travaux (cahier des soudures, cahier des contrôles).

Au titre du PAQ, l'entrepreneur remet les documents de suivi d'exécution mentionnés dans les tableaux 10.1.

Le relevé d'exécution indique, pour chaque assemblage réalisé, le nom du soudeur, la référence de la qualification du mode opératoire, la date d'exécution, les paramètres de soudage effectivement mis en œuvre qui ne figurent pas dans le programme de soudage, et toutes les particularités de l'exécution pouvant être utiles par la suite.

Les procès-verbaux et les fiches de contrôle doivent être signés par un agent de contrôle de niveau 2 certifié par la COFREND.

Tous ces documents doivent être versés par le maître d'œuvre au dossier d'ouvrage.

10.12 - SOUDAGE : TRAVAUX EN ATELIER

10.12.1 - Contrôles par le maître d'œuvre avant le soudage

Dès la fourniture des premières notes de calcul et dessins d'exécution par l'entrepreneur, le maître d'œuvre doit recueillir l'avis de l'agent chargé de l'inspection du soudage. Il faut donc que le maître d'œuvre choisisse à temps son organisme de contrôle, de façon à ce que l'inspecteur soit désigné et puisse intervenir dès les premiers stades préparatoires de l'exécution.

Le programme de soudage, lorsqu'il est disponible, fait lui aussi, bien entendu, l'objet d'un examen et d'un avis de l'inspecteur du maître d'œuvre.

Les points à examiner au cours de ces différentes phases concernent plus particulièrement :

- la conformité au CCTG et aux normes contractuelles ;
- la conformité au CCTP et aux autres documents particuliers du marché ;
- l'adéquation des dispositions prévues et le respect des règles de l'art : dispositions constructives évitant ou minimisant l'effet d'entaille, la fatigue, l'arrachement lamellaire, les contraintes et déformations dues au retrait des soudures, modalités d'exécution minimisant les risques de défaut... ;
- les possibilités de contrôle non destructif des soudures ;
- l'accessibilité des assemblages pour la surveillance et l'entretien après la mise en service de l'ouvrage.

Ces examens doivent être effectués en liaison avec le bureau contrôleur du maître d'œuvre, qui contrôle le calcul des assemblages. Le maître d'œuvre doit veiller à la bonne coordination des deux organismes, par exemple en les invitant ensemble à des réunions.

Lorsqu'il a reçu les procès-verbaux de qualification des modes opératoires de soudage et les descriptifs correspondants, l'inspecteur s'assure que ceux-ci sont valides pour les travaux à réaliser.

L'inspecteur du maître d'œuvre doit aussi être en possession des listes nominatives des soudeurs et opérateurs de l'entreprise, avec les indications concernant leur qualification (voir 10.10.2 ci-avant) : durée de validité, domaine de validité, organisme émetteur.... Ces indications nominatives sont des "documents préalables à l'exécution" remis au titre du PAQ, voir colonne 1 des tableaux ci-avant).

Il doit connaître également l'identité du ou des contrôleurs intervenant pour l'entreprise, notamment dans le cas où il s'agit d'agents ne faisant pas partie de celle-ci. Le fascicule 66 du CCTG n'introduit pas de distinction entre contrôle interne (interne à la chaîne de fabrication) et contrôle externe (placé sous l'autorité directe d'une cellule de la direction de l'entreprise). Dans le cas de contrôle externe, le contrôleur peut appartenir soit à l'entreprise, soit à un organisme sous-traitant. Les entreprises importantes ont généralement leurs propres agents de contrôle pour les soudures exécutées en atelier. Par contre, elles sous-traitent assez souvent le contrôle des soudures exécutées sur chantier.

Dans tous les cas, les agents de contrôle doivent être certifiés suivant la norme NF P 22-471 et la norme NF EN 473 (voir 6.4 ci-avant).

L'inspecteur doit vérifier les indications qui ont été fournies par l'entreprise en se faisant communiquer les originaux des certificats par les agents, par exemple au cours d'une réunion de chantier préparatoire.

Dans l'atelier, l'inspecteur du maître d'œuvre contrôle par sondages des points tels que :

- la nature de l'acier des pièces, à l'aide du tableau de répartition matière, du document de contrôle des aciers laminés, et du marquage des pièces ;
- la nature et les caractéristiques des produits consommables, les conditions de stockage des produits, l'étuvage avant utilisation des électrodes basiques et des flux sensibles à l'humidité (conformité aux recommandations du fabricant de produit) ;
- le découpage des pièces (exécution conforme aux normes, géométrie conforme aux plans du projet d'exécution) ;
- la préparation des bords à souder et l'accostage des pièces (conformité au descriptif du mode opératoire de soudage, respect des normes NF P 22-470, NF P 22-471, XP P 22-810) ; en cas d'anomalie, l'inspecteur peut se faire remettre l'attestation de conformité de la préparation du joint, sur laquelle figurent les valeurs théoriques et les valeurs mesurées ;
- la fixation provisoire des pièces ;
- la géométrie des éléments d'ouvrage d'après le positionnement des pièces.

10.12.2 - Contrôles par le maître d'œuvre pendant le soudage

Il est souhaitable que le maître d'œuvre fasse tenir un journal pour noter les renseignements pouvant être utiles ultérieurement sur les travaux exécutés, la main d'œuvre, les produits consommables, le matériel de soudage, les conditions climatiques dans le cas de soudage sur chantier...

Pendant le soudage et les contrôles par l'entrepreneur, l'inspecteur du maître d'œuvre s'assure, par sondages, que :

- les soudeurs et les opérateurs sont bien les titulaires des certificats de qualification qui ont été communiqués par l'entrepreneur ; le procédé de soudage, la position de soudage, le type d'assemblage... sont bien couverts par la qualification ;
- les agents de contrôle sont ceux dont le document de certification a été communiqué ;
- les conditions de travail des soudeurs sont convenables ;
- le préchauffage et les autres paramètres de soudage correspondent à ceux du descriptif du mode opératoire (qui doit être affiché dans l'atelier pendant les opérations de soudage) ;
- les travaux sont correctement surveillés ;
- les passes successives sont exemptes de défaut visible, et sont correctement débarrassées du laitier ;
- chaque soudeur et opérateur s'identifie en marquant de façon indélébile les assemblages qu'il exécute, dans le cas des assemblages de classe 1 (norme NF P 22-471, article 8.2.9) ; il est rappelé que le poinçonnage doit être interdit ;

- le délai minimal entre l'achèvement des soudures et l'exécution des contrôles non destructifs est respecté ;
- les conditions opératoires des contrôles non destructifs sont conformes aux normes, ou aux procédures spécifiques établies préalablement.

10.12.3 - Contrôles par le maître d'œuvre après le soudage

L'inspecteur du maître d'œuvre, après achèvement du soudage, prend connaissance des documents de contrôle de l'entrepreneur (clichés radiographiques et autres documents rendant compte des contrôles non destructifs).

Il vérifie d'après ces documents le respect :

- des tolérances géométriques après soudage (norme XP P 22-810 et spécifications éventuelles du CCTP) ;
- des pourcentages minimaux de soudure à contrôler, et de leurs emplacements (norme NF P 22-471) ;
- des critères d'acceptation des défauts (norme NF P 22-471).

En atelier, il inspecte visuellement la géométrie des assemblages après soudage et procède éventuellement à ses propres mesures sur les points sensibles (par exemple, position des montants d'appui, rectitude des raidisseurs longitudinaux de fond de caisson, planéité des dalles orthotropes...).

En ce qui concerne les soudures elles-mêmes, l'inspecteur contrôle ponctuellement la forme, les dimensions et l'absence de défaut visible des cordons, ainsi que l'état de surface des pièces après enlèvement des fixations provisoires et des appendices soudés ; il compare ses observations avec les résultats des contrôles correspondants de l'entrepreneur.

L'inspecteur procède éventuellement à des contrôles non destructifs, à titre de sondage, pour valider ceux effectués par l'entrepreneur.

De tels contrôles doivent être systématiquement entrepris en cas d'anomalie ou de doute sur un résultat de l'entreprise. En dehors de ce cas, il n'y a pas de règle fixée a priori pour l'opportunité et le nombre de ces contrôles ; l'inspecteur les décide en fonction :

- de la confiance inspirée par les actions de contrôle de l'entrepreneur ;
- de la nature et du pourcentage des imperfections ou des "défauts acceptables" constatés par le contrôle de l'entrepreneur ;
- de l'aspect des soudures ;
- des conditions de soudage ;
- du rôle de l'assemblage dans la structure, etc.

Ces contrôles peuvent être effectués par le même type de procédé que celui de l'entrepreneur, ou bien faire appel à un procédé différent.

Une soudure présentant un défaut hors tolérance doit en principe être réparée, et contrôlée à nouveau. Les conditions de réparation sont définies dans la norme NF P 22-471 (article 10) et dans le fascicule 66 du CCTG (article III.5.5).

Il est admis cependant (paragraphe 10.2 de la norme) qu'il peut être moins préjudiciable de conserver certains défauts internes que de les réparer. Il n'est pas rare, en effet, qu'une soudure réparée soit moins bonne qu'avant la réparation. De plus, parmi les critères d'acceptation des défauts (tableaux 5, 6 et 7 de la norme), certains d'entre eux seulement influent directement sur la sécurité des assemblages, alors que d'autres sont plutôt des critères de bonne exécution et peuvent parfois être transgressés avec l'accord de l'inspecteur du maître d'œuvre. Par exemple, une petite cavité dans une soudure ne nuit pas à la sécurité, à condition qu'elle ne masque pas un défaut plus dangereux tel qu'une fissure.

Les défauts sont donc "négociables", et l'entrepreneur a la possibilité de présenter au maître d'œuvre une proposition écrite de non-réparation, accompagnée de justifications. Dans ces circonstances, l'inspecteur doit bien connaître le domaine des ouvrages d'art, et savoir distinguer ce qui est préjudiciable à la sécurité de ce qui ne l'est pas.

Lorsque deux réparations successives ont donné des résultats inacceptables, le soudage doit être arrêté et l'entrepreneur doit proposer de nouvelles dispositions aux maître d'œuvre (fascicule 66 du CCTG, article III.5.5).

Ces dispositions peuvent consister :

- à modifier le mode opératoire (ce qui nécessite d'obtenir une nouvelle qualification, ou d'effectuer une épreuve de convenance)
- ou à mettre en cause la qualification du soudeur.

Lorsqu'un assemblage soudé comporte de nombreuses zones de défauts internes hors tolérances, ce qui conduirait à juxtaposer plusieurs zones de réparation dans le même assemblage, l'article susvisé du fascicule 66 prévoit que le maître d'œuvre peut faire refaire l'ensemble de l'assemblage.

L'inspecteur du maître d'œuvre doit être attentif aux réparations des soudures, ainsi qu'aux autres traitements des non-conformités. Par exemple, il doit veiller à ce que les chaudes de retrait soient effectuées suivant une procédure préalablement établie, et que la température de l'acier soit contrôlée.

10.12.4 - Acceptation des assemblages soudés par le maître d'œuvre

L'acceptation des soudures par le maître d'œuvre est mentionnée dans la norme NF P 22-471 (article 11). Le fascicule 66 du CCTG (article III.5.6) l'impose pour les assemblages soudés de classe 1 ou 2.

Le visa par le maître d'œuvre du procès-verbal d'acceptation des assemblages soudés effectués en atelier est une condition à la levée du point d'arrêt avant les phases de travaux ultérieures : mise en œuvre de la protection contre la corrosion, transport des éléments de l'atelier sur le chantier.

10.13 - MONTAGE PROVISOIRE EN ATELIER

Si un montage provisoire, total ou partiel, est effectué en atelier, l'agent d'inspection du maître d'œuvre s'assure que les opérations sont conformes au programme que l'entrepreneur a dû fournir au préalable.

Si, en outre, ce montage provisoire était demandé dans le CCTP, il doit être exécuté conformément aux prescriptions du marché : le fascicule 66 du CCTG, article III.7, définit les dispositions générales ; le CCTP doit définir les modalités particulières de l'opération, notamment la consistance des sous-ensembles à assembler.

L'inspecteur du maître d'œuvre se fait remettre les fiches de contrôle de la géométrie et il effectue, s'il y a lieu, ses propres relevés.

10.14 - PROTECTION CONTRE LA CORROSION : TRAVAUX EN ATELIER

10.14.1 - Programme et dessins d'exécution fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance en atelier

Programme d'exécution de la protection contre la corrosion

La fourniture de ce programme est prévue dans le fascicule 56 et dans le fascicule 66 du CCTG. Sa consistance minimale est définie à l'article 15 du fascicule 56. Il doit prendre en compte les spécificités de l'atelier (organisation des postes de travail, atelier chauffé ou non...).

L'application des couches de peinture doit avoir lieu en atelier pour le nombre maximal de couches possible, même si cela présente l'inconvénient d'occuper de la place en atelier. En général, on applique en atelier le primaire anticorrosion et la couche intermédiaire.

Dans le cas d'un pont lancé, il peut être intéressant d'appliquer une seule couche en atelier sur les zones qui seront blessées à coup sûr lors du lancement. Il est en effet plus facile de "réparer" une zone ne comportant qu'un primaire. Pour un pont lancé sur galets, on n'appliquera ainsi en atelier que le primaire sur la face inférieure et sur les chants oxycoupés de la semelle inférieure. Ce primaire sera "arraché" lors du lancement, mais les quelques zones "arrachées" seront beaucoup plus faciles à réparer, lors des travaux de peinture sur chantier.

Plans de mise en peinture

Un plan de mise en peinture doit être fourni pour chaque élément de géométrie différente constituant l'ouvrage.

Ce plan doit comporter, pour la partie du système appliquée en atelier, le dimensionnement des réservations (fascicule 66 du CCTG, III.1.5.2).

Pour les joints soudés, une réservation non peinte de 5 cm est à respecter de part et d'autre du joint ; la réservation est de 15 cm environ entre le primaire et la couche intermédiaire.

Pour les zones protégées par du béton, telles que l'extrados des semelles supérieures de ponts mixtes, il est nécessaire de prévoir un retour peint d'au moins 5 cm sur les zones protégées, afin d'éviter la présence d'un "point triple".

10.14.2 - Documents du PAQ fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance en atelier

Certificat ACQPA du système de peinture et fiches techniques des peintures constituant le système

Outre le certificat ACQPA du système de peinture, il est utile de demander, dès ce stade, le certificat de la stabilité colorimétrique de la finition, dans le cas où le marché exige une couleur dont la stabilité est certifiée par l'ACQPA.

Liste nominative des agents

Il doit être fourni une liste nominative des opérateurs, des agents d'encadrement et des agents de contrôle qu'il est prévu de faire travailler en atelier, avec un organigramme établissant les responsabilités (chef d'équipe, contrôles interne et externe).

Certificats ACQPA des opérateurs

À l'appui de la liste qui vient d'être indiquée, doivent être fournies les références des certificats ACQPA des opérateurs (numéro, date de validité, niveau et option(s)).

Les opérateurs directs (ouvriers découpeurs et/ou applicateurs) doivent être titulaires d'une certification ACQPA de niveau 1 au minimum et ce, dans les options correspondant aux travaux qu'ils auront à effectuer (décapage par projection d'abrasif, application de peinture, métallisation, revêtements spéciaux dont PRZ - Primaire Riche en Zinc).

Le chef d'équipe (ou le chef de chantier ou le contremaître) doit être titulaire d'une certification ACQPA de niveau 2 au minimum.

Certificats ACQPA / FROSIO des contrôleurs

La certification ACQPA / FROSIO devra être exigée pour les agents chargés du contrôle externe dès que le nombre d'agents certifiés le permettra.

La notion de contrôle “externe” (partie du contrôle de l’entreprise indépendante de la chaîne de production) est bien définie en théorie, mais peut être difficile à mettre en œuvre dans la réalité. Néanmoins, compte tenu de l’évolution actuelle par rapport au fascicule 56 (transfert à l’entreprise du contrôle de la préparation des surfaces et de l’épaisseur des couches de peinture), il est important que ces contrôles soient réalisés par une personne indépendante du chef d’équipe ou du chef de chantier.

Cette indépendance, et la qualité des contrôles qui en découlent, doivent pouvoir être estimées d’une part grâce au document d’organisation générale de l’entreprise, d’autre part (et surtout) par des contrôles statistiques réalisés dans le cadre des contrôles du maître d’œuvre. Ces contrôles du maître d’œuvre ont pour rôle principal de s’assurer que le PAQ et les stipulations du marché sont effectivement respectées.

Il n’existe pas de schéma-type d’organisation de la qualité assurant l’indépendance du contrôle externe de l’entreprise. L’agent peut appartenir à l’entreprise d’application ou à celle de construction métallique, voire ni à l’une, ni à l’autre...

Cadre du journal de chantier

Le cadre du journal de chantier est défini dans le fascicule 56 du CCTG, article 16.

En plus de ce qui est exigé dans cet article 16, le journal de chantier doit permettre de connaître, pour chaque élément d’ouvrage :

- le numéro de lot des peintures utilisées et, s’il y a eu dilution, la nature et la quantité des diluants utilisés,
- le nom des opérateurs chargés du décapage, de l’application des peintures,
- les conditions générales d’application, permettant de s’assurer que les données de la fiche de certification ou des fiches techniques des produits ont été respectées :
 - . conditions atmosphériques durant l’application et le séchage (température et hygrométrie de l’air, température du subjectile, point de rosée),
 - . délai de recouvrement après la préparation de surface, délais entre couches,
 - . tout problème lié soit à la préparation des produits, soit à leur application (temps de séchage, apparition de poudrage, coulures, bullage, cloquage, porosité, frisage, peau d’orange...),
- les résultats des contrôles internes (conformité de l’abrasif, propreté de l’air, épaisseurs de feuil humide, contrôle interne du feuil sec, etc.),
- en cas d’anomalie, la référence à la fiche de traitement de non-conformité.

L’enregistrement des conditions atmosphériques (température et hygrométrie de l’air), prévu dans le fascicule 56 du CCTG, doit être annexé au journal de chantier.

Le journal de chantier est visé par le contrôle interne de l’entreprise (en principe, par le chef d’équipe, le chef de chantier ou le contremaître certifié ACQPA niveau 2) ; il est tenu à la disposition de l’inspecteur du maître d’œuvre.

Cadre des procès-verbaux de contrôle

Ces procès-verbaux attestent, pour chaque élément d'ouvrage, voire pour chaque partie d'élément, la conformité aux stipulations du marché pour ce qui concerne :

- la préparation des surfaces ;
- les feuilis secs des couches appliquées en atelier.

La conformité des feuilis secs s'exprime par l'absence de défauts (bullage, poudrage, porosité, peau d'orange, etc.) et par la conformité des épaisseurs aux épaisseurs contractuelles des fiches de certification ACQPA (niveau A de la norme NF T 30-124).

Ces procès-verbaux sont établis par le contrôle externe de l'entreprise et sont soumis au visa de l'inspecteur du maître d'œuvre.

Pour simplifier la documentation et alléger les procédures, l'entreprise peut proposer un cadre de journal de chantier incluant les procès-verbaux du contrôle externe. Dans ce cas, ce journal est visé par le contrôle interne de l'entreprise (chef d'équipe ou chef de chantier), par le contrôle externe de l'entreprise, et par l'inspecteur du maître d'œuvre.

10.14.3 - Épreuves de convenance en atelier, réunion préalable, fiche de démarrage des travaux et planning d'exécution

Épreuves de convenance

Les épreuves de convenance en atelier doivent être précédées d'un point d'arrêt.

Elles doivent être suivies d'un autre point d'arrêt dont la levée conditionne le démarrage des travaux de protection en atelier. Le maître d'œuvre lève ce point d'arrêt au vu des comptes rendus d'épreuves établis par l'entreprise et contresignés par l'inspecteur du maître d'œuvre.

L'épreuve de convenance portant sur la préparation des surfaces est définie dans l'article 17.3.2.1 du fascicule 56 du CCTG. Bien que le fascicule spécifie la réalisation de l'épreuve sur des "plaques représentatives", il est préférable de la réaliser sur le premier élément de l'ouvrage à mettre en décapage.

L'épreuve de convenance portant sur l'application des produits est définie dans les articles 18.1.3, 18.2.1 et 18.3.1 du même fascicule.

Les épreuves de convenance sont effectuées avec les moyens prévus pour l'exécution des travaux (matériel, produits, personnel...), en présence du contrôle externe de l'entreprise et de l'inspecteur du maître d'œuvre. Elles doivent porter sur les difficultés spécifiques de l'ouvrage (rugosité des tranches oxycoupées, respect des épaisseurs minimales et maximales du primaire, respect des délais minimum de recouvrement du primaire, etc.).

Réunion préalable

Les épreuves de convenance sont l'occasion d'organiser une réunion à laquelle doivent participer :

- l'entreprise de construction métallique et l'entreprise d'application, avec leurs contrôles interne et externe ;
- le maître d'œuvre et son inspecteur.

Au cours de cette réunion, d'une part est établie la fiche de démarrage des travaux pour les travaux en atelier, et d'autre part est examiné le planning d'exécution.

Fiche de démarrage des travaux en atelier

La fiche de démarrage des travaux en atelier est établie par l'inspecteur du maître d'œuvre et elle est visée par le contrôle externe de l'entreprise. Cette fiche de démarrage établit clairement :

- les relations entre le contrôle externe de l'entreprise et l'inspecteur du maître d'œuvre : forme et délai de l'avis de mise en décapage des éléments, mode et délai de convocation pour acceptation avant l'expédition des éléments sur le chantier ;
- les stipulations du marché et les critères d'acceptation pour ce qui concerne la préparation des surfaces (degré de soin, rugosité...) et la qualité des feuillets secs à obtenir (absence de défaut et conformité des épaisseurs).

L'épreuve de convenance et l'établissement de la fiche de démarrage des travaux sont ainsi l'occasion de valider sérieusement le cadre du procès-verbal de contrôle de l'entreprise en se mettant d'accord sur les détails opératoires qu'il est important d'harmoniser. Il en va ainsi pour la mesure des épaisseurs sèches selon la norme NF T 30-124, avec définition commune des "zones homogènes" et des critères d'acceptation (niveau A).

Planning d'exécution en atelier

Le planning d'exécution en atelier donne, pour chaque élément, les dates prévisionnelles suivantes :

- entrée en atelier de décapage,
- application de la deuxième couche,
- départ de l'élément sur le chantier.

Son examen, lors de la réunion préalable, doit être confronté à la fiche de certification du système afin de détecter des impossibilités éventuelles (par exemple, non respect des délais de recouvrement) ou des difficultés (temps insuffisant imparti aux contrôles...)

10.15 - TRANSPORT DES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE DE L'ATELIER SUR LE CHANTIER

Le programme de transport fourni par l'entrepreneur doit indiquer quelles sont les entreprises responsables de chaque phase : chargement, transport proprement dit, déchargement. Le transport proprement dit est généralement sous-traité.

Le programme doit définir les caractéristiques des éléments à transporter (dimensions et poids) et les dispositions prévues. Dans le cas de transport par route, il précise par exemple :

- les caractéristiques géométriques et mécaniques des véhicules ;
- le statut réglementaire du transport (conforme au code de la route ou exceptionnel), et sa catégorie dans le cas de transport exceptionnel ;
- l'itinéraire, la date et l'horaire du transport, les problèmes éventuels de gabarit ou de poids des essieux ;
- les autorisations dans le cas de transport exceptionnel ;
- la présence éventuelle d'un véhicule pilote ou de véhicules d'accompagnement ;
- les modalités de chargement et de déchargement ;
- les modalités d'accès au chantier ;
- les précautions prévues (calages, contreventements...) pour éviter de causer des dommages aux tiers et aux éléments transportés (déformations permanentes, détériorations de surfaces, fatigue...).

Le maître d'œuvre s'assure de la cohérence et de l'adéquation des dispositions prévues.

10.16 - SOUDAGE : TRAVAUX SUR CHANTIER

Le soudage sur chantier est souvent exécuté par une entreprise sous-traitante, qui peut être l'entreprise de montage.

Les dispositions indiquées pour le soudage en atelier restent valables, mais elles doivent tenir compte des contraintes supplémentaires liées au travail sur chantier.

L'une de ces contraintes est la sujétion aux intempéries. Les postes de soudage doivent être munis d'abri protégeant le soudeur et l'assemblage à souder contre le vent et la pluie. Les produits consommables doivent être conservés selon les recommandations du fabricant. Les électrodes basiques et les flux doivent être étuvés avant utilisation, ce qui nécessite la présence d'une étuve à proximité du lieu de travail des soudeurs. L'humidité, provenant par exemple de la condensation, doit être éliminée des pièces avant soudage.

Les abris peuvent apporter aussi une protection relative contre les basses températures. Les conditions de température des pièces à souder et du poste de travail sont définies dans la norme NF P 22-471 (article 8.2.1).

Le PAQ doit inclure une note sur la protection contre les intempéries.

Une autre contrainte du chantier est l'impossibilité de retourner les pièces comme en atelier. De nombreuses soudures doivent donc être exécutées "au plafond". En outre, les procédés de soudage praticables sur chantier sont moins nombreux qu'en atelier.

Ainsi, les modes opératoires qualifiés utilisés sur chantier sont souvent différents de ceux utilisés en atelier. Les soudeurs doivent donc posséder des qualifications différentes, et une expérience confirmée dans les procédés de soudage utilisés (par exemple le procédé Innershield).

Pour ces différentes raisons, l'étendue des contrôles à effectuer par l'entrepreneur est plus importante sur chantier qu'en atelier (norme NF P 22-473).

L'inspecteur du maître d'œuvre doit avoir à sa disposition les différents documents de soudage énumérés précédemment.

Il contrôle les mêmes points qu'en atelier, en attachant une importance particulière à la géométrie à chaque étape de la construction, les défauts de géométrie étant difficilement rattrapables à ce stade.

Il s'assure du respect des dispositions contre les intempéries mentionnées précédemment.

Le visa par le maître d'œuvre du procès-verbal d'acceptation des assemblages soudés effectués sur chantier doit être une condition à la levée du point d'arrêt des phases ultérieures (suite du montage et mise en œuvre sur le chantier de la protection contre la corrosion).

10.17 - BOULONNAGE

10.17.1 - Contrôles par le maître d'œuvre avant le boulonnage

Le bureau contrôleur du maître d'œuvre et son agent d'inspection doivent être en possession des dessins d'exécution des assemblages précontraints, ainsi que du programme de pose des boulons suivant la norme NF P 22-464. Ils font préciser ces documents en tant que de besoin au cours d'une réunion de chantier préalable.

Les points à examiner à partir de ces documents sont notamment :

- l'existence éventuelle de mesures du coefficient de frottement, et les résultats obtenus ;
- l'existence éventuelle d'une étude de serrage dans les conditions du chantier ;
- le plan de serrage ;
- le calcul du couple de serrage théorique et la valeur du coefficient de rendement du couple pris en compte ;

- l'accessibilité des boulons pour la mise en œuvre ;
- le choix de la méthode de contrôle (desserrage-resserrage, ou surserrage) ;
- la définition de l'échantillonnage de contrôle ;
- le planning de mise en œuvre, qui doit être compatible avec les délais d'intervention de l'entreprise pour l'exécution de ses contrôle suivant la méthode retenue.

Si la mesure du coefficient de frottement des surfaces fait apparaître des valeurs inférieures à celle prise en compte dans les calculs, il y a lieu d'augmenter la rugosité par projection d'abrasif, ou bien d'augmenter le nombre des boulons.

10.17.2 - Contrôles par le maître d'œuvre pendant le boulonnage

L'inspecteur du maître d'œuvre s'assure que les conditions d'exécution et de contrôle sont correctement appliquées par l'entreprise.

Cet examen porte sur des points tels que :

- la conformité de l'état de préparation des surfaces de frottement ;
- l'ordre de serrage des boulons ;
- la réalisation du presserrage ;
- la protection des assemblages contre l'humidité après le presserrage ;
- l'existence d'une courbe d'étalonnage accompagnant les clés dynamométriques utilisées par l'entreprise, et la correction correspondante du couple de serrage ;
- le respect des délais de contrôle de l'entreprise après serrage ;
- les résultats du contrôle de l'entreprise.

10.17.3 - Contrôles par le maître d'œuvre après le boulonnage

L'inspecteur effectue généralement, sur quelques assemblages, ses propres contrôles de serrage. Les conditions à respecter sont évidemment les mêmes que pour les contrôles effectués par l'entreprise : clé dynamométrique étalonnée, conditions pour l'échantillonnage des boulons, délai entre le serrage et le contrôle, critères d'acceptation ou de refus...

Chaque intervention de l'inspecteur fait l'objet d'un procès-verbal adressé au maître d'œuvre. Un rapport de synthèse rappelle l'objectif du contrôle, le descriptif de l'intervention et les résultats avec leur synthèse.

Le maître d'œuvre doit s'assurer que les numéros de lot des boulons sont reportés sur les plans d'exécution qui seront archivés dans le dossier d'ouvrage destiné à la gestion de l'ouvrage en service. Cette disposition n'est pas nécessaire si les numéros de lot sont inscrits de façon indélébile sur les boulons, ce qui commence à être pratiqué maintenant.

10.18 - MONTAGE SUR CHANTIER : DOCUMENTS FOURNIS PAR L'ENTREPRENEUR AVANT L'EXÉCUTION

10.18.1 - Programme de montage sur chantier

Ce programme inclut l'ensemble des études relatives au montage sur chantier. Il doit comprendre, en application du fascicule 66 du CCTG, article III.1.5.6 :

- la description détaillée des opérations de montage sur chantier, avec l'indication des différentes phases envisagées ;
- la vérification de la résistance et de la stabilité de la structure métallique au fur et à mesure de sa construction, avec l'indication des sollicitations maximales et des sollicitations aux joints d'atelier et de chantier ;
- la justification des éléments provisoires de la structure, des ouvrages provisoires, et des matériels de montage qui seront utilisés ;
- un état récapitulatif des efforts développés au cours du montage sur les parties non métalliques de l'ouvrage et sur son environnement ;
- un état récapitulatif des efforts à développer par les matériels assurant la mise en place de l'ouvrage ;
- un programme d'exécution des joints de chantier se référant au programme de soudage et indiquant notamment les dispositions prises pour assurer le maintien des pièces ;
- un programme des relevés géométriques à effectuer dans les différentes phases de la construction.

Avant de souder un élément provisoire à la structure, l'entrepreneur doit produire un programme de soudage comme pour les assemblages soudés définitifs (voir 10.11.1 ci-avant).

Le programme de montage sur chantier est à soumettre au visa du maître d'œuvre comme les autres programmes d'exécution, avec toutefois des exceptions pour certains documents concernant les ouvrages provisoires (voir en 10.18.3 ci-après).

10.18.2 - Ouvrages provisoires : classification

Le fascicule 66 du CCTG (article III.8.2) classe les ouvrages provisoires en trois catégories :

- les éléments provisoires de structure
- les étalements
- les dispositifs de protection

Ne sont pas considérés comme des ouvrages provisoires : les matériels de montage (voir 10.18.4 ci-après), les coffrages de dalle des ponts mixtes, les ouvrages provisoires non directement liés à l'exécution de la structure métallique, les échafaudages de service.

Éléments provisoires de structure

Il s'agit d'éléments assemblés à la structure pour assurer une fonction nécessaire seulement pendant la construction de l'ouvrage : clames d'assemblage, contreventements et entretoisements de montage, avant-becs et arrière-becs de lancement, queues de lancement, oreilles de fixation...

Ces éléments provisoires, comme leur appellation l'indique, sont normalement démontés et récupérés par l'entrepreneur à la fin des travaux. Si l'entrepreneur demande à les laisser en place, le maître d'œuvre peut l'y autoriser après avoir vérifié que les conditions du fascicule 66 (article III.6) sont satisfaites.

Étalements

Les étalements sont destinés à supporter ou à soutenir la structure en cours de construction. Il s'agit notamment des palées, constituées souvent de profilés métalliques. Entrent aussi dans cette catégorie les appuis provisoires dits camarteaux, constitués d'un entassement de profilés en I munis de raidisseurs.

Dispositifs de protection

Il s'agit des protections contre les risques de chute d'éléments ou de matériels, contre les risques de chocs accidentels...

Le fascicule 66 du CCTG distingue deux sous-catégories :

- les dispositifs de protection complexes ou dont dépend la sécurité des tiers ou la qualité des ouvrages ; c'est le cas, par exemple, d'un portique de protection au-dessus d'une voie maintenue en exploitation ;
- les autres dispositifs de protection.

10.18.3 - Ouvrages provisoires : études, documents d'études

Dispositions générales

L'entrepreneur doit définir et justifier de façon détaillée les ouvrages provisoires dans le cadre du programme de montage.

De façon générale, les ouvrages provisoires doivent être conçus et dimensionnés suivant les mêmes règles de sécurité que les ouvrages définitifs (fascicule 66 du CCTG, article III.8.2.2).

L'annexe contractuelle A2 du fascicule fournit des règles de base pour les justifications : définition des charges permanentes et des charges de chantier, modalités d'application des Directives communes de 1979, règles particulières aux ouvrages provisoires en métal, en bois, en béton... On notera que les parties d'ouvrage en cours de déplacement (lançage, hissage, etc.) sont à considérer comme des charges de chantier, donc à majorer par un coefficient de sécurité partiel plus élevé que celui des charges permanentes.

Avant l'utilisation des ouvrages provisoires, les documents d'études correspondants doivent être remis :

- à l'agent de l'entreprise responsable des opérations de montage (le "ROM"), qui doit les contresigner ;
- au maître d'œuvre.

En outre, un jeu complet de ces documents contresignés par l'agent responsable des opérations de montage doit être tenu à la disposition des agents du maître d'œuvre sur le chantier, jusqu'à la réception des ouvrages définitifs.

Dans le cas des éléments provisoires de structure et des étalements, le maître d'œuvre n'a pas à viser les documents d'études (fascicule 66 du CCTG, commentaire de l'article III.1.1.1). En effet, le maître d'œuvre ne doit pas s'engager au-delà de son rôle réglementaire à l'égard de l'entreprise, qui doit garder la responsabilité de ses moyens et de ses méthodes.

Cela ne signifie pas que le maître d'œuvre puisse se désintéresser des éléments provisoires et des étalements : ceux-ci ont une importance évidente en matière de sécurité au cours des travaux et, en outre, ils sont en interaction avec les ouvrages définitifs, auxquels ils peuvent appliquer des efforts. Le maître d'œuvre doit donc être vigilant sur ces ouvrages avant de lever le point d'arrêt qui conditionne le démarrage du montage. Cette vigilance est à moduler suivant les circonstances : degré de confiance en l'entreprise de montage, niveau de difficulté des opérations, conséquences d'un incident...

Dans le cas des dispositifs de protection, les règles de visa sont différentes :

- pour les "dispositifs de protection complexes ou dont dépend la sécurité des tiers ou la qualité de l'ouvrage", le maître d'œuvre doit viser les documents d'études ;
- pour les autres dispositifs de protection, le visa porte seulement sur les hypothèses qualitatives et numériques de base du dimensionnement, et sur les schémas de principe (fascicule 66 du CCTG, article III.8.2.4).

Ces différences dans les règles de visa s'expliquent par des situations différentes en matière de sécurité. Pour les éléments provisoires d'ossature et pour les étaielements, le niveau de sécurité résulte directement de l'application des règlements et normes de calcul. Pour les dispositifs de protection, les textes généraux ne peuvent pas être aussi directifs en raison de la multiplicité des configurations possibles, de sorte que chaque cas nécessite des choix auxquels le maître d'œuvre doit être associé.

Règles particulières concernant les étaielements

L'article III.8.2.3 du fascicule 66 du CCTG définit la consistance des documents d'études des étaielements à fournir par l'entrepreneur.

L'annexe contractuelle A2 du fascicule (commentaire de l'article 4) donne des coefficients de réduction de la capacité portante des étaielements en cas de réemploi.

Ces réductions concernent les étaielements utilisés plusieurs fois successivement sur un même chantier sans démontage. Elles ne concernent pas les étaielements explicitement conçus et justifiés pour le réemploi, ni les autres ouvrages provisoires, ni les matériels de montage.

10.18.4 - Documents du PAQ fournis avant le montage sur chantier

L'entrepreneur doit contrôler la conception et l'exécution des ouvrages provisoires, et remettre au maître d'œuvre, au titre du plan d'assurance de la qualité, les attestations ou les procès-verbaux de ces contrôles (article III.8 du fascicule 66 du CCTG).

Dans le cas d'étaielements, le responsable des opérations de montage mandaté par l'entrepreneur doit certifier qu'il est fait usage soit d'éléments neufs, soit d'éléments vérifiés, triés et remis en état de façon à offrir les mêmes garanties que des éléments neufs.

Dans le cas de dispositifs de protection, les documents du PAQ sont visés par le maître d'œuvre dans les mêmes conditions que celles vues précédemment.

Pour les matériels de montage, les exigences en matière de sécurité sont des exigences réglementaires imposées par la législation. Rappelons qu'il s'agit de matériels spéciaux tels que :

- treuils ;
- câbles, haubans, moufles ;
- chaises à galets pour lançage ;
- mâts, portiques, grues, blondins, bigues, pontons flottants ;
- crémaillères de hissage.

L'entrepreneur doit faire contrôler ces matériels par des organismes de contrôle agréés. Il doit fournir au maître d'œuvre, au titre du PAQ, les attestations de contrôle contresignées par le responsable des opérations de montage.

La remise des documents traduisant ces contrôles, ainsi que la signature par le maître d'œuvre des procès-verbaux d'acceptation des assemblages soudés effectués sur chantier, sont une condition à la levée du point d'arrêt avant le montage.

10.19 - MONTAGE SUR CHANTIER : EXÉCUTION

L'entrepreneur doit désigner un agent responsable des opérations de montage (le "ROM"), et soumettre cette désignation à l'acceptation du maître d'œuvre. Le fascicule 66 du CCTG, article III.8, définit la mission de cet agent et les contrôles qu'il doit effectuer avant, pendant et après le montage.

En particulier, la géométrie du tablier doit être contrôlée :

- à terre, au fur et à mesure de l'assemblage ;
- après mise en place (par lançage, par hissage, etc.).

Les mesures à effectuer, et les tolérances géométriques correspondantes, sont définies dans la norme expérimentale XP P 22-810 (fascicule 66 du CCTG, article III.9).

L'inspecteur du maître d'œuvre doit se faire remettre les résultats de ces contrôles, et les vérifier éventuellement par sondages sur place.

10.20 - PROTECTION CONTRE LA CORROSION : TRAVAUX SUR CHANTIER

10.20.1 - Documents fournis par l'entrepreneur avant les épreuves de convenance sur chantier

La liste des documents remis au maître d'œuvre pour visa avant les épreuves de convenance sur chantier est la même que pour l'épreuve de convenance en atelier, le plan de mise en peinture en moins et la note sur la protection en plus :

- programme d'exécution de la protection, selon l'article 15 du fascicule 56 du CCTG, avec les spécificités des travaux sur chantier,
- certificat ACQPA du système de peinture, certificat ACQPA de stabilité de la couleur de finition (éventuellement), et fiches techniques des peintures,

- liste nominative des opérateurs, des agents d'encadrement, des agents de contrôle, avec un organigramme établissant les responsabilités (chef d'équipe, contrôles externe et interne),
- certificats ACQPA des opérateurs,
- certificat ACQPA / FROSIO de l'agent de contrôle externe de l'entreprise,
- cadre du journal de chantier,
- cadre des procès-verbaux du contrôle externe de l'entreprise (portant sur la préparation des surfaces et sur la qualité des feuillets secs),
- note descriptive détaillant les dispositions prévues pour protéger l'ouvrage d'une part, (piles, eulées, etc.) et l'environnement d'autre part.

Sur ce dernier point, il faut préciser que le problème de la récupération de l'abrasif, qui va se poser de façon cruciale pour la maintenance des ouvrages en raison de la nouvelle réglementation sur les déchets, ne se pose pas pour les ouvrages neufs car les abrasifs utilisés ne sont pas alors souillés par de vieilles peintures.

10.20.2 - Épreuves de convenance sur chantier, réunion préalable, fiche de démarrage des travaux et planning d'exécution

Épreuves de convenance

Comme celles en atelier, les épreuves de convenance sur chantier doivent être précédées et suivies d'un point d'arrêt. La levée du point d'arrêt après les épreuves conditionne le démarrage des travaux de protection sur chantier. Le maître d'œuvre lève ce point d'arrêt au vu des comptes rendus d'épreuves établis par l'entreprise et contresignés par l'inspecteur du maître d'œuvre.

Sur chantier, les épreuves de convenance (préparation des surfaces et application des produits) portent d'une part sur les joints de chantier où les réservations pour soudures font que la totalité du système est à appliquer, et d'autre part sur le reste des surfaces pour lesquelles il n'y a plus, en général, que la finition à appliquer.

Suivant le planning et l'organisation générale du chantier, il est souhaitable, mais pas toujours possible, de grouper les épreuves de convenance sur ces deux types de surface (joints de chantier et surfaces générales de l'ouvrage). Ces épreuves seront, de toute façon, à organiser lors de l'application du système de peinture sur le premier joint de chantier.

Selon la règle habituelle, les épreuves de convenance sont effectuées avec les moyens prévus pour les travaux (matériel, produits, personnel...) et en présence du contrôle externe de l'entreprise et de l'inspecteur du maître d'œuvre. Elles doivent porter sur les difficultés spécifiques liées à l'ouvrage, au site, au système appliqué... Citons à titre d'exemples, et sans être exhaustif :

Jointes de chantier

Préparation de surface (degré de soin, rugosité...) sans endommagement des couches voisines appliquées en atelier, respect des épaisseurs minimale et maximale du primaire, respect des délais entre couches...

Surfaces générales de l'ouvrage

C'est pour ces surfaces qu'il est le plus important de savoir organiser l'épreuve de convenance en fonction des difficultés spécifiques. En effet, la partie du système appliquée en atelier subit un certain nombre d'agressions avant sa reprise sur chantier. L'épreuve de convenance doit être l'occasion de bien se mettre d'accord sur la façon de traiter ces agressions, et de définir les méthodes de reprise et de réparation. Citons, à titre d'exemples :

- Zones blessées avec arrachements, ragrages, etc. - Il n'y a pas de méthode générale pour traiter ces zones. La méthode à retenir dépend surtout de l'importance et de l'état, en surface et en profondeur, de la blessure. En cas de surface importante blessée jusqu'à l'acier, il est nécessaire de décaper à l'abrasif et de réappliquer tout le système. Un soin particulier doit alors être porté aux "lèvres" de la blessure lors du décapage, afin de ne pas détériorer les zones saines voisines. En cas de blessure moins importante (simple ragrage blessant le système en place sur une très petite surface, arrachement n'allant pas jusqu'à l'acier...), il est souvent préférable de procéder à un décapage manuel (brosse métallique, disquage...) puis de "recharger" avec la peinture intermédiaire et en forte épaisseur au moyen de "pré-touches".
- Nettoyage du système appliqué en atelier - Il est possible que les surfaces peintes en atelier soient "très sales" (poussières et laitance plus ou moins adhérente, fumées, traces de pas, huiles, graisses...). Il n'est pas absurde d'inclure alors la méthode de nettoyage dans l'épreuve de convenance.
- Dépassement du délai de recouvrement - La reprise sur chantier d'un système ayant dépassé le délai de recouvrement doit faire l'objet d'une procédure d'exécution spéciale proposée par le fabricant de peinture, via l'entreprise. L'acceptation de cette procédure par le maître d'œuvre peut être subordonnée à une épreuve de convenance.

Réunion préalable

Comme en atelier, les épreuves de convenance sur chantier sont l'occasion d'organiser une réunion de chantier à laquelle doivent participer :

- l'entreprise de construction métallique et l'entreprise d'application, avec leurs contrôles interne et externe,
- le maître d'œuvre et son inspecteur,
- si besoin, le fabricant de peinture (pour avis sur des procédures spéciales de reprise du système appliqué en atelier), et le contrôle de l'atelier (pour faire le point précis sur les non-conformités n'ayant pas été corrigées en atelier et devant l'être sur chantier).

Fiche de démarrage des travaux sur chantier

La fiche de démarrage des travaux sur chantier est établie par l'inspecteur du maître d'œuvre lors de la réunion préalable.

La consistance de cette fiche est identique à celle des travaux en atelier (voir 10.14.3 ci-avant). Pour ce qui concerne les relations entre le contrôle externe de l'entreprise et l'inspecteur du maître d'œuvre, ce dernier est prévenu (avec un délai convenu à l'avance) de la mise en décapage de chaque joint de chantier ainsi que du démarrage des travaux pour les surfaces générales de l'ouvrage.

L'acceptation du système terminé étant le dernier point d'arrêt avant l'enlèvement des échafaudages ou des moyens d'accès aux surfaces peintes, les modalités de convocation pour cette opération, et notamment le délai, sont également arrêtés lors de l'établissement de cette fiche de démarrage des travaux.

Planning d'exécution sur chantier

Le planning d'exécution sur chantier est examiné également au cours de la réunion préalable. Il donne les dates ou durées prévisionnelles concernant :

- le traitement des joints soudés,
- le démarrage du traitement des surfaces générales de l'ouvrage,
- les périodes d'accès aux surfaces compte tenu du mode de gestion des échafaudages ou des moyens d'accès à ces surfaces.

Ce dernier point est important, car il conditionne le mode d'intervention du contrôle du maître d'œuvre.

Pour ce qui concerne les échafaudages ou moyens d'accès, il est important que le maître d'œuvre s'assure, avant l'exécution des travaux, de la bonne adéquation des moyens prévus (nacelle mobile intégrée à l'ouvrage, plancher sur échafaudage, nacelle sur camion...). Ces moyens doivent permettre l'accès aux surfaces dans des conditions telles que l'on puisse décaper et appliquer les produits en respectant les spécifications et les règles de sécurité.

10.20.3 - Acceptation du système terminé

L'acceptation du système terminé est prononcée par le maître d'œuvre au vu du compte rendu de son inspecteur. Ce compte rendu porte sur le respect du PAQ de l'entreprise d'une part, sur la qualité de la protection terminée d'autre part.

Pour ce qui concerne la qualité de la protection terminée, le contrôle final du revêtement par l'inspecteur du maître d'œuvre est un point d'arrêt avant le repliement des échafaudages et autres moyens d'accès aux surfaces peintes. Il faut donc s'assurer que ces surfaces sont accessibles avec un délai suffisant après peinture. Les contrôles portent sur les points suivants :

- conformité des épaisseurs aux spécifications (norme NF T 30-124, niveau A) ;
- absence de défaut : bullage, porosité, coulures, décollement... ;
- mesure des caractéristiques colorimétriques de départ au cas où une garantie de la stabilité colorimétrique de la finition est prévue au marché (“garantie spéciale”).

10.21 - DALLES DE PONTS MIXTES

Les documents à fournir par l’entrepreneur avant la mise en place de la dalle sont ceux définis dans le fascicule 65-A du CCTG, auxquels s’ajoute le relevé de la géométrie de la poutraison métallique.

Les contrôles du maître d’œuvre sont les mêmes que pour les autres ouvrages en béton, avec certains aspects spécifiques.

Il y a lieu de vérifier, dès la remise des premières études d’exécution et des premiers documents du PAQ, que les dispositions prévues pour la dalle sont cohérentes avec la structure métallique d’une part, avec les équipements d’autre part.

Par ailleurs, les réflexions entreprises pour limiter la fissuration du béton (voir les “Recommandations” [5.14]) ont montré l’importance de points tels que :

- la formulation du béton ;
- le phasage du bétonnage ;
- les dispositions particulières éventuelles en cas de bétonnage par temps froid ;
- la résistance minimale du béton lors d’un décoffrage ;
- le délai minimal avant décoffrage ;
- les dispositions relatives à la cure du béton ;
- les dénivellations d’appuis éventuelles ;
- dans le cas de dalle préfabriquée, les dispositions pour assurer le contact entre les éléments de dalle et la semelle supérieure des poutres principales, la liaison entre éléments de dalle successifs, l’enrobage des connecteurs.

Le maître d’œuvre doit s’assurer que les dispositions proposées par l’entrepreneur pour ces différents points sont correctes, et faire contrôler leur mise en œuvre sur le chantier.

Après exécution, le maître d’œuvre prend connaissance du profil en long final du tablier d’après les relevés de l’entrepreneur, et fait effectuer ses propres relevés s’il y a lieu.

Pour le contrôle des chapes d’étanchéité, on se reportera au fascicule 67 du CCTG, ainsi qu’au dossier STER 81 du SETRA.

10.22 - DOSSIER D'OUVRAGE

L'établissement d'une partie du dossier d'ouvrage incombe au maître d'œuvre. Celui-ci doit la remettre au service gestionnaire lors de la remise de l'ouvrage.

On se reportera à ce sujet au fascicule 01 "dossier d'ouvrage", rédigé dans le cadre de l'"instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art" de la Direction des routes, fascicule dont une version révisée a été publiée en 2000 [10.2].

Références du chapitre 10

- [10.1] - **Norme expérimentale XP P 22-810 : construction métallique - ouvrages d'art - tolérances dimensionnelles** (AFNOR, mars 1994).
- [10.2] - **Dossier d'ouvrage - fascicule 01 de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art** (LCPC - SETRA, premier trimestre 2000).



Édition des publications EAC : Jocqueline THIRION : 01 46 11 34 82

Étude graphique et mise en page : Concept Graphic 45 : 02 38 92 03 25/06 19 33 78 04

Ce document est propriété de l'Administration,
il ne pourra être utilisé ou reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du SETRA.

ISBN 2-11-091787-3

© 2001 SETRA

Achévé d'imprimer à La Chapelle-Montligeon - 61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : Avril 2001 - N° 21266

Ce guide s'adresse aux maîtres d'œuvre publics chargés de la construction d'un pont en acier, et à leurs intervenants (bureaux d'études, inspecteurs de travaux...).

Il traite certains aspects de la maîtrise d'œuvre, notamment la consultation des entreprises et la surveillance des travaux.

Il ne traite pas la conception des ouvrages : cependant, certaines indications, par exemple celles relatives au choix des aciers et aux types de soudures, peuvent être utiles dès la phase de projet.

Seuls les sujets spécifiques aux ponts en acier sont traités.

Les chapitres 1 à 4 sont consacrés aux produits de construction et à leur mise en œuvre. Ils portent sur les aspects technologiques auxquels sont le plus souvent confrontés les maîtres d'œuvre lors de la mise au point du marché et de l'exécution des travaux.

Le chapitre 5 passe en revue les textes de référence utilisables pour les spécifications techniques des marchés : CCTG, normes, autres textes.

Les chapitres 6 et 7 décrivent les dispositions visant à assurer la conformité aux spécifications : certification des produits et des services, assurance de la qualité.

Les chapitres 8, 9 et 10 fournissent des éléments pour l'application pratique par le maître d'œuvre. Ils correspondent chacun à une phase des opérations : consultation des entreprises, préparation des travaux, exécution des travaux.

This guide is intended both for public authorities in charge of building a steel bridge and for their partners (consultants, project inspectors, etc.).

It covers certain aspects of project engineering including the tender enquiry and site supervision.

It does not cover bridge design. However, some information such as that concerning the choice of steels and types of welds, may be useful for the project stage.

Only subjects specific to steel bridges are covered.

Sections 1 to 4 are devoted to construction products and their use. They concern the technological aspects project engineers usually have to address when developing the contract and performing the work.

Section 5 reviews the reference texts that can be used for technical specifications of contracts: general technical specifications, standards and other texts.

Sections 6 and 7 describe requirements intended to ensure compliance with specifications : certification of products and services, quality assurance.

Sections 8, 9 and 10 provide information for implementation by the project engineer. They each correspond to a phase in the operations: tender enquiry, preparation of work, performance of work.

Ce document est disponible sous la référence **F 0039**

au bureau de vente du SETRA

46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - FRANCE

Tel : 01 46 11 31 53 - Fax : 01 46 11 33 55

Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

Prix de vente : 200 F