

Rapport de pliage de l'armature
après la **GALVANISATION À CHAUD**

TABLE DES MATIÈRES

Étude du phénomène de fragilisation des barres d'armature pliées	6
Énoncé du problème.....	7
Objectifs	7
Sommaire	7
Méthodologie	8
Résultats.....	9
Résultats pour les tests de dépliage des barres pliées à 90° et à 180°	9
Graphique 1: Pourcentage de bris lors du dépliage	9
Exemples de pliages et de dépliages de barres d'armature.....	10
Observations.....	11
Conclusion	11
Discussion	12
Annexe 1: Certificat d'essai des barres utilisées pour l'expérience.	13
Annexe 2: Articles portant sur les causes de la fragilisation de l'acier	15
Pliage des barres d'armature après la galvanisation	17
Énoncé du problème.....	19
Objectifs	19
Sommaire	19
Méthodologie	20
Resultats et observations.....	21
Tableau comparatif entre les méthodes de galvanisation.....	21
Graphique 1 : Résultats, méthode classique vs méthode pour pliage	21
Photos 1 et 2 : Méthode de galvanisation traditionnelle.....	22
La photo 3 : Comparaison entre la méthode traditionnelle de galvanisation.....	22
La photo 4 : présente un agrandissement des fissures de type 1.....	23
Photo 5 : Exemple de défaut de type 2	23
Photo 6 : Écaillage produit par le système de pliage	23
Graphique 2 : Température d'entreposage des barres d'armature avant le test de pliage à froid.....	24
Conclusion	25
Discussion	25
Annexe 1 : Certificat d'essai des barres utilisées pour l'expérience.	26
Annexe 2 : Système de pliage utilisé pour le pliage des barres d'armature.....	27
Photo 7 : Système utilisé pour le pliage de barres d'armature.....	27
Annexe 3 : Exemple obtenus lors des essais de dépliages	27
Armature pliée après la galvanisation	29
Tableau 1 : Exemples de réaction du revêtement de zinc lorsqu'il est soumis à un pliage..	30
Tableau 2 : Aire maximale tolérée pouvant être écaillée en fonction du diamètre de la barre d'armature.....	30
Procédure d'expédition de l'armature droite pour pliage	31
Fragilisation des barres d'armature pliées avant galvanisation destinées aux ouvrages en béton	33

ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE FRAGILISATION DES BARRES D'ARMATURE PLIÉES



Corbec
Éric Michaud
14 février 2008

Étude du phénomène de fragilisation des barres d'armature pliées

Énoncé du problème :

De récents événements survenus dans l'industrie démontrent que les barres d'armature pliées avant la galvanisation présentent des taux de bris élevés lorsqu'elles sont soumises à des tests de dépliages.

Pour expliquer ces contre-performances, la littérature traitant du sujet, mentionne que deux phénomènes peuvent être en cause dans les cas de rupture de barres d'armature pliées et galvanisées soit : la captation d'hydrogène et le vieillissement accéléré.

Objectifs :

Les objectifs de la présente étude sont :

- 1- Démontrer que le taux de rupture de barres d'armature pliées avant galvanisation varie en fonction du temps passé dans les bains d'acide.
- 2- Démontrer que les problèmes de captation d'hydrogène et de vieillissement accéléré sont contrés lorsque les barres d'armature sont pliées après la galvanisation et que les barres ainsi obtenues ont des résultats comparables aux barres d'armature pliées non galvanisées lorsqu'elles sont soumises à des tests de dépliage.

Sommaire :

Quel que soit le temps de passage dans les bains d'acide hydro chlorhydrique, les barres d'acier d'armature pliées avant la galvanisation présentent des taux d'échecs importants lorsqu'elles sont soumises à des tests de dépliage.

Par contre, les barres d'acier d'armature pliées après la galvanisation se comportent comme des barres non galvanisées lorsqu'elles sont soumises aux mêmes tests de dépliage. Les quarante échantillons étudiés ont tous réussi le test de dépliage.

Le pliage après la galvanisation semble être une alternative satisfaisante permettant de contrer les problèmes de fragilisation de l'acier d'armature.

Méthodologie

Pour les fins de l'expérience, des barres d'armature d'acier, (grosneur 15M, nuance 400W) ont été utilisées. L'annexe 1 présente le certificat d'essai relatif aux barres utilisées pour les tests. Une partie d'entre elles ont été pliées avant la galvanisation de façon à obtenir des pliages de 90° et de 180° ayant des diamètres de courbure de six fois le diamètre de la barre.

Les barres pliées ont par la suite été divisées en cinq lots de 40 barres contenant chacun 20 barres pliées à 90° et 20 barres pliées à 180°. Chacun de ces lots de barres a été trempé pendant 20 minutes dans le même réservoir de dézincage et par la suite chacun des lots a trempé dans le même réservoir d'acide hydro chlorhydrique pour des périodes de temps allant de 30 à 120 minutes. Les temps de trempage ainsi que la teneur en acide des réservoirs sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Parallèlement à la préparation des barres pliées avant galvanisation, un autre groupe de barres provenant du même ballot a été galvanisé droites. Puis a été plié après la galvanisation seulement.

L'ensemble des barres a par la suite été déplié manuellement en insérant une partie de la barre à l'intérieur d'un tuyau fixe jusqu'à la courbure de la barre. L'autre extrémité de la barre était quant à elle insérée dans un tuyau mobile servant de levier. Un opérateur effectuait l'opération de dépliage en faisant pivoter le tuyau mobile de façon à déplier la barre pour obtenir une barre droite. Des exemples d'échantillons sont présentés sur les photos 1 et 2.

Résultats

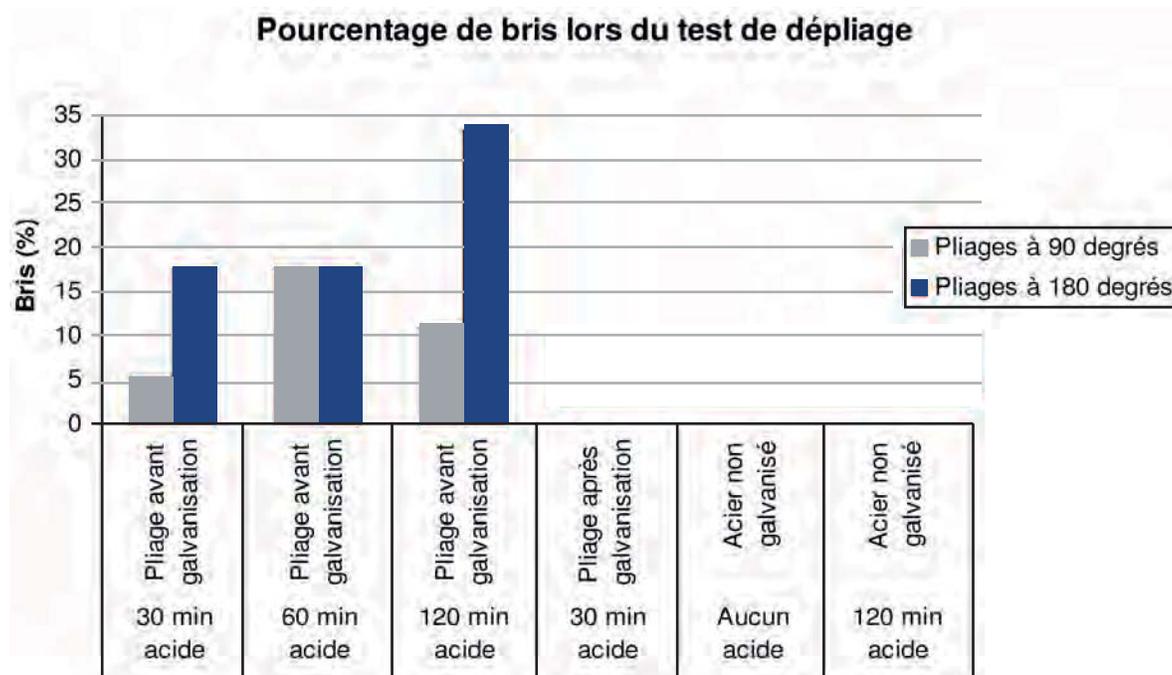
Résultats pour les tests de dépliage des barres pliées à 90° et à 180°

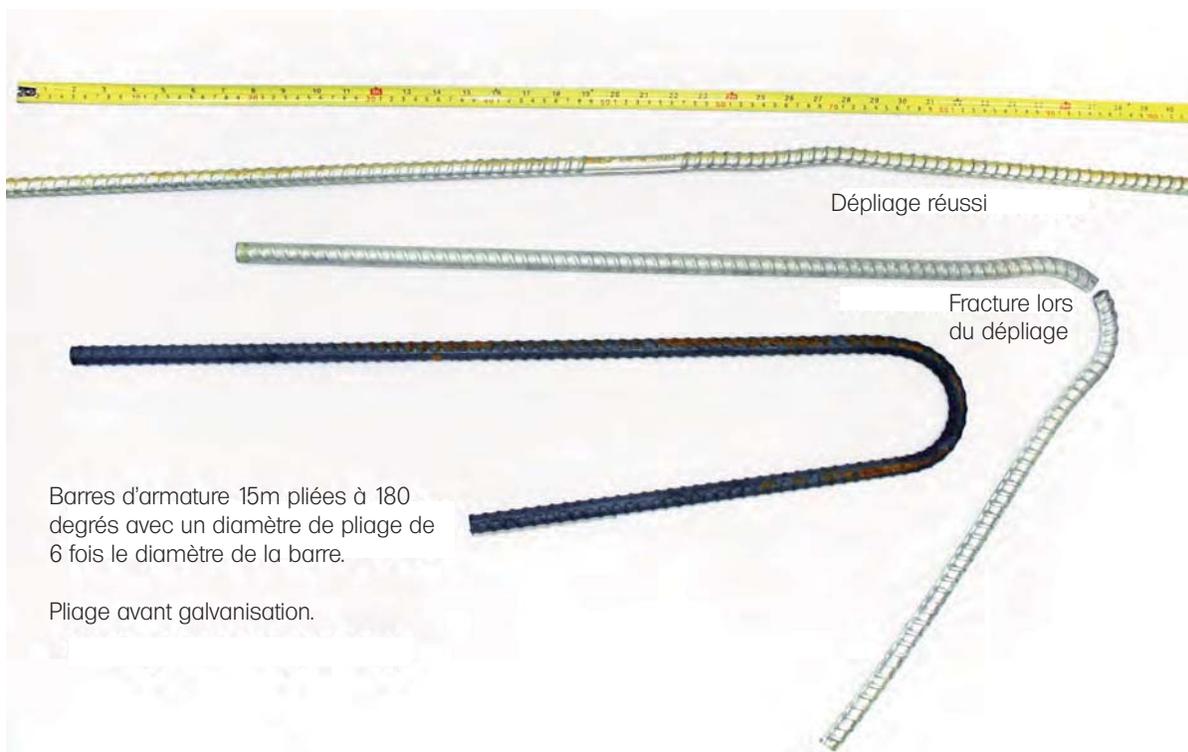
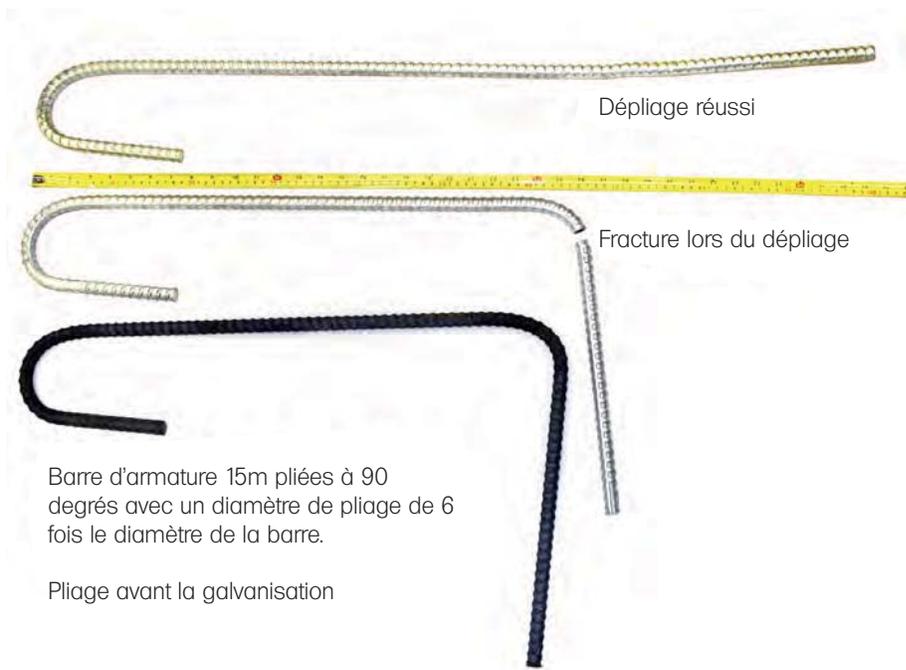
Test	Description	Temps dans le dezinc (min)	Temps dans l'acide (min)	Nombre de succès	Nombre de bris	Pourcentage de bris
1	Pliage avant galvanisation	20	30	19	1	5
2	Pliage avant galvanisation	20	60	17	3	15
3	Pliage avant galvanisation	20	120	18	2	10
4	Pliage avant galvanisation	20	30	20	0	0
5	Acier non galvanisé	0	0	20	0	0
6	Acier non galvanisé	30	120	20	0	0

Test	Description	Temps dans le dezinc (min)	Temps dans l'acide (min)	Nombre de succès	Nombre de bris	Pourcentage de bris
1	Pliage avant galvanisation	20	30	17	3	15
2	Pliage avant galvanisation	20	60	17	3	15
3	Pliage avant galvanisation	20	120	15	5	25
4	Pliage avant galvanisation	20	30	20	0	0
5	Acier non galvanisé	0	0	20	0	0
6	Acier non galvanisé	30	120	20	0	0

Note : Concentration respective des réservoirs de dezinc et de trempage: 100 g HCl/l et 170 g HCl/l

Graphique 1: Pourcentage de bris lors du dépliage





Observations

Les résultats obtenus lors des tests de dépliages sont les suivants :

- Les 40 échantillons d'acier noir pliés à 90° (20 échantillons) et à 180° (20 échantillons) ont tous passé avec succès le test de dépliage.
- Les échantillons de barres pliés à 90° avant la galvanisation présentent des taux de rupture de 5, 18 et 11% pour des temps de trempage respectifs de 50, 70 et 140 minutes dans les bains acides.
- Les échantillons de barres pliés à 180° avant la galvanisation présentent des taux de rupture de 18, 18 et 33% pour des temps de trempage respectifs de 50, 70 et 140 minutes dans les bains acides.
- Les 40 échantillons d'acier noir pliés à 90° (20 échantillons) et à 180° (20 échantillons) ayant passé 140 minutes dans les acides sans toutefois avoir été soumises au procédé de galvanisation ont tous passé avec succès le test de dépliage.

Les barres d'acier droites ayant été pliées après la galvanisation ont séjourné 50 minutes dans les acides. L'ensemble des 20 barres pliées à 90° ainsi que l'ensemble des 20 barres pliées à 180° ont réussi avec succès le test de dépliage.

Conclusion

Les résultats obtenus démontrent que même en passant le temps minimum requis pour le conditionnement de l'acier dans l'acide hydro chlorhydrique les barres d'acier pliées avant la galvanisation échouent le test de dépliage dans des proportions appréciables : 18% dans le cas de barres pliées à 180° avec un diamètre de courbure de 6 fois le diamètre de la barre.

Tandis que les quarante échantillons de barres d'acier pliées après la galvanisation faisant l'objet de cette étude ont tous réussi avec succès le test de dépliage. Ainsi les résultats obtenus se comparent à ceux obtenus par un même échantillonnage de barres d'acier noires non galvanisées soumis au test de dépliage.

Discussion

La lecture d'un document publié par l'GAA (Galvanizer Association of Australia), présenté à l'annexe 2 fournit quelques explications aux phénomènes observés lors de cette étude. Premièrement, les pièces d'acier pliées à froid présentent plus de risques d'être affectées par le phénomène de fragilisation par l'hydrogène. Deuxièmement, les problèmes liés au '*strain-age embrittlement*' sont accentués lorsque des pièces d'acier pliées à froid sont exposées à la chaleur du bain de zinc, 450°C.

À la lumière des résultats obtenus, il appert que le stress mécanique causé par le pliage à froid des barres d'armature conjugué à l'exposition à l'hydrogène atomique et à la température élevée du bassin de zinc altère substantiellement les propriétés mécaniques des barres d'armature. Par contre lorsque des barres d'acier droites, donc non soumises à des stress mécaniques, sont galvanisées, l'exposition à l'hydrogène atomique, ainsi que le trempage dans le bain de zinc chaud, n'altèrent pas significativement les propriétés intrinsèques de l'acier.

Ainsi, le pliage après la galvanisation semble être la voie tout indiquée pour réduire les problèmes de ruptures dues à la fragilisation. Cependant, le phénomène d'écaillage du revêtement de zinc qui peut survenir lors du pliage après galvanisation doit être contrôlé adéquatement. Les essais réalisés en usine démontrent que le contrôle précis des paramètres clés de la galvanisation permet d'éviter les problèmes d'écaillage et d'obtenir des revêtements de zinc qui résistent très bien à des pliages de 180° pour des diamètres de courbure de 6 fois le diamètre des barres utilisées. Les résultats de ces travaux sont présentés dans l'étude intitulée : '*Pliage des barres d'armature après la galvanisation*'.

Annexe 1: Certificat d'essai des barres utilisées pour l'expérience.

Laminoir Contrecoeur-Ouest Contrecoeur-Ouest Works		CERTIFICAT D'ESSAIS TEST CERTIFICATE				ArcelorMittal Mittal Canada Inc.											
COMMANDE SALES ORDER	BON DE COMMANDE DU CLIENT CUSTOMER'S ORDER NO.	DATE COMMANDÉE DATE ENTERED	No CERTIFICAT CERTIFICATE No	DATE EXPÉDITION DATE SHIPPED													
C39550	2137	2007/11/27	1016035	2007/12/07													
VENDU À - SOLD TO				EXPÉDIÉ À - SHIPPED TO													
ARMATURES BOIS-FRANCS INC. 249 Boul. Bonaventure Victoriaville QC CA G6T 1V5		10808101		ARMATURES BOIS-FRANCS INC. 249 Boul. Bonaventure Victoriaville QC CA G6T 1V5		10808101											
ARTI. ITEM	DESCRIPTION	No CAMPAGNE SCHEDULE No.	POIDS EXPÉDIÉ WEIGHT SHIPPED	COULÉE HEAT													
000001	ARMATURE CRENELEE 15M, 12000 MM CSA G30.18-M92 400W	C0028 No MATÉRIEL: MATERIAL No 10091137 No PIÈCE: PART No	35,469 KG CONNAISSMENT BILL OF LADING 86011810	M22187													
ANALYSE CHIMIQUE - CHEMICAL ANALYSIS																	
COULÉE HEAT	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	AlT	AlS	N2			
M22187	.26	1.19	.016	.027	.20	.32	.09	.10	.024	.019	.000	.002	.000	.0128			
COULÉE HEAT	Sn	Ti	B	Ca	Pb	As	Co	Sb	Te	Bi	Se	D.I.	C.E.				
M22187	.017	.000	.0004	.0012	.000	.009	.000	.007	-	-	-	1.22	.478				
ESSAI JOMINY - JOMINY TEST (HRC)																	
COULÉE HEAT	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J10	J12	J14	J16	J20	J24	J28	J32	J0
M22187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES - MECHANICAL PROPERTIES																	
COULÉE HEAT	L.E. Yield Strength ksi (MPa)	L.U. Ulti. Tens. Strength ksi (MPa)	% ALL ELONG.	Striction % Reduction Area	Dureté Hardness BHN (HRC)	Grosneur de Grain Grain size	Ratio Reduction Ratio										
M22187	(466.7 / 466.7)	(644.5 / 644.5)	17 / 18	-	-	-	-										
RÉSULTATS D'ESSAIS SPÉCIAUX - SPECIAL TEST RESULTS																	
COULÉE-HEAT	AUTRES ESSAIS - OTHER TEST			RÉSULTATS - RESULTS													
M22187	BEND TEST/PLIAGE : GOOD/CONFORME			CSA G30.18-M92													
i / 1				Approuvé par : <i>Noé Béland</i> Approved by : Noé Béland		COORDONATEUR Métallurgie A/Q COORDINATOR Metallurgy and Q/A											

LSP-35-40-LO (08-99)

Annexe 2: Articles portant sur les causes de la fragilisation de l'acier

Source : Site web de la Galvanizer Association of Australia
<http://www.gaa.com.au/pdf/page15-17.pdf>

Factors influencing coating thickness

The thickness, alloy structure and finish of galvanized coatings are influenced by:

- 1 Surface condition of steel
- 2 Composition of the steel

Increasing the period of immersion in the galvanizing bath will not increase coating thickness except in the case of silicon steels, as discussed on this page.

Surface condition of steel

Grit blasting steel before galvanizing roughens the surface and increases its surface area, resulting in higher reactivity to molten zinc. Greater zinc-iron alloy growth occurs during galvanizing, producing thicker coatings, though at the expense of a rougher surface and poorer appearance. Application of this method of achieving thicker coatings is generally limited by practical and economic considerations. Where increased service life or reduced maintenance is required the use of duplex galvanizing-plus-paint systems is a preferable alternative, as discussed on page 65.

Composition of steel

Both silicon and phosphorous contents can have major effects on the structure, appearance and properties of galvanized coatings. In extreme cases, coatings can be excessively thick, brittle and easily damaged.

Silicon.

As shown in the graph below, certain levels of silicon content will result in excessively thick galvanized coatings. These very thick coatings result from the increased reactivity of the steel with molten zinc, and rapid growth of zinc-iron alloy layers on the steel surface. The graph shows that excessive growth in coating thickness takes place on steels with silicon contents in the range 0.04 to 0.14%. Growth rates are less for steels containing between 0.15 and 0.22% silicon, and increase with increasing silicon levels above 0.22%.

Effect of silicon content of steels on galvanized coating mass and appearance

Phosphorous. The presence of phosphorous above a threshold level of approximately 0.05% produces a marked increase in reactivity of steel with molten zinc, and rapid coating growth. When present in combination with silicon, phosphorous can have a disproportionate effect, producing excessively thick galvanized coatings. **Suitability of silicon/phosphorous steels for galvanizing.**

As a guide to the suitability of silicon and phosphorous containing steels for galvanizing, the following criteria should be applied: % Si < 0.04% And % Si + (2.5 x % P) < 0.09% Galvanized coatings on silicon steels are usually dull grey or patchy grey in colour with a rough finish, and may be brittle. Coating service life is proportional to the increased thickness and is unaffected by appearance, provided the coating is sound and continuous. In general, the thickness, adherence and appearance of galvanized coatings on silicon and phosphorous steels are outside the control the galvanizer. (See also 'Dull grey coatings', page 42.)

Double dipping or galvanizing a second time will not increase the thickness of a galvanized coating for reasons discussed under "Coating thickness" page 13, and may adversely affect coating appearance. The terms 'double dipping' and 'double-end dipping' are sometimes confused. Double-end dipping is a method of galvanizing articles too long for the available bath by immersing one end of the work at a time, as described on page 33.

Mechanical properties of galvanized steels

The galvanizing process has no effect on the mechanical properties of the structural steels commonly galvanized. **Strength and ductility** The mechanical properties of 19 structural steels from major industrial areas of the world were investigated before and after galvanizing

in a major 4-year research project by the BNF Metals Technology Centre, UK, under the sponsorship of International Lead Zinc Research Organisation. Included were steels to Australian Standard 1511 grade A specification, and British

Standard 4360 series steels. The published BNF report 'Galvanizing of structural steels and their weldments' ILZRO, 1975, concludes that '... the galvanizing process has no effect on the tensile, bend or impact properties of any of the structural steels investigated when these are galvanized in the "as manufactured" condition. Nor do even the highest strength versions exhibit hydrogen embrittlement following a typical pretreatment in inhibited HCl or H₂S0₄. 'Changes in mechanical properties attributable to the galvanizing process were detected only when the steel had been cold worked prior to galvanizing, but then only certain properties were affected. Thus the tensile strength, proof strength and tensile elongation of cold rolled steel were unaffected, except that the tensile elongation of 40% cold rolled steel tended to be increased by galvanizing. 1-t bends in many of the steels were embrittled by galvanizing, but galvanized 2-t and 3-t bends in all steels could be completely straightened without cracking.'

Embrittlement

For steel to be in an embrittled condition after galvanizing is rare. The occurrence of embrittlement depends on a combination of factors. Under certain conditions, some steels can lose their ductile properties and become embrittled. Several types of embrittlement may occur but of these only strain-age embrittlement is aggravated by galvanizing and similar processes. The following information is given as guidance in critical applications.

Susceptibility to strain-age embrittlement.

Strain-age embrittlement is caused by cold working of certain steels, mainly low carbon, followed by ageing at temperatures less than 600°C, or by warm working steels below 600°C. All structural steels may become embrittled to some extent. The extent of embrittlement depends on the amount of strain, time at ageing temperature, and steel composition, particularly nitrogen content. Elements that are known to tie up nitrogen in the form of nitrides are useful in limiting the effects of strain ageing. These elements include aluminium, vanadium, titanium, niobium, and boron.

Cold working such as punching

of holes, shearing and bending before galvanizing may lead to embrittlement of susceptible steels. Steels in thicknesses less than 3 mm are unlikely to be significantly affected. 600 750 900 1050 1200 0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 Grey Grey Silicon content of steel with asrolled finish % Zinc coating mass g/m² Partially bright Partially bright Semi lustrous Bright Grey Bright smooth Bright 1350 17

Hydrogen embrittlement.

Hydrogen can be absorbed into steel during acid pickling but is expelled rapidly at galvanizing temperatures and is not a problem with components free from internal stresses. Certain steels which have been cold worked and/or stressed during pickling can be affected by hydrogen embrittlement to the extent that cracking may occur before galvanizing.

The galvanizing process

involves immersion in a bath of molten zinc at about 450°C. The heat treatment effect of galvanizing can accelerate the onset of strain-age embrittlement in susceptible steels which have been cold worked. No other aspect of the galvanizing process is significant.

Recommendations to minimise embrittlement

Where possible, use a steel with low susceptibility to strain age embrittlement. Where

cold working is necessary the following limitations must be observed:

1 Punching. The limitations specified in AS 4100 and AS/NZS 4680 on the full-size punching of holes in structural members must be observed. Material of any thickness may be punched at least 3 mm undersize and then reamed, or be drilled. Good shop practice in relation to ratios of punched hole diameter to plate thickness, and punch/die diametral clearance to plate thickness should be observed. For static loading, holes may be punched full size in material up to 5600 mm thick where F_y is material yield stress up to 360MPa.

2 Shearing. Edges of steel sections greater than 16 mm thick subject to tensile loads should be machined or machine flame cut. Edges of sections up to 16 mm thick may be cut by shearing. Sheared edges to be bent during fabrication should have stress raising features such as burrs and flame gouges removed to a depth of at least 1.5 mm. Before bending, edges should be radiused over the full arc of the bend.

3 Bending. Susceptible steels should be bent over a smooth mandrel with a minimum radius 3 times material thickness. Where possible hot work at red heat. Cold bending is unlikely to affect steels less than 3 mm thick.

4 Critical applications. It is better to avoid cold work such as punching, shearing and bending of structural steels over 6 mm thick when the item will be galvanized and subsequently subjected to critical tensile stress. If cold working cannot be avoided a practical embrittlement test in accordance with ASTM A143 should be carried out. Where the consequences of failure are severe and cold work cannot be avoided, stress relieve at a minimum of 650°C before galvanizing. Ideally, in critical applications structural steel should be hot worked above 650°C in accordance with the steelmaker's recommendations.

5 Edge distances of holes. In accordance with Australian Standard 4100 'Steel structures' minimum edge distances from the centre of any bolt to the edge of a plate or the flange of a rolled section should be used. See page 39.

Fatigue strength

Research and practical experience shows that the fatigue strength of the steels most commonly galvanized is not significantly affected by galvanizing. The fatigue strength of certain steels, particularly silicon killed steels may be reduced, but any reduction is small when compared with the reductions which can occur from pitting corrosion attack on ungalvanized steels, and with the effects of welds. For practical purposes, where design life is based on the fatigue strength of welds, the effects of galvanizing can be ignored. Fatigue strength is reduced by the presence of notches and weld beads, regardless of the effects of processes involving a heating cycle such as galvanizing. Rapid cooling of hot work may induce microcracking, particularly in weld zones, producing a notch effect with consequent reductions in fatigue strength. In critical applications, specifications for the galvanizing of welded steel fabrications should call for air cooling rather than water quenching after galvanizing to avoid the possibility of microcracking and reductions in fatigue strength. (...)

Pliage des barres d'armature après la galvanisation



Corbec
Éric Michaud
14 février 2008

Pliage des barres d'armature après la galvanisation

Énoncé du problème

Le pliage à froid de barres d'armature et leur galvanisation subséquente engendrent des problèmes de fragilisation majeurs. La littérature sur le sujet pointe du doigt l'exposition à l'hydrogène et le traitement thermique que subissent les barres d'acier préalablement pliées lors du processus de galvanisation. Afin de valider ces informations, des essais ont été menés en usine, l'objectif étant de quantifier l'ampleur ainsi que la sévérité du phénomène. Les résultats de ces travaux sont présentés dans le document intitulé : « Étude du phénomène de fragilisation des barres d'armature pliées ».

En décembre dernier, lors d'une rencontre entre les responsables de la division des structures du MTQ et des représentants de la corporation Corbec, il a été entendu que la seule solution probable au problème de fragilisation était le pliage après la galvanisation. Cependant, le phénomène d'écaillage qui peut alors survenir lors du pliage de l'acier galvanisé doit être contrôlé afin d'éviter le pelage excessif du revêtement de zinc.

Objectif

Développer une méthode de galvanisation permettant d'obtenir des barres d'armature pouvant être pliées après la galvanisation. Les barres doivent être capables de subir un pliage de 180° à un diamètre de courbure de 6 fois le diamètre de la barre sans présenter d'écaillage sévère du revêtement de zinc.

Sommaire

Les méthodes de galvanisation classiques ne permettent pas d'obtenir de façon reproductible des barres d'armature pouvant être pliées après la galvanisation. Le taux de rejet dû au problème d'écaillage sévère est de l'ordre de 60%.

Par contre, dans le cas de la méthode de galvanisation spécialement développée pour les applications destinées à subir une transformation mécanique ultérieure, le taux de rejet dû au problème d'écaillage sévère est inférieur à 5%. En fait, la méthode développée permet d'obtenir de façon répétitive plus de 95% de pliage dont le revêtement de zinc demeure en bonne condition.

Méthodologie

Les essais de galvanisation ont été réalisés en usine à l'aide de barres d'armature en acier de calibre 15M nuance 400W fournies par la compagnie Armature Bois Franc (ABF). Le certificat d'essai de ce lot de barres est présenté à l'annexe 1.

Le pliage des barres d'acier a été effectué à l'aide d'un dispositif de pliage mis à la disposition de la Corporation Corbec par la compagnie Armaco. Une photographie de cette plieuse est présentée à l'annexe 2.

Suite à la galvanisation, des barres d'acier droites étaient sélectionnées aléatoirement parmi le lot de barres. Celles sélectionnées étaient coupées en sections de 120 centimètres (4 pieds) pour éventuellement être pliées à chaque extrémité.

Le pliage des barres est effectué de façon à obtenir un diamètre de pliage équivalent à 6 fois le diamètre de la barre. Dans notre cas où les barres ont 15 mm de diamètre, le diamètre de courbure doit alors être de 90 mm. La majorité des barres ont été pliées sur 180° puisqu'il s'agit du cas le plus sévère de pliage.

Les résultats relatifs à la résistance du revêtement de zinc suite au pliage qu'il avait subi ont été notés en caractérisant l'observation des pliages de la façon suivante :

- 1- Aucun écaillage et/ou fissures inférieures à 1 mm de largeur
- 2- Écaillage mineur et/ou fissures supérieures à 1 mm de largeur
- 3- Écaillage sévère généralisé

De plus, afin de vérifier la friabilité du revêtement de zinc, une brosse d'acier était passée manuellement sur la partie courbée des barres.



Résultats et observations

Les essais réalisés ont mené au développement d'une méthode de galvanisation permettant de minimiser le phénomène de pelage lors du pliage après galvanisation.

Les résultats du tableau 1 montrent les différences observées entre la méthode de galvanisation classique et la méthode de galvanisation élaborée pour les applications destinées au pliage ultérieur.

Tableau comparatif entre les méthodes de galvanisation

Méthode	Observations des défauts (%)				
	Test	Type 1	Type 2	Type 3	No Éch.
Classique	Test 19	9	16	75	46
Classique	Test 15	20	31	49	45
Classique	Test 13	18	30	52	50
Classique	Moyenne	16	26	59	
Pour pliage	Test 20	80	15	5	37
Pour pliage	Test 17	82	14	4	42
Pour pliage	Test 16	92	8	0	46
Pour pliage	Test 10	88	10	2	46
Pour pliage	Test 7	85	15	0	45
Pour pliage	Moyenne	85	12	2	

Type 1: Aucun écaillage et/ou fissures inférieures à 1 mm de largeur
 Type 2: Écaillage mineur et/ou fissures supérieures à 1 mm de largeur
 Type 3: Écaillage sévère généralisé

Graphique 1: Résultats, méthode classique vs méthode pour pliage



Photos 1 et 2 : Méthode de galvanisation traditionnelle

Elles montrent un défaut de type 3 soit : de l'écaillage sévère généralisé sur l'ensemble de la partie de la barre d'armature ayant été courbée. On retrouve de l'écaillage aussi bien à l'intérieur de la courbure, (photo 1), qu'à l'extérieur de la courbure, (photo 2). Ce type d'écaillage se détache complètement de la barre d'armature lors d'un simple brossage avec une brosse d'acier. L'épaisseur de la couche de zinc qui reste alors sur la barre d'acier est inférieure à la prescription de la norme ASTM applicable pour de l'acier d'armature.



Photo 1 : Méthode de galvanisation classique

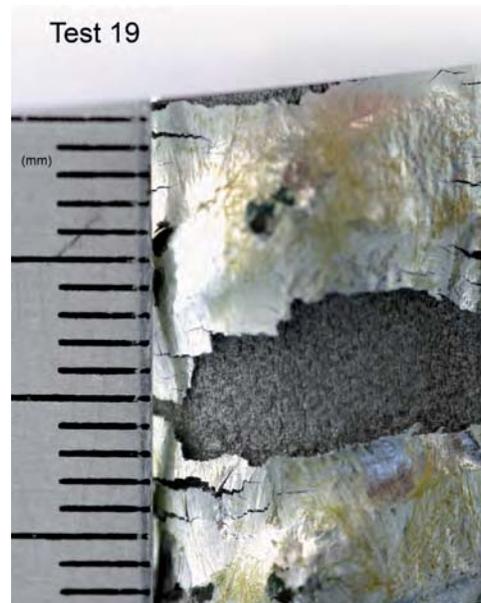


Photo 2 : Méthode de galvanisation classique

La photo 3 : Comparaison entre la méthode traditionnelle de galvanisation

Montre la comparaison entre une barre d'acier d'armature pliée obtenue par le procédé de galvanisation classique, (barre de gauche, test 19) et le procédé de galvanisation développé pour les matériaux destinés au pliage, (barre de droite, test 20). On remarque que la barre de droite ne présente pas de signe d'écaillage sévère. En fait, les essais menés en usine permettent d'obtenir de façon répétitive plus de 80% des pliages de cette qualité comparativement à seulement 16% lorsque la méthode de galvanisation classique est employée.

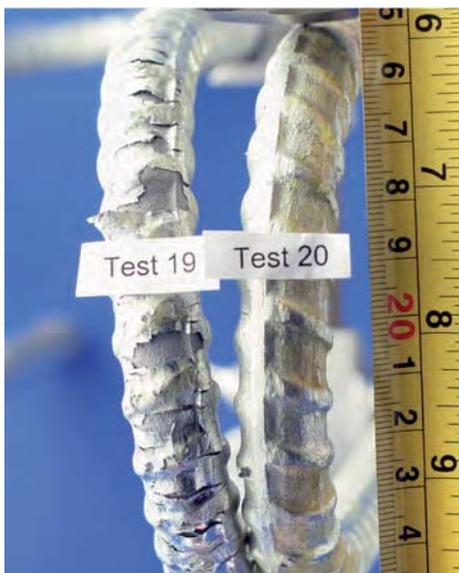


Photo 3 : Comparaison entre la méthode galvanisation classique, (test 19) et la méthode de galvanisation pour pliage (test 20).

La photo 4 présente un agrandissement des fissures de type 1.



Photo 4 : Fissures de type 1 sur barre produite par la méthode pour pliage.

Après pliage, les barres produites par la méthode de galvanisation pour pliage comptent la moitié moins de défauts de type 2, (Écaillage mineur et/ou fissures supérieures à 1 mm de largeur), que celles produites par méthode de galvanisation classique soit 12% contre 26% respectivement. La photo 5 montre un exemple d'écaillage mineur sur une barre d'armature produite par la méthode de galvanisation pour pliage.

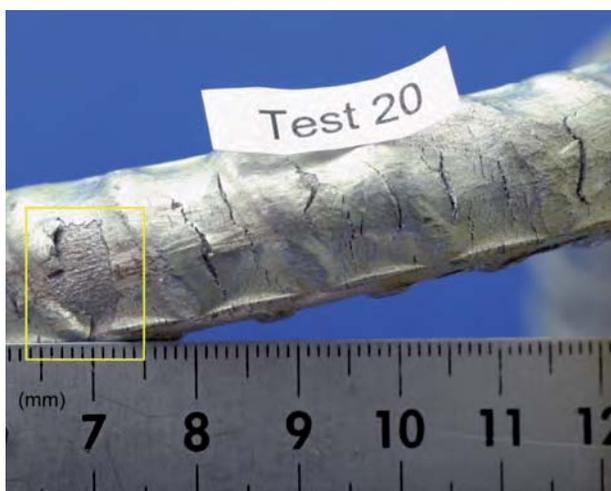


Photo 5 : Exemple de défaut de type 2, (Écaillage mineur et/ou fissures supérieures à 1 mm de largeur)

Le pliage de barres galvanisées à l'aide d'équipements mécaniques automatisés tels que le système utilisé pour réaliser les présents tests, (photo 7), peut provoquer l'écaillage de petites sections du revêtement de zinc dans la partie interne du rayon de courbure, voir photo 6. Ce type d'écaillage très localisé est causé par la friction entre le mandrin et la barre lors du pliage. Dans ces cas, l'écaillage ne fragilise pas le revêtement de zinc des surfaces adjacentes et laisse généralement une couche de zinc supérieure à 87 μm .

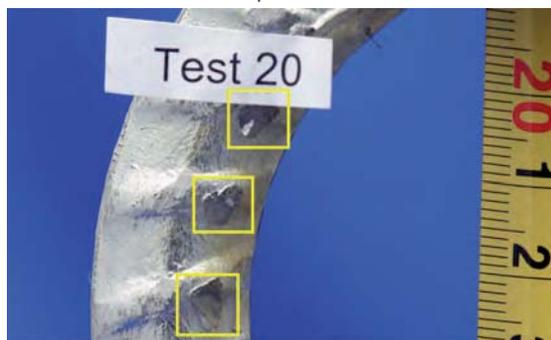
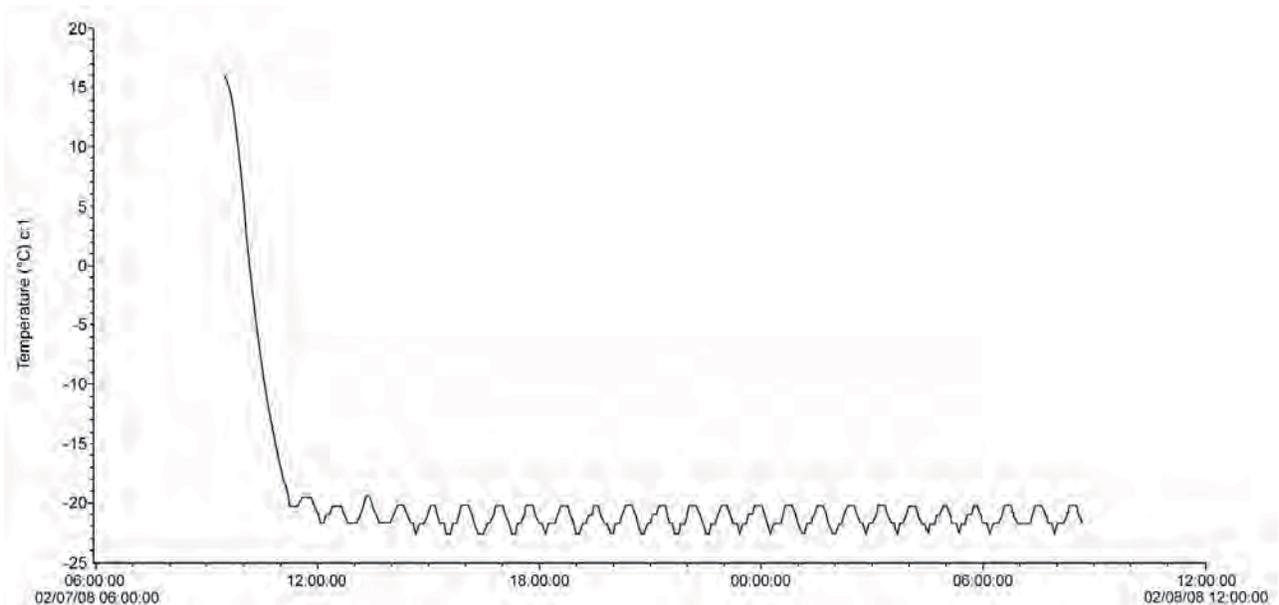


Photo 6 : Écaillage produit par le système de pliage

Considérant que les problèmes majeurs de fragilisation sont éliminés par le processus de pliage après galvanisation, les quelques problèmes d'écaillage qui ont affecté environ 2% des pliages effectués sur les barres galvanisées par la méthode pour pliage sont d'ordre secondaire. Les mesures réalisées démontrent que la surface de la barre après pelage de la couche externe de zinc a une épaisseur d'environ 30 à 50 µm combiné à la protection galvanique du zinc présent autour de la surface écaillée ; la protection contre la corrosion demeure encore présente et active.

L'ensemble des pliages effectués a été réalisé avec des barres dont la température au moment du pliage variait entre 10 et 20°C. Par contre dans le but de vérifier le comportement du revêtement de zinc sur des barres qui pourraient éventuellement être entreposées dans des conditions hivernales, des essais complémentaires ont été réalisés. Un échantillon de 15 barres pliées à 180° ne présentant que des défauts de type 1 a été soumis à une température de -20°C pendant 21 heures : graphique 2. Dès leur sortie du congélateur, les barres étaient pliées immédiatement. L'ensemble des 15 pliages réalisés sur les échantillons exposés au froid n'a présenté que des fissures de type 1. Donc comparables aux fissures observées pour les pliages effectués dans les conditions ambiantes. Ainsi, la température des barres au moment du pliage ne se révèle pas comme étant un facteur critique qui pourrait affecter négativement le comportement du revêtement de zinc lors du pliage.

Graphique 2: Température d'entreposage des barres d'armature avant le test de pliage à froid.



Conclusion

Cette étude avait pour objectif de mettre au point une méthode de galvanisation permettant d'obtenir des barres d'acier d'armature pouvant être pliées après la galvanisation tout en conservant un revêtement de zinc en bon état.

Les tests réalisés démontrent qu'en contrôlant certains paramètres clés, il est possible d'obtenir de façon répétitive des barres d'armature galvanisées qui auront les caractéristiques requises pour supporter un pliage de 180° ayant un diamètre de courbure de 6 fois le diamètre de la barre sans écaillage majeur du revêtement de zinc.

Discussion

Les expériences menées en usine au cours du mois de janvier dernier ont démontré que les problèmes de fragilisation peuvent affecter 15% des barres d'armature pliées avant la galvanisation lorsqu'elles sont soumises à des tests de dépliage¹, dans certains cas la fragilisation touche plus de 30% des barres soumises aux mêmes tests. Tandis que les barres galvanisées droites et pliées après la galvanisation se comportent comme des barres d'acier non galvanisées lorsqu'elles sont soumises à des tests de dépliage en présentant des taux de rupture quasi nuls. L'annexe 3 montre des exemples de dépliages.

Ainsi compte tenu que les problèmes d'écaillage peuvent être circonscrits en contrôlant adéquatement certains paramètres lors du processus de galvanisation, le pliage des barres d'armature après galvanisation s'avère une avenue appropriée pour obtenir des barres d'armature non fragilisées.

Note 1 : Selon les résultats de tests menés par Corbec en janvier 2008 : « Étude du phénomène de fragilisation des barres d'armature pliées ».

Annexe 1 : Certificat d'essai des barres utilisées pour l'expérience

Lamincoir Contrecoeur-Ouest Contrecoeur-Ouest Works		CERTIFICAT D'ESSAIS TEST CERTIFICATE				ArcelorMittal Mittal Canada Inc.											
COMMANDE SALES ORDER	BON DE COMMANDE DU CLIENT CUSTOMER'S ORDER NO.	DATE COMMANDÉE DATE ENTERED	No CERTIFICAT CERTIFICATE No	DATE EXPÉDITION DATE SHIPPED													
C39550	2137	2007/11/27	1016035	2007/12/07													
VENDU À - SOLD TO			EXPÉDIÉ À - SHIPPED TO														
ARMATURES BOIS-FRANCS INC. 249 Boul. Bonaventure Victoriaville QC CA G6T 1V5			10808101 ARMATURES BOIS-FRANCS INC. 249 Boul. Bonaventure Victoriaville QC CA G6T 1V5														
ARTI. ITEM	DESCRIPTION	No CAMPAGNE SCHEDULE No.	POIDS EXPÉDIÉ WEIGHT SHIPPED	COULÉE HEAT													
000001	ARMATURE CRENELEE 15M, 12000 MM CSA G30.18-M92 400W	C0028 No MATÉRIEL: MATERIAL No 10091137 No PIÈCE: PART No	35,469 KG CONNAISSMENT BILL OF LADING 86011810	M22187													
ANALYSE CHIMIQUE - CHEMICAL ANALYSIS																	
COULÉE HEAT	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	AlT	ALs	N2			
M22187	.26	1.19	.016	.027	.20	.32	.09	.10	.024	.019	.000	.002	.000	.0128			
COULÉE HEAT	Sn	Ti	B	Ca	Pb	As	Co	Sb	Te	Bi	Se	D.I.	C.E.				
M22187	.017	.000	.0004	.0012	.000	.009	.000	.007	-	-	-	1.22	.478				
ESSAI JOMINY - JOMINY TEST (HRC)																	
COULÉE HEAT	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J10	J12	J14	J16	J20	J24	J28	J32	J0
M22187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES - MECHANICAL PROPERTIES																	
COULÉE HEAT	L.E. Yield Strength ksi (MPa)	L.U. Ulti. Tens. Strength ksi (MPa)	% ALL ELONG.	Striction % Reduction Area	Dureté Hardness BHN (HRC)	Grosneur de Grain Grain size	Ratio Reduction Ratio										
M22187	(466.7 / 466.7)	(644.5 / 644.5)	17 / 18	-	-	-	-										
RÉSULTATS D'ESSAIS SPÉCIAUX - SPECIAL TEST RESULTS																	
COULÉE-HEAT	AUTRES ESSAIS - OTHER TEST		RÉSULTATS - RESULTS														
M22187	BEND TEST/PLIAGE : GOOD/CONFORME		CSA G30.18-M92														
<p>1 / 1</p> <p>Approuvé par : <i>Noé Béland</i> Approved by : Noé Béland</p> <p>COORDONATEUR Métallurgie A/D COORDINATOR Metallurgy and D/A</p>																	

LSP-35-49-10 (08-99)

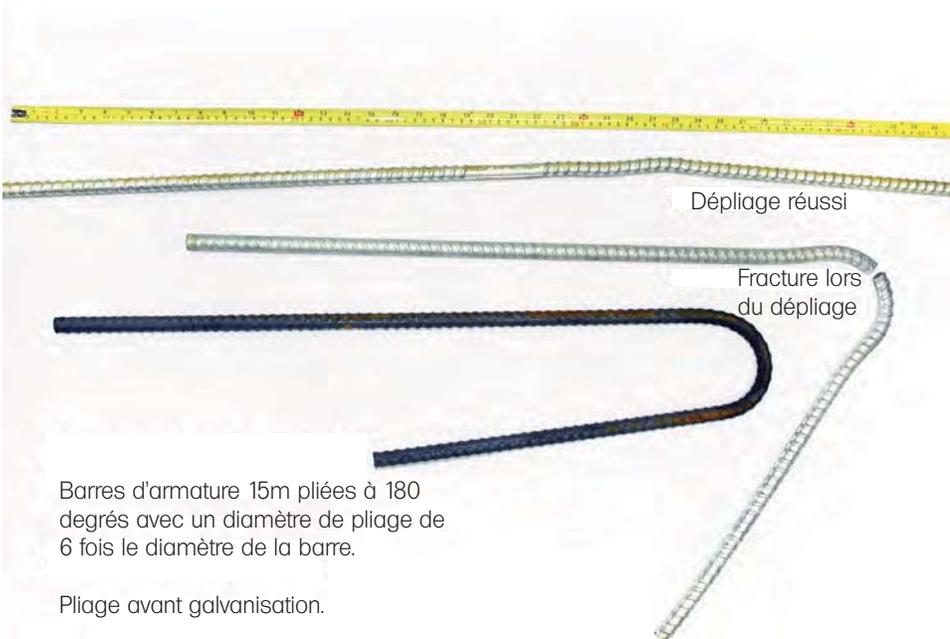


Annexe 2 : Système de pliage utilisé pour le pliage des barres d'armature.



Photo 7 : Système utilisé pour le pliage de barres d'armature.

Annexe 3 : Exemple obtenus lors des essais de dépliage



Armature pliée après la galvanisation (Document de support à l'intention des ferrailleurs)



Dans la note publiée le 21 avril dernier le MTQ recommande d'utiliser des barres d'armature pliées après galvanisation. Cette mesure vise à éliminer le problème de fragilisation de l'acier d'armature. Conscient qu'un certain nombre de barres peuvent présenter de l'écaillage, le MTQ tolère qu'une surface équivalente à l'aire de la section de la barre soit écaillée.

Le tableau 1 présente les principales situations rencontrées lorsqu'une barre d'acier galvanisé est soumise à un pliage.

Le tableau 2 donne l'aire maximale tolérée pouvant être écaillée en fonction du diamètre de la barre d'armature.

Corbec
Éric Michaud
19 août 2008

Tableau 1 : Exemples de réaction du revêtement de zinc lorsqu'il est soumis à un pliage

Description	Exemple photo	Action
<p>Réaction de type 1 :</p> <p>Aucun écaillage, présence de micro fendillement du revêtement de zinc généralement inférieure à 1mm de largeur. Le revêtement de zinc adhère toujours bien à la barre. Aucun détachement de particules de zinc sous l'action d'une brosse d'acier</p>		<p>Accepter la barre¹</p>
<p>Réaction de type 2 :</p> <p>Écaillage mineure et /ou fissures supérieures à 1mm de largeur.</p> <p>Le zinc en périphérie de la partie découverte adhère généralement bien à la barre d'acier</p>		<p>Accepter la barre si la partie découverte est inférieure à la surface de la section de la barre¹. Ex : 200mm² pour une barre 15M</p> <p>Rejet de la barre lorsque la partie découverte est supérieure à l'aire de la section de la barre</p>
<p>Réaction de type 3 :</p> <p>Écaillage sévère généralisé. Le revêtement de zinc se pèle facilement à la main ou sous l'action d'une brosse.</p>		<p>Rejet de la barre si la surface totale écaillée est supérieure à l'aire de la section de la barre. Il est possible que d'autres barres du même ballot présentent le même problème d'écaillage</p>

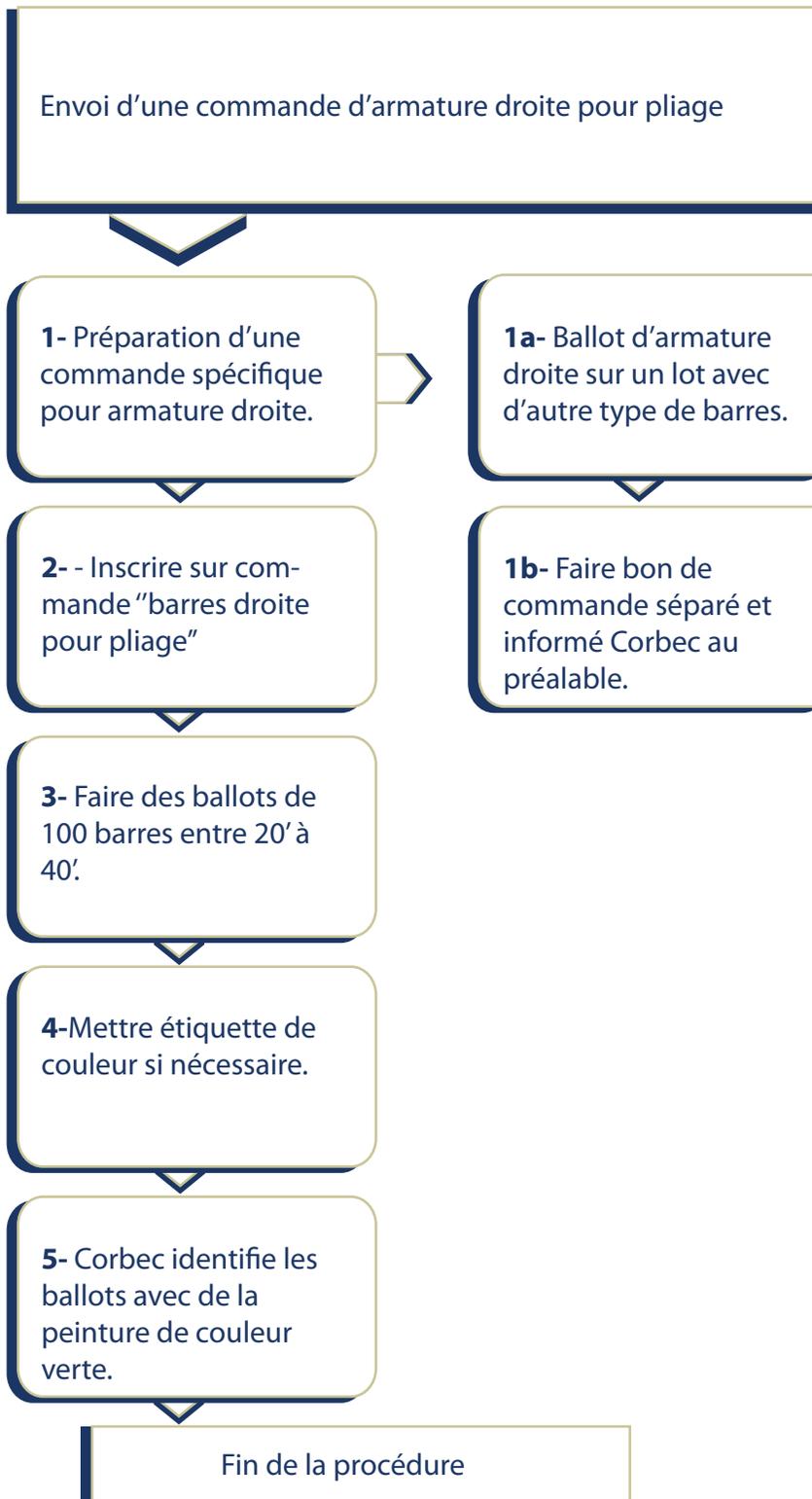
Note1 : La barre doit également être conforme aux autres exigences en vigueur tel la norme du MTQ intitulé « Acier d'armature pour le béton armé ».

Tableau 2 : Aire maximale tolérée pouvant être écaillée en fonction du diamètre de la barre d'armature.

Diamètre de la barre d'armature	Surface d'écaillage tolérée (mm ²)
10M	80
15M	200
20M	315
25M	490
30M	700
35M	960
45M	1600
55M	2375

Procédure d'expédition de l'armature droite pour pliage

Département : Service à la clientèle



Procédure d'expédition de l'armature droite pour pliage
 Département : Service à la clientèle

No	Titre de l'activité	Détails de l'activité	Responsable	Documents nécessaires	Enregistrements
1	Création d'un bordereau de livraison.	Le client doit préparé une commande uniquement pour un lot d'armature droite pour pliage.	Client	Delivery slip	
1a	Création d'un bordereau de livraison.	Un ou quelques ballots d'armature droite pour pliage sont envoyé avec d'autres types de barres.	Client	Delivery slip	
1b	Création d'un bordereau de livraison.	Client doit faire un bordereau séparé et identifié de façon claire les ballots pour pliage.	Client	Delivery slip	
2	Création d'un bordereau de livraison.	Le client doit inscrire sur son bordereau clairement "Barres d'armature droite pour pliage"	Client	Delivery slip	
3	Emballage	Les barres d'armature 15m et 20m doivent être empaqueter en ballot de 100 barres.	Client	N/A	
4	Emballage	Les barres d'armature pour pliage doivent avoir un étiquette de couleur si envoyé avec d'autres types de barres sur un même camion.	Client	N/A	
5	Emballage pour expédition	Après la galvanisation Corbec identifiera les ballots pour d'armature droite pour pliage avec de la peinture verte qui sera mit à chaque extrémité et au milieu.	Corbec	N/A	
6	Tableau pour # barres par grandeur	10M X 150 = 1413KG 15M X 100 = 1884KG 20M X 100 = 2826KG 25M X 50 = 2355KG 30M X 50 = 3297KG 35M X 25 = 4710KG 45M X 25 = 3532KG 55M X 25 = 5887KG			

Cette procédure a été réalisée en fonction des nouvelles directives établies par le MTQ concernant le pliage des barres d'armatures après la galvanisation.
 Prenez note que ce procédé sera en action à compter du lundi 5 Mai 2008.



DESTINATAIRE : Ingénieurs régionaux en structures (projets)

EXPÉDITEUR : Jean-Paul Gervais, ing.
Chef du service des matériaux d'infrastructures

DATE: 21 Avril, 2008

OBJECT: Fragilisation des barres d'armature pliées avant galvanisation destinées aux ouvrages en béton.

Suite à des cas de fragilisation de barres d'armature pliées avant galvanisation destinées aux ouvrages de béton, nous avons dû examiner différentes solutions afin d'éliminer définitivement ce problème. Lorsque des barres ou plaques en acier sont formées à froid et galvanisées à chaud par la suite, il peut se produire une fragilisation, causée par l'hydrogène lors du trempage des pièces dans l'acide et par le traitement thermique au moment du trempage dans le bain de zinc. Ce phénomène ne se produit pas lorsqu'on plie les barres après galvanisation. Nous avons donc modifié la méthode de galvanisation en collaboration avec un galvaniseur de façon à éviter ou réduire considérablement l'écaillage du revêtement lors du pliage.

Suite aux résultats obtenus de l'expérimentation réalisée chez ce galvaniseur, où ont assisté des représentants de la Direction des structures et du Service des matériaux d'infrastructures, il s'avère que cette nouvelle façon de faire est concluante.

Étant donné que pour un certain pourcentage de barres, il y aura un écaillage partiel du revêtement au niveau du rayon de pliage, nous devons spécifier une surface maximale d'écaillage (c'est-à-dire décollement de la couche extérieure de zinc soit par brossage ou par l'utilisation d'un outil pointu comme un couteau).

Les barres étant coupées après galvanisation, et par conséquent non protégées, nous suggérons de spécifier que la surface totale maximale acceptable d'écaillage au niveau du rayon de pliage soit du même ordre, c'est-à-dire équivalent à la section transversale d'une barre. Cette spécification sera ajoutée à la norme 5101 tome VII des normes lors de sa prochaine révision annuelle.

Les barres étant coupées après galvanisation, et par conséquent non protégées, nous suggérons de spécifier que la surface totale maximale acceptable d'écaillage au niveau du rayon de pliage soit du même ordre, c'est-à-dire équivalent à la section transversale d'une barre. Cette spécification sera ajoutée à la norme 5101 tome VII des normes lors de sa prochaine révision annuelle. Toutefois, afin d'éviter d'éventuels problèmes de fragilisation pour la saison en cours, nous vous suggérons fortement d'appliquer immédiatement ce changement, en spécifiant à l'entrepreneur d'utiliser des barres pliées après galvanisation, tout en mentionnant la surface totale maximale acceptable d'écaillage du revêtement, par pliage, soit par exemple :

- 200 mm² pour une barre 15M;
- 300 mm² pour une barre 20M.

Ces modifications apportées aux termes d'un contrat liant le MTO et un entrepreneur n'ont pas d'impact financier. Mentionnons tout de même que le sous-traitant chargé de fabriquer l'armature n'aura plus à refaire ses paquets d'armature suite à la galvanisation, ce qui représente en soi un gain appréciable pour lui.

Nous vous saurions gré de faire suivre cette lettre à vos concepteurs et surveillants, qu'ils soient employés du Ministère ou mandataire, afin qu'ils puissent y donner suite dans les meilleurs délais.

Nous demeurons à votre disposition et vous remercions de votre collaboration.

Jean-Paul Gervais, ing
Chef du service des matériaux d'infrastructures
2700, rue Einstein
Québec, Qc.

cc. Guy Richard, ing. M. Sc. A.
Directeur, Direction des structures

Claude Tremblay, ing.
Directeur, Direction du laboratoire des chaussées

Gérard Desgagné, ing. M. Sc.
Chef du Service de la conception

Denis Bérubé, ing.
Service de l'entretien

Donald Villeneuve, ing.
Service des matériaux d'infrastructures

Directeurs territoriaux





www.corbecalv.com



Corbec

9960, Côte-de-Liesse, suite 201

Lachine, Qc

H9T 1A1

Tél. : 514-364-4000 Télécopieur : 514-365-9222 Sans frais : 1 800 463-8313

GALVANISE L'EXCELLENCE DEPUIS... 1965