



## abstracts — résumés

### **STUDY OF THE PERFORMANCE OF FRP REINFORCING BARS SUBJECTED TO EXTREME CONDITIONS OF APPLICATION**

MATHIEU ROBERT, PATRICE COUSIN, BRAHIM BENMOKRANE

*Fibre-reinforced polymer (FRP) materials have emerged as a practical alternative material for producing reinforcing bars for concrete structures. This is due to their relatively low cost-to-performance ratio and noncorrosive nature compared to traditional steel reinforcing bars. In addition, FRP materials exhibit properties, such as high tensile strength, that make them suitable for use as structural reinforcement. However, their durability in an alkaline environment is still of concern and factors that can affect the long-term behaviour of GFRP materials have to be investigated. Moisture, high pH of surrounding environment, extreme temperature and the presence of micro cracks can affect the long-term properties of FRP reinforcing bars. This paper summarizes the long-term durability study of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) reinforcing bars subjected to different conditionings simulating the real environment of application. In particular, the behaviour of GFRP bars subjected moisture, high pH of moist concrete, extreme temperatures, and to tensile prestress was investigated showing the great durability of GFRP reinforcing bars.*

**KEYWORDS:** FRP, composites materials, reinforcement, concrete, high temperature, absorption, mechanical properties, rate of reaction, prediction model.

### **PERFORMANCE DES ARMATURES COMPOSITES DE PRF SOUMISES À DES ENVIRONNEMENTS D'APPLICATION EXTRÊMES**

Les matériaux polymères renforcés de fibres (PRF) sont de plus en plus utilisés dans les ouvrages du génie civil à cause de leurs nombreux avantages par rapport à l'acier d'armature. Toutefois, certaines conditions d'application peuvent potentiellement affecter leur durabilité, rendant cruciales les études exhaustives de leur comportement à long terme pour permettre leur plein développement. Les solutions aqueuses, l'alcalinité du milieu environnant, la température d'application et l'état des barres sont tous des paramètres pouvant compromettre les propriétés à long terme des barres d'armature en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV), de carbone (PRFC) ou d'aramide (PRFA). Le présent article synthèse présente l'étude de la durabilité à long terme de barres de PRFV soumis à des vieillissements accélérés en laboratoire simulant la réalité. Le comportement de barres de PRFV face à l'humidité, à l'alcalinité du béton humide, aux températures extrêmes et aux chargements en traction ont été investigués, montrant la bonne durabilité des composites de PRFV pour des applications en génie civil.

**MOTS-CLÉS :** PRF, composites, durabilité, armature, béton, température, absorption, propriétés mécaniques, taux de réaction, modèle de prédiction.

### **POTENTIAL POUZZOLANICITY OF GLASS CULLET FINES AND AGGREGATES**

RACHIDA IDIR, MARTIN CYR, AREZKI TAGNIT-HAMOU

*Mixed glasses of different colors are economically difficult to reuse for the fabrication of new glass products but their use in cement-based materials is a promising way to recycle this material. This paper deals with the pouzzollanique activity of mixed glass cullet, by evaluating the pouzzollanique behavior of a large range of glass particle sizes, from less than 40  $\mu\text{m}$  (540  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) up to 2.5 mm (2.2  $\text{m}^2/\text{kg}$ ). Five different classes of glass are assessed separately, in terms of compressive strength tests on mortars, consumption of lime (TG), morphology (SEM) and composition of hydrates (EDX and X-ray fluorescence).*

*The results show that the pouzzollanique activity increases with glass fineness and that, compared to a reference material without glass, equivalent or superior compressive strength can be obtained when using up to 40% of glass of 540  $\text{m}^2/\text{kg}$  fineness. Transition fineness around 30  $\text{m}^2/\text{kg}$  (140  $\mu\text{m}$ ) is highlighted, for which the pouzzollanique activity becomes substantial. However, a slight but significant pouzzollanique activity is detected for coarse particles (>1 mm), as confirmed by the consumption of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , the formation of C-S-H-like hydrates and an increase of 10% (5 MPa) in the compressive strength compared to an inert admixture.*

**KEYWORDS:** recycled glass; glass powder; glass aggregate; pouzzolane; pouzzollanique reaction; alkali-silica reaction

### **PROPRIÉTÉS POUZZOLANIQUES DES FINES ET DES GRANULATS DE VERRE DE RECYCLAGE**

Le recyclage du verre mixte contenant plusieurs couleurs pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons. Néanmoins, il est nécessaire de gérer les deux principaux comportements que peut avoir ce verre lorsqu'il est mis en contact avec une matrice cimentaire, à savoir :

- un comportement néfaste associé à la réaction alcali-silice, si le verre est utilisé sous la forme de grosses particules ;
- un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzollanique, si le verre est utilisé sous la forme de fines particules.

Cet article traite de l'utilisation du verre mixte en remplacement de ciment qui présente une alternative aux voies de recyclage déjà existantes. Il évalue le comportement pouzzollanique du verre de recyclage d'une large gamme de tailles de particules de verre, de la classe la plus fine (< 41 $\mu\text{m}$ ) jusqu'aux particules les plus grossières de taille 2.5-5mm. Cinq différentes classes de verre ont été évaluées séparément, en termes de tests de résistance à la compression sur mortiers, de consommation de chaux (ATG), de morphologie (MEB) et de composition des hydrates (EDS et fluorescence X).

Les résultats montrent que :

- Le verre de recyclage présente une activité pouzzollanique qui augmente avec la finesse de ses particules.



- Par rapport au témoin sans verre, des résistances équivalentes ou même supérieures peuvent être obtenus en utilisant jusqu'à 40% du verre d'une finesse 540 m<sup>2</sup>/kg
- Des indices d'activité pouzzollanique supérieurs à 90% peuvent être obtenus après:
  - 7 jours de cure pour 10% de verre, quelle que soit la finesse du verre;
  - 90 jours de cure pour 20% de verre, uniquement lorsque la surface spécifique est supérieure à 200 m<sup>2</sup>/kg.
- Une finesse de transition d'environ 30 m<sup>2</sup>/kg (140 µm) est mise en évidence, pour laquelle l'activité pouzzollanique devient importante.
- Une légère mais significative activité pouzzollanique est détectée pour les grosses particules (> 140 µm), confirmée par une consommation de Ca(OH)<sub>2</sub>, la formation de C-S-H et un accroissement de 10% (5MPa) de la résistance à la compression comparé un à ajout inerte.
- Toutefois, la possible alcali-réactivité de ces particules devrait être prise en compte, car la RAS a été détectée pour les particules dont la surface spécifique est inférieure à 4,5 m<sup>2</sup>/kg.
- La composition des néoformations dépend de la cinétique de la réaction et de la disponibilité du calcium et des alcalins en un endroit donné et à un âge donné. Le déficit des alcalins par rapport au calcium conduit à des hydrates de faible (N+K)/S (fort C/S) ayant une composition proche de C-S-H, tandis que l'inverse pourrait favoriser des rapports (N+K)/S élevé, typique des gels de RAS.

**MOTS-CLÉS :** verre de recyclage; poudre de verre; granulats de verre; pouzzolane; réaction pouzzollanique; réaction alcali-silice.

#### **BASIC OXYGEN FURNACE SLAG (BOF SLAG): CHARACTERIZATION AND EVOLUTIVITY**

ESSIA BELHADJ, CÉCILE DILIBERTO, ANDRÉ LECOMTE

*Basic oxygen furnace slag (BOF slag) are by-products of the conversion of pig iron to steel. According to the high quantities produced, they are a valuable mineral resource for the construction, in form of aggregates or additions in certain hydraulic binders. However, they have chemical properties that directly control their stability or any hydraulic potential (free lime, etc...). A good knowledge of physico-chemical properties of BOF slag is a necessary preliminary step to their valorization. This work proposes a comprehensive methodology for the characterization of steel slag by complementary analytical techniques (XRF, XRD, TGA ...). Its application to a variety of BOF slag shows that they essentially contain C<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>F, Ca(OH)<sub>2</sub>, Fe<sub>1-x</sub>O, CaO. CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and MgO are also detected in few quantities. But this composition may change by hydration and carbonation, these two reactions are related to storage temperature and humidity.*

**KEYWORDS:** BOF Slag, chemical composition, valorisation, building material, free lime

#### **LAITIERS D'ACIÉRIE DE CONVERSION : CARACTÉRISATION ET ÉVOLUTIVITÉ**

Les laitiers de convertisseurs à oxygène ou BOF slag (Basic Oxygen furnace) sont des co-produits de l'industrie sidérurgique. Suivant la nuance d'acier produite, 100 à 200Kg de BOF slag sont générés par tonne d'acier [MAH, 08]. En 2005, 1,2 millions de tonnes ont été produites en France. Le principe de la conversion de la fonte en acier est de réduire la teneur en carbone par soufflage d'oxygène. Au cours de ce procédé, de la chaux est introduite dans le convertisseur pour fixer les éléments indésirables contenus dans la fonte et pour protéger les briques

réfractaires du four. A la fin de la conversion, les BOF slag sont séparés de l'acier par gravimétrie.

Les laitiers d'aciérie sont peu exploités ; l'agriculture en consomme une faible partie en amendement agricole pour neutraliser l'acidité du sol. Mais la plus importante utilisation des BOF slag concerne le domaine des techniques routières, comme granulats, puisqu'ils possèdent une bonne résistance mécanique et leur coût est peu élevé [MOT, 01]. Malheureusement cette utilisation a été restreinte durant les dernières années à cause de l'expansion volumique des BOF slags due à l'hydratation de l'oxyde de calcium contenu dans ces matériaux [CAI, 00].

Grâce à leur composition chimique proche de celle des ciments Portland, la valorisation des BOF slag dans les liants hydrauliques est envisageable. Cette valorisation aura un impact environnemental en préservant les ressources naturelles et en limitant l'émission de CO<sub>2</sub> due à la clinkérisation. Cependant, ces matériaux ont des propriétés hydrauliques faibles en raison de la différence minéralogique par rapport au ciment Portland, notamment l'absence de silicate tricalcique et la forte teneur en oxyde de fer [Mur, 97]. En effet, la wüstite (Fe<sub>1-x</sub>O) qui est une des phases principales des BOF slag ne réagit pas au contact de l'eau. D'autre part leur utilisation peut être limitée en raison de leur forte évolutivité. En effet, l'oxyde de calcium contenu dans ces matériaux réagit facilement avec l'humidité de l'air pour donner de la chaux éteinte Ca(OH)<sub>2</sub>, qui elle-même se carbonate au contact du CO<sub>2</sub> ambiant en formant de la calcite CaCO<sub>3</sub>. De ce fait, la teneur en CaO diminue au cours du temps ce qui peut ralentir la réactivité de ces matériaux.

La valorisation des BOF slag demande au préalable une caractérisation physico-chimique approfondie, afin d'avoir une bonne connaissance de leur composition chimique et de trouver le meilleur moyen de les valoriser. La plupart des travaux de recherche publiés sur ce sujet portent sur la caractérisation qualitative des BOF slag et sur la quantification de leur teneur en chaux, suite au problème de gonflement. Cependant, la quantification et l'identification des propriétés des autres phases (C<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>F, etc.) sont aussi un atout pour l'utilisation des BOF slag que ce soit sous forme d'agrégats ou d'un constituant à part entière du ciment.

Ce travail concerne la caractérisation chimique et physique de différents laitiers d'aciérie (fraîches et vieilles productions). Différentes méthodes d'analyse qualitatives et quantitatives de ces matériaux ont été développées. Les compositions massique et minéralogique ont été déterminées par fluorescence X et diffraction des rayons X. L'arrangement des phases au sein des grains a été observé à la microsonde de castaing couplée avec des analyses EDS afin d'identifier les compositions élémentaires de chaque phase ainsi que les impuretés qu'elles peuvent renfermer. La teneur en chaux libre est déterminée par un dosage acido-basique complété par des analyses thermogravimétriques afin de différencier les teneurs respectives en Ca(OH)<sub>2</sub> et en CaO. La teneur en CaCO<sub>3</sub> a été déterminée également par cette technique. Des dosages chimiques et des extractions sélectives ont permis de compléter la quantification des phases minérales. Les propriétés physiques ont été étudiées sur une poudre de granulométrie 0/0,125 mm. La surface spécifique a été déterminée par le test Blaine selon la norme EN 196-6. La masse volumique absolue a été mesurée par pesée hydrostatique dans un liquide non réactif. L'évolutivité de ces matériaux a été suivie par dosages des phases CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> et CaCO<sub>3</sub> sur des BOF slag de teneurs initiales en chaux variables et de conditions de conservation différentes.

**MOTS-CLÉS :** Laitiers de conversion, matériaux de construction, valorisation, chaux libre, carbonatation

### **USE OF SHAPE MEMORY ALLOY WIRES FOR THE CREATION OF PRESTRESS STATES IN CONCRETE BEAMS**

HANH TRAN, ALEKSANDRA DEBSKA, XAVIER BALANDRAUD, JEAN-FRANÇOIS DESTREBECQ

*The study deals with the use of shape memory alloys (SMAs) to create prestress states in concrete prismatic beams. Nickel-titanium SMA wires with suitable transformation temperatures are used to this purpose. The wires are first stretched in a martensitic state at ambient temperature. Then they are placed onto the surface of the beams. A thermal cycle is applied to transform the martensite to austenite, in order to activate the shape memory effect in the wires. The strain evolution in the concrete beams is measured with strain gauges. A prestress effect is clearly observed in the beams during the procedure until cooling down to ambient temperature. The influence of the initial stretch of the wires and the transformation temperatures is discussed.*

**KEYWORDS:** shape-memory alloy, nickel-titanium, concrete, prestress.

### **UTILISATION DE FILS EN ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME POUR LA CRÉATION DE PRÉCONTRAINTES DANS LES POUTRELLES EN BÉTON**

L'étude traite de l'utilisation de fils d'alliages à mémoire de forme (AMF) pour créer des états de précontraintes dans des poutrelles en béton. Le principe consiste à étirer des fils AMF à l'état martensitique à température ambiante avant de les fixer solidement sur les poutrelles. L'effet mémoire est ensuite activé par élévation de la température de manière à provoquer le retour des fils à l'état austénitique. Cette transformation en déformation gênée provoque l'apparition d'une force de traction dans les fils qui agit comme une force de précontrainte. Cette force est évaluée pour chaque poutrelle testée à partir de la courbure induite, déduite de mesures par jauges extensométriques. Les essais réalisés ont permis de décrire le processus de développement de la force de précontrainte durant la phase d'activation de l'effet mémoire. L'intensité de la force obtenue dépend du nombre de fils et de la pré déformation donnée aux fils à l'état martensitique. Il est mis en évidence que la force finale de précontrainte après retour à température ambiante est bornée par la valeur atteinte pour une valeur particulière de la prédéformation. L'examen de la relation entre la prédéformation et la courbure induite à température ambiante par l'effet de précontrainte indique que l'effet qui limite la force de précontrainte dans les fils résulte d'une production partielle de martensite lors du refroidissement, mais que cet effet n'est pas affecté par le nombre des fils fixés à la poutrelle. Ces résultats montrent que le choix des températures de transformation est un point clé pour assurer la permanence de la précontrainte et éviter les pertes en cas de baisse de température. En conclusion, la présente étude démontre la possibilité d'induire des états de précontrainte dans des poutrelles en béton à l'aide de fils en AMF. Si le coût élevé des alliages Nickel-Titane peut sembler a priori un obstacle à leur utilisation pour la création de précontraintes dans des composants en béton, l'activation de l'effet mémoire par simple élévation de température constitue un avantage par rapport aux procédés classiques de précontrainte. Il existe par ailleurs des AMF à base fer avec des performances moindres que celles des Nickel-Titane, mais de coût mieux adapté à des applications industrielles. Un champ possible d'application pourrait être l'utilisation d'AMF comme méthode alternative de précontrainte pour l'amélioration du comportement ou le renforcement de structures existantes.

**MOTS-CLÉS :** alliage à mémoire de forme, Ni-Ti, béton, précontrainte

### **CONCRETE RENOVATION EFFECTIVE DEEP HYDRO IMPREGNATIONS - FIELD EXPERIMENTS**

MICHEL DONADIO

*Deeply penetrating hydrophobic impregnations can help to increase the design life of a civil engineering structure, by providing an effective chloride barrier. Although its efficiency is somewhat reduced if cracking occurs after the treatment, a considerable reduction in chloride penetration is still achieved. They are also efficient for ASR mitigation. Results from field experiments show the positive return on investment when using these types of deeply penetrating hydrophobic impregnation. However, lower active content formulations have a tendency for the active ingredient to remain at the surface and quickly lose efficiency when subjected to weathering. Therefore the right type of product must be selected for each project (e.g. for civil engineering structures subjected freeze and thaw cycles, product satisfying the class II penetration depth of EN 1504-2 shall be selected).*

### **RÉNOVATION DES BÉTONS EFFICACITÉ DES IMPRÉGNATIONS HYDROFUGES À HAUT POUVOIR DE PÉNÉTRATION RÉSULTATS SUR SITE**

Les imprégnations hydrophobes à haut pouvoir de pénétration peuvent contribuer à augmenter la durée de service d'une structure de génie civil en fournissant une barrière efficace à la pénétration des chlorures et autres agents agressifs solubles dans l'eau. Des résultats sur site montrent l'efficacité de ce type d'imprégnation hydrophobe en particulier pour lutter contre les problèmes de corrosion et d'alcali réaction. Toutefois, les produits ayant un faible taux de matière active ont tendance à rester en surface du béton et à perdre rapidement leur efficacité quant ils sont soumis aux intempéries.

De ce fait, le type de produit le plus approprié doit être sélectionné en fonction des particularités de chaque projet; des essais préliminaires devant être réalisés pour déterminer la consommation requise pour obtenir une pénétration donnée. Par exemple, pour un pont en béton armé soumis aux cycles gel dégel et sels de déverglaçage, le produit sélectionné doit satisfaire les essais de gel/dégel et être de classe II (pénétration >10 mm) suivant la norme NF EN 1504-2.

### **MINERAL FOAMS WITH IMPROVED PERFORMANCES**

C. BAUX, C. LANOS, A. PHELIPOT-MARDELÉ

*Mineral foam materials represent an alternative to fibrous lightweight products that are to be reconsidered. Following a reminder of the conditions of foam formation in fluid environments we review different foam production systems and provide details concerning gypsum foams. Several types of gypsum foams are achieved by modifying formulation parameters and production conditions. Thermal and mechanical performances of these gypsum foams are then assessed and compared to the ones obtained for cellular and hemp concrete. Physical properties of these foams are analyzed (including pore size, membrane thickness and bubbles connectivity). Relevant results allow the identification of several optimal conditions necessary to mineral foam formation applicable to other mineral binder types.*

**KEYWORDS:** gypsum foam, density, mechanical strength, thermal conductivity.

## MOUSSES MINÉRALES À PERFORMANCES OPTIMISÉES

Les techniques d'isolation de bâtiments anciens par l'extérieur par des systèmes autoporteurs ou la constitution de parois monocouches thermiquement performantes imposent le développement de matériaux présentant un bon compromis entre performances mécaniques et performances thermiques. L'évolution du contexte réglementaire visant à réduire l'utilisation de certains composés fibreux minéraux (fibre de roche, laine de verre) et composés polymères (résines polyester, polyuréthane) doit également être prise en compte lors de la conception d'un système novateur.

Outre les éco-matériaux tels que les bétons de chanvre, de roseau, de lin, de bois le développement de mousses minérales constitue une alternative qu'il convient de reconsidérer.

L'occlusion d'une bulle gazeuse dans une matrice minérale repose sur un équilibre entre la fluidité du mélange lors de sa réalisation, la tension de surface, l'état de pression, la masse volumique. Les principes physiques conduisant à la formation de telles structures sont rappelés.

Dans un deuxième temps différents systèmes de production de mousses minérales sont passés en revue. Dans de tels systèmes, le caractère alvéolaire des mélanges minéraux est obtenu à l'état fluide en induisant la production d'un gaz, en obtenant la stabilisation par un tensio-actif, en modifiant l'occlusion d'air...

Trois modes de production de mousses alvéolaires sont ensuite comparés. Ils sont appliqués au cas du gypse. La connectivité des bulles, les conditions de cristallisation et d'orientation de la matrice minérale sont étudiées.

Des mousses de gypse de masses volumiques variables (entre 250 et 1500 kg/m<sup>3</sup>) sont ensuite produites en utilisant différents agents porogènes et tensio-actifs et en modifiant leur formulation (ratio eau/liant, adjuvant/liant). Les performances mécaniques et thermiques de ces mousses minérales sont évaluées et comparées à celles obtenues sur des matériaux alvéolaires plus complexes à produire (béton cellulaire, béton mousse) ou à celles d'éco-matériaux. Les performances obtenues s'avèrent très pertinentes montrant tout l'intérêt du développement de tels matériaux avec un mode de production compatible avec une formulation limitant l'eau de gâchage et aboutissant à une matrice à performances mécaniques optimisées.

**MOTS-CLÉS :** mousse de gypse, densité, résistance mécanique, conductivité thermique.

## BIOPOLYMERS: A NEW WAY FOR THE PROTECTION OF CONCRETE STEEL REINFORCEMENTS

FEUGEAS FRANÇOISE, ROUX SÉBASTIEN, BUR NICOLAS, TRIBOLLET BERNARD

*The aim of this study is to evaluate an admixture whose active component is an eco-respectful biopolymer having steel corrosion inhibiting properties. Many means of concrete steel reinforcements protection against corrosion are on the market, but few of them are eco-friendly. This study has an environmental stake for the sustainable development of concrete structures improving their aging resistance and using eco-friendly products. Bacteria (*Lactobacillus reuteri*) allow the production of a biopolymer called EPS 180 whose presence as admixture in concrete will improve their eco-friendly quality regarding: (i) their production using eco-respectful products like biopolymers and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS for CEM V). Actually, corrosion of rebars is a frequent pathology of civil engineering works against which the means are generally not satisfying the environmental criteria. The biopolymers, produced by bacteria of milk, are harmful for human beings and a little*

*quantity of biopolymers is used for the tested admixture. The samples were manufactured using 2 cement bases including a CEM V that is more eco-friendly than traditional CEM I because containing industrial byproducts. Capillary imbibition tests and water total porosity showed the low influence of the admixture on the pore structure of mortars. After immersion in natural seawater of cement pastes reinforced with steel C15 rebars, electrochemical measurements showed that the biopolymer does not affect the free corrosion potential of reinforcement nor the composition of passive layer but inhibits the reaction cathodic reduction of oxygen.*

## UTILISATION DE SUBSTANCES EXTRACELLULAIRES POLYMÉRIQUES COMME INHIBITEURS DE CORROSION DES ARMATURES EN BÉTON

L'objectif de cette étude est d'évaluer un adjuvant dont le principe actif est un biopolymère écorespectueux aux propriétés inhibitrices de corrosion des aciers. Différents moyens de lutte contre la corrosion des armatures des bétons armés sont disponibles sur le marché mais bon nombre d'entre eux ne peuvent pas être considérés comme écorespectueux. L'enjeu de cette étude est le développement durable des ouvrages en béton armé par l'amélioration de leur résistance au vieillissement et par l'utilisation de produits éco-respectueux. Des bactéries (*Lactobacillus reuteri*) sont utilisées pour la fabrication d'un biopolymère appelé EPS 180 dont l'utilisation comme adjuvant dans les bétons va permettre de les rendre plus éco-respectueux dans la mesure où : (i) leurs armatures sont protégées de la corrosion, (ii) ils sont fabriqués avec des produits éco-respectueux comme les biopolymères et les laitiers de haut fourneaux (CEM V). La corrosion des armatures est en effet une pathologie fréquente des ouvrages de génie civil pour laquelle les moyens de lutte ne sont généralement pas satisfaisants sur le plan environnemental. Les biopolymères, fabriqués à partir de substances extrapolymeriques issues de bactéries du lait, sont sans danger pour l'homme et une très petite quantité de ces produits permet d'obtenir l'adjuvant testé. Des échantillons ont été réalisés à partir de deux nuances cimentaires, le traditionnel CEM I et un CEM V, plus écorespectueux car contenant des sous-produits industriels. Des essais d'imbibitions capillaires et de porosité totale à l'eau ont montré la faible influence de l'adjuvant aux biopolymères sur la structure poreuse des mortiers. Après immersion en eau de mer naturelle de pâtes de ciment renforcées d'armature en acier C15, des mesures électrochimiques ont montré que ce biopolymère n'influence pas le potentiel libre de corrosion des armatures ni la composition de leur couche passive mais inhibe de la réaction cathodique de réduction de l'oxygène.

## RELIABILITY ANALYSIS OF STAINLESS STEEL COVER PLATE JOINTS

J. AVERSENG, A. BOUCHAÏR, A. CHATEAUNEUF

*Stainless steel becomes more and more important in construction, particularly due to its highly ductility and strain hardening capacity. However, an experimental study on cover-plate joints conducted at the LaMI revealed some limits of actual design rules (EN1993-1-4), especially when considering complex failure modes, such as bearing, that involve large deformations. In this study, a non-linear finite element model reproducing the complex behaviour of cover plate joints is used to distinguish the major parameters influencing the behaviour of these joints. A meta-model based on the quadratic response surface method is built from a large set of results and exploited through a reliability approach allowing to quantify the impacts of the different parameters. The objectives are to assess and enrich the available*

*calculation methods for stainless steel joints in the objective of reliability level of Eurocodes.*

**KEYWORDS:** *stainless steel, joint, bearing, finite elements, reliability.*

### **ANALYSE FIABILISTE D'ASSEMBLAGES COUVRE-JOINT EN ACIER INOXYDABLE**

Les aciers inoxydables sont amenés à jouer un rôle de plus en plus important dans le domaine de la construction. Ils présentent en effet de nombreux points forts, parmi lesquels une grande ductilité et un grand potentiel d'écrouissage permettant une dissipation significative d'énergie sous chargements cycliques, sous chocs, ainsi qu'une redistribution importante d'efforts avant rupture. Ce type d'acier présente, comme autres avantages, une excellente résistance à la corrosion et une meilleure résistance au feu par rapport à l'acier au carbone utilisé en structures. Toutes ces caractéristiques en font un matériau particulièrement intéressant pour des applications en zones d'assemblage, qui peuvent bénéficier de sa grande capacité de déformation et de résistance sous des niveaux élevés de contraintes. Des études récentes sur le comportement mécanique d'éléments de structure en acier ont permis d'apporter des éléments de comparaison avec les exigences de l'EN 1993-1-4 qui constitue une extension des règles établies pour les structures en acier au carbone afin de prendre en compte les particularités apportées par l'acier inoxydable. Une étude a été menée au LaMI sur des assemblages boulonnés, en acier inoxydable, de type couvre-joint qui sont les plus courants. Les résultats issus de cette étude ont permis d'évaluer la validité des expressions analytiques de calcul de la capacité résistante de ces assemblages en considérant les modes de ruine complexes associés à la déformation en pression diamétrale. En effet, une vérification de résistance sous sollicitations ELU peut ne pas suffire à limiter les déformations sous sollicitations ELS. Cette approche est en effet implicitement admise pour l'acier au carbone dont le faible rapport entre les limites ultime et élastique est généralement compris entre 1,1 et 1,5. Or, ce rapport peut dépasser 2 pour les aciers inoxydables austénitiques alors que le rapport des sollicitations entre ELU et ELS est compris entre 1,35 et 1,5. Cette étude expérimentale est complétée par un modèle éléments finis non linéaire, développé sous Cast3m, en vue de représenter de façon réaliste le comportement de ces assemblages. Ce modèle prend en compte la zone de contact entre la partie filetée du boulon et les trous des plats assemblés. La géométrie de l'assemblage a été choisie en vue de favoriser un mode de ruine de type pression diamétrale. La loi force-déplacement, qui illustre le comportement global de l'assemblage, intègre les différentes sources de déformation

présentes (sections brute et nette, pression diamétrale et cisaillement du boulon). Les résultats obtenus sont validés par comparaison avec les données expérimentales sur trois assemblages de différentes dimensions. Cette étude numérique a permis de distinguer les paramètres les plus influents sur le comportement des assemblages étudiés qui sont la loi constitutive du matériau, l'épaisseur et la longueur du plat, la pince longitudinale et la largeur de l'assemblage. Cependant, cette approche déterministe ne permet pas de tenir compte de la variabilité des caractéristiques géométriques et matérielles de ces assemblages. Ainsi, une approche fiabiliste est proposée pour évaluer les dispositions de l'Eurocode 3, en vue de donner aux formules de vérification des assemblages en acier inoxydable le même niveau de fiabilité que pour l'acier au carbone. Cette étude contribuerait à enrichir les méthodes de calcul disponibles pour l'acier inoxydable qui présentent un certain conservatisme au niveau des applications structure à cause du manque de données et de retour d'expérience dans le domaine. La méthodologie adoptée pour l'étude fiabiliste s'appuie sur une mise à jour et un paramétrage du modèle éléments finis pour générer des résultats intégrant les variabilités paramétriques. La mise en place du plan d'expérience des résultats numériques permet de construire une base de données de lois de comportement de l'assemblage, en fonction des paramètres géométriques et matériels les plus influents. De cette base, un méta modèle basé sur les techniques de Surfaces de Réponses Quadratiques (SRQ) est construit avec une erreur de calage maintenue inférieure à 5%. Sur le plan déterministe, cette SRQ est comparée aux formules analytiques proposées dans l'Eurocode 3, montrant leur conservatisme dans le cas de l'acier inoxydable. L'analyse fiabiliste est menée sur la SRQ afin d'éviter des temps de calcul excessifs. Cette analyse est basée sur la prise en compte des incertitudes liées aux dimensions géométriques (tolérances de fabrication), aux paramètres de la loi de comportement de l'acier inoxydable et aux charges appliquées à l'assemblage. Deux critères de défaillance ont été considérés : capacité résistante de l'assemblage et déformation excessive sous pression diamétrale du plat assemblé. Pour l'objectif de fiabilité prescrit par les Eurocodes, les règles de dimensionnement sont confrontées aux résultats de l'analyse fiabiliste, en vue de la validation de l'approche de dimensionnement des assemblages en acier inoxydable. Le niveau de conservatisme de l'EC3 est estimé, pour ces assemblages, à travers la comparaison des coefficients partiels de sécurité. La définition de la résistance en pression diamétrale est discutée à partir des résultats fiabilistes considérant le ratio élevé entre la limite ultime et la limite élastique.

**MOTS-CLÉS :** acier inoxydable, assemblage, pression diamétrale, élément finis, fiabilité.