



Cerema

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



Journées techniques GC'2015

L'utilisation d'armatures passives en acier
inoxydable dans les ouvrages d'art

Auteurs : Ph. Jandin, Y. Tardivel, T. Chaussadent,
L. Gaillet, P. Corfdir



L'utilisation d'armatures passives en acier inoxydable dans les ouvrages d'art

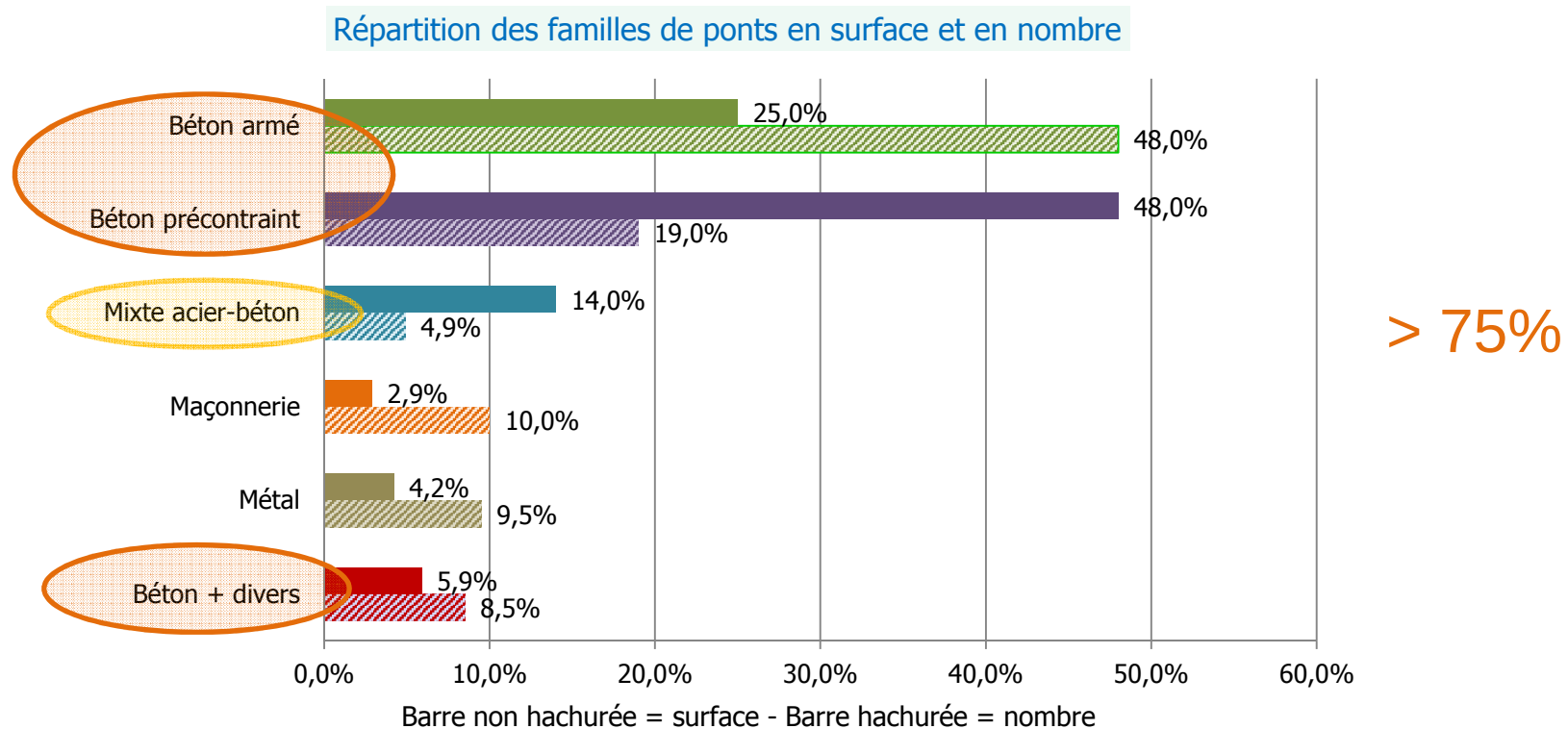
Sommaire

- Problématique
- Les armatures d'acier inoxydable
- Les armatures inox dans le béton
- Les armatures inox dans un ouvrage d'art
- Impact environnemental et économique
- Conclusion

Problématique

Ouvrages en béton : patrimoine important

- Ponts du réseau routier national



Problématique

Ouvrages en béton : patrimoine important

- Principales pathologies



Bowstring en BA de 1923 – Photos CG54



Pont en BA de 1953 – Photos CG54

Problématique

Ouvrages en béton : patrimoine important

- Principales pathologies



Intérieur d'un caisson en BP –
Défauts d'enrobage – Photos CG54



About d'ouvrage – Défauts d'enrobage et d'étanchéité des joints –
Photos CG54

Problématique

La corrosion des armatures de béton armé

- Principale cause de détérioration prématurée des structures en béton
 - Béton pH 12,5 à 13,5 : alcalin → passivation acier
→ couche de corrosion qui isole l'acier
 - Environnement extérieur :
 - Humidité
 - Ions chlorure (sels de déverglaçage, milieu marin)
 - Milieu ambiant (gaz carbonique)

Carbonatation
pH (≈ 9)

→ Film passivant instable

CO_2

Cl^-



Chloruration

Piqûration de l'acier

→ Destruction du film passivant

Problématique

La corrosion des armatures de béton armé

- Conséquences sur les structures
- Guide AFGC de nov 2003
- Processus de diagnostics long et pouvant être relativement coûteux
- Réparations rarement faites dans les conditions requises et dans le respect absolu des règles de l'art,
- Faible retour d'expérience sur certaines d'entre elles
- Faible durabilité des réparations

Problématique

Une solution : le choix initial de l'armature

1,33

- Armatures revêtues de polymères type époxy (ECR)



2

- Armatures galvanisées



3 à 5

- Armatures en inox



2,5

- Rmq : stainless steel clad rebar (SSC) = armatures revêtues d'inox (épaisseur de l'ordre du mm)



Les armatures inox

Composition :

- Teneur en Chrome $> 10,5\%$
- Teneur en Carbone $< 1,2\%$

Structure métallurgique :

- Aciers austénitiques
- Aciers ferritiques
- Aciers auténo-ferritiques (ou duplex)
- Aciers martensitiques

Les armatures inox

Propriétés physiques et mécaniques

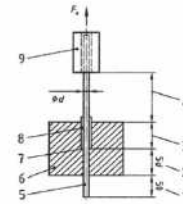
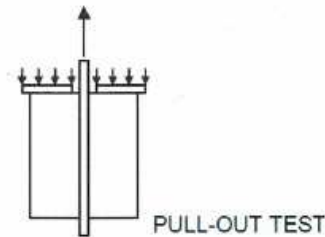
Famille	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kN/m ³)	Coefficient de dilatation entre 20°C et 200°C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
Ferritique	220 000	77	10,5
Austénitique	200 000	79	16,5
Austéno-ferritique	200 000	78	13,0
Acier carbone	200 000	79	10,0

- Béton armé = adhérence entre béton et armature
→ $\approx$ même coefficient de dilatation entre béton et acier au carbone
- Armatures inox : coefficient de dilatation $>$ celui du béton
→ Incidence dans le cadre des cycles de température?

Les armatures inox

Propriétés physiques et mécaniques

- Incidence coefficient de dilatation des armatures inox
 - Essais au LR de Strasbourg de type pull-out (selon annexe D de la norme NF EN 10080)

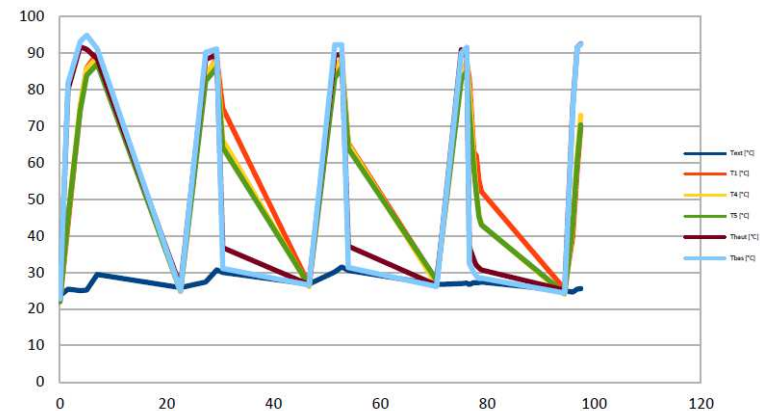


- 2 séries d'essais menés en juillet 2013 :
 - 1^{ère} série sur 5 éprouvettes avec acier au carbone, avec ou sans cycles de température et 2 éprouvettes avec acier inox austénitiques avec ou sans cycles
 - 2^{ème} série sur 1 éprouvette avec acier au carbone avec cycles et 3 éprouvettes avec acier inox austénitique avec ou sans cycles

Les armatures inox

Propriétés physiques et mécaniques

- Incidence coefficient de dilatation des armatures inox
 - Cycles de température :
 - Chauffage à 85-90°C
 - Refroidissement jusque 25-30°C
 - Durée d'un cycle = 24h

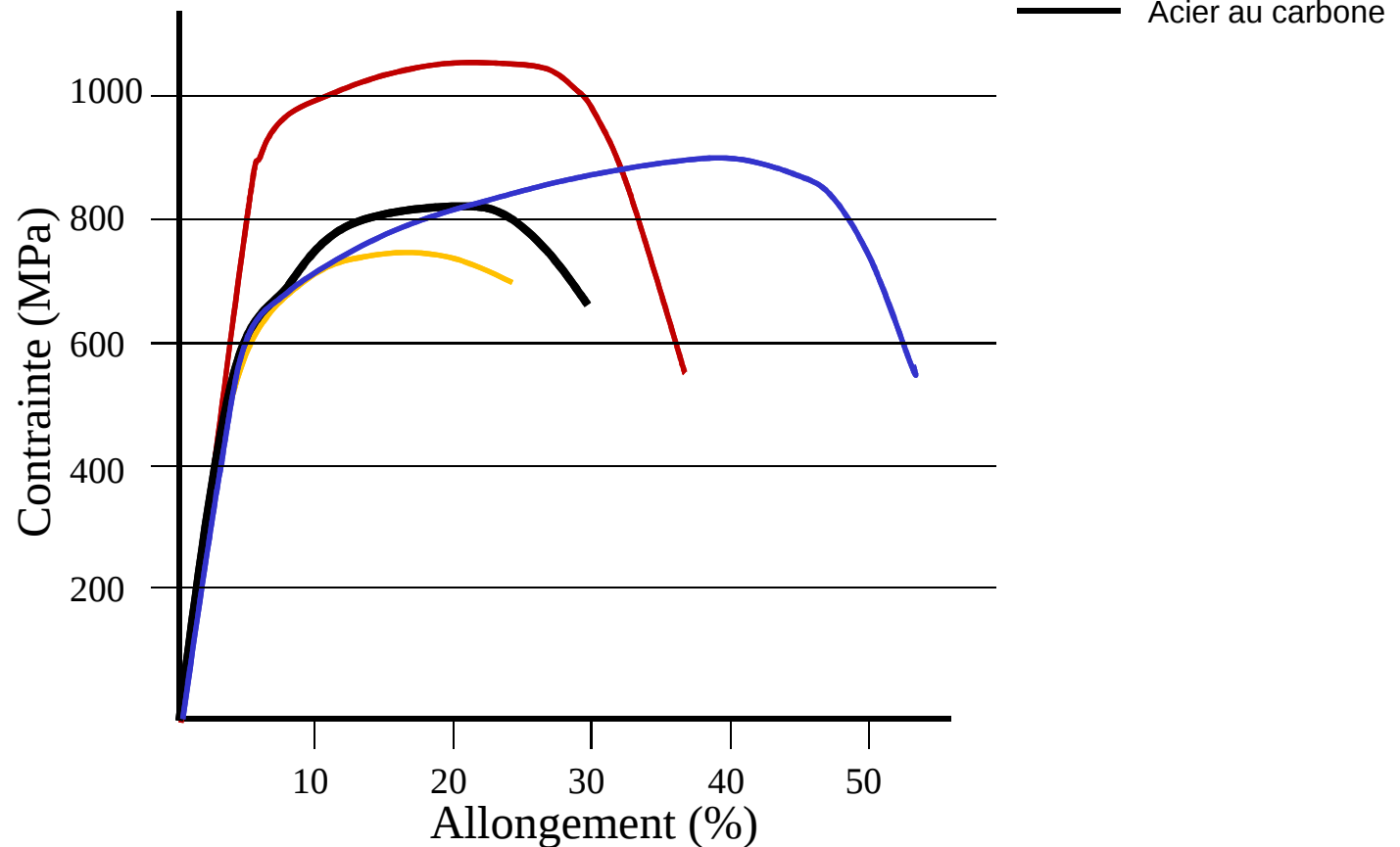


- Résultats obtenus : pas de différence d'adhérence notable entre acier carbone/béton et acier inox/béton

Les armatures inox

Propriétés physiques et mécaniques

- Propriétés mécaniques



Les armatures inox

Normalisation

- Normes européennes :
 - EN 10088-1:2014 « Aciers inoxydables - Partie 1 : liste des aciers inoxydables »
 - EN 10888-3:2014 « Aciers inoxydables - Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, **barres**, fils machines, fils tréfilés, profils et produits transformés à **froid** en acier résistant à la corrosion **pour usage général** »
 - EN 10088-5:2009 « Aciers inoxydables - Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les barres, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion **pour usage de construction** ».

Les armatures inox

Normalisation

- Norme française :
 - XP A35-014:2003 « Aciers pour béton armé - Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable »
 - 4 classes de nuance (limite conventionnelle d'élasticité à 0,2%) : InE235, InE500, InE650 et InE800
 - Désignation numérique : exemple 1.4429 correspondant à un acier austénitique X2CrNiMo17-13-3
 - Diamètre de 5 à 50 mm

Les armatures inox dans le béton

Avantages

- Maintenance réduite
- Durabilité élevée
- Coûts de cycles de vie compétitifs

Inconvénients

- Coût initial



Utilisation sélective dans les zones critiques

Les armatures inox dans le béton

Choix de la nuance

- Nuances adaptées au génie civil :

Structure métallurgique	Nuance EN 10088-1	PREN
Acier au carbone		0
Austénitique	1.4401	> 23
Austénitique	1.4571	> 25
Austénitique	1.4429	> 27
Duplex	1.4362	> 23
Duplex	1.4462	> 30

Les armatures inox dans le béton

Utilisation avec des aciers au carbone

- Pas de risque de corrosion galvanique une fois dans le béton → utilisation sélective

Dimensionnement des structures

- Limite élastique de 500 ou 650 Mpa
- Réduction de l'enrobage à $\text{Max}\{30 \text{ mm}; \emptyset\}$, quelle que soit la classe d'exposition
- Possibilité d'augmentation de l'ouverture de fissure de 0,3 à 0,4 mm en ELS fréquent si uniquement critère de corrosion considéré

Les armatures inox dans le béton

Façonnage, soudage et pose

- Risque de contamination au contact avec acier au carbone
- précautions à prendre :
- Fabrication, transport, stockage, manutention (outillage en inox, emballage, etc..)
 - Soudage : pas recommandé sur site, privilégier les coupleurs (en inox)

Les armatures inox dans les ouvrages d'art

Nombreuses applications dans le monde, emploi de plus en plus répandu et généralisé

- Exemple le plus connu : estacade de Progreso, Yucatan, Mexique (1941)

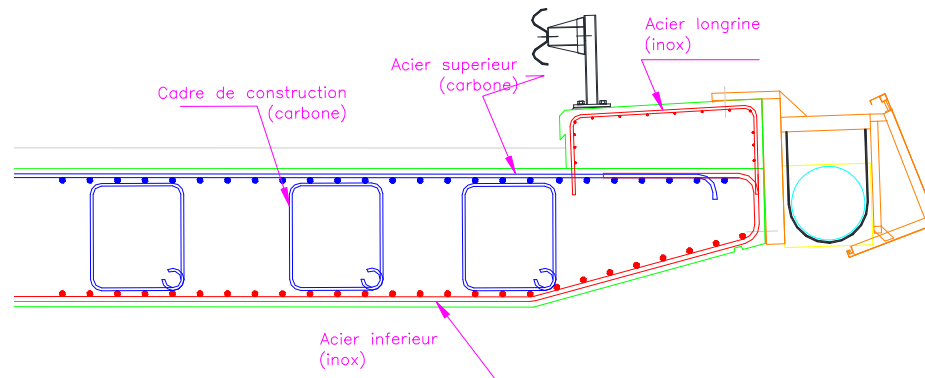
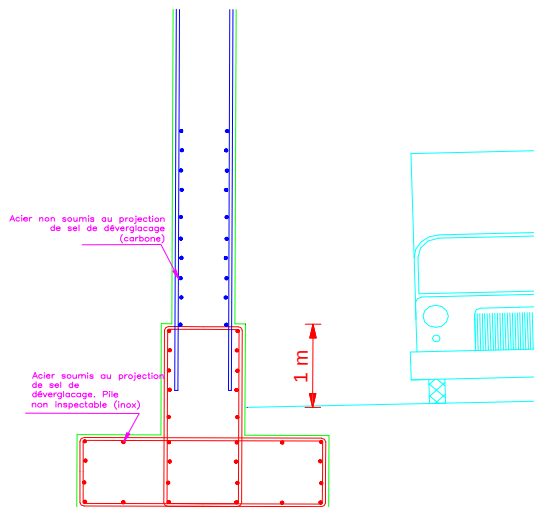


Progreso Pier, Mexique – 2100m portés à 4000m en 1988– Photos Google Street

Les armatures inox dans les ouvrages d'art

Intérêt :

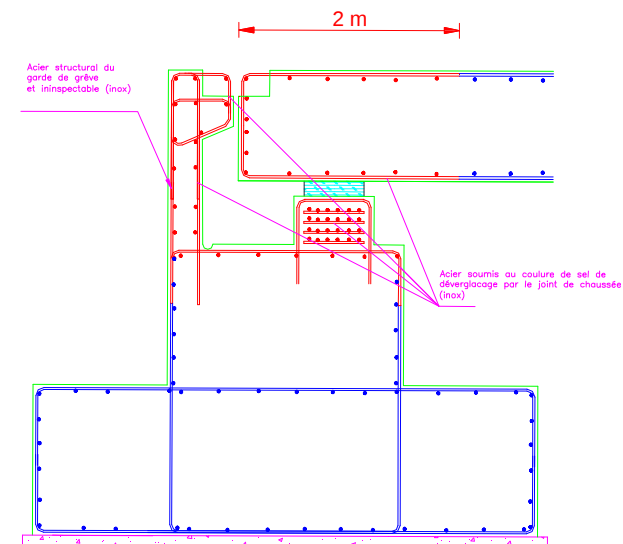
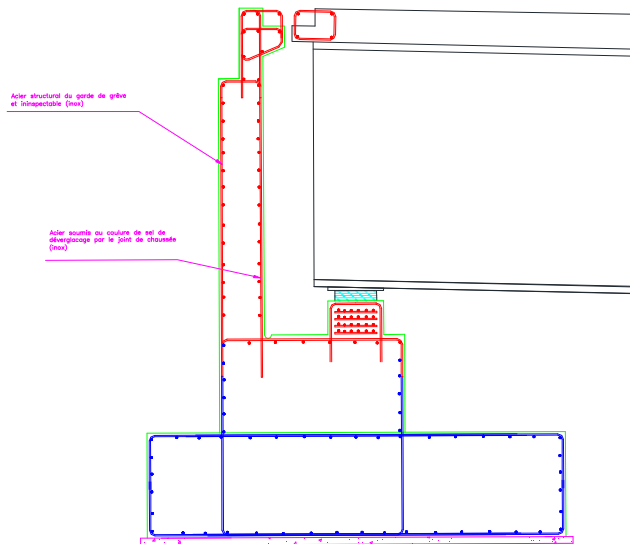
- Ouvrages en site maritime ou exposés aux sels de déverglaçage :
 - Longrines de dispositifs de retenue
 - Zones de marnage des piles
 - Pieds de piles exposés aux sels en montagne



Les armatures inox dans les ouvrages d'art

Intérêt :

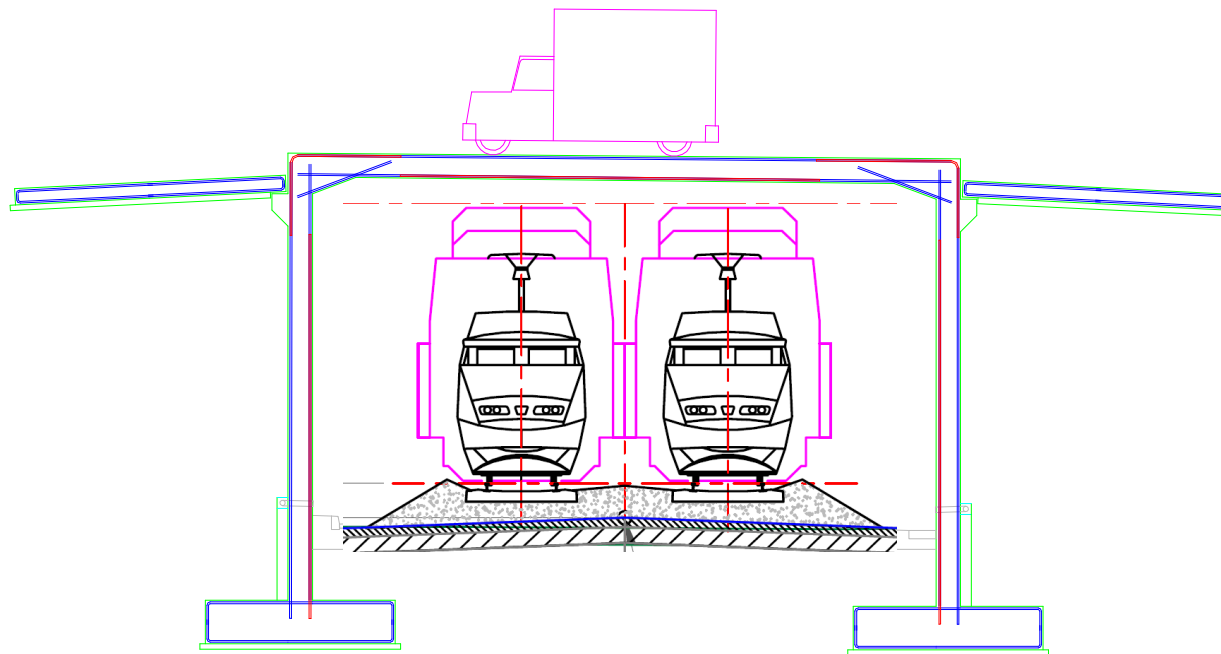
- Parties d'ouvrages difficilement accessibles
 - Abouts de tablier
 - Petits ouvrages sur cours d'eau



Les armatures inox dans les ouvrages d'art

Intérêt :

- Contraintes d'exploitation
 - Ouvrages sur axes stratégiques (aéroports, LGV, autoroutes ou routes à fort trafic)



Impact environnemental et économique

Objet de l'évaluation

- 
- Coût + élevé des armatures inox
 - Coût + élevé de construction des ouvrages
 - Bénéfices à moyen et long termes pour la société?
 - Évaluation sur le cycle de vie

Impact environnemental et économique

Évaluation économique

- Surcoût des armatures inox de l'ordre de 3 à 5 ou 6 x prix des armatures au carbone
- Choix des zones à traiter en fonction du site de l'ouvrage et des enjeux :
 - Parties d'ouvrages inaccessibles
 - Parties d'ouvrages fortement agressées
 - Totalité d'un intrados
- À comparer aux coûts d'entretien incluant les coûts indirects

Conclusion

Guide méthodologique

- S'assurer de l'utilisation des armatures en inox dans les ouvrages d'art et d'être une solution efficace aux désordres liés à la corrosion
- Choix sur la nuance de l'acier
- Mise en œuvre
- Configurations type d'utilisation conjointe avec les armatures au carbone
- Évaluations environnementales et économiques sur le cycle de vie
- Proposer des clause types de rédaction de cahier des charges



Cerema

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

Merci de votre participation

philippe.jandin@cerema.fr

Yannick.tardivel@cerema.fr

Pierre.Corfdir@developpement-durable.gouv.fr

thierry.chaussadent@ifsttar.fr

laurent.gaillet@ifsttar.fr

