

# Utilisation d'assemblages collés en génie civil

-

*Utilisation en renforcement extérieur et Contrôle non destructif*

**S. Chataigner**      *Laboratoire SMC/ Département MAST, IFSTTAR*

*L. Gaillet (SMC, IFSTTAR), M. Quiertant (EMMS, IFSTTAR), K. Benzarti (CPDM, IFSTTAR), A. Khadour (COSYS, IFSTTAR), C. Aubagnac (Lab. Autun, CEREMA), J.F. Caron (Navier, Ecole des Ponts), G. Foret (Navier, Ecole des Ponts), E. Le Gal La Salle (ICAM)*



**IFSTTAR**

Journée technique sur les CND pour les assemblages collés & soudés  
*PRECEND, 4 Février 2016, Nantes*

# Sommaire

## **I) Généralités sur le transfert des efforts par collage**

- a) Généralités
- b) La longueur d'ancrage

## **II) Utilisation de renforcements par composites collés**

- a) Mise en œuvre sur site et contrôle
- b) Transfert des efforts
- c) Durabilité

## **III) Contrôle non destructif de ces renforcements**

- a) Historique des travaux effectués
- b) Investigations sur le sujet des acousto-US

## **IV) Conclusion**



# Transfert des efforts par collage



# Principe

## Le collage

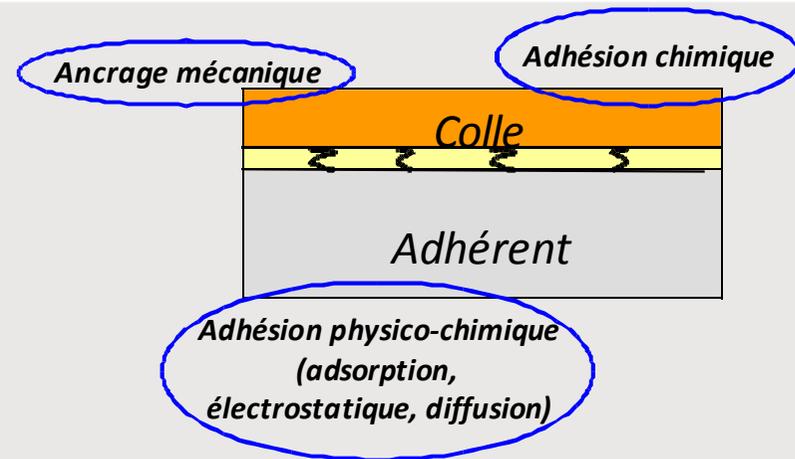
« Le collage permet d'assembler des substrats au moyen de substances adhésives (colles, adhésifs) » (CETIM, 2006)

## Le collage structural

« Le collage est dit structural lorsqu'il confère à l'assemblage considéré une résistance mécanique suffisante dans les conditions environnementales de service » (J. Cognard, 1994)

Il existe de nombreux types d'adhésifs différents (natures chimiques, modes d'obtention, mode de prise)

Principaux adhésifs structuraux:  
Polyuréthanes, Acryliques,  
Phénoliques, Poly imides, **Epoxy**s



D'où l'importance de la **préparation de surface** pour améliorer les efforts d'adhésion (CETIM, 2006):

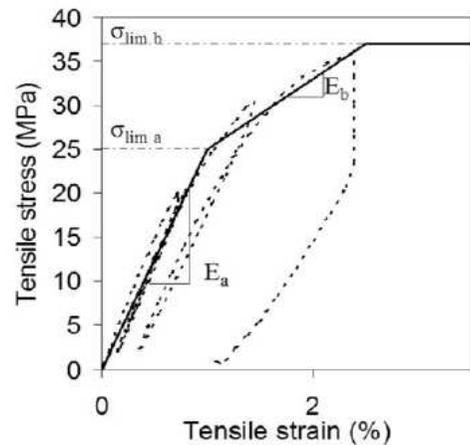
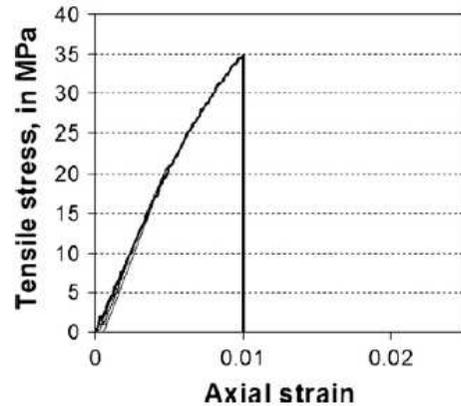
- Enlèvement des couches faibles
- Modification de la rugosité
- Modification de la composition chimique du substrat
- Modification de l'énergie de surface

D'où l'importance de l'observation des modes de rupture de l'assemblage (révélateur de préparation de surface insuffisante)

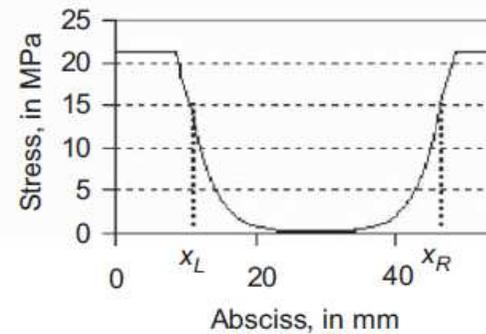
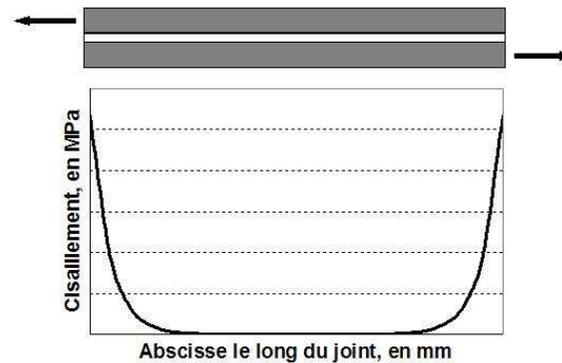


# Fonctionnement mécanique en cisaillement

## Comportement en traction de la résine



## Transfert des efforts par cisaillement

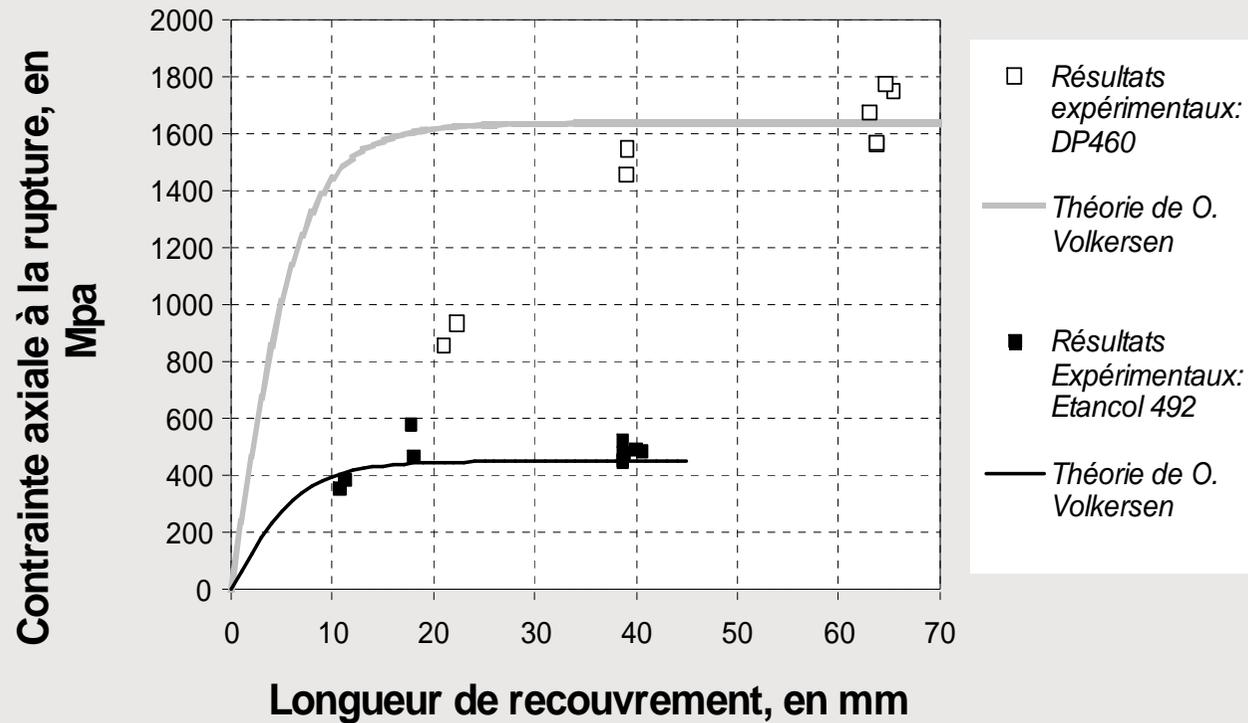


- > **Importance des zones d'about dans le cas du collage structural**
- > **Influence des défauts: création de contraintes locales**

S. Chataigner, V.A. Duong, J.F. Caron, A. Diaz Diaz, Investigation of adhesive's elasto-plasticity in bonded lap joints: slip and shear strain along the joint, Construction and Building materials, 2010, Vol.25: 432-441, 2011.



# Concept de longueur d'ancrage



-> **Existence d'une longueur dite d'ancrage**

-> **Existence d'une capacité maximale indépendante de la longueur collée au-delà de cette longueur d'ancrage**

S. Chataigner, J.F. Caron, A. Diaz Diaz, C. Aubagnac, K. Benzarti, Non linear failure criteria for a double lap bonded joint, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.30(1): 10-20, 2010.



# Utilisation de renforts par composites collés en génie civil



# Principe



**Plat  
pultrudé**

**Deux principaux types de procédés déjà  
utilisés dans le domaine du génie civil**



**Tissu  
sec**



## Types de renforcement:

- Flexion (ELU)
- Effort tranchant (ELU)
- Fatigue dans le cas des structures métalliques
- Confinement de poteaux (ELU)
- Renfort sismique (Apport de ductilité)

**Prolongation de  
la durée de vie  
des structures  
(Gestion du  
patrimoine)**

## Avantages des matériaux composites vis-à-vis des méthodes classiques:

- Pas de problème de corrosion (utilisation de fibres de carbone en général)
- Légèreté (mise en œuvre) (= > ancêtre = tôle collée)
- Réalisation de géométries non planes (tissus)

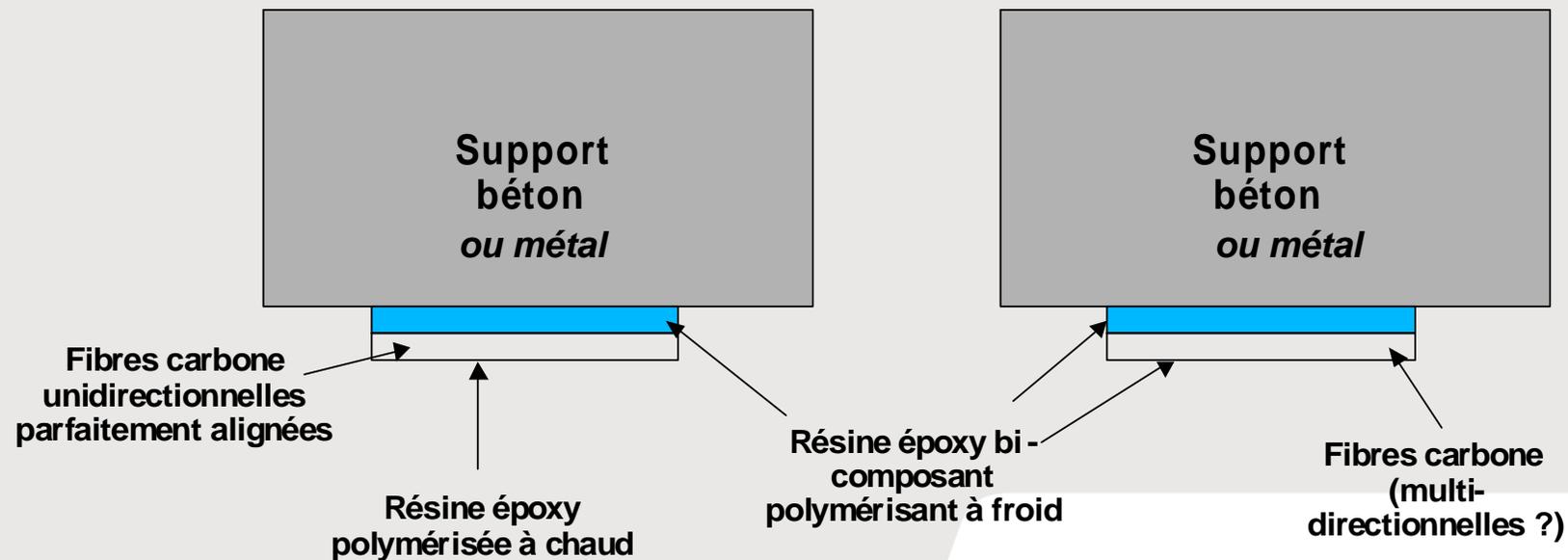


### Système plat pultrudé:

- Composite réalisé en usine (Volume de fibres très important)
- Raideur très élevée (proche de celle de l'acier) ( $E = 160\,000\text{ MPa}$ )
- Géométrie prédéfinie

### Système tissu sec:

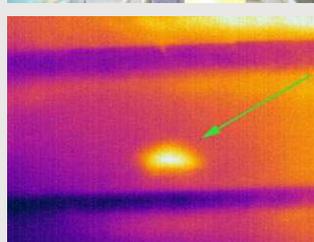
- Composite réalisé in-situ
- Raideur plus faible ( $70\,000\text{ MPa}$ )
- S'adapte à la plupart des géométries (sauf angles saillants)



**=> Matériaux anisotrope, qualité des matériaux dépendantes des conditions d'application**



# Référentiel



AUSCULTATION



ESSAIS  
DESTRUCTIFS DE  
COHESION

## 2 Guides de l'AFGC sur le sujet du dimensionnement:

Association Française du Génie Civil, "Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites - Recommandations provisoires », Documents scientifiques et techniques, Juin 2007 puis Février 2011.

Association Française du Génie Civil, "Renforcements parasismiques de structures en béton armé par matériaux composites - Recommandations provisoires », Documents scientifiques et techniques, Juin 2015.

**=> Contrôle au maillet**

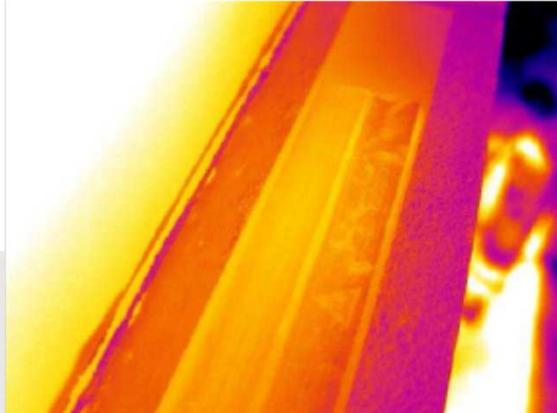
**Guide pour le contrôle extérieur des opérations de réparation ou de renforcement de structures en béton par collage de matériaux composites**  
*Rédigé dans le cadre du groupe innovation du LCPC, Janvier 2010, en cours d'enregistrement dans le plan qualité du réseau*

**=> Ajout du contrôle à la caméra thermique IR, mais manque de préconisation sur l'acceptabilité des défauts**



*Classical application steps*

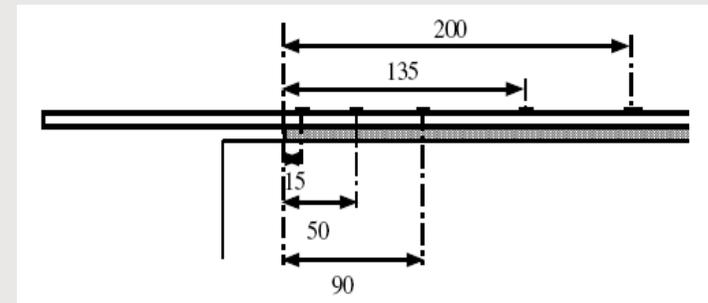




On site control operations: surface preparation, resin preparation, application, non destructive control (thermography), test samples realization to check the procedures of the enterprise and follow ageing on site.



# Caractérisation du transfert des efforts



S. Chataigner, J.F. Caron, K. Benzarti, M. Quiertant, C. Aubagnac, « Characterization of composite to concrete bonded interface – Description of the single lap shear test », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol.13: 1073-1082, 2009.

S. Chataigner, J.F. Caron, K. Benzarti, M. Quiertant, C. Aubagnac, Use of a single lap shear test to characterize composite-to-concrete or composite-to-steel bonded interfaces, *Construction and Building materials*, Vol.25: 468-478, 2011

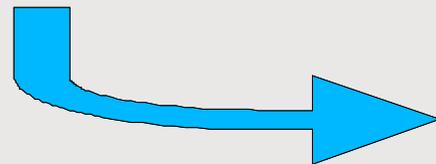


# Durabilité de la technique

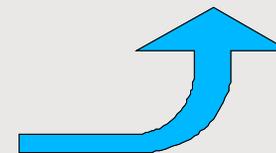
*Vieillessement accéléré (40°C et plus de 95 % HR)*



**REALISATION DE LOTS D'EPROUVETTES EN LIAISON AVEC DES ENTREPRISES**



**STOCKAGE A 40°C et 95 % HR  
(accélération du vieillissement  
des résines)**



**ESSAIS SUR MATERIAUX ET  
ASSEMBLAGES A ECHEANCES  
REGULIERES**

*K. Benzarti, S. Chataigner, M. Quiertant, C. Marty, C. Aubagnac, Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays, Construction and Building materials, Vol.25: 523-538, 2011.*

*S. Chataigner, A. Gagnon, M. Quiertant, K. Benzarti, C. Aubagnac, Adhesively bonded composite reinforcements for steel structures : durability of the stress transfer, CICE 2012, Rome.*



# Principales conclusions des investigations de durabilité

- Assouplissement de la résine avec le temps dans le cas de vieillissements accélérés (température et humidité)
- Dégradation des efforts d'adhésion dans le cas du collage sur support béton (changement de mode de rupture)
- Pour les durées et les géométries étudiées, pas de diminution de la capacité de l'assemblage en cisaillement.
- Etude sur la durabilité sous charge en cours

⇒ **Quid de l'influence d'un défaut**

⇒ **Manque de corrélation avec le vieillissement sur site (pas d'évolution pendant 20 ans)**

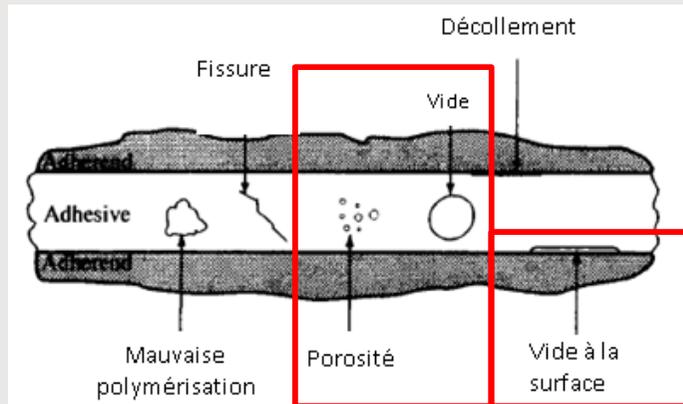


# Contrôle non destructif de ces renforcements

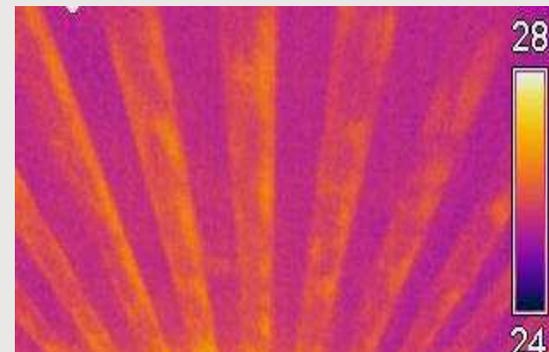


# Introduction/Contexte

- Actuellement => Méthode de contrôle par thermographie IR active utilisée sur site permettant seulement de détecter des vides ou porosités (\*\*)



(\*) **Classification des principaux défauts des assemblages collés**



Exemple d'investigation par thermographie IR sur site (Labo Autun)

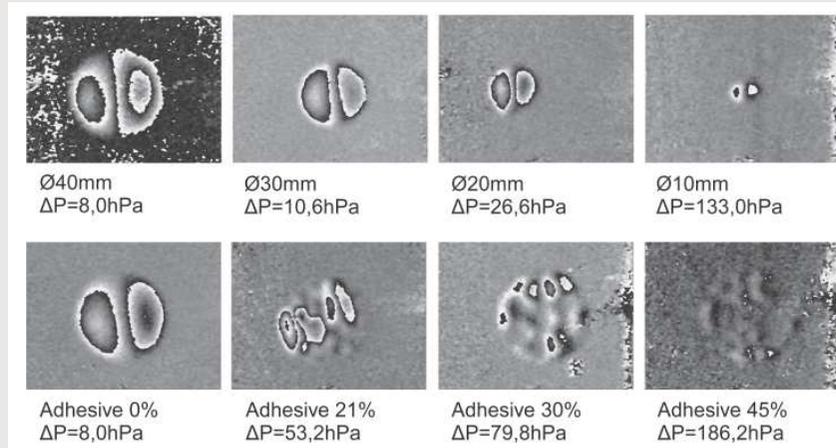
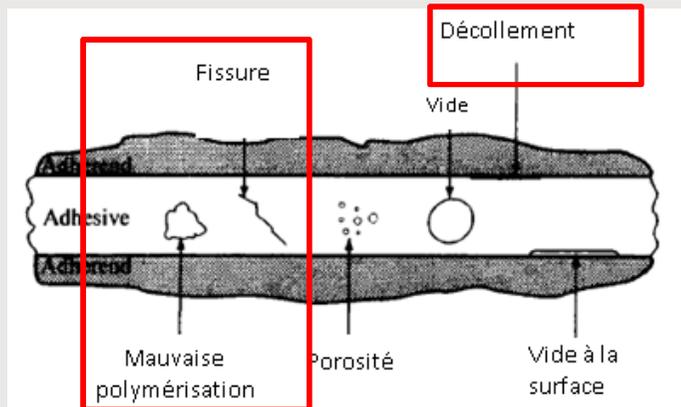
(\*) R.D. ADAMS and B.W. DRINKWATER, *Nondestructive testing of adhesively bonded joints*, NDT&E International, Vol.30, No 2, pp. 93-98, 1997.

(\*\*) J. DUMOULIN, C. IBARRA-CASTANEDO, M. QUIERTANT, F. TAILLADE, A. BENDADA AND X. MALDAGUE, « Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography », 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Québec (Canada), 2010.



Besoin autres méthodes CND => détecter la polymérisation incomplète ou la présence de films polluants néfastes pour l'adhérence :

Exemple de la shearographie (\*)



*Inconvénients :* - Investigation localisée  
- Adaptée au renforcement de type tissu (plus souple)

=> Evaluation de la **méthode des acousto-ultrasons**

(\*) F. TAILLADE, M. QUIERTANT, K. BENZART AND C. AUBAGNAC, *Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures*, Construction and Building materials, Vol. 25, pp.568-574, 2011.



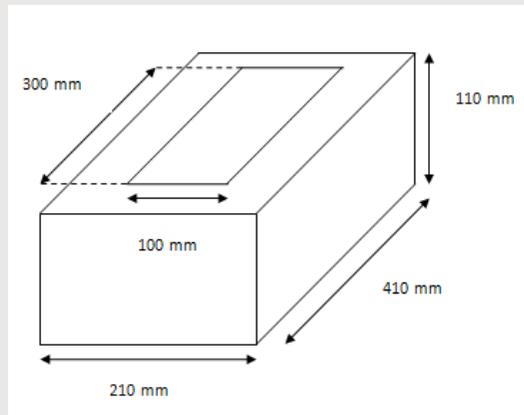
# Premières investigations sur l'utilisation des acousto-US



# Présentation du protocole expérimental

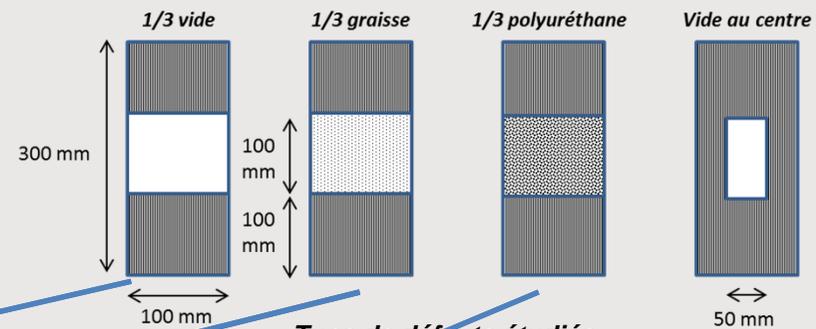
## a) Echantillons étudiés

- Collage composite sur béton:
  - Dalle béton C35 de dimension 210 mm\*410 mm\*110 mm
  - Procédé de renforcement Compodex (plat unidirectionnel à fibre de carbone et matrice époxy, 300 mm\* 100mm\* 1,4 mm et résine époxy bi-composant polymérisant à froid)

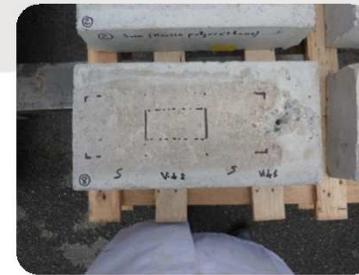
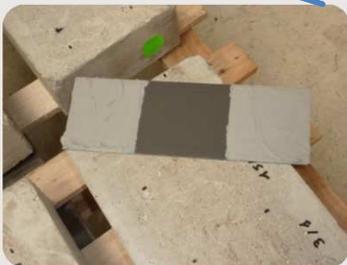


Géométrie des échantillons

- 1 échantillon sain (référence) + 4 échantillons avec différents défauts



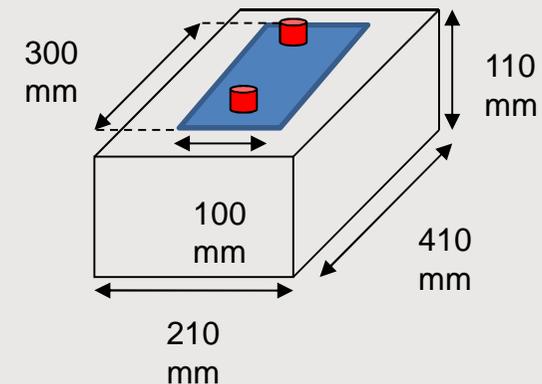
Type de défauts étudiés



# Présentation du protocole expérimental

## b) Dispositif expérimental d'acousto-ultrasons

- Système acousto-US (Mistras) avec les logiciels Wavegen (émission) et AEWIN (réception)
- Deux capteurs piézoélectriques sont utilisés et disposés de part et d'autre du renfort collé à une distance de 230 mm. Ils sont couplés à la surface grâce à une graisse silicone + élastiques
- Essais préliminaires sur deux types de capteurs:
  - Capteurs de type R15: onde de compression et fréquence de résonance proche de 150 kHz
  - Capteurs de type SH10: onde de cisaillement et fréquence de résonance proche de 100 kHz



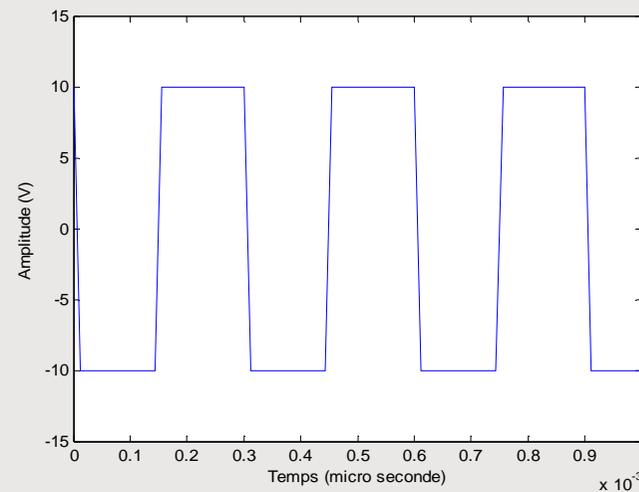
Photos du dispositif expérimental



# Présentation du protocole expérimental

## c) Définition du signal envoyé

- Signal d'excitation de type carré à 10V (pour ne pas saturer le capteur) (Nota: cela pourra être adapté en fonction de la distance entre les capteurs)
- Fréquences d'excitation utilisées proches de la fréquence de résonance du capteur : 80 ou 100 kHz



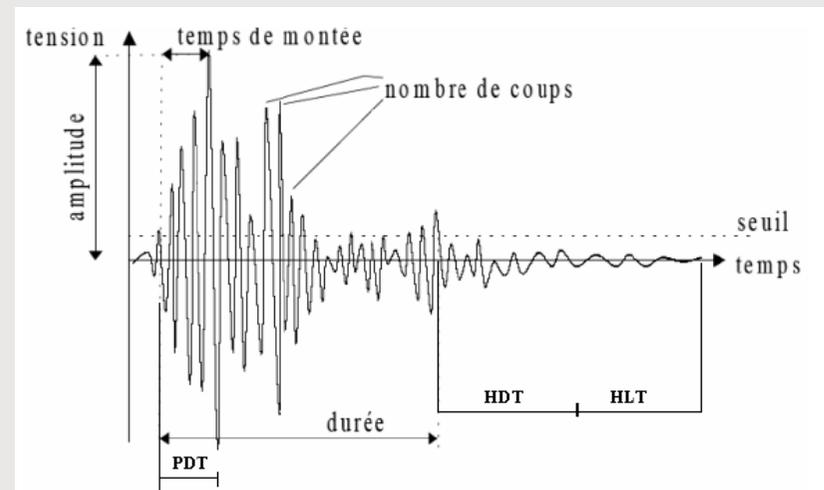
*Exemple de signal d'excitation*



# Présentation du protocole expérimental

## d) Traitement des signaux reçus

- Traitement des signaux reçus selon un formalisme émission acoustique
- Paramètres de définition des salves:
  - Seuil: 45 dB
  - PDT: 70  $\mu\text{s}$  (*Peak Definition Time*)
  - HDT: 200  $\mu\text{s}$  (*Hit Definition Time*)
  - HLT: 300  $\mu\text{s}$  (*Hit Lock Out Time*)
- Paramètres acoustiques étudiés:
  - Amplitude de la salve
  - Durée de la salve
  - Nombre de coups
  - Temps de montée
  - Energie
  - Fréquence moyenne



Représentation d'une salve et des paramètres acoustiques

=> Réalisation de 6 à 10 mesures pour chaque échantillons avec couplage/découplage des capteurs pour mesurer la dispersion de la méthode.

C.U. GROSSE, M. OHTSU, "Acoustic emission testing", Springer, 2008.

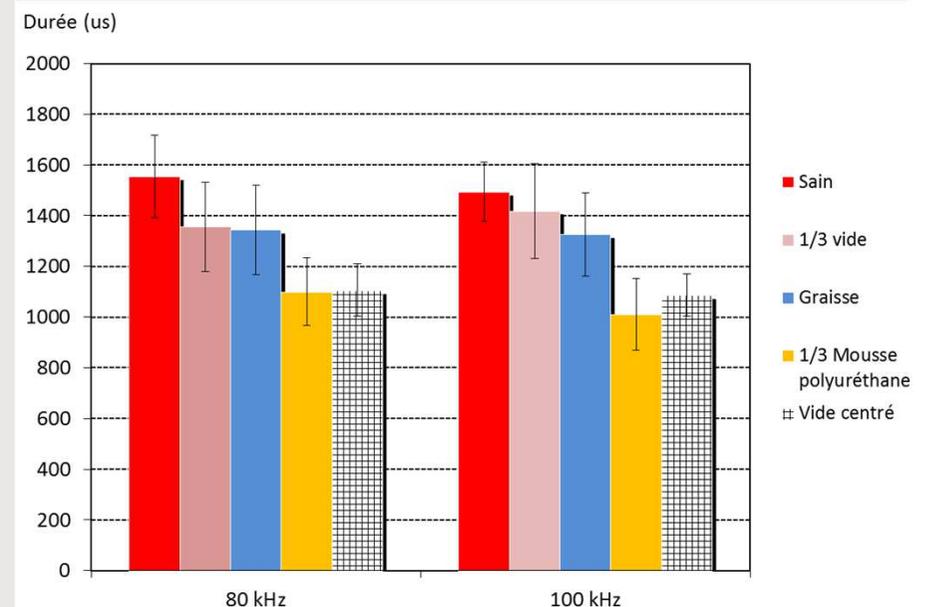
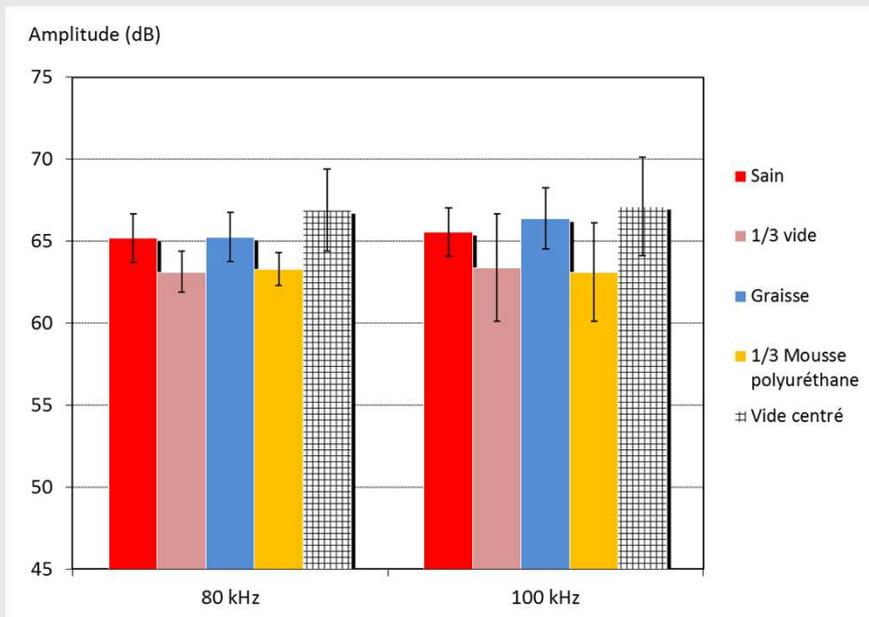
A. VARY, "The acousto-ultrasonic approach", Lewis research center, Cleveland, Ohio, 1987.



# Résultats et analyse

## a) Analyse paramétrique

- Détermination pour chacun des paramètres de la valeur moyenne et de l'écart-type mesuré pour chacun des cas d'étude

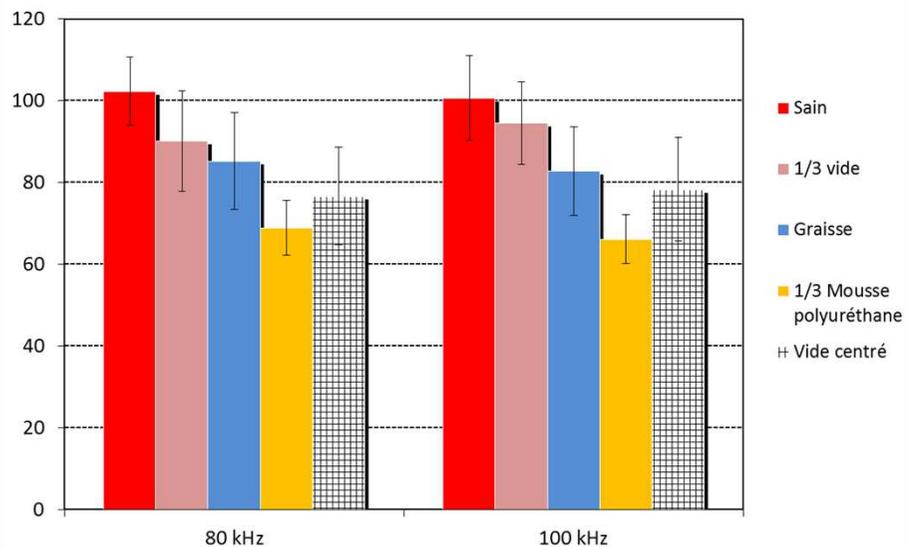


- Influence des conditions de collage peu marquée sur l'amplitude mais très marquée sur la durée des salves reçues.
- Peu d'influence de la fréquence d'excitation dans la gamme retenue (80 et 100 kHz).

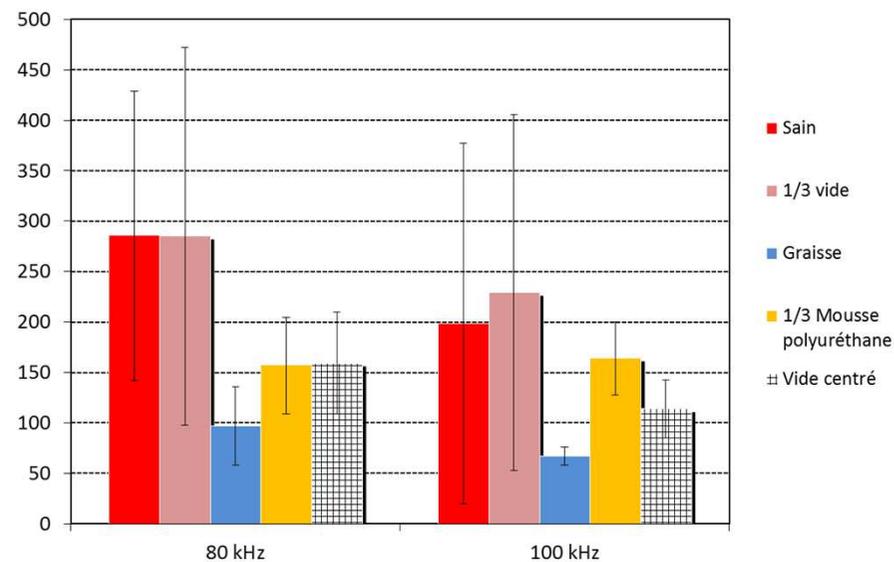


# Résultats et analyse

Nombre de coups



Temps de montée (us)

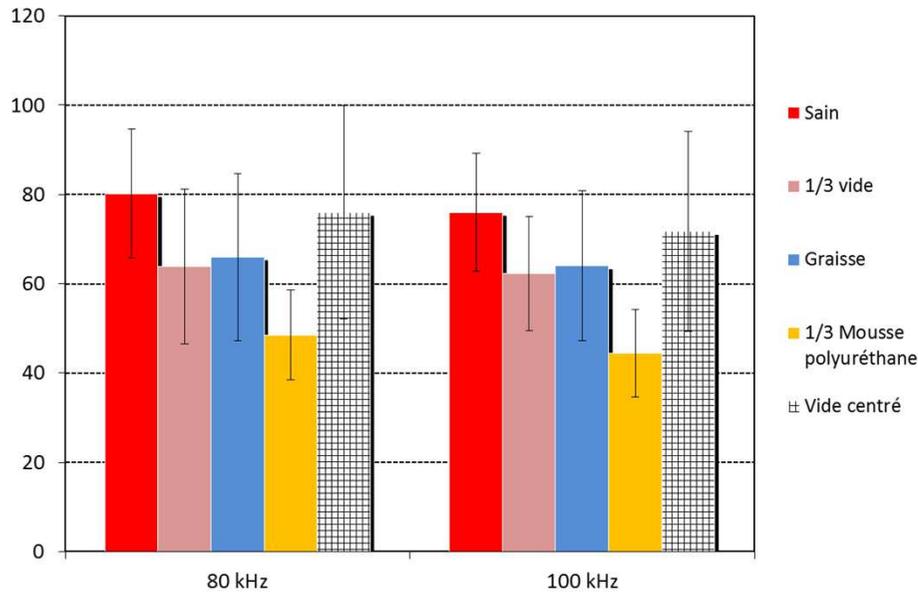


- Influence des conditions de collage marquée sur le nombre de coups
- Dispersion importante des résultats en ce qui concerne les temps de montée
- Peu de différences entre les fréquences d'excitation 80 et 100 kHz.

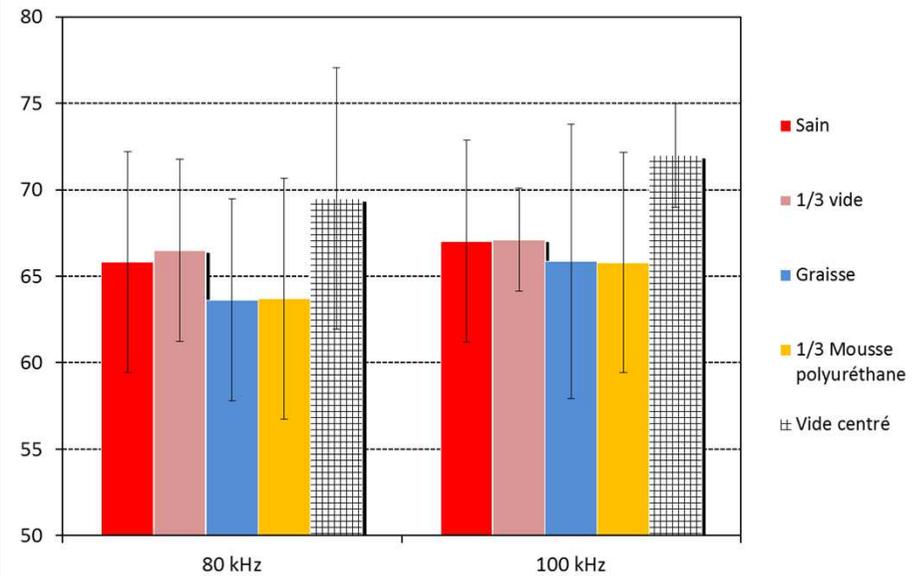


# Résultats et analyse

Energie (dB)



Fréquence moyenne (kHz)



- Influence complexe sur l'énergie reçue.
- Peu d'influence sur la fréquence moyenne avec une forte dispersion des résultats.
- Peu de différences entre les fréquences d'excitation 80 et 100 kHz.

⇒ Possibilité de détection de défauts à partir de l'énergie, du nombre de coups, de la durée du signal ou encore de l'amplitude dans certains cas mais probabilité d'erreur à cause de la dispersion des mesures.



# Résultats et analyse

## b) Analyse statistique en composantes principales

- Détermination des directions principales de projection des résultats à n composantes = paramètres acoustiques.
- **Première étape:**  
Limitation du nombre de paramètres acoustiques utilisés pour cette analyse en utilisant le facteur lambda de Wilk (rapport du déterminant de la matrice de variance-covariance intraclasse sur le déterminant de la matrice de variance-covariance totale). Réalisé sous le logiciel NOESYS pour limiter à 4 le nombre de paramètres acoustiques utilisés.

Paramètres étudié	1/3 vide	Graisse	1/3 mousse polyuréthane	Vide centré
Amplitude				
Energie				
Durée de la salve				
Nombre de coups				
Fréquence initiale				
Fréquence centrale				
Fréquence réverbérée				
Fréquence moyenne				
Temps de montée				

*Paramètres les plus discriminants pour l'ACP pour les quatre défauts étudiés*



# Résultats et analyse

- **Seconde étape:**

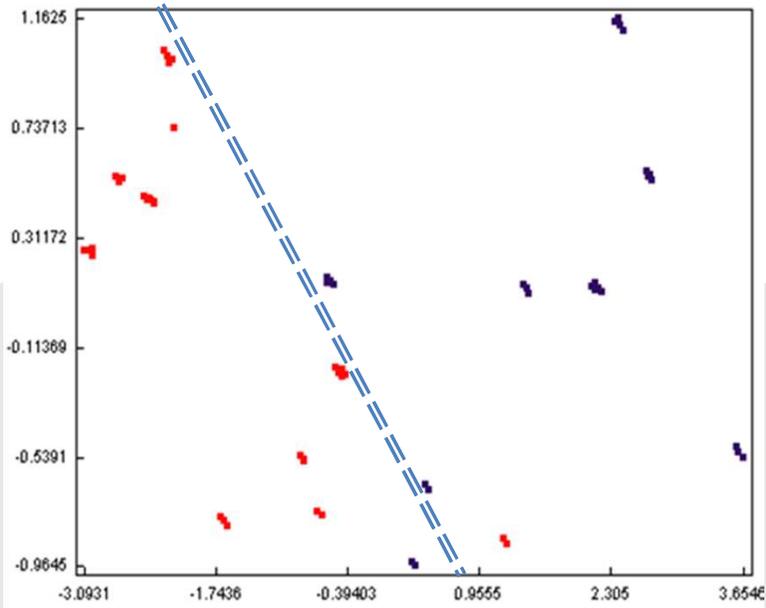
Représentation des résultats des essais sur échantillon sain et échantillon avec défaut dans le plan formé par les deux directions principales déterminées par ACP.

Nota: on vérifie que la part d'inertie résiduelle est bien inférieure à 10% (critère d'arrêt choisi pour notre ACP).

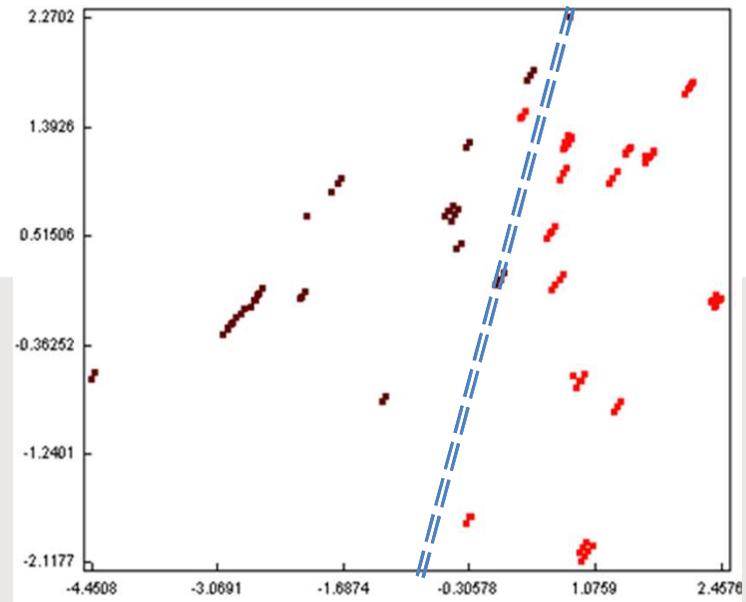
Axe considéré	1/3 vide	Graisse	1/3 mousse polyuréthane	Vide centré
Premier axe	82.83 %	67.1 %	82.6 %	50.9 %
Second axe	10.93 %	23 %	10.9 %	39.1 %
Troisième axe	4.96 %	6.4 %	4.1 %	6.6 %

*Part d'inertie totale de chacun des axes principaux de l'ACP*

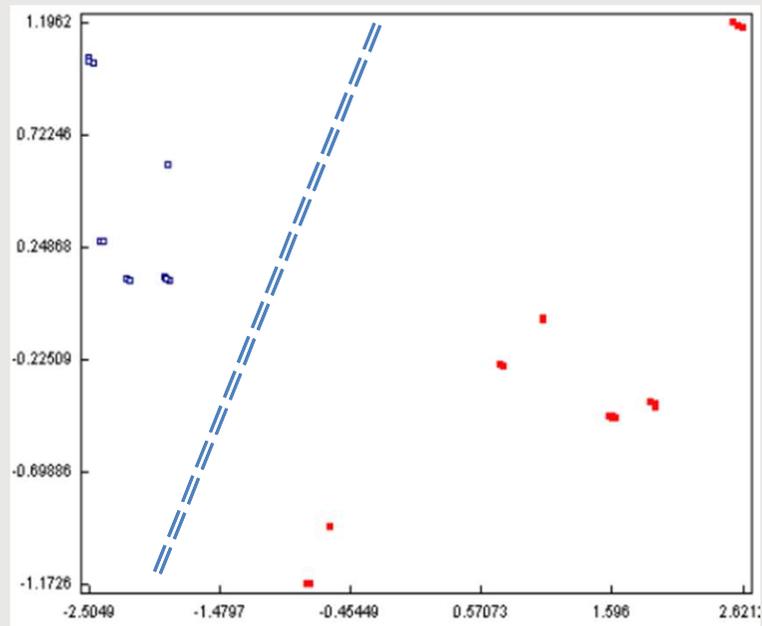




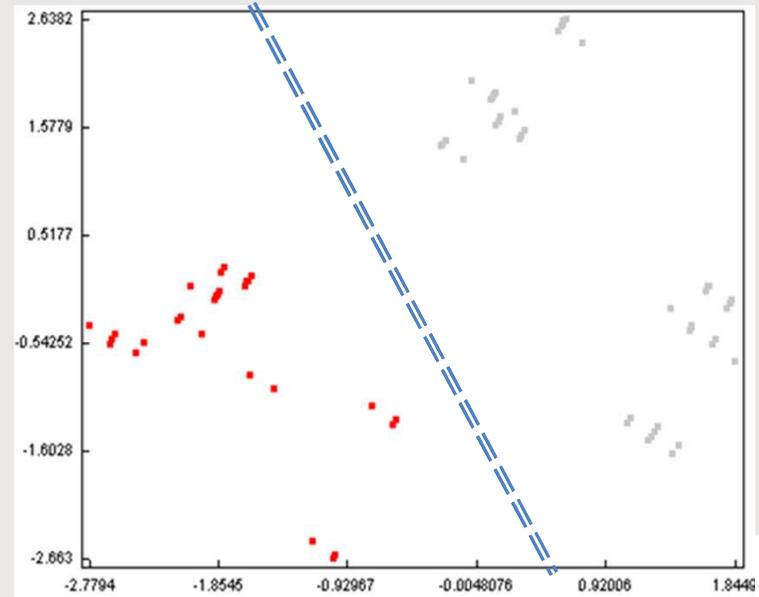
**1/3 vide**



**Graisse**



**1/3 mousse polyuréthane**



**Vide centré**

⇒ Possibilité d'expression de critères dans le plan principal de l'ACP pour distinguer les échantillons défectueux.



# Conclusion

- **Utilisation du collage en génie civil:**
  - Courant pour le cas du renforcement par composite collé aujourd'hui pour les structures en béton: manque encore de données sur sa **durabilité**.
  - Travaux de recherche en cours sur le sujet du **renforcement des structures métalliques vis-à-vis de la fatigue** (Collaboration SNCF, Projet Européen FASSTBridge)
  - Réflexions en cours sur d'autres typologies de structures comme les structures bois-béton assemblées par collage
- **Le contrôle non destructif des renforcements par composites collés:**
  - Utilisation courante de la **thermographie IR** comme méthode à grand rendement de détection des vides/porosités => Besoin de préconisations sur les défauts acceptables (localisation, taille, ...)
  - Manque de méthodes à rendement acceptable, sans risques d'endommagements et à bas coût de contrôle **des défauts de polymérisation et vides en surface**
  - Premières investigations présentées sur l'utilisation des acousto-US: mais méthode lourde à mettre en œuvre et nécessitant encore des développements.



<http://www.infravation.net/projects/FASSTBRIDGE>



# Conclusion

- Question du monitoring/instrumentation des assemblages collés
  - Travaux sur l'utilisation de la fibre optique
  - Travaux sur l'utilisation de l'émission acoustique



*Projet CLERVAL  
(ASFA, CEREMA, IFSTTAR)*



**Renforcement**



33 m

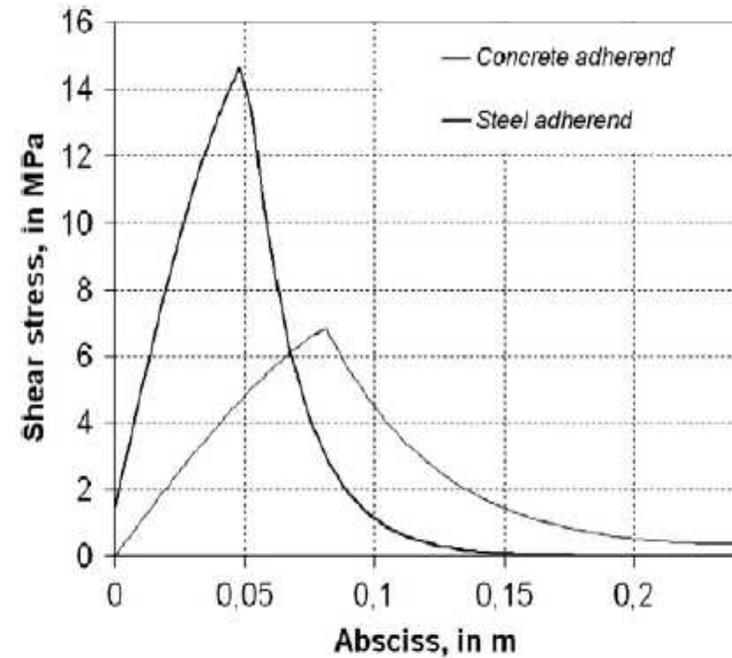
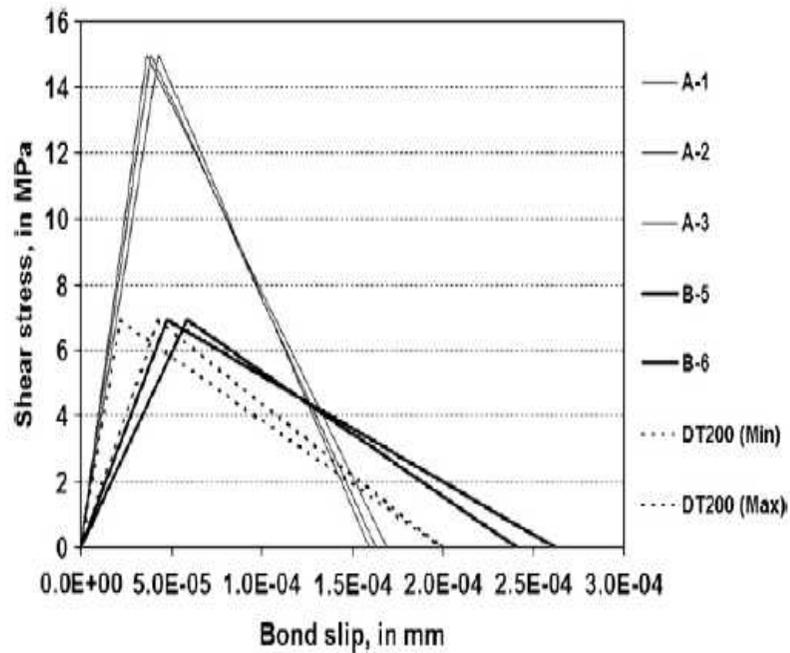
**Essai en flexion**

Merci de votre attention !

*Sylvain Chataigner*  
[sylvain.chataigner@ifsttar.fr](mailto:sylvain.chataigner@ifsttar.fr)

Intervenant - date

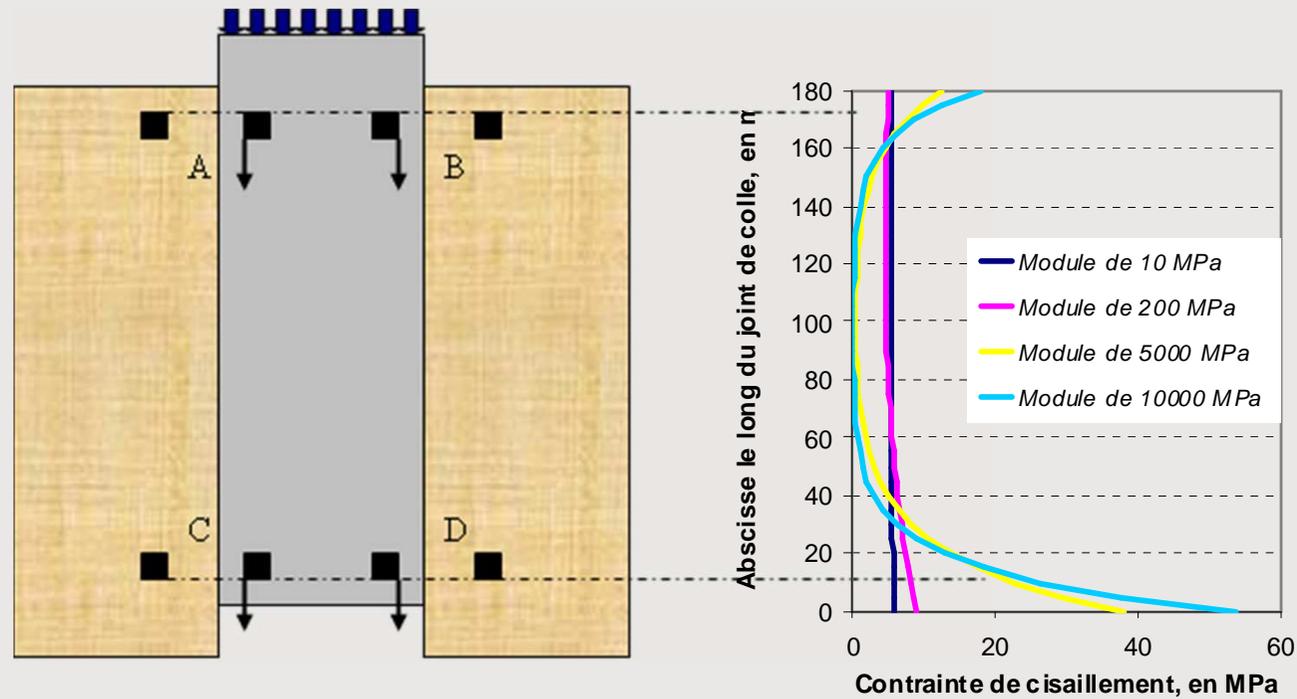




S. Chataigner, J.F. Caron, K. Benzarti, M. Quertant, C. Aubagnac, Use of a single lap shear test to characterize composite-to-concrete or composite-to-steel bonded interfaces, Construction and Building materials, Vol.25: 468478, 2011



# Application au cas des structures mixtes bois-BFUP



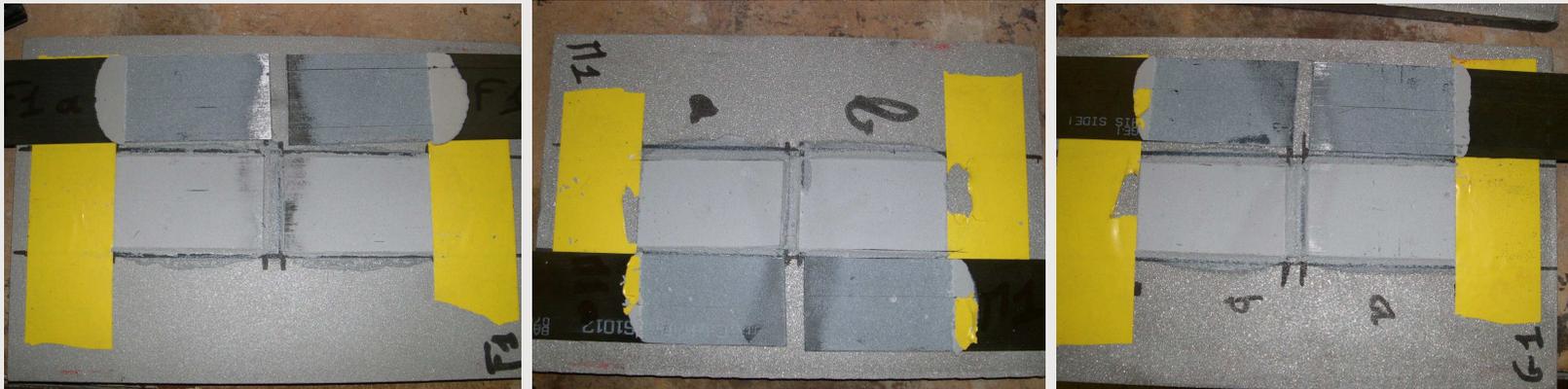
G. Youssef; L. Loulou; S. Chataigner; A. Flety; R. Le Roy; S. Caré; M. Bornert; C. Aubagnac, *Analysis of the Behavior of a Bonded Joint between Laminated Wood and Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete using Push-Out Test*, *Construction and Building Materials*, Vol.53: 381-391, 2014.



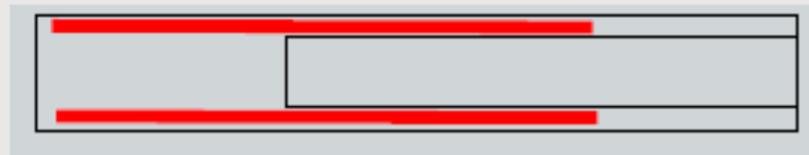
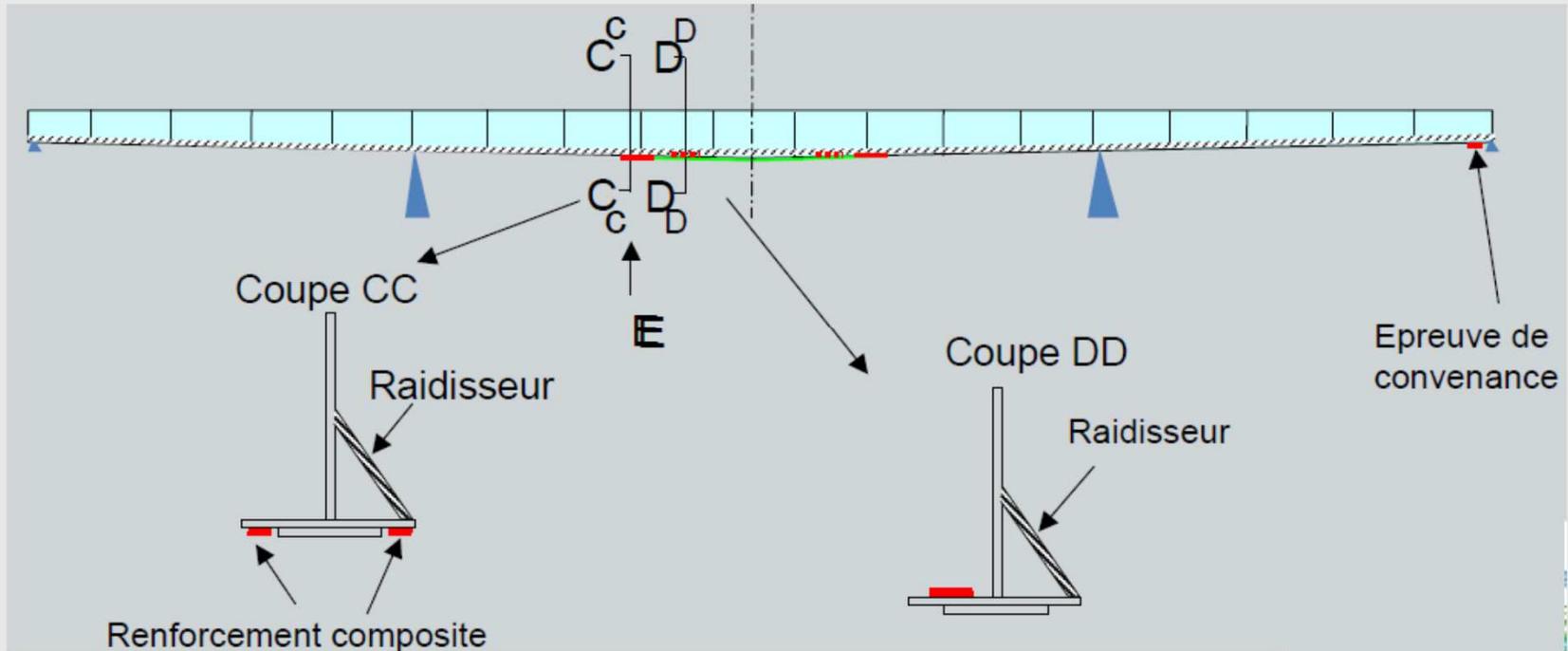
## L'influence de la rugosité de surface

Opération courante de préparation de surface utilisée pour la remise en peinture: sablage SA3 avec trois différents degrés de rugosité: 7  $\mu\text{m}$ ; 10  $\mu\text{m}$ ; 13  $\mu\text{m}$  (Faible, moyen, élevé).

Toutes les ruptures sont cohésives dans le joint de colle. Des capacités ultimes similaires sont obtenues.



**Exemple d'un chantier en France=> Réduction de l'amplitude d'efforts au niveau d'un cordon de soudure**

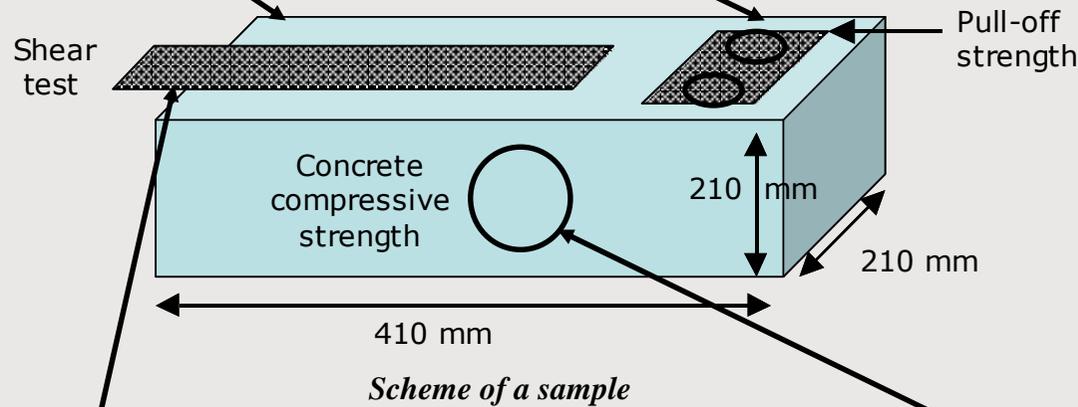


**ASSEMBLY**

- \* Shear test on single lap joint
- \* Pull-off test (EN 1542)

**ADHESIVE**

- \* Tensile tests
- \* Shore D hardness
- \* Mass uptakes
- \* Glass transition temperature
- \* Visco-elastic behaviour DMA (dynamic mechanical analysis)



**COMPOSITE**

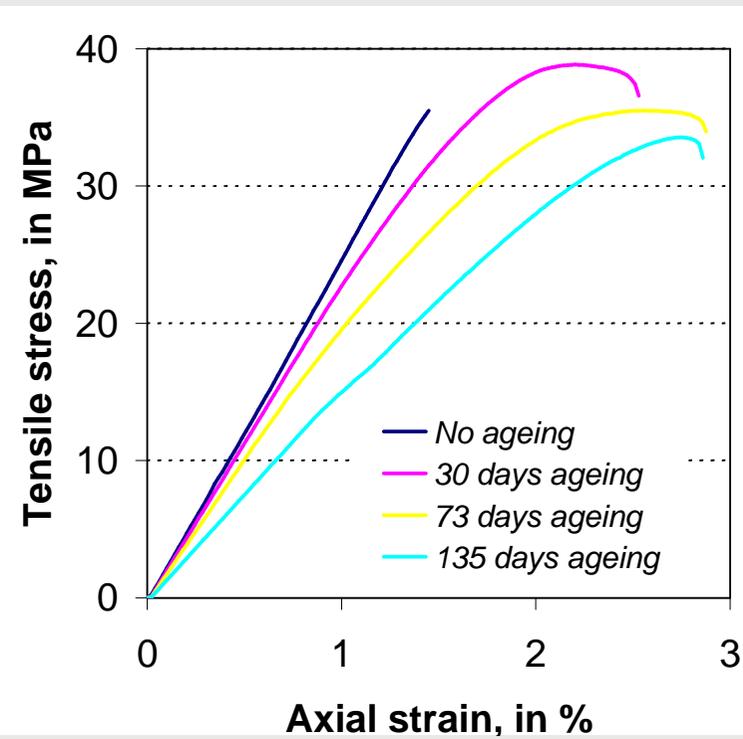
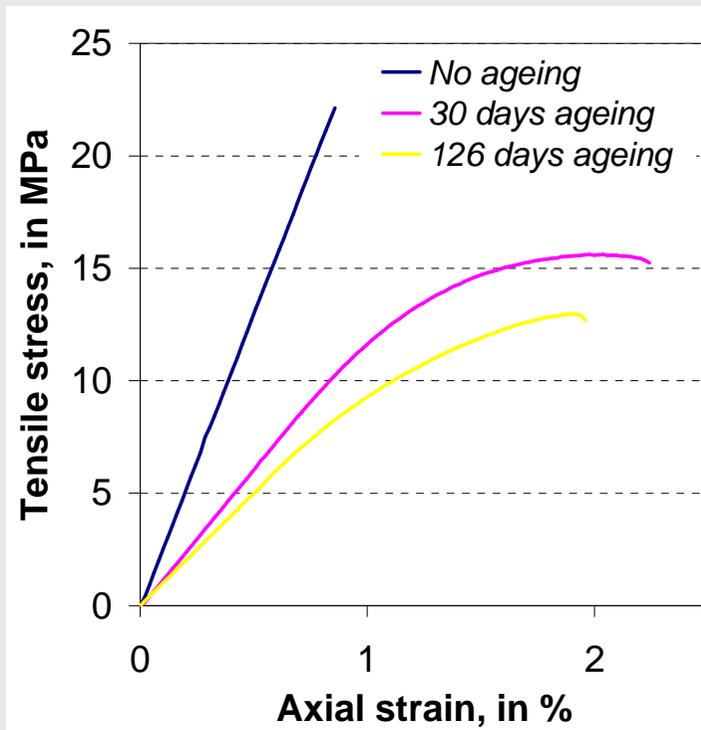
- \* Tensile tests not presented in this study (no evolution was observed)

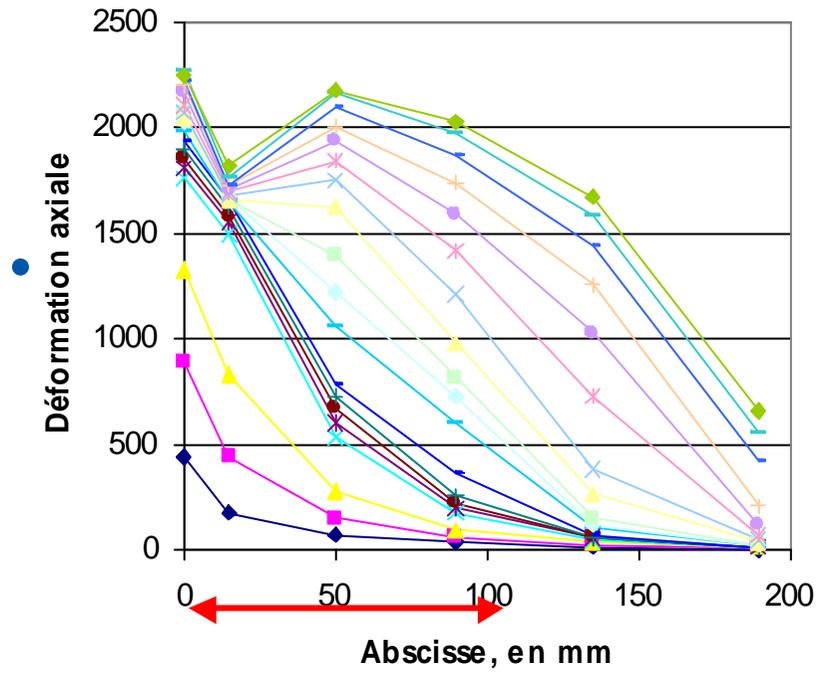
**CONCRETE**

- \* Compressive test (EN 12 390-3)

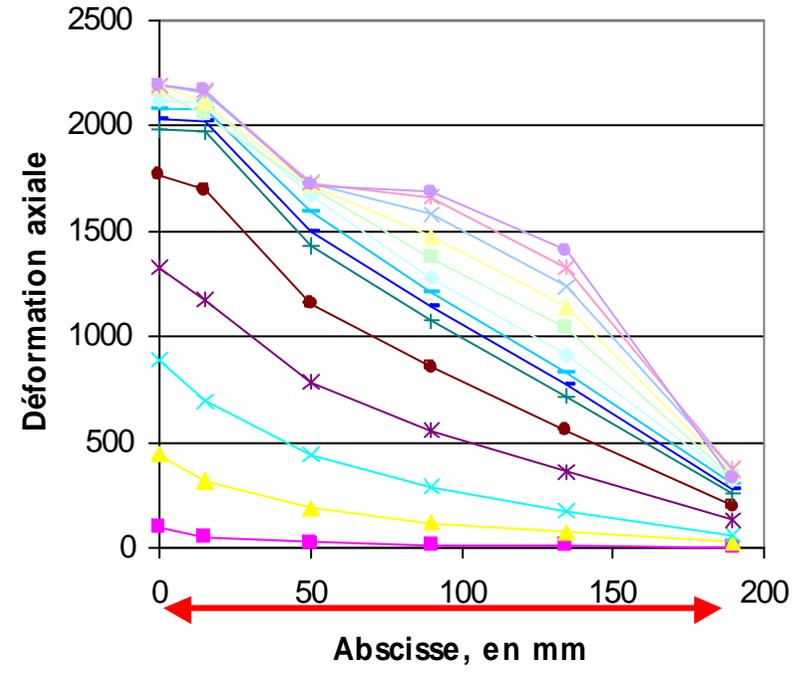


## Adhesive's tensile behaviour

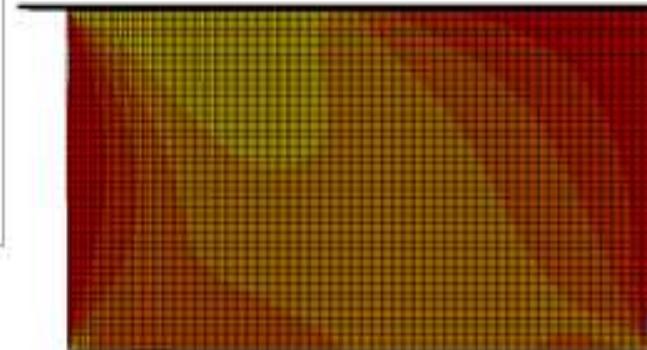
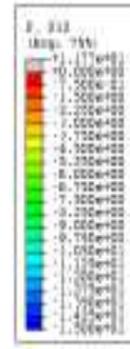
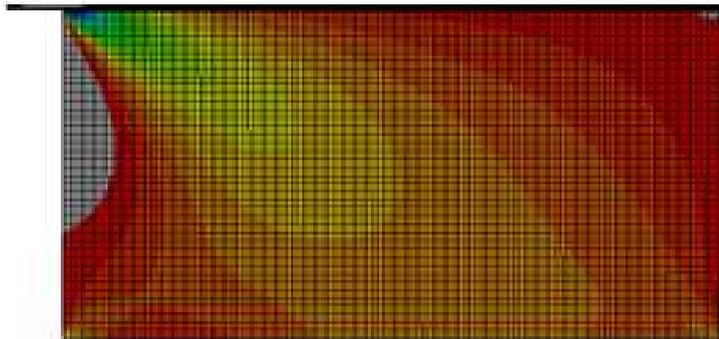
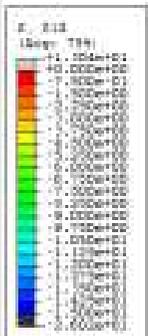


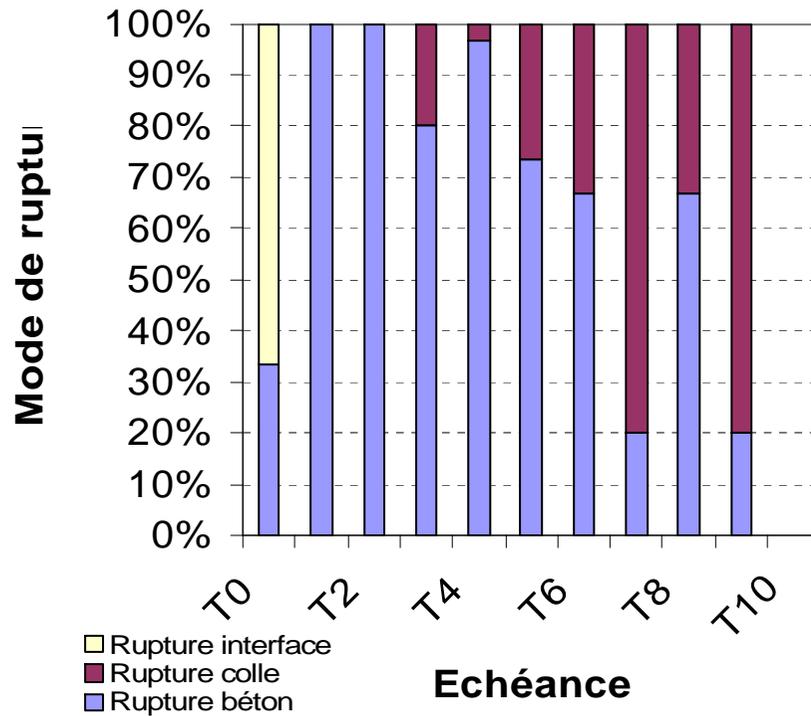


*Essai référence*

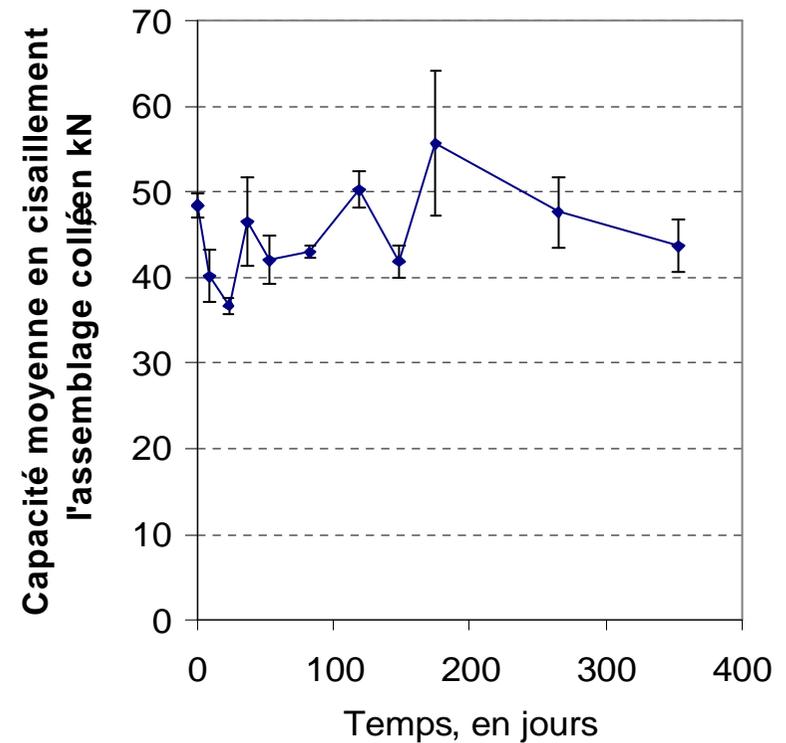


*Essai après 9 mois de vieillissement*





**Évolution du mode de rupture de l'assemblage en cisaillement**

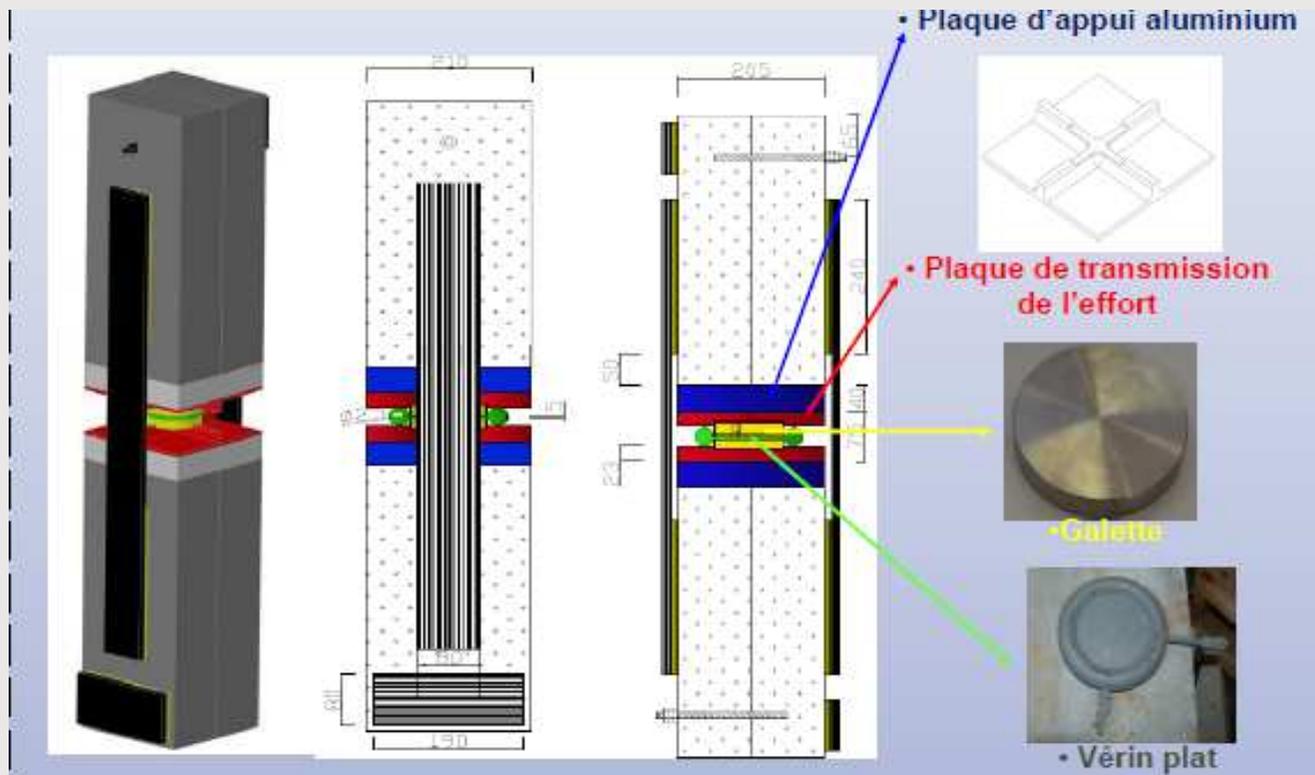


**Évolution de la capacité en cisaillement de l'assemblage collé**

K. Benzarti, S. Chataigner, M. Quiertant, C. Marty, C. Aubagnac, Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays, *Construction and Building materials*, Vol.25: 523-538, 2011.



## Fluage (en cours d'investigation)

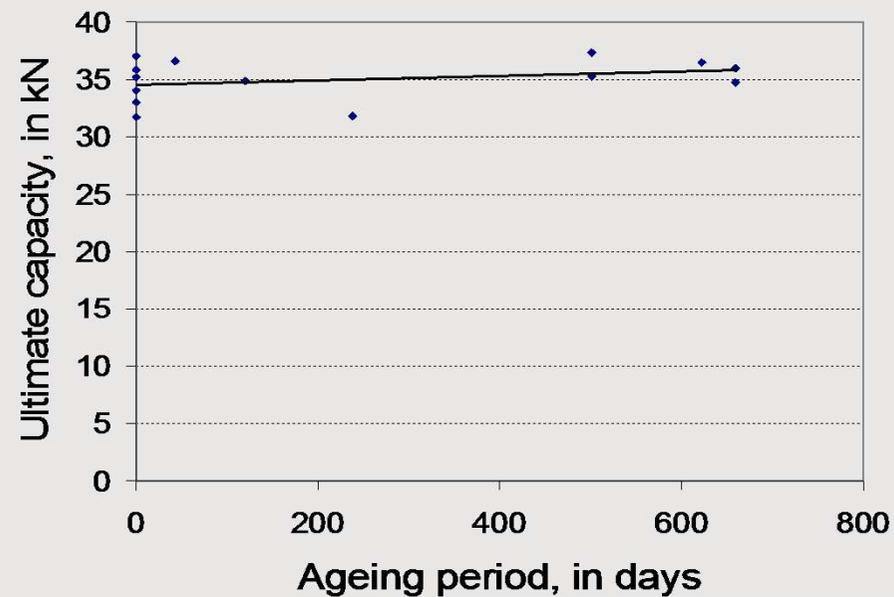


N. Houhou, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, A. Flety, C. Marty, "Analysis of the non-linear creep behaviour of FRP-concrete bonded assemblies", *Journal of Adhesion and Science Technology*, Vol.29(14-15): 1345-1366, 2014



## Durabilité

Comme pour les composites collés sur béton, le vieillissement accéléré est obtenu en conservant les échantillons dans un environnement à 40° C et saturé en humidité. Toutes les ruptures obtenues sont cohésives dans l'adhésif. L'acier rouille autour du renfort collé seulement. Pour la période étudiée (2 ans); aucune dégradation de la capacité n'est observée et ce pour les trois rugosités de surface.



S. Chataigner, A. Gagnon, M. Quiertant, K. Benzarti, C. Aubagnac,  
*Adhesively bonded composite reinforcements for steel structures :  
durability of the stress transfer, CICE 2012, Rome.*

