

Webinaire « Les jeudis de l'AFGC » : Les ponts en matériaux composites



Normalisation Européenne (projet d'Eurocode, CEN/TS 19101: 2022) et travaux en cours

Philippe Jandin (Cerema – DTerSO) : philippe.jandin@cerema.fr

Emilie Lepretre (Univ Gustave Eiffel – Campus de Nantes) : emilie.lepretre@univ-eiffel.fr

Samuel Durand (BE Méca – Nantes) : samuel.durand@cluster-meca.fr

Jean-François Caron (ENPC) : jean-francois.caron@enpc.fr

Le 04 juillet 2024

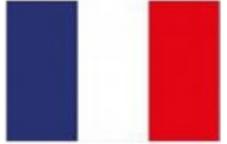
Organisation du CEN/TC 250

CEN/TC 250 « Structural Eurocodes »
(Discussions politiques, stratégiques et coordination des SCs)



**CN P06E - Coordination
Eurocodes structuraux**

afnor
NORMALISATION



Coordination Group
(Préparation plénières TC 250)

WG 1 Policy and guidelines
(N1250)

GC - Groupe de coordination

**GE 1 - Règles et procédures
d'élaboration des Eurocodes et
documents associés**

TC 250 / Sous-Comités

SC 10 Basis of structural design
(Série EN 1990)

SC 1 Actions on structures
(Série EN 1991)

SC 2 Design of concrete structures
(Série EN 1992)

SC 3 Design of steel structures
(Série EN 1993)

**SC 4 Design of composite steel and concrete
structures**
(Série EN 1994)

SC 5 Design of timber structures
(Série EN 1995)

SC 6 Design of masonry structures
(Série EN 1996)

SC 7 Geotechnical design
(Série EN 1997)

SC 8 Earthquake resistance design of structures
(Série EN 1998)

SC 9 Design of aluminium structures
(Série EN 1999)

SC 11 Structural Glass
(Série EN 19100)

Miroir des Sous-Comités

**GE 10 - Groupe d'experts EN 1990
Basis of structural design**

**CN P06A - Bases de calcul des
structures**

**CN EC2 - Calcul des structures en
béton**

**CNC2M - Construction métallique et
mixte**

**CNC2M - Construction métallique et
mixte**

CN P21A - Structures en bois

CN P10B - Maçonnerie

**CN JOG - Justification des
ouvrages géotechniques**

**CN/PS - Règles de construction
parasismique**

**CN C.ALU - Calcul des structures
en aluminium**

CN P78A - Verre dans le bâtiment

Miroir des Working Groups

GE 2 - Constructions existantes

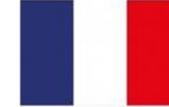
**GE 4 - Calcul des structures en
polymères renforcés de fibres**

**GE 5 - Calcul des structures
membranaires**

**GE 6 - Calcul des structures -
Robustesse**

Organisation du CEN/TC 250

CEN/TC 250 « Structural Eurocodes »
(Discussions politiques, stratégiques et coordination des SCs)



afnor
NORMALISATION

TC 250 / Working Groups

WG 2 Existing Structures
(CEN/TS 17440)

WG 4 Fibre reinforced polymer structures
(CEN/TS 19101)

Luigi Ascione 

WG 5 Membrane Structures
(CEN/TS 19102)

WG 6 Robustness
(CEN/TR Robustness)

Miroir des Working Groups

GE 2 – Constructions existantes

GE 4 - Calcul des structures en polymères renforcés de fibres

Jusqu'en 2024 : Jean-François Caron (ENPC)
Depuis 2024: Samuel Durand (BE Méca)

GE 5 - Calcul des structures membranaires

GE 6 - Calcul des structures - Robustesse

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022

Origines :

- Existence de normes nationales et de documents de référence pour les différents pays membres de l'UE : *Eurocomp (1996), CUR 96 (2003), BD90/05 (2005), DIBt (2005), CNR-DT 205 (2008), ACMA, ...*
- Essor des structures entièrement en matériaux composites au niveau Européen (très peu en France ...)



- Nécessité de développer une norme Européenne harmonisant les règles de calcul, la vérification et la fabrication d'éléments structuraux en matériaux composites pour le domaine du bâtiment et des Ouvrages d'Art.

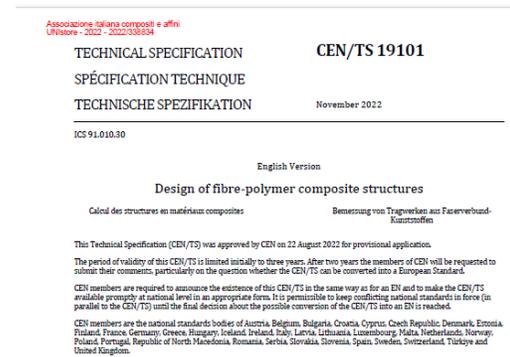
Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022



Les étapes clés :

- **2010** : la communauté européenne (CE) vote le mandat M/466 au CEN/TC 250 pour démarrer la procédure amenant à créer une nouvelle génération d'Eurocodes structuraux;
- **2016** : **'Scientific and Technical Report'** publié par le JRC en janvier 2016 – soumis à enquête publique et à la validation par le CEN/TC250 ;

L. Ascione, J-F. Caron, P. Godonou, K.V. Ijselmuijden, J. Knippers, T. Mottram, M. Oppe, M.G. Sorensen, J. Taby, L. Tromp. « Prospect for new guidance in the design of FRP », JRC Science For Policy Report, EUR 27666 EN, 2016.
- **2016-2022** : Après validation par le CEN/TC250, préparation et publication d'un TS **'Technical Specification'** en novembre 2022 ;



➔ CEN/TS 19101: 2022 « Design of fibre-polymer composite structures »

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022



Les étapes clés :

- **2023** : Travail sur les 'background documents' & 'Worked examples' ;
Contribution GE4 français - publication en cours chez Taylor&Francis
- **2023/2024** : Accord par le CEN/TC250 pour le développement des règles d'exécution (fabrication, installation et maintenance)
Réunion de lancement du GT spécifique 'execution rules' le 05/2024
- **Horizon 2026/2027** : Après une période de 3 ans d'utilisation du TS et prise en compte du retour d'expérience

 vote par le CEN/TC250 et décision pour un passage officiel en Eurocode !

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022

Domaine d'application & organisation du document

➤ Le CEN/TS 19101 s'applique :

- au calcul des bâtiments, ponts et autres structures de génie civil en matériaux composites, y compris les structures permanentes et temporaires ;
- aux éléments composites en PRF (stratifiés, profilés et panneaux sandwich); aux combinaisons d'éléments composites et d'éléments composés d'autres matériaux (structures composites hybrides); aux connexions entre ces éléments (boulonnées, collées, hybrides) ;

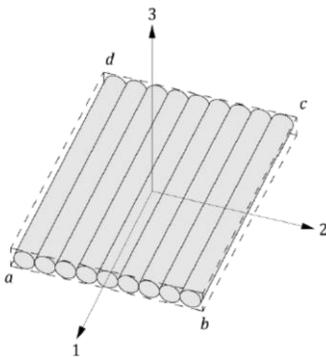


Figure 3.1 — Reference axes (local) for a unidirectional ply

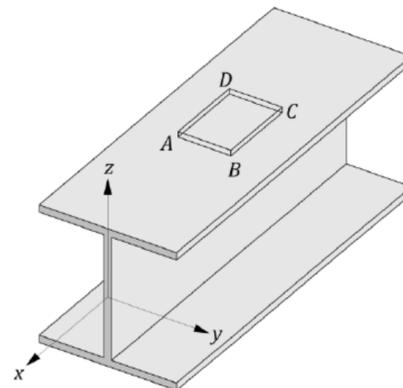
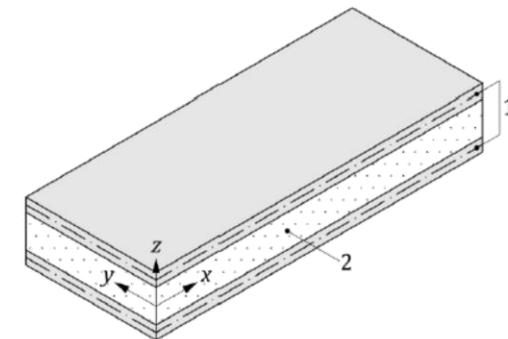
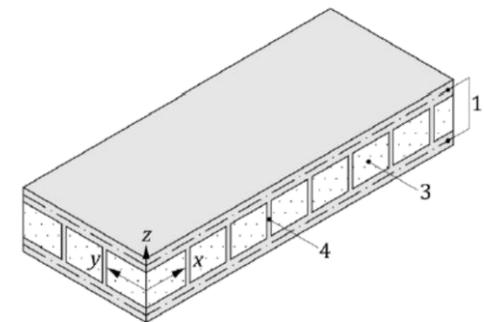


Figure 3.3 — Reference axes (global) for a profile, with reference to a laminate (ABCD, Figure 3.2)



a) Configuration of homogeneous-core sandwich



b) Configuration of web-core sandwich

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022

Domaine d'application & organisation du document



➤ Le CEN/TS 19101 s'applique :

- Aux matériaux composites comprenant des fibres de verre, de carbone, de basalte ou d'aramide et une matrice à base de résines thermodurcissables (polyester, vinylester, époxy ou phénolique); aux matériaux d'âme (mousse polymères et balsa); aux adhésifs thermodurcissables ;

ET *est conforme aux principes et exigences concernant la résistance, l'aptitude au service et la durabilité des structures, aux bases de calcul et aux vérifications données dans l'EN 1990.*

~~➤ Le CEN/TS 19101 **NE** s'applique **PAS** :~~

- ~~➤ aux éléments composite intervenant dans le renforcement externe (lamelles ou tissus PRF collés sur OA, jonc en engravure) ou interne (armatures composites) des structures existantes;~~
- ~~➤ aux câbles composites.~~

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022

Domaine d'application & organisation du document

➤ Semblable à un Eurocode standard :

- 12 Chapitres
- 5 Annexes

CEN/TS 19101:2022 (E)

Contents

	Page
European foreword.....	5
0 Introduction.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	9
3 Terms, definitions, symbols and abbreviations.....	10
3.1 Terms and definitions.....	10
3.2 Symbols and abbreviations.....	21
3.3 Symbols for member axes.....	46
4 Basis of design.....	50
4.1 General rules.....	50
4.2 Principles of limit state design.....	50
4.3 Basic variables.....	50
4.4 Verification by the partial factor method.....	52
4.5 Design assisted by testing.....	61
5 Materials.....	62
5.1 Glass transition temperature.....	62
5.2 Composite materials.....	62
5.3 Core materials.....	64
5.4 Adhesives.....	66
6 Durability.....	67
6.1 General.....	67
6.2 Environmental conditions.....	68
6.3 Effects and measures for specific environmental conditions.....	69
6.4 Effects of combined environmental conditions.....	72
6.5 Measures for connections and joints.....	72
7 Structural analysis.....	73
7.1 Structural modelling for analysis.....	73
7.2 Global analysis.....	80
7.3 Imperfections.....	82
7.4 Methods of analysis.....	86
8 Ultimate limit states.....	88
8.1 General.....	88
8.2 Ultimate limit states of laminates.....	88
8.3 Ultimate limit states of profiles.....	96
8.4 Ultimate limit states of sandwich panels.....	107
8.5 Creep rupture.....	128
9 Serviceability limit states.....	131
9.1 General.....	131
9.2 Deflections.....	131
9.3 Vibrations.....	133
9.4 Matrix cracking.....	134
10 Fatigue.....	134
10.1 General.....	134
10.2 Fatigue actions.....	135
10.3 Fatigue verification.....	135
10.4 Fatigue testing.....	136
11 Detailing.....	138
11.1 General.....	138
11.2 Profiles.....	138
11.3 Sandwich panels and member laminates.....	138
11.4 Bolted connections.....	140
11.5 Adhesive connections.....	143
12 Connections and joints.....	143
12.1 General rules.....	143
12.2 Bolted connections.....	144
12.3 Bolted joints.....	163
12.4 Adhesive joints and connections.....	165
12.5 Hybrid joints and connections.....	170
Annex A (informative) Creep coefficients.....	171
A.1 Use of this annex.....	171
A.2 Scope and field of application.....	171
A.3 Pultruded composite profiles.....	171
A.4 Composite laminates.....	172
A.5 Core materials.....	172
Annex B (informative) Indicative values of material properties for preliminary design.....	174
B.1 Use of this annex.....	174
B.2 Scope and field of application.....	174
B.3 General.....	174
B.4 Fibres.....	174
B.5 Resins.....	175
B.6 Core materials.....	176
B.7 Ply properties.....	178
B.8 Laminate properties.....	188
Annex C (normative) Buckling of orthotropic laminates and profiles.....	191
C.1 Use of this annex.....	191
C.2 Scope and field of application.....	191
C.3 General.....	191
C.4 Elastic buckling of orthotropic laminates.....	192
C.5 Elastic buckling of profiles.....	196
Annex D (normative) Structural fire design.....	215
D.1 Use of this annex.....	215
D.2 Scope and field of application.....	215
D.3 Assumptions.....	215

CEN/TS 19101:2022 (E)

D.4 Basis of design.....	215
D.5 Material properties.....	220
D.6 Tabulated design data.....	229
D.7 Simplified design methods.....	230
D.8 Advanced design methods.....	230
Annex E (informative) Bridge details.....	232
E.1 Use of this annex.....	232
E.2 Scope and field of application.....	232
E.3 General.....	232
E.4 Bridge bearings.....	232
E.5 Expansion joints.....	232
E.6 Parapets.....	234
E.7 Adhesive deck-girder connections.....	234
E.8 Crash barrier fixations.....	234
Bibliography.....	236

Vers un Eurocode « Structures composites » - CEN/TS 19101: 2022

Focus sur des points spécifiques



➤ Calcul aux Etats Limites et méthode des coefficients partiels :

- Cohérence globale des Eurocodes (le TS 19101 s'utilise en lien avec l'EN 1990, l'EN 1991,) ;
- ELU : statiques et flambement, fatigue, fluage MAIS règles différentes entre profilés et panneaux sandwich !
- ELS : déformations, vibrations, ET fissuration !

➤ Assemblages :

- Boulonnés : formalisme repris de l'EN 1993-1-8 (structures en acier) ;
- Collés : possibilité d'utiliser des méthodes d'analyse avancées (méthode EF – VCCT, éléments cohésifs) + critères !

➤ Température d'utilisation :

- La température des matériaux dans les éléments, les connexions et les composants, en conditions de service, doit être supérieure à -40°C et inférieure à $T_g - 20^{\circ}\text{C}$ (T_g onset) !

T_g = température de transition vitreuse des matériaux composites et de l'adhésif



Limite importante pour le choix des matériaux !

Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

Instrumentation sur site et approche Eurocode

➤ Pourquoi cette étude ?

- Les matériaux composites ne sont pas couverts par l'EN1991-1-5 (actions thermiques) ;
- Les spécifications ne sont donc pas valables a priori pour les structures composites ;
- Il s'agit alors d'améliorer la compréhension du comportement thermique des structures composites ;
- Et de proposer une méthode pour l'étude thermique des structures composites, en lien avec les approches de calcul Eurocode



Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

Instrumentation sur site et approche Eurocode

- **Cas d'étude : Passerelle piétonne située à Saint-André-de-Cubzac, France (33)**
 - PRFV (fibres de verre E-glass, matrice polyester) ;
 - Mise en place en 2015 par l'entreprise Janson Bridging ;
 - Calculée selon les recommandations du document CUR 96* ;
 - Constituée de 2 travées isostatiques, de longueur respective 21m et 15m, et de largeur 2,4m ;
 - Poids total de l'ouvrage : 18 tonnes (levage à la grue) – Installation en 4 heures.

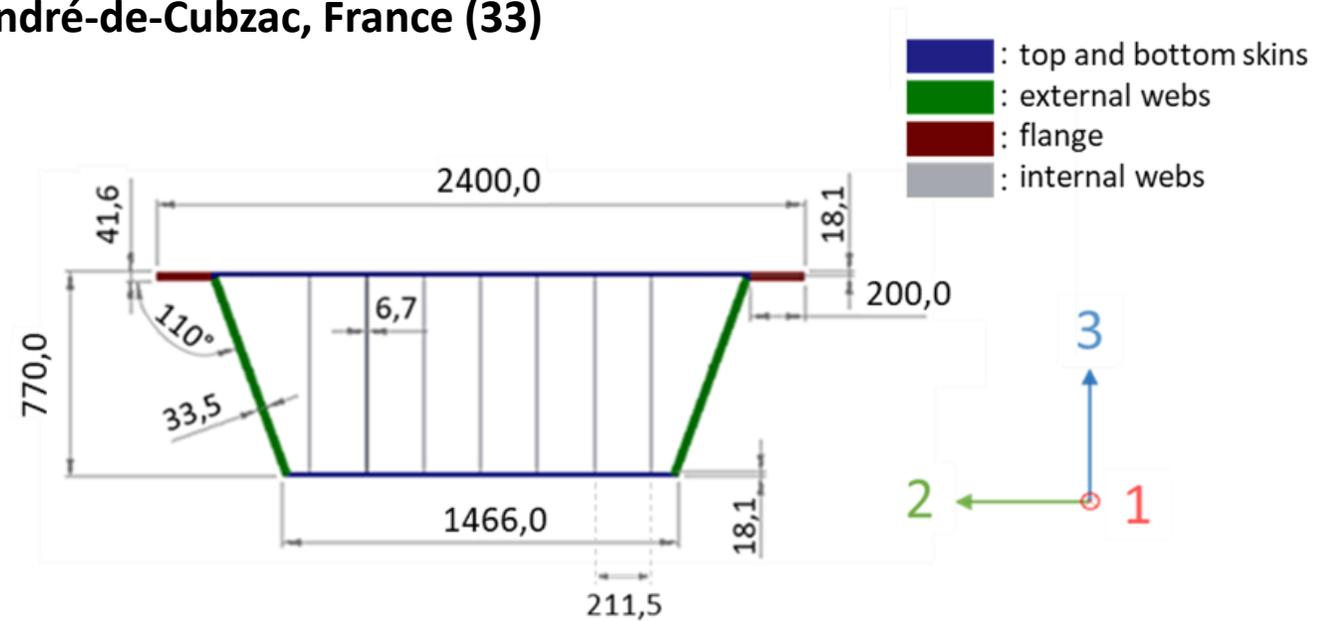
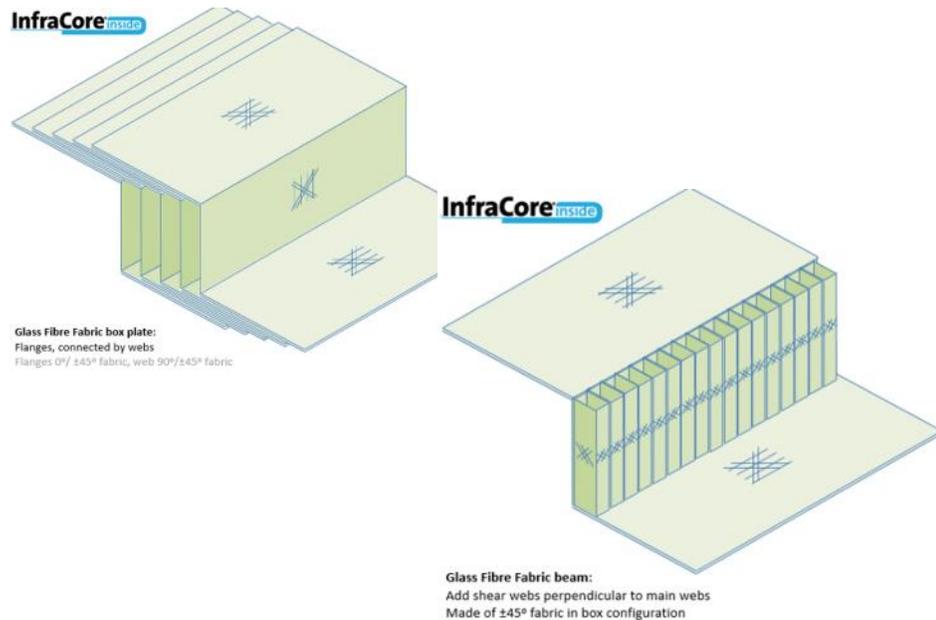


*CUR96 "Recommendation 96, Fibre-reinforced Polymers in Civil Load Bearing Structures". Dutch Recommendation, Netherlands (2003)

Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

Instrumentation sur site et approche Eurocode

- **Cas d'étude : Passerelle piétonne située à Saint-André-de-Cubzac, France (33)**
 - Technologie InfraCore Inside



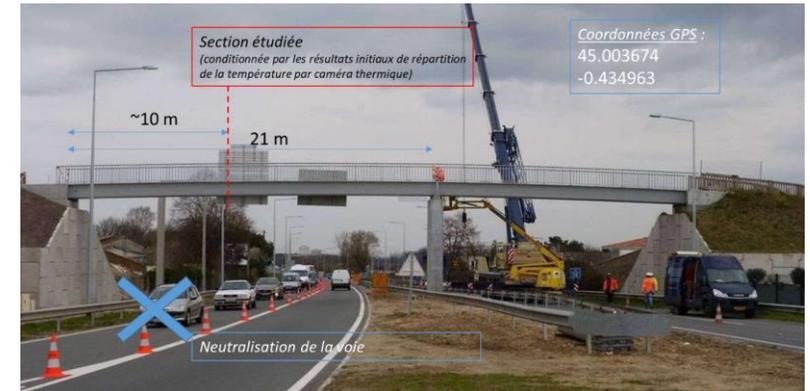
Section transversale de la passerelle

Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

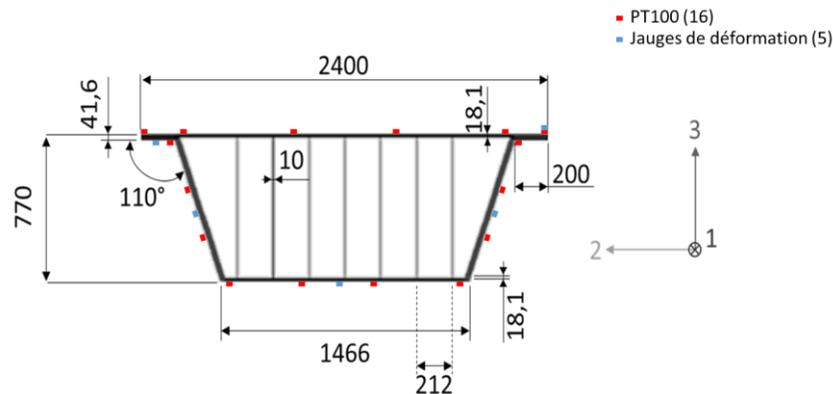
Instrumentation sur site et approche Eurocode

➤ Instrumentation envisagée : sur la passerelle

- Caméra thermique ;
- Jauges de déformations ;
- Capteurs de mesure locale de température (PT100) ;
- Suivi des déplacements par tracker laser et corrélation d'images ;
- Anémomètre ;
- Capteurs de déplacements pour suivi à long terme.



Section instrumentée



Section étudiée – localisation des capteurs

Objectifs :

- Obtenir le profil de température dans une section courante de l'OA ;
- Corréler ce profil aux conditions environnementales (exposition au vent, au rayonnement solaire).

Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

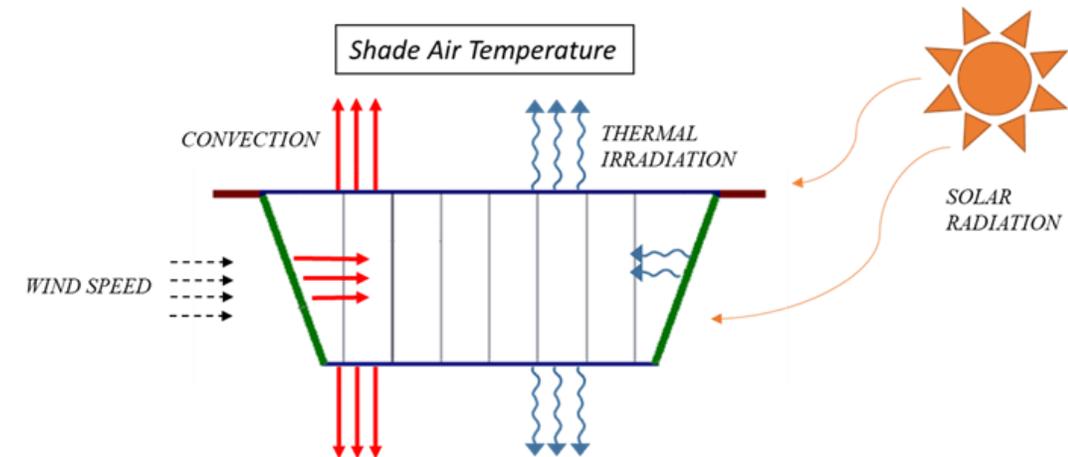
Instrumentation sur site et approche Eurocode

➤ Instrumentation envisagée : sur plaque de référence

- Plaque en aluminium laquée noir mat sur une face ;
- Instrumentée par 3 PT100 ;
- Support permettant différentes inclinaisons ;
- Protection au vent dominant possible.



Emissivité (ϵ_N) de la plaque : **0,94**



Conditions environnementales à prendre en compte pour le comportement thermique de la passerelle

- **Objectif** : déterminer les conditions réelles de rayonnement solaire et de convection subies par les différentes faces instrumentées de la passerelle (méthode d'analyse inverse).

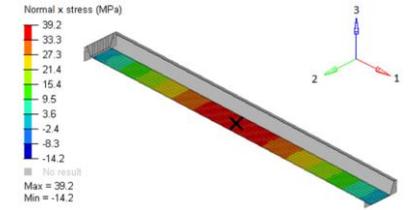
Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

Instrumentation sur site et **approche Eurocode**

➤ **Approche Eurocode : dimensionnement vis-à-vis des charges mécaniques**

- Proposition d'un WE intégré au 'Background document' du TS 19101 + publication chez Taylor&Francis (en cours)
- Possibilité d'utiliser la micromécanique pour prédire les propriétés mécaniques en phase avant-projet ;
- Modèle EF 3D (éléments de coque, 1 seule épaisseur, propriétés élastiques orthotrope)
- Combinaison de charge considérée (ELU) : poids propre + véhicule de service ;
- Vérifications effectuées selon les recommandations du TS 19101

➤ **Objectif** : montrer l'intérêt et la cohérence du TS 19101 + sa compatibilité avec les Eurocodes existant.



Contrainte de traction en sous-face pour la combinaison de charge considérée (modèle EF - design value)

ULS_2	Type of verification	Ea/Ra	Check
Face sheet	Tensile failure	0,3	✓
	Crushing	0,3	✓
	Local buckling	0,2	✓
Internal web	Shear failure	0,1	✓
	Local buckling due to shear	0,2	✓
	Bending failure	0,3	✓
	Local buckling due to in-plane bending	0,3	✓
	Crushing due to transverse compression	~0	✓
	Buckling due to transverse compression	0,1	✓
External web	Shear failure	0,1	✓
	Local buckling due to shear	~0	✓
	Bending failure	0,3	✓
	Local buckling due to in-plane bending	~0	✓
	Crushing due to transverse compression	~0	✓
	Buckling due to transverse compression	~0	✓
Global stability	Buckling	-	✓

Vérifications effectuées suivant les recommandations du TS 19101

Etude thermique (en cours) d'une passerelle composite en fibres de verre

Instrumentation sur site et approche Eurocode

➤ Approche Eurocode : dimensionnement vis-à-vis de la température

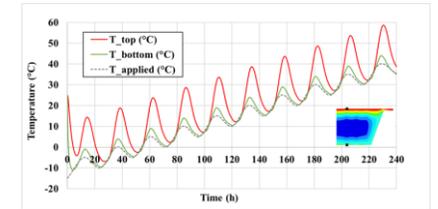
- Modèle thermique 2D mis au point ;
- Utilisation de l'EN1991-1-5 pour la température ambiante ;
- Données d'entrée à fiabiliser ;

➤ Objectif :

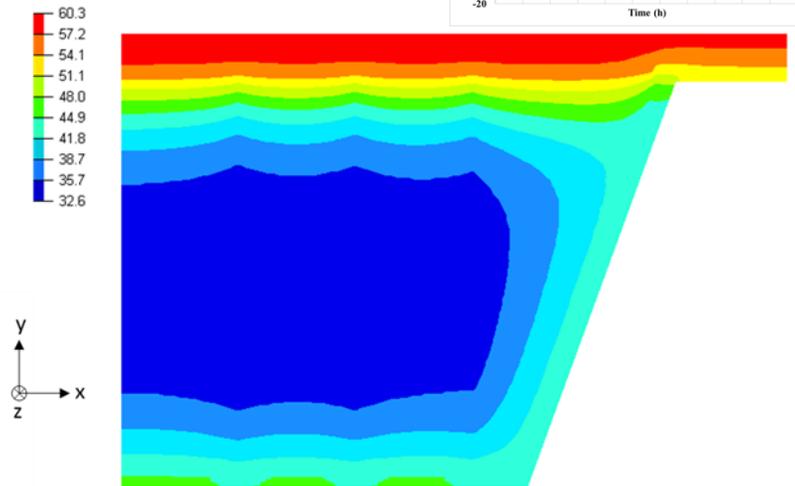
- Construire un modèle thermomécanique capable de représenter le comportement réelle de ce type de passerelle en température ;
- Faire le lien avec les règles de dimensionnement actuel (EN1991-1-5).

➤ A garder en tête :

- la règle du $T_{max} < T_g - 20^\circ\text{C}$ peut être très dimensionnante ;
- Les contraintes internes d'origine doivent être prises en compte.



Temperature (°C)



Distribution de température dans la section (température ambiante de 40°C)*

*E. Lepretre, P. Jandin, N. El Bourkadi, S. Durand and J-F. Caron, « Design approach for FRP structures : a focus on thermal design », 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2020), July 2021

Perspectives

- **Etude thermique de la passerelle de Saint-André-de-Cubzac :**
 - Instrumentation prévue la semaine 40 (du 30/09 au 04/10) ;
 - Exploitation, mise en place des modèles, recommandations ;

- **WG4 :**
 - Échanges avec le WG4 concernant l'étude menée sur la passerelle ;
 - Prise en compte des retours suite à période d'essais du TS ;
 - 'Execution rules' en cours de rédaction ;

- **Valorisation du travail :**
 - Par le biais d'articles scientifiques et conférences ;
 - Guide UGE-CEREMA ? Guide AFGC ?



Webinaire « Les jeudis de l'AFGC » : Les ponts en matériaux composites

Normalisation Européenne (projet d'Eurocode, CEN/TS 19101: 2022) et travaux en cours



Merci pour votre attention, n'hésitez pas à nous contacter

Philippe Jandin (Cerema – DTerSO) : philippe.jandin@cerema.fr

Emilie Lepretre (Univ Gustave Eiffel – Campus de Nantes) : emilie.lepretre@univ-eiffel.fr

Samuel Durand (BE Méca – Nantes) : samuel.durand@cluster-meca.fr

Jean-François Caron (ENPC) : jean-francois.caron@enpc.fr