

# Matériaux composites à matrices polymères

*Ingénieur en génie civil et professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, Patrice Hamelin est directeur du Laboratoire de génie civil et d'ingénierie environnementale (LGCIE) et responsable du groupe de travail matériaux composites à l'Association française de génie civil (AFGC).*

En matière de matériaux de construction, la tendance depuis une quinzaine d'années est au remplacement progressif des matériaux classiques par ce qu'on appelle les *composites à matrices polymères*. Cependant, on peut noter un retard du secteur de la construction par rapport aux autres secteurs industriels d'un côté, et de la France par rapport aux pays du Nord de l'autre. Ce retard demande à être comblé et cela constitue une promesse de croissance pour la demande en matériaux polymères. L'évolution technique du bâtiment est actuellement portée par l'évolution de la demande – importance des critères de

développement durable, mise en sécurité, sobriété énergétique – plus que par celle de l'offre technique – progrès dans la maîtrise scientifique de la formulation apportée par la chimie des polymères ou la compréhension de la cristallisation des matrices minérales. Les matériaux composites à matrices polymères élargissent considérablement la capacité de répondre aux nouvelles exigences des consommateurs.

Une remarque préalable pour remettre en mémoire la dimension économique impressionnante du secteur de la construction, que ce soit en termes de chiffre d'affaires ou en termes d'emplois : il

correspond, au plan national, à un chiffre d'affaires de 131,8 milliards d'euros pour le bâtiment, 55,8 milliards d'euros pour les travaux publics et concerne 1 300 000 personnes dans le bâtiment, 270 000 salariés dans le bâtiment et travaux publics (au sujet du BTP, voir aussi le *Chapitre de J. Méhu*).

Une première partie de ce chapitre posera les idées générales sur le rôle des matériaux composites à matrices polymères dans la construction ; une deuxième présentera trois thèmes qui illustrent l'importance des matériaux composites pour le respect des critères de Grenelle de l'environnement pour la construction (voir le *Chapitre de J.-M. Michel*). La référence au Grenelle indique bien que les approches diffèrent d'un pays à un autre ; la « vieille Europe » a ainsi d'autres options que les États-Unis ou que d'autres continents.

## 1 Les deux grandes classes de matériaux composites et la diversité de leurs usages pour la construction

### 1.1. Intérêt des composites à matrices polymères pour la construction

Un matériau composite est l'association de charges ou sous-structures (souvent minérales) avec des matrices<sup>1</sup> polymères qui sont

1. Dans un matériau composite, une matrice est une matière (plastique, métal, céramique...) servant à transférer les efforts au renfort (fibres, billes...), qui est plus rigide et plus résistant.

thermodurcissables<sup>2</sup> ou thermoplastiques<sup>3</sup>. Les principaux avantages des composites, déjà largement utilisés pour le développement industriel, par exemple dans l'automobile, l'aéronautique (voir notamment le *Chapitre de J.-P. Viguier*) ou encore la robotique, sont la facilité de transformation, la résistance et la rigidité qui permettent de réduire le poids propre des ouvrages pour une résistance donnée. Ils présentent aussi de bonnes propriétés de durabilité au sens traditionnel du terme, à savoir une forte résistance à la corrosion et des propriétés physiques particulières comme celles de pouvoir être amagnétiques ou thermiquement isolants.

Les matériaux composites sont recherchés pour la construction dans deux domaines différents : les matériaux d'enveloppe – ce qu'on appelle le second œuvre – et les matériaux structuraux (ossature) chargés de supporter les efforts pour la tenue du bâtiment et son exploitation. On les classe en matériaux composites « souples » d'une part et « rigides » d'autre part.

### 1.2. Les composites souples

Les composites souples sont des matrices thermoplastiques avec fibres de polymère

2. Un matériau plastique thermodurcissable durcit progressivement sous l'action de la chaleur pour atteindre un état solide irréversible.

3. Un matériau thermoplastique se ramollit lorsqu'il est chauffé au-dessus d'une certaine température et qui, en dessous, redevient dur.

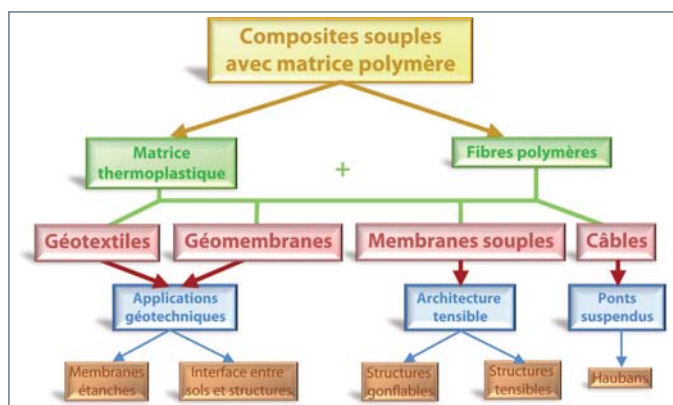


Figure 1

La famille des composites souples avec matrice polymère et leurs applications.



Figure 2

De nombreux ponts tiennent avec des câbles en composite.

(Figure 1). Ils permettent la réalisation d'architectures tensiles, comme des membranes souples pour réaliser des structures gonflables telle que des couvertures de stades (voir les *Chapitres de J.-P. Viguier* et de *G. Némox*) ; ils peuvent aussi donner lieu au développement de câbles ouvrant la voie aux applications d'infrastructures telles que les ponts suspendus (Figure 2). Les composites souples peuvent aussi être des géotextiles ou des géomembranes, matériaux d'interfaces entre le bâtiment, l'habitat ou l'ouvrage et le

milieu naturel – généralement le sol. Les conditions de sol ou de terrain ne sont en effet pas toujours adaptées à la construction de routes ou de fondations de bâtiments. Les membranes vont modifier la répartition des charges et assurer la durabilité des talus en termes de tenue dans le temps et de résistance.

### 1.3. Les composites rigides

Les composites rigides sont des matrices thermodurcissables renforcées en général par des charges minérales (Figure 3). Ils permettent de

Figure 3

La famille des composites rigides et leurs applications.

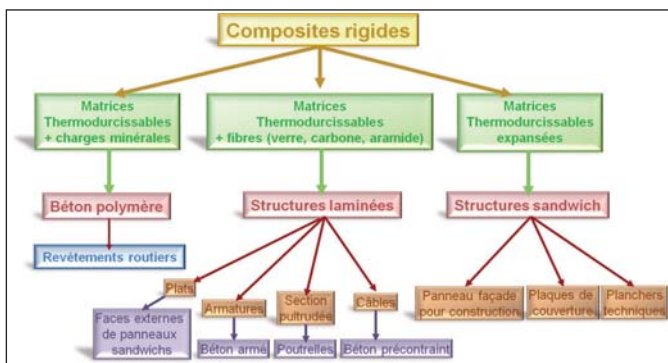


Figure 4

Tuyauteries anti-corrosion pour le génie chimique et le génie industriel.



réaliser des « bétons de polymères » ou des revêtements routiers comme les bétons de ville quand ils sont associés à des fibres telles que la fibre carbone-aramide (voir le *Chapitre de G. Némoz*). En outre, les composites rigides fournissent des armatures ou des éléments de structure porteurs tels que le profilé<sup>4</sup>.

On réalise avec ces composites des structures que l'on appelle matériaux stratifiés, qui sont des empilements de couches et dont les applica-

tions sont la réalisation d'éléments d'enveloppe tels que les panneaux de façade, qui sont autoporteurs et doivent en même temps posséder des propriétés d'isolation acoustique, phonique et thermique. Après expansion, les matrices thermodurcissables peuvent être insérées entre deux plaques de matériaux selon le principe du sandwich ; elles jouent alors à la fois un rôle mécanique et un rôle thermique.

Par ailleurs, les composites durs sont utilisés pour la fabrication d'une variété de composants intervenant dans la construction. Dans

4. Un profilé est un matériau auquel on a donné une forme déterminée.



Figure 5

Bâtiment entièrement réalisé en composite.

Figure 6

Les profilés pultrudés, des demi-produits industriels composites.

les usines chimiques, par exemple, elles constituent des tuyauteries anti-corrosion (Figure 4) ; elles constituent aussi le matériau verre polyester pour la fabrication de panneaux.

Le bâtiment montré sur la Figure 5 est une maison développée par la société Impact Design, donnant une vision quelque peu futuriste de ce que pourrait être une cellule d'habitation. On pourrait imaginer qu'elle soit mobile et qu'elle puisse suivre l'évolution du soleil dans la journée par un déplacement des cellules. Ce procédé a été déjà développé industriellement.

Les composites rigides sont également adaptés à la réalisation des structures traditionnelles en acier, comme les profilés « pultrudés »<sup>5</sup> pouvant adopter différentes géométries, avec des renforts bi- ou tri-dimensionnels (Figure 6). Les composites en



5. La définition de ce terme technique est reportée au paragraphe 2.2 de ce chapitre.



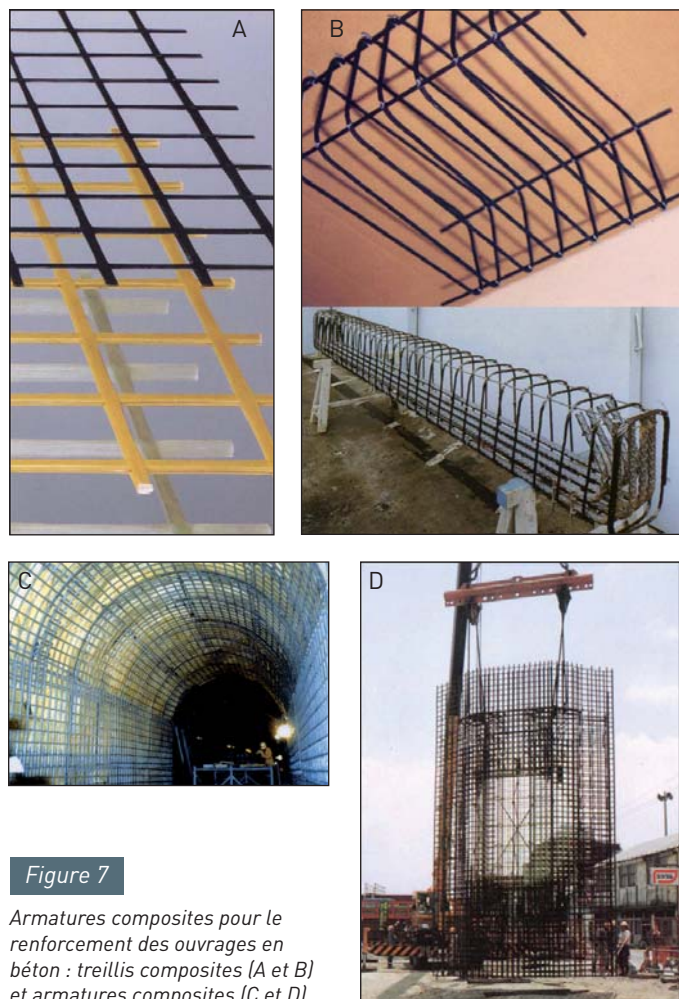


Figure 7

Armatures composites pour le renforcement des ouvrages en béton : treillis composites (A et B) et armatures composites (C et D).

verre/carbone<sup>6</sup>, verre/résines polyesters ou vinylesters sont capables de remplacer l'acier comme armatures de béton armé. Pour certaines applications, comme la réalisation de tunnels pour lesquelles il y a lieu de déformer

6. Au sujet des fibres de carbone, voir le *Chapitre de J.-P. Viguier* de cet ouvrage, ainsi que l'ouvrage *La chimie et le sport*. Partie 3 : « Les matériaux de la performance ». Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2011.

les armatures, les solutions composites, plus facilement formables, sont nettement mieux adaptées que l'acier (Figure 7).

Malgré tous les atouts des matériaux composites, les matrices cimentaires traditionnelles chargées d'ions minéraux restent majoritairement utilisées (à propos des bétons performants, voir le *Chapitre d'A. Ehrbacher*). Mais les bétons à très haute performance, nécessaires pour des conditions techniques exigeantes, se fissurent, entraînant des problèmes de corrosion, de ruptures, et donc de durabilité au sens « durée de vie ». L'incitation à développer l'utilisation des matériaux composites est donc indubitablement là.

Des matrices cimentaires peuvent être utilisées pour la fabrication de matériaux composites en lieu et place des matrices polymères ; des fibres de carbone<sup>6</sup> ou des fibres polymères sont utilisées comme charges. Un exemple en est le Ductal<sup>®</sup>, un béton à très hautes performances (200 MPa de résistance) ; pour qu'il reste utilisable sans subir de rupture explosive ou présenter des risques d'inflammation, on rajoute des fibres de différentes natures, métalliques ou polymères (Figures 8 et 9).

#### 1.4. Les obstacles techniques et psychologiques au développement des nouveaux matériaux dans la construction

Pour que les matériaux composites s'imposent dans la profession du BTP, il ne suffit

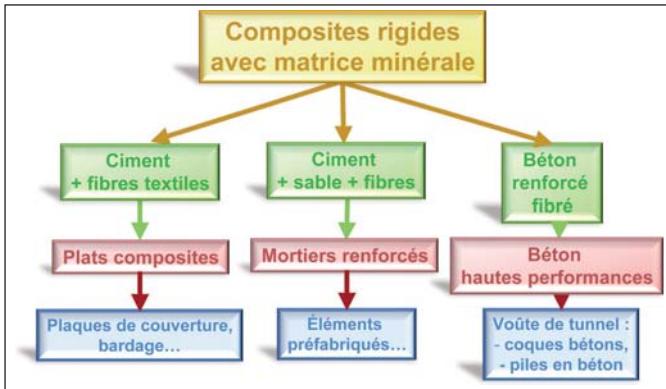
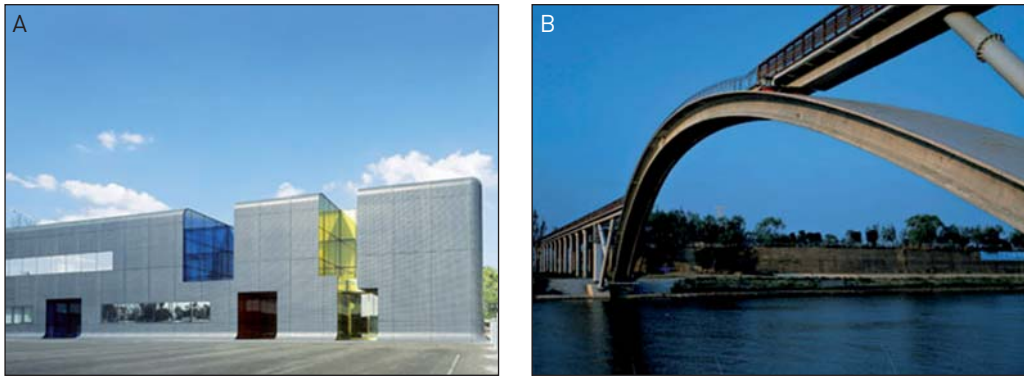


Figure 8

La famille des composites rigides à matrice minérale et leurs applications.



pas qu'ils soient performants, il faut aussi que leurs qualités soient portées à la connaissance des responsables du choix des matériaux – les concepteurs – et acceptées avec un parfait degré de confiance ; il faut aussi que soit présente chez tous une réelle motivation de progrès technique (Figure 10).

Une première série d'éléments qui freinent l'introduction des nouveaux matériaux dans la profession est à trouver dans le type d'informations qui parvient aux décideurs, qui sont souvent incomplètes ou même trompeuses :

- la nature des informations techniques données aux concepteurs. On leur fournit en général les propriétés mécaniques « instantanées »



Figure 9

A) Centre-bus de Thiais en Ductal® ; B) Passerelle de Séoul en Corée réalisée en Ductal®, un composite fibre/ciment résistant à toute épreuve ; C) détail d'un panneau en Ductal®, Centre-bus RATP (France).

alors qu'ils ont besoin de prévoir les comportements à long terme – une dizaine d'années pour l'habitat, une centaine pour un ouvrage d'art – qui sont le cadre dans lequel travaille le BTP ;

- la distorsion du discours de la presse technique qui souvent, cherche d'abord à flatter le lecteur en mettant en avant, pour promouvoir les nouveaux matériaux, des applications de très haute technologie comme

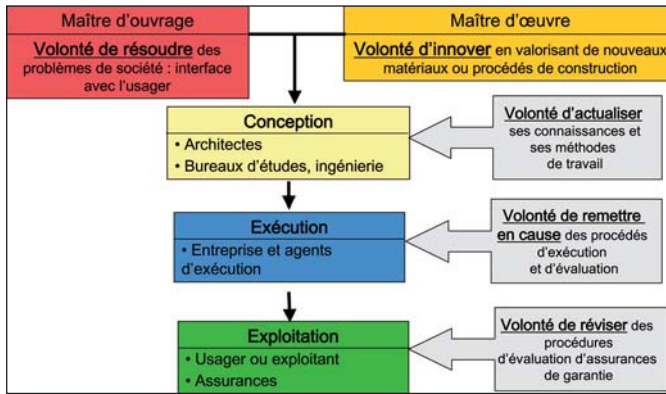


Figure 10

Innovation dans la conception et la réalisation d'un ouvrage en génie civil.

la robotique, le spatial, etc. Ceci tend à créer un effet de mode, éventuellement techniquement infondé, illustré par la « black fashion » qui voudrait tout peindre en noir pour faire croire que l'on va s'approprier la performance d'une raquette de tennis ou d'une paire de skis de hautes technologies.

Un autre problème est, bien entendu, le coût élevé des composites. À l'évidence, la fibre de carbone ou de la résine époxy<sup>7</sup> ne se produiront pas au prix de l'acier (0,50 €/kg) pour faire un béton de 1 €/kg. C'est le cercle vicieux habituel : les prix pourront baisser si les tonnages augmentent ; ils augmenteront si les prix baissent !

On doit aussi reconnaître qu'un important obstacle à la généralisation du recours aux matériaux composites se trouve dans l'état d'esprit conservateur – trop conservateur – qu'on constate chez les professionnels. C'est que les ouvrages en béton ou béton armé de la construction traditionnelle permettent des réalisations très largement satisfaisantes, et les méthodes de calcul et de dimensionnement permettant de prédire

leurs performances sont bien maîtrisées en termes de durabilité et de sécurité entre autres. Compte tenu de l'importance des enjeux, on peut comprendre la prudence qui préside à la décision de choisir un nouveau matériau, décision qui comporte toujours une prise de risque.

Ces difficultés portent une conclusion très claire : pour développer l'utilisation des nouveaux matériaux dans la construction, il faut qu'existe une vraie volonté de recherche de la rupture technologique et une volonté partagée par tous les acteurs : maître d'ouvrage, architecte, maître d'œuvre, bureau d'étude, entreprise chargée de l'exécution, organismes de contrôles sans oublier les usagers de l'exploitation. Cette volonté générale n'est pas facile à obtenir, compte tenu de la diversité des acteurs impliqués aux intérêts et engagements souvent différents ; elle exigerait des efforts accrus de formation mettant l'accent sur l'innovation en génie civil ainsi, certainement, qu'une rigueur accrue sur les méthodes d'évaluation des risques et de suivi des ouvrages.

## 2 Les multi-matériaux dans le contexte du développement durable (Grenelle de l'environnement)

### 2.1. Objectifs de développement durable et multi-matériaux

Les principaux textes qui sous-tendent le présent chapitre sont les suivants :

7. Voir la note de bas de page 9 du *Chapitre de D. Gronier*.



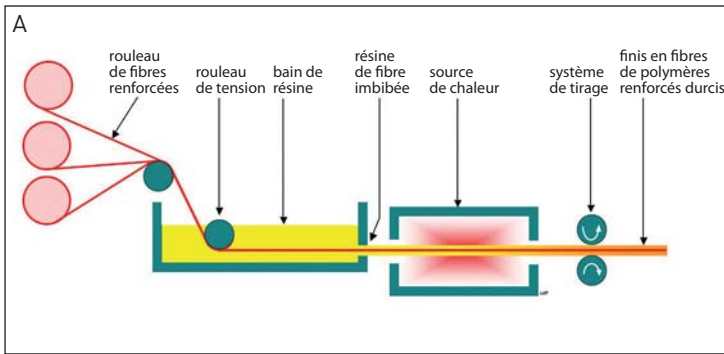


Figure 11

A) Banc de pultrusion.  
B) Différentes sections géométriques de barres composites pultrudées.

- loi (octobre 2008) relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement : réduction des consommations d'énergie des bâtiments ;

- loi (juillet 1976) en relation avec la directive européenne SEVESO : directive du 31 juillet 2003 relative à la présentation des risques technologiques et naturels ;

- réduction de la vulnérabilité des bâtis vis-à-vis des actions sismiques [circulaire du 26 avril 2002] : mise en sécurité du patrimoine existant ;

- décret 15 mars 2010 relative à l'utilisation du bois dans certaines constructions : procédés constructifs multi-matériaux bois-composites.

Pour se mettre en conformité avec les objectifs de ces textes, la voie privilégiée par les divers départements de recherche du génie civil est de combiner des matériaux aux performances complémentaires (multifonctionnalité) et d'autre part de chercher à développer des technologies d'assemblages, c'est-à-dire d'approfondir les concepts et les techniques de fonctionnalisation de surface ou de collage. Les critères du développement durable conduisent à chercher l'optimum des durées de vie (typiquement, il faut prévoir sur cent ans) et à donner des éléments de réponse sur la fin de vie des

matériaux (recyclage, coût énergétique) (à propos du recyclage, voir le **Chapitre de J. Méhu**).

## 2.2. Des composites pour les performances thermiques

Les plaques ou les profilés pultrudés<sup>8</sup> en composite « Schöck ComBAR® » sont susceptibles de remplacer les armatures des fers à bétons, et ceci permet de maîtriser les ponts thermiques<sup>9</sup>. La **Figure 11** schématise un banc de pultrusion ; il est possible de fabriquer en continu des profilés de sections géométriques variées. Les propriétés mécaniques de résistance à la traction sont caractérisées par 550 N/mm<sup>2</sup> (newton par millimètre carré) pour un acier de construction classique et 1 000 N/mm<sup>2</sup> pour le composite, soit un gain de résistance par un facteur deux. La conductivité thermique est de 60 W/mK pour l'acier à béton, mais cent fois plus faible pour le composite (à propos de la conductivité des matériaux, voir le **Chapitre de**

8. Le terme pultrusion, qui provient de « pull » et « extrusion », désigne un procédé de moulage continu dans la fabrication de matériaux composites à section constante.

9. Les ponts thermiques sont des zones de déperdition thermique dans l'enveloppe des bâtiments.

Tableau 1

Comparaison des caractéristiques de Schöck Combar® et de l'acier.  
HA = haute adhérence.

Caractéristiques	Acier HA Fe E500	Acier inoxydable HA	Schöck ComBAR® (HA)
Résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	550	550	1 000
Limite d'élasticité (N/mm <sup>2</sup> )	500	500	1 000
Contrainte état de service (N/mm <sup>2</sup> )	286	286	250 (= 0,5 % d'extension)
Contrainte état limite (N/mm <sup>2</sup> )	435	435	337
Allongement en charge de service	0,18 %	0,18 %	0,42 %
Module d'élasticité (N/mm <sup>2</sup> )	200 000	160 000	60 000
Contrainte d'adhérence (20/25 (N/mm <sup>2</sup> ))	2,3	2,3	2,3
Contrainte d'adhérence (30/37 (N/mm <sup>2</sup> ))	3,0	3,0	3,0
Contrainte d'adhérence (40/50 (N/mm <sup>2</sup> ))	3,7	3,7	3,7
Recouvrement (mm)	Classe d'expos	Classe d'expos	ds + 1 mm
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	7,85	7,85	2,2
Conductivité thermique (W/mK)	60	15	< 0,5
Coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha \cdot 10^5/K$	1,0	1,2	0,6 (axial), 2,2 (radial)
Résistivité ( $\Omega$ cm)		$7,5 \cdot 10^3$	$> 10^{14}$
Magnétisme	oui	très faible	non

X2

:100

**J.-C. Bernier**). Les propriétés de résistance comme les propriétés thermiques sont ainsi considérablement améliorées quand on passe de l'acier au composite (**Tableau 1**).

Du fait de ses qualités mécaniques, l'utilisation du béton armé composite apparaît ainsi comme plus performante que celle du béton armé acier pour la réalisation des structures.

La différence des comportements – diagramme élasto-plastique avec phénomène de plastification pour l'acier Fe550 mais comportement quasi-linéaire avec rupture brutale pour le composite – entraîne cependant une réelle difficulté (**Figure 12**), en ce que la méthode de dimensionnement des structures en composite ne pourra pas être celle

qui est pratiquée aujourd'hui dans les Eurocodes<sup>10</sup> adaptés aux structures acier. Il est nécessaire que de nouveaux textes pour les Euro codes soient écrits pour permettre aux architectes d'utiliser des règles de calcul de dimensionnement. D'une nature réglementaire autant que technique, cette difficulté correspond à un réel obstacle pratique.

Les ponts thermiques étant largement dus aux armatures au niveau des balcons où un transfert direct de chaleur vers l'extérieur prend place, ils pourront être supprimés ou fortement atténués par l'utilisation des composites qui permettent ainsi d'atteindre les objectifs d'isolation thermique fixés.

### 2.3. Mise en sécurité de l'habitat et maîtrise du risque sismique

Du fait de leurs excellentes performances, les matériaux composites permettent l'amélioration de la sécurité de l'habitat par rapport aux matériaux traditionnels, le béton et l'acier. Ces qualités, si l'on en prend conscience, devraient contribuer à briser

10. Les Eurocodes sont les normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil. Ils ont pour but d'harmoniser les techniques de construction en Europe afin de permettre le libre accès des entreprises de travaux ou des bureaux d'études techniques aux marchés des autres États membres. Ils sont développés par le Comité européen de normalisation (CEN).

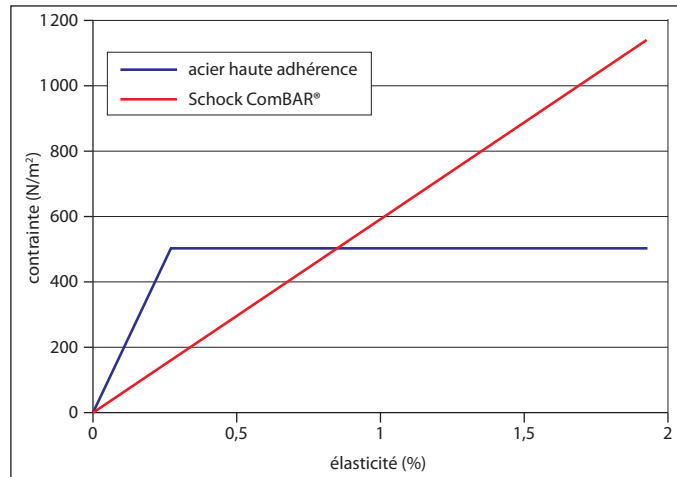


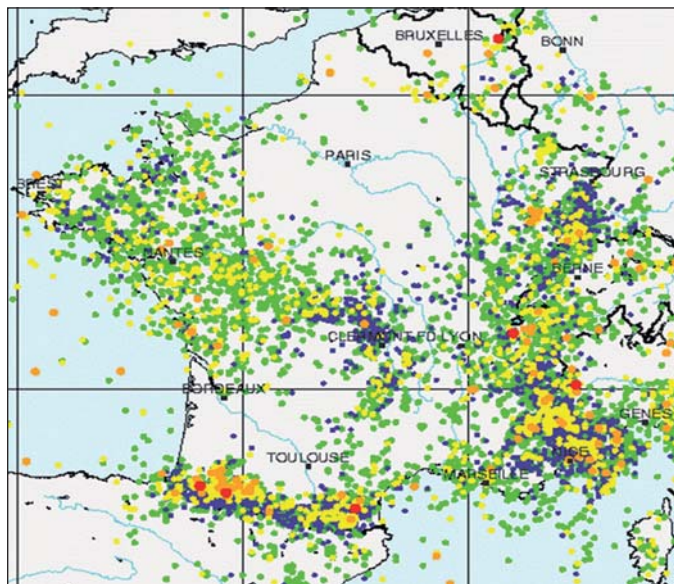
Figure 12

Diagramme de contrainte/élasticité comparant l'armature acier haute adhérence et le composite Schöck ComBAR®. Des lois de comportements en traction différentes imposent méthodes de dimensionnement différentes.

le côté conservateur évoqué plus haut (paragraphe 1.4).

La nécessité d'adapter le patrimoine existant ou les osatures existantes s'impose à la lumière des accidents météorologiques qui semblent survenir de plus en plus fréquemment. Le **Chapitre d'A. Ehrlacher** a ainsi évoqué la remontée possible du niveau des eaux de deux mètres ; si elles sont en béton, les digues soumises au marnage sont susceptibles de se fissurer et d'être soumises à la corrosion de l'eau de mer. Les matériaux composites comme les profilés pultrudés vinylester/verre, parfaitement adaptés pour protéger, réparer ou renforcer les ouvrages existants, sont évidemment indiqués dans ce cas.

Une technologie aujourd'hui répandue pour le renforcement de dalles de béton, de ponts ou de planchers, etc., est de déposer sur le substrat des polymères généralement d'origines époxydes pour stratifier ou coller des tissus en fibre de carbone ou de verre. On protège ensuite le revêtement par des gels (coating).



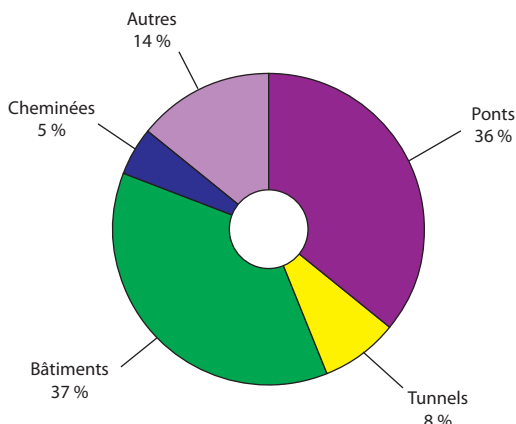
**Figure 13**

Carte de sismicité en France de 1980 à 1998 (données BCFS). Il est nécessaire de prendre en compte les risques sismiques en France : les bâtiments et ouvrages doivent être mis en conformité, ce qui conduit à un enjeu technologique important, avec des impacts socio-économiques.

En France, le dommage sismique est pris en compte par une série de décrets et règlements qui ont été révisés en 2008. Des secousses sismiques ne peuvent en effet pas être exclues et les bâtiments construits dans les années 1950 ne sont pas nécessairement en conformité avec les sollicitations considérées comme possibles (**Figure 13**). Le problème majeur est celui de la tenue des maçonneries qu'il y a lieu de

**Figure 14**

Parts des différents secteurs dans le marché de la réparation en France (estimation 2006).



renforcer notamment dans les bâtiments sensibles – les préfectures, les hôpitaux par exemple dont bien souvent les parois séparatrices sont en maçonnerie.

Le poids économique des divers chantiers de réparation ou mise en conformité est considérable. La mise en conformité intervient pour 40 % du marché de la réparation, soit une estimation de deux millions de mètres carrés (estimation 2006). Incidemment, ceci absorbe pratiquement 40 % du marché total de la production de fibre de carbone ; il serait donc bien venu d'arrêter de limiter la publicité en faveur de la fibre de carbone à la robotique ou aux raquettes de tennis... (**Figure 14**).

#### 2.4. Réhabilitation du « matériau bois » grâce aux composites

La recommandation d'accroître l'utilisation du bois dans la construction par un facteur dix, formulée dans le décret du 15 mars 2010, a déjà comme conséquence que l'on voit se développer des maisons « tout en bois » (voir le **Chapitre de J.-P. Viguier**). Mais la généralisation de ces pratiques ne va pas sans inconvénient du point de vue de la stabilité dimensionnelle – le retour d'expérience des chalets savoyards le montre. Des recherches se développent pour améliorer les performances des ossatures en bois en dépit de la rigidité intrinsèquement plus faible de ce matériau, relativement aux portées maximum, à sa déformation et à son comportement acoustique.





Figure 15

Panneau autoporteur en bois.

La voie privilégiée dans les centres de recherche est de recourir aux multi-matériaux, assemblages de plusieurs matériaux aux propriétés complémentaires : composites pultrudés ou composites stratifiés pour la constitution de poutres (voir aussi le *Chapitre d'A. Ehrlacher*). L'insertion de bois à l'intérieur des composites améliore la tenue à la traction des poutres ou des renforts composites et permet de plus l'utilisation de bois aux caractéristiques limitées mais de faibles coûts. Ainsi il est possible d'utiliser des éléments préfabriqués (panneaux ou poutres) aux performances mécaniques améliorées par rapport aux éléments classiques grâce à l'ajout ou

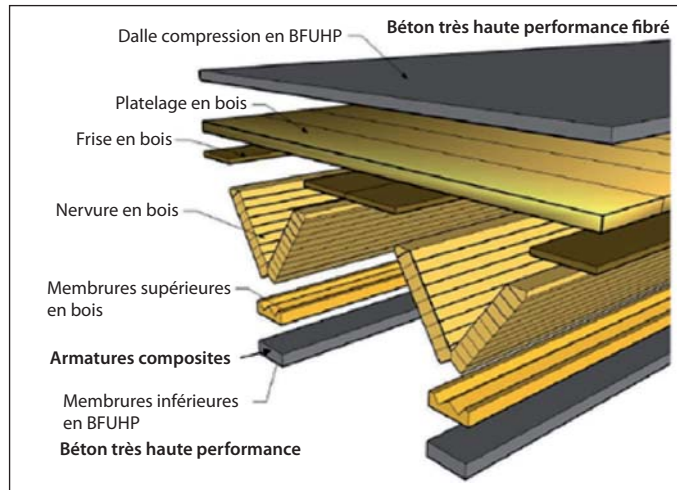


Figure 16

Éléments préfabriqués multi-matériaux d'un panneau autoporteur haute performance avec collage époxyde. BFUHP = béton filtré à ultra-hautes performances.

par insert de composites (Figures 15 et 16). Sont également fabriqués des planchers autoporteurs où l'on combine une dalle de béton à très haute performance fibrée avec des platelages en bois. Les assemblages sont réalisés à l'aide de polymères de haute performance et de colles époxy. Sur les parties tendues, on utilise en remplacement des fers à bétons les composites hautes performances ainsi que les armatures de verre vinylester qui améliorent la résistance en traction.

## **Les matériaux à matrices polymères, matériaux d'aujourd'hui, matériaux d'avenir**

Ce chapitre a montré à travers la présentation d'exemples que les matériaux composites à matrices polymères apportent la capacité :

- d'atteindre les objectifs de la consommation d'énergie des bâtiments en supprimant presque complètement les ponts thermiques ;
- de contribuer à la mise en sécurité des ouvrages existants, en particulier par rapport au risque sismique ;
- de contribuer à l'amélioration de la durabilité des bâtiments et notamment des bâtiments en bois.

Leur qualification et leur certification au niveau du marché européen nécessitent une démarche volontaire de toutes les parties impliquées dans l'activité de la construction pour élaborer de nouvelles règles de dimensionnement qui leur soient adaptées et qui devront compléter les Eurocodes guidant la construction en Europe. Pour l'universitaire, il y a urgence d'actualiser les formations d'ingénieurs par l'introduction de masters spécialisés utilisables professionnellement pour le développement de l'utilisation des matériaux à matrices polymères.

# Crédits photographiques

Fig. 9 : Lafarge DR. A : architecte :  
agence ECDM, photo : Benoît  
Fougeirol.