

LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Éric Bausson

Partie des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programme de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique – partie « Constitution et transformations de la matière »
- ▶ Programme de physique-chimie des classes de première et de terminale STI2D – parties « Matière et matériaux » et « Ondes et information ».
- ▶ Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale – partie « Constitution et transformations de la matière »

Mots-clés : composite, matrice, renforts, polymères, viscosité, Chardonnet, pneu, caoutchouc, défautologie

INTRODUCTION

L'un des principaux avantages des matériaux composites réside dans sa capacité à combiner légèreté et grande résistance mécanique. Cette optimisation du rapport masse/résistance en fait des matériaux particulièrement adaptés à des domaines exigeants comme l'aéronautique et l'automobile.

De plus, leur grande flexibilité de conception permet d'ajuster les propriétés en fonction des besoins, en jouant sur la nature de la matrice et des renforts. Le pneumatique est un exemple intéressant de matériau composite où chaque matière première apporte sa contribution pour optimiser ses performances.

Toutefois, l'utilisation des composites s'accompagne de défis, notamment en ce qui concerne la défautologie (analyse des défauts). En raison de leur structure hétérogène, ces matériaux peuvent présenter différents types de défauts tels que des porosités ou des fissurations internes. Ces défauts, parfois invisibles à l'œil nu, peuvent altérer significativement les performances mécaniques et la durabilité des structures. Leur détection et leur caractérisation nécessitent donc des techniques spécifiques de contrôle non destructif, comme les ultrasons ou la radiographie.

Ainsi, malgré leurs nombreux avantages, les matériaux composites exigent une maîtrise rigoureuse de leur conception et de leur mise en œuvre, afin de garantir leur fiabilité et leur sécurité dans des applications de plus en plus exigeantes.

UN MATÉRIAU COMPOSITE, QU'EST-CE QUE C'EST ?

Un matériau composite est constitué d'au moins deux matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. Voici les constituants d'un matériau composite :

Matrice		Renforts		Charges et/ou additifs
polymère thermoplastique	+	fibres	+	apporter
ou		tissus		ou modifier
polymère thermdurcissable		nappes		certaines propriétés

La matrice

Dans le domaine des matériaux composites, la matrice joue un rôle essentiel : elle assure la cohésion des renforts (fibres), transmet les efforts mécaniques et protège les fibres contre les agressions extérieures.

On distingue plusieurs grandes familles de matrices, chacune ayant ses spécificités.

Les matrices polymères sont de loin les plus utilisées dans les composites industriels, notamment en aéronautique, automobile ou nautisme.

Nous distinguons les matrices thermodurcissables (elles durcissent de manière irréversible sous l'effet de la température) comme les résines époxy, des matrices thermoplastiques (elles peuvent être fondues puis reformées plusieurs fois) comme le polypropylène et les polyamides.

Pour limiter l'impact environnemental, les matrices biosourcées connaissent un fort développement. Elles sont issues de ressources renouvelables (végétaux). Parmi les polymères biosourcés thermoplastiques, nous retrouvons l'acide polylactique issu de l'amidon, et les résines thermodurcissables biosourcées à base d'huiles végétales comme le soja ou le lin. Ces matrices biosourcées représentent une voie prometteuse pour rendre les composites plus durables en remplaçant des ressources fossiles, issues du pétrole ou du gaz naturel, par des matières premières renouvelables (biomasse, etc.). Néanmoins, des progrès restent nécessaires pour rivaliser pleinement avec les matériaux conventionnels.

Il existe d'autres types de matrices, moins courantes, comme les matrices métalliques à base d'aluminium, de titane ou de magnésium, qui sont utilisées pour des applications à haute température ou à fortes contraintes. Dans le domaine du spatial, des matrices céramiques à base de carbure de silicium (SiC) ou d'alumine (Al₂O₃) sont utilisées pour leur résistance aux très hautes températures et à la corrosion.

Les renforts

Les renforts, portant bien leur nom, permettent d'assurer principalement les propriétés suivantes aux matériaux composites :

- ▶ résistance mécanique (traction, compression) ;
- ▶ rigidité ;
- ▶ allègement des structures (excellent rapport masse/performance) ;
- ▶ résistance aux chocs ;
- ▶ résistance à l'usure et à la fatigue ;
- ▶ propriétés orientables selon la direction des fibres.

Tableau 1. Données sur quelques renforts utilisés couramment.

Type de renfort	Masse volumique (g/cm ³)	Avantage principal	Inconvénient principal
fibres de verre	2,5	économique	moins performant
fibres de carbone	1,7–1,9	très rigide et léger	coût élevé
aramide (kevlar)	1,44	résistant aux chocs	sensible aux UV
fibres de lin	1,4–1,5	écologique	moins durable

Les masses volumiques de ces renforts sont faibles comparées à celle de l'acier (7,8 g/cm³) et sont mêmes inférieures à celle de l'aluminium (2,7 g/cm³). Cela en fait des matériaux particulièrement attractifs pour réduire, par exemple, le poids des voitures ou des avions en remplaçant les métaux par des composites.

Un exemple des proportions des matériaux mis en jeu dans différents avions de marque Boeing au cours du temps, du 747 au 787, est présenté en **figure 1**.

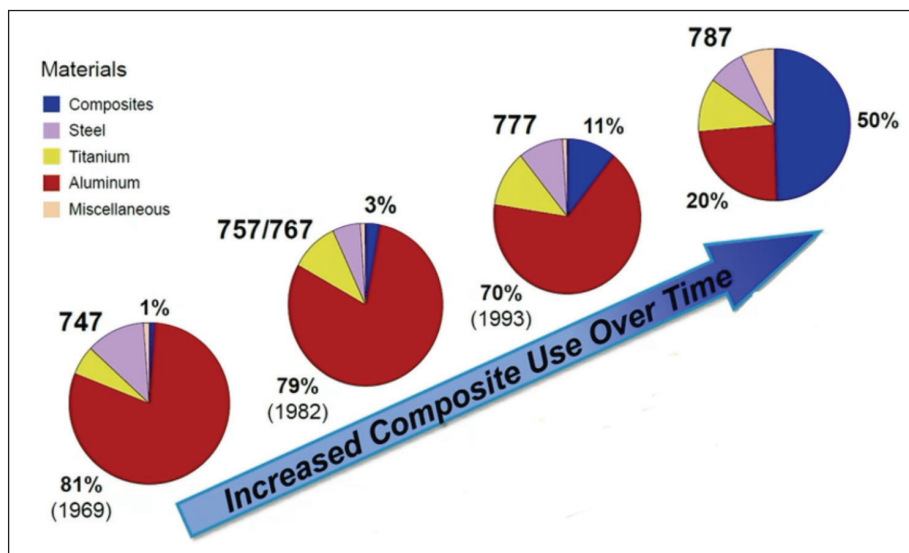


Figure 1. Augmentation de l'usage des composites à travers le temps.
Source : The Impact of Composites in the Aviation Industry. S. Sarkar [2024].

On remarque que la proportion des matériaux composites n'a cessé d'augmenter très nettement au cours du temps.

Parmi les renforts, les fibres de carbone sont très connues du grand public car elles sont, par exemple, utilisées pour la fabrication de cadres de vélo ou de raquettes de tennis. Leur production est complexe et très énergivore en raison des températures imposées dans les processus de production comme celui présenté en figure 2, à partir de fibre acrylique.

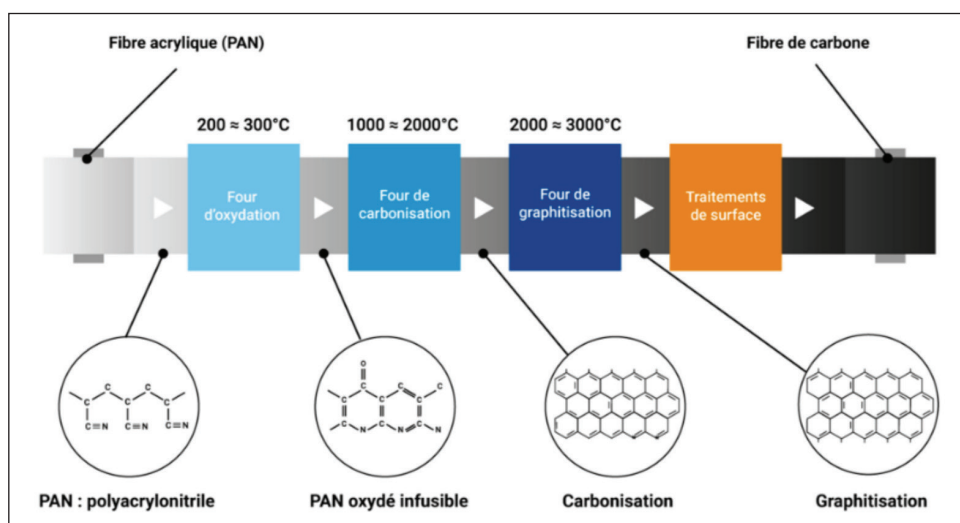


Figure 2. Fabrication d'une fibre de carbone. Source : <https://toray-cfe.com/quest-ce-que-la-fibre-de-carbone/>.

Les charges et/ou additifs

Ils permettent d'ajuster finement les propriétés et souvent de réduire les coûts.

Les charges sont des particules solides dispersées dans la matrice, généralement en quantité importante. Il peut s'agir de silice (SiO_2), du carbonate de calcium (CaCO_3), du noir de carbone et bien d'autres. Ils permettent d'augmenter la rigidité, d'améliorer la résistance à l'usure, de diminuer la dilatation, de modifier la densité, etc.

Les additifs sont introduits en plus faible quantité et ont des fonctions très spécifiques :

- ▶ stabilisants (UV, thermiques, oxydation) ;
- ▶ plastifiants (assouplissement) ;
- ▶ agents de réticulation (ex : durcisseurs, peroxydes) ;
- ▶ retardateurs de flamme ;
- ▶ pigments (coloration).

UN EXEMPLE DE MATÉRIAU COMPOSITE POUR NOTRE MOBILITÉ : LE PNEUMATIQUE

Un pneu est un bel exemple de matériau composite car sa constitution est complexe et tous les matériaux incorporés confèrent aux pneumatiques toutes ses propriétés (Figure 3).

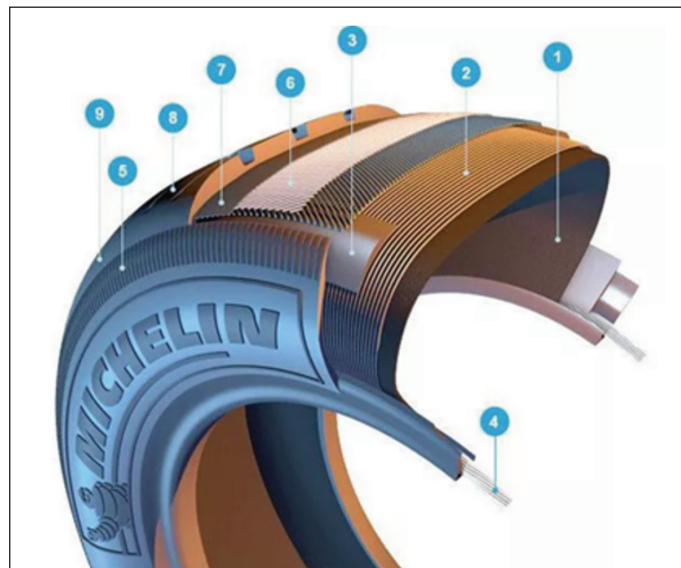


Figure 3. Structure d'un pneu de marque Michelin®. 1 : Gomme intérieure, 2 : nappe carcasse, 3 : zone basse du bourrelet, 4 : bourrelets, 5 : flanc, 6 : pli carcasse, 7 : nappe sommet, 8 : nappes d'armature (ou ceintures), 9 : bande de roulement.

Source : <https://www.michelin.fr/auto/conseils/regles-pneus/fabrication-recyclage-pneus>.

La gomme est constituée de caoutchouc pour assurer l'étanchéité à l'air.

La nappe carcasse est constituée de cordons (ou de câbles) fins en fibre textile fixés au caoutchouc.

La zone basse du bourrelet permet l'accroche à la jante métallique.

Les bourrelets sont fixés fermement contre la jante pour assurer une étanchéité et maintenir le pneu bien en place sur la jante.

Le flanc assure la protection du côté du pneu des chocs trottoirs et des obstacles de la route.

Le pli carcasse détermine en grande partie la résistance du pneu. Il est composé de câbles d'acier très fins et résistants collés dans le caoutchouc. Il est également suffisamment souple pour absorber les déformations causées par les bosses, les nids-de-poule et autres obstacles sur la route.

La nappe sommet est une couche de sécurité aidant à maintenir la forme du pneu lors d'une conduite à grande vitesse. Pour empêcher la déformation du pneu, des câbles renforcés à base de nylon sont insérés dans une couche de caoutchouc et placés tout autour de la circonférence du pneu.

Les nappes d'armature (ou ceintures) constituent la base rigide de la bande de roulement.

La bande de roulement est en contact avec la route. Elle assure la traction et l'adhérence du pneu dans les virages et est conçue pour résister à l'usure, à l'abrasion et à la chaleur. Sa sculpture est conçue pour des fonctions très précises (adhérence, évacuation de l'eau, etc.).

Tableau 2. Bilan synthétique pour un pneumatique.

éléments	constituants	rôles principaux
matrice	caoutchoucs ¹ (NR, SBR, BR, IIR)	cohésion, élasticité
renforts	fibres textiles ² , acier	résistance mécanique, rigidité
charges / additifs	noir de carbone ³ , silice ⁴ , soufre ⁵ , résines ⁶ ...	optimisation des propriétés

¹ Caoutchouc naturel (NR), issu de l'hévéa : excellente élasticité et résistant (pneus poids-lourds). Caoutchoucs synthétiques : SBR (styrène-butadiène) : bonne résistance à l'usure (pneus tourisme) ; BR (butadiène) : améliore la résistance au froid et la durabilité ; IIR (butyle) : très faible perméabilité à l'air. ² Polyesters, polyamides (nylon) et rayonne (viscose fabriquée à partir de la cellulose). ³ Le noir de carbone augmente la résistance mécanique, l'usure et protège contre les ultraviolets. ⁴ La silice améliore l'adhérence sur sol mouillé et réduit la résistance au roulement (économie de carburant). ⁵ Le soufre permet la vulcanisation (création de ponts entre les chaînes polymères du latex) car les atomes de soufre font des liaisons C-S-S-C entre les chaînes $-(CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2)_n-$. ⁶ Les résines modifient l'adhérence.

Zoom sur le caoutchouc SBR

Le mot caoutchouc (rubber en anglais) provient de l'indien : cao (bois) et ochu (pleurer). Quand on pratique une incision (saignée) dans l'écorce de l'hévéa, un liquide laiteux (latex) s'écoule goutte à goutte, composé de 1/3 de caoutchouc et de 2/3 d'eau (Figure 4). Le latex est d'abord filtré puis traité par une solution acide diluée. On constate alors qu'il y a coagulation, le caoutchouc apparaît, sous forme solide, en suspension. Après laminage, les feuilles de caoutchouc sont séchées et pressées en balles, constituant la matière première utilisée dans l'industrie. En 1929, on réussit à fabriquer un polymère du butadiène et du styrène en présence de sodium comme catalyseur.



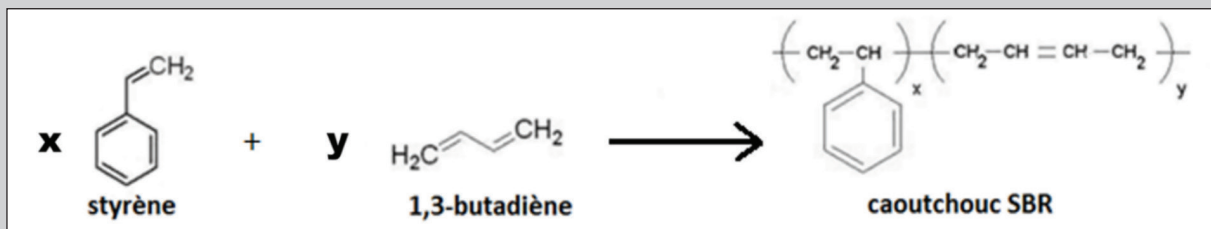
Figure 4. La culture de l'hévéa pour son latex.

Source : <https://www.msm.ch/lhistoire-fascinante-du-caoutchouc-a-1117002/>

Un polymère est une macromolécule pouvant être obtenue par polycondensation (en plus du polymère, il se forme une autre molécule) ou par polyaddition (le polymère est le seul produit formé). Le polymère appelé SBR (styrène-butadiène rubber) fut développé industriellement par l'Allemagne après 1930.

En 1942, les États-Unis, privés par les Japonais de leurs approvisionnements en caoutchouc naturel, développèrent la production de SBR en améliorant les propriétés mécaniques de ce produit.

Cet élastomère synthétique, obtenu après polyaddition, est supérieur au caoutchouc naturel au niveau des propriétés recherchées (élasticité, durabilité, etc.) donc il est présent actuellement dans l'ensemble de nos pneumatiques automobiles.



Il est possible de recycler les pneus usagés pour récupérer le caoutchouc SBR pouvant servir pour d'autres usages comme celui de dalles dans des aires de jeux.



Figure 5. Aire de jeux avec sol en caoutchouc SBR. Source : https://www.planet-loisir-equipement.fr/1339-thickbox_default/granulats-sbr-3-7-mm.jpg

Zoom sur la rayonne (viscose)

Parmi les fibres textiles utilisées dans les pneumatiques, nous pouvons retrouver la rayonne, fibre synthétique dotée de propriétés recherchées pour les pneus comme la bonne résistance à la traction et la faible déformation sous contrainte, même à haute température.



Figure 6. Comte de Chardonnet représenté sur un timbre de l'année 1955.
Source : <https://www.timbres-de-france.com/collection/pop.php?ligne=1109>

Dans les années 1860, l'industrie française de la soie était en crise à cause d'une maladie affectant le ver à soie. Louis Pasteur et le comte Hilaire de Chardonnet étudièrent ce problème en vue de sauver l'industrie. En 1885, Chardonnet s'est intéressé à la recherche d'un moyen de produire de la soie artificielle et breveta la première méthode de fabrication de fibres à partir de cellulose (souvent issue du bois). La rayonne (viscose), une fibre textile artificielle, vit ainsi le jour !

Le procédé Chardonnet repose sur la transformation de la cellulose en nitrate de cellulose (nitrocellulose), soluble, puis sa régénération en cellulose.

Voici les étapes de ce procédé Chardonnet :

On part de la pâte de bois, dont on isole la cellulose, polymère de formule brute $(C_6H_{10}O_5)_n$ et de formule semi-développée simplifiée $[-C_6H_7O_2(OH)_3-]_n$.

La cellulose est traitée par une solution d'acide nitrique (HNO_3) de telle sorte que l'équilibre soit très déplacé vers la droite, celle de la formation de nitrocellulose :



Ici l'équation chimique fait état de la réaction d'un seul groupement hydroxyle. Cela peut aller jusqu'à trois.

On obtient la nitrocellulose, qui contrairement à la cellulose, est soluble dans un mélange alcool + éther.

La solution est extrudée (filée), et on effectue l'évaporation partielle du solvant.

On effectue l'hydrolyse, réaction dans le sens opposé de la première transformation chimique, pour régénérer la cellulose en déplaçant l'équilibre de l'équation (1) vers la droite en ajoutant de l'eau :

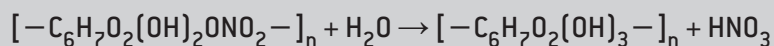


Figure 7. La viscose produit à partir de la cellulose. Source : <https://textrend.fr/blog/lin-viscose/viscose-et-lin-le-tissu-ideal-pour-l-ete-et-le-printemps?srsId=AfmB0ooMwPkru2cS8Rw9cU9MTH9MfVm9VZuKnuyVsgwwYQbUIGnWQo1Z>

COMMENT DÉTECTER LES DÉFAUTS DANS UN MATÉRIAU COMPOSITE ?

La détection des défauts dans les matériaux composites se fait majoritairement par des **contrôles non destructifs (CND)** car on caractérise l'état interne sans endommager la pièce. C'est crucial en aéronautique, éolien, automobile, etc.

Voici les principales techniques, leur principe et les défauts détectés :

- ▶ La plus simple d'entre elles, celle du contrôle au marteau (tap test – **Figure 8**), peut parfois suffire !
- ▶ Le contrôle avec une sonde d'ultrasons (**Figure 9**) : après analyse des échos réfléchis aux interfaces, cela permet de détecter des porosités, des fissures internes ou une mauvaise adhésion fibre/matrice.
- ▶ La radiographie (rayons X), dont l'absorption varie selon la densité du matériau, permet de détecter des porosités, bulles d'air, des inclusions non-désirées.
- ▶ La thermographie active (observation grâce à une caméra infrarouge des variations de température en surface après excitation thermique) permet de détecter entre autres les décollements (**Figure 10**).
- ▶ Les courants de Foucault (induction électromagnétique dans les matériaux conducteurs uniquement) pour détecter les défauts proches de la surface.

Il en existe d'autres comme la tomographie et l'interférométrie laser.



Figure 8. Marteau pour le tap test.
Source : https://www.henchmanusa.com/H69_dash_400/Tap-Hammer-Composite/pd.php.



Figure 9. Méthode de contrôle par ultrasons. Source : <https://ndt-inspections.fr/contrôles-volumiques>.

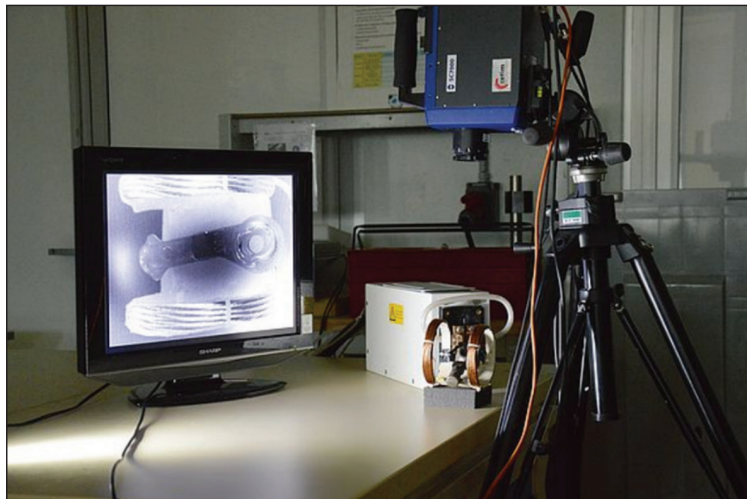


Figure 10. La thermographie active pour traquer les défauts des composites.
Source : <https://www.pei-france.com/article/la-thermographie-active-pour-traquer-les-defauts-des-composites/>.

CONCLUSION

Les matériaux composites s'imposent aujourd'hui comme des matériaux stratégiques. Leur succès repose sur des propriétés exceptionnelles, notamment un excellent rapport résistance/masse, une grande résistance à la fatigue et à la corrosion, ainsi qu'une forte adaptabilité aux environnements difficiles.

Ces atouts expliquent leur présence croissante dans des secteurs clés tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie ou encore le biomédical, où la recherche de performance et d'allègement est essentielle.

Cette expansion est directement liée aux enjeux contemporains, notamment la réduction des émissions de dioxyde de carbone, l'efficacité énergétique et le développement des infrastructures durables.

Cependant, le coût élevé des matières premières, la complexité des procédés de fabrication, les difficultés de recyclage limitent encore une diffusion plus large de ces matériaux.

Les perspectives futures apparaissent néanmoins particulièrement prometteuses. Les recherches s'orientent vers des composites plus durables, notamment recyclables ou biosourcés (comme celles de nouvelles matrices à base de vanilline, [Figure 11](#)). Enfin, les innovations en fabrication, telles que l'impression 3D ou l'automatisation du placement de fibres, permettent d'envisager une production plus rapide, plus précise et plus économique. À terme, les matériaux composites devraient ainsi jouer un rôle majeur dans la transition vers une industrie plus performante, plus légère et plus respectueuse de l'environnement, confirmant leur statut de matériaux d'avenir.

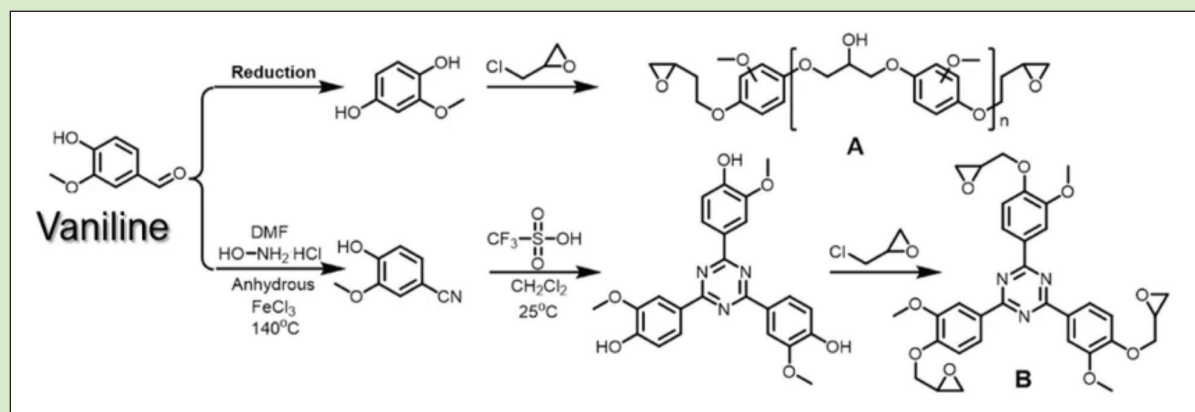


Figure 11. Voies de synthèse de monomères époxy à partir de la vanilline.

Source : Recent development on bio-based thermosetting resins. J. Liu et al. J. Polym. Sci. [2022].

POUR EN SAVOIR PLUS

Voici quelques liens vous permettant d'élargir vos connaissances sur les matériaux composites et/ou sur les mobilités :

- [Hilaire de Chardonnet et l'aventure de la soie artificielle](#) – Luneau Serge – Société chimique de France

Et sur le site [Mediachimie](#) :

- [Conférences du colloque « Chimie et mobilités » du 11 février 2026](#)
- [Comment fabriquer des pneus à partir d'un arbre ? La vulcanisation](#)
- [Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire. Illustration pour les polymères](#) – Jean-François Gérard
- [Matériaux composites à matrices polymères](#)
- [La route du futur](#) – Des idées plein la Tech

Éric Bausson est professeur de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen