

La chimie et le rail

D'après la conférence de Daniel Cadet

Après une carrière de chercheur, de directeur scientifique adjoint et de directeur des Relations Internationales au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Daniel Cadet est Directeur des affaires techniques extérieures chez Alstom¹, où il a notamment la charge des relations universités-industrie.

Le groupe Alstom emploie plus de 93 500 employés répartis dans cent pays et dans trois domaines : la fourniture de solutions de production d'énergie classique ou d'énergie renouvelable, de transformation et de transport de cette énergie et de transport ferroviaire (**Figure 1**).

Dans le transport ferroviaire, Alstom est le seul groupe mondial multi-spécialiste qui maîtrise à la fois la fabrication des trains, l'infrastructure ferroviaire, la signalétique, la maintenance des trains comme de l'infrastructure (**Figure 2**).

La gamme des trains fabriqués est large : elle va du Tramway jusqu'au TGV, le dernier né de la gamme étant l'AGV (automotrice à grande vitesse) qui roule à 360 km/h (**Figure 3**). Il en est de même pour les infrastructures fer-

roviaires, la signalisation et les activités de maintenance, qui sont elles aussi diversifiées (**Figure 4**).

On ne parle pas ou peu de chimie chez Alstom Transport ; pourtant, elle est présente partout comme nous allons le découvrir. Mais en premier lieu, rappelons les spécificités du transport ferroviaire.

1 Les caractéristiques spécifiques des transports ferroviaires

À l'exception des tramways, pour lesquels on retrouve quasiment partout des modèles assez identiques, dans le ferroviaire on ne signe jamais de contrat, mais un projet, ce qui résume bien la spécificité de notre métier. En ce qui concerne les trains, chaque nouveau programme

1. www.alstom.com/fr

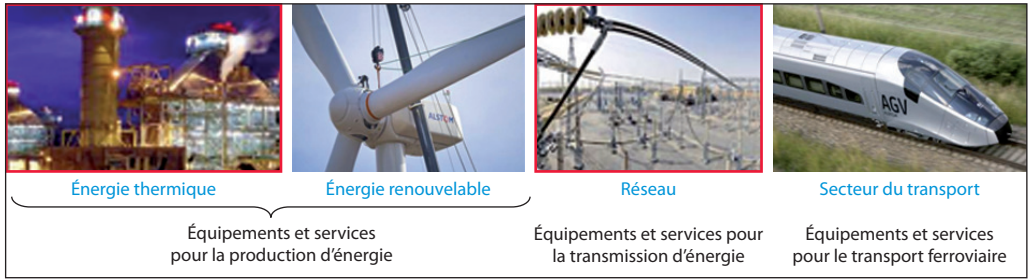


Figure 1

Les secteurs industriels du groupe Alstom.

Source : Alstom



Figure 2

Alstom, des multi-spécialistes.

Source : Alstom Transport

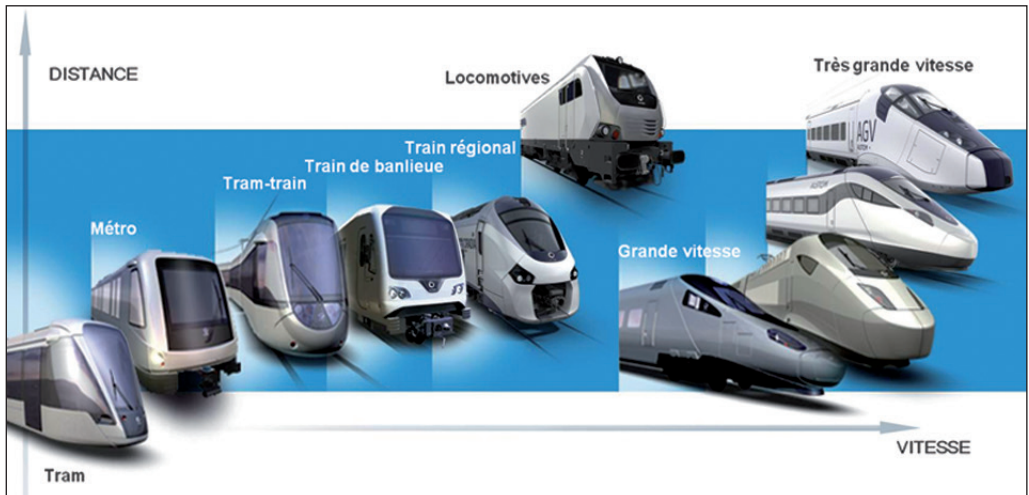


Figure 3

Gamme de produits ferroviaires d'Alstom Transport.

Source : Alstom Transport

(contrat avec un client) est un nouveau train que nous devons concevoir, pour satisfaire la demande du client, s'adapter à des normes différentes d'un pays à un autre

et à une utilisation (profil de mission) qui est elle aussi très différente. Pour répondre à un appel d'offres, il faut travailler une nouvelle conception de trains. Le concept de



Figure 4

Infrastructure signalétique, services et maintenance d'Alstom Transport.

Source : Alstom Transport

train du futur n'existe donc pas, contrairement à l'aviation qui peut se projeter en 2030-2035. Le train du futur, c'est celui qui est actuellement en construction et qui sera livré pendant dix ans au client : citons par exemple en France, pour les régions françaises, le « Régiolis » (**Figure 5**) que nous sommes en train de finir (1^{er} train livré le 4 juillet à la région aquitaine). Les clients ont des compétences techniques très élevées, et leur cahier des charges est très exigeant et très détaillé (jusqu'à plusieurs milliers de pages). Nous retrouvons la chimie au second niveau dans les spécifications techniques qui concernent par exemple les matériaux verts, etc. Dans les contraintes, on retrouve des normes et des réglementations, au niveau européen et au niveau national, et naturellement REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction

des produits chimiques) nous impacte. La chimie intervient dans les solutions à trouver. Les prix décroissent. Les clients sont principalement des autorités ; par exemple, comme signalé dans le **Chapitre de R. Legrand et H. Van Damme**, une grande partie du financement des systèmes de transport urbains vient des taxes. Par exemple, en région parisienne le client-passager urbain ne paie que 25 % du coût. Donc, quand les budgets sont un peu serrés par la crise économique, c'est le prix qui guide les choix des autorités. Nous pouvons proposer de l'innovation, mais si elle coûte plus cher, elle ne passera pas la barre du budget disponible. Il est donc difficile d'introduire des innovations, le prix étant largement déterminé par la sécurité, sur laquelle il n'y a aucun compromis. Il n'y a aucun risque pris sur ce point, et les garanties sont à long terme, trente ans,



Figure 5

Présentation de la première rame Régiolis, à Strasbourg, en 2011.

© Licence CC-BY-SA-3.0, 2.5, 2.0, 1.0, Kevin. B.

et certains clients veulent même étendre au-delà de trente ans, mais des trains circulent toujours après cinquante ans. Les industriels du transport ferroviaire rêvent de pouvoir faire des trains qui ne dureraient que quinze ans et qui seraient renouvelés tous les quinze ans !

La comparaison des prix du ferroviaires à ceux de l'aéronautique est elle aussi intéressante. Un A320 prix catalogue coûte 65 millions d'euros, avec sans doute, quand on en commande cent, une petite et même peut-être une bonne diminution. Un TGV coûte, quant à lui, 30 millions d'euros.

Un autre point important est que le « chiffre d'affaires annuel » de l'industrie ferroviaire est relativement faible. Alstom représente 6 milliard d'euros, soit environ 10 % du marché mondial atteignable par les industriels qui est de 60 milliards d'euros. Comparé au chiffre d'affaires de l'automobile, par exemple le chiffre d'affaires de Volkswagen est de 160 milliards d'euros, l'industrie manufacturière ferroviaire est donc en fait une petite industrie. Cette observation est importante car cela diminue les capacités d'investissement en R&D : même si l'on y consacre 3 % de notre chiffre d'affaires, cet investissement est très largement inférieur aux 3 % que Volkswagen peut injecter dans la recherche et le développement. Nous sommes donc fortement à l'affût des développements qui se passent dans d'autres industries, et l'intersectoriel est très important pour l'innovation.

Dans le contexte d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO₂, le développement du ferroviaire passe par l'utilisation optimale de l'énergie électrique, et le secteur est très compétitif dans ce domaine. Le **Chapitre de J. Botti** montre que l'industrie aéronautique a investi depuis des décennies des sommes considérables dans l'utilisation optimale de l'énergie, car monter 1 kilogramme à 10 000 mètres coûte cher !

D'autre part, le transport ferroviaire est un moyen de transport déjà ou potentiellement décarboné, car 35 % des lignes au monde sont électrifiées et 60 % du transport est réalisé sur ces lignes : c'est le cas en France, où 70 % du ferroviaire est électrifié avec une origine nucléaire.

On fait appel à de fortes puissances : ainsi pour atteindre le record de vitesse de 574,8 km/h, la tension de l'alimentation avait été portée à 31 kV AC (autorité de certification), ce qui a permis d'atteindre une puissance totale, entre les motrices et des moteurs répartis sur des bogies², de 20 mégawatts. Et pourtant, la facture d'énergie le jour de ce record n'a été que de 64 €. C'est donc actuellement ce qu'il y a de mieux comme exemple d'utilisation optimale de l'énergie électrique. Mais pour cela, il faut de l'adhérence, donc il faut augmenter la masse : il nous arrive régulièrement de tarer des locomotives.

2. Un bogie est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire, sur lequel sont fixés les essieux (et donc les roues).

L'impact environnemental est réduit, notamment l'empreinte du CO₂. Le nouveau train AGV en France, avec le mix énergétique français³, correspond à l'émission de 0,2 g de CO₂ par kilomètre par passager : il est donc difficile de faire mieux, même pour un cycliste pour lequel il faut tenir compte des émissions de CO₂ dans la fabrication des aliments qu'il va consommer pour sa dépense énergétique, et... il ne va pas à la même vitesse !

C'est grâce au travail sur les progrès des composants électroniques de puissance que l'on atteint ces résultats, et nous allons voir que la chimie y contribue.

Le ferroviaire optimise l'utilisation de l'énergie en récupérant l'énergie de freinage et en la renvoyant sur la caténaire⁴ ou la grid (réseau électrique externe) : par exemple quand un métro parisien freine, l'énergie de freinage est renvoyée sur la caténaire et réutilisée par un autre métro en phase d'accélération. Certes, y a encore des gains à faire, mais il faut en évaluer le coût financier, tels que les systèmes de stockage et de gestion de l'énergie à bord dont les développements s'appuient sur la R&D en électrochimie.

3. Au sujet du mix énergétique français, voir *Chimie et enjeux énergétiques*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier, P. Rigny, EDP Sciences, 2013.

4. La caténaire est le système de suspension de fils conducteurs servant à l'alimentation en courant des locomotives électriques, des trains auto-propulsés et des tramways.

Le travail d'Alstom est d'offrir au client un système de transport complet, clé en main, et adapté à son cahier des charges. Nous avons donc un métier d'intégrateur : nous intégrons des composants, des sous-systèmes de façon à concevoir et à fabriquer une solution correspondant aux besoins du client, au prix auquel on s'est engagé. Il faut donc maîtriser un large spectre de compétences et d'expertise, ce qui est d'ailleurs aussi le cas de l'industrie aéronautique et de l'industrie automobile.

2 Où est la chimie dans l'industrie ferroviaire ?

L'industrie ferroviaire utilise des produits et matériaux, et intègre des composants : 50 à 70 % de la valeur d'un train correspond à des composants achetés à l'extérieur chez des équipementiers qui livrent des sous-systèmes complets. La chimie est donc présente partout mais cachée, comme nous allons le voir dans les exemples qui suivent.

2.1. Les composites

Dans les composants électroniques de puissance précédemment évoqués, on utilise des pâtes dans lesquelles des nanoparticules⁵ d'argent permettent d'évacuer plus rapidement les calories qui y sont dissipées.

5. Une nanoparticule est un assemblage d'atomes dont au moins une dimension est à l'échelle du nanomètre (= 10⁻⁹ mètre).

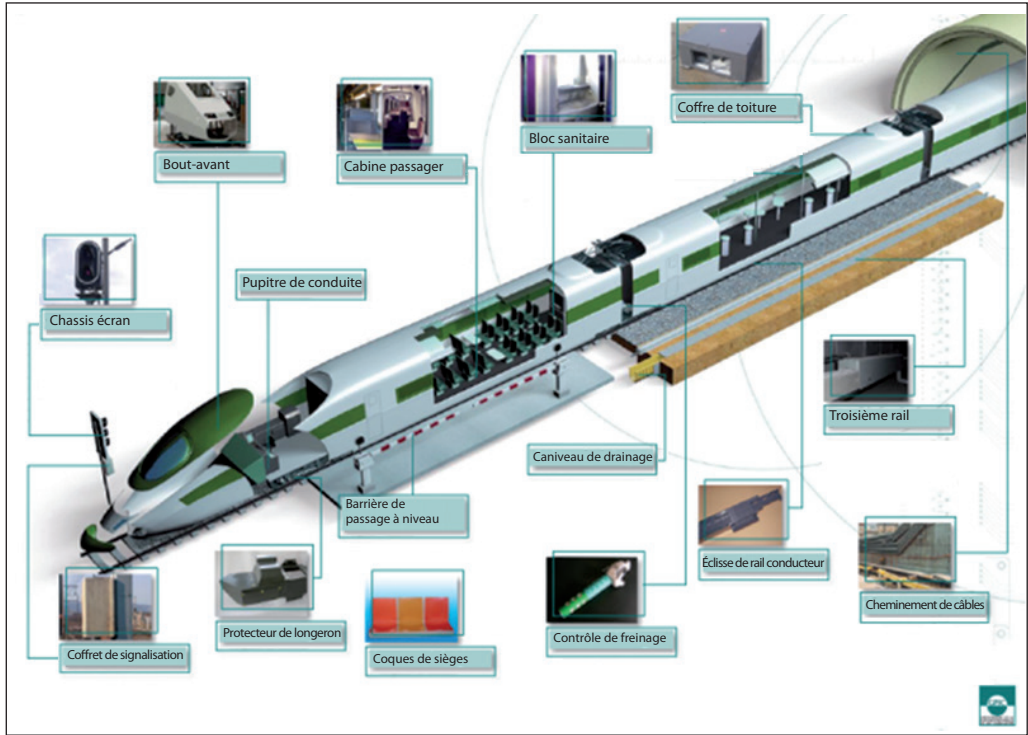


Figure 6

Les matériaux composites dans le transport ferroviaire.

Source : Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composants.
www.gpic.fr

Les peintures utilisées dans les trains doivent résister aux graffitis et maintenant être à l'eau ; elles sont issues des développements récents de la chimie. La **Figure 6** montre que dans le secteur ferroviaire, on utilise partout des matériaux composites, mais pas encore dans la structure.

Nous étudions maintenant le développement de l'utilisation du composite structurant, de façon à alléger les trains pour diminuer la consommation d'énergie. En effet, il faut savoir que pour la très grande vitesse, à partir du moment où le TGV ne s'arrête pas, 50 % du trajet peut être sur l'ère, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de consommation électrique pour la traction, donc pas de consommation d'éner-

gie, et cela d'autant mieux que les conducteurs connaissent très bien la ligne, et savent jouer avec les pentes.

2.2. Les moteurs et l'énergie

La **Figure 7** représente des moteurs à aimants permanents que nous avons développés, parce qu'il fallait diminuer la taille pour les placer dans les bogies et augmenter leur puissance massique. Derrière ce type de moteur, il y a beaucoup de chimie, car on y trouve des matériaux et des produits isolants. Ces moteurs, qui tournent à plusieurs milliers de tours par minute, utilisent des aimants qui doivent être maintenus en place à la périphérie, ce qui a posé un certain nombre de problèmes.

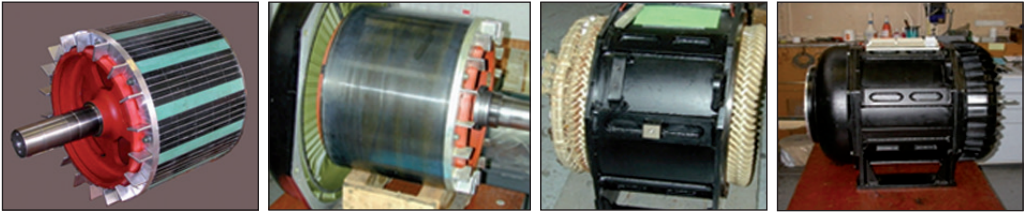


Figure 7

Moteurs à aimants permanents.

Source : Alstom Transport



Figure 8

Le projet STEEM (Système Tramway à Efficacité Énergétique Maximisée), avec un système de stockage d'énergie (SuperCaps/ batteries).

Source : Alstom Transport

La **Figure 8** illustre le problème de stockage de l'énergie dans des batteries dans le cas du projet STEEM (Système Tramway à Efficacité Énergétique Maximisée), à l'essai sur la ligne T3 du tramway parisien : pendant six mois, il y a eu un tramway équipé d'un système de stockage d'énergie et qui a fonctionné entre deux stations sans faire appel à l'énergie de la caténaire.

tégrité des passagers doit être conservée dix-huit minutes en cas d'incendie dans un tunnel. Comme nous le verrons plus loin, ce sont les chimistes qui mettent au point ces textiles qui résistent au feu aussi bien qu'aux lacérations.

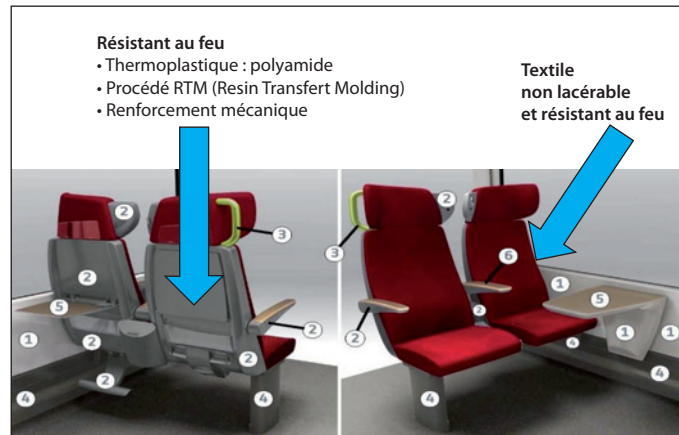
Figure 9

Des sièges renforcés grâce à la chimie, pour la sécurité des voyageurs.

Source : Alstom Transport

2.3. Les sièges

Les sièges (**Figure 9**) utilisés dans les transports ferroviaires doivent répondre à des normes de sécurité draconiennes : dans un train, même si l'on répand de l'alcool sur un siège et que l'on y met le feu, le siège doit résister ; l'in-



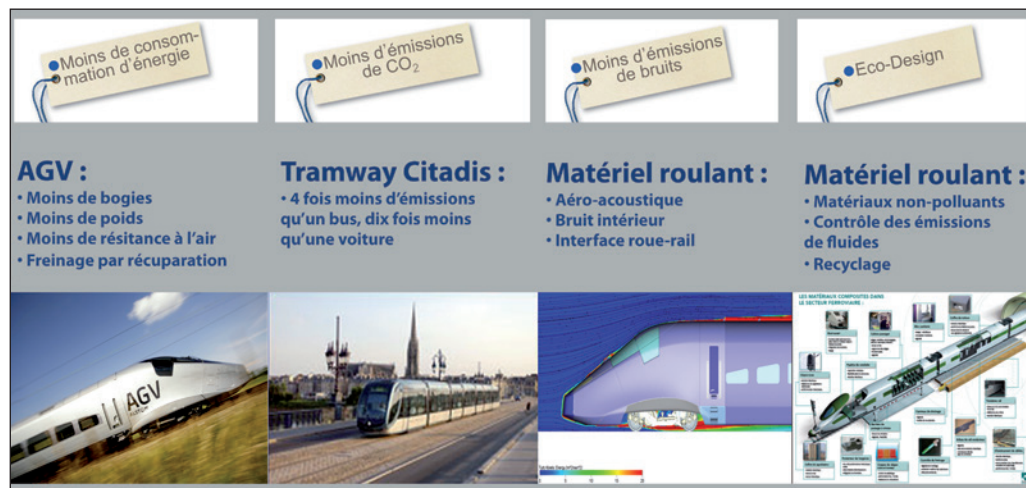


Figure 10

Les besoins de progrès pour l'environnement.

Source : Alstom Transport

2.4. L'énergie et l'environnement

L'énergie et l'environnement sont au centre de nos objectifs de développement. Nous avons vu précédemment que le transport ferroviaire est performant dans le domaine de l'efficacité énergétique, mais des progrès peuvent encore être réalisés : Alstom travaille en relation avec les systèmes organisateurs de transports (voir le **Chapitre de R. Legrand et H. Van Damme**) pour étudier par exemple dans les tramways la consommation énergétique de chaque composant et sous-système pour obtenir des gains d'énergie.

Nous travaillons aussi sur le bruit, qui est une émission polluante contraignante du ferroviaire, et donc sur les matériaux qui permettent d'absorber le bruit et des matériaux permettant de résoudre la nuisance à la source.

Le cycle de vie et le recyclage sont au cœur de nos préoccupations : 98 % de nos trains fabriqués maintenant sont recyclables, même s'ils sont

prévus pour durer cinquante ans, et il existe dès à présent un centre de développement du recyclage des trains à Givet dans le nord de la France.

Les besoins de progrès sont résumés dans la **Figure 10**. Les possibilités et donc les investissements sont toutefois contrôlés par les normes et par les coûts. En termes de chimie, les normes imposent beaucoup de choses. Et, comme beaucoup de nos marchés sont à l'étranger hors Europe, dans la préparation des appels d'offres, il est de plus en plus demandé par nos clients de respecter les normes européennes.

3 Exemples de projets de recherche et développement

3.1. Élaboration de composites thermodurs et de fibres bio-sourcées

Dans ce cas, l'objectif est de remplacer un composite polyester/verre par une résine époxy bio-sourcée. Cette

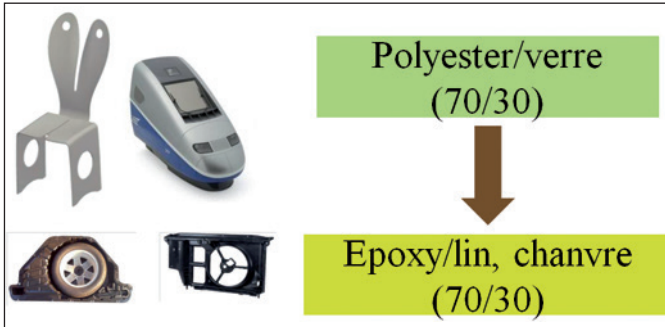


Figure 11

Finather : composites thermodurs et bio-sourcés.

résine devra être réactive, de viscosité maîtrisable, stable pour le stockage et mécaniquement performante. Le renfort fibreux sera issu du lin et du chanvre. Un tel composite aura des applications nombreuses (tissus, non tissés, fibres coupées...) dans le mobilier et les transports, notamment dans le ferroviaire et l'automobile.

Le rôle des industriels du ferroviaire est d'établir le cahier des charges, d'en sous-traiter la réalisation, de suivre la for-

mulation et la mise en œuvre d'un tel composite dont les performances doivent au moins être identiques à l'existant, tout en respectant les nouvelles exigences environnementales, et d'aboutir à la fabrication pour un coût maîtrisé.

3.2. Les verrous

Les verrous à faire sauter, à la fois scientifiques, technologiques et économiques, sont résumés sur la **Figure 12**.

Figure 12

Les verrous, à la fois scientifiques, technologiques et économiques.

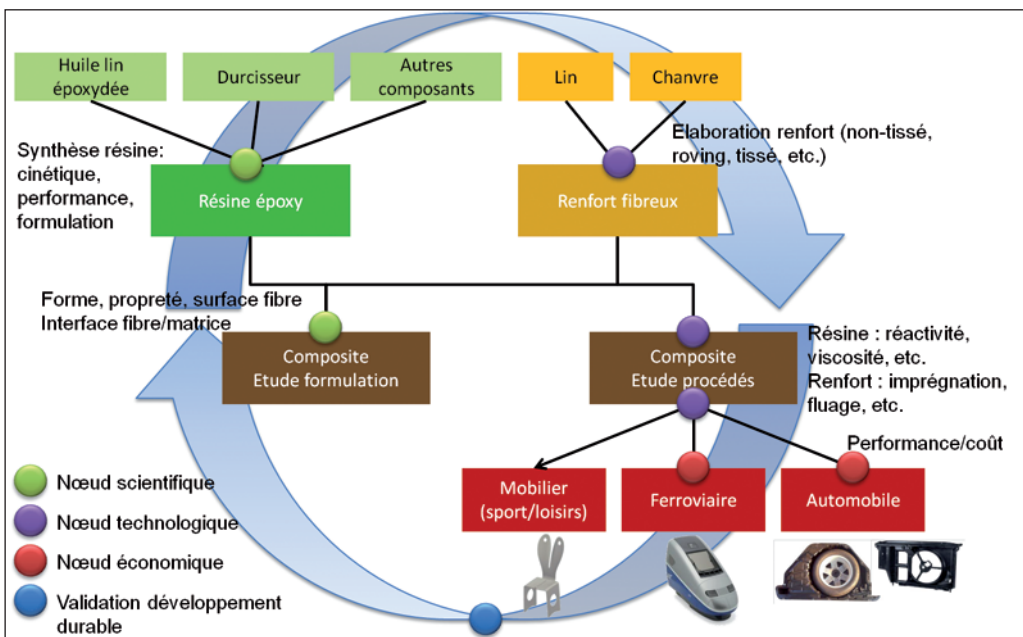
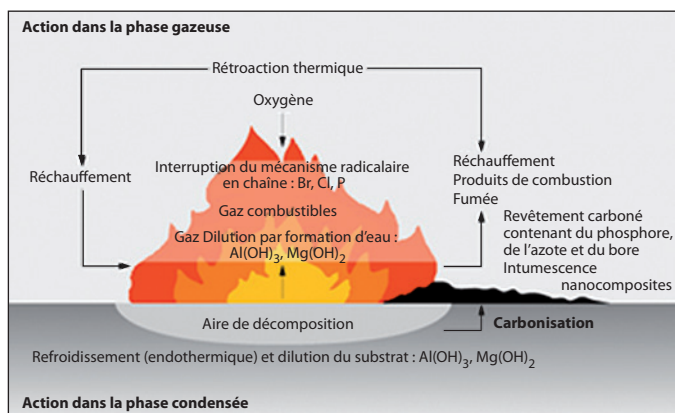


Figure 13

Action de HYPOPOTAM, composite polymère hybride à base de nanotalc pour tenue au feu améliorée.



Nous avons déjà vu que la tenue au feu est particulièrement importante pour le mobilier ferroviaire, et c'est notamment le cas des matériaux textiles utilisés pour le recouvrement des sièges pour lesquels ont été développées des fibres polyester intumescentes (INTUMAT : INTUMescent, MATériaux), qui, lorsqu'on les « allume », s'éteignent toutes seules, et surtout ne produisent pas de fumées toxiques.

Dans ce domaine important de l'amélioration de la tenue au feu, le projet « HYPOPOTAAM » concerne le développement de composites POLymères HYbrides à base de nanoTALC POur tenue au feu AMéliorée : c'est un matériau nanostructuré, léger, qui est généré *in situ* par extrusion⁶ réactive. Son action est résumée dans la **Figure 13**.

Le transport ferroviaire a fortement besoin de chimie pour innover

Un intégrateur industriel comme Alstom Transport qui conçoit des systèmes complexes n'est donc pas un acteur direct de la chimie, mais il en est largement dépendant pour trouver des solutions à ses problèmes. À ce titre, il est présent dans certains projets pour impulser les recherches permettant d'aboutir à ces solutions qui améliorent sa compétitivité. Les produits innovants sont nombreux mais le coût

6. L'extrusion est un procédé de mise en forme des matières plastiques qui consiste à pousser la matière à fluidifier à travers une filière.

de leur développement doit être acceptable par le client, car cela impacte le prix du billet de transport final ou sur les taxes. D'autre part, ces produits innovants doivent tenir compte de deux autres contraintes très importantes du transport ferroviaire : les normes très fortes et le cycle de vie très long (garantie de trente ans).