

# Le pneumatique : innovation et haute technologie pour faire progresser la mobilité

*Dominique Aimon a passé la plus grande partie de sa carrière chez Michelin<sup>1</sup>, en particulier au Centre de recherche de Clermont-Ferrand. Il a aussi travaillé chez Michelin dans le domaine des méthodes de fabrication, a été directeur du marketing produit pour la division véhicule de tourisme, avant de passer à la compétition. Il est aujourd'hui directeur de la communication scientifique et technique de ce groupe.*

Depuis plus de cent ans, la raison d'être de Michelin est de faire progresser la mobilité, parce que mobilité et progrès, de même que mobilité et développement sont étroitement liés.

Est-ce le progrès qui entraîne la mobilité ou la mobilité qui entraîne le progrès ? Pour essayer d'y répondre, observons ce qui s'est passé depuis quatre mille ans. À chaque rupture technologique de la mobilité, surgit une nouvelle civilisation : on peut voir la roue, puis les voies romaines, l'Empire romain, les bateaux, la conquête du monde, le train, etc.

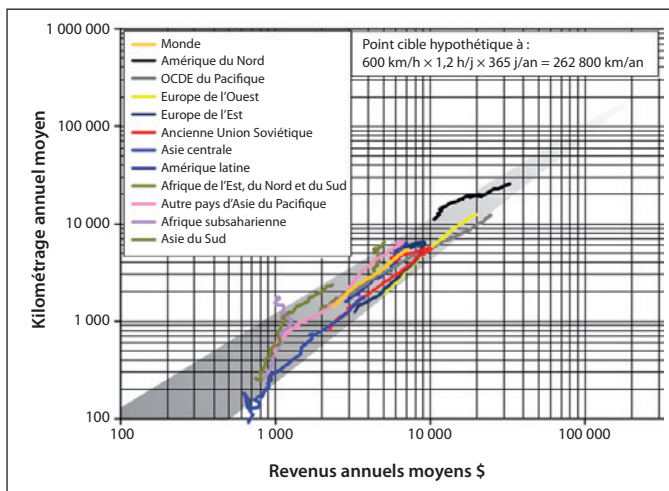
Par ailleurs, la **Figure 1** montre la corrélation forte qui existe entre le kilométrage annuel moyen d'une population et son revenu annuel, donc entre mobilité et développement. Cette corrélation est valable pour tous les continents et les pays : chaque trait de couleur de la figure correspond donc à une histoire. Par exemple, pour le trait noir des États-Unis : il y a cinquante ans, avec 10 000 dollars par tête de revenu annuel moyen, les habitants parcouraient 10 000 kilomètres par an ; aujourd'hui, le rapport est de 20 000 dollars par tête

1. [www.michelin.fr](http://www.michelin.fr)

Figure 1

Mobilité et développement sont très liés.

Source : A. Schafer (données 1950-2000)



pour 20 000 km parcourus. On trouve une relation très forte entre les deux facteurs.

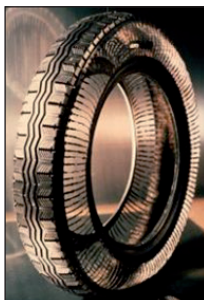
Nous sommes donc convaincus qu'il y a encore de l'avenir pour la mobilité, car la mobilité génère le progrès et que nous souhaitons y contribuer.

La **Figure 2** illustre comment depuis un siècle, Michelin a contribué par ses innovations

au développement de la mobilité, avec les premiers pneus démontables pour vélo, les premiers pneus pour voitures, les Michelin's, le pneu radial, le pneu vert... Il est intéressant de constater que la chimie a toujours été au rendez-vous pour nous aider dans ces ruptures technologiques, comme nous allons le voir à présent.

Figure 2

Évolution de la production Michelin.



## 1 Les enjeux du développement de la mobilité routière

Le développement de la mobilité routière (**Figure 3**) a néanmoins un certain nombre de retombées négatives qu'il faut traiter : un million de morts par an sur les routes, 18% des émissions de CO<sub>2</sub>, le prix des carburants qui va continuer à augmenter, la disponibilité des matières premières qui diminue, la congestion des villes. Tout cela constitue un énorme chantier si nous voulons faire progresser la mobilité dans de bonnes conditions. Il peut être résumé en quatre objectifs : la mobilité doit être rendue plus sûre, plus propre, plus efficace et plus agréable.



**Figure 3**

*L'augmentation des transports routiers : 50 millions de véhicules en 1950, 800 millions en 2000 et 1,6 milliards prévus en 2030.*

### Le pneumatique : un objet de haute technologie et un partenaire clé

Nous allons voir que le pneumatique est un objet high tech (**Figure 4**) dont le quotidien est une vie difficile (**Figure 5**). Le pneu est un objet composite de haute technologie qui subira au cours de sa vie des millions de cycles de défor-

mations et qui travaillera en grande déformation, ce qui n'est pas le cas des autres objets composites comme les raquettes ou les skis.

Le pneu est en fait un composite à plusieurs étages (**Figure 6**), car la structure globale du pneu est un composite constitué de mélanges de gomme et de renforts métalliques ou textiles, mais aussi



**Figure 4**

*Entre un pneu Michelin et un smartphone : quel est le produit le plus high tech ?*



**Figure 5**

*Le quotidien d'un pneu ;  
une vie difficile... chaque jour.*

parce que chaque mélange est lui-même un composite à une maille micrométrique ou nanométrique. Une grande variété de matériaux sont utilisés dans le pneu, au total plus de deux cents composants sont nécessaires à sa fabrication. La performance du pneu dépend de la parfaite cohésion de tous ces composants. Ces derniers se divisent en cinq groupes :

1- caoutchouc naturel : principal composant de la bande de roulement et des pneus de poids lourd ;

2- caoutchouc synthétique : essentiel dans la bande de roulement des pneus pour voiture et 4x4 ;

3- noir de carbone et silice : utilisés comme agents renforçant la résistance à l'usure du pneu ;

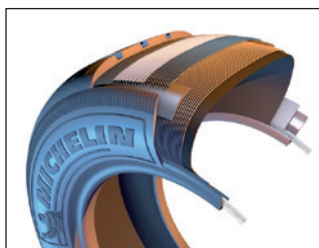
4- agents chimiques : permettent de cuire le pneu et de lui donner des caractéristiques particulières ;

5- câbles métalliques et fibres textiles : ils forment le squelette du pneu et garantissent sa rigidité.

Regardons maintenant chacun des composants. Prenons par exemple chacune des gommes qui sont partout et constituent 80 % d'un pneu. Par exemple, la gomme de la bande de roulement est aussi un composite à une échelle millimétrique ou nanométrique. C'est un mélange de quatre constituants : des élastomères, des charges renforçantes (du noir de carbone et maintenant de la silice, qui améliore la résistance à l'usure et l'adhérence, en particulier sur sols mouillés et froids), des plastifiants (huiles et résines) pour

**Figure 6**

*Composition d'un pneu : plus de 200 composants !  
Mélanges composites (élastomères, charges renforçantes, plastifiants, adjuvants) et renforts (textiles, métalliques).*



## LES PERFORMANCES À RÉUNIR POUR UN PNEU SONT NOMBREUSES

Sécurité, longévité, plaisir de conduire, freinage sol sec, robustesse, silence intérieur, confort, économies de carburant, tenue en virage sur le mouillé, respect de l'environnement, absence de vibration, adhérence neige, qualité, bruit extérieur, tenue de route, sans soucis...

permettre un bon mélange de l'ensemble des composants, des adjuvants comme le soufre qui permettent de cuire le pneu, et des éléments qui renforcent la stabilité aux rayons UV, la résistance à la chaleur...

La composition du mélange diffère selon les différentes parties du pneu, selon les fins d'utilisations et selon les modèles. Le développement et la mise au point du mélange constituent un point essentiel du développement du pneu.

Sous la bande de roulement se trouvent des nappes métalliques qui ceinturent le pneu, constituées de fils métalliques parallèles ; ces câbles en deux couches croisées assurent la rigidité du pneu et sont particulièrement importants pour sa tenue de route. La nappe carcasse radiale est celle située entre la gomme intérieure et le sommet du pneu ; dans les véhicules de tourisme, elle est constituée de fibres parallèles dans le sens radial (ce qui a donné le nom au pneu). Ces fibres inextensibles permettent de garder une bonne surface de contact entre le pneu et le sol.

Les fibres textiles et métalliques sont préparées pour assurer leur adhérence à la

gomme. Les fils métalliques sont en acier recouvert de laiton ; l'adhérence de ces câbles à la gomme résulte de la formation de polysulfures et de sulfures de cuivre à partir du cuivre constitutif du laiton et du soufre de la vulcanisation<sup>2</sup>.

La zone latérale du pneu est constituée de gomme souple capable de supporter une déformation à chaque tour de roue et de résister aux chocs.

Ce composite multi-étages devra travailler dans des conditions extrêmement difficiles, très longtemps, et effectuer de nombreuses tâches différentes.

L'innovation est le seul moyen pour trouver des solutions et pour satisfaire ce cahier des charges très complet : c'est l'ADN de Michelin (**Figure 7**). Pour réunir davantage de performances en un même pneu, il faut résoudre des conflits de conceptions en déployant des technologies de pointe.

2. La vulcanisation est un procédé chimique qui consiste à incorporer un agent vulcanisant tel que le soufre à un élastomère brut pour former après cuisson des ponts entre les chaînes polymères, en vue de rendre le matériau plus élastique.

Figure 7

L'ADN de Michelin :  
« Quand un client achète ses pneus, vous ne pouvez pas lui demander de choisir entre la sécurité, la longévité, les économies de carburant ou le confort » - François Michelin.



## 2 L'innovation technologique dans le domaine du pneumatique

### 2.1. Un travail d'équipe entre une multiplicité de métiers et de disciplines

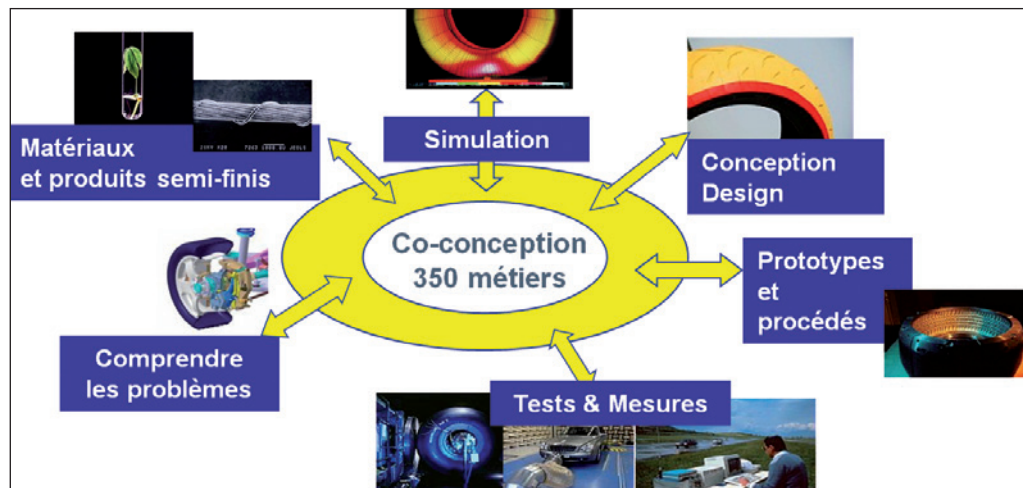
Michelin investit plus de 600 millions d'euros chaque année en recherche et développement. Le plus gros centre de recherche et développement est en France (près de Clermont-Ferrand). Les programmes ont trois horizons : la recherche avancée à

dix ans et plus, la recherche à objectifs de cinq à dix ans, et le développement sur les pneus qui vont bientôt sortir et qui seront sur les voitures dans trois-quatre ans.

Il est intéressant de noter la multiplicité des métiers qu'il faut avoir pour réussir cette innovation (Figure 8). La chimie y joue un rôle fondamental et prépondérant, elle n'est pas la seule discipline scientifique à intervenir. Le développement d'un pneumatique nécessite un travail d'équipe, de nouveaux outils

Figure 8

L'innovation dans le pneumatique : une multiplicité des métiers.



et une approche transdisciplinaire pour comprendre et résoudre les problèmes.

La compétition automobile sert à comprendre mieux les choses. Par exemple, les modèles d'adhérence utilisés au quotidien pour les pneus des voitures de tourisme ont été développés à partir d'observations et d'analyses faites en Formule 1, en Championnat du Monde des Rallyes et dans d'autres compétitions.

La **Figure 8** résume les différentes étapes de l'innovation. Il faut d'abord comprendre les problèmes pour trouver la bonne solution, et il faut souvent innover pour comprendre.

Commence ensuite le travail de conception des composants et des matériaux évoqués dans la **Figure 6**, qui regroupe toutes les sous-disciplines de la chimie : la chimie minérale, organique, et maintenant la biochimie.

Puis il faut assembler et coller ces matériaux : l'acier, le nylon, l'aramide<sup>3</sup>, les gommés... Enfin, tout cet ensemble doit résister à 150 % de déformation plusieurs millions de fois. Ce sont des défis techniques d'adhésion, de résistance très importants et difficiles à réussir.

Aussi, les outils de simulation apportent une aide efficace

3. L'aramide est un *polyamide aromatique*, classe de matériaux résistant à la chaleur et/ou présentant de bonnes propriétés mécaniques, servant à la fabrication de nombreux matériaux composites. Voir à ce sujet *La chimie et l'habitat*, Chapitre de G. Némoz, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

et utile qui permet d'explorer beaucoup plus, et beaucoup plus vite, la faisabilité des diverses solutions possibles. Le gain de temps et l'économie sont considérables par rapport à autrefois où, pour chaque nouvelle idée, il fallait réaliser un prototype. Il en est de même pour l'analyse du cycle de vie qui est maintenant indispensable.

Ensuite interviennent la conception, le design, puis la réalisation des prototypes sélectionnés, et la mise au point des procédés de fabrication des prototypes, car chaque innovation dans les matériaux, dans l'architecture des pneus ou dans le dessin de la bande de roulement entraîne une nécessaire innovation dans les procédés de fabrication et d'assemblage des composants.

En dernier lieu, il faut tester les prototypes, et la puissance de tests est absolument fondamentale : toute cette boucle doit fonctionner en permanence pour pouvoir garantir et améliorer la qualité du pneu (**Figure 9**).

350 métiers contribuent à la conception et à la réalisation d'un pneu : des tribologues<sup>4</sup>, des métallurgistes, des chimistes de l'analyse, des mécaniciens des fluides, des spécialistes des matériaux (150 métiers différents dans cette filière). Tous ces métiers doivent travailler ensemble afin de résoudre les conflits de conceptions et trouver des solutions innovantes qui permettent d'apporter plus de performances aux clients (**Figure 10**).

4. La tribologie est la science du frottement.

Figure 9

Tests des pneus sur les prototypes.

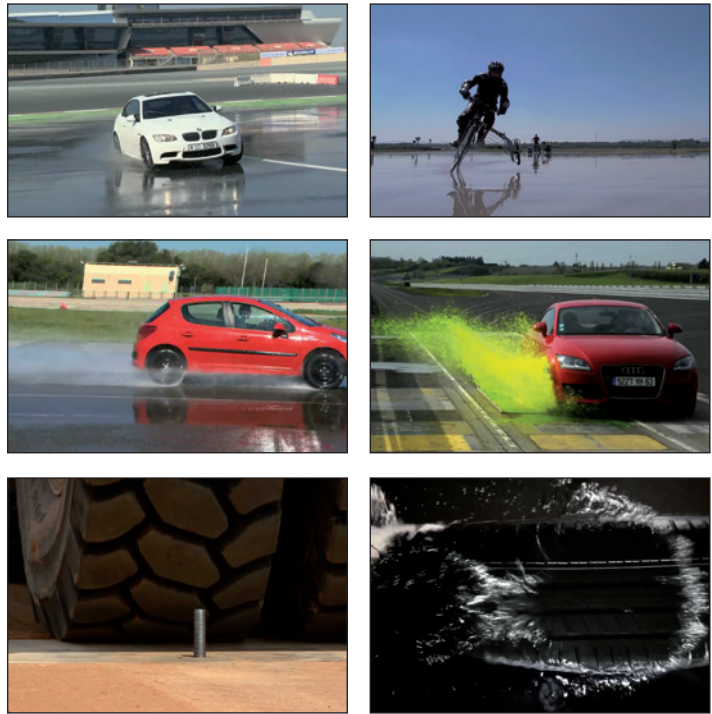
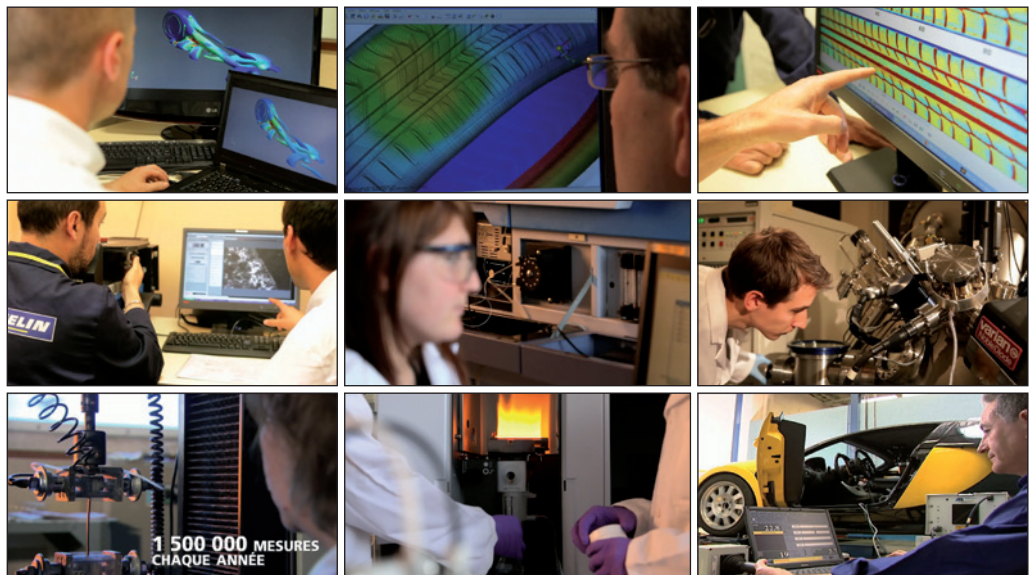


Figure 10

Une multitude de métiers pour la conception et à la réalisation d'un pneu.





## 2.2. Le pneu vert ou comment concilier l'adhérence et l'efficacité énergétique

Pour une voiture de tourisme, un plein sur cinq est pour les pneus (Figure 11). Quand une voiture de 1,5 tonnes roule à 110 ou 130 km/h sur une route, chaque pneu consomme l'équivalent d'énergie d'un radiateur de 2 000 watts. Pour un poids lourd, c'est encore plus important : 30 à 33 % de l'énergie consommée l'est pour les pneus. L'objectif est donc d'améliorer l'efficacité énergétique des pneus afin de

diminuer la consommation de carburant et par conséquent de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

La Figure 12 résume comment les pneus consomment de l'énergie : 15 % sont consommés dans la résistance à l'avancement, qui résulte du brassage de l'air et du glissement sur le sol de la bande de roulement. 60 à 70 % sont consommés par les flexions, les cisaillements, les compressions de la bande de roulement, et 20 à 30 % par les flexions et cisaillements des flancs et zones basses.

Figure 11

Un plein sur cinq est pour vos pneus.

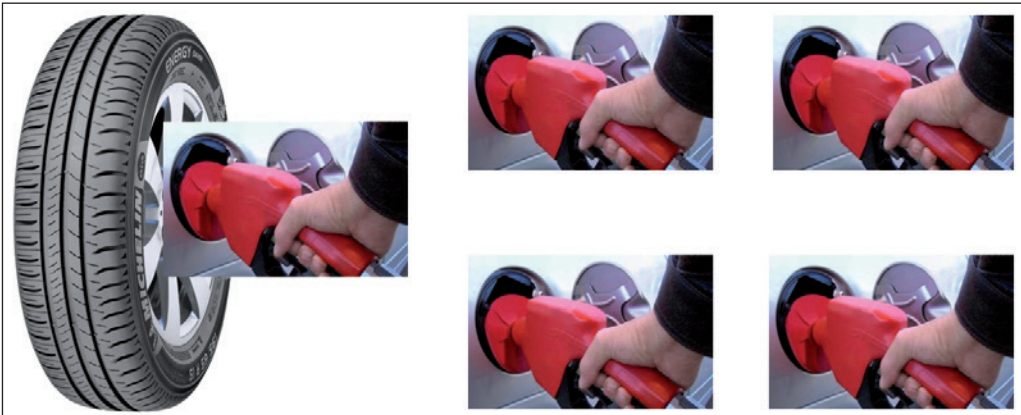

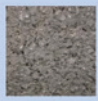
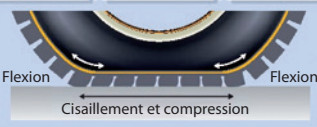
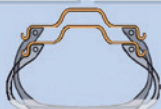


Figure 12

Pourquoi les pneus ont-ils besoin d'énergie ?

Quoi	Surface du pneu et air	Bande de roulement			Flanc et zone de base		
Comment	Brassage d'air 	Glissement sur le sol 	Déformations d'où dissipation d'énergie Flexion    Compression    Cisaillement 			Flexion    Cisaillement 	
	Contribution à la résistance au roulement	< 15 %	60 à 70 %			20 à 30 %	

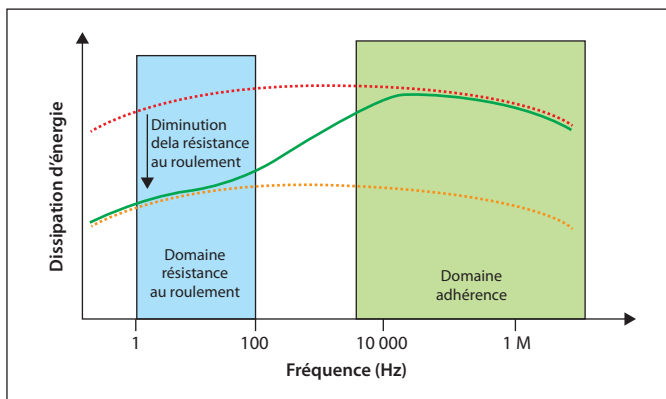
C'est donc un domaine dans lequel il y a beaucoup de progrès à faire et où la chimie sera utile pour améliorer les propriétés des composants

La **Figure 13** montre que 70 % de l'énergie consommée par le pneu est due au fait que la roue est ronde et la route est plate : le pneu est obligé de se déformer pour en épouser la forme.

On peut étudier par simulation numérique le brassage de l'air (qui ne représente que 15 % de la consommation d'énergie), et pour cela choisir entre différentes sculptures celles qui seront les plus efficaces. On a tendance à penser que les pneus qui sont bons en efficacité énergétique ne sont pas bons en adhérence. En réalité, il est tout à fait possible de concilier adhérence et efficacité énergétique. Une grande rupture dans ce domaine a eu lieu en 1992 avec l'apparition de la silice comme charge renforçante, qui a non seulement renforcé la résistance à l'usure mais également modifié le comportement de la gomme de la bande de roulement.

**Figure 13**

*Dissipation d'énergie en fonction de la fréquence.*



Traditionnellement, les pneus très adhérents avaient des dissipations d'énergie importantes, aussi bien aux basses fréquences de déformations liées au tour de roue qu'aux fréquences élevées liées à l'adhérence. En effet, à 80-100 km/h, le pneu fait une vingtaine de tours de roues par seconde, soit vingt déformations par seconde, donc une fréquence de 20 Hz.

Par contre, pour que le pneu s'accroche bien à la route, on dispose de moins d'une milliseconde pour générer le phénomène d'adhésion, et cette adhésion dépend de phénomènes locaux dans lesquels il faut que le pneu épouse chaque grain de la route. Moins d'une milliseconde correspond à des fréquences de déformations du matériau dans le domaine du kHz ; il faut donc que dans ce domaine des fréquences élevé, le pneu puisse facilement se déformer, devienne mou. Il faut donc être capable de dissocier les propriétés du matériau quant à sa dissipation d'énergie à basse ou à haute fréquence.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'une sorte de pâte à modeler pour enfant, le silly putty : si on le sollicite à faible vitesse on a l'impression que c'est presque un liquide qui est capable de couler. En revanche, si on sollicite à forte vitesse en le jetant par terre, il ne reste pas par terre en s'étalant mais rebondit. Ce matériau est donc très mou quand on le sollicite à basse vitesse, et très élastique quand il est sollicité à vitesse élevée.

Pour le pneu, c'est l'inverse qu'il faut réaliser avec une gomme de formulation

adaptée : on veut qu'il soit élastique à basse fréquence de déformation et consomme peu d'énergie, mais on veut aussi qu'il soit mou à vitesse de déformation élevée pour bien adhérer, et c'est ce que l'ajout de silice a permis de réaliser (Figure 13, courbe verte). Ces nouveaux pneus, appelés « pneu verts », ont été créés en 1992, et nous en sommes actuellement à la cinquième génération ; et la chimie a joué un grand rôle dans la mise au point de ces différentes générations. Le gain réalisé sur la dissipation d'énergie de ces pneus verts a fait économiser seize milliards de tonnes de carburant, soit 40 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> (Figure 14).



**Figure 14**

Le pneu vert de Michelin : économiser plus de 16 milliards de litres de carburant et réduire de plus de 41 millions de tonnes les émissions de CO<sub>2</sub>.

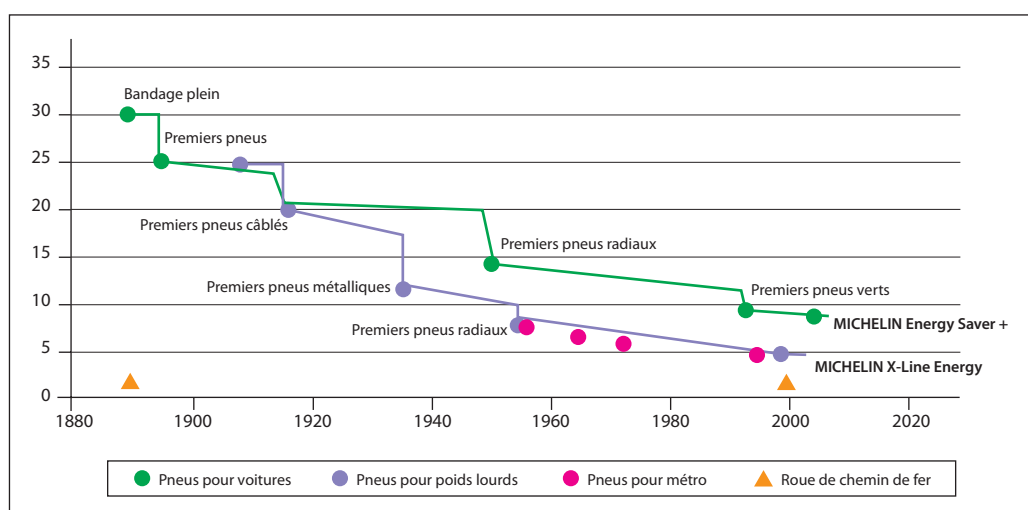
### 2.3. Le pneu radial

Si l'on regarde l'évolution du pneu sur un siècle (Figure 15), nous sommes partis d'un bandage plein qui avait un coefficient de résistance au roulement de 30 kg/tonne, ce qui est équivalent à monter constamment une pente de 3 %.

Les premières innovations ont eu lieu en 1946, avec l'apparition des premiers pneus radiaux pour les voitures, et quelques temps plus tôt, avec les pneus métalliques pour les poids lourds. Pour les pneus métalliques, c'est déjà la chimie qui a permis de coller le métal et la gomme, ce qui fut ensuite un point clé pour la réalisation du radial qui aurait été impossible s'il n'y avait pas eu cette expérience du poids lourd à pneus métalliques. En effet, dans le pneu radial, il faut coller les

**Figure 15**

Évolution du coefficient de résistance au roulement ces 160 dernières années (en kg/t).



fils métalliques à la gomme pour les nappes métalliques de la ceinture du sommet. Rappelons que cette structure radiale permet de garder en permanence une bonne surface de contact entre le pneu et le sol.

Et ces progrès ont fait que, dans les années 50, on est passé à un coefficient de résistance au roulement de 15 kg/t (équivalent à une pente de 1,5 %), puis à 10 kg/t dans les années 90 (équivalent à une pente de 1 %), et l'on baisse constamment ce coefficient.

Les résistances au roulement sont plus faibles sur les poids lourds que sur les voitures de tourisme parce que les pneus de poids lourds sont gonflés à 8 ou 10 bars ; ils sont donc beaucoup plus rigides que les pneus de voiture gonflés à 2 bars, qui ont des taux de déformation plus importants. Néanmoins, bien qu'étant plus rigides, les pneus poids lourd qui ont des pressions sur le sol très élevées et qui contiennent du

caoutchouc naturel sont très adhérents comme les pneus de voiture réalisés à partir de polymères de synthèse.

La diminution du coefficient de résistance au roulement est importante car nous avons vu qu'elle joue un rôle non négligeable dans la dissipation de l'énergie (20 %).

Nous avons aussi vu que pour les véhicules de tourisme, un plein sur cinq va pour les pneus, mais pour les poids lourds, c'est un plein sur trois, et comme le transport routier est responsable de 18 % des émissions de CO<sub>2</sub> de la planète, cela veut dire que les pneumatiques sont responsables de 4,4 % de ces émissions. C'est beaucoup, et il faut donc continuer à progresser dans ce domaine.

Pour cela, il faut continuer à développer la recherche dans le domaine des matériaux et des structures composites pour améliorer l'adhérence, l'efficacité énergétique, la longévité, le confort, etc.

## Le pneumatique pour le XXI<sup>e</sup> siècle...

Il reste donc encore beaucoup de chemin à parcourir, et tous les métiers de la chimie y seront présents.

De plus, nous devons réaliser ces progrès avec une chimie propre, économe en énergie, biosourcée dans la mesure du possible : trouver des solutions où les agents qui transformeront les matériaux seront des microbes, des bactéries, ou des auto-arrangements de molécules dans certaines conditions, afin de nous diriger

vers des matériaux beaucoup plus sophistiqués, ayant des performances décalées, réduisant davantage les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des composants.

Si l'on veut continuer à avoir de la mobilité *via* le transport routier, le pneumatique jouera encore un rôle très important dans les 30 à 50 ans à venir, et nous aurons besoin de trouver des solutions innovantes à de nombreux défis et problèmes qui restent encore posés, dans lesquels les sciences de la chimie seront très présentes.