

L'émergence de l'économie circulaire¹ du pneu : un défi passionnant !

D'après la conférence de Jean-Michel DOUARRE

Jean-Michel Douarre, Responsable du programme de Recherche sur les Matériaux, Michelin

Introduction

Le sujet de cette communication est l'émergence de l'économie circulaire du pneu. Cela concerne la capacité de pouvoir recycler le pneu usé (appelé également pneu en fin de vie non réutilisable) dans le pneu neuf. Cette action s'inscrit dans celles que l'on peut activer pour améliorer l'impact environnemental du pneu tout au long du cycle de vie du pneu. C'est d'abord l'extraction et l'origine des matières premières, la conception (on peut

par exemple réduire la masse pour avoir un pneu qui soit aussi performant), la fabrication, la logistique, l'usage, la gestion des produits en fin de vie... Si on améliore la performance des pneus, par exemple la longévité kilométrique, la résistance au roulement directement reliée à la consommation du véhicule, on améliore aussi l'impact du produit sur l'environnement (*Figure 1*). Le thème de cette communication est ici celui du recyclage du pneu usé dans le pneu neuf, partie très importante du cycle de vie du pneu.

1. Modèle économique visant à minimiser le gaspillage et à maximiser la durabilité en réutilisant, recyclant et régénérant les ressources.

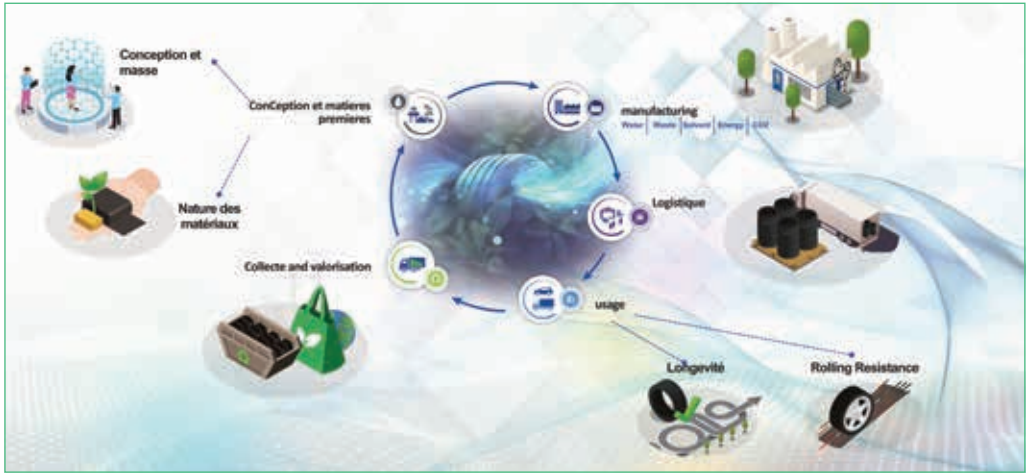


Figure 1

Cycle de vie du pneu chez Michelin.

1 Les difficultés de remplacement des matières premières fossiles du pneu

1.1. L'objectif ciblé par Michelin et les quantités impliquées

Michelin s'est engagé à remplacer totalement l'ensemble des matériaux d'origine fossile du pneu d'ici 2050, soit par des matériaux issus du bio-sourcé (renouvelable), soit du

recyclage. On est aujourd'hui à 30 %, on passera à 40 % en 2030 pour arriver à 100 % en 2050 (Figure 2). Il s'agit d'un objectif très ambitieux car il concerne le remplacement d'à peu près 3 millions de tonnes de matières premières. La quantité totale de matière utilisée dans les pneus Michelin dans le monde, c'est 300 fois le poids de la tour Eiffel ! La quantité de matières à remplacer en volume est donc déjà le premier défi.



Figure 2

Objectif de réduction de matières fossiles dans les pneus Michelin d'ici à 2050.

1.2. La diversité des matières premières du pneu

Une deuxième caractéristique du problème concerne la diversité de matières premières impliquées dans le pneu. Un pneu ça paraît rond, noir et monocomposant. Eh bien ce n'est pas du tout monocomposant puisque la partie noire est constituée de mélanges de caoutchouc. Ces mélanges sont des assemblages de matières premières – des élastomères² –, des charges renforçantes³ (silice, noir de carbone), des additifs, des plastifiants⁴, des agents de cuisson⁵, des agents

de mise en œuvre⁶, des agents de protection du pneu⁷. Cette seule partie « mélange » est déjà complexe mais on a en plus dans le pneu du métal et du textile. Il faut donc s'intéresser à toutes ces matières premières-là et trouver des solutions de remplacement qui sont durables et non issues de la matière fossile (Figure 3).

On a déjà vu deux défis : le volume et le nombre de matières premières importants avec des chimies très différentes à remplacer. Mais il y a en plus **quatre obstacles potentiels** à surmonter.

2. Polymères élastiques, souvent utilisés dans la fabrication de caoutchouc.

3. Substances ajoutées à un matériau pour améliorer sa résistance et ses propriétés mécaniques.

4. Substances ajoutées aux polymères pour les rendre plus souples et flexibles.

5. Additifs utilisés dans le processus de vulcanisation du caoutchouc pour améliorer ses propriétés physiques.

1.3. Quatre défis principaux à surmonter

A. Défi technologique

Le premier défi est technologique : il s'agit de trouver des

6. Substances facilitant le processus de fabrication d'un matériau.

7. Substances ajoutées pour améliorer la durabilité et la résistance du pneu.



Figure 3

Composition de l'économie circulaire classique d'un pneu. Elle indique aussi les consortiums* (groupe de partenaires) et projets identifiés en vue du développement de matières premières renouvelables ou recyclées.

*Groupes de partenaires collaborant pour atteindre des objectifs communs, souvent dans le contexte de projets de recherche ou d'innovation

matières premières aussi performantes que les matières premières qu'on remplace, en particulier en ce qui concerne la sécurité : rappelons quand même que dans les véhicules, les pneus sont le seul contact avec la route. Ce contact se fait par quatre petites surfaces (de la taille d'une carte postale) donc quand vous êtes à 130 km/h sur l'autoroute et que vous devez freiner, vous avez intérêt à avoir des bons pneus et des bons matériaux : il n'est pas possible de transiger sur cet impératif. Il y a aussi l'usure à maîtriser car on ne veut pas faire subir des dégradations de performances à l'utilisateur du fait du remplacement des matériaux.

B. Défi de la chaîne d'approvisionnement

Quand on a identifié des solutions techniques possibles, ce n'est pas pour autant que l'on a gagné car il faut faire des produits pour une masse de 3 millions de tonnes. Il va donc falloir, **deuxième défi, développer une chaîne d'approvisionnement et de transformation de matières premières appropriée** aux nouvelles contraintes technologiques. Cela se traduit par la mise en place des équipements industriels permettant de réaliser la série de transformations nécessaires. Bien entendu, pour les matières fossiles ou pour les matières durables, les transformations sont différentes : il faudra donc totalement **redéfinir les moyens de transformation et investir** pour disposer des capacités nécessaires à des produits de haute qualité et stables.

Une autre contrainte majeure vient de ce que Michelin produit sur toutes les zones géographiques, et ne veut pas avoir une fabrication de matières durables uniquement en Europe pour faire des pneus en Asie par exemple... Les chaînes d'approvisionnement doivent couvrir l'ensemble de **notre « activité Monde »** en « *local to local* » : **c'est notre deuxième défi.**

C. Défi de la viabilité économique

Défi technologique, défi de création de chaînes d'approvisionnement pour des larges volumes, stabilité de la qualité, couverture Monde. En surcroît de ces défis, il faut rajouter notre troisième défi : celui de **la viabilité économique**. Celle-ci est fondamentale : s'il n'y a pas de viabilité, il n'y a pas de développement. La chaîne de transformation, par définition, comporte une série d'acteurs différents. S'il y a un acteur dans la série qui ne gagne pas sa vie, la chaîne de transformation ne va pas se développer et le système va bloquer. Il va donc falloir prêter une attention particulière à cette partie-là.

L'optimisation économique d'une nouvelle chaîne d'approvisionnement est en concurrence avec les chaînes d'approvisionnement des matières premières fossiles existantes qui sont, par nature, super optimisées et pour lesquelles les investissements sont faits et amortis depuis longtemps. On part donc avec un handicap économique considérable. Mais qui va payer ? Est-ce que le client va l'accepter ? Est-ce

que des subventions pourront venir compenser les nouvelles dépenses d'investissements ? Rien n'est acquis, mais ce qui est sûr c'est qu'il va falloir mobiliser toutes les idées pour maîtriser l'impact économique. Un point de vigilance important sera par exemple d'être capable de valoriser tous les produits issus de la chaîne de transformation, même ceux que l'on appelle les sous-produits qui ne pourront pas être utilisés dans le pneu. Tout doit être utilisé et valorisé.

D. Défi de la viabilité environnementale

Le **quatrième défi** qu'il faut surmonter est celui de la **bonne viabilité environnementale**. Il faut être sûr que l'introduction de ces nouvelles matières premières n'impacte pas négativement l'analyse du cycle de vie (ACV). Par exemple, si vous introduisez une nouvelle matière première et que vous perdez en résistance à l'usure, cela veut dire que votre pneu va faire moins

de kilomètres, il va falloir le changer plus rapidement et, à la fin, l'efficacité de la matière n'est pas bonne : vous allez donc dégrader l'analyse du cycle de vie. Par ailleurs, comme chaque transformation demande de l'énergie, il va falloir faire attention au bilan énergétique des nouvelles technologies mises en œuvre : si vous avez besoin de deux fois plus d'énergie, vous dégagez aussi plus de CO₂ et cela va être compliqué. Là aussi, il va falloir travailler sur des moyens de transformation qui sont économes en énergie.

De surcroît, il faut veiller à ne pas générer d'effets environnementaux négatifs, hygiène, sécurité, environnement, et intégrer par exemple la question des impuretés dans tout le cycle de recyclage. Pour éviter des impacts environnementaux négatifs, il faut s'assurer que l'analyse de ces risques a été conduite de façon professionnelle et que toutes les mesures nécessaires ont été mises en place (**Figure 4**).

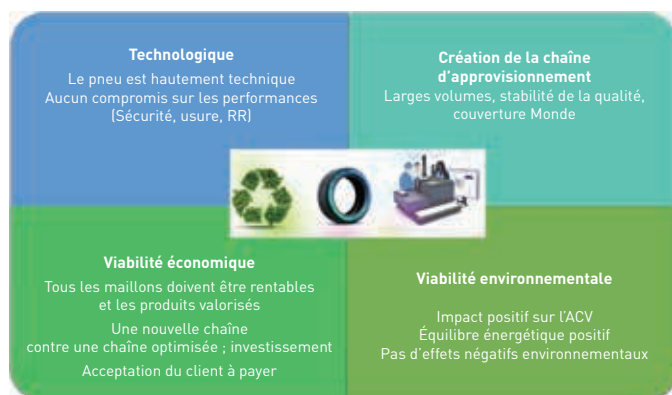


Figure 4

Quatre défis à résoudre pour permettre la recyclabilité optimale des pneus.

2 Le recyclage des pneus

2.1. Quantités en présence

Si l'on revient au recyclage, le premier constat, les chiffres sont quand même assez impressionnants, est qu'il y a 1,6 milliard de pneus qui deviennent déchets dans le monde par an. 1,6 milliard de pneus, cela fait 26 millions de tonnes de matériaux qui sont des déchets. En Europe, c'est 3,5 millions de tonnes. L'Europe est plutôt bien placée sur la collecte des pneus en fin de vie, puisqu'on en collecte en moyenne 90 à 95 %. Aujourd'hui, environ 50 % des pneus collectés sont valorisés énergétiquement : ils sont envoyés dans des cimenteries pour y être brûlés et obtenir de l'énergie. 50 % sont également utilisés pour la matière pour faire des tapis de sol, de l'asphalte, des murs antibruit, des terrains de sport...

Il apparaît depuis quelques années qu'une petite partie seulement de ces matières premières sont recyclées dans le pneu. La principale raison en est que la qualité des produits obtenus sans traitement supplémentaire, est largement insuffisante pour répondre aux défis de performance mentionnés précédemment.

Le deuxième constat qui s'impose est que 3,5 millions de tonnes sont disponibles en Europe mais que 50 % sont exportés. Pourquoi exporter ? C'est de la matière première, autant la garder chez nous et ne pas dépenser l'énergie pour l'envoyer ailleurs. Les pneus en fin de vie devraient être une grande source potentielle de

matières premières pour le pneu. Recycler le pneu, c'est donc une vraie opportunité, mais il faut bien sûr développer les technologies pour y arriver.

2.2. Le projet *BlackCycle*

Revenons sur le cycle des transformations pour présenter le projet *BlackCycle*⁸, un projet co-financé par l'Europe dont Michelin est leader. L'idée est, dans un premier temps, de recycler la partie caoutchouc du pneu uniquement. Cela consiste, après avoir récupéré les pneus, à les trier, les « déconstruire » parce que la bande de roulement est très différente du flanc en termes de composition : il est donc intéressant, par exemple, de traiter les bandes de roulement ensemble et les flancs séparément. Il faut également séparer le textile, le métal, mais on ne s'occupe pas de leur recyclabilité dans le pneu dans ce projet-là. Le projet *BlackCycle* s'occupe de la partie uniquement « mélange de caoutchouc » que l'on va pyrolyser après granulation.

La pyrolyse⁹ est une technologie intéressante pour un mélange complexe constitué de différents composants intimement liés impossibles à séparer (dans notre cas, il y a des élastomères, des charges, des produits chimiques). Elle traite l'ensemble du mélange

8. Le cycle du noir, en référence à la couleur de la partie « mélange » que l'on cherche à recycler.

9. Processus de décomposition chimique d'une substance par la chaleur en l'absence d'oxygène, générant des gaz et des résidus carbonés.

complexe en le décomposant thermiquement. Ainsi, la pyrolyse va produire du gaz qui sert à alimenter la pyrolyse en énergie, du noir de carbone appelé « *Recovered Carbon Black (R-CB)* » qui est un mélange de noirs de carbone, de cendres minérales (ZnO, silice) venant des matériaux de caoutchouc pyrolysés, et des huiles de pyrolyse. À noter que les « *recovered CB* » sont des noirs de carbone peu techniques pouvant être utilisés à des quantités limitées dans les pneus.

Les huiles de pyrolyse, séparées, sont distillées¹⁰ et fournissent différentes fractions qui seront épurées pour être valorisées. Un exemple sera d'en prendre une partie, la fraction lourde¹¹, et de l'envoyer vers un fabricant de noir de carbone. Celui-ci utilise généralement des résidus pétroliers pour alimenter ses fours. À partir de l'huile de pyrolyse, il pourra faire un noir de carbone identique à celui qu'il fabrique en utilisant des résidus pétroliers classiques. À noter que ce noir est alors très technique et peut être utilisé de façon massive dans les pneus.

En résumé, il y a donc une série de transformations que l'on est obligé de mettre en place pour pouvoir arriver à des matériaux de bonne qualité économiquement viables. Dans notre exemple, il faut

collecter les pneus, les trier, les déconstruire, granuler la partie caoutchoutique, pyrolyser, distiller l'huile de pyrolyse et fabriquer le noir de carbone technique. Encore une fois, quand on veut recycler un pneu usé, savoir le transformer en matières premières de haute qualité est la clé et nécessite donc une chaîne de transformations performante.

2.3. Le développement de consortiums

Chez Michelin, on ne sait pas faire la pyrolyse, ce n'est pas notre domaine, la granulation¹², la fabrication de noir de carbone non plus. Or comme on l'a vu précédemment, le pneu neuf sera le résultat de l'introduction de matières premières en partie du recyclage et d'une longue chaîne de transformations successives. On ne peut donc pas créer cette chaîne seul. Il faut collaborer avec des spécialistes de chaque domaine, de chaque transformation. Les consortiums sont des mécanismes parfaits pour mettre ces collaborations en œuvre. Au cours de ces dernières années, Michelin a donc créé des consortiums rassemblant les professionnels de chaque étape de transformation pour pouvoir penser d'une façon holistique la chaîne de transformation et pour obtenir rapidement des matières premières idoines pour le pneu. Le projet *BlackCycle* cofinancé par l'Europe dans le programme

10. Processus de séparation des composants d'un mélange liquide en les chauffant pour les vaporiser, puis en les refroidissant pour les condenser.

11. Partie d'une substance qui a une densité plus élevée, obtenue lors d'une distillation.

12. Processus de transformation de matières en particules granulaires, souvent utilisé dans le traitement de matériaux.

Horizon 2020 était le premier que l'on a lancé et a généré une dizaine d'innovations différentes sur cette chaîne de valeur pour arriver à sortir des matières premières de qualité (Figure 5).

Les consortiums sont vraiment importants dans notre fonctionnement. L'Europe est un facilitateur pour les mettre en place dans le cadre d'appels à projets qui sont organisés sur le recyclage, sur l'économie circulaire. En 2020, nous avons ainsi lancé le projet *BlackCycle*, pour le recyclage de la partie caoutchouc. Treize entités constituent ce consortium : Michelin en est leader, mais il comprend également tous les spécialistes de chaque chaînon de la série de transformations des pneus en fin de vie :

- Aliapur, collecteur de pneus usagés (France) ;
- ESTADO (Allemagne) et HERA (Espagne), transformateurs des pneus collectés ;

- Pyrum (Allemagne) et Sisener (Espagne) ; pyrolyseurs et distillateur (Sisener) ;
- Orion, fabricant de noir de carbone (Allemagne) ;
- Michelin, concepteur et fabricant de pneumatiques.

Il y a aussi des académiques travaillant sur des technologies pour améliorer la qualité et le rendement des huiles de pyrolyse :

- ICB (Espagne) ;
- CERTH (Grèce).

Il ne faut pas non plus oublier les autres partenaires :

- INERIS (France), sur l'ergonomie et la maîtrise des risques Hygiène/Sécurité/Environnement des nouvelles technologies ;
- Quantis (Suisse), pour le calcul des analyses de cycle de vie, bilans carbone ;
- Axelera (France), pour la dissémination des résultats du projet ;

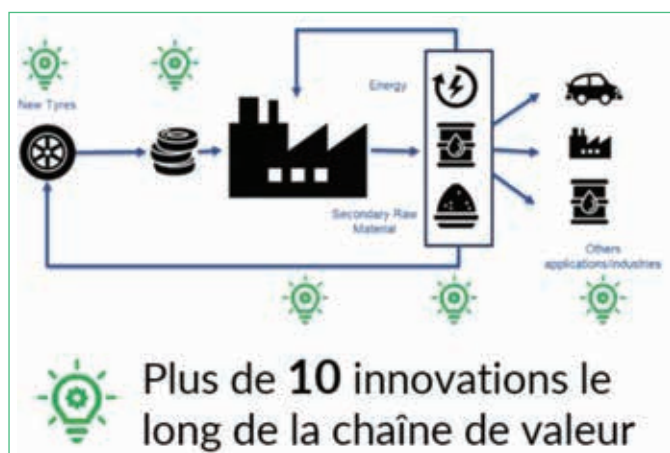


Figure 5

Innovations mises en place dans le projet *BlackCycle*.

- ICAMCYL, pour la collecte et l'organisation des données du projet pour l'Europe.

Nous citons la liste des acteurs de *BlackCycle*, pour bien démontrer que tous ces partenaires constituent un vrai écosystème autour de la transformation des pneus en fin de vie en matières premières de haute qualité. Cet écosystème est très important pour introduire de nouvelles technologies et mieux maîtriser le processus global de transformation.

Cerise sur le gâteau, au-delà de la diversité d'activité des différents partenaires (activité technique, industriels versus académiques versus instituts...), ce projet européen rassemble des intervenants de cinq pays différents, ce qui rajoute une diversité culturelle supplémentaire très intéressante et stimulante.

2.4. Perspectives de développement

En 2020, avec le projet *BlackCycle*, Michelin a initié les actions de recyclage de la partie « mélange » de caoutchouc noir (d'où le nom de « *BlackCycle* »). En 2022, nous nous sommes intéressés à la partie PET du pneu utilisé sous forme de fibre textile donnant une grande partie de la rigidité structurelle du pneu. C'est le même polymère qui est utilisé dans les bouteilles d'eau minérale par exemple. Cependant, contrairement aux bouteilles où il est « facile » de retraiter le PET car composé de près de 100 % de PET, pour le pneu c'est une autre histoire. En effet, quand on déconstruit le pneu, on récupère une pulpe de

PET¹³ très sale avec du caoutchouc à l'intérieur, que l'on ne sait pas utiliser. On a donc lancé un autre projet européen qui s'appelle *WhiteCycle*¹⁴, cofinancé par l'Europe dans le programme Horizon pour la partie fibre textile en PET. Comme pour *BlackCycle*, il faut déconstruire, trier, purifier. Mais contrairement à *BlackCycle*, on n'utilise pas la pyrolyse comme technologie cœur mais la dépolymérisation enzymatique¹⁵ de Carbios pour traiter le PET. L'enzyme très sélectif va être extrêmement efficace pour décomposer le PET (sans être perturbé par les résidus de gomme). Les monomères du PET récupérés ainsi seront purifiés et repolymérisés ensuite. Le nouveau PET sera alors transformé en fibres pour être réintroduit dans les pneus neufs. On voit là aussi toute une série de transformations différentes de celles de *BlackCycle* qu'il va falloir mettre au point. Le consortium dans un projet européen est ici encore une excellente solution pour progresser rapidement. Ce projet fait intervenir seize entités et cinq pays.

En bref, ce que l'on attend de ces consortiums, c'est la possibilité de créer une chaîne de valeur de l'économie circulaire du pneu d'une façon rapide, qui va conduire à des innovations et créer un nouvel écosystème qui n'existe pas aujourd'hui.

13. Mélange de fibres de polyester avec des résidus de gomme provenant du recyclage des pneus.

14. Le cycle du blanc, en référence à la couleur du PET.

15. Processus de dégradation de polymères par des enzymes, dans ce contexte, utilisé pour le recyclage du PET.

Conclusion

J'espère vous avoir convaincus que le recyclage est un défi passionnant, en particulier pour des produits complexes, composites, parce qu'il faut savoir trouver les technologies pour refaire des matières premières de haute qualité et conserver les performances des produits neufs. C'est un défi passionnant parce que cela passe forcément par une activité collaborative : on ne peut pas le faire tout seul, ce n'est pas possible. Il nous faut les universitaires, il nous faut les différents acteurs de l'industrie, les spécialistes de l'analyse du cycle de vie, de l'ergonomie et des risques environnementaux pour nous aider à réussir : c'est donc très collaboratif et passionnant parce que l'on travaille avec des sociétés que l'on ne connaissait pas trop, avec des cultures différentes, avec aussi des pays différents.

C'est également passionnant parce que cela réclame des innovations qui nous permettent d'avoir les bons produits au bon coût, au bon volume, à la bonne qualité. Cette activité doit aussi être résiliente, parce qu'il y a beaucoup de concurrence par rapport aux chaînes traditionnelles. La situation est parfois difficile en termes de coût. Le coût est généralement plus élevé au départ, et il faut se focaliser pour trouver la meilleure chaîne de valeur et être concurrentiel par rapport au fossile et relever les différents défis auxquels on fait face.

Ce chapitre vous a montré des exemples de défis techniques, économiques, environnementaux, de création de l'écosystème auxquels on a à faire face. « **Quand j'ai commencé à travailler sur le recyclage, j'en avais une très mauvaise image : je croyais que c'était du bidouillage, que quand on recyclait quelque chose, on avait un produit qui n'était pas de bonne qualité. Eh bien, ce n'est pas ça le recyclage.** C'est vraiment réussir à obtenir des matériaux de haute qualité mis au point grâce à beaucoup d'innovations et de travail collaboratif. »