

Le pneumatique dans un environnement « technologie véhicule évolutif » : impacts et perspectives

Grâce aux efforts de recherche et développement qui ont été menés, la résistance au roulement des pneus a été réduite de moitié depuis une trentaine d'année. Cependant, cette résistance au roulement continue de contribuer, de manière très significative, à la consommation d'énergie des véhicules : jusqu'à plus de 20 % pour les véhicules à propulsion thermique, et jusqu'à plus de 30 % pour les véhicules « tout électrique ». Il y a donc là un gisement de progrès considérable. Par ailleurs, la conception des systèmes de roues intégrant moteur et suspension électriques peut constituer une rupture technologique décisive...

par **Jean-Marie MUS***

LE CONTEXTE

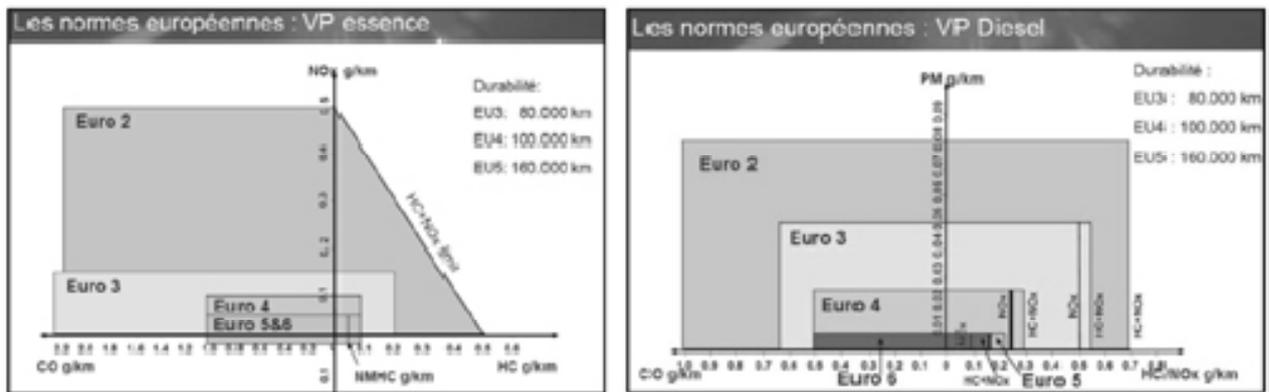
Notre société est à la recherche des voies pouvant permettre d'exploiter de manière durable les ressources naturelles de notre planète. L'industrie automobile, forte consommatrice d'énergie fossile, a un rôle majeur à jouer dans ce contexte. A ce jour, nous pouvons estimer le parc automobile mondial à 900 millions de véhicules. Plusieurs projections estiment qu'il sera de l'ordre de 1,5 milliard de véhicules à l'horizon 2030-2040, sachant, par ailleurs, que le transport routier représente 18 % de la totalité des émissions de CO₂ d'origine anthropique, la totalité des modes de transport représentant 24 % de ce total (1). Comment

concilier les attentes des personnes en matière de mobilité et l'impact de celle-ci sur l'environnement ? Comment l'industrie automobile réagit-elle face à ce problème ? Quel en est l'impact, en ce qui concerne le pneumatique ?

Plusieurs faits déclencheurs doivent être pris en compte pour comprendre les évolutions futures du monde automobile. Le plus important est la pression sociétale, que relaie une action réglementaire, cherchant à limiter de façon drastique la pollution des véhicules, et donc

* Groupe Michelin, Recherche Avancée.

(1) Source *World Business Council for Sustainable Development*.



Graphique 1 : Evolution des contraintes réglementaires européennes s'appliquant aux véhicules « essence » et « diesel ».

leur consommation de carburant. La plus visible est centrée sur la réduction des émissions de CO₂ (et autres agents polluants), avec les réglementations européennes qui y sont associées.

Cependant, cette pression environnementale se couple à une tendance de fond : l'augmentation du coût de l'énergie fossile. Ponctuellement, ce coût pourra fluctuer, comme c'est le cas aujourd'hui, en situation de crise, mais, en projection, cette tendance à la hausse est robuste et durable. Pour le conducteur, cela n'est pas sans conséquence sur le coût complet d'usage de son véhicule (*Total Cost of Ownership*). A titre d'exemple, la flambée des prix des carburants, enregistrée en 2008, a eu pour effet de réduire la distance moyenne parcourue annuellement, pour la toute première fois depuis que cet indicateur a été mis en place.

Pour répondre à ces défis, les constructeurs automobiles, dans leur ensemble, recherchent des voies de propulsion alternatives permettant de répondre à cette double problématique, environnementale et économique.

UNE RÉPONSE TECHNOLOGIQUE DIVERSIFIÉE

Une première réponse, qu'apportent les constructeurs, réside dans une segmentation plus marquée, privilégiant les petits véhicules – moins chers et moins polluants – au détriment des véhicules de moyenne gamme. Cela est vérifié, quel que soit le continent. Nous ne développerons pas ce point dans le présent article, mais il faut savoir qu'il aura un réel impact, à terme, sur la segmentation de l'offre de l'industrie automobile et, donc, sur celle du pneumatique.

L'autre réponse, apportée aux attentes réglementaire et sociétale en matière de réduction de la pollution atmosphérique des transports, consiste en un investissement lourd, par les constructeurs d'automobiles, dans une grande diversité de « technologies moteur » (2). Cette diversité des recherches technologiques s'accompagnera d'une diversité dans l'offre des constructeurs. En effet, les communiqués de presse montrent qu'aucun constructeur automobile important ne reste à l'écart de cette vague de la « nouvelle technologie », certains

apportant parfois plusieurs réponses différentes au sein d'une même marque.

A la lecture de cette diversité, on peut se demander de quoi le futur de l'automobile sera réellement fait. Une chose est sûre : demain, l'offre technologique des constructeurs sera vaste et différenciée, par rapport à celle disponible aujourd'hui pour les véhicules « essence » ou « diesel ». Il est certain que la réponse à la pression écologique prendra des formes multiples, selon les zones géographiques et les technologies retenues : une étude, réalisée par le *Boston Consulting Group* (BCG), explicite cette diversité.

Le premier constat que l'on peut faire est que, dans les dix à quinze ans qui viennent, le parc automobile mondial restera largement dominé par les moteurs thermiques. Cependant, le paysage technologique ne sera plus monolithique. En effet, un quart du parc sera propulsé par des moteurs intégrant une contribution de l'énergie électrique plus ou moins importante.

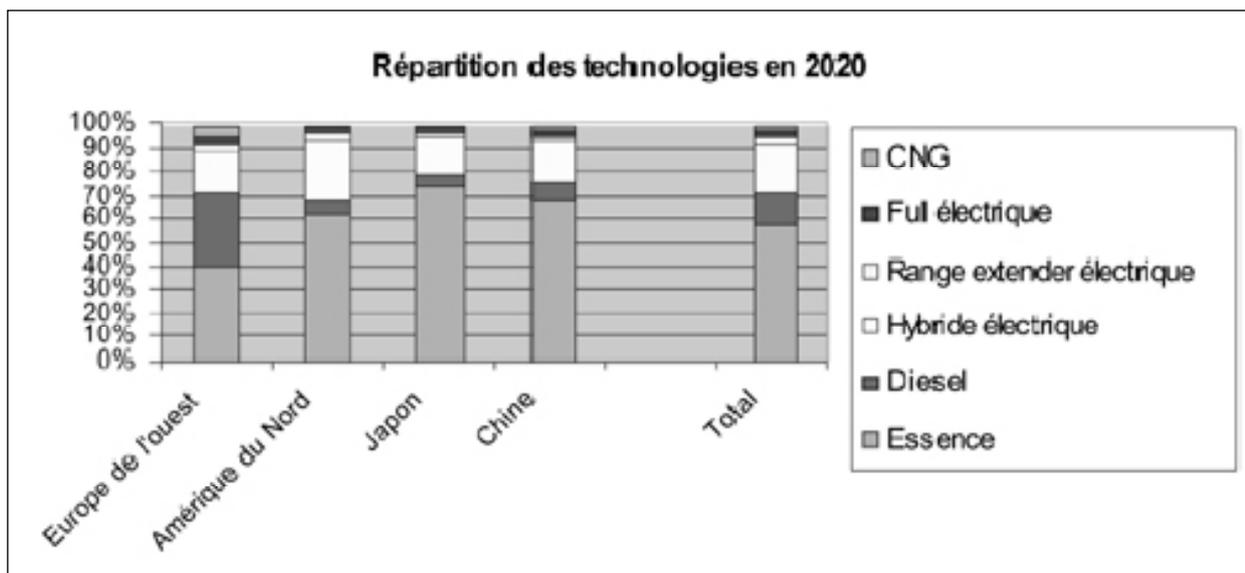
Le second élément est que la partie « véhicule électrique pur » restera faible (de l'ordre de 3 % au niveau mondial), et probablement concentrée sur des segments d'usage qui lui sont favorables – usage urbain, avec une densité de population importante et de faibles distances à parcourir, ou bien encore pour des usages urbains captifs (livraisons rapides, distribution de courrier, location de véhicules à usage intra-urbain...).

Cette pénétration relativement faible de la propulsion électrique trouve son origine dans l'insuffisante maturation technologique et économique des batteries. Celles-ci sont l'élément clé, et portent donc le risque économique associé au développement de la propulsion électrique.

Un autre élément important à prendre en considération est le fait que le moteur à pile à combustible tend à disparaître du champ des probables, en matière de technologies électriques.

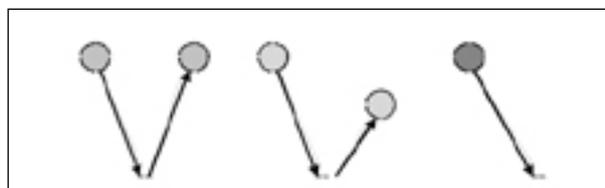
Dans le contexte électrique, plusieurs configurations sont possibles, allant d'une assistance au démarrage jusqu'à une propulsion entièrement électrique. Michelin

(2) Optimisation des moteurs thermiques, moteur à combustion à hydrogène, *stop & start*, micro, *mild and full* hybrides, *plug-in* hybrides, pile à combustible et, enfin, « tout électrique ».



Graphique 2 : Le retour de la voiture électrique ? (source : *the come-back of electric car ?* – BCG, 2009).

a développé un prototype de moteur électrique et de suspension intégrés à la roue : la *Michelin Active Wheel*, qui pourrait constituer une réelle alternative technologique (Voir l'annexe).



Graphique 3 : Schéma comparatif du principe de dissipation, pour trois types de matériaux caractéristiques

L'IMPACT DU PNEUMATIQUE, DANS CETTE DIVERSITÉ TECHNOLOGIQUE

Pourquoi introduire le pneumatique dans une problématique de consommation d'énergie et de respect de l'environnement ? Parce que les pneumatiques représentent, pour les véhicules d'aujourd'hui, de l'ordre de 20 % des forces de résistance au déplacement (3). Par conséquent, 20 % de l'énergie consommée pour faire avancer votre véhicule est liée aux pneumatiques !... Pourquoi et comment ? Qu'en est-il de la possible contribution du pneumatique dans ce nouveau panorama technologique, à la fois thermique, hybride et électrique ? Suivant la nature de ces différentes technologies de propulsion, la contribution du pneumatique à la consommation est différente. Mais avant de rentrer dans le vif du sujet, examinons la manière dont le pneumatique pèse sur la consommation finale de carburant d'un véhicule.

Définition de la résistance au roulement

La résistance au roulement est due principalement au fait que les gommages, qui constituent les pneumatiques, sont des matériaux viscoélastiques.

Ces types de matériaux ont pour propriété de dissiper de l'énergie, sous forme de chaleur, lorsqu'ils subissent des déformations. Ainsi, lorsqu'il roule, le pneumatique se déforme, sous l'effet de la charge, et il a tendance à s'apla-

tir sur le sol. Ces déformations entraînent des déperditions d'énergie : elles constituent la résistance au roulement. La résistance au roulement se définit comme l'énergie perdue par le pneu, par unité de distance parcourue (4). Pour vaincre la résistance au roulement, il faut donc fournir de l'énergie. Dans le cas d'un véhicule à moteur thermique (ou électrique), cette énergie est fournie par la combustion de carburant (ou une décharge partielle des batteries) : la résistance au roulement participe, par conséquent, à la consommation d'énergie des véhicules.

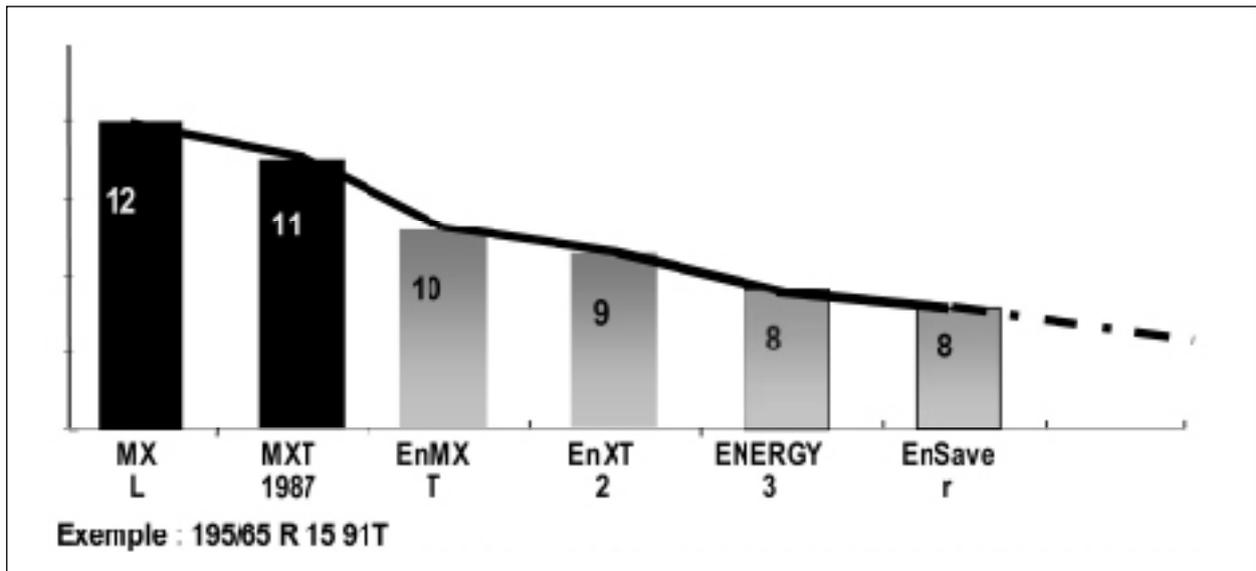
Depuis une trentaine d'années, Michelin innove afin de réduire l'impact de la résistance au roulement du pneumatique, contribuant ainsi à diminuer la consommation finale de carburant.

La résistance à l'avancement : « contribution » du pneu, comparée aux autres « contributions »

La définition de la résistance au roulement étant précisée, intégrons le pneumatique à son environnement – le véhicule. Pour conserver une vitesse donnée à son

(3) Ce chiffre dépend des conditions d'usage.

(4) Définition de la norme ISO8767 sur les méthodes de mesure de la résistance au roulement.



Graphique 4 : Evolution de la résistance au roulement des pneus Michelin « Energy ».

véhicule, le conducteur appuie légèrement sur l'accélérateur. Ce faisant, il consomme de l'énergie. S'il lève le pied et passe au point mort, le véhicule finira par s'arrêter, même sur une route plate. La raison en est que des forces (dites « freineuses ») agissent sur le véhicule. Cinq grands types de forces s'opposent, ainsi, à sa progression :

- les forces de résistance au roulement (que nous avons introduites, au paragraphe précédent) ;
- les forces aérodynamiques (liées au frottement de l'air sur le véhicule) ;
- les forces de frottement internes (frottement des pièces mécaniques) et les consommations annexes du véhicule (éclairage, chauffage...) ;
- la force de gravité (attraction terrestre s'exerçant sur le véhicule dans les montées, en fonction de sa masse et du degré de pente) ;
- les forces d'inertie (en accélération).

Nous pouvons schématiser cela par le dessin correspondant au schéma 1.

Ces cinq types de forces « freineuses », qui s'opposent au déplacement du véhicule sont les consommatrices de l'énergie cinétique utile, apportée par le groupe motopropulseur. L'énergie utile (par opposition à l'énergie perdue) est la part de l'énergie totale apportée (par le carburant ou une batterie) servant effectivement à mouvoir un véhicule. Entre ces deux types d'énergie, intervient la notion de « rendement moteur ». Ce rendement dépend de la technologie moteur et de son usage. Suivant que le moteur est électrique ou thermique, ce rendement diffère fortement. Dans le schéma 2, nous retrouvons la part de 20 % imputée au pneu (citée plus haut), dans la consommation de l'énergie utile contribuant au déplacement du véhicule.

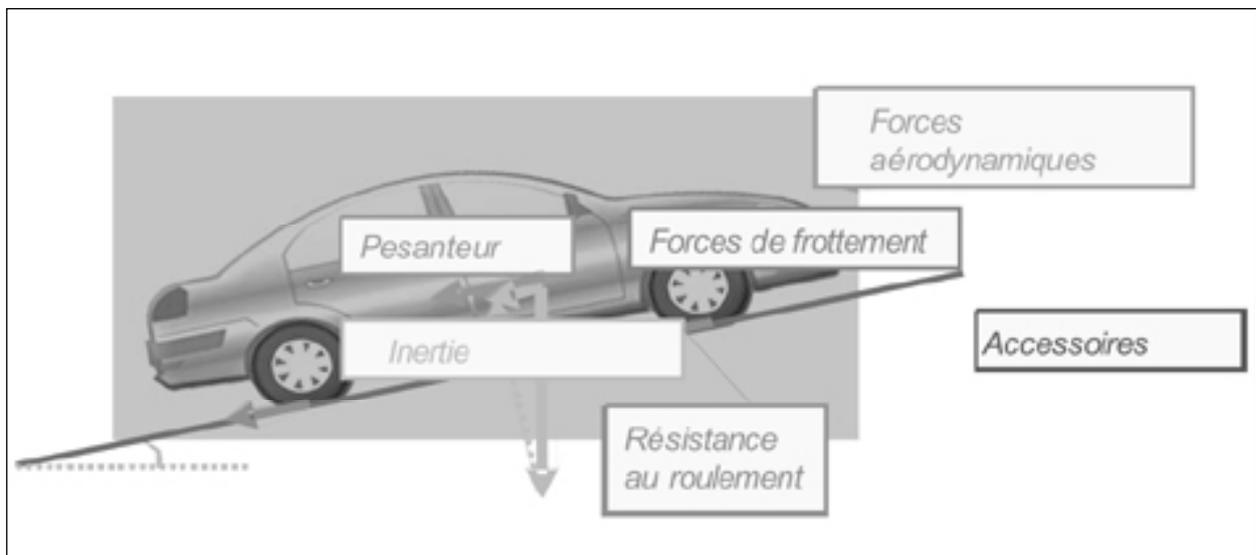


Schéma 1 : Les différentes forces « freineuses » s'exerçant sur un véhicule en mouvement.

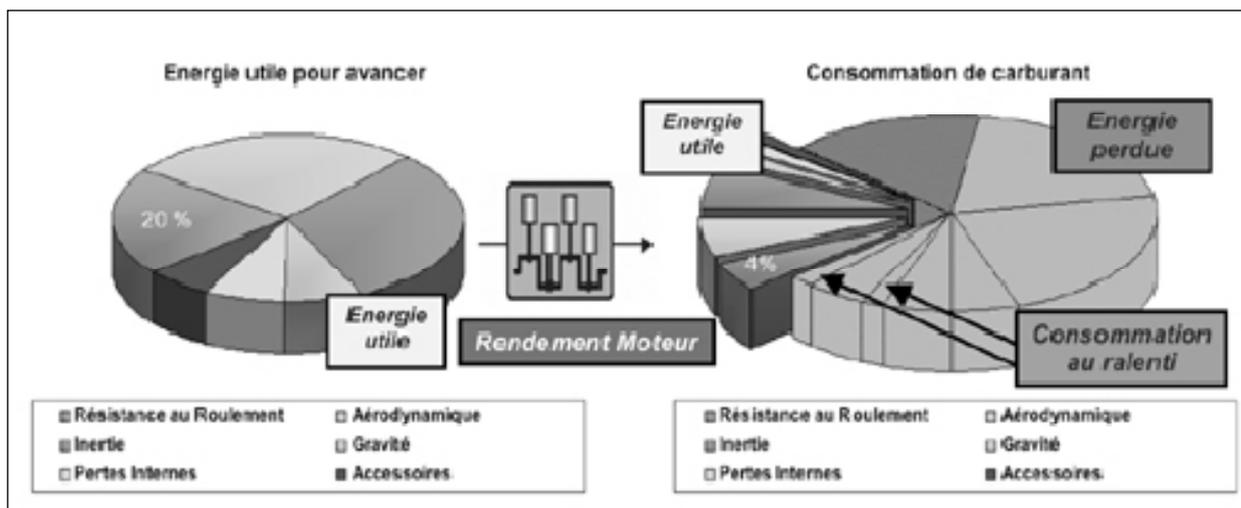


Schéma 2 : Energie utile et déperditions d'énergie, en fonction du « rendement moteur ».

« Contribution » du pneu à la consommation

Pour un véhicule donné, la « contribution » du pneu à la consommation de l'énergie utile du véhicule dépend :

- de la vitesse et de l'accélération du véhicule, à chaque point du parcours considéré ;
- des caractéristiques du véhicule (masse, aérodynamisme...);
- de la résistance au roulement du pneumatique lui-même.

Connaissant tous ces paramètres, on peut, pour un parcours donné, établir la part de chaque force « freineuse » dans la consommation finale du véhicule. Nous avons appliqué cette démarche à deux types de véhicule (l'un thermique et l'autre électrique), afin d'identifier la part de déperdition d'énergie imputable aux pneus.

La « contribution » du pneu peut aller jusqu'à 21 % pour une propulsion thermique, et dépasser les 30 % pour une propulsion « tout électrique ». Pour les véhicules hybrides, le chiffre dépend des options technologiques retenues, mais peut être considéré comme intermédiaire entre les valeurs des véhicules thermiques et « tout électrique ». Le fait de disposer de pneus à faible résistance au roulement devient donc un facteur clé de la consommation d'énergie des véhicules, et ce indépendamment des technologies moteur employées. Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'effort de Michelin en matière de recherche et de développement a permis de diviser pratiquement par deux la résistance

au roulement des pneus et, donc, leur « contribution » à la consommation d'énergie, tout en conservant les qualités fondamentales des pneus Michelin : leur sécurité et leur longévité.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le monde automobile traverse une phase de mutation technologique importante. Pour atteindre les seuils d'émissions de CO₂ (et autres agents polluants), les constructeurs d'automobiles doivent développer une diversité technologique importante. L'introduction de la propulsion électrique (partielle ou totale) en atteste, même si le véhicule « tout électrique » devrait rester marginal.

Ces évolutions techniques vont se traduire par l'apparition de différentes versions de véhicules couvrant la totalité du champ du possible – thermique, différents niveaux d'hybridation, tout électrique, voire (plus marginalement) hydrogène. Pour le groupe Michelin, cette diversité technologique change l'impact du pneu dans la consommation énergétique. Pour un usage urbain normalisé, la part du pneu passe ainsi de 20 %, pour les moteurs thermiques, à plus de 30 %, pour les véhicules « tout électrique ». Les efforts, que le Groupe Michelin a déployés dans la durée, ont permis de réduire de moitié la résistance au roulement des pneus qu'il produit, et apportent, ainsi, une validation défini-

Usage	Part de la résistance au roulement du pneu dans la consommation	
	Véhicule Thermique	Véhicule électrique
Usage urbain sévère	12%	25%
Usage urbain normalisé -ECE	20%	33%
usage routier normalisé -EUDC	21%	21%
Usage autoroutier	18%	17%

Tableau 1 : « Contribution » des pneus à la déperdition d'énergie finale de deux types de véhicules (thermique : moteur à explosion, et électrique), en fonction de divers usages.

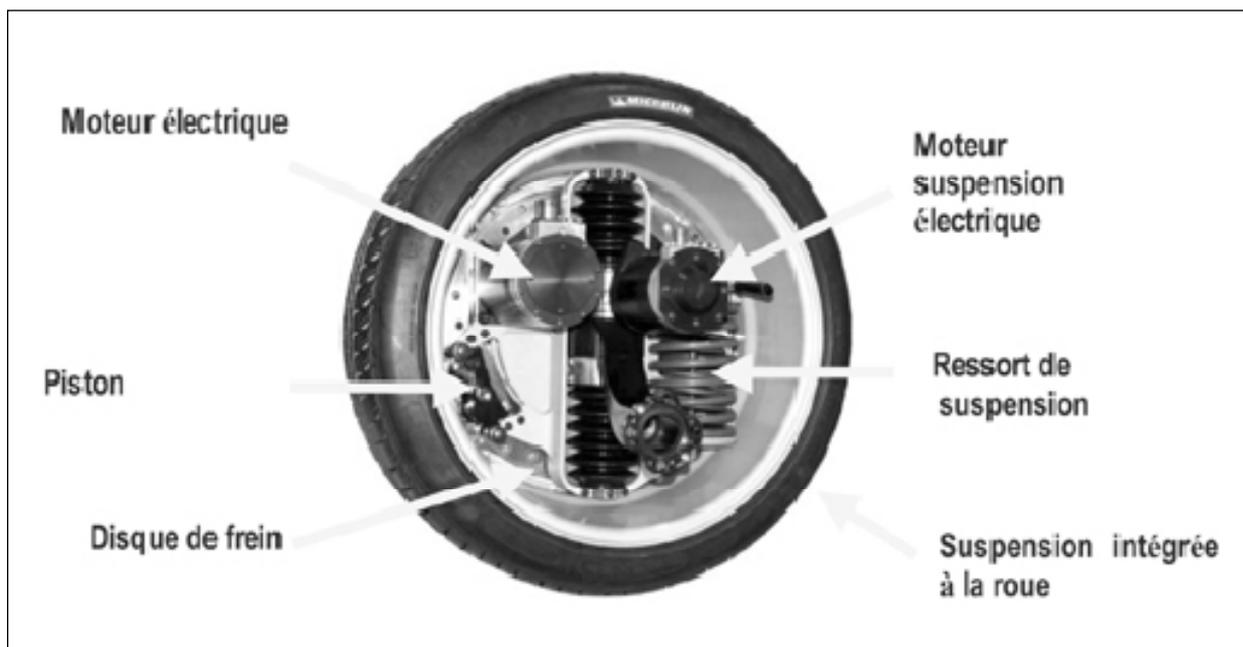


Schéma 3 : Les composants essentiels de la *Michelin's Active Wheel*.

tive de la stratégie du Groupe en matière de recherche et de développement sur le thème de l'environnement. Au-delà de la résistance au roulement, l'identification de nouvelles caractéristiques du pneu impactant la consommation d'énergie des véhicules, est fondamentale pour la poursuite de la réduction de cette consommation. C'est ici qu'une approche « système » apporte un autre regard : l'interaction aérodynamique pneu/passage de roue et l'interaction du pneu avec la suspension du véhicule, sont des sujets de recherche porteurs de nouveaux axes de progrès.

ANNEXE : LA MINIATURISATION DES ORGANES, CLEF TECHNOLOGIQUE DE LA MICHELIN'S ACTIVE WHEEL

La clef de la révolution technologique de la *Michelin's Active Wheel* réside en la miniaturisation du moteur et la maîtrise de la gestion de la suspension. Grâce à cette miniaturisation, la roue a pu, en quelque sorte, être « ré-inventée ».

Pour la première fois, en effet, la roue intègre non seulement le pneu et le système de freinage, mais aussi, et surtout, la motorisation du véhicule, ainsi que sa suspension électrique (voir le schéma 3 : Les composants essentiels de la *Michelin's Active Wheel*). Selon la puissance souhaitée et le type d'usage recherché, il est possible de combiner, sur un même véhicule, quatre moteurs (un dans chaque roue) ou bien seulement deux (par exemple, dans les deux roues avant). En cela, la *Michelin's Active Wheel* préserve la liberté des

constructeurs, qui peuvent continuer à concevoir des automobiles à deux ou à quatre roues motrices.

L'énergie alimentant le moteur ainsi intégré à la roue est, dans le cas de la *Michelin's Active Wheel*, exclusivement électrique. Il peut s'agir de batteries (lithium-ion ou autres), d'une pile à combustible et/ou de superconducteurs. Dans tous les cas, ces sources de motorisation associent deux avantages considérables : **une pollution réduite à zéro et un confort exemplaire**. En effet, le véhicule qui en est équipé, n'émet aucun gaz à effet de serre. Par ailleurs, la motorisation électrique se distingue par son silence de fonctionnement. Cela profite aux passagers du véhicule, mais aussi – et surtout – au milieu dans lequel ce dernier évolue. Une automobile dotée d'une motorisation *Michelin's Active Wheels* laisse la ville respirer !

Le tour de force de la *Michelin's Active Wheel* est de concilier, à un niveau jamais encore atteint, écologie et performances. La nouvelle voiture *WILL* en est une illustration probante : ses deux moteurs, intégrés dans les roues avant, lui procurent une réelle vivacité : elle passe de 0 à 100 km/h en 10 secondes, et peut atteindre les 140 km/h. Quant à la *Venturi Volage*, avec ses quatre *Active Wheels* motorisées, elle offre des performances d'accélération et une tenue de route impressionnantes. Ce dynamisme est servi par une liaison au sol, qui établit de nouveaux standards en matière de tenue de route et de confort. Car avec la *Michelin's Active Wheel*, la suspension du véhicule n'est plus mécanique, mais électrique. Ce système inédit se caractérise par un temps de réponse extrêmement rapide (3/1 000^{es} de seconde). Tous les mouvements de roulis ou de tangage sont ainsi automatiquement corrigés.

La *Michelin's Active Wheel* permet une simplification extrême de la conception du véhicule. Tous les compo-

sants mécaniques d'une voiture traditionnelle n'ont plus aucune utilité ici : boîte de vitesses, embrayage, arbre de transmission, différentiel, amortisseurs, etc., disparaissent sur les véhicules mus par des *Michelin's Active Wheels*. Les véhicules gagnent en légèreté et le besoin en énergie se trouve, de fait, lui aussi limité. Résultat : l'autonomie du véhicule atteint des niveaux, qui répondent aux attentes des automobilistes.

La *Michelin's Active Wheel* constitue donc une rupture technologique évidente. Elle apporte une réponse efficace et élégante aux problématiques soulevées par le transport routier, aux critiques qui lui sont faites, qu'il s'agisse de l'énergie (quantité, diversité, coût), des émissions de gaz à effet de serre, de l'encombrement urbain et de la pollution urbaine.