

La simulation numérique par éléments finis chez Michelin : présentation de la chaîne de calcul et application à la prédiction de la résistance au roulement d'un pneumatique.

J. Eustache¹

¹ Ingénieur docteur, MFP Michelin, Cébazat, France, julien.chapelat@michelin.com

Résumé — La présentation introduit l'approche de Michelin autour de la Simulation et de la modélisation, un pilier stratégique de l'innovation du groupe. Au sein du groupe, la simulation est un vecteur majeur de transformation pour développer des produits plus performants et accélérer la Recherche & Développement. Nous présentons ici la chaîne de valeur interne autour de la simulation par éléments finis. Nous présentons également un cas d'application concret en lien avec la performance du pneumatique, au service de la conception chez Michelin.

Mots clefs — Simulation numérique, Méthode Eléments Finis, Résistance au roulement.

1. Introduction

Dans un contexte industriel en constante évolution, Michelin – acteur majeur du secteur de la mobilité – s'engage résolument dans une démarche d'innovation pour concevoir les produits de la mobilité de demain. Ces développements visent à améliorer les performances globales de nos pneumatiques (durabilité, sécurité, confort, consommation énergétique), tout en répondant à des exigences croissantes en matière de développement durable.

La simulation numérique constitue aujourd'hui un levier majeur pour accélérer et fiabiliser la conception chez Michelin, en couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur – de la molécule et des matériaux jusqu'au comportement du véhicule complet, comme illustré ci-dessous en Figure 1 :

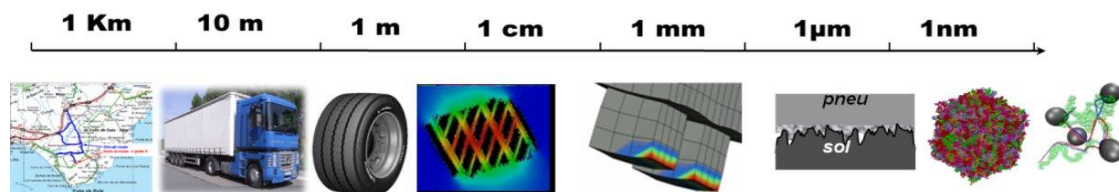


Figure 1 : De la molécule au véhicule, les différentes échelles de simulation chez Michelin

Cette démarche s'appuie notamment sur une chaîne de calcul utilisant la méthode des éléments finis entièrement intégrée et adaptée aux besoins industriels de l'entreprise, articulée autour du solveur maison BIBMEF, développé depuis plusieurs décennies sur une base générique issue du monde académique (MEF++ [1]), et complétée par un socle de bibliothèques open-source éprouvées pour le prétraitement, le calcul et le posttraitement (MUMPS [2], Scotch [3], PETSc [4], Gmsh [5], ParaView [6]). Cette infrastructure supporte à la fois des environnements orientés conception pneumatique, avec

des processus de validation pour assurer la qualité de nos produits, services et des environnements de recherche et d'étude du compromis de performance. Cette chaîne de calcul sert tout le cycle de vie du pneu, de la simulation des procédés, à l'analyse des performances sur le terrain en passant par l'assemblage des matières à cru et la cuisson des pneumatiques. Nous proposons également un environnement voué à l'exploration au-delà du pneumatique, destiné à la recherche avancée et à l'innovation dans différents domaines d'application (procédés, systèmes flexibles, structures composites, etc.).

Nous illustrerons cette capacité par un exemple de prédiction de l'une des performances du pneumatique par simulation : la résistance au roulement.

2. Un moteur (solveur) spécifique (BIBMEF)

BIBMEF constitue le moteur de calcul développé par Michelin et ses partenaires académiques (notamment le GIREF) pour la simulation par éléments finis dans un contexte multi-physique, multi-corps et multi-échelle. Pensé comme un outil reposant sur des briques génériques et extensibles, il vise à offrir à la fois un écosystème ouvert de prototypage et des outils métiers robustes répondant aux exigences industrielles. La démarche associe ingénierie logicielle moderne, exigences HPC, conception orientée utilisateur et collaboration académique.

Au cœur du projet, le solveur générique MEF++ met en œuvre une architecture modulaire basée sur les standards du calcul scientifique : MPI pour le parallélisme distribué, Petsc et MUMPS pour la résolution linéaire, formats VTK [7] et GMSH pour l'interopérabilité. La mise en donnée de calcul s'appuie sur un type de fichier dédié (« .champs »), permettant de décrire de manière déclarative les équations, lois de comportement, modèles de contact, schémas numériques, conditions aux limites et sorties. Ce formalisme, interprétable et personnalisable, favorise l'extensibilité et la reproductibilité. BIBMEF autorise également l'intégration de lois matériaux personnalisées (via MFront [8] par exemple), de modèles multiphysiques, de scénarios de tests virtuels et d'algorithmes externes via API Python.

Le développement repose sur une chaîne CI/CD (intégration continue) avancée, garantissant robustesse et traçabilité : plusieurs plateformes de validation, plusieurs milliers de tests dont un large socle de tests parallèles, intégration continue pour les versions quotidiennes, distribution automatisée via AppImage, Docker et modules Python. Cette démarche permet d'assurer la stabilité d'un code contenant un peu plus d'un million de lignes, enrichi par plus d'une centaine de contributeurs sur 15 ans.

Sur le plan HPC, BIBMEF est conçu pour exploiter efficacement les architectures modernes : hybridation MPI/OpenMP, optimisation mémoire, partitionnement de maillage, adaptation de maillage, optimisation des solveurs. Des benchmarks récents montrent une très bonne scalabilité faible et forte, avec la capacité de résoudre des problèmes contenant plusieurs milliards de ddl (degrés de liberté) sur des dizaines de milliers de cœurs.

L'outil est aujourd'hui utilisé dans de nombreux projets industriels et académiques : performances thermomécanique, endurance, acoustique du pneumatique cuit, simulation de procédés, croissance morphologique, modélisation multi-corps, cosimulation, réduction de modèles (ROM) [9], workflows

automatisés via notebooks, etc. L'interopérabilité est un pilier stratégique : utilisation dans des chaînes d'outils diverses, depuis des scripts experts jusqu'à des pipelines automatiques sur cloud.

Ainsi, BIBMEF se présente aujourd'hui comme un framework complet, scalable et interopérable, capable d'adresser les besoins croissants en simulation avancée tout en restant adaptable aux exigences futures, tant scientifiques qu'industrielles.

3. Une chaîne de calcul interne

Le chaîne de calcul interne constitue l'infrastructure opérationnelle qui permet de déployer efficacement les différentes étapes de simulation par éléments finis (dont fait partie BIBMEF) au sein des processus de simulation Michelin. Elles forment un écosystème complet, allant de la modélisation géométrique jusqu'à l'analyse des résultats, et intègrent l'ensemble des outils nécessaires pour assurer des simulations fiables, rapides et adaptées aux besoins métiers variés (performance pneumatique, endurance, acoustique, procédés, sécurité, etc.).

Cette chaîne remplit un rôle stratégique : elle permet de réduire le recours aux essais physiques, coûteux et lents, tout en donnant accès à des variables internes inaccessibles expérimentalement. Elle s'insère dans un continuum allant de l'observation physique à la modélisation mathématique, en passant par la discrétisation, la sélection d'algorithmes numériques, la programmation, le calcul haute performance et enfin l'interprétation des résultats. La chaîne de calcul interne se positionne comme un compromis optimal entre précision physique, coût de calcul et capacité d'exploration, notamment grâce à des workflows reproductibles et standardisés, et dans lesquels reposent notre savoir-faire métier.

L'architecture de la chaîne repose sur plusieurs briques intégrées :

- Pré-traitement : outils internes de CAO et maillage, paramétrage automatique, édition assistée via API python.
- Modélisation matériau : Base de données matériau et autres outils permettant d'injecter des lois complexes, cohérentes avec le solveur BIBMEF.
- Soumission HPC : outil de soumission via scheduler slurm, intégration transparente aux architectures internes et cloud.
- Solveur : BIBMEF pour les simulations mécaniques, thermomécaniques, fluides internes, contact, acoustique, etc.
- Post-traitement : ParaView, API Python pour générer des post-scenarios de calcul.
- Chainage de la simulation : Interface web pour soumettre des scénarios complets de calcul et des plans d'expérience.

L'ensemble forme un outil ou bureau digital au service de la conception, adapté aussi bien aux usages standardisés (simulation standard du pneumatique) qu'aux études expertes (endurance, phénomènes dynamiques, contact complexe, fragmentation locale, procédés continus, interactions fluide/structure), comme présenté en Figure 2.

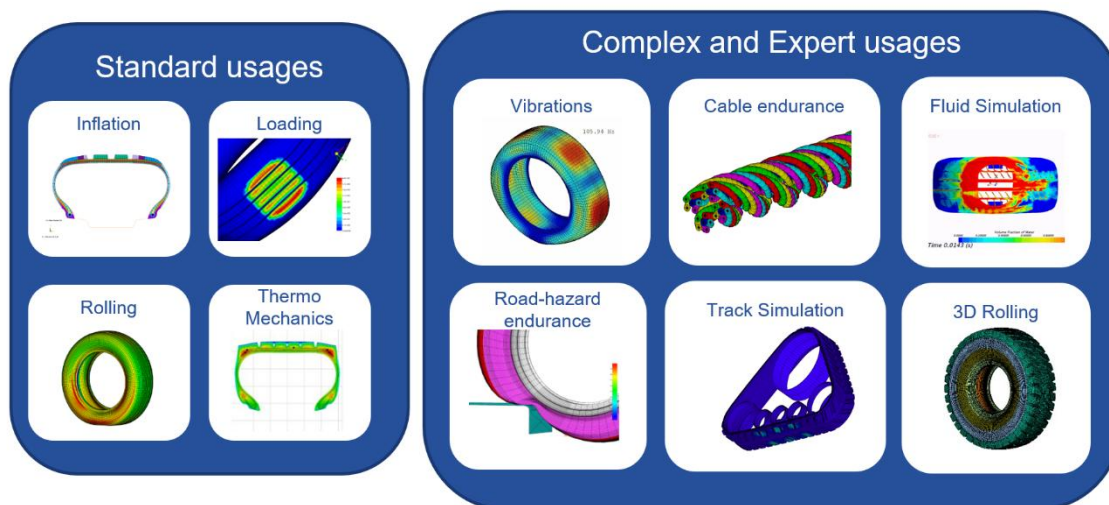


Figure 2 : Différents cas d'usage de la chaîne de simulation interne.

En effet, de nombreuses applications illustrent la polyvalence de la chaîne de calcul : prédiction du comportement en chocs routiers, simulation de rupture des nappes composites et énergie de perforation, couplages multi-modèles, roulage pneumatique thermomécanique, notamment pour la prédiction de la résistance au roulement. Ces cas d'usage démontrent la capacité de la chaîne à reproduire des phénomènes multi-physiques et non linéaires complexes, parfois impossibles à aborder expérimentalement.

4. Un exemple de prédiction de performance par simulation : la résistance au roulement

L'essentiel des informations données dans ce chapitre est issu d'un article publié dans Techniques de l'ingénieur : Le pneumatique au service de la transition énergétique, par J.-B. Mathieu et C. Poncet [10].

Le changement climatique impose une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Le secteur des transports représente environ 26 % des émissions énergétiques mondiales de CO₂, soit près de 6,7 gigatonnes, et constitue donc un levier majeur de décarbonation. Dans ce contexte, la Commission Européenne vise une réduction de 90 % des émissions de CO₂ liées aux transports à l'horizon 2050 (référence 1990), et met en place des réglementations progressives contraignant les émissions des véhicules neufs. Les pneumatiques jouent un rôle direct dans cette trajectoire : optimiser leur résistance au roulement (RR) permet de diminuer la consommation énergétique et donc les émissions associées.

La résistance au roulement provient de la nature même du pneumatique. À chaque rotation, celui-ci se déforme pour s'adapter au sol et établir une aire de contact par laquelle transigent les efforts nécessaires à l'accélération, au freinage et au guidage. Les gommes constituant les pneus sont viscoélastiques : chaque cycle de déformation entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, phénomène irréversible à l'origine de la RR. Cette résistance s'ajoute aux autres forces à vaincre pour se déplacer (aérodynamique, pente, inertie). Elle représente 5 à 20 % de la consommation énergétique d'un véhicule

léger et 15 à 40 % pour un poids lourd, ce qui confère à sa réduction un double intérêt : environnemental et économique.

La résistance au roulement correspond à l'énergie perdue par unité de distance parcourue. Dimensionnellement, il s'agit d'une force (N).

Elle dépend :

- du pneu, via ses propriétés dissipatives,
- de la charge appliquée (poids transmis), notée Z .

Le comportement d'un pneu est caractérisé par le coefficient de résistance au roulement :

$$C_{rr} = \frac{F_{rr}}{Z}$$

F_{rr} et Z sont en Newtons, C_{rr} est sans unité, il peut aussi être exprimé en % ou en kg/t.

La force de résistance au roulement exercée sur un véhicule en mouvement dépend à la fois des caractéristiques des pneus qui l'équipent et de la charge verticale appliquée sur ceux-ci (notée Z), voir Figure 3.

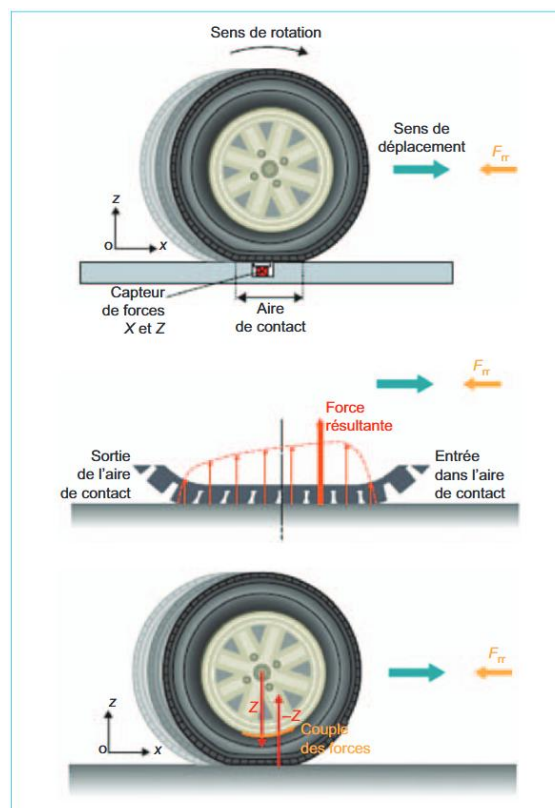


Figure 3 : Schéma exposant la résistance au roulement d'un pneumatique déformable sur un sol rigide

La résistance au roulement constitue un paramètre central dans l'efficacité énergétique des pneumatiques et, par extension, dans la réduction de la consommation des véhicules et de leurs émissions associées. Son évaluation est strictement encadrée par différentes normes. Plusieurs méthodes de mesure coexistent, tout en garantissant l'obtention de valeurs équivalentes. Par ailleurs, l'étiquetage européen des pneumatiques permet désormais au consommateur de comparer le niveau de performance énergétique des pneumatiques mis sur le marché.

La résistance au roulement dépend de nombreux paramètres d'usage, parmi lesquels la pression de gonflage, la température ambiante, les vitesses élevées, ainsi que la durée de roulage, qui influent tous significativement sur le niveau dissipatif du pneumatique. De manière générale, un C_{rr} plus faible se traduit par une réduction directe de la consommation énergétique du véhicule, confirmant le rôle essentiel des pneumatiques dans la transition énergétique du transport routier.

Les mécanismes à l'origine de la résistance au roulement—depuis l'hystérèse microscopique des matériaux viscoélastiques jusqu'aux déformations macroscopiques du pneumatique dans l'aire de contact—font l'objet de travaux approfondis dans les milieux académique et industriel. Les enjeux sont considérables : la phase d'usage, dominée par la résistance au roulement, constitue la part la plus impactante du cycle de vie d'un pneumatique. Réduire encore la RR nécessite donc des efforts continus de recherche et développement, tant sur les matériaux (vers des gommés intrinsèquement moins dissipatives à rigidité comparable) que sur la structure interne et la bande de roulement (optimisation des rigidités locales, maîtrise des zones dissipatives, architecture des semi-finis).

En somme, l'amélioration de la résistance au roulement représente un enjeu multidimensionnel :

- réglementaire, car elle conditionne l'accès au marché et l'information du consommateur ;
- énergétique, car elle influence directement la consommation des véhicules ;
- scientifique et technologique, car elle mobilise des travaux multi-échelles, du matériau au système roulé.

Elle demeure ainsi un domaine stratégique pour concilier performance, durabilité et transition énergétique dans le secteur du transport routier. La présentation visera à introduire comment la simulation permet de prédire la résistance au roulement, tant sur des problématiques pneumatiques que hors pneumatiques.

Conclusion

Dans un contexte industriel où l'innovation est un levier central de compétitivité, Michelin s'appuie sur une stratégie de simulation numérique ambitieuse pour concevoir les pneumatiques et systèmes de mobilité de demain. L'entreprise a construit, au fil des décennies, une infrastructure complète et cohérente — allant du matériau jusqu'au véhicule — fondée sur un moteur de calcul propriétaire (BIBMEF), des briques open source éprouvées et une chaîne de calcul interne capable de valider différents périmètres de modélisation (en termes de robustesse, de reproductibilité, etc.) sur des usages industriels exigeants comme pour des explorations scientifiques avancées.

Cette organisation offre un avantage décisif : accélérer le développement, réduire la dépendance aux essais physiques et fiabiliser la conception multi-physique et multi-échelle. Elle permet également

d'adresser de nouveaux domaines applicatifs tout en assurant un haut niveau d'interopérabilité, de reproductibilité et de performance HPC.

L'exemple de la résistance au roulement, présenté dans ce résumé, illustre pleinement la valeur de cette approche. La RR est un enjeu essentiel, à la fois réglementaire, énergétique, et technologique. Sa maîtrise contribue directement à la réduction des émissions de CO₂ du transport routier, en cohérence avec les objectifs européens ambitieux pour 2050. Les travaux de simulation permettent aujourd'hui de décrire finement les mécanismes dissipatifs — du comportement viscoélastique des matériaux à la déformation du pneumatique en roulage — et d'en quantifier l'impact sur la consommation du véhicule.

Parce qu'elle domine largement la phase d'usage dans le cycle de vie du pneu, la résistance au roulement reste un axe de recherche prioritaire. Les progrès futurs passeront autant par le développement de matériaux moins dissipatifs que par l'optimisation multi-échelle et multi-composants de la structure interne du pneumatique. Les capacités de simulation intégrées de Michelin constituent, à ce titre, un outil stratégique pour répondre simultanément aux exigences de performance, de durabilité et de transition énergétique.

Références

- [1] Groupe Interdisciplinaire de Recherche en Éléments Finis (GIREF). MEF++: Logiciel de simulation numérique par éléments finis. Université Laval, Québec, Canada.
- [2] P.R. Amestoy, I.S. Duff, J. Koster, J.-Y. L'Excellent. A Fully Asynchronous Multifrontal Solver Using Distributed Dynamic Scheduling. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 23(1), 15–41, 2001.
- [3] F. Pellegrini. Scotch and libScotch 5.1 User's Guide. INRIA – LaBRI – Université Bordeaux I, 2008.
- [4] S. Balay, W. Gropp, L. C. McInnes, B. F. Smith. PETSc – The Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation. Argonne National Laboratory, ANL-95/11, 1998.
- [5] C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), pp. 1309-1331, 2009.
- [6] Ahrens, James, Geveci, Berk, Law, Charles, ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization, *Visualization Handbook*, Elsevier, 2005, ISBN-13: 9780123875822
- [7] Schroeder, Will; Martin, Ken; Lorensen, Bill. *The Visualization Toolkit* (4th ed.). Kitware, 2006.
- [8] Helfer, T., et al. MFront: A Code Generation Tool Dedicated to Material Knowledge. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015.
- [9] D. Danan, R. Meunier, T. Dairay, T. Homolle, M. Yagoubi, Application of zonal Reduced-Order-Modeling to tire rolling simulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 246, 2025.
- [10] J.-B. Mathieu, C. Poncet, *Techniques de l'Ingénieur*. (s.d.). Le pneumatique au service de la transition énergétique. 2024.