

La Simulation Numérique du Pneumatique chez Michelin

Jean-baptiste.harry@fr.michelin.com



PLAN

- Le groupe Michelin
- Le pneu et ses performances
- La simulation dans le processus de conception
- La modélisation Eléments-Finis du pneu
- Le HPC et le logiciel scientifique



PLAN

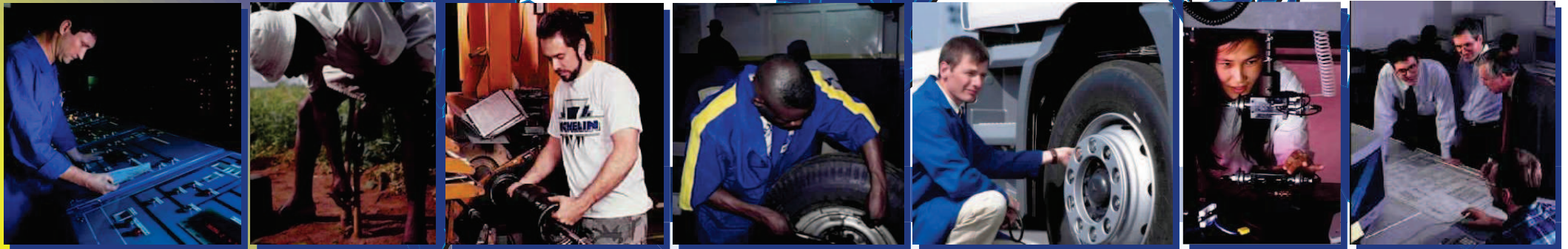
- **Le groupe Michelin**
- **Le pneu et ses performances**
- **La simulation dans le processus de conception**
- **La modélisation Eléments-Finis du pneu**
- **Le HPC et le logiciel scientifique**



- Présence commerciale dans 170 pays
- 69 Sites de production dans 18 pays



115 000 salariés dans le monde
184 millions de pneus en 2011
10 millions de cartes et guides



Le Groupe Michelin



1 Centre de Technologies réparti sur 3 sites 6000 salariés en R&D



Un portefeuille de marques

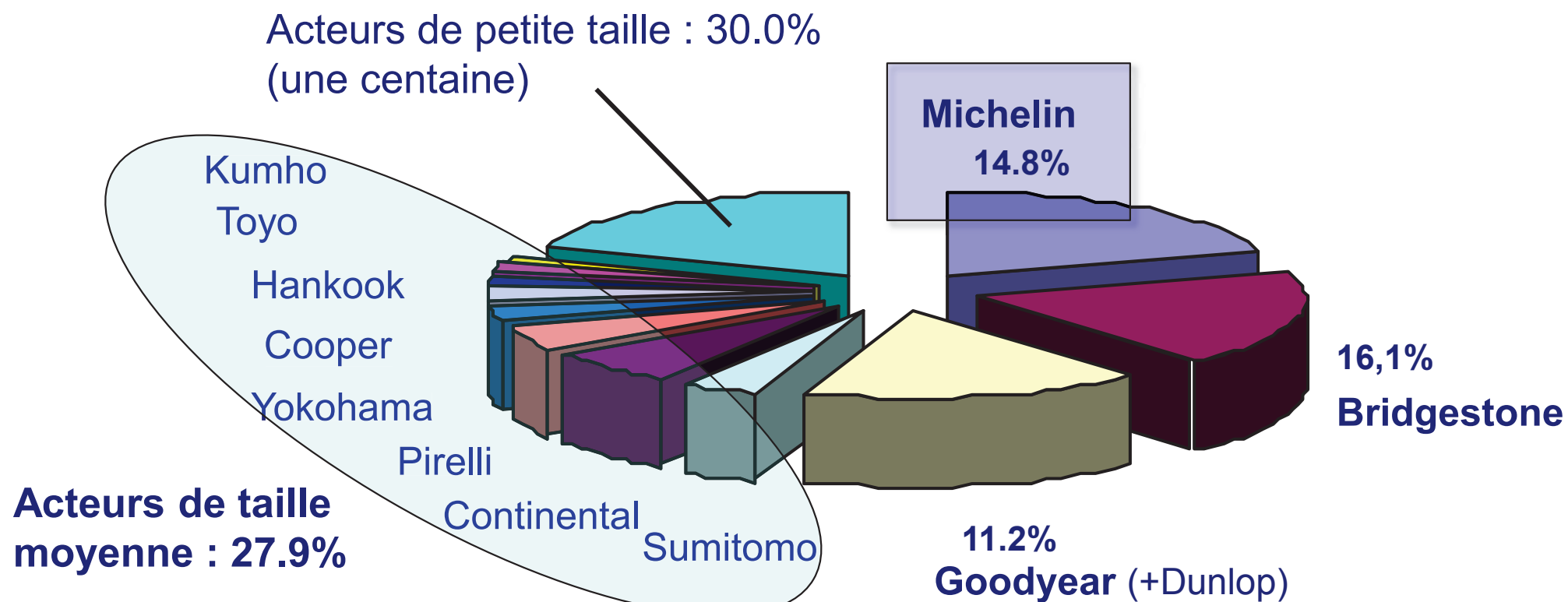


Objectifs :

- . SATISFAIRE LARGEMENT LES BESOINS
- . DÉVELOPPER LES VOLUMES



Marché mondial du pneu sur 2011



Marché du pneu

- Un marché hautement concurrentiel
- Un marché mondial
- Un marché en forte croissance
- Très grande variété de produits / déclinaisons (6000 types)
- Plus d'un milliard de pneus vendus chaque année
- 100 milliards d'euros générés chaque année

PLAN

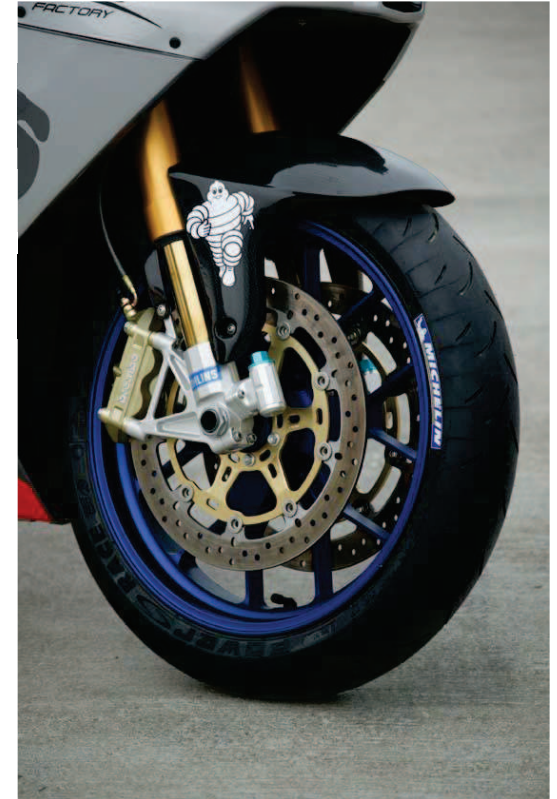
- Le groupe Michelin
- **Le pneu ; ses performances**
- La simulation dans le processus de conception
- La modélisation Eléments-Finis du pneu
- Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Le pneu ? ... ou les pneus ?

2 Roues ...



Vitesse max > 300km/h
50 cm² au sol par pneu
Angle carrossage > 40°



Le pneu ; ses performances



Automobiles...

Grande diversité
d'utilisations :

Sec / mouillé / neige
/ boue / glace



Le pneu ; ses performances



Poids lourds...



Sol sec/mouillé/neige/glace

Forte charge : qq tonnes

Vitesse : 100 / 130 km/h

Le pneu ; ses performances



Agricole ...



Sol meuble.

Faible vitesse

Faible pression

Génie civil ...



Le plus gros : 5.6T, 4m de diamètre
Très forte charge
Sols agressifs
Usage intensif (24/24)



Le pneu ; ses performances

Aéronautique...



Petite taille, petit poids
Charge très élevée
Vitesse très élevée
Montée en temp. rapide



Out Of This World.



: 21 pouces, 93 Kg
: 20.5 bar
: 64545 kg/pneu
: 416 km/h

→ Une seule utilisation ...

Le pneu ... ou les pneus ?

- ... Les pneus !

- Derrière un aspect banal, les contraintes et les conditions d'utilisation imposées aux différents types de pneus en font autant de produits très différents, dont la conception, dans les cas les plus extrêmes, correspond à un réel défi technologique.

Les pneus : Des objets complexes



Le pneu ; ses performances



Structure du pneu

- **Structure composite hautement déformable.**
- **Jusqu'à plusieurs dizaines de constituants**
 - **Gommes.**
 - **Nappes renforcées.**
 - **Tringles.**
- **Chaque constituant ayant un rôle fonctionnel bien défini.**

Structure du pneu

Bande de roulement

gomme

Nappes sommet

Composite : gomme + acier

Nappe carcasse

Composite : gomme + acier
ou gomme + textile

Flanc

gomme

Gomme Intérieure

Gomme

Tringle

acier

Le pneu ; ses performances



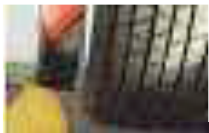
Fonctions d'un pneu



Amortir



Porter



Guider



Transmettre des couples

Performances du pneu

Adhérence

Longitudinale (couple moteur/freineur)

Transversale (virage)

Route sèche / mouillée
(+ hydroplanage)



Résistance au roulement

- Dissipation d'énergie induite par le roulage
- Participe à la consommation de carburant (20% en VL, 30% en PL)

Usure

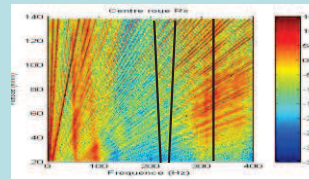
- Perte de matière dans la bande de roulement



Pneus Tourisme/ PL

Bruit/Confort

- Bruit aérien et solide
- Audible (HF) / ressenti (BF)



Endurance

- Fin de vie prématurée causée par agressions extérieures (chocs trottoir, objets acérés, humidité)
- Haute vitesse (VLI)



Comportement

- Comportement véhicule
 - sur/sous-vireur,
 - vivacité/précision du guidage,
 - ...
- Plaisir de conduite

Les performances sont antagonistes
On cherche à décaler un compromis de performance

PLAN

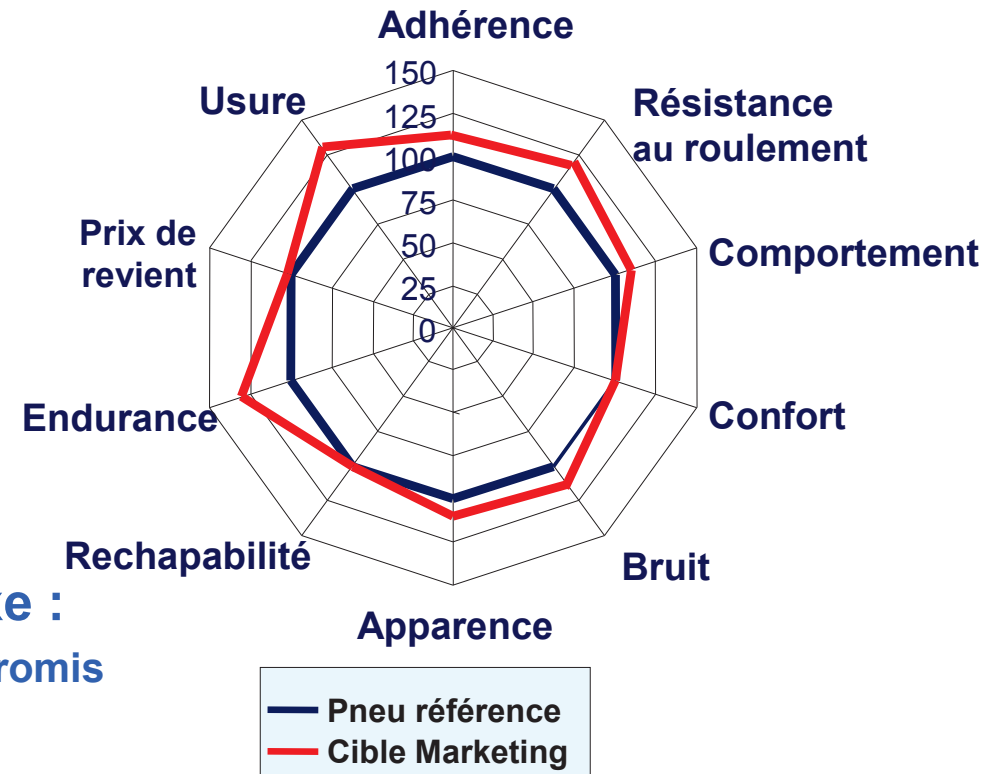
- **Le groupe Michelin**
- **Le pneu et ses performances**
- **La simulation dans le processus de conception**
- **La modélisation éléments-finis du pneu**
- **Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu**

Conception du pneu

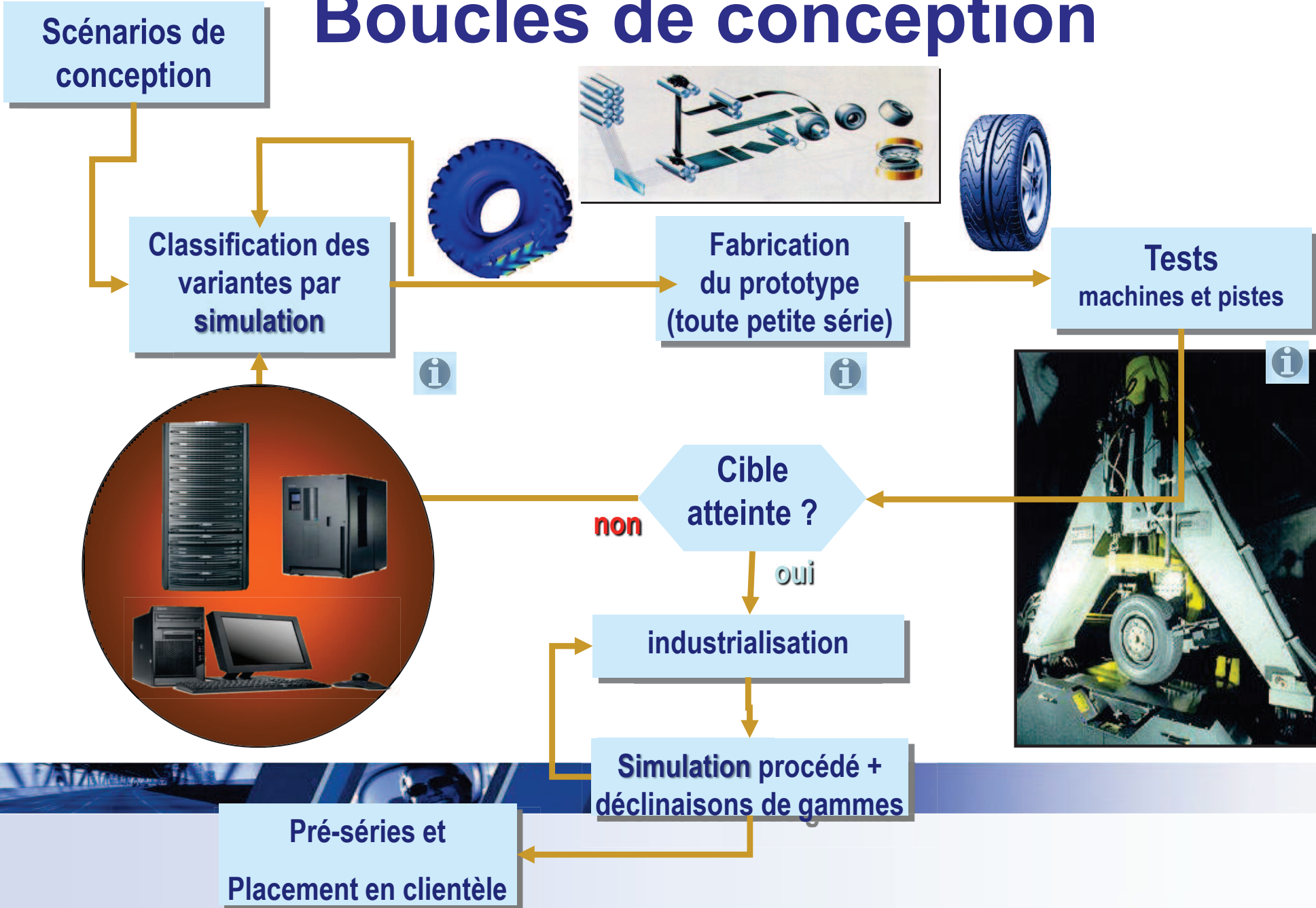
- **BUT** : Concevoir une solution produit intégrant toutes les performances requises (usure, adhérence, bruit,...)

- Le cahier des charges s'exprime en termes de performances relatives à un pneu existant :

- **Processus long, coûteux et complexe** :
Fortement contraint : Recherche de compromis entre des performances antagonistes...



Boucles de conception



La simulation dans le processus de conception

PLAN

- Le groupe Michelin
- Le pneu et ses performances
- La simulation dans le processus de conception
- La modélisation éléments-finis du pneu
- Le HPC et le logiciel scientifique

La modélisation éléments-finis du pneu

Est indispensable pour :

- Comprendre la thermo-mécanique du pneu
- Classer les variantes envisagées par rapport aux performances définis

Elle permet :

- d'accélérer le cycle de conception et réduire son coût (moins de tests)
- améliorer les procédés
- améliorer la pertinence des tests réels

Est basée sur un code éléments-finis interne

Est particulièrement délicate à réaliser



La modélisation éléments-finis du pneu

- **Un problème de mécanique numérique complexe ...**
 - De nombreuses sources de non linéarités et faible régularité du problème
 - De nombreuses sources de mauvais conditionnement
 - Des matériaux complexes
 - Une physique multi-échelle et riche dans une géométrie complexe
 - Des attentes exigeantes en terme de :
 - Précision (pression de contact, tension câble, énergie dissipée, ...)
 - Robustesse, efficacité de calcul, ergonomie
- **Un problème de mécanique numérique qui peut/doit encore progresser...**



PLAN

- **Le groupe Michelin**
- **Le pneu et ses performances**
- **La simulation dans le processus de conception**
- **La modélisation éléments-finis du pneu**
- **Le HPC et le logiciel scientifique**



Historique et approche du calcul à Michelin

- **Des le début des années 80:**
 - Par des petits codes de calcul / chaine développé en interne.
 - Des machines de calcul Cray et des PC.
- **Dans les années 90:**
 - Des PC et des stations de calcul HP
 - un solveur développé en interne (en fortran) toujours utilisé
- **A partir des années 2005:**
 - Début de l'aire des clusters actuels :achat d'un cluster tous les ans.
 - Développement d'un nouveau code de calcul en C++ : indispensable pour le parallélisme, l'adaptation de maillage en parallèle ...



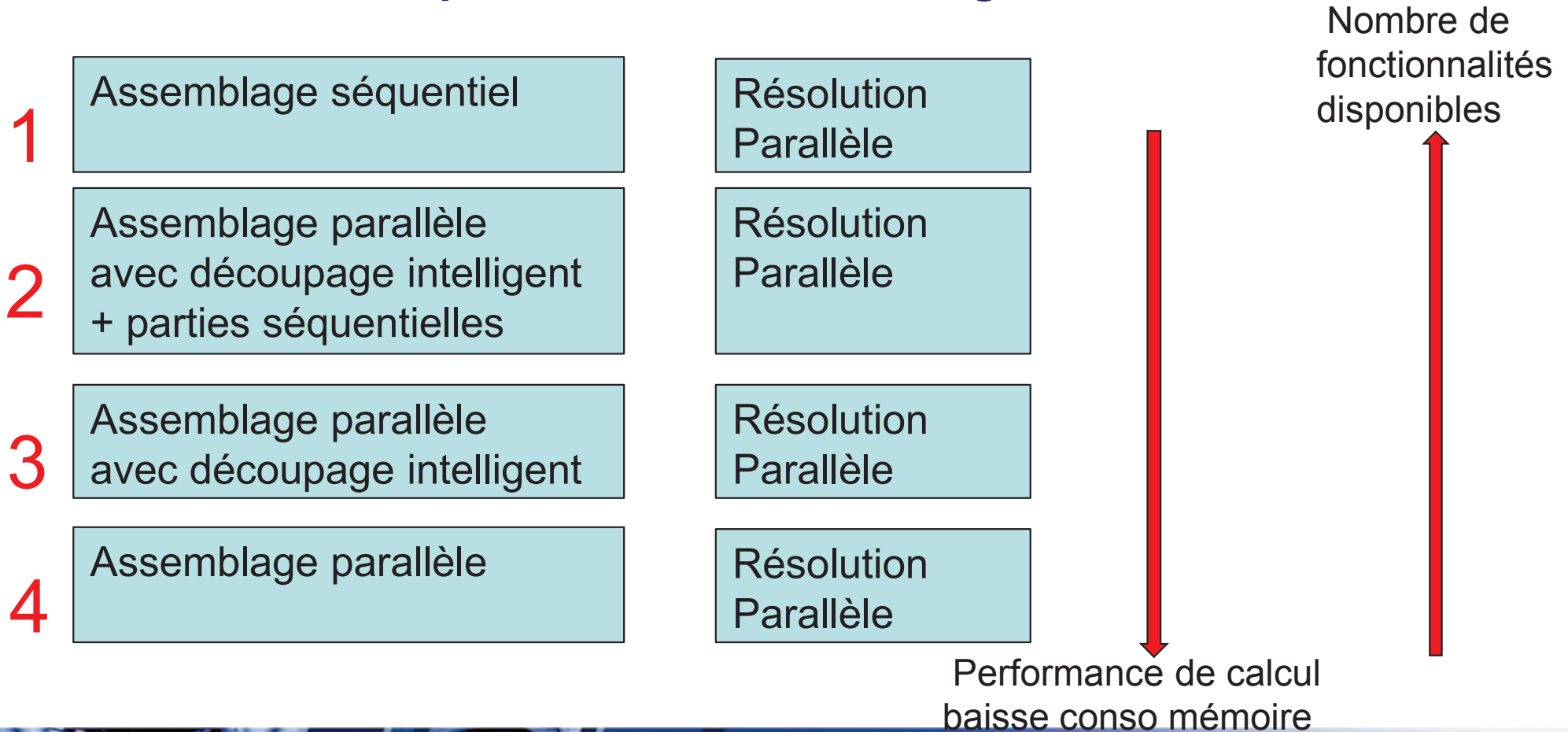
Approche du parallélisme 1

- **Un calcul : suite d'assemblages $O(n)$ et de résolutions $O(n^2)$**
- **Solveurs algébriques => « clef » de la performance en mécanique des solides (BCS, MUMPS, Pardiso, Pastix, FETI ...)**
 - **Solveurs directs : robuste mais consommation mémoire et scalabilité limité**
 - **Solveur itératifs (FETI) : -scalabilité importante.**
 - consommation mémoire maîtrisé.
 - difficulté de convergence sur des milieux hétérogènes complexes (stade recherche).
 - **Le temps d'assemblage est beaucoup moins pénalisant qu'en Mécanique des fluides et plus le cas augmente en taille moins il le devient.**



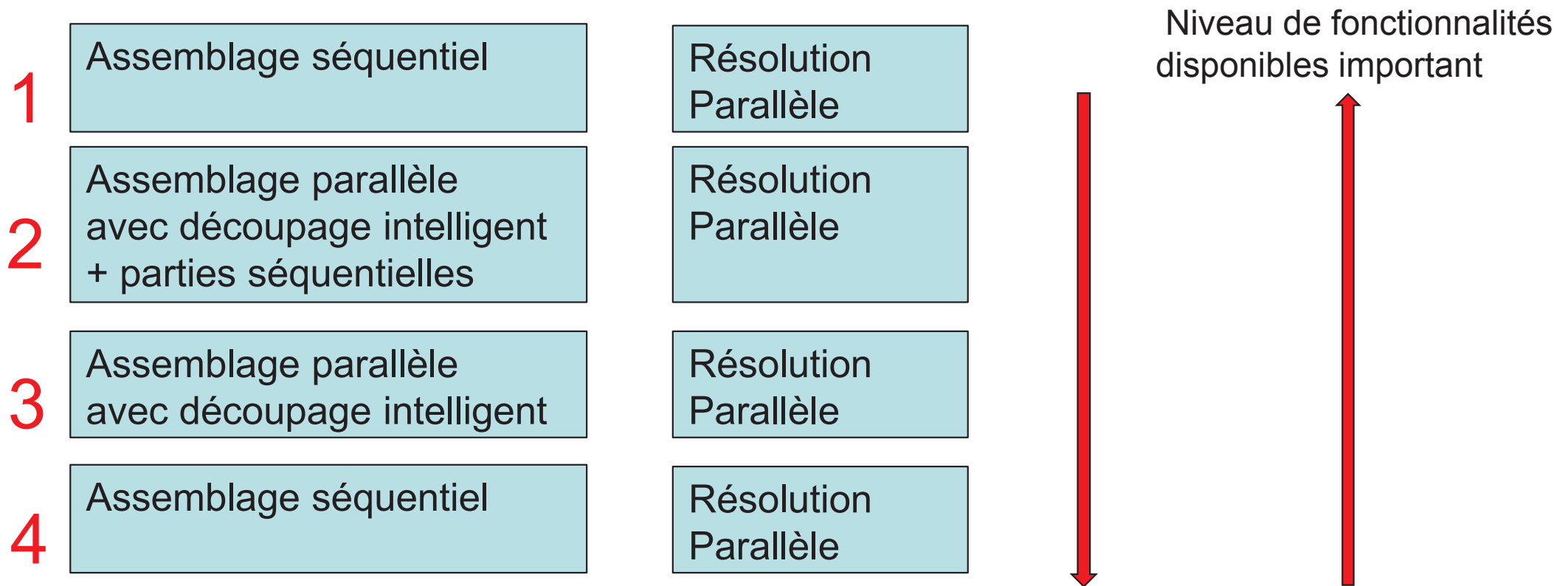
Approche du parallélisme 2

- On dissocie le parallélisme d'assemblage et de résolution.



Approche du parallélisme 2

- On dissocie le parallélisme d'assemblage et de résolution.



BUT: optimisation du service rendu

Cette approche multi niveau dans le parallélisme permet de rendre les fonctionnalités plus rapidement disponibles avec un maximum de performance de calcul.

Le logiciel scientifique à Michelin

- **Une activité aux interfaces multiples:**
 - Avec les Systèmes d'Information (dev logiciel, Catia, infrastructures, gestion des ressources de calcul)
 - Avec le monde de la production : usines, concepteurs machines
 - Avec les équipes matériaux et conception pneu.
- **Difficultés :**
 - Gérer les interfaces.
 - Faire le travail de fond (qualité logiciel, architecture des codes, refactoring ...)
 - Faire du logiciel scientifique avec des processus industriels et/ou SI.



Conclusion

- La simulation du pneu chez Michelin est au cœur du processus de conception et de la démarche d'innovation
- Beaucoup d'interactions entre les équipes numérique, physique de la performance, matériau et concepteurs
- Beaucoup de collaborations universitaires sur un périmètre mondial
- *Le HPC est devenu indispensable d'un point de vue scientifique et économique:*
 - *En 2014 on a plus que doublé notre puissance de calcul.*
 - *De nouveaux problèmes se posent à nous au niveau du scheduling pour rendre ces ressources disponible au mieux.*

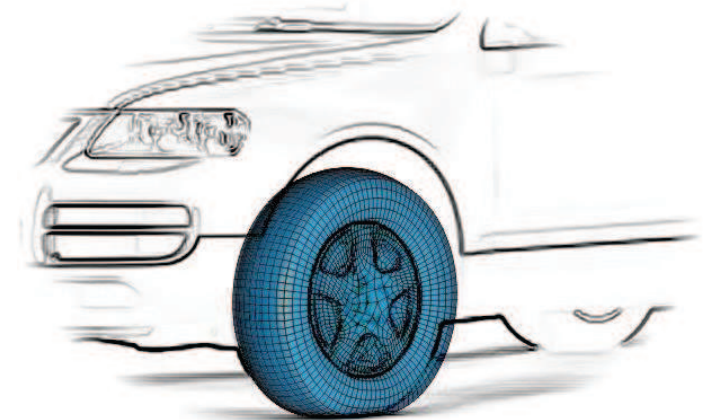




Questions ?

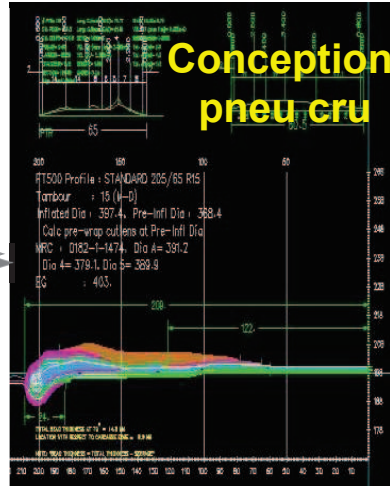
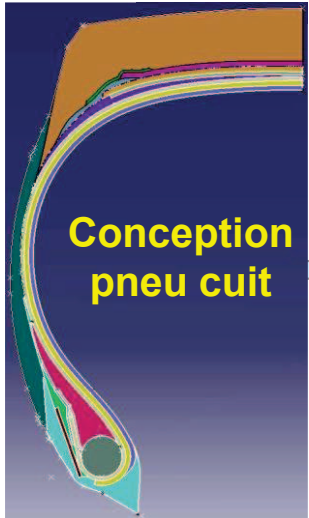
**Ou suite , présentation de sujets de recherches
en mécanique numérique**

Jean-baptiste.harry@fr.michelin.com

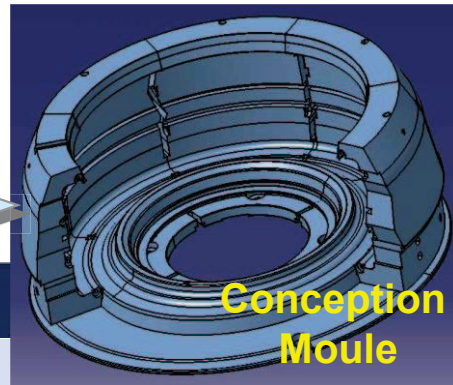
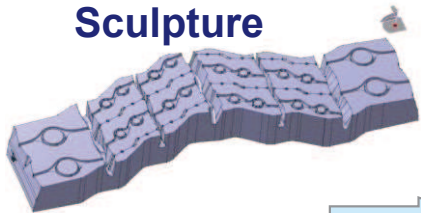


De la conception à la fabrication

Simulation du procédé de fabrication



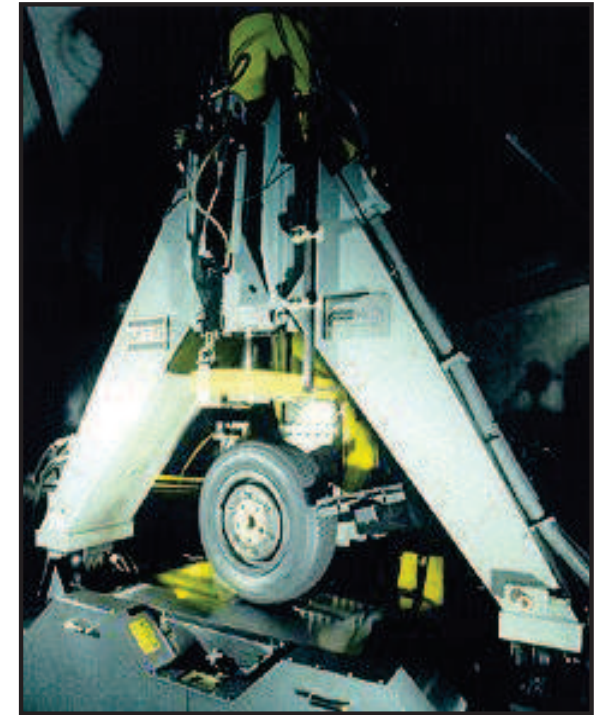
Conception Sculpture



La simulation dans le processus de conception

Tests

- Sur machine :
- Mesures pneus statiques et dynamiques :
 - ◆ 75 000 pneus mesurés / an
- Tests d'endurance :
 - ◆ 325 000 000 Kms / an
 - ◆ 11 000 pneus mesurés / an



La simulation dans le processus de conception

Tests

- Sur piste :
- Tests subjectifs et objectifs :
 - ◆ 37 000 évaluations / an
- Tests d'usure et d'endurance :
 - ◆ Tests analytiques : 30 millions Kms / an
 - ◆ Tests statistiques : 1,8 milliard Kms / an



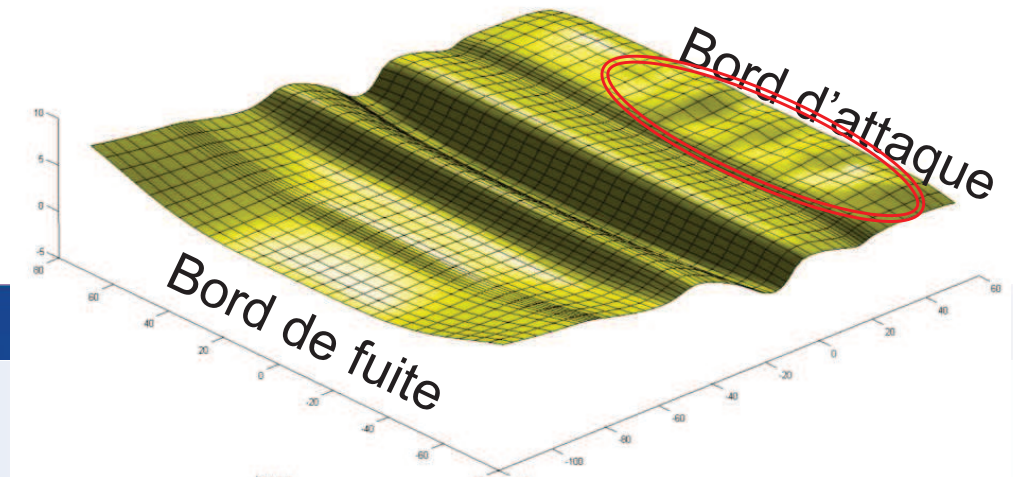
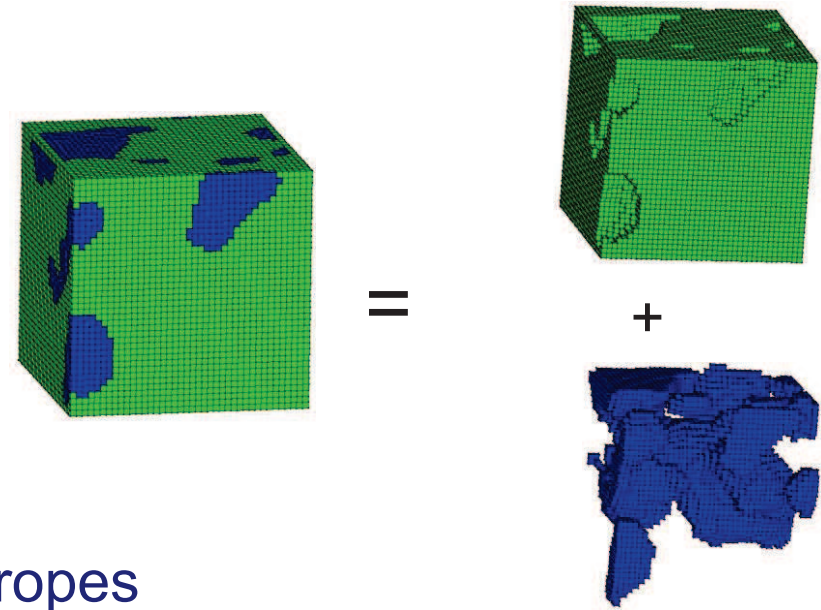
La simulation dans le processus de conception



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Modèles matériau avancés :

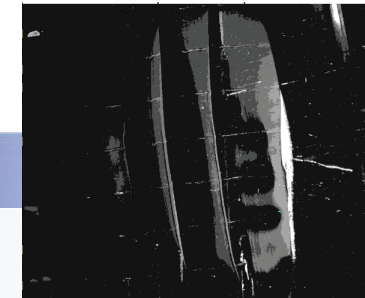
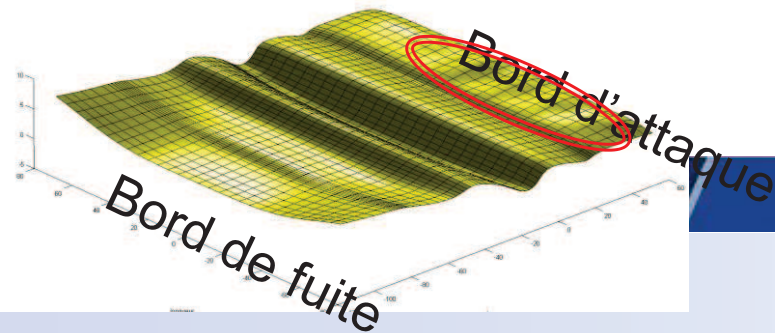
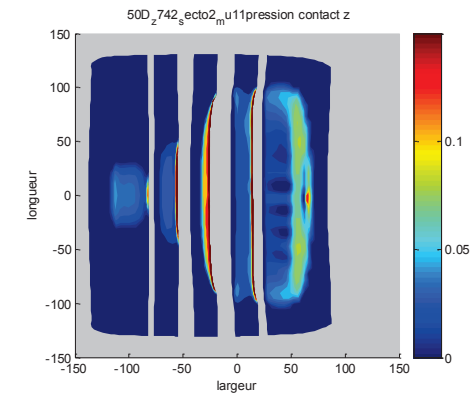
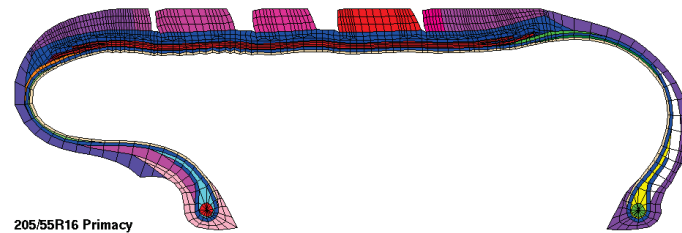
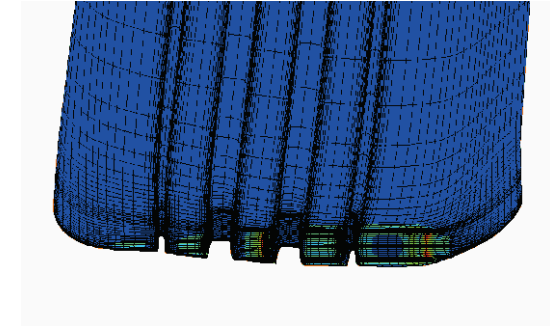
- Méthodes d'homogénéisation :
 - Gommés à bulles
 - Lois nappes (textile)
 - Lois câble (multi-fils, ...)
- Modèles élasto-visco-plastiques orthotropes pour les gommés (crués et cuités)
- Modèles enrichis
 - flexion (éléments coques, ...)
 - ...



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Modèles matériau avancés :

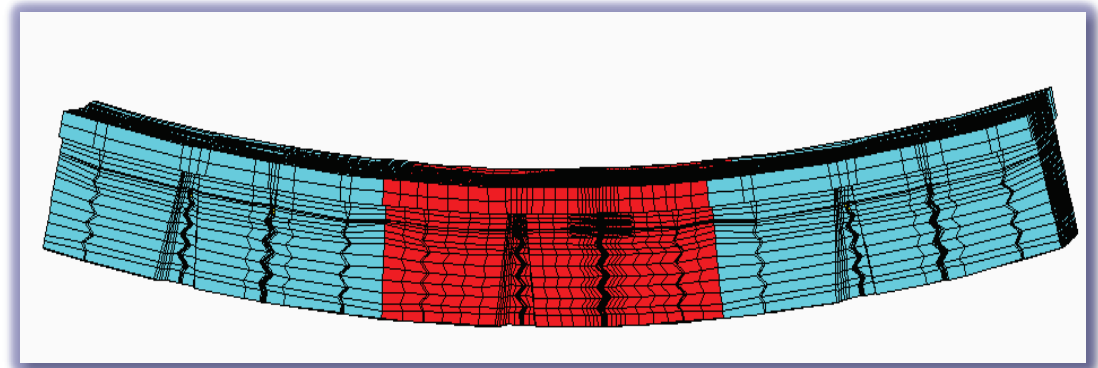
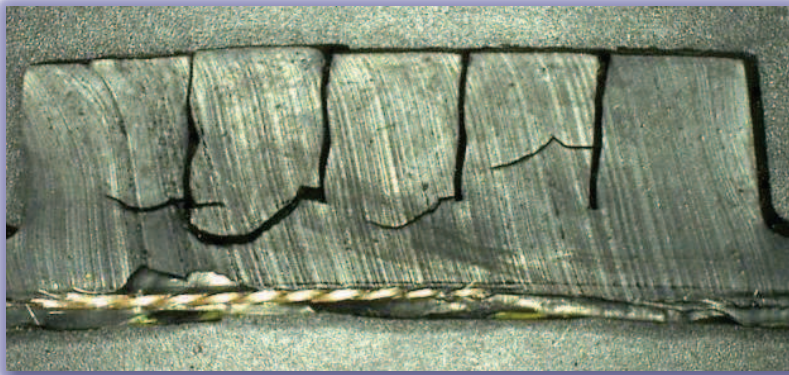
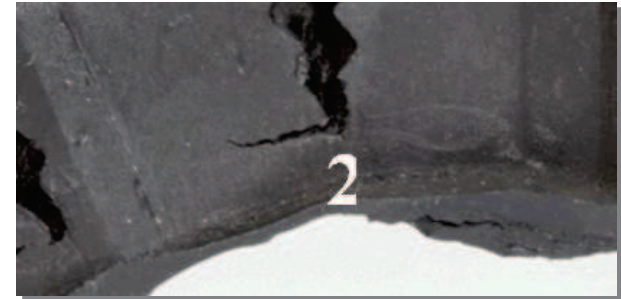
- Exemple modélisation de la flexion
 - Améliore le rendu sous sollicitation transversale
 - Clé pour la prédiction de l'adhérence transverse.



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Modélisation de l'endommagement :

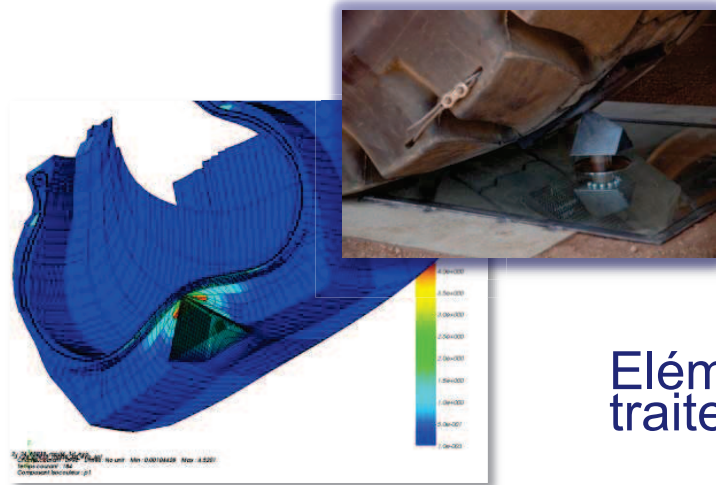
- Modèle de propagation de fissure
- Incrustation de fissures dans le maillage
- Critère de fissuration, méthode de couplage local/global (détermination cycles de déformation, ...)



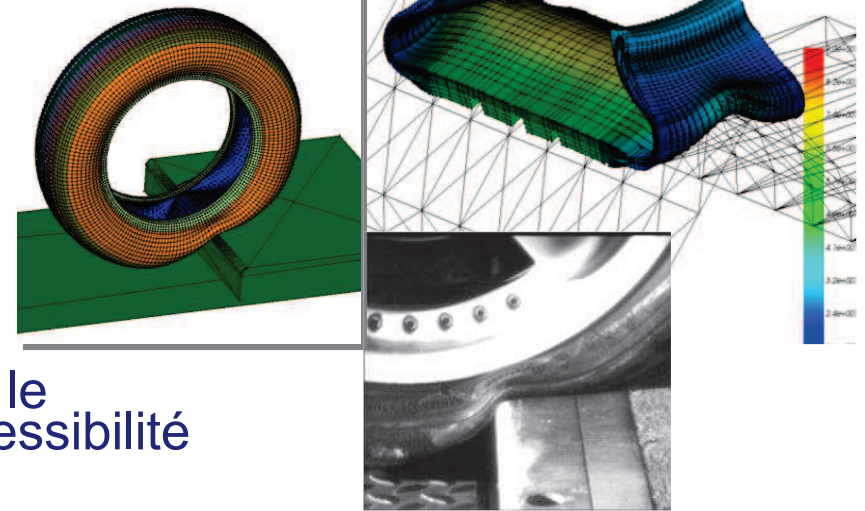
Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Contact et très grandes déformations pour la prédiction de l'endurance

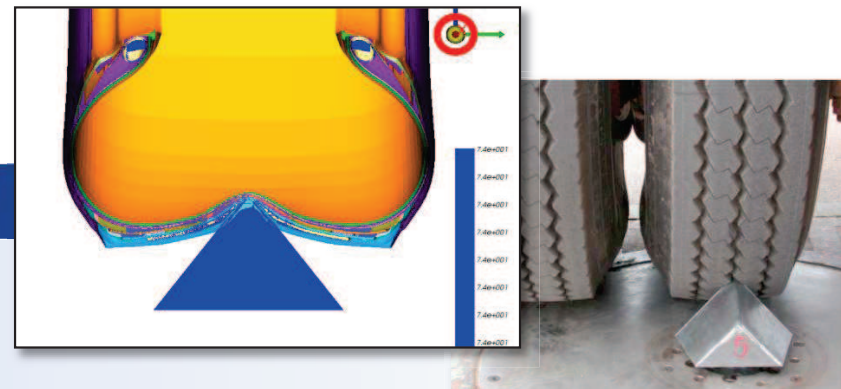
Traitement du contact : Éléments mortier, pré-détection, ...



Éléments enrichis pour le traitement de l'incompressibilité



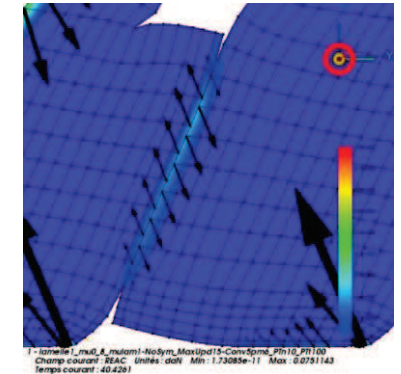
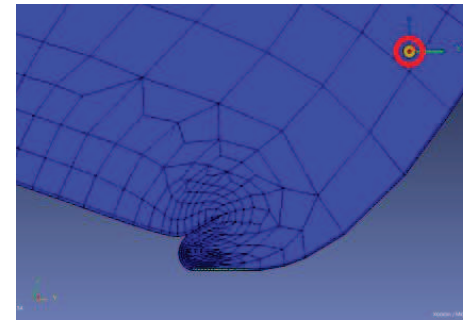
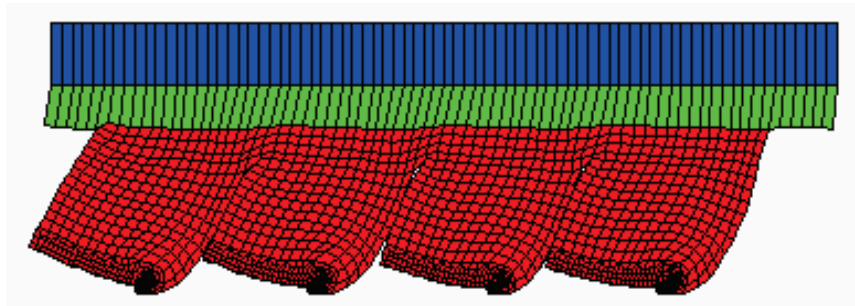
Schémas instationnaires explicites pour calculs d'impacts



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

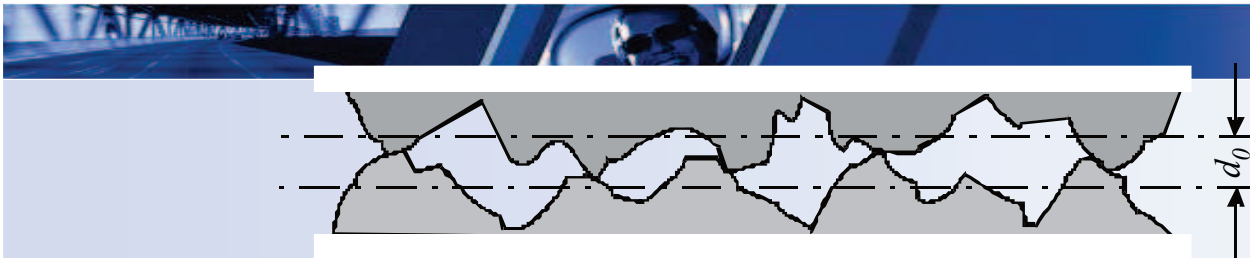
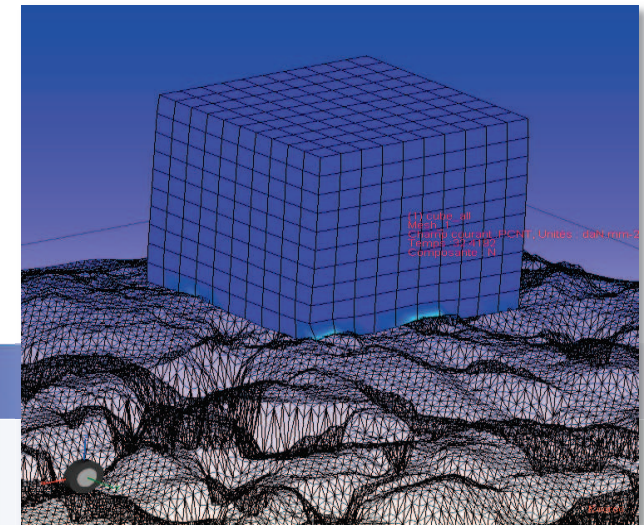
Modélisation du contact pour l'adhérence :

Thermique de surface instationnaire



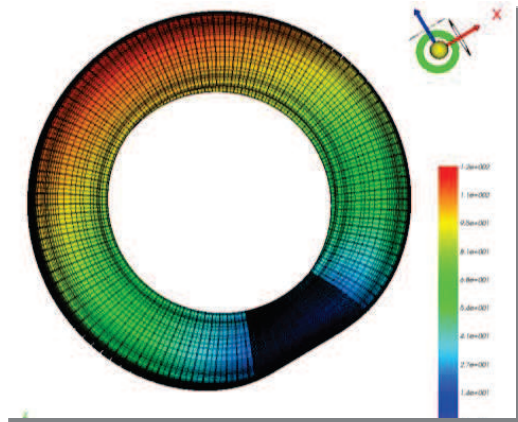
Modèle de contact gomme/gomme avec frottement

Sols rugueux et méthodes multi-échelles (couplage micro/macro)



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

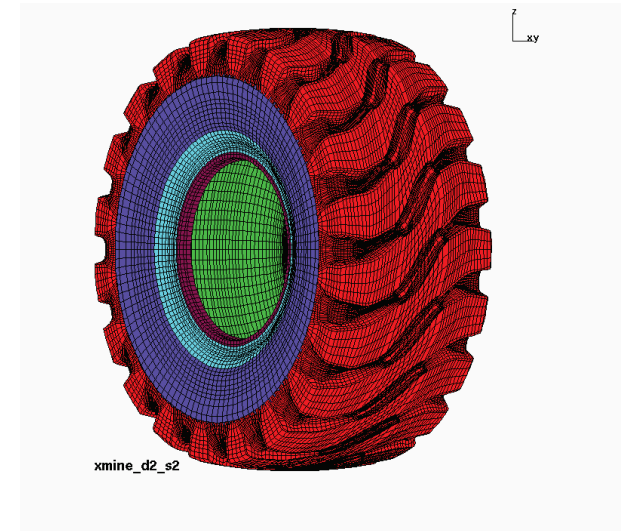
Efficacité de résolution :



Méthodes robustes de résolution non-linéaire

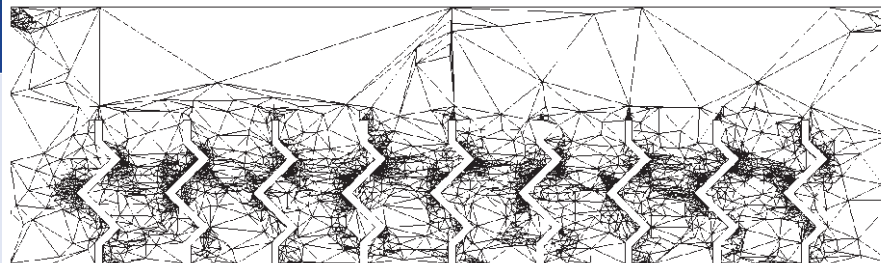
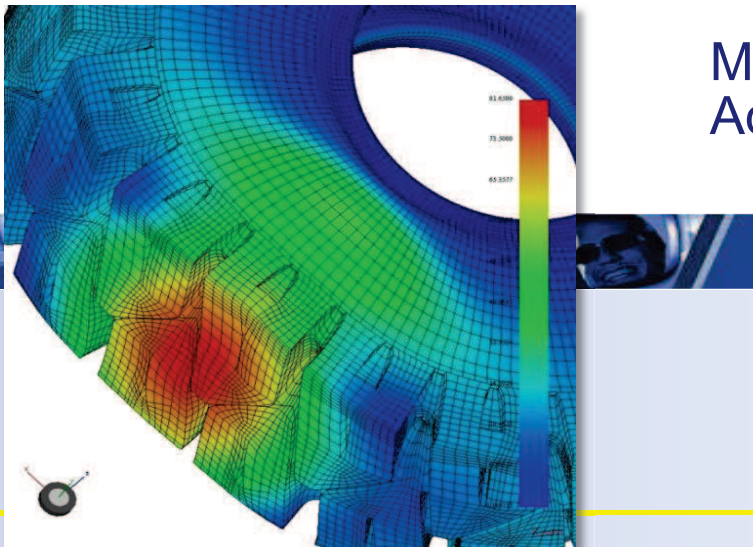
Solveurs algébriques
(directs / itératifs)

Pré-conditionneurs



Parallélisation des calculs / décomposition de
domaine / HPC (High Performance Computation)

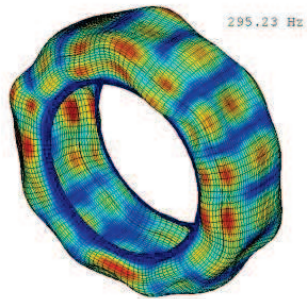
Méthode de recollement de maillages incompatibles
Adaptation de maillage ; Eléments tetra



Les sujets de recherche actuels en mécanique numérique du pneu

Autres :

Modélisation du bruit

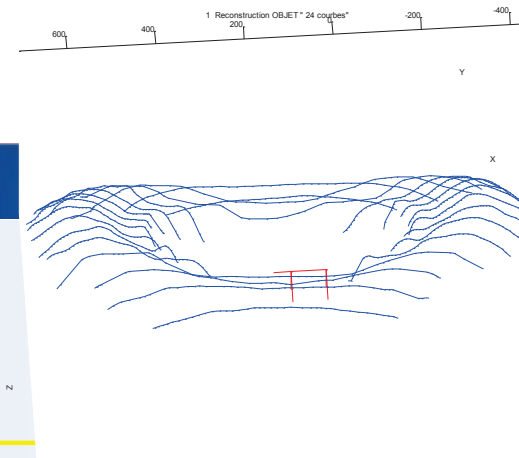
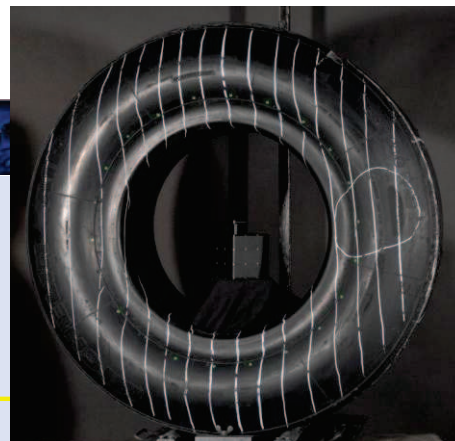


Sensibilité, fiabilité, Optimisation de paramètres de conception

Hydroplanage : couplage fluide/structure



Mesure non destructive et reconstruction 3d



La simulation dans le processus de conception

But :
prédire la performance perçue par l'utilisateur final en conditions réelles,
mesurée par un constructeur ou test réglementaire

Méthodes de simulation pour
l'évaluation de la perfo. :
But : classer les variantes

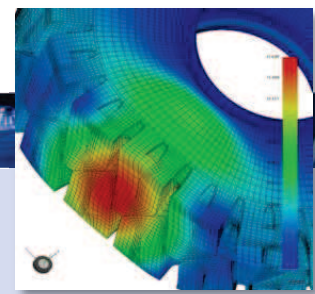
Tests/Mesures variantes en
situation idéalisée ou réelle

Critère substitutif
perfo.

Scénario de
calcul

Outils de calcul

- i Gonflage
- i Confort
- i Bruit
- i Résistance Roulement
- i Usure



La simulation dans le processus de conception

- Simulation du montage/gonflage :

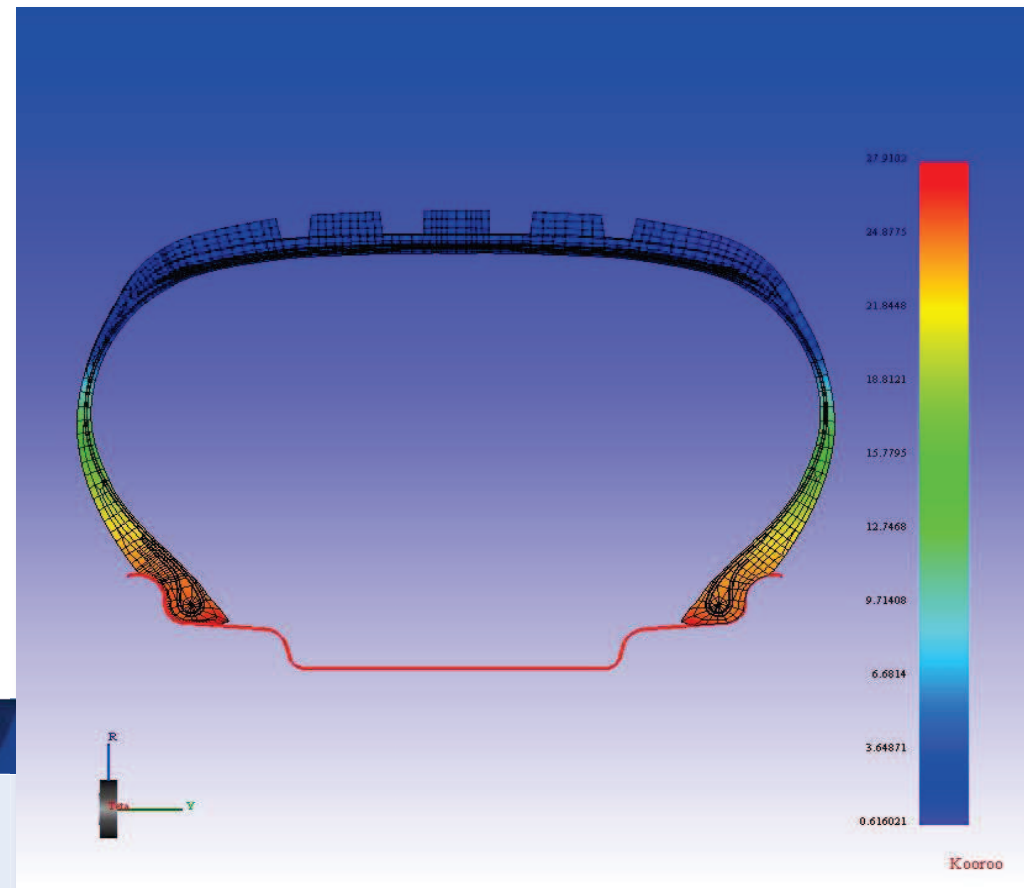
Analyse 'montée sommet' : recherche d'un profil 'plat'

Prédiction des dimensions de la boîte englobante (norme ETRTO)

Calculs par éléments finis :

Statiques,

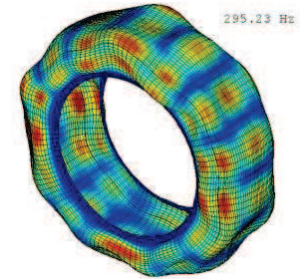
Axi-symétriques.



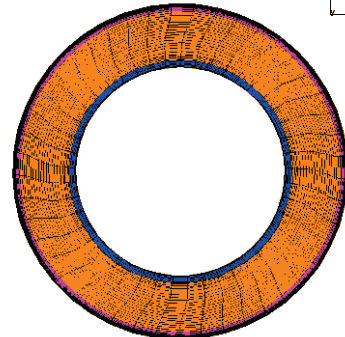
La simulation dans le processus de conception

- Confort :

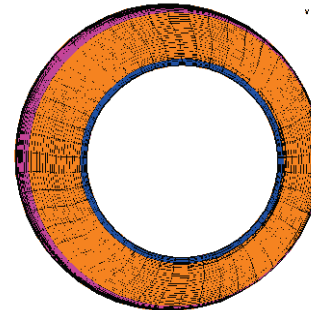
Simuler et optimiser les modes de vibration du pneu.
Calcul par éléments finis : Modes propres.



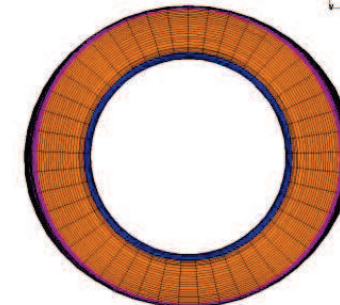
Modes
radiaux



R0

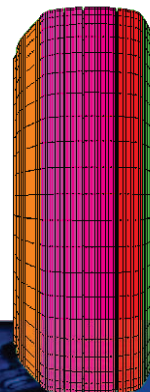


R1

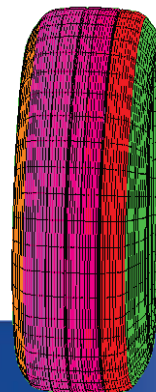


R2

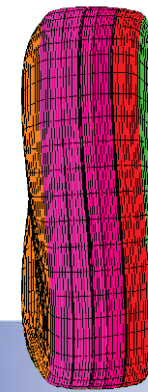
Modes
transverses



T0



T1



T2



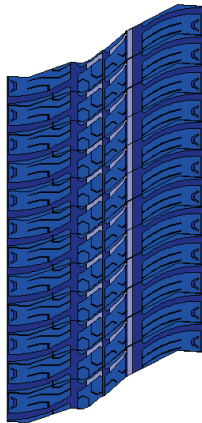
La simulation dans le processus de conception

- **Bruit :**

Caractériser le bruit généré par le séquençement des motifs géométriques de la sculpture.

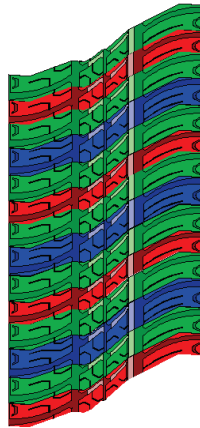
Simulation modèle simplifié (non éléments-finis)

Pneu mono pas



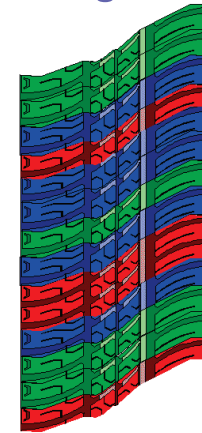
Sirènement

Séquence redondante



Battement

Arrangement calculé



Bruit blanc



La simulation dans le processus de conception

- **Résistance au roulement (RR) :**

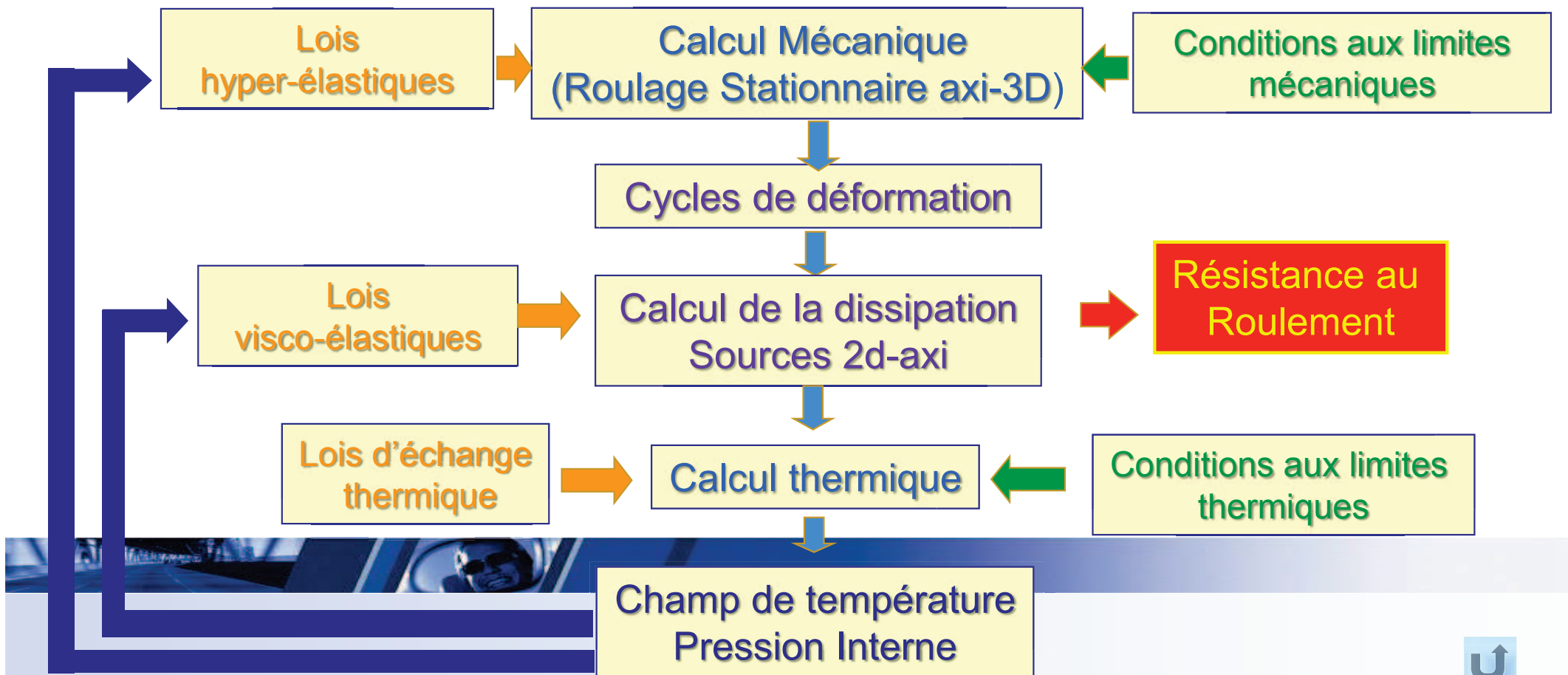
- Part de la RR dans la consommation :

20% (VL) - 30% (PL) de la consommation !

- Réduction de la résistance au roulement = Réduction sensible de la consommation.
- Contribution principale : pertes **visco-élastiques** = f(déformation)
 - Propriétés 'visco' des gommes (rhéologie)
 - Chaque cycle de déformation (tour de roue) dissipe de l'énergie
 - Dépend fortement de la fréquence et de la température
- Contribution secondaire : frottement dans l'aire de contact

La simulation dans le processus de conception

- Prédiction de la Résistance au Roulement : exemple de scénario de calcul
 - Simulation éléments-finis multiphysique :
 - Couplage thermo-mécanique (couplage faible → point fixe)



La simulation dans le processus de conception

● Usure :

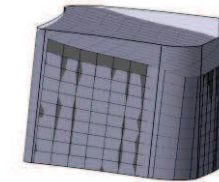
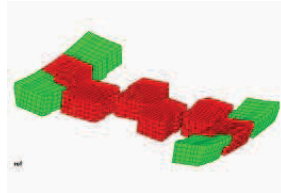
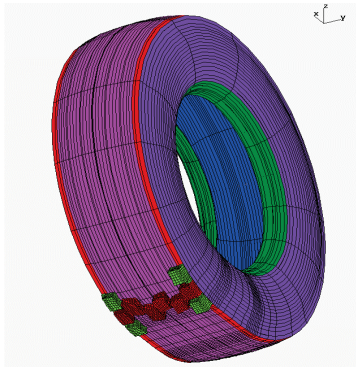
Calculer la cinétique d'usure d'une sculpture pour prédire

la Durée de Vie

l'évolution de la forme d'Usure



Simulation « éléments-finis » multiphysique.



Géométrie / Maillage

Lois de comportement
(hyperélastique)

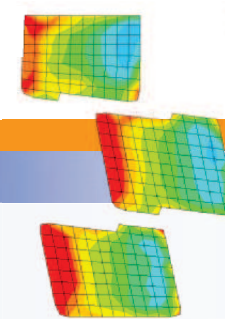
Calcul mécanique
Quasi-statique local/global

Conditions aux limites
mécaniques

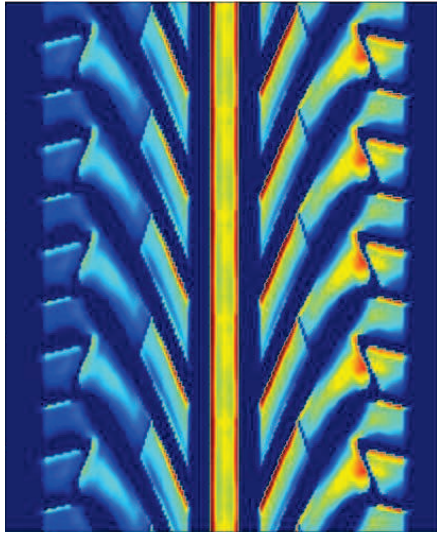
Champ de pression de contact
Champ de vitesses de glissement

Loi d'érosion

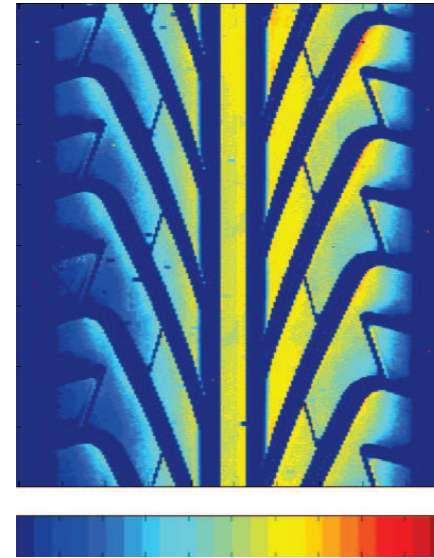
Calcul vitesse d'usure
instantanée



La simulation dans le processus de conception



Mesurée



Calculée

Carte d'Usure



Le tweel

