

**Master 2**  
**Ingénierie de**  
**Conception**  
Université de Poitiers



Rapport de fin de stage  
**Simulation en frottement d'un toron de fibres  
de carbone**

Rédigé par Zerourou Bachir

Maitres de stage :  
Noël BRUNETIÈRE  
Olga Smerdova

Année scolaire : 2021/2022

FACULTÉ  
DES **SCIENCES**  
**FONDAMENTALES**  
ET **APPLIQUÉES**  
UNIVERSITÉ DE POITIERS





## Remerciement

Je tiens à remercier vivement mes deux maitres de stage Noël Brunetière et Olga Smerdova de m'avoir accepté et de me donner la chance de travailler avec eux, la patience qu'ils avaient eue avec moi pour tantôt m'expliquer les expériences faites au labo mais les phénomènes physiques qui régissent dans le toron que nous voulions comprendre. Nous organisons souvent des réunions où je ne me sentais pas que tout le travail était à ma charge mais chacun de nous propose et discutera ses idées jusqu'à ce que nous soyons tous les trois d'accord. Parfois je leur demande de me répéter plusieurs fois une certaine explication, ils m'aident à écrire les programmes, à comprendre certaines fonctions du code de calcul LMGC90.

Je remercie aussi Frédéric Dubois et Rémy Mozul pour leur formation sur le code LMGC90 et l'initiation au langage Python, même si j'avais suivi la formation à distance ça ne leur a pas posé un problème pour répondre à mes questions.

Je remercie aussi l'équipe des doctorants de TriboLub qui m'ont prodigué des conseils sur python et l'utilisation de paraview.

Je remercie Mikael Gueguen pour sa formation sur l'utilisation de Git et HPC pour faire mes calculs.

## Table des matières

Remerciement.....	3
Liste des figure .....	5
I. Introduction générale.....	6
II. Organisme d'accueil .....	7
a) Introduction .....	7
b) Axe Tribolub .....	7
Chapitre III : Problème du sujet .....	8
c) Problème posé .....	8
III. Méthode des éléments discrets .....	12
a) Présentation de la MED .....	12
b) Différents types de codes de calculs par la MED .....	15
i. Architecture du LMGC90.....	15
• Corps à géométrie basique :.....	17
• Corps à géométrie à partir d'un outil de maillage : .....	17
c) Modèle du toron sur LMGC90 .....	18
i. Elaboration du modèle.....	18
ii. Préprocesseur.....	20
iii. Postprocesseur .....	23
iv. Calcul parallèle.....	24
v. Visualisation des résultats après simulation .....	24
IV. Résultats des nouvelles simulations numériques .....	26
a) Le modèle existant :.....	26
b) Paramétrage du modèle .....	28
c) Non symétrie des distances des deux master point.....	29
d) Augmentation des rayons des fibres de Ghost.....	30
e) Ajout des cavités.....	32
f) Master point au milieu du toron .....	34
Bilan de l'institut Pprime .....	37
Bilan personnel.....	38
Conclusion générale .....	39
Bibliographie .....	40
Résumé .....	41
Abstract .....	41

## Liste des figure

Figure 1 : Procédé RTM pour la fabrication des pièces composites .....	8
Figure 2 : Défauts due au contact .....	8
Figure 3 : Toron de fibres de carbone.....	9
Figure 4 : Les deux expériences de Cornelissen.....	9
Figure 5: Schéma du tribomètre de l'expérience transversale sur le toron .....	10
Figure 6: Schéma des trois étapes communes pour la MED .....	13
Figure 7: Schématisation des éléments constituant un avatar dans LMGC90.....	16
Figure 8: Etapes principales d'une simulation sur LMGC90 .....	17
Figure 9 : algorithme de dépôt du LMGC90 .....	20
Figure 10 : Vue de dessus du toron en contact avec la paroi.....	21
Figure 11 : évolution de la force de compression. ....	21
Figure 12: Schématisation d'un master point qui représente la précontrainte. ....	22
Figure 13 : Représentation de la forme du toron .....	23
Figure 14 : Modèle numérique de référence faisant apparaître les éléments (fibres, Ghost, paroi, master point) schématiquement et sur paraview . ....	26
Figure 15 : Résultat de la simulation de référence. ....	27
Figure 16: Comparaison entre trois différents temps de calcul de $\mu_{\text{toron/paroi}}$ . ....	28
Figure 17 : Distribution des raideurs de la loi « ELATIC_WIRE » dans le modèle de référence. ....	29
Figure 18 : Courbes $\mu_{\text{toron/fibre}}$ , déplacement et déformation du toron. ....	30
Figure 19: Augmentation des rayons des fibres Ghost. ....	31
Figure 20 : courbes du coefficient $\mu_{\text{toron/plaque}}$ , déplacement et déformations. ....	31
Figure 21: Insertion des cavités entre les fibres.....	32
Figure 22: différentes configurations d'insertion des cavités. ....	32
Figure 23 : Courbes $\mu_{\text{toron/paroi}}$ , déplacement et déformation. ....	33
Figure 24 : Modèle avec le master point 'ELASTIC_WIRE' au milieu du toron. ....	34
Figure 25 : Ajout du deuxième master ROD. ....	35
Figure 26 : Courbes $\mu_{\text{toron/plaque}}$ , déplacement et déformation. ....	36

## I. Introduction générale

La tribologie est une discipline très largement utilisée dans le milieu industriel, c'est une branche de la physique et de la mécanique qui s'intéresse à l'étude des contacts, des frottements, lubrification, entre les solides. Ce présent rapport est une synthèse de mon travail de stage de six mois au sein de l'institut Pprime de l'université de Poitiers, au cours duquel j'ai continué le travail de C.Chai sur l'élaboration d'un modèle numérique par la méthode des éléments discrets en utilisant le code de calcul LMGC90 afin de faire correspondre le résultat expérimental fait en 2021 et mon modèle numérique afin répondre localement à la problématique du glissement des fibres de renforcement des pièces avec l'outil de formage du procédé RTM.

Mon travail de stage pendant ces derniers six mois était l'affinement du modèle numérique développé par C.Chai qui s'appuie sur trois paramètres :

- Coefficient de frottement fibre/fibre ( $\mu_{ff}=0.1$ ) ;
- Coefficient de frottement fibre/paroi ( $\mu_{fgl}=0.35$ ) ;
- Force de référence qui tire les fibres seulement en traction  $F=1e-4$  N.

La problématique de ce modèle est non seulement le toron se déforme trop, cela vaut aussi que son déplacement est petit, mais aussi il ne permet pas de faire revenir le toron à son état initial.

Dans mon modèle je prendrai en considération l'adhésion des fibres, cela nous permettra de limiter la déformation du toron qui conduira le toron à se déplacer plus.

Le premier chapitre je ferai l'objet d'une petite présentation de l'organisme d'accueil, ensuite je présente la problématique de mon sujet de stage ainsi que les l'étude expérimentaux faites pour comprendre le comportement d'un toron de fibres de carbone.

Le deuxième chapitre est consacré à la littérature la méthode des éléments discrets, la méthode NSCD utilisé dans LMGC90, et l'élaboration du modèle numérique du toron.

Le troisième chapitre est dédié aux résultats obtenus avec les nouvelles simulations faites durant mes six mois de stage avec une comparaison avec les résultats expérimentaux faites durant l'année 2021 au laboratoire.

Je termine mon travail avec une conclusion générale et des perspectives qui seront l'appui pour le futur travail.

## II. Organisme d'accueil

### a) Introduction

Dans le cadre de ma fin de parcours pour ma deuxième année master, j'ai effectué mon stage au sein de l'institut Pprime à l'université de Poitiers (Faculté des sciences fondamentales et appliquées). Pprime est une institution spécialisée dans la recherche dans plusieurs domaines de la physique et de la mécanique appartenant au CNRS, elle est conventionnée par L'université de Poitiers et l'ISAE-ENSMA (École nationale supérieure de mécanique et d'aérospatiale) [1]. Elle comprend globalement six-cents personnes, dont environ trente chercheurs du CNRS et cent soixante-dix enseignants chercheurs de l'université de Poitiers et de l'ISAE.

Pprime s'appuie aussi sur du personnels permanents et contractuels (ingénieurs, techniciens et administratifs). Elle est englobée par trois départements : Physique et mécanique des matériaux, Génie mécanique des systèmes complexes et Fluide, thermique et combustion (figure 1).

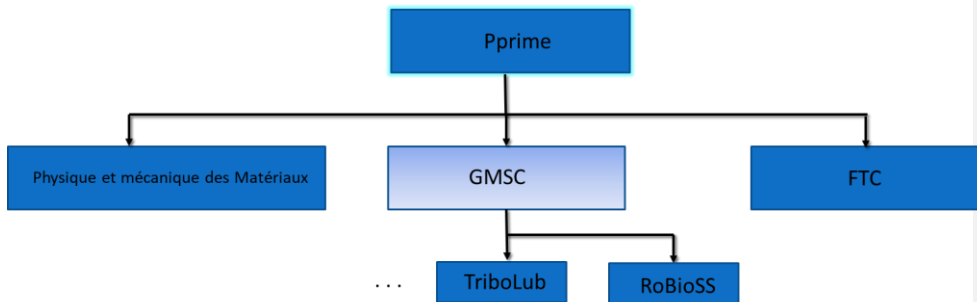


Figure 1 : Structure de l'institut Pprime.

L'institut Pprime possède 17 équipes de recherches, moi je travaillais dans l'équipe de TriboLub spécialisée dans la tribologie au département du Génie mécanique des systèmes complexes.

### b) Axe TriboLub

L'objectif scientifique de l'équipe TriboLub est d'effectuer des recherches, de comprendre et modéliser les phénomènes qui conditionnent les interfaces sèches et lubrifiées. Ces phénomènes sont fortement interdisciplinaires et multi-échelles : de l'échelle de la mesure de rugosité des interfaces à l'échelle des systèmes mécaniques.

TriboLub possède plusieurs parcs de plus d'une dizaine de bancs d'essai qui sont modulables et peuvent être modifier pour répondre aux exigences de la recherche et de l'industrie.

### III. Problème du sujet

#### c) Problème posé

Pour la continuité de ce qui est était déjà accompli, pendant l'étape de fabrications des pièces en fibres de carbone avec le procédé RTM, (Resin Transfert Mounting) figure 2, si le processus n'est pas bien maitrisé, exactement à l'étape de fermeture de l'outil sur la pièce composite renforcée par fibres de carbone (étape 2 et 3) qui est tissée par ensemble de toron, juste avant qu'on injecte la résine et on ouvre de nouveau l'outil pour retirer la pièce, des imperfections de formage des pièces apparaissent due au frottement entre le toron et l'outil à l'échelle mésoscopique (voir figure 3).

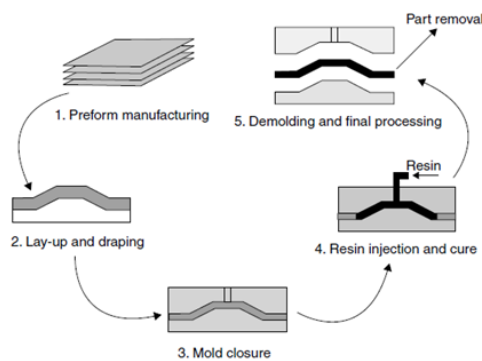


Figure 2 : Procédé RTM pour la fabrication des pièces composites.

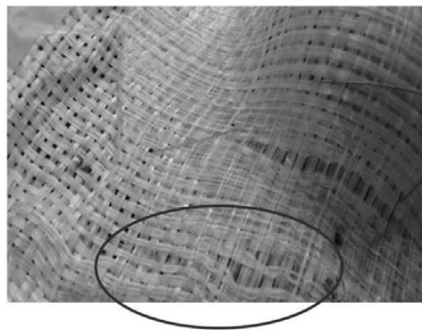


Figure 3 : Défauts due au contact [1].

Pour répondre à cette problématique, de nombreuses études expérimentales ont été faites pour comprendre le comportement du toron de fibres de carbone, je ne cite dans ce chapitre que quatre d'entre eux. Mais avant de présenter les quatre expériences définissons tout d'abord un toron. Nous pourrions considérer qu'un toron

**Commenté [MB1]:** Le développement du problème est très bien formulé, mais séparez le problème du développement du problème, c'est-à-dire qu'il devrait y avoir deux sous-sections différentes



est un ensemble de fibre d'un nombre pouvant aller jusqu'à 12000 d'un rayon entre 3-3.5 micromètres (voir figure 4).



Figure 4 : Toron de fibres de carbone [1].

Comprendre le comportement mécanique complexe d'un toron nous pousse à faire des expériences sur celui-ci afin de pouvoir mesurer certaines quantités qui constitueront la base des approches de modélisation de la mécanique de contact du frottement afin de comprendre, d'expliquer, mais aussi répondra à la complexité de l'interaction entre ces milliers de fibres. Plusieurs chercheurs ont essayé de faire des études expérimentales en frottement sur les trois échelles des matériaux renforcés par les fibres de carbone dont je pourrai résumer comme suit :

- La première étude est les deux expériences faites par Cornelissen, dans le but de caractériser le frottement sec entre toron/toron et toron/métal. Ces deux expériences dans lesquelles on avait constaté que le coefficient de frottement toron/toron est principalement influencé par l'orientation relatives (parallèle ou perpendiculaire) des torons mesurés au niveau mésoscopique (figure 5) [2]. Quant au frottement toron/métal, il est influencé par la topographie de la surface, les résultats sont aussi très sensibles à la résistance au cisaillements interfacial ainsi qu'au propriétés d'adhérence du métal[3].

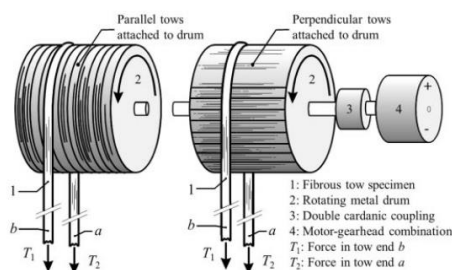


Figure 5 : Les deux expériences de Cornelissen[2].

- La deuxième étude est celle de Tournonias, il avait conclu que la vitesse de frottement et la charge normale ont des influences négligeables sur le coefficient de frottement que ce soit pour les fibres ou pour le toron. Ainsi tant pour le toron que pour les fibres, le frottement suit la loi de Coulomb [4].
- La troisième étude est de Mulvihill, il avait fait l'objet de mesure de la longueur de contact vraie des filaments parallèles. Mais aussi il a mesuré à l'échelle microscopique ou à l'échelle des fibres, une variation du coefficient de frottement interne du toron en orientation parallèle des fibres d'une élevée d'une valeur de 1.7 à 3.2 fois [5]. La disposition parallèle prédit une plus grande surface de contact pour la même charge normale sur cette surface, d'où un frottement plus élevé.
- La dernière est celle de Smerdova, dans laquelle cette fois-ci, contrairement aux précédentes études expérimentales, on cherchait à comprendre le phénomène de frottement d'un toron sur la direction transversale au lieu de longitudinale. Tout comme les précédentes expériences un bon d'essai a été réalisé à partir d'un tribomètre (figure 6). Tout d'abord il faut dire que le frottement du toron dépend du nombre de cycles pour toutes les expériences, et pour en comprendre davantage de la dépendance de ce coefficient avec la distance de glissement, ce tribomètre était monté pour mesurer la force de frottement en contact glissant sous une charge constante, normale, sous une observation microscopique entre deux plaques de verre qui servent de fenêtre.

Le tableau 1 résume les valeurs mesurées du coefficient de frottement dynamique entre toron et la plaque de verre supérieure :

	Passage 1	Passage 2	Passage 3	Passage 4	Valeur moyenne
aller	$0.34 \pm 0.051$	$0.35 \pm 0.039$	$0.35 \pm 0.044$	$0.34 \pm 0.039$	$0.33 \pm 0.036$
retour	$0.31 \pm 0.043$	$0.30 \pm 0.043$	$0.29 \pm 0.040$	$0.29 \pm 0.035$	$0.29 \pm 0.033$

Tableau 1 : coefficient de frottement de 4 torons en aller/retour [5]

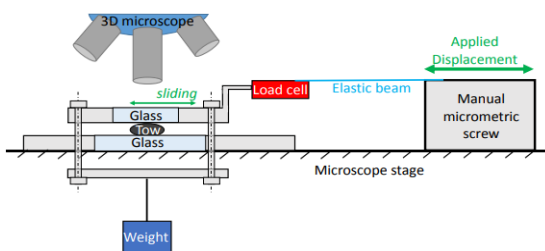


Figure 6: Schéma du tribomètre de l'expérience transversale sur le toron[6].

La continuité de cette dernière représente en gros mon travail durant mon stage à l'institut Pprime. Il faut savoir tout d'abord que l'année passée, tout un travail d'élaboration d'un premier modèle numérique utilisant un code de calcul par éléments discrets LMGC90 était fait par C. Chai dont les grandes lignes sont :

**Commenté [MB2]:** Et encore, il serait préférable de diviser le développement du problème qui a été fait par vous-même en un sous-chapitre

- Abstraction de la géométrie d'une fibre, puisque numériquement on ne peut pas présenter réellement la géométrie de chaque fibre, alors il avait considéré une géométrie cylindrique ;
- Hypothèses simplificatrices du passage du modèle expérimental en 3d dont le comportement est beaucoup plus complexe à un modèle numérique en 2d qui soit capable de reproduire toutes les informations et manipulations physiques (pression d'attache, étalement du ton, etc) ;
- Uniformisation des unités : mm-ms-g ;
- Construction du modèle avec une similitude des dimensions considérées dans l'expérience, il avait rajouté aussi certains paramètres pour rester le plus fidèle à l'expérience, le cas des vides entre les fibres ;
- Calcul des variables pour passer des paramètres locaux où paramètres globaux, pour que nous pourrions tracer les courbes du coefficient de frottement toron/plaque, déplacement et déformation du toron qui sont regroupé dans un fichier que nous pourrions ouvrir avec Excel pour tracer les courbes ;

Ma partie de travail est soit d'apporter des modifications et faire enrichir le modèle déjà existant, soit d'établir un nouveau modèle dans le cas où le premier ne nous permet pas de faire correspondre les résultats expérimentaux avec ceux numériques.

## IV. Méthode des éléments discrets

Ce deuxième chapitre sera dédié à la méthode des éléments discrets et le choix d'une éventuelle liste parmi les codes de calculs existant en premier lieu, ensuite une présentation la méthode NSCD du code LMGC90. Ensuite je ferai l'objet de présenter les outils qui nous ont servi pour la construction de notre modèle numérique.

### a) Présentation de la MED

Au départ y avait une méthode dite « Event Driven » qui répondait parfaitement aux problèmes où il y a un nombre très restreint de contact entre corps rigides. C'est une méthode appliquée dans le domaine de la robotique où les résultats de contacts lors d'une évolution restent inchangés, nous pouvons alors utiliser des méthodes d'intégrations d'ordre plus élevé permettant ainsi des mouvements précis.

On trouve dans la littérature que le premier développement de cette méthode remonte à P.A.Cundall, initialement pour l'étude de systèmes composés de rocs, à ce moment elle s'appelait « Distinct Element Method », ensuite étendue pour l'étude des milieux granulaire. L'extension des méthodes utilisées pour modéliser le comportement dynamique des molécules aux particules macroscopiques, appelée à juste titre dynamique moléculaire « MD »[7].

Ces deux méthodes régularisent le contact entre particules, elles utilisent des lois de répulsions raides reliant forces et paramètres de configuration pour approcher la contrainte mécanique de non-pénétrabilité (conduisant numériquement à une légère interpénétration des particules). La raideur des lois pousse à introduire des paramètres de dissipation reliés aux vitesses des corps et à garder des pas de temps petits pour assurer la stabilité du schéma d'intégration temporel [8].

La dernière approche est appelée CD (Contact Dynamics) développé par JJ. Moreau et M. Jean, qui renonce à la régularisation des lois de contacts, On parlera alors de « Smooth » pour la MED et MD, et « Non Smooth » pour CD pour devenir finalement « Non Smooth Contact Dynamics ». Le caractère non-régulier apparaît dans trois aspects [7] :

- Non-linéarité spatiale ;
- Non-linéarité Temporelle ;
- Non-linéarité en loi de contact.

Tout d'abord la méthode des éléments discrets dans la dimension analytique des choses, elle a pour objectif de déterminer les positions de toutes les particules ainsi que toutes les forces appliquées sur ces particules à tout instant  $t$  considéré de notre système et pour chaque pas de temps  $dt$ . A l'état initial de notre système, c'est-à-dire au début du cycle de calcul, les positions de nos particules sont connues à l'instant  $t$ , ainsi que toutes les forces de contact au temps  $t-dt$  (voir figure 7). Le calcul des positions de toutes les particules au temps  $t+dt$  et de toutes les forces de contact au temps  $t$  est réalisé en trois étapes :

- Etape 1 (Mouvement des particules) : le principe est de prédire une position ou d'effectuer directement un déplacement, calcul du déplacement des particules entre temps  $t$  et  $t+dt$  par résolution des équations de la dynamique.
- Etape 2 (Détection des contacts) : calcul des interpénétrations entre particules à partir de leurs positions au temps  $t$  ;

calcul de toutes les forces de contact au temps  $t$  à partir des interpénétrations calculées à l'étape et des forces de contact au temps  $t-dt$  par application de la loi de contact ;

- Etape 3 (Détermination des forces de contacts) : corriger les déplacements en calculant les positions des particules au temps  $t+dt$ .

A la fin du cycle de calcul, la connaissance des positions des particules au temps  $t+dt$  et de toutes les forces de contact au temps  $t$  permet d'initier le cycle de calcul au pas de temps suivant.

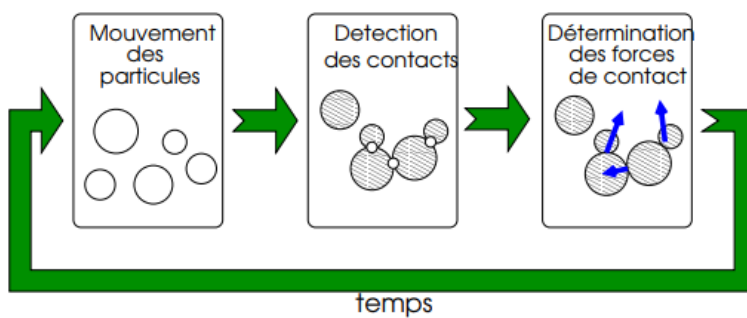


Figure 7: Schéma des trois étapes communes pour la MED[6].

Et dans la dimension numérique, cette méthode définit un domaine à l'aide de particules (objets) que nous pourrions dire d'eux qu'elles sont rigides, non déformables, liées les unes par rapport aux autres par des lois d'interactions par contact (frottement, adhérence, etc). Ces équations de la dynamique nous ramèneront à déterminer les déplacements, les rotations de chaque particule au cours du temps ou de la simulation.

L'équation de la dynamique est donnée par :

$$M\ddot{q}(t) = F_{ext}(t) + F_{int}(q, \dot{q}, t) + R \quad 1.1$$

Où  $M$  est la matrice de masse de notre système,  $\ddot{q}$  est le vecteur accélération ou dérivée seconde du vecteur position  $q$ ,  $F_{ext}$  et  $F_{int}$  sont respectivement les forces extérieures et forces intérieures en absence de contact et  $R$  les forces de contacts (résultante).

Les trois méthodes (MED, MD, NSCD) s'appuient sur l'équation (1.1) mais en prenant des itinéraires différents pour déterminer le mouvement du système. L'équation 1.1 est discrétisée en temps via le schéma d'intégration temporel.

La méthode NSCD utilisée dans LMGC90 utilise la  $\theta$ -méthode pour discrétiser l'équation (1.1). Les systèmes multi-contacts interviennent des chocs entre particules, dans le cas où on écrit cette équation en termes de mesures, et ainsi prendre les dérivées au sens des distribution l'équation (1.1) devienne :

$$M d\dot{q}(t) = F_{ext}(t) + F_{int}(q, \dot{q}, t) + R dv \quad 1.2$$

Où  $dt$  est la mesure de Lebesgue,  $d\dot{q}$  est une mesure différentielle et  $dv$  une mesure non négative pour laquelle  $d\dot{q}$  possède une densité de mesure.  $R$  est la densité d'impulsion de contact (instantanée).

Le schéma d'intégration suivant  $\theta$ -méthode en se plaçant sur l'intervalle  $]t^i, t^{i+1}]$ , l'équation 1.2 deviendra :

$$M[\dot{q}(i+1) - \dot{q}_{libre}(i)] = hR(i+1) \quad 1.3$$

Où

$$\dot{q}_{libre}(i) = \dot{q}(i) + M^{-1}(i)h[(1-\theta)F_{int}(i) + \theta F_{ext}(i+1)] \quad 1.4$$

Et

$$q(i+1) = q(i) + h[\theta\dot{q}(i+1) + (1-\theta)\dot{q}(i)] \quad 1.5$$

$\dot{q}_{libre}$  noté vitesse libre,  $h$  est le pas du temps, les valeurs de  $\theta$  doivent être prises entre  $\frac{1}{2}$  et 1 pour permettre une stabilité au schéma d'intégration. Les inconnues pour passer de l'instant  $t^i$  à  $t^{i+1}$  sont  $\dot{q}(i+1)$  et  $R(i+1)$

Les paramètres locaux relatives aux contacts peuvent être exprimés avec la matrice de changement de repère  $H$  et inversement avec sa transposée  $H^t$ . Ce qui nous ramène à exprimer la vitesse relative  $u_\alpha$  et l'impulsion moyenne  $r_\alpha$  de contact dans l'équation suivante :

$$u_\alpha(i+1) = u_{\alpha, libre}(i) + \sum_{\beta=1}^{nc} W_{\alpha\beta} r_\beta(i+1) \quad 1.6$$

$W_{\alpha\beta} = H^t M^{-1} H$  est la matrice Delassus,  $nc$  est le nombre de contact.

### b) Différents types de codes de calculs par la MED

Il existe multiples codes traduisant MED, même si la logique de bases est semblable, il peut y avoir des différences significantes relatives aux détails l'implémentation ainsi que le domaine d'application de chaque code. Cela nous conduit donc à plusieurs codes de calculs par MED libres ou commercial dont je pourrai citer dans cette liste :

- YADE-OPEN-DEM : code de calcul (Yet Another Dynamic Engine) élaboré et développé au laboratoire « 3SR » de Grenoble, pour créer des modèles numériques en trois dimensions, en utilisant des lois bien appropriés aux problèmes traités.
- LIGGGHTS : (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) est un code de calcul écrit en C++ par l'université Johannes Kepler en Autriche. Basé sur le code LAMMPS pour la modélisation des matériaux granulaires en général et le transfert de chaleur dans les milieux granulaires. LIGGGHTS fait parti du projet CFDEM dont le but de développer une nouvelle approche entre la CFD et la MED [8].
- WOO : est une plateforme orienté objet écrite en C++, basé sur le MED, elle contient un ensemble d'outils pour la création des géométries, définir le model de contact, l'intégration et la visualisation des résultats.
- EDEM Altair : EDEM est une solution de haute performance pour la simulation des écoulements des matériaux en vrac, développé par Altair sur la base de la MED, elle propose une interface graphique et une API pour exécuter les bibliothèques définies par les utilisateurs [9].
- LMGC90 : Ecrit à l'université de Montpellier en Fortran par F. Dubois, cette bibliothèque est très facile d'utilisation grâce aux classes d'abstractions écrites en python qui offre des fonctions prêtent d'utilisation et qui cachent toute la partie des détails de calculs.

Chaque code propose une architecture et des outils différents pour la définition d'un modèle, l'algorithme de détection des contacts qui ne dépend pas forcément de la méthode utilisée (MED, MD ou NSCD), la technique de discrétisation du temps, mais aussi des avantages et des inconvénients. LMGC90 se situe une bonne place parmi les codes par sa simple utilisation via le scripting python, des fonctions basiques prêtent pour la construction des modèles, seulement la documentation qui est un peu pauvre.

#### i. Architecture du LMGC90

Tous les modèles que nous pourrions développés dans ce fameux code de calcul dépendra premièrement des possibilités offertes pour leur l'élaboration en termes de définition de la géométrie, qui fait partie des définitions des corps rigides dans notre cas d'étude dites en LMGC90 avatars, mais aussi la définition des contacteurs qui nous serviront de moyens pour faire interagir ces corps rigides. Puisque le code LMGC90 exploite la puissance de paradigme objets, chaque avatar est une classe qui contient toutes ces informations, la figure 8 résume l'abstraction d'un corps rigide.

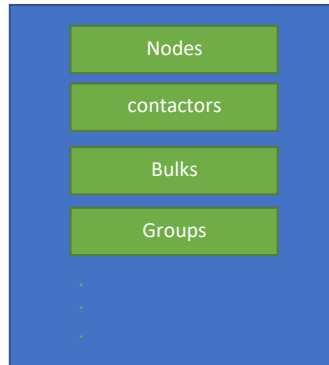


Figure 8: Schématisation des éléments constituant un avatar dans LMGC90.

Nous pouvons voir aussi que la classe avatar qui est la représentation d'un corps ou d'un solide, inclus des listes pour stocker les informations qui le constitue, tel que les éléments qui ressemble à la table de connectivité des éléments finis de cet avatar, mais aussi les contacteurs, les nœuds des éléments, on peut définir aussi des groupes d'éléments dans le cas d'utilisation d'un maillage pour pouvoir appliquer les conditions aux limites sur certaines éléments. Y a d'autre fonctions pour définir le matériau, le modèle (mécanique, poreux, thermique, multiphysique), rotation, translation de l'avatar.

Les étapes principales pour faire une simulation sur LMGC90 montré sur la figure 9 contient une première partie décrite en couleur violet qui sera réservée pour la génération d'un échantillon, après exécution du modèle, on aura tous les fichiers de format « .DAT » qui contiendront tous les avatars, les lois d'interactions, les conditions aux limites ou initiales qui seront tous contenus dans le répertoire « DATBOX ». Les CL/CI peuvent être également définies dans des fichiers texte. Les fichiers du modèle établis nous serviront d'entrer après lecture et chargement pour faire le calcul (deuxième partie en violet).



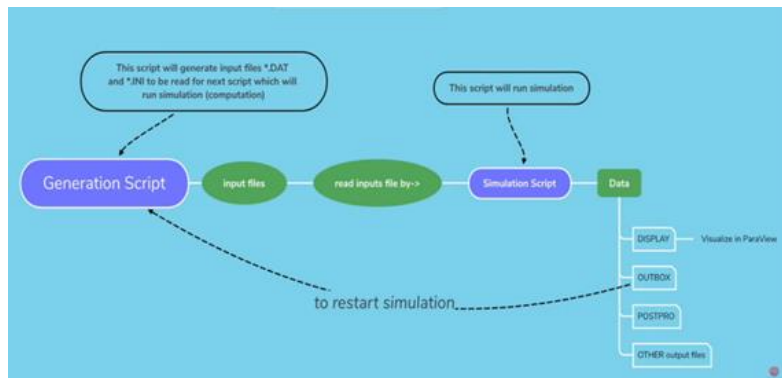


Figure 9: Etapes principales d'une simulation sur LMGC90.

Dans notre cas d'étude nous nous situons dans le cas granulaire, nous pourrions organiser les avatars en deux grandes catégories :

- Corps à géométrie basique :

Que nous pourrions dire d'eux qu'elles appartiennent à la bibliothèque LMGC90 pour la construction des objets. Le tableau 3 résume l'ensemble des commandes qui permettent la construction des avatars dans le cas 2d que nous utilisant pour établir notre modèle.

Commande	Représentation graphique
rigideDisk()	
rigidJonc()	
rigidPolygon()	

Tableau 2 : Commandes basiques pour construire des corps « avatars » dans LMGC90.

- Corps à géométrie à partir d'un outil de maillage :

Cette deuxième catégorie de géométrie fait appel à un module externe (Gmsh) pour construire un objet à partir d'un maillage que ce soit pour les solides rigides ou les solides déformables.

Deuxièmement, de la possibilité de rajouter des contacteurs dans nos géométrie qui nous servirons à définir les interactions entre nos objets, la bibliothèque de LMGC90 comprennent plusieurs types de contacteurs pour

différents usages. Un avatar pourra contenir plus d'un contacteur appelé dans LMGC90 un cluster, le tableau 4 résume les contacteurs qu'on utilise pour élaborer notre modèle.





Type du contacteur	Forme	Description
« PT2Dx »		Il est représenté comme un point avec lequel nous pourrions faire interagir deux avatars.
« DISKx »		Il enveloppe le rigide de type disque pour pouvoir modéliser le contact entre deux avatars avec une loi de contact (ex. coulomb)
« JONCx »		Il enveloppe un rigide de type Jonction que nous utilisons pour modéliser le contact entre nos fibres et les deux parois
« POLYG »		Il enveloppe un rigide de type polygone.

Tableau 3 : Contacteur 2d sur LMGC90.

Troisièmement, du choix parmi toutes les lois d'interactions de la bibliothèque de LMGC90, ce dernier est fait d'une façon à pouvoir rajouter davantage de loi soit à partir du code lui-même en utilisant des fonctionnalités, soit à partir d'une bibliothèque externe, exemple (Matlib). Il existe des lois qui peuvent seulement être appliquées sur certains types de contacteurs.

Quatrièmement de la manière dont on fait la détection des interactions entre nos objets qu'on appelle dans le langage de LMGC90 table de visibilité (see\_table) dans laquelle on définit comment la loi s'applique et comment elle se détecte entre un corps candidat et un corps antagoniste via le paramètre couleur.

17

c) Modèle du toron sur LMGC90

i. Elabration du modèle

À partir des commandes présentées dans la partie précédente, nous pourrions commencer la construction de notre modèle numérique. De l'autre côté la construction du modèle numérique nous à poser certaines étapes dont les hypothèses considérées qui nous facilite non seulement la construction du modèle mais aussi de garder les informations physiques nécessaires du passage du modèle réel 3d au modèle 2d, de bien choisir la similitude dimensionnelle ( dimension des fibres, des deux plaques, vitesse du glissement de la plaque supérieure, nombre de fibres, caractéristiques physiques des matériaux des fibres et des deux plaques)

○ Caractéristiques physiques des matériaux

La masse volumique de la fibre utilisée est  $1.8\text{g/cm}^3$ . Son module d'élasticité longitudinal est 230 GPa, et le module transversal est 81 GPa. Pour les deux plaques (paroi) en verres leur masse volumique est  $2.5\text{g/cm}^3$ . Le tableau 5 résume toutes les caractéristiques physiques des deux matériaux utilisés.

Fibre de carbone			Paroi (verre)	
Masse volumique	Module d'élasticité longitudinal	Module d'élasticité transversale	Masse volumique	Module Young
$1,80\text{ g/cm}^3$	230 GPa	81 MPa	$2,50\text{ g/cm}^3$	70 GPa

Tableau 4: Caractéristiques des deux matériaux (fibres, verre).

○ Hypothèses

Dans notre cas d'étude on considère que :

- Les fibres sont rigides et non déformables ;
- Problème en 2d, ce qui nous pousse à ne plus prendre en considération les contacts au sens des filaments des fibres ;
- Les fibres peuvent être représentées comme des disques, le contact entre les fibres est donc ponctuel.

○ Dimensions

	Masse volumique	Dimensions	Sollicitations appliquées	Accélération gravitaire	Conditions limites
Fibre de carbone	$2,5\text{E-}3$	Rayon : $3,25\text{E-}3$ à $3,45\text{E-}3$	Gravité	0,00981	Blocage de rotation en Z
Paroi supérieur	$1\text{E-}4$	$2,76\text{E-}3 * 2,6\text{E-}5$ ( $0,5-0,208 * l_x$ , $l_y + 2 * R_{\text{max}}$ )	Gravité ; compression ; vitesse transversale ;	0,00981	translation suivant X
Paroi inférieur	$1\text{E-}4$	$2,76\text{E-}3 * 2,6\text{E-}5$ ( $0,5 * l_x$ , $-2 * R_{\text{max}}$ )	Gravité	0,00981	Encastré
Boîte imaginaire	-	$1,38 * 0,138$	-	-	-
Particules fantôme	$1\text{E-}4$	$3,46\text{E-}3$ à $6\text{E-}3$	Gravité	0,00981	Encastré

Master point	1E-4	Rayon : 1E-3 (10*lx, ly/2)	Gravité	0,00981	Encastré
--------------	------	-------------------------------	---------	---------	----------

Tableau 5: dimension et paramètres du modèle de référence.

## ii. Préprocesseur

Au-delà de toutes les fonctionnalités de définition d'un modèle, qui englobe la partie géométrique, contacteurs, lois d'interactions, et table de visibilité, le Préprocesseur dispose de fonctionnalités pour pouvoir l'écriture des fichiers « .DAT » vu en haut dans lesquels sont stockés toutes les informations des quatre points du haut avant l'étape de calcul. Nous pourrions aussi spécifier l'affichage des informations au moment du calcul.

Il existe une fonction qui permet une prévisualisations du modèle établi.

### ○ Dépôt des fibres

Il est important de bien spécifier le dépôt de nos fibres, l'algorithme utilisé pour construire d'un échantillon granulaire soit il est basé sur une méthode géométrique minimisant un potentiel, soit par la méthode de dépôt sur un réseau utilisé sur LMGC90(voir figure 10).

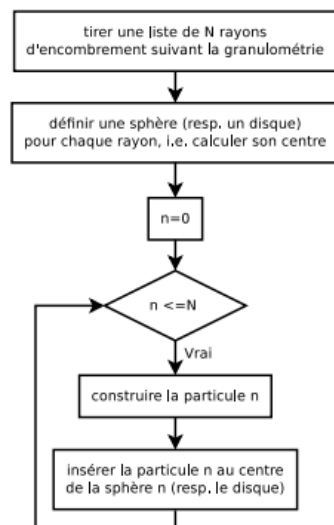


Figure 10 : algorithme de dépôt du LMGC90[2].

À ce dépôt il faudra rajouter l'espacement entre les fibres pour bien être plus proche du phénomène quand appellera les fibres Ghost, elles auront les mêmes caractéristiques des fibres normales avec un diamètre plus grand sur une plage de  $[4.43 \cdot 10^{-3}, 6 \cdot 10^{-3}] \mu\text{m}$ . Ce dépôt nous renvoie les positions initiales de chaque fibre ainsi que nombre total des fibres déposées.

○ Ajout de la compression et vitesse de glissement de la paroi supérieure

Pour prendre en compte l'étalement des fibres avec un poids de 500g de l'expérience qui peut représenter une force de compression de 6.55 N sur une surface du toron de 7mm\*17.5mm (figure 11). Par un simple calcul on trouvera la valeur de la pression :

$$\text{Pression} = F_c / \text{Surface de toron} = 6.55 \text{ N} / 122.5 \text{ mm}^2 = 0.053 \text{ MPa}$$

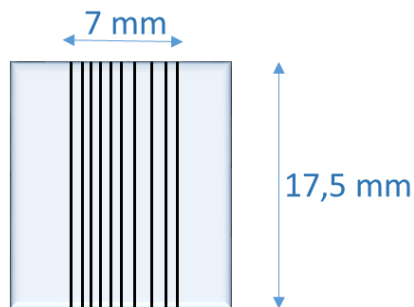


Figure 11 : Vue de dessus du toron en contact avec la paroi[2].

Cette pression qu'on pourra traduire en une force linéaire sur le toron dû à notre problème 2d, puisque la largeur du toron est 200\*Rmax, donc cette force linéaire égale à :

$$F_{lin} = \text{Pression} * \text{largeur du toron} = 0.053 * 0.69 = 0.03657 \text{ N/mm}$$

Le code LMGC90 nous permet d'appliquer des conditions aux limites ou initiales soient par une expression où on pourra définir les valeurs de nos chargements, soit par un fichier externe dont lequel on pourra nous-même définir l'expression de notre chargement. Afin d'éviter la compression quasiment instantanée appliquée aux fibres, nous avons choisi de la définir sur une durée de 1ms suivant la courbe suivante :

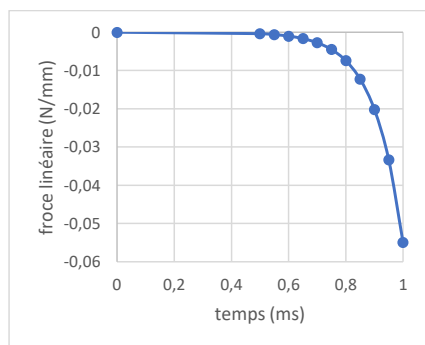


Figure 12 : évolution de la force de compression.

De la même façon avec la force de compression, la vitesse de glissement de la plaque supérieure qui est égale à 0.1mm/s dans notre modèle numérique soit 0.001mm/ms sur un glissement de la plaque supérieure de 0.2 mm sur la phase d'aller et 0.2 mm sur celle du retour, l'application de cette vitesse est définie à partir un fichier externe.

#### ○ Ajout des master points

Dans l'expérience après avoir attaché une extrémité du toron et le faire tendre avec un poids de 500g cité sur le point précédent, l'autre extrémité tendue de notre toron sera aussi à son tour attachée, dans cette situation il faudra qu'on arrive à rajouter cette précontrainte d'une valeur de 0.053 MPa dans notre modèle numérique.

LMGC90 nous donne la possibilité de modéliser cette précontrainte en rajoutant deux « master points » symétriques, et une loi d'interaction exercée entre les masters points et les fibres s'appelle ELASTIC\_WIRE. Elle décrit le comportement d'un fil élastique entre deux contacteurs. Cette interaction exerce une force de traction lorsque les particules s'éloignent du master point. Lorsque le fil est sous tension, la force T est proportionnel à la déformation, sinon le fil ne présente aucune compression et la force de réaction s'annule (figure 13).

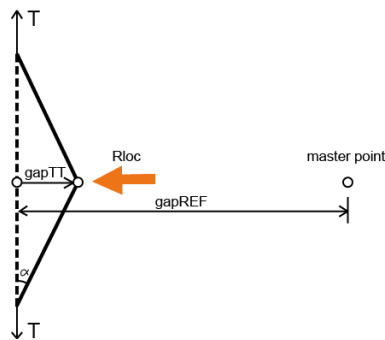


Figure 13: Schématisation d'un master point qui représente la précontrainte [1].

Dans la Loi de contact choisie (ELASTIC\_WIRE), la force de réaction est proportionnelle à la déformation :

$$R_{locN} = -F/st * strain$$

$$Strain = (gapTT - gapREF) / gapREF - prst$$

Où gapREF est l'écart entre contacteurs dans la configuration de reference; gapTT est la distance entre les contacteurs à l'instant actuel. Dans notre cas, gapTT est la position actuelle de particule et le master point. Le terme gapTT-gapREF donne la valeur de déplacement de la particule.

Les deux paramètres F/st et prst sont à définir. Ils représentent respectivement la raideur du ressort et la précontrainte.

### iii. Postprocesseur

Dans le cas global LMGC90 inclut un fichier dans lequel on exécute toutes les routines de calcul, de la lecture des fichiers du modèle établi dans la partie « Préprocesseur ». C'est aussi dans cette partie que les calculs qui nous seront utiles pour pouvoir faire une comparaison entre les résultats expérimentaux avec ceux qui seront obtenus par le modèle numérique sont au premier degré : le coefficient de frottement toron/plaque, le déplacement du toron ainsi que sa déformation, en deuxième degré largeur et épaisseur du toron, rotation de la plaque supérieure, fraction volumique à l'aide des fonctions du Postprocesseur.

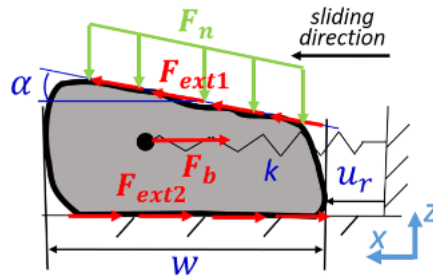


Figure 14 : Représentation de la forme du toron[2].

#### o Calcul des paramètres globaux

Globalement, on analyse l'évolution de la forme de toron, le frottement entre toron et paroi etc. À l'échelle locale, on prend en compte le frottement interne entre les fibres, et le nombre de fibres qui est en contact avec la paroi. Voici les formules pour trouver les résultats dans le programme :

$$\text{Largeur du toron} = \max(\text{abscisse } X) - \min(\text{abscisse } X)$$

$$\text{Hauteur du toron} = (\text{écart ordonné min} + \text{écart ordonné max})/2$$

$$\text{Coefficient de frottement toron/paroi} = R_t/R_n$$

Avec  $R_t$  la force transversale et  $R_n$  force normale

Pour calculer le déplacement du centre de toron, il faut tout d'abord trouver la position du centre de chaque incrément. Ainsi :

$$(\text{Déplacement du centre})_i = (\text{abscisse du centre})_{i+1} - (\text{abscisse du centre})_i$$

$$\text{Déplacement relatif } (\%) = \frac{(\text{Déplacement du centre})_i}{\text{Déplacement de la plaque}}$$

$$(\text{Déformation})_i(\%) = \ln \left( \frac{(\text{largeur du toron})_i}{(\text{largeur du toron après compression})} \right)$$

Quant à la rotation de paroi supérieure, l'idée générale est de trouver la pente de paroi supérieure pour chaque instant.

**Rotation paroi supérieure** = arctan (la pente de paroi)

$$\text{Fraction volumique} = \frac{\text{surface des particules avec un diamètre moyen}}{\text{surface de la boîte imaginaire}}$$

#### iv. Calcul parallèle

Pour remédier aux problèmes liés au temps de calculs, nous pourrions utiliser le calcul parallèle qui représente une solution pour réduire le temps de restitution d'une simulation, LMGC90 nous offre deux approches de parallélisation :

- *multi-threading* : utilisant l'interface libre OpenMIP, cette première approche nous permet d'exploiter de répartir les calculs sur tous les cœurs du processeur d'une machine, elle repose sur le concept de la mémoire distribuée.
- *multi-processing* : la deuxième approche s'appuie sur la bibliothèque de passage de messages MPI sur plusieurs processeurs, donc on aura des instances d'un même processus (tâche) qui s'exécute sur plusieurs processeurs, et ils peuvent dialoguer entre eux par le biais d'envois de messages. Cette dernière approche nécessite des modifications du code de LMGC90 de chaque modèle établi. Parfois le travail devient difficile.

Pour notre cas on utilisait la première technique car non seulement y pas de configurations requises, il ne me suffit que de recompiler LMGC90 avec le paramètre multithreading. Trois commandes sont nécessaires pour spécifier, le nombre d'unités de calcul à allouer, nombre de tâches pour chaque unité de calcul et la politique de traitement, suivant l'ordre inverse, ces commandes sont :

- ❖ export OMP\_SCHEDULE = STATIC
- ❖ export OMP\_NUM\_THREADS = n ;
- ❖ export OPENBLAS\_NUM\_THREADS =1

#### v. Visualisation des résultats après simulation

Les fichiers de résultats après chaque simulation en 2d dans le cas de la configuration des corps rigides sont stockés sous un format xml qui peut être lu par Paraview avec l'extension «.pvd». Les informations représentées comme des « DataSet », chaque « DataSet » représente une donnée, comme exemple, le pas du temps qui dépend de la fréquence d'écriture des fichiers de résultats, mais aussi le nom de chaque « vtp » qui contient toutes les informations visuelles par pas de temps de la simulation, qui est lui est codé sous un format propre et non lisible

Dans le langage LMGC90 on parle de tables, qui ressemble beaucoup plus aux tables de bases de données, au total après chaque fin de simulation on aura dans le dossier « DISPLAY » cinq tables (fichiers) :



- « tacts.pvd » : qui contient les informations géométriques des contacteurs.
  - Disp : le vecteur déplacement ;
  - Reac : le vecteur de force de contact d'un corps rigide ;
  - Rot Z : l'angle de rotation suivant l'axe Z ;
  - Spin Z : vitesse angulaire ;
  - Torque Z : moment du contact suivant l'axe Z ;
  - Velocity : le vecteur vitesse.
- « rigids.pvd » : contient les données liées aux corps rigides, pour les informations géométriques il ne se trouve que la position du centre d'inertie d chaque corps.
  - Fext : le vecteur de la force externe ;
  - Mext Z : le moment de la force externe.
- « ptc.pvd » : contient les informations au point de contact.
  - Gap : la distance de l'interaction ;
  - N : le vecteur normal de contact ;
  - T : le vecteur tangentiel de contact.
- « inters.pvd » : cette table contient les interactions.
  - Rn : la réaction normale locale ;
  - Rt : la réaction tangentielle locale.

Il se peut qu'on retrouve la même information dans deux tables différentes. L'ouverture de ces tables sur Paraview nous donne un aspect visuel sur ce qui se passe pendant la simulation. Parfois on est ramené à utiliser des outils propres à Paraview pour en extraire davantage d'information en plus de ce que les tables nous décrivent.

## V. Résultats des nouvelles simulations numériques

### a) Le modèle existant :

Après avoir récupéré tous les modèles et simulations faites par C. Chai, dont le dernier modèle développé que nous avons nommé modèle de référence représenté sur la figure 15 est celui cité au deuxième chapitre. Ce modèle était paramétré suivant le tableau 6 :

Numéro essai	Mu fibre/fibre	Mu fibre/paroi	Raideur ressort
1 (référence)	0,1	0,35	1e-4

Tableau 6 : valeurs des paramètres du modèle de référence [1].

Ce modèle contient les fibres d'un rayon maximal de  $3.45e-3\text{mm}$  et d'un rayon minimal de  $3.25e-3\text{mm}$ , les fibres Ghost qui nous sert de vide entre les fibres, la boîte imaginaire de dépôt a les dimensions de  $300 \times R_{\text{max}}$  de longueur et  $60 \times R_{\text{max}}$  de largeur. Les deux masters points sont espacés de  $10 \times 300 \times R_{\text{max}}$  ( $10 \times l_x$ ). Les rayons de fibres Ghost quant à eux ils sont dans sur une plage de valeurs entre  $3.46e-3$  et  $6e-3\text{ mm}$ .

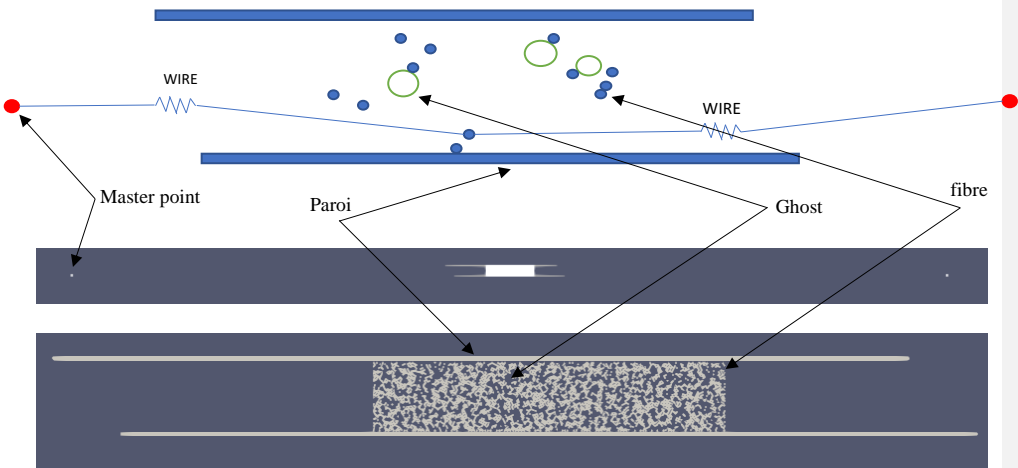


Figure 15 : Modèle numérique de référence faisant apparaître les éléments (fibres, Ghost, paroi, master point) schématiquement et sur paraview.

Le résultat final nous a conduit à ce choix de valeurs des paramètres locaux du modèle, qui sont :

- Coefficient de frottement fibre/fibre :  $\mu_{ff} = 0,1$  ;
- Coefficient de frottement fibre/plaque :  $\mu_{fg} = 0,35$  ;
- Force de référence du master point :  $st = 1e-4\text{ N}$ .

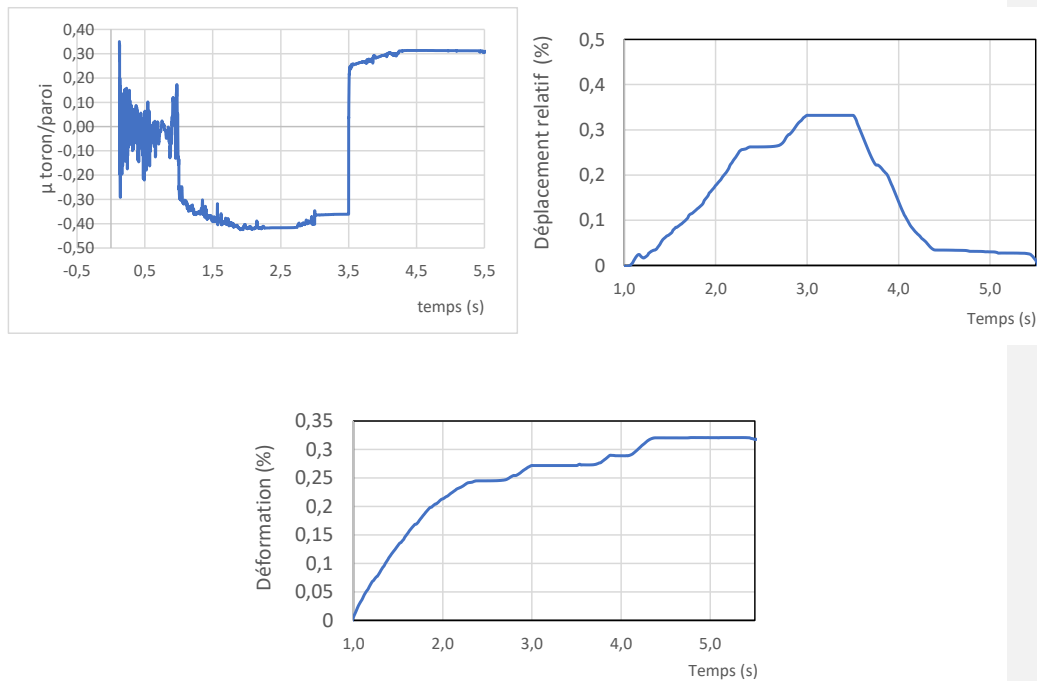
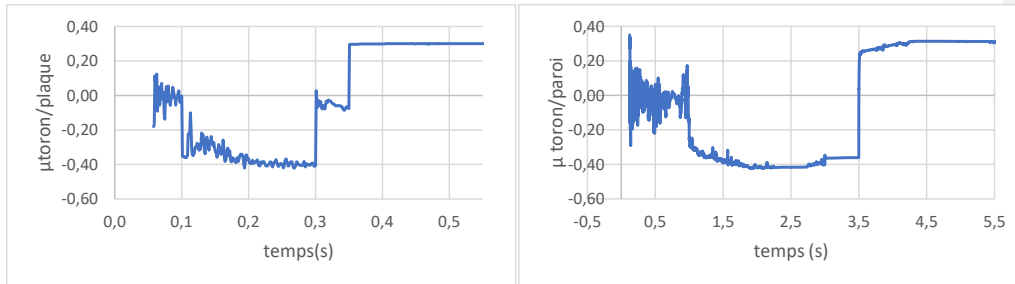


Figure 16 : Résultat de la simulation de référence.

Dans un premier temps, j'ai commencé par comprendre le code et ce qu'il fait, ensuite j'ai réalisé mes premières simulations sur ma machine sur trois temps de calcul différents :

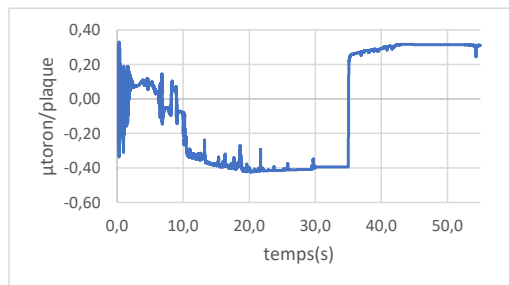
- Pour un temps de 0,55 secondes, qui correspond dans le code à 551 pas de temps ;
- Pour un temps de 5,5 secondes, qui correspondait à 5501 pas de temps ;
- Pour un temps de 55 secondes, qui correspondait à 55001 pas de temps.

La figure 16 montre la différence de la précision des calculs entre les trois durées des simulations dans le cas du  $\mu$ toron/plaque.



a) Calcul sur 0.55 s

b) Calcul sur 5.5 s



c) Calcul sur 55s

Figure 17: Comparaison entre trois différents temps de calcul de  $\mu$ toron/paroi.

Ce premier paramétrage nous donne en matière de valeurs des résultats et allure de courbes un moyen de nous situer par rapport à la puissance de la machine utilisée la durée des simulations. Pour le premier cas, les résultats étaient loin de la réalité (figure10.a), car pendant un calcul, non seulement il faudra choisir un pas de temps très petit dans notre cas  $dt = 0.001s$ , mais aussi il faudra tenir en compte de la durée (nombre de steps) pour une meilleure détection de contact entre les fibres. Donc pour les deux dernières durées, il n'y avait pas une grande différence en termes de valeurs de résultats. Cependant le temps de calcul était beaucoup plus significatif, à titre de comparaison, pour une simulation de 5.5 secondes dans le code LMGC90 je devais attendre 11 heures de calcul sur ma machine, alors que pour 55 secondes le calcul s'effectue sur une durée de 3 jours. Cela conduit finalement à choisir la durée de 5.5 secondes et de paramétrer toutes les valeurs (vitesse, etc.) pour cette durée.

#### b) Paramétrage du modèle

Tout d'abord les simulations sont faites sur trois phases sur une durée de 5.5 secondes :

- Phase de la chute de la plaque supérieure jusqu'à l'application de la compression d'une valeur de 0.054 MPa, qui représente la phase où on tend les fibres ;
- Phase d'aller dans laquelle on effectue le mouvement de glissement de la plaque supérieure d'une vitesse  $v=1mm/s$  sur une distance de 0.4 mm ;

- Phase de retour après une pause de 0.5 secondes, jusqu'au retour de la plaque à phase initiale d'aller, pour une même vitesse et glissement de 0.4 mm.

La loi « ELASTIC\_WIRE » que nous avons utilisée pour reproduire la précontrainte due à l'attachement des fibres dans les deux extrémités pendant l'expérience. Cette loi en réalité peut être assimilée à une corde ou un fils élastique entre deux contacteurs de type points «PT2Dx » qui ne travaille qu'à la traction. Elle est définie par deux paramètres : la force de référence de la corde et la précontrainte. Dans notre cas où les distances du centre de gravité des fibres par rapport à notre master point sont différentes, donc nous pourrions calculer la distribution de cette force de référence pour chaque fibre. La figure 18 nous montre cette distribution dans le cas du modèle de référence, puisqu'on est dans un domaine granulaire, même si on établit un nouveau modèle avec les mêmes paramètres cette distribution change.

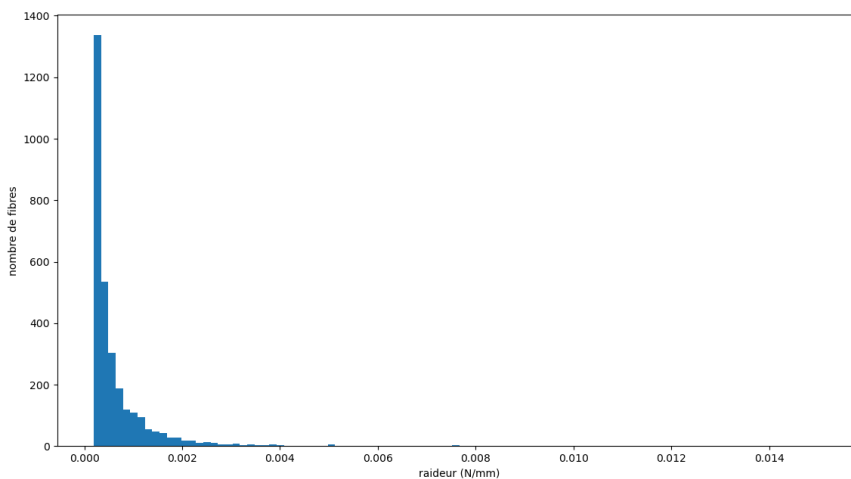


Figure 18 : Distribution des raideurs de la loi « ELATIC\_WIRE » dans le modèle de référence.

Puisque le grand problème avec ce modèle est que non seulement on est très loin des valeurs mesurées dans l'expérience, de plus l'allure des courbes de déformation du modèle de référence pour la phase retour n'est pas similaire. Dans la réalité des choses le toron se déplace beaucoup plus qu'il ne se déforme et faut dire aussi que le toron revient à son état initial de déformation. Le résultat du modèle numérique de référence nous donne tout à fait le contraire de cette réalité.

### c) Non symétrie des distances des deux master point

Cette simulation avait pour but de faire approcher l'un des master point et de garder la distance de l'autre et inversement (voir figure 19), pour voir l'impact de l'augmentation de la distribution de la rigidité de la loi « ELATIC\_WIRE » sur les fibres.

Les résultats de des deux simulations sur les trois paramètres globaux comparées à celle du modèle de référence ont donné courbes suivantes :

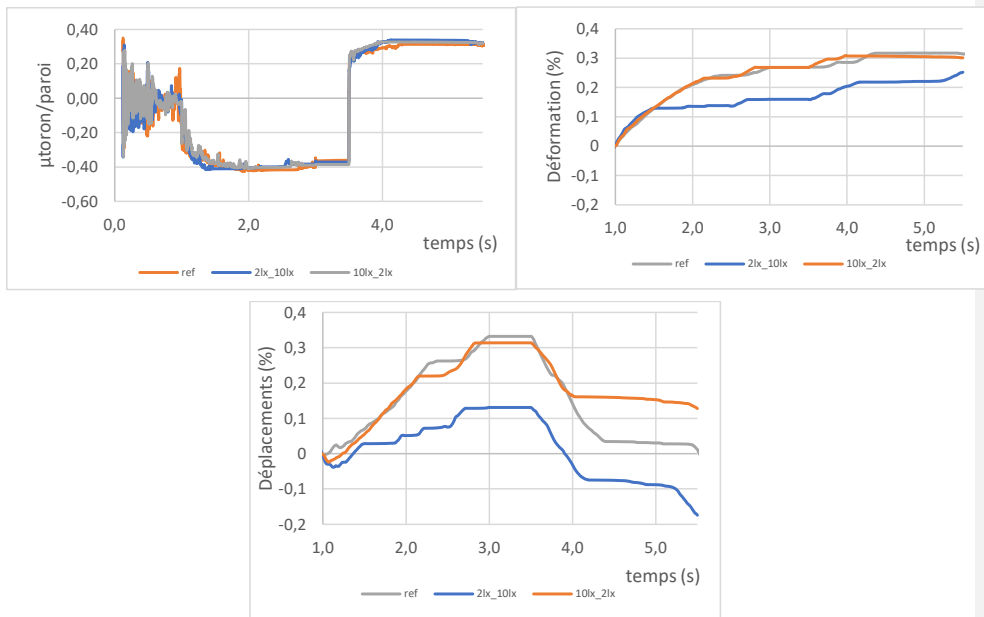


Figure 19 : Courbes  $\mu$ toron/fibre, déplacement et déformation du toron.

Dans le cas de cette configuration, sur la simulation (2lx\_10lx), qui peut être traduite par : le master point de gauche qui est le plus proche mais qui possède la même raideur que celui de droite mais une distance cinq fois plus petite ne change pas beaucoup les résultats des paramètres globaux à l'exception du déplacement du toron qui a une valeur de 0.02 mm contrairement aux deux autres simulations avec une valeur de 0.10-0.11mm. Cela nous pousse à poser la question de l'influence de la valeur de détection des lois d'interactions de notre « see\_table » dans laquelle on l'avait fixé à 11\*lx.

#### d) Augmentation des rayons des fibres de Ghost

Parmi ce qui nous a poussée à poser la question était toujours que le toron après la phase de compression était tellement compacté avec cette configuration qu'il nous faudra davantage de vide très exactement après la première phase, celle de la compression. Pour cela on augmentera les rayons des fibres Ghost, ainsi diminuer leur nombre jusqu'à seulement 850 au lieu de 1000 afin de nous permettre un espacement plus important entre les fibres. Cela a conduit à changer les dimensions de notre boîte imaginaire de dépôt des fibres vers une largeur de 120\*Rmax sur la même longueur, pour en garder le même nombre de fibres entre 2800 et 2900 pour chaque simulation.

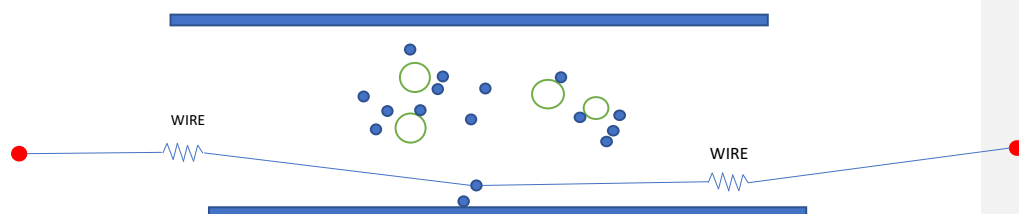


Figure 20: Augmentation des rayons des fibres Ghost.

Cette augmentation des rayons des Ghost n'a pas vraiment apporté un grand changement, le toron reste toujours compact et les courbes en termes des valeurs de  $\mu_{\text{toron/plaque}}$ , le déplacement reste dans l'ordre de 37% par rapport au déplacement de la paroi supérieure, quant à la déformation reste toujours de l'ordre de 32% (figure 21).

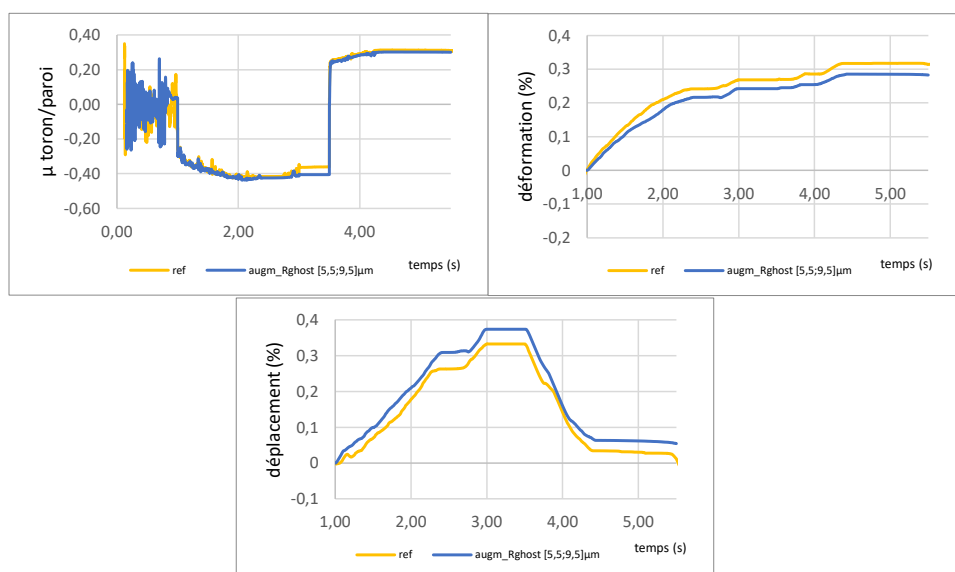


Figure 21 : courbes du coefficient  $\mu_{\text{toron/plaque}}$ , déplacement et déformations.

#### e) Ajout des cavités

La fonction `granulair_random()` avec laquelle on réalise le dépôt des fibres dans la boîte imaginaire nous offre la possibilité de créer des cavités à travers un paramètre dans lequel on introduit un tableau des rayons de nos cavités avec un deuxième tableau pour leurs positions suivant les deux axes  $x$  et  $y$ . Ces cavités en plus de l'augmentation des rayons de fibres Ghost du point précédent nous permettraient davantage d'irrégularité de la surface du toron en contact avec la plaque supérieure voir figure 22.

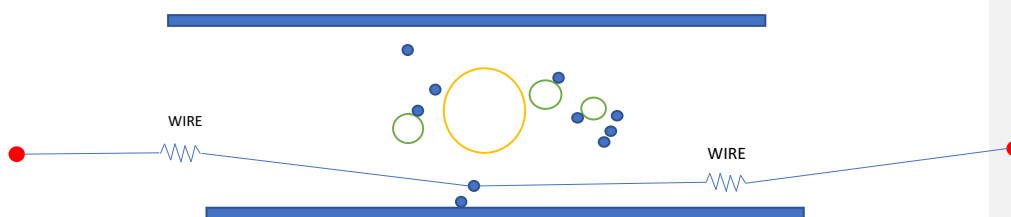


Figure 22: Insertion des cavités entre les fibres

Les résultats de cette nouvelle configuration combinaient avec celle de l'augmentation des rayons des Ghost avec différentes configurations d'insertion de ces cavités montré sur la figure 23:

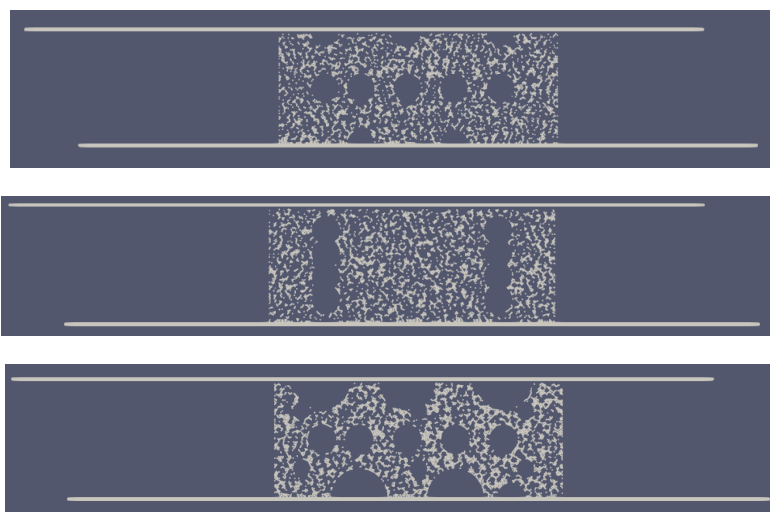


Figure 23: différentes configurations d'insertion des cavités.



Les résultats des paramètres globaux tracés sur la figure 24.

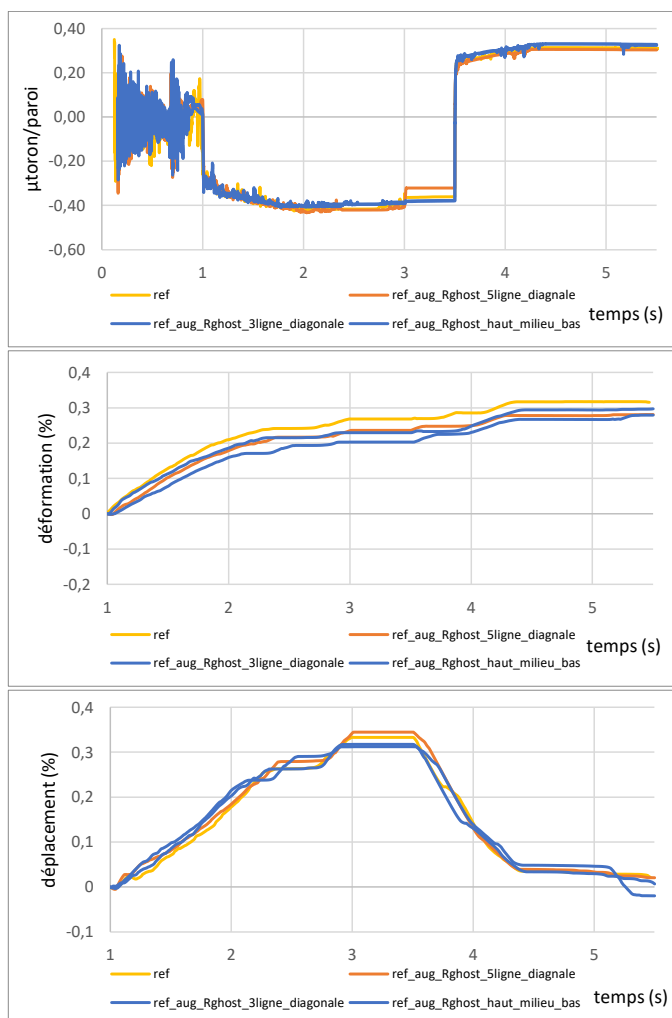


Figure 24 : Courbes  $\mu_{\text{toron/paroi}}$ , déplacement et déformation.

Les modifications qu'on pensait nous rapporter des réponses sur la question du toron compacté après la phase de compression, nous montrent que le toron compacté ne pourra être résolu par l'ajout des vides ou la création d'une séparation locale au niveau des fibres.

Les résultats des trois paramètres globaux restent très proches du modèle de référence. La phase de compression nous ramène toujours à la même situation. La dernière configuration qui sera gardée pour les nouveaux modèles qui seront établis.

#### f) Master point au milieu du toron

Jusqu'à maintenant et dans toutes les simulations précédentes le toron a toujours tendance à s'étaler pendant les trois phases, nous avons pensé à une nouvelle configuration dans l'idée d'inclure un master point avec une loi « ELASTIC\_WIRE » au milieu du toron, pour lui rajouter une caractéristique élastique, cette dernière nous conduira à garder les fibres proches de ce master point (figure 25) pour ne pas laisser le toron s'étaler trop pendant les deux phases d'aller/retour.

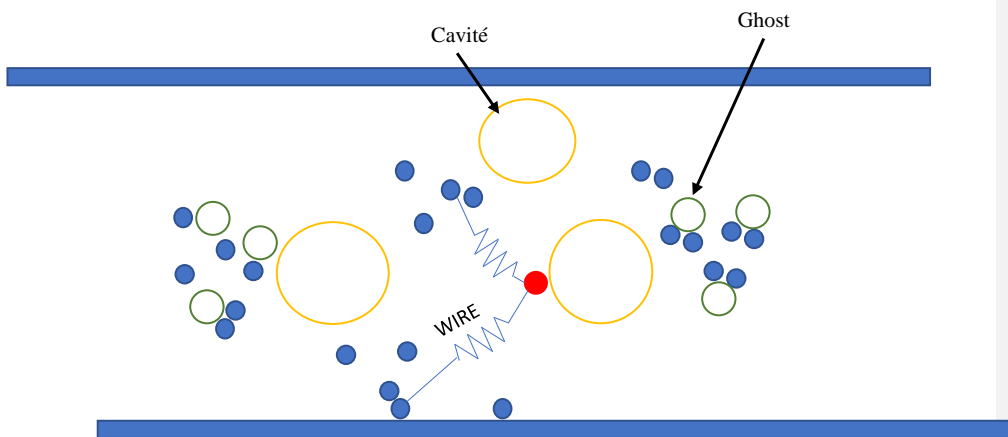


Figure 25 : Modèle avec le master point 'ELASTIC\_WIRE' au milieu du toron.

Après avoir configuré le modèle avec des valeurs de la force de référence de  $1e-3$ ,  $1e-4$  et  $1e-5$  N du master point du centre pour voir l'influence de l'adhésion entre fibres.

Ce modèle nous donne l'impression après la phase de compression que le toron suit le mouvement d'aller/retour de la plaque supérieure, comme si qu'il est collé sur la plaque. Ce collage que nous pourrions aussi appeler glissement du toron pourra continuer sans cesse, cela veut dire qu'il ne diminue pas tant que la plaque ne s'arrête pas. La réalité est que ce glissement diminuera au cours du déplacement de la plaque.

Ce modèle nous a incités à utiliser le cluster de l'université de Poitiers afin de réduire les temps de calcul d'une durée moyenne de temps de cinq à six jours. Le cluster possède huit processeurs, ce qui représente un total de 192 cœurs. Après avoir créé un compte et généré une paire de clé public/privé, la machine distante peut être utilisée soit via une console de commande (Linux) soit par un navigateur web.

La réservation des ressources telle que le nombre de nœuds (cœurs) à utiliser, la quantité de mémoire pour chaque nœud se fait à travers des commandes stockées dans un fichier d'extension « .pbs ». Pour nos calculs après avoir fait des premiers tests, une réservation de 24 nœuds pour et une mémoire de 1 Go pour chaque nœud sont nécessaires.

Pour un comportement plus proche de la réalité du fait que le toron doit arrêter de glisser, nous avons tout d'abord choisi de ne pas placer directement le master point au milieu, mais de choisir une fibre la plus proche du milieu tout en respectant le dépôt aléatoire des fibres de lui associer une loi « ELASTIC\_ROD » en gardant la même distance de notre modèle de référence ( $10 \cdot l_x$ ) (voir figure 23), c'est équivalent de mettre deux « ELASTIC\_WIRE » d'une valeur de la force de référence de 3 N.

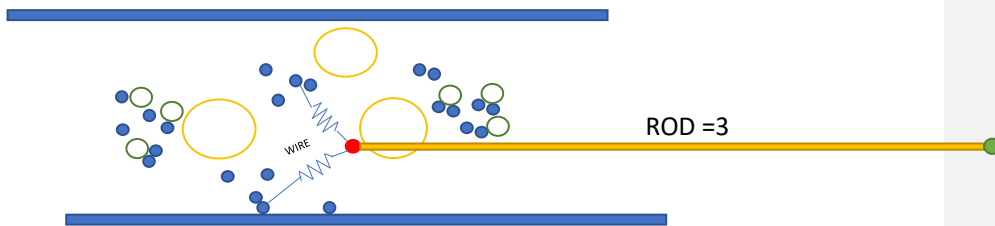
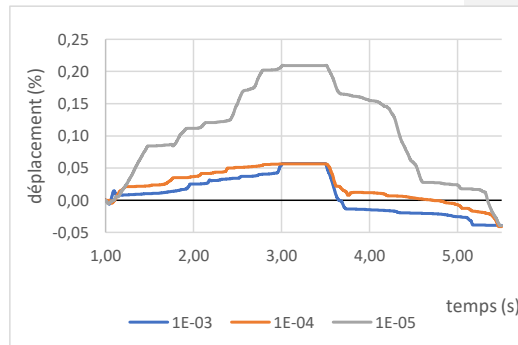
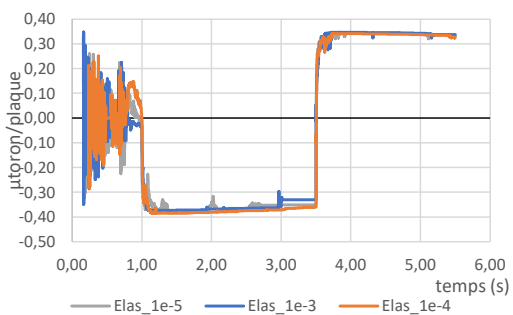


Figure 26 : Ajout du deuxième master ROD.

L'influence cette loi ROD pour les deux valeurs de raideurs nous ont donné les résultats tracés sur la figure 27. Pour faciliter la comparaison cette fois-ci avec le modèle expérimental on calculera le déplacement du toron par rapport au déplacement de la plaque supérieure, la même chose pour la déformation on va la calculer par rapport à la compression (écrasement) du toron.



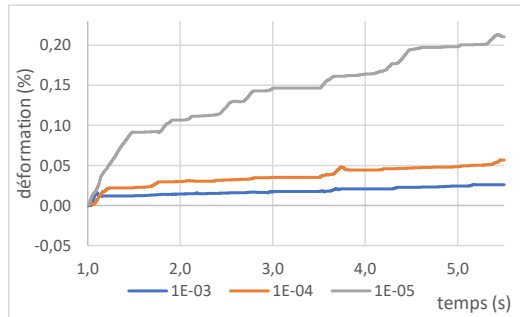


Figure 27 : Courbes  $\mu$ toron/plaque, déplacement et déformation.

Nous pouvons constater dans cette configuration pour la valeur de la force de référence égale à  $1e-3$  et  $1e-4$  N du master point placé sur une fibre près du centre du toron, on a un pourcentage sur le déplacement du toron de 6% par rapport au déplacement de la paroi supérieure alors que cette valeur dans le résultat expérimental est à 12%.

Pour la même valeur de la force de référence d'une valeur  $1e-3$  N la déformation maximale du toron est égale à 3% qui est très proche de la valeur de l'expérience qui vaut 1%.

## Bilan de l'institut Pprime

Le but de mon stage est de continuer l'exploration numérique du comportement en frottement d'un toron de fibres de carbone en utilisant la MED sous LMGC90 déjà établi l'année passée. Après avoir fait des essais dans le but de mesurer la force de frottement entre un toron et une plaque en verre sur un tribomètre et d'en déduire le coefficient de frottement toron/plaque, déplacement et déformation. Cette étude expérimentale ne permet pas de visualiser ni de mesurer les mécanismes de contact à l'échelle mésoscopique. Après avoir configuré les paramètres locaux de notre modèle numérique pour des valeurs de ( $\mu_{ff}=0.1$ ,  $\mu_{fgl}=0.35$ , et  $st=1e-4$  N) du toron, il était aussi question de prendre en compte l'augmentation de la force de référence de la loi élastique du master point, la rotation des fibres, l'adhésion entre fibres et utilisation d'un modèle viscoélastique. Toutes ces configurations n'avaient pas beaucoup d'influence sur les résultats du coefficient de frottement toron/plaque qui était le seul paramètre qui correspondait à celui des expériences, par contre le déplacement et la déformation du toron changent pour chaque nouveau modèle établi dépendant d'une implémentation et utilisation des lois d'interactions différentes pour soit la modélisation de la précontrainte des fibres soit pour rajouter un phénomène physique pouvant compenser l'abstraction et le passage du modèle 3D vers un autre en 2D. Pour répondre à la problématique du toron très compacté après la phase de compression était approché par deux modèles, le premier est l'augmentation des rayons des fibres Ghost qui nous sert pour espacer les fibres d'un intervalle  $[5.5, 9.5]\mu m$ , le deuxième est l'insertion des cavités réarrangées de différentes façons pour avoir une surface de contact irrégulière avec la plaque supérieure. Le dernier modèle établi répondait au problème du toron très compacté après la phase de compression, en insérant un master point dans l'une des fibres la plus proche du milieu de la boîte imaginaire qui représente le toron initial. Cette fibre est liée avec les autres avec une loi élastique paramétrée par une force de référence avec les valeurs :  $1e-3$ ,  $1e-4$  et  $1e-5$  N. Après l'ajout d'un autre master point avec une loi élastique travaillant en traction/compression avec deux valeurs distinctes de 0.3 et 3 N, jouer le rôle de limiteur de glissement des fibres pendant les deux phases d'aller/retour. Les deux valeurs respectivement de la loi « ELASTIC\_WIRE » et « ELASTIC\_ROD » de  $1e-3$  et 3 N nous ont donné les meilleurs résultats pour le déplacement et la déformation du toron tandis que le coefficient de frottement toron/paroi était déjà bien paramétré dans le modèle de référence.

Le format de fichier HDF5 nous offre la possibilité de reprendre nos calculs à partir d'un temps donné sans être obligé de refaire tout un calcul depuis le début. Puisque nos calculs se font sur trois étapes, il n'est pas nécessaire de répéter une étape déjà faite, même si on a seulement réussi à l'utiliser pour quelques tests, cette approche d'utilisation des fichiers HDF5 plutôt que les fichiers standard de LMGC90 « .DAT » rapportera davantage de gain de temps et présente aussi une solution dans le cas de besoins de faire passer une sortie de paramètres d'un calcul comme entrée d'un autre.

L'utilisation du cluster de l'université nous a permis l'accélérer de nos calculs, notamment pour le dernier modèle passant de six jours de calcul sur une station de travail vers une durée de soixante heures sur le cluster Vision.

Les calculs réalisés pendant ma période de stage étaient organisés dans un fichier Excel « bible.xlsx », la feuille principale contient une liste des simulations faites sur chaque mois, chaque simulation nous renvoie

dans le cas d'une clique sur une autre feuille dans laquelle tous les détails de cette simulation sont stockés, ainsi que la possibilité d'accéder au répertoire de cette dernière pour la visualisation des résultats.

## Bilan personnel

Grâce à ce stage j'ai découvert la mécanique des corps rigides avec la méthode des éléments discrets, moi qui suis familiarisé avec la mécanique des solides déformables et la méthode des éléments finis, à l'utilisation de LMGC90 via python.

J'ai commencé par comprendre la théorie et le formalisme appliquer au milieu granulaire, le contact, le frottement de Coulomb, et des nouvelles méthodes numériques pour résoudre les équations aux dérivées partielles ( $\theta$ -méthode).

Paraview m'avait servi d'outil de visualisation mais aussi de moyen pour tracer l'évolution des forces de réactions, de déplacements, etc, entre fibre/fibre et fibre/plaque.

Il m'a permis aussi de m'insérer parmi une équipe de jeunes chercheurs qui sont passionnés de leur métier, de savoir comment pousser les choses et d'en chercher l'information. J'avais découvert aussi le lien de l'université et de ses instituts qui sont toujours à la pointe de la recherche scientifique avec les entreprises spécialisées dans l'industrie, consulting, qui, constamment font appel à l'expertise et du savoir-faire des chercheurs de l'université pour résoudre les problèmes d'ingénierie.

J'ai appris à utiliser le langage python qui est très connu dans le milieu de recherche, j'ai découvert aussi la MED en utilisant le code LMGC90, qui m'avait ouvert le chemin du milieu discret et granulaire, moi qui avais toujours l'habitude de résoudre et considérer la continuité du matériau avec la méthode des éléments finis. J'ai appris aussi à utiliser Paraview, un outil de visualisation très complet, cela m'a permis de visualiser et de regarder de près le comportement du toron.

Ce stage m'avait appris que le métier de chercheur est tellement strict que je ne devais pas en aucun cas sauter les étapes, commencer par poser une question, considérer des hypothèses simplificatrices, jusqu'aux résultats.

## Conclusion générale

Ce stage était un premier pas dans le vaste monde de la recherche, un monde qui commence par des simples questions bien posées, qui entraîne des hypothèses et méthodes très bien définies, qui conduiront dans la plupart du temps à deux cheminements différents. Un premier, l'expérimentation, qui est difficile à mettre en œuvre, des processus d'extraction d'informations qui nécessitent des coûts élevés, un deuxième, facile à mettre en œuvre avec les moyens informatiques, logiciels et matériels. Le problème de ce dernier est le temps de calcul considérable dans certaines applications, notamment dans le milieu granulaire en utilisant la méthode par les éléments discrets.

L'exploration du modèle numérique de C. Chai m'avait conduit à faire des nouvelles simulations et de rajouter des nouvelles lois de contacts sur le code LMGC90, dans lesquelles je pourrai conclure cela :

- La libération des fibres en rotation totale ou partielle pour certaines fibres n'a pas été significatif pour le déplacement et déformation du toron par rapport au modèle de référence.
- L'augmentation des rayons des fibres Ghost qui nous ont servi pour espacer les fibres entre elles ainsi que l'insertion des cavités entre les fibres pour empêcher d'avoir un toron qui est très compact après la phase de compression n'ont pas apporté une grande contribution dans les résultats du déplacement et déformation du toron.
- L'ajout de l'adhésion entre les fibres a permis d'empêcher l'étalement du toron qui veut aussi restreindre sa déformation pendant le glissement de la plaque supérieure.
- Le coefficient de frottement  $\mu_{\text{toron/paroi}}$  n'a pas beaucoup évolué aux cours de nos nouvelles simulations.

## Perspectives :

Pour répondre à la question du quasi-retour du toron à sa position initiale pour avoir une courbe décroissante dans la phase de retour de la déformation du toron, il faut tenir en compte ou donner au toron la possibilité d'une force de réaction qui va pousser la plaque supérieure en haut. Cela nous ramènera, soit à ajouter une loi d'interaction de type 'ELASTIC\_RODE ' entre le master point au centre du toron et un autre en bas d'une distance de  $10 \cdot l_x$ , soit à ajouter une loi pour les fibres qui les laissent tourner avec un certain angle.

Pour des raisons de calculs rapides et pour un accès à distance, il est recommandé de passer rapidement à la machine Vision de l'université.

## Bibliographie

- [1] : C. Chai, « Modélisation d'un toron de fibres de carbone par éléments discrets », université de Poitiers, 2021.
- [2] : B. Cornillessen, « Frictional behavior of carbon fiber tows: a contact mechanics model of tow–tow friction », SAGE Publications, 2014.
- [3] : B. Cornillessen, « Frictional behaviour of high performance fibrous tows: A contact mechanics model of tow–metal friction », Elsevier, 2013.
- [4] : M. Tournalias, «Friction of carbon tows and fine single fibres», 2017.
- [5] : D.M. Mulvihill, «Friction of carbon fibre tows», Elsevier, 2016.
- [6] : O. Smerdova, « Transversal friction of epoxy-lurificated and dry carbon tows :from initial stages to stabilised state », Elsevier, 2021.
- [7] : M. Renouf, « Optimisation Numérique et Calcul Parallèle pour l'étude de milieu divisés bi- et tridimensionnels », université de Montpellier, 2004,.
- [8] : J-F. Jerier, « Modélisation de la compression haute densité des poudres métalliques ductiles par la méthode des éléments discrets », Université Joseph-Fourier – Grenoble, 2009.
- [9] : M. Masmoudi Daoud, « Etude Expérimentale et Modélisation par la méthode des éléments discrets de l'amortissement dans les matériaux granulaires », Université Paris Saclay, 2016.



## Résumé

Ce travail de stage avait l'objet de chercher à comprendre le frottement engendré lors du procédé RTM dans le but d'optimiser et maîtriser ce procédé. Un modèle numérique d'un toron de fibres de carbone était développé par la méthode des éléments discrets sur LMGC90 pour pouvoir identifier les phénomènes de frottement locaux entre les fibres qui compose le toron, mais aussi entre fibre et outil. Ce modèle numérique apportera plus d'informations du comportement à l'échelle mésoscopique dû au paramétrage des coefficients de frottement entre fibres, entre fibres et parois, mais aussi l'utilisation des lois proposées dans le code LMGC90 qui nous permettrait de donner un comportement élastique entre les fibres, de prendre en charge le phénomène d'adhésion, etc.

Mots clés : Contact, frottement, méthode des éléments discrets, toron, fibres de carbone, RTM, corps rigide, LMGC90.

## Abstract

This internship work had the purpose of seeking to understand the friction generated during the RTM process to optimize and control this process. A numerical model of a strand of carbon fibers was developed by the method of discrete elements on LMGC90 to be able to identify the phenomena of contact and strongly local between these fibers that make up the strand, but also between fiber/tool. This numerical model will provide more information from the behavior at the mesoscopic scale to the parameterization of the coefficients of friction between fibers, between fibers and plate, but also the use of the laws proposed in the LMGC90 code that will allow us to give an elastic behavior between the fibers, to support adhesion.

Keywords: contact, friction, discrete elements method, tow, carbon fiber, RTM, rigid body, LMGC90.