



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Rapport de Stage d'Ingénieur
Chez ***Manufacture Française des Pneumatiques Michelin***

01 Mars 2011 -30 Septembre 2011

Etude réalisée par

DIALLO Mouhamadou Nassirou, MACS 3, SUP-GALILEE

Travaux encadrés par :

- **OMNES Pascal**, Tuteur école

Et

- **ROMERO DE LA OSA Marc**, Tuteur Michelin
- **BOUSSETTA Ramzy**, Tuteur Michelin



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Remerciements

Marc, je tiens à te remercier de m'avoir accordé ta confiance, ton aide inestimable durant tout mon stage chez Michelin, et sache que j'espère trouver un jour le moyen de te montrer toute ma gratitude et toute ma reconnaissance pour ces mois de recherche. Comment ne pas aimer la recherche en travaillant à tes côtés ? Mes remerciements iront ensuite vers **Ramzy**, pour son implication continue dans ce travail et son aide précieuse tout au long de ce stage. Vous m'avez tous les deux apporté beaucoup scientifiquement ainsi que sur le plan personnel et je ne serais certainement pas en train d'écrire ces quelques lignes sans vos encouragements et votre soutien.

Je tiens également à remercier :

- Benjamin Soulé de Bas
- Jean Mathieu Clergeat
- Julien Caillard
- Nicolas Lesaffre
- Pierre Gabet
- Pierre Grave
- Rémi Bruant
- Sébastien Garruchet
- Stéphane Laurent

Vous avez tous contribué à créer une ambiance agréable et conviviale.

Je dédie ce mémoire à la personne que j'ai tant aimé qu'elle assiste à ma soutenance : le regretté mon cher père **El hadj Kaoussoulaye DIALLO**.

A mon adorable mère, **Hadja Mariama DIALLO** qui m'a beaucoup donné.

Enfin, j'aimerais remercier toute le reste de ma famille et les proches qui ont du subir de loin les hauts et les bas de ma vie d'étudiant. Je les remercie pour leur soutien pendant tous ces années. J'espère vous le rendre un jour.





Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Sommaire

1	Introduction	6
2	Présentation de l'entreprise	7
2.1	Histoire	7
2.2	Michelin de nos jours	8
2.3	Organisation du groupe	9
2.4	Le site de Ladoux	10
3	Pneumatique et câbles	11
3.1	Pneumatiques	11
3.2	Renforts	11
3.3	Câbles	12
4	Le code de calcul Multifil	13
5	Etude paramétrique des câbles métalliques	15
5.1	Introduction	15
5.2	Le câble A	15
5.2.1	Problème rencontré	15
5.2.2	Résolution du problème	16
a.	Influence de la profondeur de régularisation sur les contraintes	16
b.	Influence de la profondeur de régularisation sur la courbe CFA	19
c.	Influence de la raideur de contact	20
d.	Influence des autres paramètres d'entrés	22
5.3	Le câble B	25
5.3.1	Problème rencontré	25
5.3.2	Résolution du problème	26
a.	Influence de la profondeur de régularisation	26
b.	Influence de la force imposée	27
c.	Convergence numérique et rapport avec la physique	29
d.	Influence des autres paramètres d'entrés	31
5.4	Conclusion	31
6	Etude paramétrique des câbles textiles	32
6.1	Introduction	32
6.2	Etude de la traction d'un renfort avec 150 tours	32
6.3	Etude de la traction d'un renfort avec 190 tours	33
6.4	Les différents types de divergence sous Multifil	38
6.4.1	Introduction	38
6.4.2	Divergence dite « normale »	38
6.4.3	Divergence dite « incrément déplacement infini »	38
6.4.4	Divergence dite « augmentation brusque incrément déplacement »	39
6.4.5	Divergence dite « problème du résidu »	40
6.5	Perspectives	45
7	Conclusion	46
	Bibliographie	47

1 – Introduction

La manufacture française des pneumatiques MICHELIN utilise, comme d'autres industriels, des outils de modélisation qui permettent de simuler, prédire et optimiser le comportement de structures complexes telles que les pneumatiques. Pour améliorer le réalisme de la simulation, des modèles de plus en plus complexes sont développés.

L'enrichissement des modèles mécaniques et numériques est généralement accompagné d'une altération de la robustesse de l'outil de simulation. Par conséquent, il est nécessaire d'accompagner les développements de nouveaux modèles d'une amélioration de la robustesse de la simulation. Mon stage s'inscrit dans ce contexte et concerne l'analyse des performances d'un logiciel de calcul par éléments finis pour la modélisation des renforts dans les pneumatiques. L'objectif étant d'identifier, sur une base de calculs représentatifs, les principales sources d'instabilités numériques et de proposer des pistes d'amélioration de l'outil de simulation.

La première étape consiste à effectuer un état des lieux de la fiabilité de l'outil de simulation sur une base de calculs représentatifs. Ensuite, de réaliser une analyse des résultats obtenus : identification des sources de problèmes numériques pour les cas problématiques ainsi que le lien entre le modèle physique et la difficulté numérique. Dans cette partie, des variantes de calcul et une étude de sensibilité sur les paramètres influents dans le modèle physique et numérique seront réalisées. La dernière partie du stage sera consacrée à l'identification des pistes d'amélioration de l'outil de simulation pour palier le manque de robustesse. La mise en oeuvre des solutions rapidement testables dans le code source de l'outil est également envisagée.

Le rapport est constitué de cinq parties. Une première partie sur la présentation du groupe et une seconde portant sur le pneumatique et les câbles. La troisième partie est consacrée à la présentation du logiciel Multifil. La quatrième et la cinquième partie sont consacrées à l'étude paramétrique des câbles.



2 - Présentation de l'entreprise

2.1 - Histoire

L'histoire **Michelin** débute en 1886 avec **André** et **Edouard Michelin** qui reprennent l'entreprise familiale et créent en 1889 **MICHELIN** et Cie.

En 1891, un cycliste vient à la manufacture pour se procurer le nécessaire afin de réparer les bandages Dunlop qui équipent sa bicyclette. Ce travail exige beaucoup de temps, Edouard Michelin imagine et essaye pour la première fois un pneumatique et dépose son brevet sur les pneus démontables et réparables en un rien de temps. Le coureur **Charles Terront** équipé de ces pneumatiques gagne la course Paris-Brest-Paris de cette même année avec une avance de huit heures sur ses concurrents équipés de Dunlop ; ce qui montre bien la grande fiabilité de Michelin et permet de faire connaître l'entreprise au grand public.



L'Eclair, la première voiture équipée de pneus voit le jour en 1895 lors de la course Paris-Bordeaux-Paris. Pour la première fois une voiture roule sur de l'air !

En 1899 la « Jamais Contente » (voir photo ci-contre), une voiture électrique équipée de pneus Michelin dépasse la barre des 100km/h.

Bibendum, le bonhomme Michelin apparaît à la fin du XIXe siècle. Il est surmonté par la phrase « *Nunc est bibendum* » soit « *C'est maintenant qu'il faut boire* », qui sera par la suite transformée en slogan publicitaire : « *Le pneu Michelin boit l'obstacle* ».

Né de l'imagination des frères Michelin, Bibendum a évolué jusqu'à devenir un symbole attachant et un ambassadeur de la marque MICHELIN.



En 1900 le premier Guide Rouge Michelin est édité à 35 000 exemplaires avec cette annonce prophétique d'André Michelin : « *Ce guide naît avec le siècle, il durera autant que lui.* » Une dizaine d'années plus tard, c'est au tour de la première carte routière de voir le jour.

Durant la première moitié du XXe siècle, l'ancienne « petite entreprise familiale » a continué de monter en puissance et a pris une avance considérable sur ses rivaux de l'époque en créant le pneumatique à carcasse radiale qui améliore nettement la tenue de route et la durée de vie des pneus.

La recherche mise au point permet d'adapter tous les pneus à différentes sortes de véhicules comme les poids lourds, les avions, les formules 1 ou encore la moto.

Pour répondre à la demande croissante, Michelin s'implante à travers le monde entier : plus de 40 usines sont construites en Europe, Amérique du Nord, Asie et Afrique du Nord.

C'est en alliant recherche, innovation et performance que Michelin a su conquérir le monde du pneumatique en l'espace d'un siècle et est aujourd'hui le fabricant de pneus le plus titré, en ayant été par exemple champion du monde pilote et constructeur de Formule 1 en 2005, ou bien en ayant gagné les 24 heures du Mans, le Dakar auto, moto et camion avec la marque BF GOODRICH lui appartenant.



Date : 23/09/2011	Classification : D3	Retention : WA+10	Nb de page:47
Author : DIALLO Mouhamadou		Validator : Marc ROMERO DE LA OSA	
Confidential. Exclusive property of Manufacture Française des Pneumatiques Michelin. Any reproduction or utilization prohibited without the consent of Michelin			

2.2 – Michelin de nos jours

Aujourd'hui, Michelin figure comme un des leaders mondiaux des pneumatiques.

La direction du Groupe est assurée par Michel ROLLIER, Président de la Gérance, et Jean-Dominique SENARD, tous deux Gérants Associés commandités. Ils sont assistés par le Conseil Exécutif du Groupe (CEG), composé de onze directeurs responsables de Lignes Produit, de Directions Groupe, de Directions de Performance et des zones de croissance.

Le graphique suivant montre le marché mondial du pneu en 2009 :

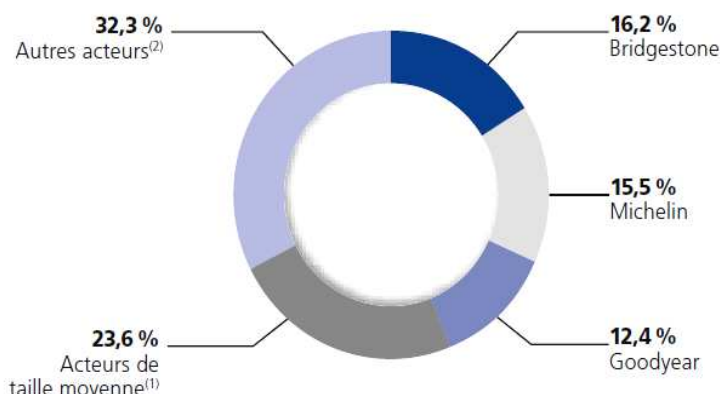


Figure 1 : Marché mondial du pneumatique en 2009

Michelin s'est implanté dans le monde entier en ayant notamment trois centres de recherche situés sur trois continents (Europe, Amérique du Nord et Asie), 72 usines dans une vingtaine de pays et 6 plantations d'hévéas au Brésil et au Nigeria.



Figure 2 : Implantation de Michelin dans le monde



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Au total, Michelin emploie plus de 111 000 personnes et près de 6000 chercheurs.

En 2009, la société a établi un chiffre d'affaires de 17,9 milliards d'euros, ce qui représente une production annuelle de 176 millions de pneumatiques en tout genre et plus de 10 millions de cartes et guides.

2.3 – Organisation du groupe

Michelin s'articule autour de quatre lignes produits réparties sur cinq zones géographiques, chacune destinée à un certain type de production.

Les centres de technologies (CT) fournissent à ces lignes toutes les innovations nécessaires à l'amélioration des pneumatiques, puis il y a différents services qui permettent aux produits d'aboutir et d'arriver sur le marché.

Michelin possède différentes lignes produits:

La LPTC pour le Tourisme et les Camionnettes



La LPPL pour les Poids Lourds



La DLPS pour les Spécialités telles que les avions, les deux roues
Les engins agricoles ou pour le génie civil



Les autres activités comme les ventes d'itinéraires, de cartes etc....



Date : 23/09/2011	Classification : D3	Retention : WA+10	Nb de page:47
Author : DIALLO Mouhamadou		Validator : Marc ROMERO DE LA OSA	
Confidential. Exclusive property of Manufacture Française des Pneumatiques Michelin. Any reproduction or utilization prohibited without the consent of Michelin			

Le groupe dispose de trois Centre de Technologies (CT) répartis sur trois continents, il y a :

- Le Centre de Technologie Europe (CTE) situé à Ladoux,
- Le Centre de Technologie Amérique du Nord (CTA) situé à Greenville aux Etats-Unis,
- Le Centre de Technologie Asie Océanie (CTAO) situé à Ota au Japon.

Michelin consacre 4% de son chiffre d'affaire à la recherche

2.4- Le site de Ladoux

Le site de Ladoux situé à Clermont-Ferrand constitue un des trois centres de technologie Michelin : c'est le CTE (Centre de Technologie Européen).

Il s'étend sur 450 hectares, possède 19 pistes d'essais sur 41 km de long et emploie 3600 personnes.



Figure 3: Vue aérienne des pistes du CTE



Figure4: Site de Ladoux

L'entité Physique des Matériaux et de leurs Transformations (PMT) a pour mission de comprendre les propriétés des matériaux et leurs performances en pneu (performance produit) et en phase d'élaboration (performance industrielle). Son activité s'articule autour de la création et le développement d'outils (mesures expérimentales et modèles théoriques) permettant d'améliorer la compréhension, dans le but d'augmenter la puissance d'innovation des concepteurs matériaux et des concepteurs pneus.

3 – Pneumatique et câble

3.1- pneumatique

Le pneumatique est un assemblage de différents constituants ayant chacun un rôle bien précis, c'est pourquoi, chacun d'entre eux a un comportement mécanique qui lui est propre. La composition et la structure d'un pneumatique sont relativement complexes. La maîtrise de la composition des mélanges utilisés ainsi que des nombreux éléments qui le structure s'avère indispensable pour en améliorer les performances. Les organes du pneumatique sont soumis à des contraintes exigeantes et variées, d'où la nécessité d'une conception poussée, de la plupart d'entre eux.



Figure 5: Coupe d'un pneumatique de tourisme

3.2 – Renforts

Les renforts sont constitués de câbles noyés dans de la gomme de calandrage, celle-ci assure le maintien des câbles dans la nappe ainsi que la liaison entre la nappe et les composants voisins. Bien que la gomme soit chargée avec du noir de carbone, elle possède une contrainte à la rupture de l'ordre de quelques dizaines de MPa pour un allongement à la rupture de plusieurs centaines de pourcents. Ces valeurs permettent de conclure que la gomme seule ne peut pas tenir la pression de gonflage avec un coefficient de sécurité suffisant et des niveaux de déformation faibles. Contrairement à la gomme, l'acier possède une contrainte à la rupture de l'ordre de quelques GPa pour un allongement de quelques pourcents. Ce matériau est donc choisi pour constituer les renforts dont le rôle principal est de reprendre les tensions générées par le gonflage.

Sous l'effet d'une charge, le pneumatique se déforme, elle se traduit par de la flexion au niveau des nappes carcasse et ceinture. Ce phénomène justifie l'utilisation de câbles car en flexion, ils sont moins rigides que les barreaux.

3.3 – Câbles

Un câble est un assemblage de fils enroulés en hélice. Chaque fil de cet assemblage est décrit par un rayon d'enroulement, un pas d'hélice, un angle dans le plan orthogonal à l'axe d'hélice (voir Figure6).

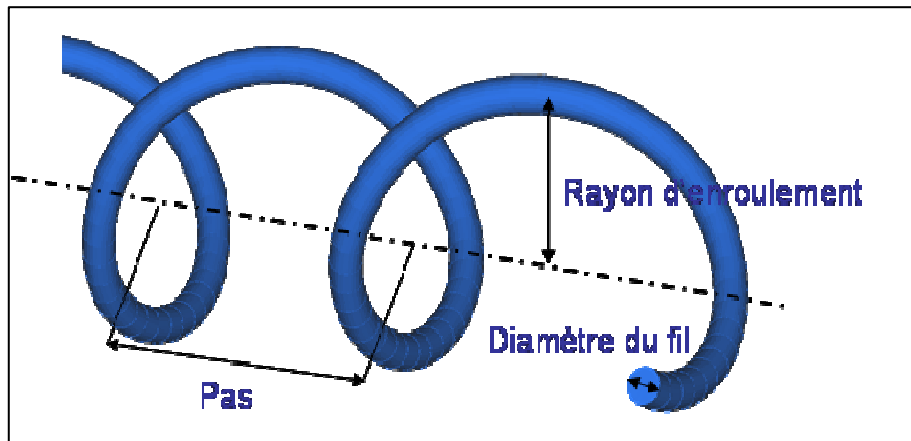


Figure 6: description d'un câble

Le câble présenté sur la figure 7 est composé de 19 fils répartis sur quatre couches, la première couche est seulement composée du fil d'âme.

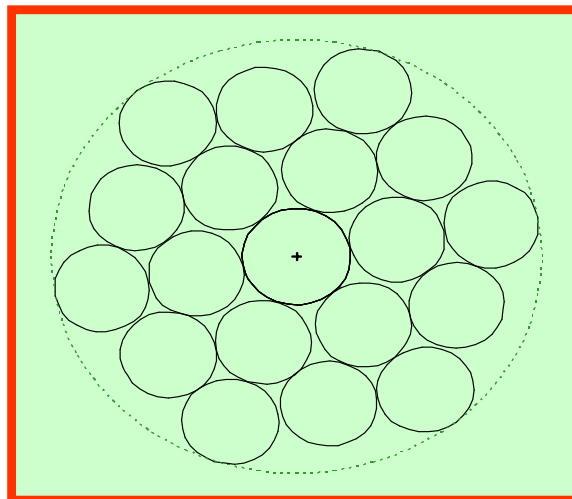


Figure 7 : Exemple de géométrie d'un câble compact

Un câble se comporte de la même manière qu'un barreau, en extension. L'évolution de l'effort en fonction de l'allongement est linéaire.

Cependant, la rigidité du câble est plus faible que celle d'un barreau constitué du même métal que celui utilisé pour la confection du câble. Ceci est dû à la structure de l'assemblage et plus particulièrement à l'enroulement des fils en hélice.

4 – Le code de calcul Multifil

L'étude présentée ici a pour but de modéliser et de simuler le comportement d'un câble métallique (ou textile) utilisé comme renfort dans les pneumatiques. Cette modélisation cherche en particulier à décrire et à quantifier les interactions entre les fils élémentaires constituant le câble, ceci étant considéré comme une première étape vers une compréhension des phénomènes d'usure et de fatigue rencontrés au cours de la vie du câble. Le logiciel Multifil a été développé par la méthode des éléments finis pour modéliser le comportement d'une éprouvette composée d'une portion de câble entourée ou non d'une matrice de gomme et soumise à des chargements variés. Voir figure 8.

Pour représenter le comportement de cette éprouvette dans un environnement proche de celui d'un pneumatique réel, il paraît essentiel de pouvoir appliquer à cette éprouvette des modes de déformations semblables à ceux rencontrés dans un pneu. Un des modes de chargement privilégié est donc l'application du câble sur une ligne moyenne donnée, censée représenter la déformée du pneumatique à un instant donné. Une des entrées du calcul comporte donc la donnée des définitions géométriques des lignes moyennes sur lesquelles on souhaite appliquer le câble aux différents instants. La première sollicitation subie par le câble est une forte tension qui résulte de la pression de gonflage du pneu.

Parmi les développements théoriques, on retiendra deux éléments essentiels. Le premier est un modèle de poutres enrichis qui permet de prendre en compte des effets multidimensionnels et se révèle par là mieux adapté aux types de sollicitations subies par les fils élémentaires des assemblages. Le second point, qui concerne la prise en compte des interactions de contact entre fils, réside dans la mise en place d'une discrétisation a priori du problème de contact-frottement.

L'amplitude des mouvements liés à la déformation imposée au câble indique que l'on devra considérer de grands déplacements et de grandes déformations qui induisent un comportement non linéaire des structures qui les subissent. Les contacts se produisent presque partout (entre fils parallèles, au niveau des croisements). Un élément de contact est composé de deux particules matérielles appartenant aux câbles et supposées venir en contact à un instant t donné en un lieu géométrique donné. Donc un élément de contact c'est deux particules et une direction de contact. Les conditions de contact sont des relations (modèle de contact régularisé voir paragraphe 5.2.2.a) qui permettent de statuer sur le fait qu'au niveau d'un élément de contact chacune des deux particules matérielles désignées n'a pas pénétré dans le volume de l'autre. La manière dont les éléments de contact ont été construits entraîne une non linéarité géométrique sur laquelle il est nécessaire d'itérer. La solution n'est pas calculable directement de manière explicite et donc l'utilisation des algorithmes itératifs. La méthode de Newton (quasi Newton dans certains cas) sera utilisée pour la résolution du problème non linéaire. La méthode de Newton ne marche pas dans tous les cas parce que dans certains modèles de contact, la direction donnée par la tangente ne rapproche pas forcément la solution ou bien le calcul de la tangente peut se révéler trop coûteux. Dans ce cas la méthode consiste à prendre une forme approchée de la dérivée, ou si le calcul de cette dérivée est trop coûteux, on gardera la même tangente pour plusieurs itérations successibles. On parlera de méthode de quasi-Newton.

L'algorithme développé comporte trois niveaux d'itérations imbriqués :

- Une boucle externe est consacrée à la création des éléments de contact, c'est à dire à la détermination des particules matérielles prédites entrer en contact. Ces éléments de contact sont recalculés à chaque itération de cette boucle.
- Une boucle intermédiaire est dédiée à la détermination des directions normales de contact. C'est suivant ces directions que sont mesurées les distances entre particules des éléments de contact et appliquées les réactions normales de contact. Ces directions sont réactualisées à chaque itération de cette boucle.
- la boucle la plus interne consiste en un algorithme de Newton (ou quasi-Newton) chargé de résoudre toutes les autres non linéarités du problème (contact, frottement, grands déplacements, grandes déformations).

Il n'y a pas de critère de convergence pour les deux premières boucles. L'algorithme effectue donc toujours les nombres d'itérations indiqués.

On considère que l'algorithme de résolution a convergé si la norme de l'incrément de déplacement au cours de la dernière itération et la norme du résidu relatif sont inférieures aux critères de convergence fixés au préalable.

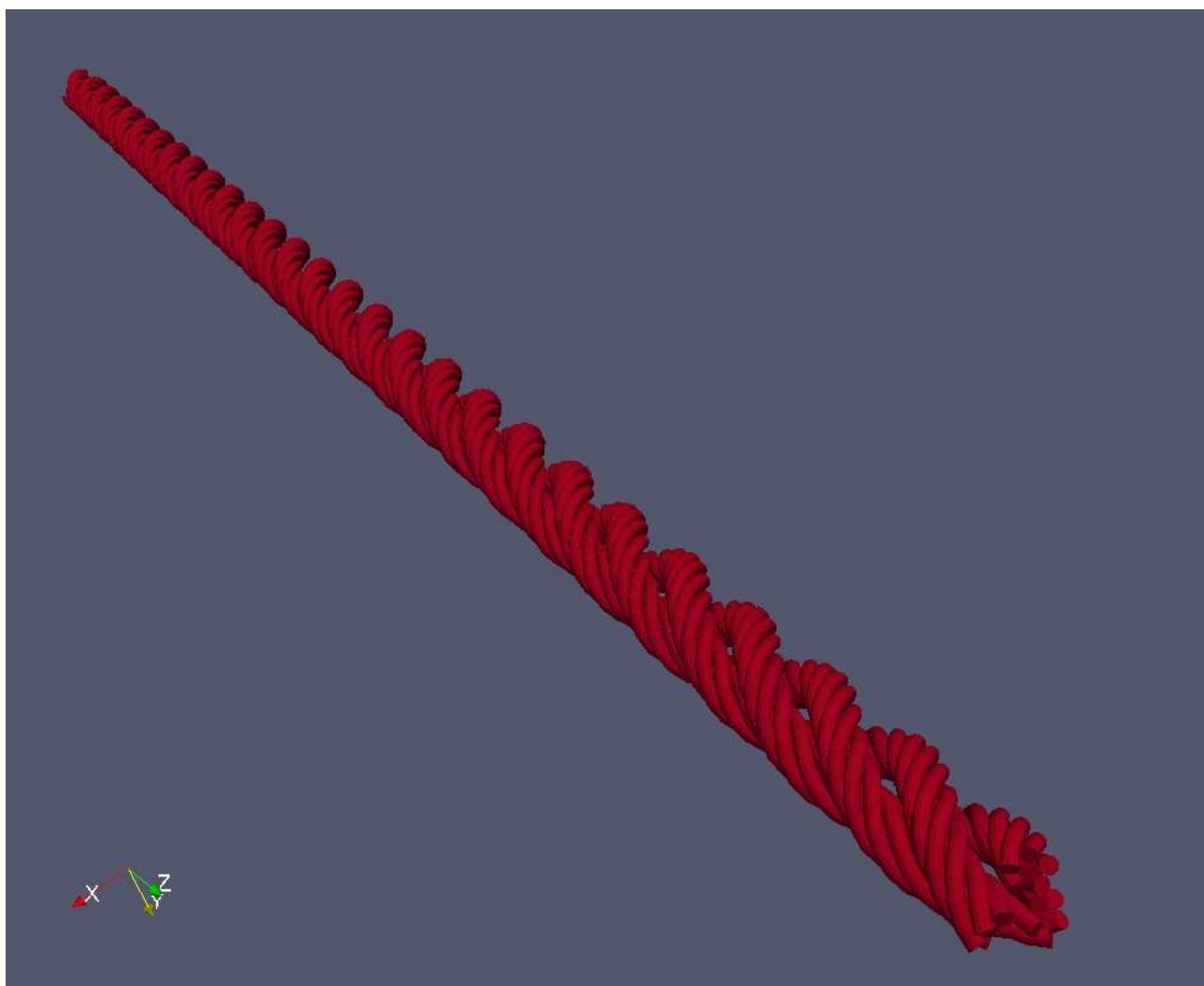


Figure 8 : image d'une simulation avec Multifil

5- Etude paramétrique des câbles métalliques

5.1- Introduction

Durant le stage de **Pierre KEMPF** à Ladoux, des problèmes de non convergence avec le logiciel Multifil ont été constatés mais aussi une augmentation des contraintes au niveau des fils d'âmes ce qui n'est pas normal du point de vu physique. Les travaux portaient sur l'étude du comportement des câbles et plus précisément sur l'extension des câbles métalliques A et B. Ces câbles métalliques sont utilisés comme renforts dans les nappes sommet des pneumatiques poids lourds. L'objet de cette partie est d'étudier ces différents problèmes afin de proposer des solutions pour la résolution avec Multifil.

5.2- Le câble A

5.2.1- Problème rencontré

Dans cette partie l'étude s'est portée sur la mise en extension du câble A.

Après convergence des calculs avec Multifil, des incohérences sont apparues aussi au niveau de l'évolution des contraintes longitudinales des fils ; ceux-ci étant du à la modification du nombre d'éléments de contact des fils de la couche externe. Avec 135 éléments de contacts, le résultat reste stable (figure 9) mais en passant à 140 éléments les contraintes longitudinales des fils d'âme augmentaient progressivement en s'éloignant de l'extrémité encastree comme le montre la figure 10 ci-dessous. La valeur des contraintes est normalement uniforme le long du câble.

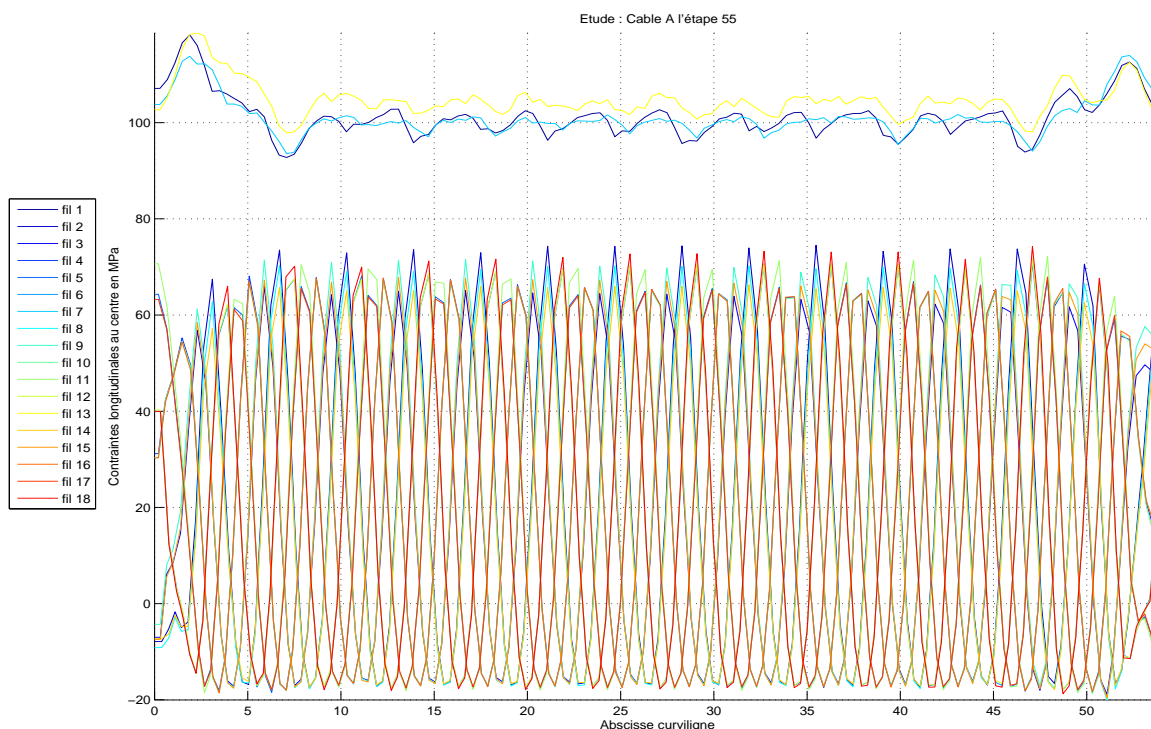


Figure 9 : Contraintes longitudinales avec 135 éléments

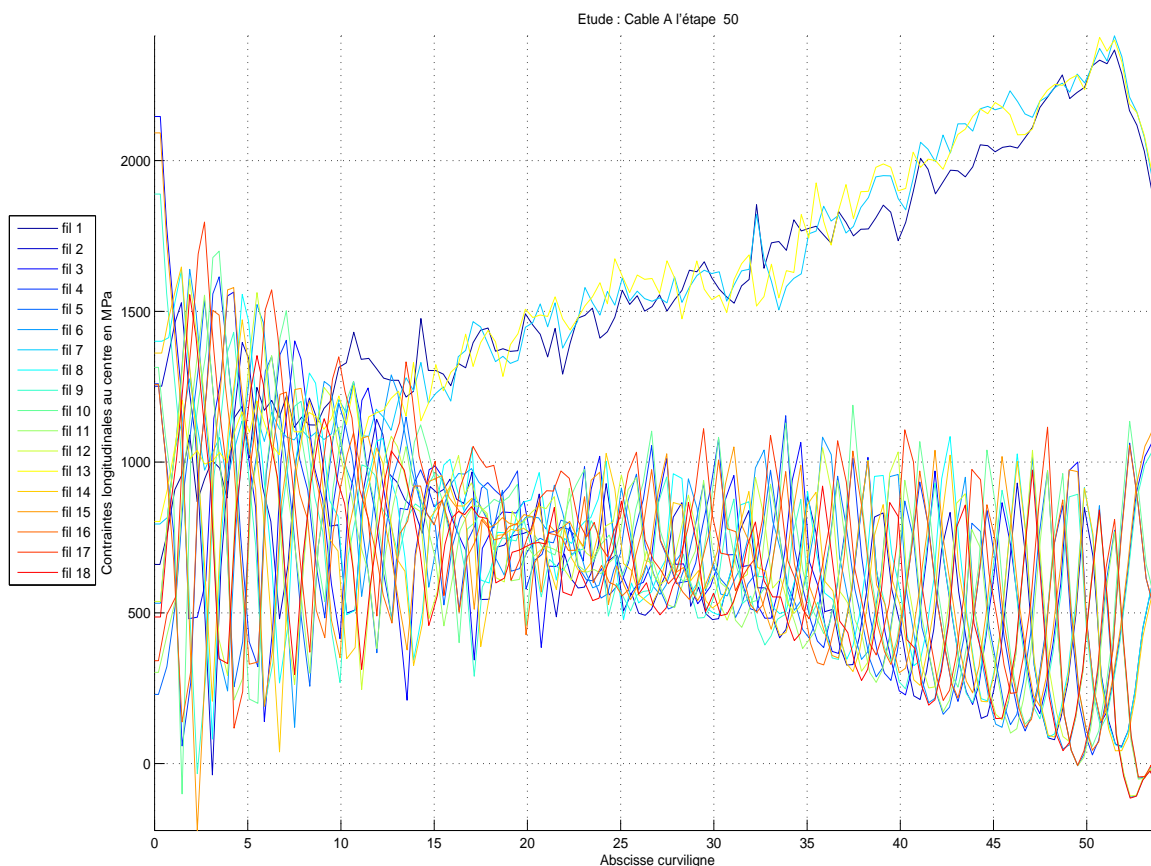


Figure 10 : Contraintes longitudinales avec 140 éléments le long du câble A

5.2.2- Résolution du problème

a. Influence de la profondeur de régularisation sur les contraintes

Pour faire respecter les conditions de contact, il faut imposer aux particules de respecter le contact souhaité c'est-à-dire impossibilité d'interpénétration des structures.

La manière la plus simple d'imposer les conditions limites de contact consiste à appliquer aux endroits où le contact est détecté une réaction normale proportionnelle à la pénétration mesurée. Ceci revient en quelque sorte à affecter à la surface des corps en contact une raideur normale unilatérale qui s'oppose à l'interpénétration mais ce modèle de contact linéaire n'offre pas toujours une bonne qualité de convergence en ce qui concerne l'algorithme de contact. Au cours des itérations l'algorithme teste différentes configurations de contact. Pour remédier à cette difficulté, plutôt que d'appliquer une réaction normale proportionnelle à la pénétration en cas de contact, on propose que cette réaction normale soit quadratique par rapport à la pénétration.

Toutefois, un modèle de contact entièrement quadratique ne se comporte pas forcément très bien d'un point de vue algorithmique, la direction prise en suivant la dérivée première ne conduisant pas directement à la solution. Pour cette raison, nous proposons de ne conserver la partie quadratique du modèle que pour les pénétrations inférieures à un certain seuil appelé profondeur de régularisation du contact (Voir figure 11). La profondeur de régularisation du contact permettra d'assouplir les contacts entre les fils voisins. Une augmentation de la valeur de la profondeur de régularisation facilite les contacts entre fils voisins.

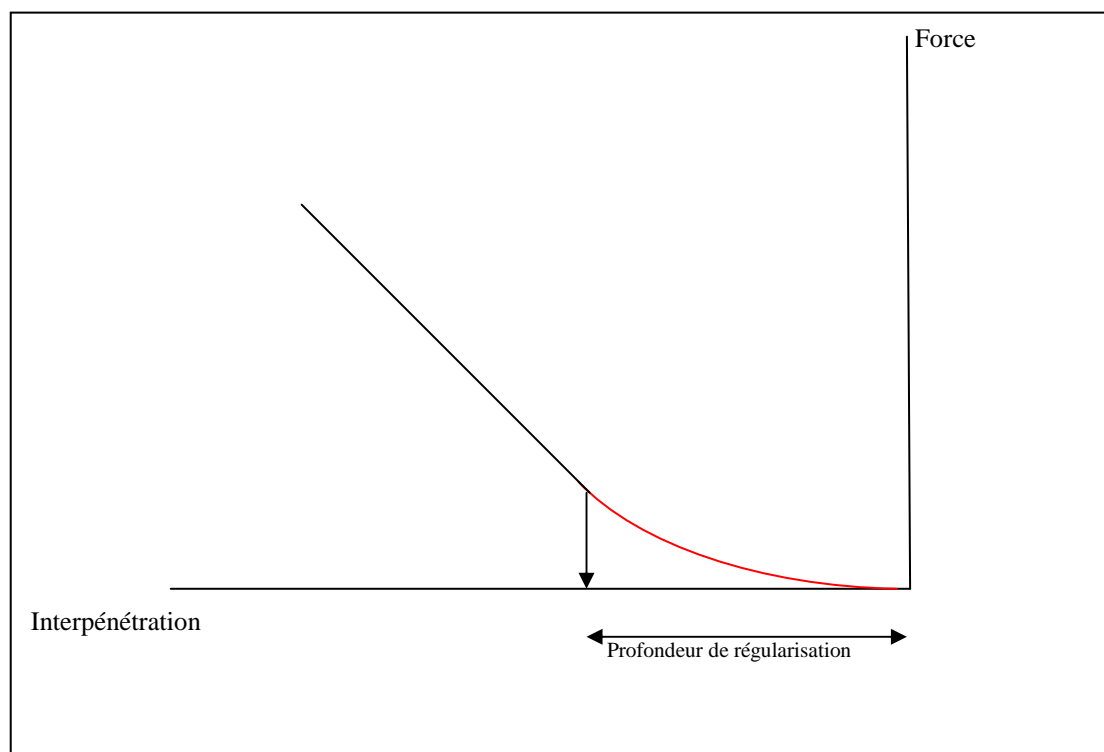


Figure 11 : profondeur de régularisation

Pour corriger le problème des contraintes, une étude portant sur la variation de la profondeur de régularisation a montré qu'à partir d'une certaine valeur, les contraintes se stabilisent et restent homogènes le long du câble. La valeur prise était de 0.0001.

En prenant une profondeur de régularisation environ 2% du rayon du fil, les résultats montrent finalement que ce n'est pas le passage de 135 à 140 éléments qui entraînait une augmentation anormale de la contrainte. Le problème était plutôt la valeur prise comme profondeur. En effet à partir d'un certain nombre d'étapes de calculs, le câble devient très tendu ce qui entraîne une anomalie au niveau des contraintes longitudinales. Les figures ci-dessous (figure 12 et 13) montrent les contraintes à l'étape 50 lors de l'extension.

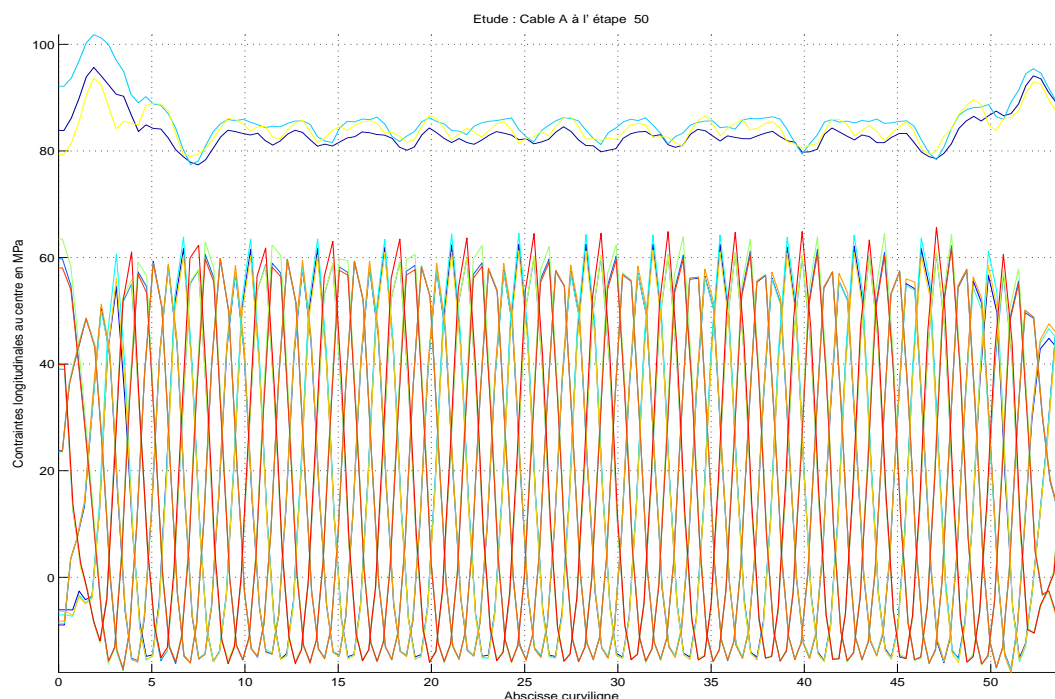


Figure 12 : Contraintes longitudinales avec 135 éléments (extension)

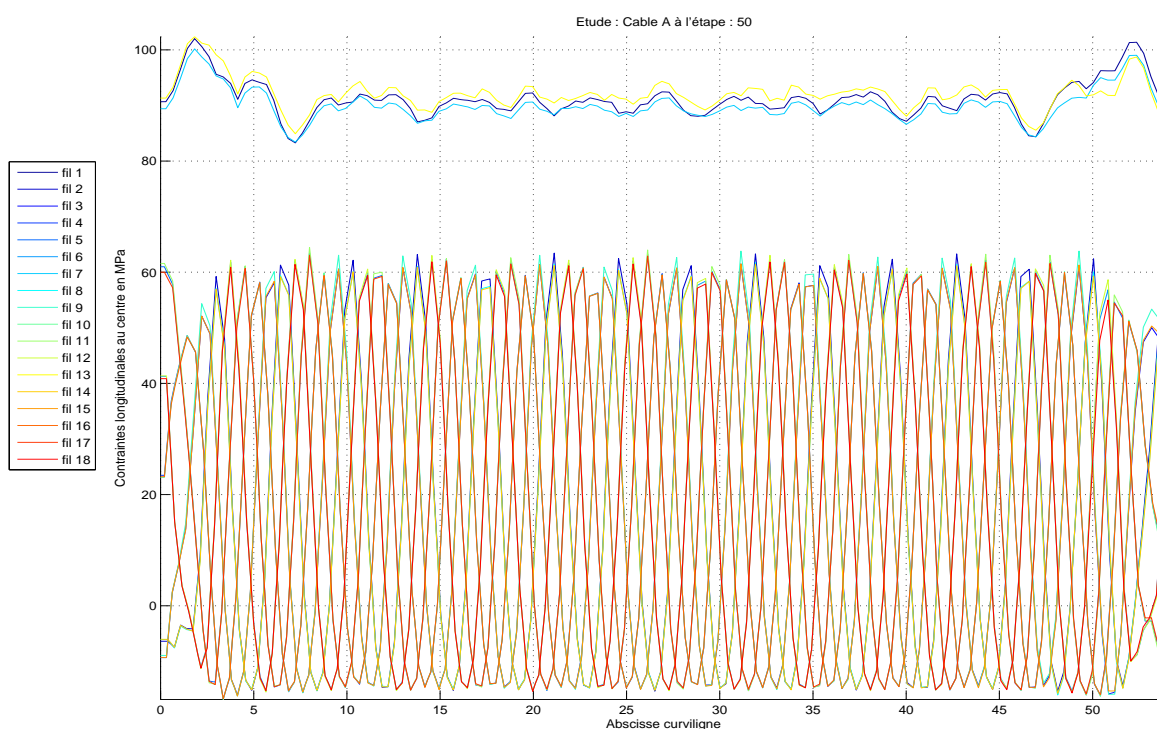


Figure 13 : Contraintes longitudinales avec 140 éléments (extension)

Conclusion :

Le nombre d'éléments de discrétisation n'améliore donc pas la convergence mais il a une influence au niveau des contraintes locales et cette influence reste relativement faible le long du câble.

La profondeur de régularisation joue un rôle essentiel sur la stabilité des contraintes longitudinales.

Ceci permet donc de conclure que la valeur de la profondeur de régularisation a une influence sur les contraintes. Le rayon d'enroulement des fils d'âme cesse de diminuer pour atteindre une valeur seuil, les contraintes longitudinales au centre des fils augmentent sous l'effet de l'extension et les pressions de contact entre fils deviennent plus importantes.

b. Influence de la profondeur de régularisation sur la courbe CFA (force allongement)

Afin de vérifier cette influence, des calculs comparatifs ont été menés sur le câble A. Des courbes forces-allongements (CFA) ont été tracées, pour différentes valeurs de la profondeur de régularisation : 0.003, 0.002, 0.0015, 0.001 et 0.0005. Les autres paramètres ont été conservés. Figure 14

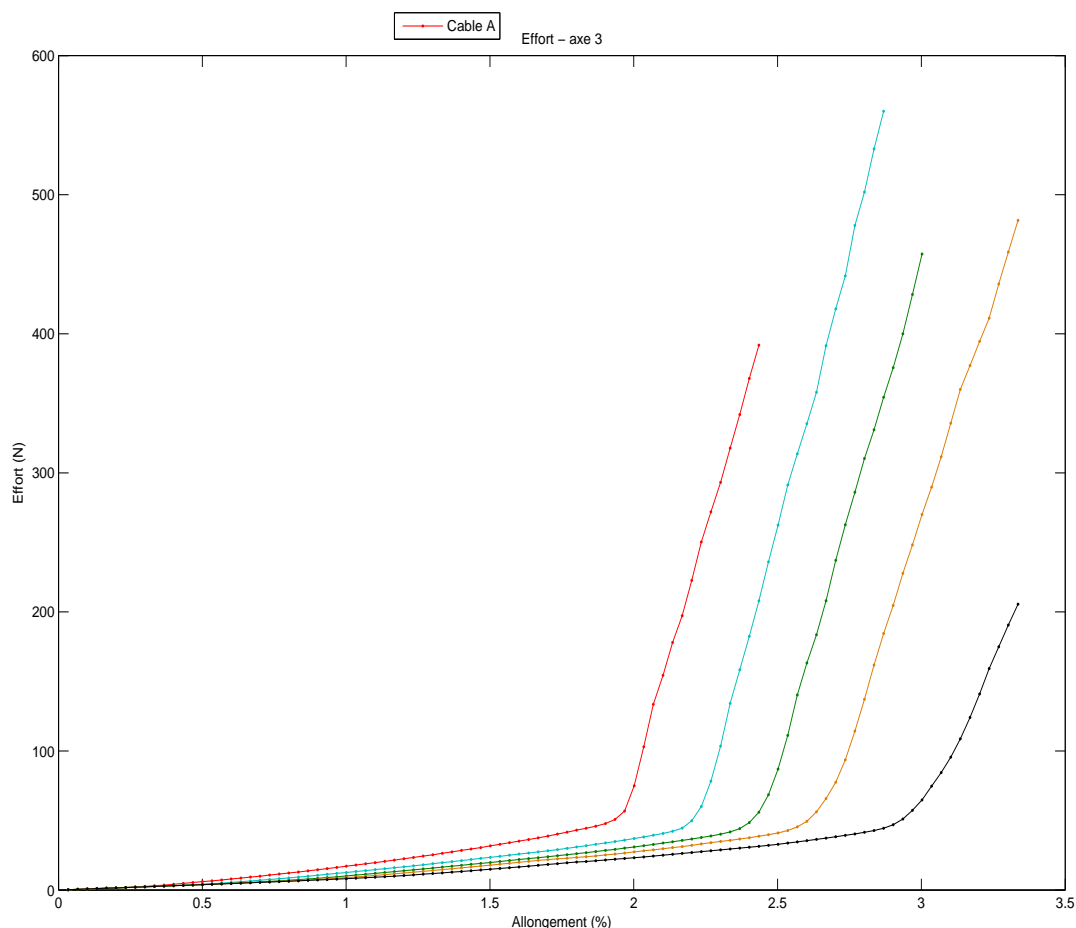


Figure 14 : courbe CFA

Légende : rouge : $P=0.0005$, bleue: $P=0.001$, vert: $P=0.0015$, marron : 0.002 et noir : 0.003

Profondeur de régularisation	Pente de la courbe
P=0.0005	700
P=0.001	701
P=0.0015	701
P=0.002	702
P=0.003	445

Tableau 1 : pente des courbes CFA

A part la courbe noire, les quatre autres courbes se superposent car ayant la même pente comme le montre le tableau 1 ; ce qui permet de conclure que la rigidité n'est pas modifiée. Mais à partir d'une certaine valeur de la profondeur de la régularisation, la rigidité n'est plus la même.

Ainsi avec une valeur inférieure à 3% du rayon des fils, la profondeur de régularisation ne perturbe pas la valeur du module de rigidité. Mais au delà de cette valeur de la profondeur de régularisation, il faudra tenir compte de la solution physique du problème et se demander si une telle modification de la valeur de rigidité du câble donnerait un sens au résultat de la simulation.

La valeur de la profondeur de régularisation modifie la valeur de l'allongement structural début de courbe (ASDC). L'ASDC représente la transition entre l'état aéré du câble et le câble compacté.

Ainsi, lorsque la profondeur de régularisation passe de la valeur 0.0005 à 0.001, la valeur de l'allongement structural est augmentée de 0.3% environ.

En augmentant la valeur de la profondeur de régularisation, cela facilite l'interpénétration entre les fils. Plus la valeur de la profondeur de régularisation augmente plus l'ASDC est important. Avec une profondeur de 0.002, le câble est beaucoup plus compact par rapport à une profondeur de 0.0005.

c. Influence de la raideur de contact

Le modèle mécanique de contact adapté est déterminé aussi par la raideur de contact (voir figure 15) qui représente la raideur normale de contact. À effort normal donné, la pénétration est inversement proportionnelle à la raideur de contact.

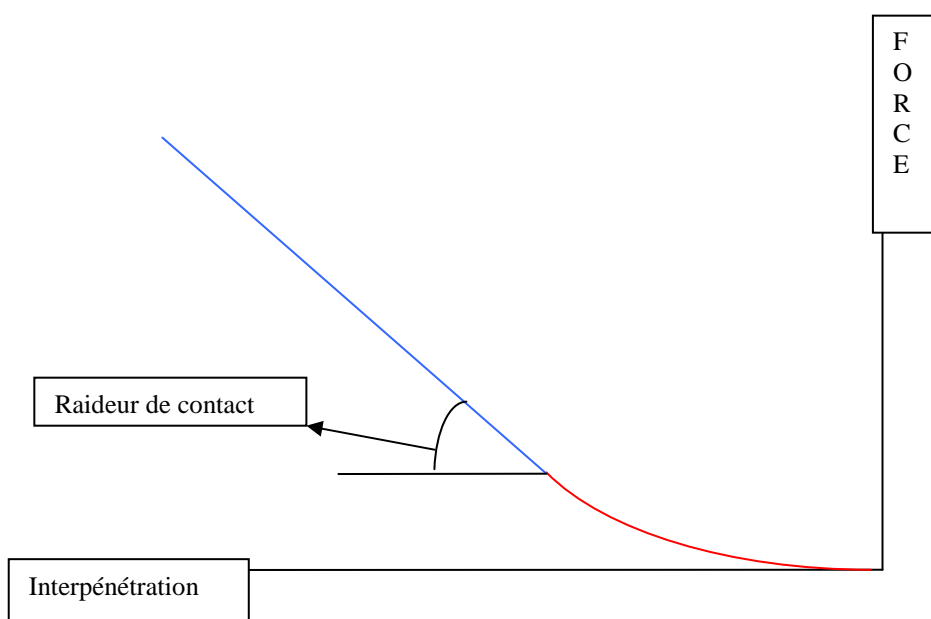


Figure 15 : raideur de contact

Une raideur de contact nulle correspond à une situation où il y aurait une libre pénétration entre les fils. Cette situation est possible d'un point de vue numérique comme nous le montre les figures 16 et 17 mais ce cas ne peut représenter un problème physique. Il faut dans ce cas partir d'une raideur qui a un sens d'un point de vue physique.

En cherchant à respecter le plus exactement les conditions cinématiques, on aurait tendance à prendre une valeur de la raideur la plus élevée possible. Ceci risque de poser dans la plupart des cas des problèmes de convergence de l'algorithme. Une valeur comprise entre 75 et 100 est conseillée.

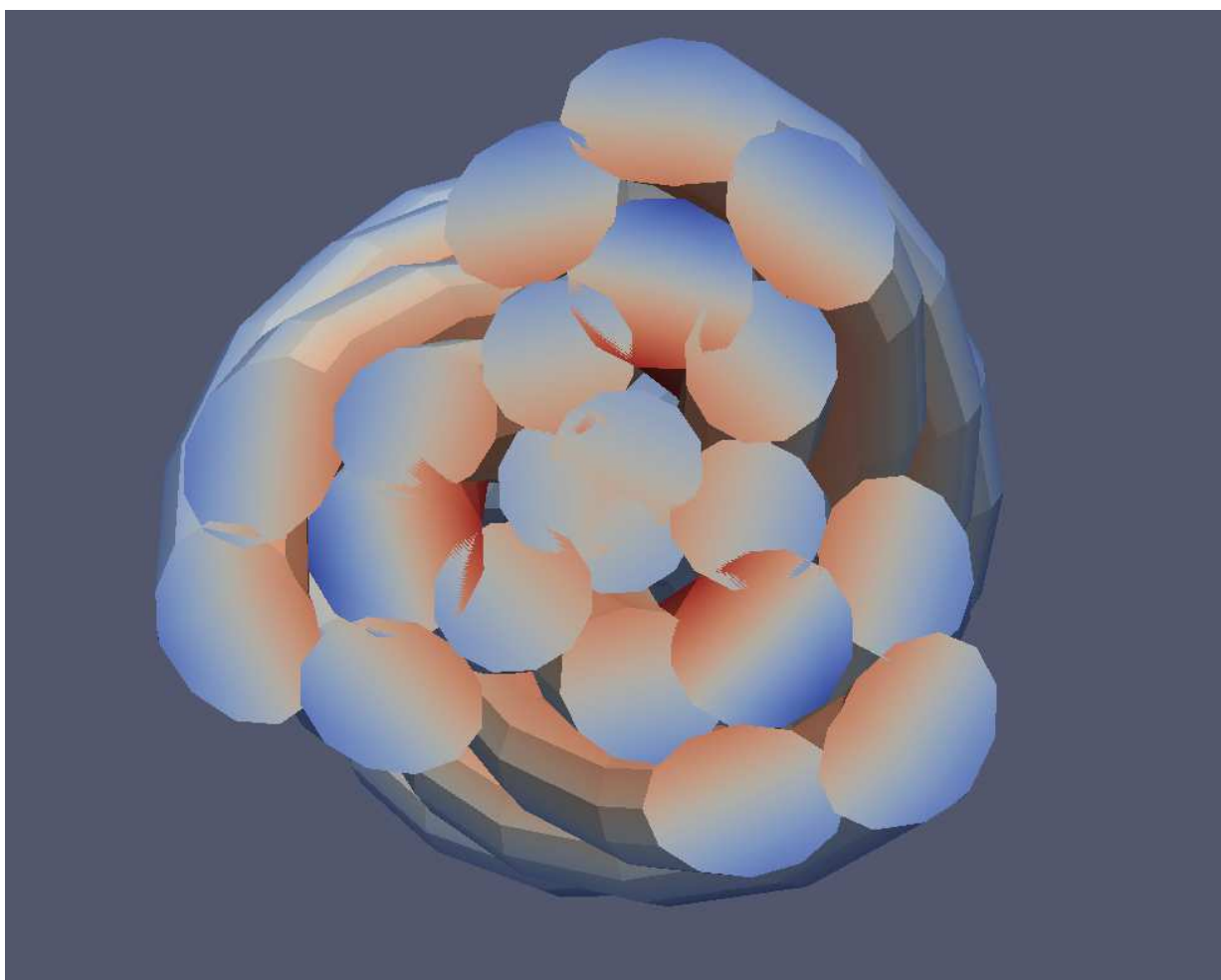


Figure 16 : Contact entre les fils à l'étape 150 de l'extension

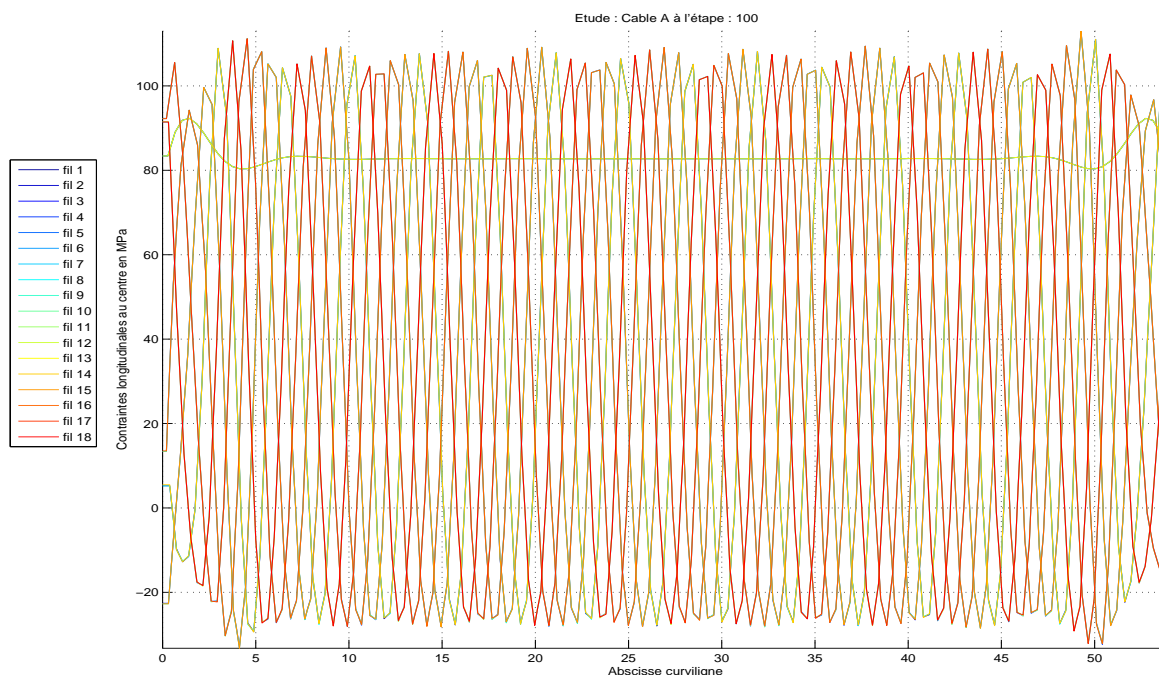


Figure 18 : Contraintes longitudinales le long du câble avec une Raideur nulle

d. Influence des autres paramètres d'entrés

• Déplacement imposé

Ce paramètre joue un rôle essentiel lors de la simulation avec Multifil. Il s'agit de l'incrément de déplacement d de l'extrémité du fil suivant la direction longitudinale. Pour cela, on détermine d'abord l'abscisse curviligne, de la projection orthogonale du point dans la configuration précédente, sur la ligne moyenne précédente. On considère ensuite le point de la ligne moyenne actuelle située à une abscisse curviligne décalée du déplacement imposé d . En augmentant ou divisant (facteur 2) cette valeur de déplacement, ça n'influence pas la convergence des calculs mais modifie fortement le temps de calcul.

• Ligne moyenne

Le principe pour appliquer cette condition est de bloquer les déplacements des fils d'âmes dans les directions orthogonales à la ligne moyenne. De cette manière, les déplacements longitudinaux par rapport à cette ligne moyenne sont laissés libres.

Pour simuler les câbles, Une ligne moyenne est définie pour représenter une déformation proche des câbles pneumatiques réels. C'est un paramètre géométrique que le câble devra suivre aux différents instants. Dans le cadre d'une extension, la ligne moyenne ne joue pas tellement parce que la ligne moyenne ne se déplace pas beaucoup. En variant ce paramètre d'un facteur dix, la convergence n'a pas été modifiée. Mais pour voir une influence de la ligne moyenne sur la convergence, il faudra multiplier d'un facteur au moins 10000. Avec cette rigidité, les nœuds reviennent brusquement à la ligne moyenne exigée. C'est une force de rappel énorme pour les nœuds du câble. Ce qui va causer un problème numérique donc à une divergence des calculs.

- **Glissement réversible**

A réaction normale fixée, la réaction tangentielle est proportionnelle au déplacement tangentiel tant que celui-ci reste inférieur à une valeur limite, appelée glissement réversible. (Voir figure 19). C'est la norme du déplacement tangentiel réversible maximale. Tout déplacement relatif au contact dont la norme est inférieure à cette valeur est considéré comme réversible. Ce paramètre intervient directement dans la matrice de rigidité par exemple en diminuant cette valeur, le critère de réversibilité est réduite donc cela entraîne un frottement beaucoup plus rapide. Cela modifie la matrice et le maillage. Une variation du glissement réversible n'a finalement pas joué sur la convergence des calculs.

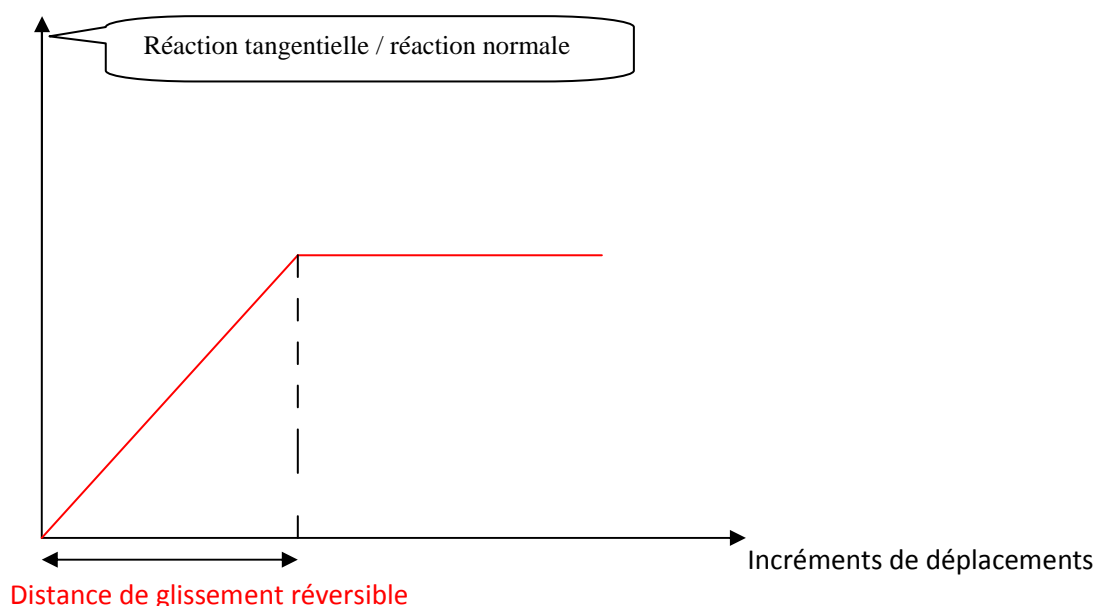


Figure 19 : Loi de coulomb régularisée

- **Nombre d'éléments de contact**

Ayant choisi de représenter le contact de manière ponctuelle, nous ne pouvons cependant pas traiter l'ensemble des particules venant en contact. Notre approche numérique doit nécessairement être discrète et choisir des lieux particuliers où sera testé le contact. Les contacts qui se produisent entre fils ont de grandes chances de se produire sur une étendue continue à l'échelle macroscopique. La discrétisation a priori du contact proposée dans notre modèle se traduit à ce niveau par la disposition d'éléments de contact discrets le long de cette zone continue en définissant des lieux géométriques discrets possibles pour le contact. Comme nous avons voulu que cette discrétisation soit indépendante de la discrétisation des fils, nous avons choisi de la définir au niveau de l'assemblage lui-même. Pour ce faire, nous disposons régulièrement le long de l'assemblage des plans orthogonaux à sa ligne moyenne, plans que nous appelons sections de contact. Nous définissons les lieux géométriques discrets où sera testé le contact comme étant situés aux intersections des fils avec ces sections de contact.

Ce paramètre a une influence sur les contraintes locales uniquement mais cette influence n'est pas suffisante pour modifier la convergence des calculs avec Multifil malgré son rôle dans la matrice de rigidité.



- **distance de recherche de contact**

C'est la distance entre deux points au-delà de laquelle on considère qu'il n'y a pas plus lieu de créer d'éléments de contact. L'augmentation de cette distance accroît le nombre d'éléments de contact créés, et donc les couplages au sein de l'assemblage, ce qui entraîne un élargissement du profil de la matrice et une augmentation du temps de résolution mais n'influence pas la convergence des calculs.

- **Module de Young et coefficient de poisson**

Les matériaux des fils sont considérés comme élastiques et donc seront définis par leur module de Young et leur coefficient de frottement. Ils n'ont pas vraiment influencé la convergence avec Multifil.

5.3- Le câble B

5.3.1- Problème rencontré

Lors de la fabrication des câbles, leur géométrie évolue en fonction des tensions de mise en place, des vides qui peuvent exister ou des mouvements de fils. Avant de passer à l'étape d'extension, une étape de mise en place du câble est nécessaire pour simuler cette réorganisation. Cette étape sert à positionner les fils de manière à mettre le câble à l'équilibre. Il existe deux possibilités de mise en place : soit appliquer une force sur les fils soit imposer une déformation. Les calculs lors de la mise en place avec une déformation imposée convergent.

Pour effectuer une mise en place avec une force imposée, la recommandation était de prendre 5% de la force de rupture du câble. La force de rupture du câble B est de 230 daN.

Le constat immédiat est qu'en appliquant une telle force (11,5 daN), les calculs avec Multifil ont tous divergé. Voir figure 20 ci-dessous.

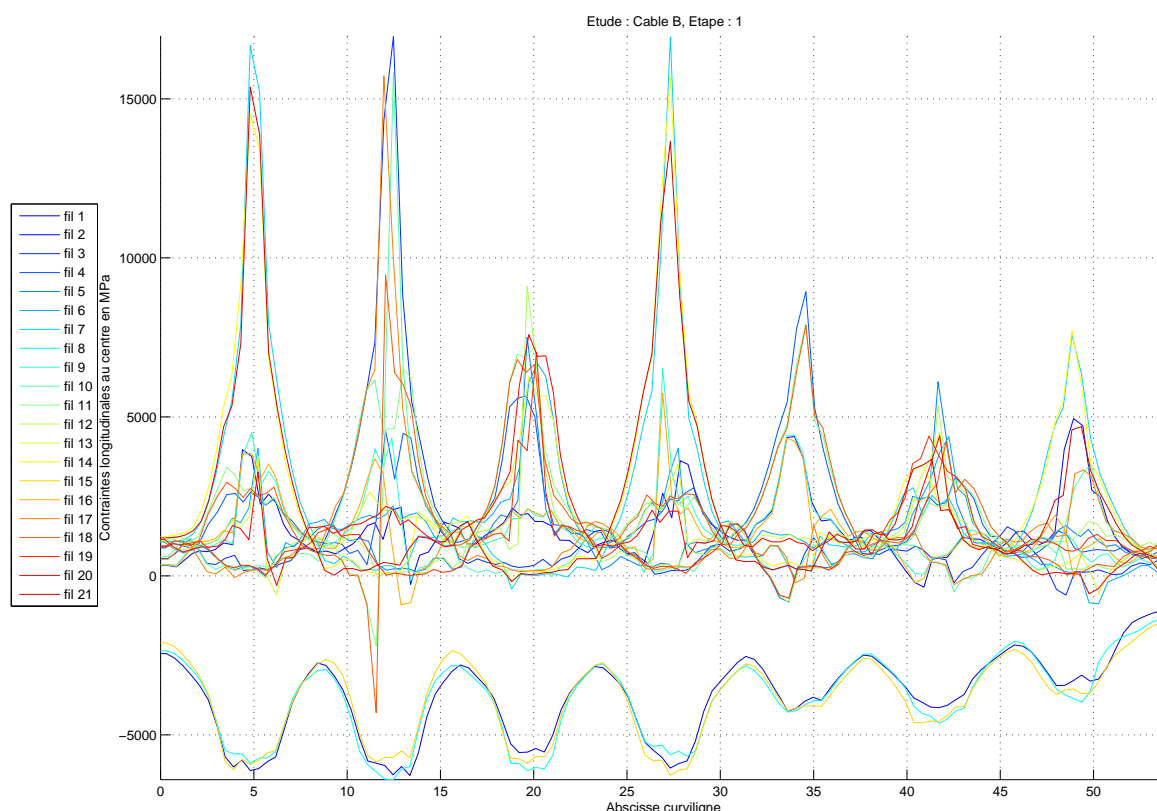


Figure 20 : Contraintes longitudinales le long du câble B

5.3.2- Résolution du problème

a. Influence de la profondeur de régularisation

Une augmentation de la valeur de la profondeur de régularisation facilite les contacts en fils.

En prenant environ 1 % du rayon du fil le plus fin, les calculs avec Multifil convergent mais des anomalies ont été constaté au niveau des contraintes longitudinales des fils.

En imposant une force de 11 daN et une profondeur de pénétration de 2.d-03 sur le câble B, la courbe des contraintes se présente comme la montre la figure 21.

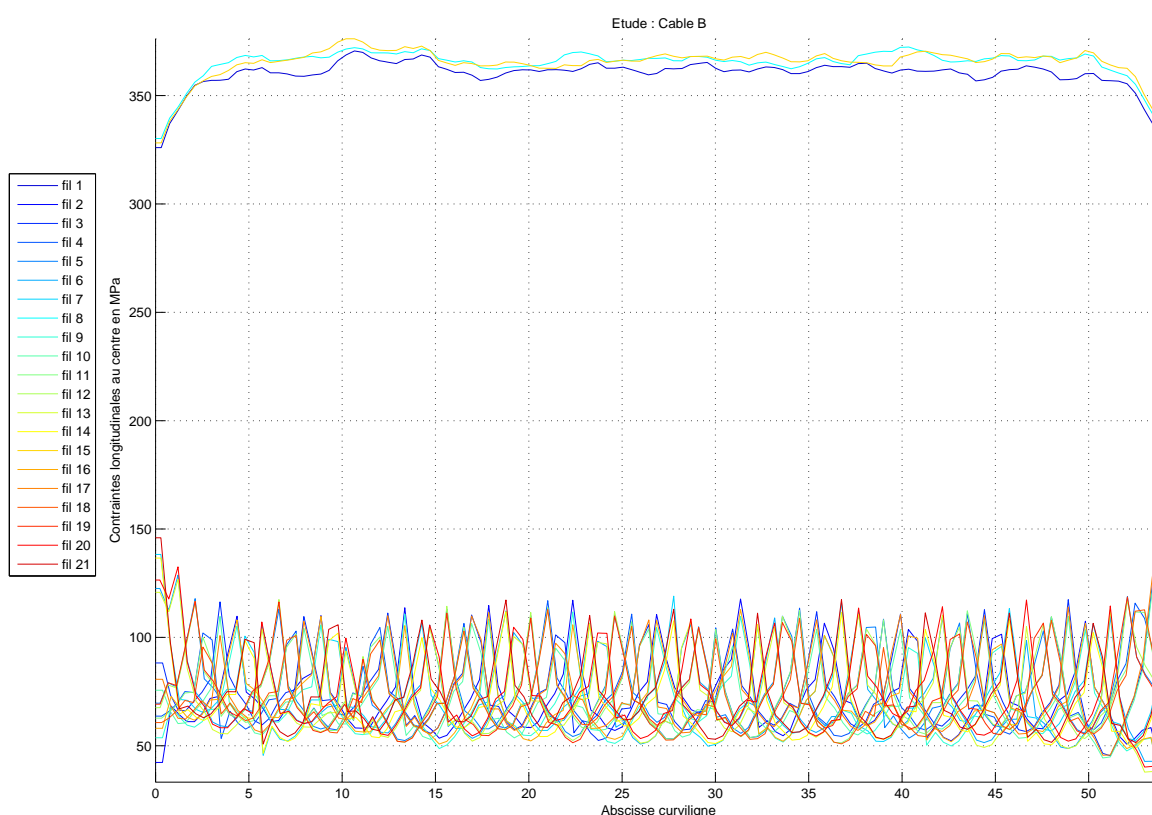


Figure 21 : Contraintes longitudinales le long du câble B

Conclusion :

Les contraintes ne sont pas stables le long du câble et surtout les contraintes au niveau des fils d'âme

Sont beaucoup plus élevées par rapport aux fils de la couche externe. Le rayon des fils est de

0.113mm, la profondeur choisit au départ était de 0.0005 c'est-à-dire environ 4/1000 du rayon

Ce qui augmente considérablement la pression sur les fils d'âme. Il n'y a presque pas d'inter pénétration des fils.

Ce qui entraîne une augmentation des contraintes longitudinales le long des fils d'âme.

b. Influence de la force imposée

L'idée est de diminuer la force imposée vu que l'objectif de la mise en place est seulement de repositionner les fils de manière à mettre le câble à l'équilibre. La profondeur de régularisation est toujours de 0.0005. Des calculs ont été faits avec une force très faible environ 1% de la force de rupture des câbles.

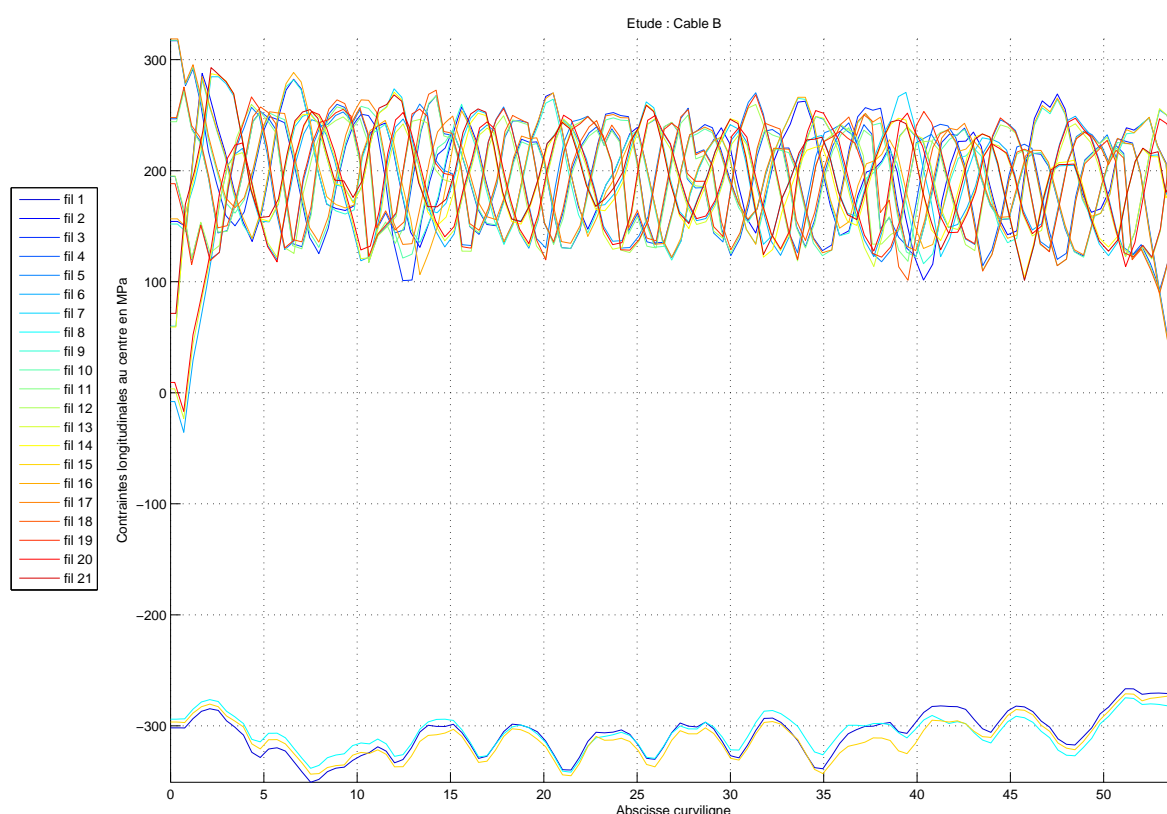


Figure 22 : Contraintes longitudinales le long du câble B

Les calculs avec Multifil ont convergés mais les contraintes ne sont toujours pas stables le long des fils. Les fils d'âme ont des contraintes négatives (figure 22) ce qui n'est pas logique parce qu'ils sont entourés des fils externes et qu'il y a normalement une faible pénétration entre fils. Des contraintes négatives signifient que les fils sont en compression.

Pour remédier ce problème, la méthode consiste à augmenter la profondeur de régularisation à 0.002 tout en appliquant une force très faible par rapport à la force de rupture du câble. Dans la suite les mises en place seront effectuées avec une profondeur de 0.002 ce qui représente environ 1.7% du rayon des fils. Le Graphe suivant (figure 23) représente une mise en place avec une force de 1.1 daN du câble B.

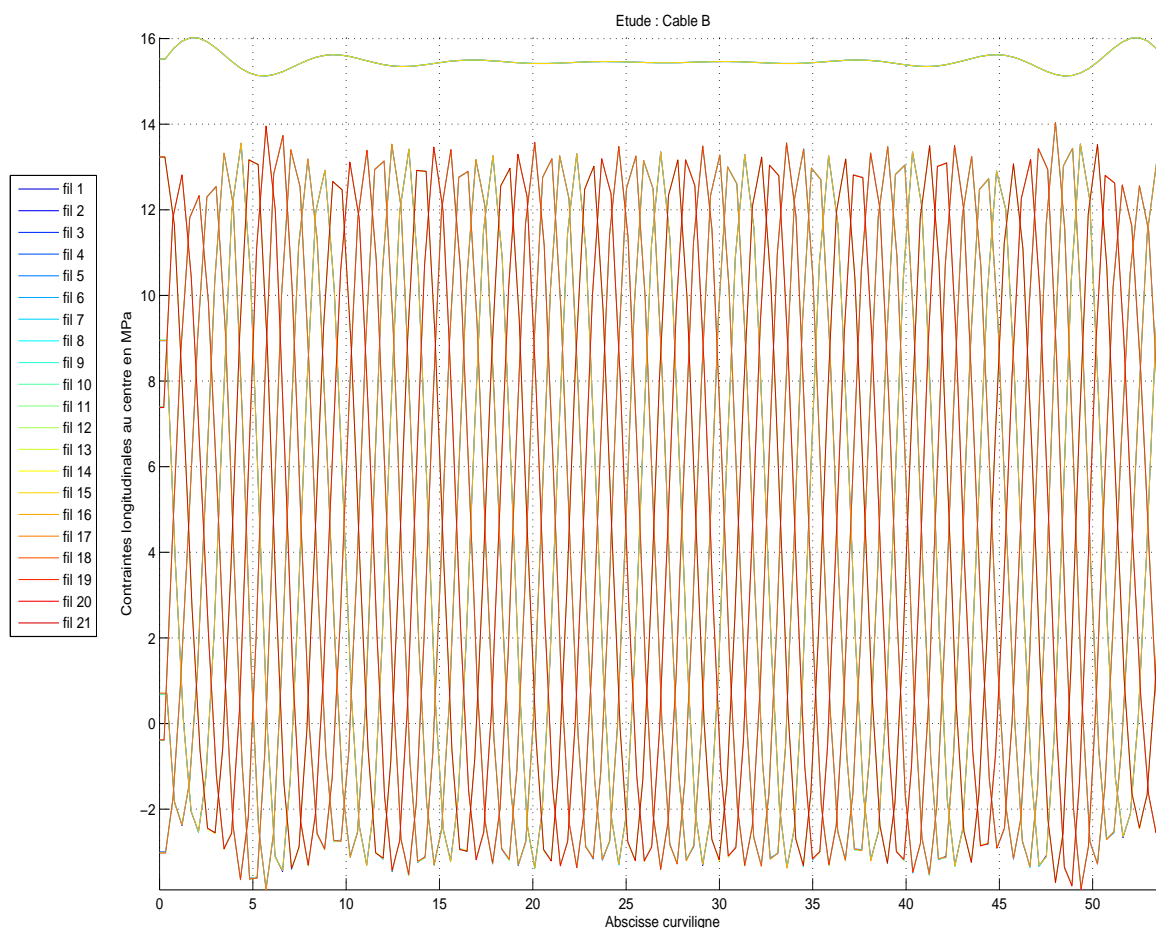


Figure 23 : Contraintes longitudinales le long du câble

Conclusion :

Les contraintes se stabilisent le long du câble.

Les courbes sont bien homogènes le long du câble à part le début et la fin du câble ; ce qui se justifie par les effets de bord du câble. Ceci justifie un peu plus le rôle que joue la force imposée lors de la mise en place.

c. Convergence numérique et rapport avec la physique

Dans certains cas, pour fabriquer des câbles il est préférable d'appliquer une profondeur de régularisation très faible afin de respecter leurs propriétés physiques.

Pour résoudre ce problème, les calculs seront faits dans cette partie en essayant de respecter cette valeur limite de profondeur.

Une des particularités de Multifil est de pouvoir sauvegarder en tout moment les coordonnées des nœuds et d'avoir la possibilité de reprendre les calculs au niveau de cette étape de calcul.

Le principe est de démarrer avec une profondeur de régularisation qui converge et de diminuer progressivement cette valeur à chaque étape de calcul.

Cela permettra d'assouplir les calculs numériques afin d'éviter les divergences. Avec cette méthode, il est possible d'aboutir à la valeur de la profondeur voulue sans faire diverger les calculs et les contraintes sont stables aussi.

Les figures 24 et 25 représentent respectivement une courbe des contraintes de profondeur de 0.0005, Et 0.001 calculées sans avoir fait une reprise des calculs c'est-à-dire en réinitialisant le câble.

La figure 26 a été obtenue en partant d'une profondeur de régularisation de 0.002 et en divisant de deux à chaque reprise pour arriver à une profondeur de 0.0005 voulu au départ.

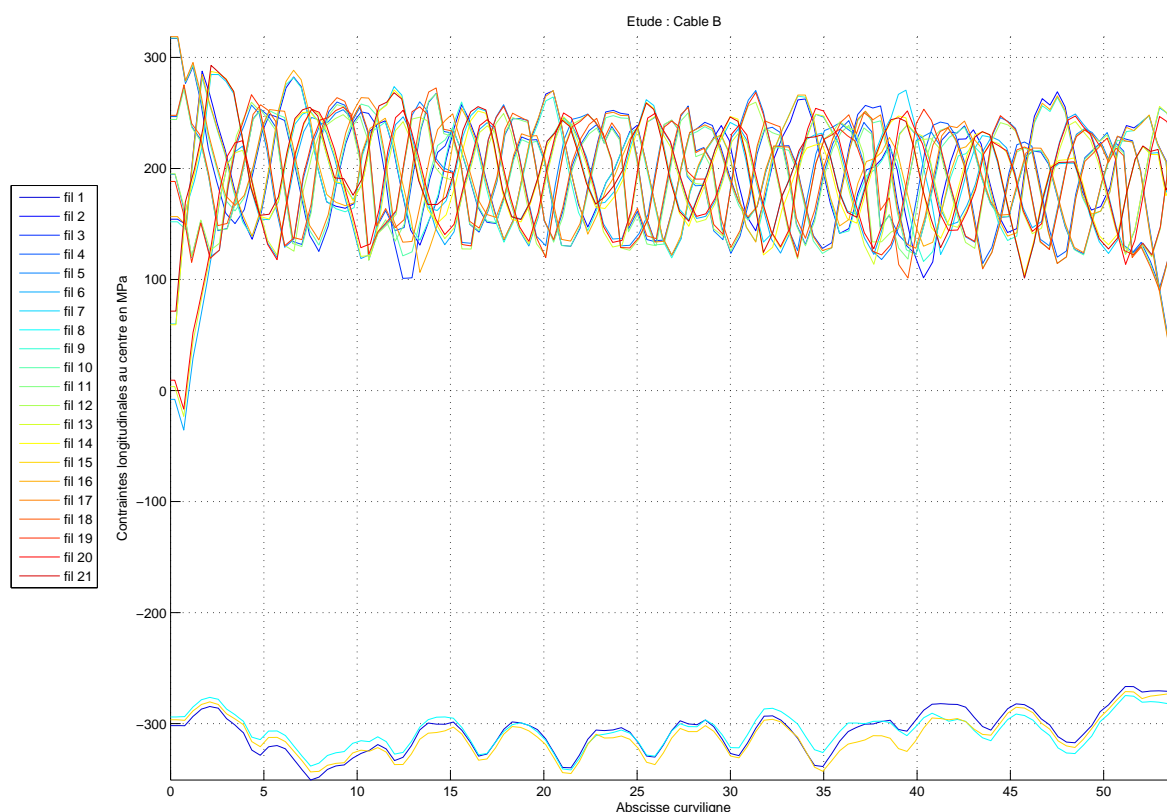


Figure 24 : Contraintes longitudinales avec une profondeur de 0.0005

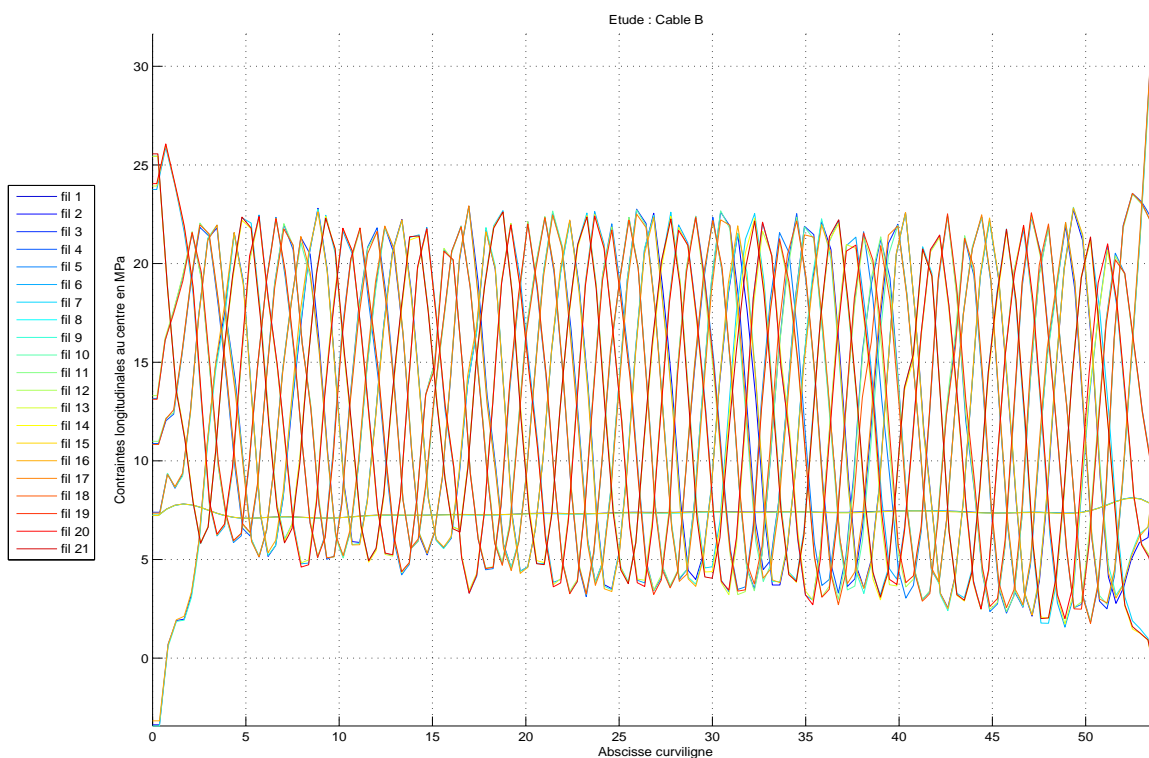


Figure 25 : Contraintes longitudinales avec une profondeur de 0.001

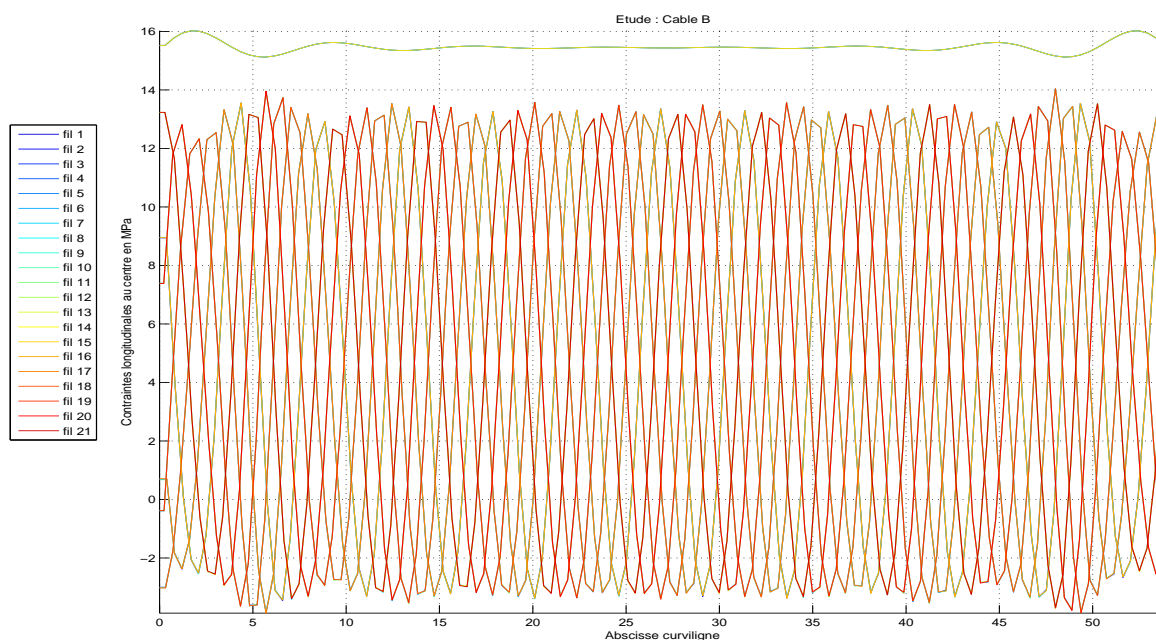


Figure 26 : Contraintes longitudinales avec une profondeur de 0.002



d. Influence des autres paramètres d'entrés

Les câbles A et B ont les mêmes propriétés mécaniques.

L'étude paramétrique des autres paramètres a donné les mêmes résultats que l'étude faite avec le câble A.

5.4- Conclusion

Les calculs avec Multifil et l'analyse du post-traitement ont montré un rapport entre la profondeur de régularisation et la force imposée pour effectuer une mise en place. Il est préférable d'appliquer une force très faible (environ 1% de la force de rupture) voir parfois nulle pour effectuer la mise en place. En ce qui concerne l'extension c'est globalement la profondeur qui joue sur la convergence. En général une valeur de 2% du rayon du câble le plus fin fait converger les calculs avec Multifil. Il faudra aussi tenir en compte de certains paramètres d'entrés (raideur de contact, distance de recherche de contact) qui pourront améliorer les résultats du post-traitement.

6– Etude paramétrique des câbles textiles

6.1- Introduction

La particularité des câbles textiles vis-à-vis des métalliques est que la trajectoire des fibres est inconnue c'est-à-dire qu'il n'y a pas de ligne moyenne définie au préalable. Le nombre de filaments est environ 1000 dans un renfort textile.

Un câble textile a beaucoup plus de fils qu'un câble métallique.

L'objectif de cette partie est d'effectuer une extension des câbles textiles et d'étudier la robustesse des calculs avec Multifil.

L'application de Multifil sur les renforts textiles paraît beaucoup plus difficile.

6.2- étude de la traction d'un renfort avec 150 tours

Comme dans le cas des câbles métalliques, la profondeur de régularisation a une forte influence lors de la simulation des renforts textiles. Avec une profondeur de régularisation de 0.001, les calculs avec Multifil ont convergé. La figure 27 montre l'allongement (en %) du câble en fonction de la force imposée. Il faut noter aussi que le résultat des calculs (résidu et incrément de déplacement) n'a pas été reproductible. Mais néanmoins, les calculs ont tous convergé malgré la différence de résidu.

Finalement ce qui faut retenir c'est qu'avec une telle profondeur de régularisation, les simulations avec Multifil convergent mais il y a un problème de robustesse des calculs.

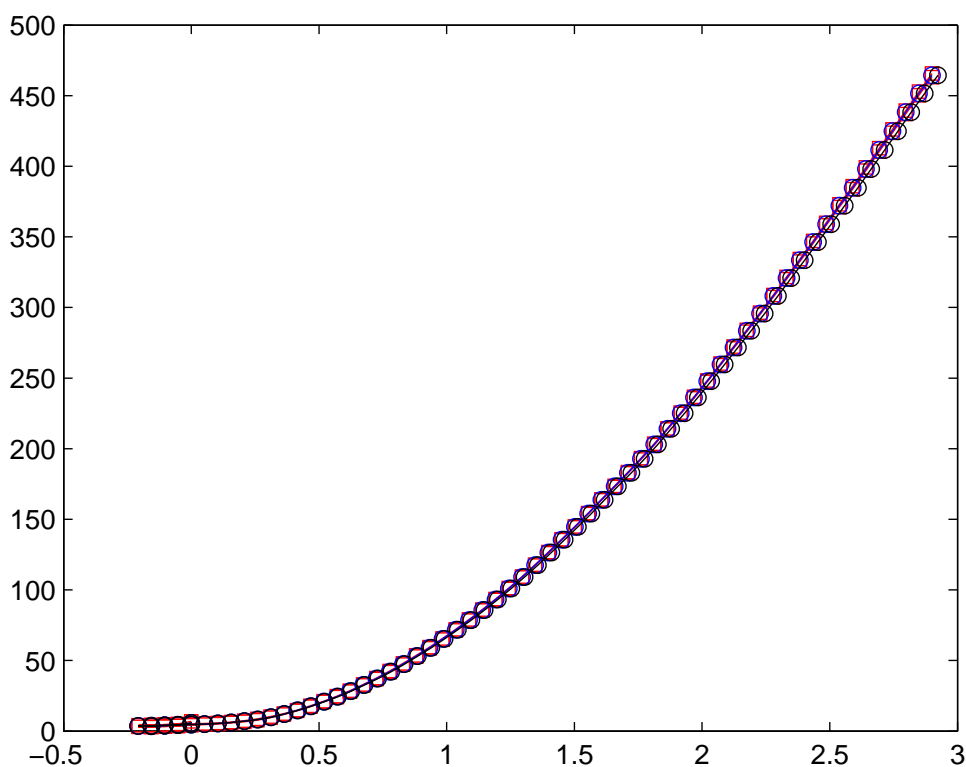


Figure 27 : Courbe Force Allongement (en %) avec une profondeur de 0.001

6.3- étude de la traction d'un renfort avec 190 tours

Les premiers calculs effectués sous Multifil ont montré que les résultats (résidu, incrément de déplacement,...) ne sont pas reproductibles.

Deux calculs avec les mêmes paramètres d'entrées ont été lancés en même temps et les résultats confirment l'hypothèse de non reproductibilité des simulations sous Multifil comme le montre la courbe force allongement (CFA) 28 ci-dessous

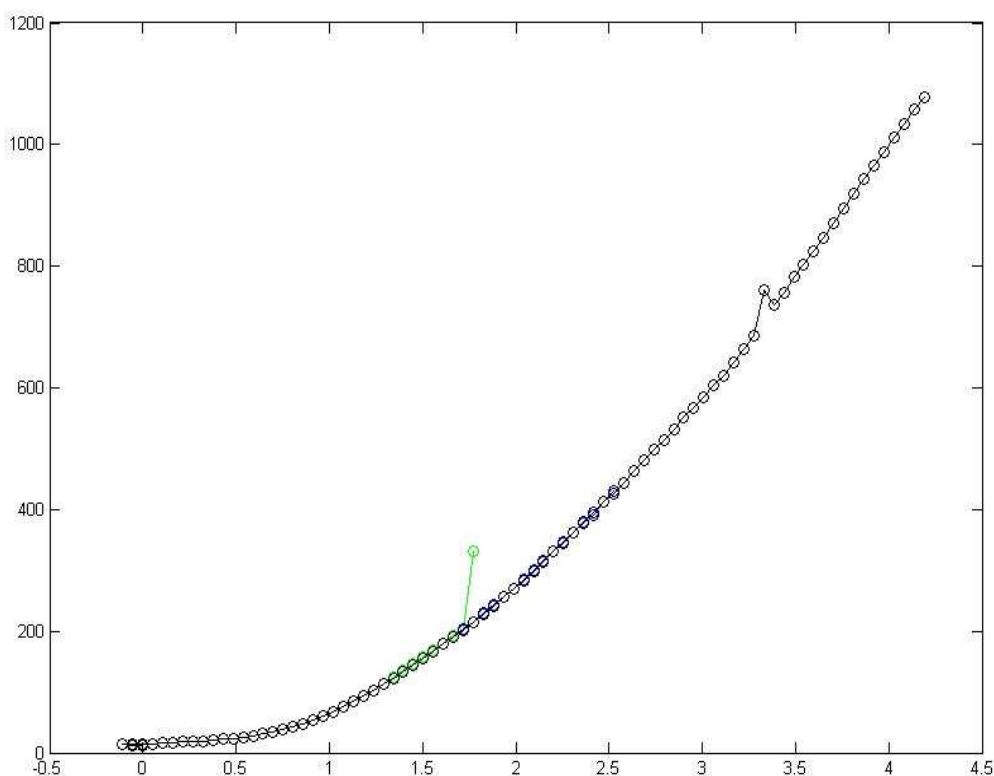


Figure 28 : Courbe CFA des deux calculs avec des paramètres identiques

Conclusion : à chaque fois que les couleurs noir et verte apparaissent cela veut dire que les résultats ne sont pas les mêmes à cette étape. Au début les deux courbes sont confondues et vers la fin les deux courbes apparaissent clairement.



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Pour les premières étapes les résultats sont les mêmes mais à partir d'un certains nombres d'étape de calculs, les résidus commencent à être différentes d'un calcul à un autre.

La différence de résidu commence à l'ordre de 1/1000000 pour finir par diverger à des étapes différentes. Le constat est le même avec l'incrément de déplacement.

Le tableau 2 montre la divergence des calculs en des étapes différentes et la non reproductibilité des calculs pour deux calculs identiques.

Calcul 1				Calcul 2			
Etape de chargement 410				Etape de chargement 380			
-----				-----			
Détermination des normales 2				Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.39832E-01	0.51489E-02	0.37000E+02	1	0.24747E-01	0.41294E-02	0.70000E+01
2	0.61841E-01	0.13827E-02	0.13700E+03	2	0.33901E-01	0.84893E-03	0.72000E+02
3	0.57214E-02	0.14279E-02	0.56000E+02	3	0.46007E-02	0.65824E-03	0.36000E+02
4	0.83690E-02	0.12782E-02	0.15000E+02	4	0.15704E-02	0.63636E-03	0.13000E+02
5	0.26879E-02	0.31985E-02	0.80000E+01	5	0.11007E-02	0.75459E-03	0.30000E+01
6	0.32837E-01	0.14616E-02	0.70000E+01	6	0.12332E-02	0.82374E-03	0.10000E+01
7	0.41552E-02	0.12600E-02	0.21000E+02	7	0.13626E-02	0.62835E-03	0.40000E+01
8	0.27805E-02	0.11474E-02	0.14000E+02	8	0.98804E-03	0.62835E-03	0.40000E+01
9	0.29790E-02	0.12562E-02	0.80000E+01	Ajustement de la pénalisation coef. Moyen : 0.30120E+03			
10	0.42098E-02	0.15683E-02	0.60000E+01	Détermination des points de contact 2			
11	0.65881E-02	0.15636E-02	0.12000E+02	Nombre de couples de fils : 1100			
12	0.94510E-02	0.22422E-02	0.10000E+02	Nombre termes matrice de rigidité 5818998			
13	0.21737E-01	0.87009E-03	0.60000E+01	Détermination des normales 1			
14	0.36576E-02	0.12090E-02	0.60000E+01	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
15	0.59653E-02	0.16013E-02	0.70000E+01	1	0.76424E-01	0.75523E-02	0.16800E+03
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.62663E+03				2	0.22250E-01	0.94883E-03	0.99000E+02
Détermination des points de contact 2				3	0.70064E-02	0.15153E-02	0.37000E+02
Nombre de couples de fils : 1068				4	0.70948E-02	0.75549E-03	0.90000E+01
Nombre termes matrice de rigidité 5881692				5	0.18188E-02	0.16354E+00	0.80000E+01
Détermination des normales 1				6	0.99999E+00	0.11894E+00	0.25000E+02
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	7	0.99970E+00	0.71935E-01	0.12990E+04
1	0.88207E-01	0.22929E-01	0.30100E+03	8	0.99493E+00	0.11523E+00	0.15550E+04
2	0.44373E+00	0.57207E-02	0.13700E+03	9	0.99939E+00	0.87063E-01	0.19510E+04
3	0.69847E-01	0.47571E-02	0.18000E+03	10	0.99851E+00	0.10746E+01	0.17860E+04
4	0.27497E+00	0.26589E-02	0.18700E+03	11	0.10000E+01	0.42820E+00	0.19990E+04
5	0.20595E-01	0.26825E-02	0.77000E+02	12	0.10000E+01	0.26394E+00	0.19210E+04
6	0.10211E-01	0.12551E-02	0.37000E+02	13	0.10000E+01	0.17283E+00	0.13150E+04
7	0.33732E-02	0.23132E-02	0.24000E+02	14	0.10000E+01	0.12035E+00	0.78100E+03
8	0.13457E-01	0.12908E-02	0.12000E+02	15	0.10000E+01	0.82615E-01	0.60400E+03
9	0.44174E-02	0.23598E-02	0.16000E+02	Le calcul n'a pas converge a l'issue des itérations requises.			
10	0.61743E-02	0.12868E-02	0.80000E+01				
11	0.41344E-02	0.27649E-02	0.12000E+02				
12	0.16283E-01	0.19144E-02	0.90000E+01				
13	0.67744E-02	0.12979E-02	0.90000E+01				
14	0.29255E-02	0.96378E-03	0.11000E+02				
15	0.47256E-02	0.12394E-02	0.60000E+01				
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.63241E+03							
0.63241E+03							
Détermination des normales 2							
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact				
1	0.43868E-01	0.63867E-02	0.25000E+02				
2	0.19856E+00	0.16712E-02	0.12100E+03				
3	0.18411E-01	0.42999E-01	0.40000E+02				
4	0.99973E+00	0.17600E-01	0.38000E+02				
5	0.99673E+00	0.11846E-01	0.11800E+03				
6	0.96422E+00	0.91598E-02	0.13500E+03				
7	0.72763E+00	0.50551E-02	0.69000E+02				
Le calcul n'a pas converge a l'issue des itérations requises.							

Tableau 2 : différence de résidu et de déplacement

54

Date : 23/09/2011	Classification : D3	Retention : WA+10	Nb de page:47
Author : DIALLO Mouhamadou		Validator : Marc ROMERO DE LA OSA	
Confidential. Exclusive property of Manufacture Française des Pneumatiques Michelin. Any reproduction or utilization prohibited without the consent of Michelin			

Les résultats n'étant pas reproductibles, une étude paramétrique avec Multifil ne nous permet pas de conclure sur quelque chose.

Une des méthodes pour résoudre ce problème consiste à faire le calcul avec Multifil en sauvegardant au fur et à mesure les résultats et les coordonnées des nœuds (fichier .repr), ensuite de repérer l'étape où le calcul diverge. Le but est de reprendre les calculs à partir de l'étape précédente en faisant une reprise.

Une reprise consiste à relancer un nouveau calcul à partir de l'étape précédant sans avoir besoin de reprendre au début.

L'étude a été faite sur deux exemples identiques et dans les deux cas, les calculs n'ont pas été reproductifs à partir d'un certain nombre d'étape. L'exemple suivant montre le non reproductibilité des calculs et la différence du type de divergence d'un calcul à un autre.

Le tableau 3 représente le premier calcul effectué pour pouvoir repérer le début de la divergence.

Etape de chargement 351			

Détermination des normales	1		
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.93767E-01	0.49289E-02	0.19700E+03
2	0.64062E+00	0.39592E-02	0.10700E+03
3	0.44579E+00	0.13929E-02	0.70000E+02
4	0.10011E+00	0.21454E-02	0.41000E+02
5	0.14512E+00	0.55943E-03	0.33000E+02
6	0.11214E-01	0.99235E-03	0.12000E+02
7	0.13335E-01	0.21136E-03	0.50000E+01
8	0.10034E-02	0.75020E-03	0.60000E+01
9	0.17324E-02	0.12679E-03	0.20000E+01
10	0.45318E-03	0.54944E-03	0.50000E+01
11	0.15579E-02	0.88476E-04	0.00000E+00 *
12	0.12182E-03	0.18125E-03	0.30000E+01
13	0.33053E-03	0.49364E-04	0.00000E+00 *
14	0.57102E-04	0.49364E-04	0.10000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.54802E+02			
Détermination des normales	2		
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.50037E-01	0.39929E-02	0.12000E+02
2	0.47875E+00	0.29474E-02	0.91000E+02
3	0.22680E+00	0.14067E-02	0.56000E+02
4	0.83848E-01	0.13064E-02	0.23000E+02
5	0.49343E-01	0.54300E+34	0.18000E+02
6	0.00000E+00	0.92880E+34	0.11000E+02
7	0.00000E+00	0.13542E+35	0.60000E+01
8	0.00000E+00	0.37095E+35	0.40000E+01
9	0.00000E+00	Infinity	0.10000E+01
10	0.00000E+00	NaN	0.20000E+01
11	0.00000E+00	NaN	0.37960E+04 *
12	0.00000E+00	NaN	0.00000E+00 *
13	0.00000E+00	NaN	0.00000E+00 *
14	0.00000E+00	NaN	0.00000E+00 *
15	0.00000E+00	NaN	0.00000E+00 *
Le calcul n'a pas convergé à l'issue des itérations requises			

Tableau 3: début de la divergence

La divergence a eu lieu à l'étape 351 avec une forte augmentation de l'incrément de déplacement (voir tableau 3). La reprise a été effectuée à partir de l'étape 350.

Le tableau 4 montre que les calculs ne divergent plus à cette étape en effectuant un nouveau calcul avec reprise.



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Calcul 1 à l'étape 351				Calcul 2 à l'étape 351			
Etape de chargement 351				Etape de chargement 351			
-----				-----			
Détermination des points de contact 1				Détermination des points de contact 1			
Nombre de couples de fils : 1046				Nombre de couples de fils : 1046			
Nombre termes matrice de rigidité 5703492				Nombre termes matrice de rigidité 5703492			
Détermination des normales 1				Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.00000E+00	0.67730E-02	0.00000E+00	1	0.00000E+00	0.67730E-02	0.00000E+00
2	0.70724E+00	0.44676E-02	0.11100E+03	2	0.70724E+00	0.44676E-02	0.11100E+03
3	0.56155E+00	0.19182E-02	0.82000E+02	3	0.56155E+00	0.19182E-02	0.82000E+02
4	0.12768E+00	0.19793E-02	0.38000E+02	4	0.12768E+00	0.19793E-02	0.38000E+02
5	0.12110E+00	0.10747E-02	0.21000E+02	5	0.12110E+00	0.10747E-02	0.21000E+02
6	0.21195E-01	0.10427E-02	0.23000E+02	6	0.21195E-01	0.10427E-02	0.23000E+02
7	0.16881E-01	0.63057E-03	0.13000E+02	7	0.16881E-01	0.63057E-03	0.13000E+02
8	0.33637E-02	0.77318E-03	0.70000E+01	8	0.33637E-02	0.77318E-03	0.70000E+01
9	0.21961E-02	0.58340E-03	0.20000E+01	9	0.21961E-02	0.58340E-03	0.20000E+01
10	0.16684E-02	0.80031E-03	0.50000E+01	10	0.16684E-02	0.80031E-03	0.50000E+01
11	0.25638E-02	0.44740E-03	0.10000E+01	11	0.25638E-02	0.44740E-03	0.10000E+01
12	0.11439E-02	0.93458E-03	0.00000E+00	12	0.11439E-02	0.93458E-03	0.00000E+00
13	0.47190E-02	0.38663E-03	0.30000E+01	13	0.47190E-02	0.38663E-03	0.30000E+01
14	0.83427E-03	0.38663E-03	0.30000E+01	14	0.83427E-03	0.38663E-03	0.30000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.52093E+02				Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.52093E+02			
Détermination des normales 2				Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.43278E-01	0.71637E-02	0.15000E+02	1	0.43278E-01	0.71637E-02	0.15000E+02
2	0.86443E+00	0.75051E-02	0.87000E+02	2	0.86443E+00	0.75051E-02	0.87000E+02
3	0.81648E+00	0.22693E-02	0.12100E+03	3	0.81648E+00	0.22693E-02	0.12100E+03
4	0.16080E+00	0.41262E-02	0.82000E+02	4	0.16080E+00	0.41262E-02	0.82000E+02
5	0.23349E+00	0.11964E-02	0.48000E+02	5	0.23349E+00	0.11964E-02	0.48000E+02
6	0.38882E-01	0.20745E-02	0.17000E+02	6	0.38882E-01	0.20745E-02	0.17000E+02
7	0.77082E-01	0.47806E-03	0.20000E+02	7	0.77082E-01	0.47806E-03	0.20000E+02
8	0.45806E-02	0.12350E-02	0.11000E+02	8	0.45806E-02	0.12350E-02	0.11000E+02
9	0.63475E-02	0.27762E-03	0.40000E+01	9	0.63475E-02	0.27762E-03	0.40000E+01
10	0.76018E-03	0.27762E-03	0.50000E+01	10	0.76018E-03	0.27762E-03	0.50000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.53384E+02				Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.53384E+02			
Détermination des points de contact 2				Détermination des points de contact 2			
Nombre de couples de fils : 1040				Nombre de couples de fils : 1040			
Nombre termes matrice de rigidité 5710215				Nombre termes matrice de rigidité 5710215			
Détermination des normales 1				Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.93767E-01	0.49289E-02	0.19700E+03	1	0.93767E-01	0.49289E-02	0.19700E+03
2	0.64062E+00	0.39594E-02	0.10700E+03	2	0.64062E+00	0.39592E-02	0.10700E+03
3	0.44579E+00	0.27790E-02	0.70000E+02	3	0.44579E+00	0.13929E-02	0.70000E+02
4	0.10011E+00	0.32731E-02	0.41000E+02	4	0.10011E+00	0.21454E-02	0.41000E+02
5	0.14512E+00	0.68018E-03	0.33000E+02	5	0.14512E+00	0.55943E-03	0.33000E+02
6	0.11214E-01	0.99250E-03	0.12000E+02	6	0.11214E-01	0.99235E-03	0.12000E+02
7	0.13335E-01	0.21136E-03	0.50000E+01	7	0.13335E-01	0.21136E-03	0.50000E+01
8	0.10034E-02	0.75020E-03	0.60000E+01	8	0.10034E-02	0.75020E-03	0.60000E+01
9	0.17324E-02	0.12679E-03	0.20000E+01	9	0.17324E-02	0.12679E-03	0.20000E+01
10	0.45318E-03	0.54944E-03	0.50000E+01	10	0.45318E-03	0.54944E-03	0.50000E+01
11	0.15579E-02	0.88476E-04	0.00000E+00	11	0.15579E-02	0.88476E-04	0.00000E+00
12	0.12182E-03	0.18125E-03	0.30000E+01	12	0.12182E-03	0.18125E-03	0.30000E+01
13	0.33053E-03	0.49364E-04	0.00000E+00	13	0.33053E-03	0.49364E-04	0.00000E+00
14	0.57102E-04	0.49364E-04	0.10000E+01	14	0.57102E-04	0.49364E-04	0.10000E+01

Tableau 4: convergence à l'étape 351 après reprises des calculs

Les résidus sont les mêmes dans les deux cas de calculs effectués après reprise mais à partir de l'étape 369, la valeur des résidus commence à être différente comme le montre le tableau 5 et que la divergence s'effectue en des étapes différentes.



Analyse de la performance d'un code de calcul éléments finis

Entity :
PMT/PRC/PR

Rapport de Stage d'Ingénieur de DIALLO Mouhamadou

Calcul 1 à l'étape 369				Calcul 2 à l'étape 369			
Etape de chargement 369				Etape de chargement 369			
-----				-----			
Détermination des points de contact 2				Détermination des points de contact 2			
Nombre de couples de fils : 1097				Nombre de couples de fils : 1090			
Nombre termes matrice de rigidité 5770803				Nombre termes matrice de rigidité 5772990			
Détermination des normales 1				Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.73933E-01	0.44805E-02	0.16000E+03	1	0.78127E-01	0.71329E-02	0.17100E+03
2	0.21525E-01	0.60731E-03	0.88000E+02	2	0.23529E-01	0.81473E-03	0.91000E+02
3	0.31031E-02	0.10579E-02	0.34000E+02	3	0.60108E-02	0.91212E-03	0.33000E+02
4	0.24776E-02	0.47244E-03	0.50000E+01	4	0.27315E-02	0.47889E-03	0.13000E+02
5	0.99411E-03	0.18524E-02	0.60000E+01	5	0.12955E-02	0.84446E-03	0.20000E+01
6	0.65564E-02	0.48418E-03	0.20000E+01	6	0.17271E-02	0.71679E-03	0.30000E+01
7	0.92519E-03	0.53168E-03	0.50000E+01	7	0.11835E-02	0.64494E-03	0.50000E+01
8	0.15602E-02	0.33822E-03	0.20000E+01	8	0.13047E-02	0.42544E-03	0.20000E+01
9	0.49752E-03	0.43543E-03	0.70000E+01	9	0.70671E-03	0.21004E-03	0.60000E+01
10	0.15705E-02	0.26204E-03	0.00000E+00	10	0.50477E-03	0.41449E-03	0.10000E+01
11	0.48415E-03	0.38788E-03	0.70000E+01	11	0.58684E-03	0.11838E-03	0.10000E+01
12	0.17178E-02	0.26059E-03	0.10000E+01	12	0.31986E-03	0.36530E-03	0.00000E+00
13	0.54623E-03	0.14867E-02	0.30000E+01	13	0.61265E-03	0.94121E-04	0.00000E+00
14	0.17335E-01	0.29364E-03	0.10000E+01	14	0.25477E-03	0.14085E-03	0.00000E+00
15	0.12591E-02	0.15822E-03	0.20000E+01	15	0.21701E-03	0.67000E-04	0.00000E+00
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.19644E+03				Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.19559E+03			
Détermination des normales 2				Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact	Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.27762E-01	0.24994E-02	0.80000E+01	1	0.29893E-01	0.28769E-02	0.80000E+01
2	0.21287E-01	0.72712E-03	0.58000E+02	2	0.26189E-01	0.83456E-03	0.68000E+02
3	0.24154E-02	0.71477E-03	0.22000E+02	3	0.28705E-02	0.62748E-03	0.34000E+02
4	0.13720E-02	0.40229E-03	0.50000E+01	4	0.11723E-02	0.43700E-03	0.90000E+01
5	0.93526E-03	0.81915E-03	0.80000E+01	5	0.78927E-03	0.60615E-03	0.40000E+01
6	0.12823E-02	0.64662E-03	0.40000E+01	6	0.83895E-03	0.58226E-03	0.30000E+01
7	0.17142E-02	0.69562E-03	0.80000E+01	7	0.10319E-02	0.59780E-03	0.10000E+01
8	0.10477E-02	0.10720E-01	0.50000E+01	8	0.87615E-03	0.52904E-03	0.20000E+01
9	0.83828E+00	0.27850E-02	0.90000E+01	9	0.93962E-03	0.56687E-03	0.20000E+01
10	0.13715E+00	0.24137E-02	0.62000E+02	10	0.86981E-03	0.39756E-03	0.20000E+01
11	0.20716E+00	0.44226E-02	0.84000E+02	11	0.64115E-03	0.38028E-03	0.60000E+01
12	0.67862E+00	0.15467E-01	0.51000E+02	12	0.59793E-03	0.25051E-03	0.50000E+01
13	0.99829E+00	0.66308E-02	0.56000E+02	13	0.37150E-03	0.21568E-03	0.40000E+01
14	0.97753E+00	0.56424E-02	0.97000E+02	14	0.32354E-03	0.10939E-03	0.40000E+01
15	0.58596E+00	0.34089E-02	0.72000E+02	15	0.15775E-03	0.93355E-04	0.70000E+01
Le calcul n'a pas convergé à l'issue des itérations requises							
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.19712E+03							

Tableau 5: divergence à l'étape 369 après reprises des calculs

Conclusion :

La méthode qui consiste à faire des reprises de calculs a permis d'améliorer la convergence des simulations d'une dizaine d'étapes de calculs mais par contre en ce qui concerne la reproductibilité des calculs, le problème est toujours pressent.

57

Date : 23/09/2011	Classification : D3	Retention : WA+10	Nb de page:47
Author : DIALLO Mouhamadou		Validator : Marc ROMERO DE LA OSA	
Confidential. Exclusive property of Manufacture Française des Pneumatiques Michelin. Any reproduction or utilization prohibited without the consent of Michelin			

6.4- Les différents types de divergence sous Multifil

6.4.1- Introduction

En effectuant les simulations des câbles textiles des problèmes de robustesse ont apparus. Le but de ce paragraphe est de voir les différentes formes de divergence rencontrées. Dire que les calculs divergent ne suffit pas pour comprendre et pouvoir résoudre le problème. Dans cette partie l'analyse sera faite sur plusieurs calculs effectués afin de voir tous les cas possibles de divergence. Deux quantités sont mesurées pour estimer la convergence de l'algorithme de résolution : la norme de l'incrément de déplacement au cours de la dernière itération et la norme du résidu relatif. La norme de l'incrément de déplacement est calculée comme la somme des normes des incréments de déplacement en chaque nœud du maillage. Le résidu relatif est calculé comme le rapport entre la norme du résidu total, divisée par la norme du résidu dû aux seuls termes d'efforts internes. Dans cette partie, il s'agira de savoir d'où proviennent les divergences constatées lors des calculs textiles.

6.4.2- Divergence dite « normale »

C'est une forme de divergence où le résidu augmente progressivement jusqu'à ce qu'il soit supérieur à la valeur limite de convergence exigée. De même l'incrément de déplacement augment progressivement et il n'y a pas d'augmentation brusque de résidu ni de l'incrément de déplacement. Ce type de divergence n'est pas fréquent dans ce cas d'étude de textiles.

6.4.3- Divergence dite « incrément déplacement infini »

Elle a lieu à l'intérieur des itérations de Newton au moment des calculs des normales.

La valeur de l'incrément de déplacement est relativement petite (environ $10 \text{ E-}02$) à l'itération N et un incrément de déplacement d'ordre infini à l'itération N+1 alors que le résidu reste faible à cette itération.

Ce n'est pas un problème physique mais plutôt numérique dans ce cas là. Voir tableau 6.

Une augmentation brusque de l'incrément de déplacement entraîne un déplacement notable de certains fils du câble donc ce qui fait le calcul n'arrive plus à se retrouver. La distance de recherche de contact est limitée.

divergence			
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.37087E+03			
Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.19784E-01	0.27491E-02	0.10000E+01
2	0.43985E-02	0.29510E-03	0.34000E+02
3	0.18601E-02	0.67484E-03	0.13000E+02
4	0.18721E-02	0.38697E-03	0.40000E+01
5	0.92213E-03	0.38697E-03	0.70000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.37376E+03			
Détermination des points de contact 2			
Nombre de couples de fils : 1354			
Nombre termes matrice de rigidité 6269682			
Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.53717E-01	0.14389E-01	0.10500E+03
2	0.90948E-01	0.32450E-02	0.49000E+02
3	0.40366E-01	0.50430E-02	0.71000E+02
4	0.43909E+00	0.25885E-02	0.12100E+03
5	0.30849E-01	0.20658E-02	0.71000E+02
6	0.43854E-01	0.20617E-02	0.35000E+02
7	0.96521E-02	0.19208E-02	0.21000E+02
8	0.12918E-01	0.11605E-02	0.14000E+02
9	0.12404E-01	0.11643E-02	0.11000E+02
10	0.54266E-02	0.16053E-02	0.30000E+01
11	0.13077E-01	0.77311E-03	0.40000E+01
12	0.45050E-02	0.13046E-02	0.11000E+02
13	0.11221E-01	0.98487E-03	0.40000E+01
14	0.43264E-02	0.10971E-02	0.10000E+02
15	0.53408E-02	0.61190E-03	0.50000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.37465E+03			
Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.24519E-01	0.27564E-02	0.70000E+01
2	0.25673E-01	0.52591E-03	0.37000E+02
3	0.29522E-02	0.17066E+70	0.15000E+02
4	0.00000E+00	NaN	0.40000E+01

Tableau 6 : Divergence



6.4.4- Divergence dite « augmentation brusque incrément déplacement »

Elle a lieu à l'intérieur des itérations de Newton au moment des calculs des normales.

La valeur de l'incrément de déplacement est relativement petite (environ 10 E-02) à l'itération N et un incrément de déplacement environ 10 à l'itération N+1 alors que le résidu reste faible à cette itération. Ce n'est pas un problème physique mais plutôt numérique dans ce cas là. Voir tableau 7.

La différence avec la divergence vue au paragraphe 6.3.2 est la valeur de l'incrément de déplacement. Les calculs s'arrêtent lorsque Multifil rencontre une divergence du type 6.3.2 alors que dans ce cas présent, le logiciel essaie de retrouver une position équilibre avant de diverger finalement. Dans certaines situations, le logiciel arrive à converger en contrôlant de nouveau la valeur de l'incrément de déplacement.

Etape de chargement 375

Détermination des points de contact 1

Nombre de couples de fils : 1082

Nombre termes matrice de rigidité 5775582

Détermination des normales 1

Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
-----------	----------------	---------	---------

1	0.00000E+00	0.49531E-02	0.00000E+00
2	0.30293E-01	0.81775E-03	0.34000E+02
3	0.72194E-02	0.80780E-03	0.32000E+02
4	0.52866E-02	0.62891E-03	0.17000E+02
5	0.24891E-02	0.81540E-03	0.10000E+02
6	0.53757E-02	0.50501E-03	0.40000E+01
7	0.18847E-02	0.53707E-03	0.10000E+02
8	0.57495E-02	0.31467E-03	0.60000E+01
9	0.21786E-02	0.39373E+00	0.40000E+01
10	0.10000E+01	0.27151E+00	0.71000E+02
11	0.99999E+00	0.19872E+00	0.17160E+04
12	0.99995E+00	0.54383E+00	0.24980E+04
13	0.10000E+01	0.38904E+00	0.34440E+04
14	0.99999E+00	0.23160E+01	0.26700E+04
15	0.10000E+01	0.82760E+00	0.19590E+04

Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.22797E+03

Détermination des normales 2

Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
-----------	----------------	---------	---------

1	0.10000E+01	0.76019E+00	0.42020E+04
2	0.10000E+01	0.49701E+00	0.35700E+04
3	0.10000E+01	0.31428E+00	0.35750E+04
4	0.10000E+01	0.32755E+00	0.26270E+04
5	0.10000E+01	0.69972E+00	0.19300E+04
6	0.10000E+01	0.28691E+00	0.20050E+04
7	0.10000E+01	0.20619E+00	0.18790E+04
8	0.10000E+01	0.15935E+00	0.14420E+04
9	0.10000E+01	0.29563E+00	0.10840E+04
10	0.10000E+01	0.26254E+00	0.11960E+04
11	0.10000E+01	0.28331E+00	0.14240E+04
12	0.10000E+01	0.19195E+00	0.24410E+04
13	0.10000E+01	0.19729E+00	0.22870E+04
14	0.10000E+01	0.22831E+00	0.18860E+04
15	0.10000E+01	0.15286E+00	0.16670E+04

Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.47396E+03

Détermination des points de contact 2

Nombre de couples de fils : 1679

Nombre termes matrice de rigidité 7082517

Détermination des normales 1

Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
-----------	----------------	---------	---------

1	0.10000E+01	0.13465E+02	0.46900E+04
2	0.10000E+01	0.17407E+02	0.43070E+04
3	0.10000E+01	0.20624E+02	0.53420E+04
4	0.10000E+01	0.53016E+02	0.69610E+04
5	0.10000E+01	0.12961E+03	0.56080E+04
6	0.10000E+01	0.23695E+03	0.41950E+04

Tableau 7 : Divergence

6.4.5- Divergence dite « problème du résidu »

- **Entre les normales**

La divergence a lieu lorsqu'on recalcule les normales par exemple à la fin du calcul de la normale 1, le calcul converge mais en calculant la normale suivante, le résidu augmente brusquement. La direction normale de contact indique dans quelle direction on mesure le contact. Donc le problème provient de la détermination des directions normales de contact.

L'incrément de déplacement augmente aussi progressivement sous l'effet du résidu. Cela constitue un problème purement numérique. Voir tableau 8 ci-dessous.

Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.53777E+00	0.16076E-01	0.82600E+03
2	0.83385E+00	0.37269E-02	0.46100E+03
3	0.11889E+00	0.27728E-02	0.20200E+03
4	0.13329E+00	0.15142E-02	0.93000E+02
5	0.35727E-01	0.26911E-02	0.34000E+02
6	0.31562E-01	0.15190E-02	0.15000E+02
7	0.85790E-02	0.27250E-02	0.11000E+02
8	0.15930E-01	0.19898E-02	0.13000E+02
9	0.77081E-02	0.31382E-02	0.17000E+02
10	0.36061E-01	0.17797E-02	0.23000E+02
11	0.93431E-02	0.23149E-02	0.16000E+02
12	0.12445E-01	0.17018E-02	0.12000E+02
13	0.66200E-02	0.21451E-02	0.80000E+01
14	0.77341E-02	0.16963E-02	0.11000E+02
15	0.77291E-02	0.15770E-02	0.15000E+02
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.91786E+02			
Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.16703E+00	0.10267E-1	0.13000E+03
2	0.99999E+00	0.45302E-01	0.77000E+03
3	0.99985E+00	0.35161E-01	0.12660E+04
4	0.99959E+00	0.23117E-01	0.88400E+03
5	0.99671E+00	0.15668E-01	0.56300E+03
6	0.96333E+00	0.15543E-01	0.39300E+03
7	0.95676E+00	0.12528E-01	0.36500E+03
8	0.71863E+00	0.12287E-01	0.29200E+03
9	0.88298E+00	0.91944E-02	0.27600E+03
10	0.78147E+00	0.10693E-01	0.19000E+03
11	0.90676E+00	0.66162E-02	0.17700E+03
12	0.57151E+00	0.85654E+00	0.12000E+03
13	0.10000E+01	0.96412E+00	0.54900E+04
14	0.10000E+01	0.13710E+01	0.52910E+04
15	0.10000E+01	0.59365E+01	0.45190E+04
Le calcul n'a pas convergé à l'issue des itérations requises.			
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.69262E+03			
Fil 3 casse			
Fil 4 casse			
Fil 12 casse			

Tableau 8 : Divergence

• Entre points de contacts

Celle-ci a lieu entre le calcul de deux points de contacts c'est-à-dire au premier point les calculs convergent normalement alors qu'au début de calcul du 2^{ème} point de contact, le résidu augmente brusquement et ce qui entraîne la divergence des calculs (tableau 9). Cela constitue un problème purement numérique.

Détermination des points de contact 1			
Nombre de couples de fils : 1073			
Nombre termes matrice de rigidité 5766186			
Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.00000E+00	0.37394E-02	0.00000E+00
2	0.25198E-01	0.83580E-03	0.68000E+02
3	0.26893E-02	0.84827E-03	0.26000E+02
4	0.24277E-02	0.53260E-03	0.10000E+02
5	0.96300E-03	0.53260E-03	0.80000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.14850E+03			
Détermination des normales 2			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.20566E-01	0.17436E-02	0.20000E+01
2	0.60450E-02	0.56274E-03	0.37000E+02
3	0.63521E-02	0.11698E-02	0.28000E+02
4	0.22248E-02	0.38606E-03	0.11000E+02
5	0.93945E-03	0.38606E-03	0.12000E+02
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.15072E+03			
Détermination des points de contact 2			
Nombre de couples de fils : 1075			
Nombre termes matrice de rigidité 5767644			
Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.70097E+00	0.21545E-3	0.12200E+03
2	0.10000E+01	0.13247E+00	0.94000E+02
3	0.99998E+00	0.99357E-01	0.59800E+03
4	0.99978E+00	0.24448E+00	0.15360E+04
5	0.10000E+01	0.12481E+00	0.18390E+04
6	0.10000E+01	0.17590E+00	0.15340E+04
7	0.10000E+01	0.17546E+00	0.14710E+04
8	0.10000E+01	0.10143E+00	0.13620E+04
9	0.10000E+01	0.71086E-01	0.12850E+04
10	0.10000E+01	0.57073E-01	0.78100E+03
11	0.99998E+00	0.55545E-01	0.66500E+03
12	0.99986E+00	0.12212E+00	0.60800E+03
13	0.10000E+01	0.96681E-01	0.69000E+03
14	0.99999E+00	0.55578E-01	0.84000E+03
15	0.99995E+00	0.20229E+00	0.80400E+03
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.27037E+03			

Tableau 9: Divergence

Dans les deux cas, le résidu augmente d'un facteur 1000 environ d'une normale à une autre ou d'un point de contact à un autre. Les calculs se passent bien avant et y avait pas de raison de diverger à cette étape.

• A l'intérieur des itérations de Newton

C'est le type de divergence qui a lieu à l'intérieur des itérations de Newton en calculant les normales des points de contact. La valeur du résidu augmente d'un facteur de 1000 entre le passage de l'itération N à l'itération N+1. La valeur de l'incrément de déplacement reste quand à elle faible (tableau 10).

Détermination des normales 1			
Itération	Résidu relatif	Delta U	Contact
1	0.00000E+00	0.79164E-02	0.00000E+00
2	0.98448E-01	0.25033E-02	0.62000E+02
3	0.17767E-01	0.17081E-02	0.48000E+02
4	0.13184E-01	0.13436E-02	0.21000E+02
5	0.67848E-02	0.16655E-02	0.22000E+02
6	0.86750E-02	0.18290E-02	0.90000E+01
7	0.83815E-02	0.23917E-02	0.16000E+02
8	0.90834E-02	0.17108E-02	0.15000E+02
9	0.89992E-02	0.87619E-03	0.14000E+02
10	0.55361E-02	0.15265E-02	0.90000E+01
11	0.64929E-02	0.13686E-02	0.10000E+02
12	0.57879E-02	0.10905E-02	0.14000E+02
13	0.62749E-02	0.15013E-02	0.80000E+01
14	0.14352E-01	0.13295E-02	0.80000E+01
15	0.11433E-01	0.12959E-02	0.80000E+01
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.28601E+03			
Détermination des normales 2			
Iteration	Residu relatif	Delta U	Contact
1	0.29305E-01	0.24240E-02	0.17000E+02
2	0.91534E-01	0.80183E-03	0.59000E+02
3	0.72903E-02	0.13544E-02	0.27000E+02
4	0.54039E-02	0.41809E-03	0.17000E+02
5	0.27478E-02	0.10206E-02	0.12000E+02
6	0.47876E-02	0.41942E-03	0.20000E+01
7	0.24966E-02	0.20090E-02	0.12000E+02
8	0.64003E-02	0.36674E-01	0.90000E+01
9	0.99800E+01	0.28282E-01	0.15000E+02
10	0.97167E+01	0.11502E-01	0.19200E+03
11	0.71933E+00	0.19326E-01	0.16700E+03
12	0.97146E+00	0.12076E-01	0.12900E+03
13	0.72978E+00	0.43525E-01	0.11800E+03
14	0.99980E+00	0.17075E-01	0.78000E+02
15	0.99718E+00	0.27462E+00	0.12300E+03
Ajustement de la pénalisation - coef. moyen : 0.30919E+03			

Tableau 10: Divergence

Conclusion :

les différents types de divergence montrent que le problème apparaît lors de la résolution de l'algorithme. L'une des difficultés pour résoudre ce problème est le fait que les calculs ne donnent toujours pas le même type de divergence au même endroit. Avec le même câble textile, deux calculs identiques lancés simultanément affichent d'un côté une différence de résidu et de l'incrément de déplacement et d'un autre côté une divergence en des étapes différentes.

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette divergence : contact, frottement, influence des paramètres d'entrées.

D'autres paramètres numériques comme la valeur de la pénalisation du contact peuvent déstabiliser la convergence.

Pour pouvoir résoudre ce problème, il a fallu chercher un cas test qui diverge mais qui sera aussi reproductible au même endroit. Une étude paramétrique n'a pas permis d'améliorer la convergence des calculs.

Pour remédier ce problème il faudra une étude beaucoup plus pousser de l'algorithme de résolution des contacts- frottements. Faute de temps, nous n'avons pas pu traiter ce cas mais avec quelques expériences avec le code, des perspectives de résolution ont été énumérées au paragraphe suivant.

6.4- Perspectives

Malgré tout le temps mis pour étudier les renforts textiles, il nous a manqué de temps pour résoudre le problème de non reproductibilité. De ce fait il existe des pistes pour résoudre ce problème.

La profondeur a un rôle essentiel au niveau des contacts entre fils voisins.

En modifiant la profondeur de régularisation lors de l'étude du renfort avec 150 tours d'enroulement, il y a une amélioration des calculs jusqu'à obtenir une convergence.

L'une des pistes d'étude sera donc d'étudier au plus près l'algorithme de résolution des contacts dans Multifil. Certains paramètres numériques comme les seuils d'enclenchement de la tangente glissante exacte peuvent aussi provoquer un grand saut qui déstabilise. C'est un paramètre à revoir aussi.

Si les critères (résidu relatif, incréments de déplacement) passent sous ces seuils, la matrice tangente de glissement exacte est considérée. Si on est « proche » de la solution, la matrice tangente exacte accélère la convergence mais elle peut aussi provoquer déstabiliser.

L'idée sera de faire 3 ou 4 calculs représentatifs avec les mêmes paramètres d'entrées et de comparer les matrices de rigidité d'un côté et les second membres (les forces) d'un autre côté.

Cela permettra d'identifier l'origine de la différence de la solution et de remonter le problème.

Il est très probable que le problème vienne de la matrice de rigidité avec les incréments de déplacement calculés en chaque nœud du maillage.

Quand il y a des variations importantes des contacts et de l'incrément de déplacement, le problème peut venir des contacts et du coefficient de pénalisation.

Par contre quand on observe un résidu relatif élevé et que les autres indicateurs stables, les frottements peuvent être en cause.

La méthode de résolution qu'utilise Multifil est la méthode de Newton mais nous avons constaté avec la courbe CFA que les derniers points se décalaient légèrement de la courbe souhaitée.

Pour corriger ce problème, l'une des méthodes que nous avons pensé adapter est la méthode de continuation. La particularité de cette méthode de résolution est de pouvoir contrôler les incréments de déplacement des fils en imposant une valeur limite de déplacement.

C'est une méthode qui, à partir de l'étape n des calculs pourra contrôler le déplacement à l'étape n+1.

Cela permettra de contrôler les variations importantes des contacts et de l'incrément de déplacement.

7– Conclusion

L'objectif principal des études présentées dans ce document a été de faire une analyse paramétrique du code de calcul Multifil.

Après une étude bibliographique sur le logiciel et la théorie mécanique, la démarche suivie a été de s'approprier le code de calcul et de faire une étude paramétrique de l'ensemble des variables.

L'étude des câbles métalliques a montré l'importance de certains paramètres comme la profondeur de régularisation qui gère l'interpénétration des câbles. Des solutions ont été apportées sur chaque type de câble métallique.

Quand à l'étude câbles textiles, il faut noter aussi l'importance de la profondeur de régularisation dans la résolution des problèmes de convergence mais des problèmes de non reproductibilité ont été confirmés sur certains câbles textiles. Toutes fois, ces problèmes peuvent être résolus en étudiant les pistes de résolution.

La majeure partie des erreurs constatées sont plutôt numériques cela veut dire en améliorant le code de calcul éléments finis, la plus part des problèmes seront résolus.

Ce stage a été très instructif, à la fois de par un sujet de stage intéressant, et de par ma découverte de l'importance apportée à la recherche et à l'innovation chez Michelin



Bibliographie

- [1] Développements théoriques relatifs au Logiciel Multifil, **Centrale Paris**
- [2] Notion d'utilisation de Multifil 4.0, **Damien Durville** - Mai 2000
- [2] Développements Multifil : loi de comportement, **Damien Durville** – Février 2003
- [4] Rapport de stage sur la caractérisation du comportement des câbles métalliques, **Pierre Kempf** - Juillet 2010
- [5] www.michelin-engineering-and-services.com
- [6] www.michelin.com
- [7] intracte.michelin.com
- [8] intradocsgcm.michelin.com