



See what you mean

PROJET VELUM



Sommaire

PRESENTATION	3
Résumé	3
Objectifs	5
CREATION DE LA GEOMETRIE.....	5
Géométrie paramétrée de la toile.....	6
METHODE DES ELEMENTS FINIS.....	9
Le modèle d'analyse du quart d'ellipse	9
Mise en données géométrique	10
3 parts élémentaires sont nécessaires :.....	10
N*36 sets géométriques sont créés	11
L'assemblage.....	12
Mise en données du modèle éléments finis	14
Les matériaux	14
Les propriétés	14
Le maillage	15
Les steps	16
Les interactions.....	18
Les amplitudes.....	19
Les chargements	20
Les conditions aux limites	20
La configuration du calcul.....	22
Les sorties.....	22
Création du JOB	24
ANALYSE RESULTATS ET DISCUSSION	24
La première configuration : mouvement synchrone de repliement et déploiement de la toile	24
La seconde configuration : mouvement asynchrone de repliement et déploiement de la toile.....	26
CONCLUSION.....	27
REFERENCES	27
CONTACTS.....	Erreur ! Signet non défini.

PRESENTATION

Résumé

Les Romains protégeaient les spectateurs des intempéries en déployant d'immenses rideaux sur leurs arènes, le Vélum. Comment déployer et replier un tel dispositif? Un ingénieur français à la retraite, René Chambon, pense avoir la solution.

Qui n'a jamais sué à grosses gouttes et pris de douloureux coups de soleil, un après midi « de plein cagnard » dans les gradins d'un stade ? Encore aujourd'hui, la plupart des édifices de spectacle de plein air ne sont pas couverts. La seule alternative reste la casquette, les lunettes de soleil, et la crème solaire. Pourtant, plus de 2000 ans auparavant, les Romains avaient déjà imaginé et réalisé un système permettant le déploiement d'une toile, le velum, au-dessus des gradins des amphithéâtres.

Si de nombreux récits et fresques anciens témoignent de l'existence de ces velums, peu d'indices dévoilent le secret du système de dépliement/repliement ou de l'installation sur les structures des arènes. René CHAMBON, ingénieur des Arts et Métiers à la retraite, décida, à l'automne 2003, de consacrer son temps libre à la résolution de cette énigme. Après plusieurs années de recherches bibliographiques et de déplacements sur les sites des vestiges d'amphithéâtres romains, ce passionné d'antiquité imagina comment les Romains pouvaient installer, déployer et replier 25000 m² de toile, pour un poids total d'environ 8 tonnes, au-dessus des gradins du Colisée de Rome pour protéger les 50000 spectateurs des ardeurs du soleil.

Fort de son expérience d'ingénieur, René CHAMBON a réalisé des maquettes physiques à échelle réduite au 1/100 pour explorer son hypothèse sur la procédure d'installation et sur le principe du système de déploiement et repliement de la toile, ainsi que des calculs de résistance des matériaux pour le dimensionnement du système pour supporter le poids du velum. Les résultats de ses travaux firent l'objet de reportages TV, de conférences et d'articles de journaux.

Convaincu par son enthousiasme et la qualité de sa démarche, Dassault Systèmes s'est proposé de mettre la théorie de René CHAMBON à l'épreuve de ses outils de conception et de simulation scientifique, passant ainsi à la maquette numérique et des calculs 2D statiques linéaires à des calculs 3D dynamiques non linéaires mieux adaptés pour rendre compte de la réalité



La géométrie numérique en trois dimensions de la toile a été réalisée grâce au logiciel CATIA V5. L'utilisation de paramètres, tels que les dimensions de la toile, le nombre des rectangles de toile ou encore leur inclinaison, permettent de mettre à jour la géométrie en quelques clics et de passer ainsi facilement de l'arène du Puy du fou à celle du Colisée. Ce modèle géométrique 3D sert ensuite de support à la simulation numérique 3D du comportement mécanique du velum. Cette simulation est réalisée entièrement avec Abaqus, l'outil de simulation non linéaire par méthode éléments finis de SIMULIA. Il fut particulièrement important de bien affiner le comportement de la toile et des drisses, de bien gérer les multiples contacts et frottements de cette étude ainsi que l'influence du poids du système pour pouvoir mesurer précisément les efforts fournis à chaque drisse par les tireurs. Cet important travail préalable était nécessaire pour pouvoir lancer la simulation numérique, qui a nécessité une puissance de calcul certaine mais accessible à un ordinateur portable.

L'animation 3D réaliste des déformations de la toile et des câbles au cours du repliement et du déploiement du velum, ainsi que l'analyse des efforts nécessaires à chaque instant, finirent de valider que le système imaginé pouvait effectivement fonctionner. Cette simulation montre aussi que la force d'un homme était suffisante pour actionner chaque treuil, et ce même en cas de problème de synchronisation des tireurs ou défaillance passagère d'un tireur. Le modèle paramétré de Dassault Systèmes, en permettant de faire varier le nombre de drisses réparties autour du stade, a permis de démontrer que le nombre de drisses effectivement recensé sur le Colisée était bien dimensionné relativement aux efforts à fournir par les tireurs, même lors des phases critiques à la fin du repliement, quand le poids de la toile et les frottements sont maximaux.

Ce modèle 3D Dassault Systèmes entièrement paramétré ainsi mis au point peut maintenant s'appliquer aux vélums modernes, où les tissus synthétiques et les moteurs se substituent au chanvre, au lin et aux tireurs de l'Antiquité.

Les leçons du passé pourraient donc ainsi s'appliquer au présent, permettant le dimensionnement et la construction rapide d'abris, que ce soit pour abriter des spectacles ou des réfugiés privés de leur habitation par une catastrophe naturelle par exemple.

Objectifs

Dassault Systèmes a proposé de valider le principe de fonctionnement du velum élaboré et proposé par les travaux de Mr CHAMBON, grâce aux solutions 3D CATIA V5 R18 et Abaqus 6.8.1 sur les points suivants :

- Simulation du comportement mécanique de la toile en 3D et temps réels lors du repliement/déploiement de la toile
- Détermination des efforts nécessaires pour déplier/replier la toile ainsi que des valeurs des déformations des structures

Cette étude est menée sur un ordinateur portable muni d'un processeur dual core de 2 GHz et 2 Go de RAM.

Dassault Systèmes attaque un marché encore peu connu dans le monde de la simulation. Après KHEOPS, le VELUM est un exemple supplémentaire démontrant la **capacité de ses outils de conception et de simulation à s'adapter** à tous les domaines.

CREATION DE LA GEOMETRIE



Figure 1 : maquette 3D échelle réduite des arènes de Nîmes présentée au journal de FRANCE 3 par René CHAMBON



Géométrie paramétrée de la toile

Le modèle est basé sur les caractéristiques d'un stade de longueur 102 m pour une largeur de 78m. Il est piloté par différents paramètres, permettant une mise à jour facile et rapide de la géométrie.

La forme elliptique du vélum présentant 2 plans de symétrie, le modèle se limite à $\frac{1}{4}$ d'ellipse avec des conditions de symétrie appliquées aux bords, afin de limiter la taille du modèle éléments finis et ainsi minimiser les temps et ressources de calculs.

La géométrie de la toile dépliée est générée dans CATIA V5 à l'aide de l'outil *Knowledge Pattern* (KP), qui permet la création automatique et paramétrée de structures géométriques répétitives mais pas nécessairement tout à fait identiques (non réalisables avec les outils classiques de répétitions linéaires ou circulaires). Les *KP* se présentent sous la forme de scripts pouvant faire référence à des *features* (géométrie ou paramètres utilisateur) de l'arbre de spécification *CATIA* et pouvant utiliser des boucles itératives. La géométrie créée par un *KP* apparaît sous la forme de *datum* (feature isolé dans l'arbre) et est référencée dans des *Lists* (tableaux indicés). Ces *features* sont entièrement régénérés (effacés et recréés) à chaque exécution des *KP*, manuellement ou automatiquement (en définissant des priorités) dès qu'un paramètre utilisateur est modifié ou qu'un des *features* créés est supprimé. L'outil *KP* est accessible depuis le *workbench Product Knowledge Template* et les *features KP* sont créés sous le nœud *Relations* dans l'arbre de spécification.

Dans le cas présent, deux *KP* sont exécutés successivement.

Un premier *KP* permet de créer les arêtes (représentées par des droites) des segments de toile à partir :

- du périmètre de l'arène (représentée par une courbe pilotée par les 2 rayons de l'ellipse)
- ainsi que des paramètres utilisateurs définissant le nombre de drisses, leur angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale et la longueur des segments de toile.

Ces arêtes sont ensuite utilisées dans un second *KP* pour générer les surfaces représentant les segments de toile entre les drisses. La forme initiale des plis de la toile sous l'effet de la pesanteur est approximée par des profils de type splines variant le long du périmètre de l'ellipse de manière à ce que les segments de toile aient des largeurs à peu près identiques. Les plis seront ensuite déformés sous l'effet de la pesanteur lors du calcul.

La modification d'un paramètre (nombre de drisses par exemple) déclenche l'exécution successive des 2 *KP* : la mise à jour de la géométrie est terminée en quelques secondes. L'utilisation d'une *Design Table* permet de définir des configurations prédéfinies (jeux de paramètres différents) correspondant à différentes arènes.

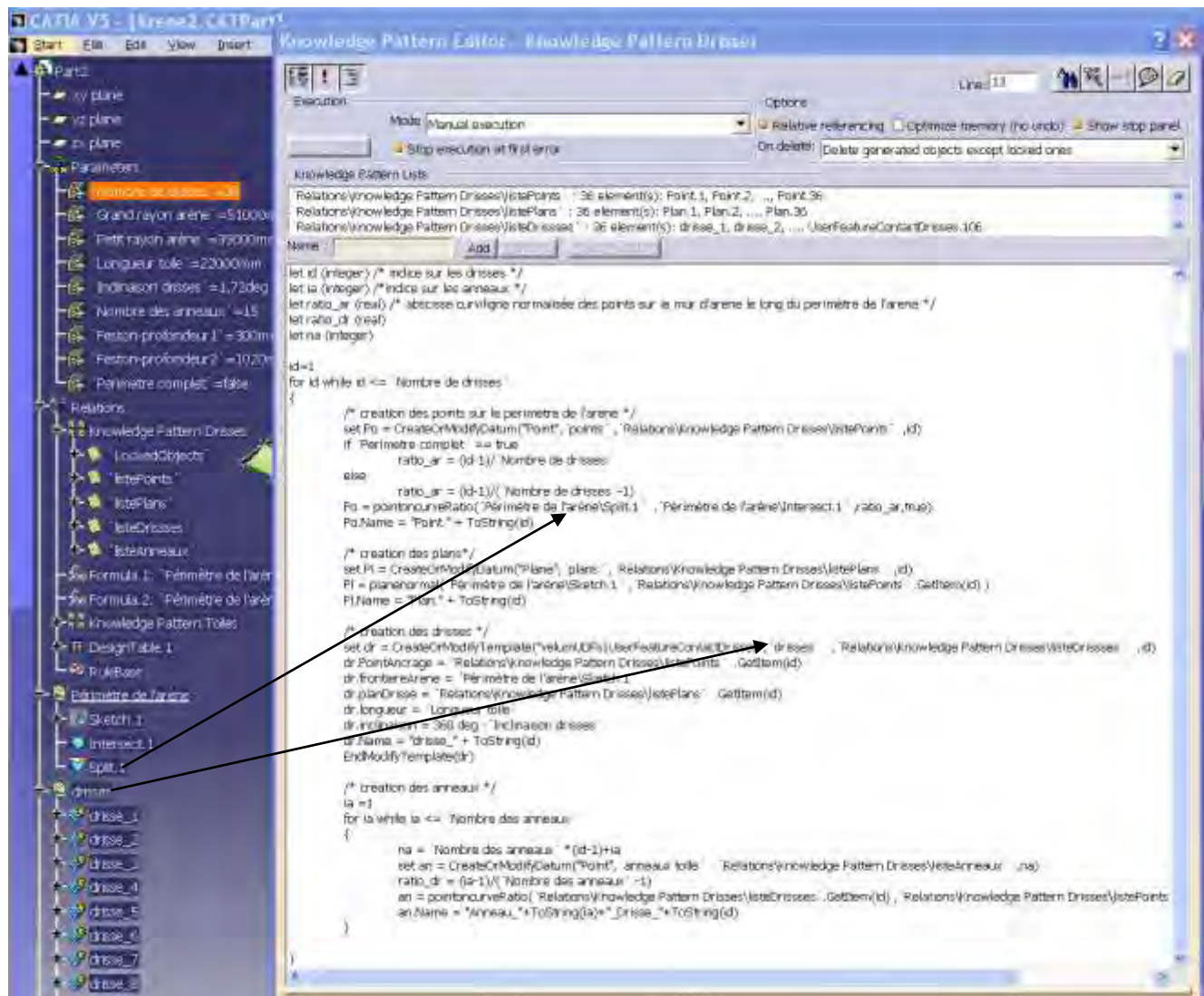


Figure 2 : exemple du script du 1er KP

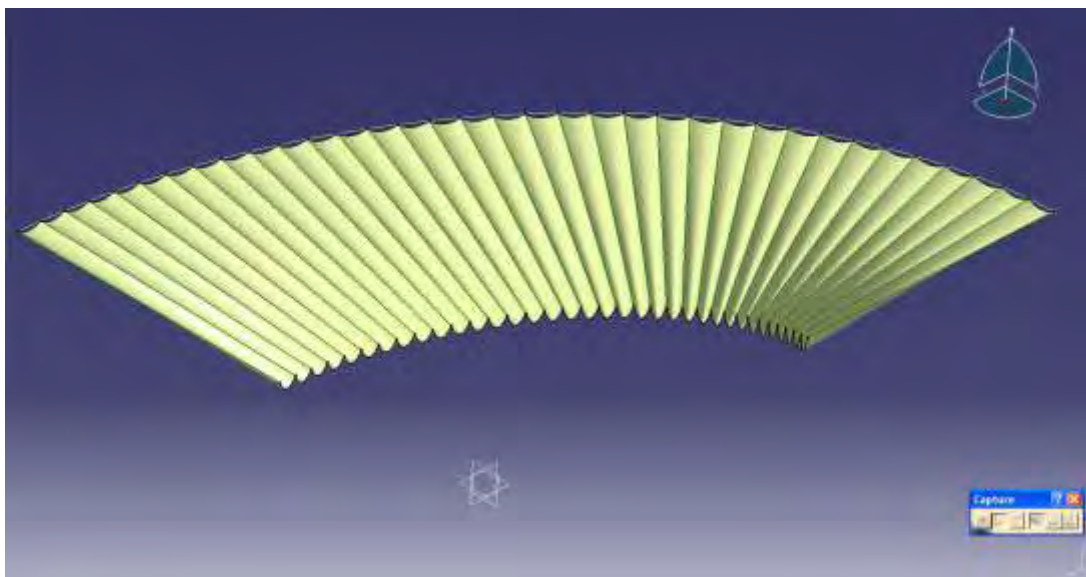


Figure 3: géométrie de la toile générée par les *KP*

METHODE DES ELEMENTS FINIS

Le modèle d'analyse du quart d'ellipse

Des **hypothèses de simulation** sont nécessaires pour figer des valeurs par défaut dont nous ne disposons pas à l'heure de l'étude. Ainsi certaines valeurs caractéristiques mises en jeu sous l'Antiquité ne sont pas disponibles : une approximation est basée sur les caractéristiques matériaux actuels. Par exemple la carte matériau de la toile en coton ou lin s'est inspirée de celle de la ceinture de sécurité du « Example Problems Manual.3.3 ». De même pour la valeur du coefficient de frottement des anneaux sur les drisses. Ces valeurs peuvent jouer le rôle de paramètres de recalage du modèle d'analyse.

Réaliser l'ensemble du système comme un clone de la réalité aurait été long, fastidieux en mise en données, et extrêmement couteux en temps de calcul. Nous avons donc fait une **modélisation** en adéquation avec les ressources disponibles.

L'analyse du scope de l'étude permet de cibler les composants nécessaires à la simulation. L'étude porte uniquement sur la phase de repliement et déploiement de la toile au dessus de l'arène. Les mâts et l'anneau central sont dans un état d'équilibre puisque le bras reliant ces deux entités est tendu pendant cette période. C'est pourquoi dans notre étude les mâts et l'anneau central ne sont ni matérialisés, ni modélisés. Seuls les poulies, les drisses, les anneaux et la toile sont sollicités et donc modélisés. La figure suivante illustre le modèle ainsi mis en jeu

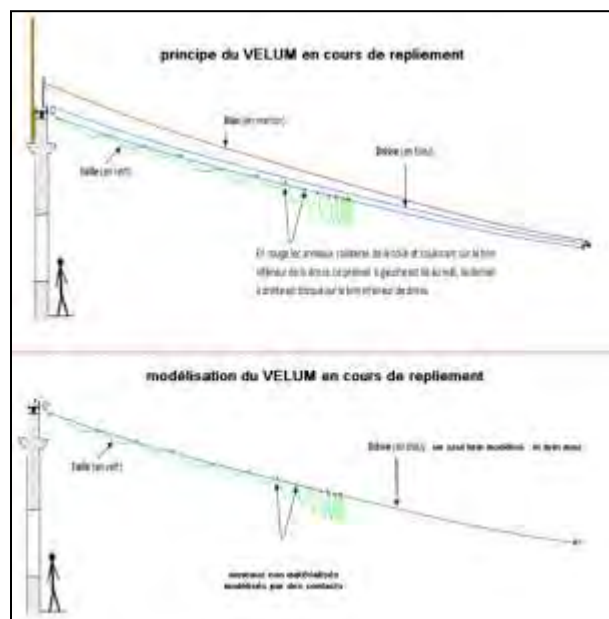


Figure 4 : principe physique et modélisation - comparaison

Rappelons que la géométrie de la **toile** est extraite de CATIA. Le maillage et la mise en données sont faits dans Abaqus CAE.

Les **anneaux**, pièces toriques dans la réalité, n'ont pas été matérialisés par des Parts dans le modèle Abaqus. Ce niveau de détail aurait impliqué de raffiner également les maillages de la toile et des drisses, rallongeant ainsi considérablement les temps de calcul, sans que cela n'améliore significativement la précision des résultats pour autant, tout en rendant la convergence plus difficile. Le principe de fonctionnement de ces anneaux est donc modélisé par un contact entre la toile et les drisses. Ainsi on récupère la notion d'effort lié au frottement existant entre les anneaux et la drisse en jouant sur le coefficient de frottement du contact ajustable.

La mise en données géométrique des **drisses** est faite dans Abaqus CAE. Pour des raisons de limitations actuelles d'Abaqus dans la gestion des contacts (des drisses avec les anneaux de la toile), chaque drisse a été modélisée par une surface déformable et non pas une courbe comme on aurait pu l'imaginer à priori.

La modélisation des **poulies** est faite par l'intermédiaire des connecteurs **SLIPRING**, disponibles dans Abaqus CAE. On peut ainsi récupérer les efforts au centre de la poulie, et ajouter la notion de frottement du câble sur la poulie. De manière générale les connecteurs permettent de modéliser par des éléments filaires des relations mécaniques complexes en utilisant des géométries simplifiées au maximum.

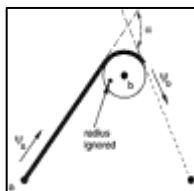


Figure 5 : schéma du connecteur SLIPRING = poulie

Toutes ces pièces déformables utilisent un matériau linéaire élastique. Cependant l'étude portant sur des grands déplacements de près de 22m où on veut prendre en compte les effets dynamiques, le **solveur explicite** d'Abaqus est retenu.

Mise en données géométrique

La création du modèle dans le CAE est basée sur un import de géométrie de la toile paramétrée générée dans CATIA V5R18. On crée ensuite sur la même échelle les pièces élémentaires drisses nommées sur les figures suivantes **PART-3** et squelettes **PART-1**.

3 parts élémentaires sont nécessaires :

Le **squelette** est la base de l'installation du système de connecteur notamment le système de poulie, il permet la mise en position de chaque pièce les unes par rapport aux autres.



Figure 6 : PART-1 = squelette

Représentant physiquement une boucle de câble de section circulaire, la **drisse** est modélisée par une surface déformable pour permettre la définition de son contact avec les anneaux. La drisse contient un repère local pour faciliter son positionnement dans l'assemblage lors de son instanciation. Le repère local de cette drisse est nommé *part3-1_radN* (*N variant de 1 à 36*).

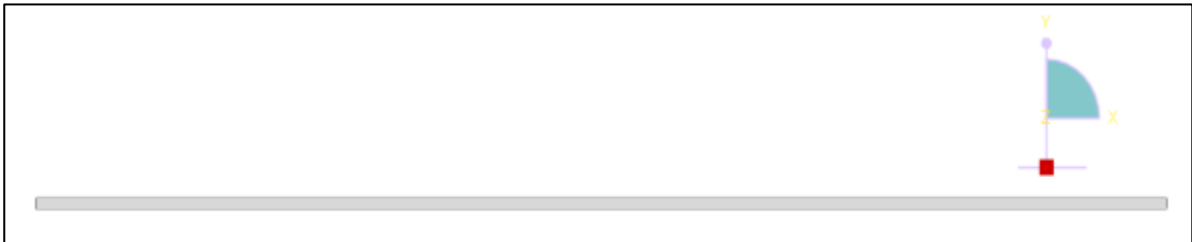


Figure 7 : PART-3 = drisse

La *Part* de la toile est obtenue par importation de la géométrie CATIA. Elle est constituée d'un assemblage de segments de toile mis arbitrairement en forme. Elle peut être amenée à changer, à chaque exécution des *knowledges patterns* dans CATIA suite à la modification d'un paramètre (ex : diminution du nombre de drisses, ...). Elle présente 36 traces de drisses.

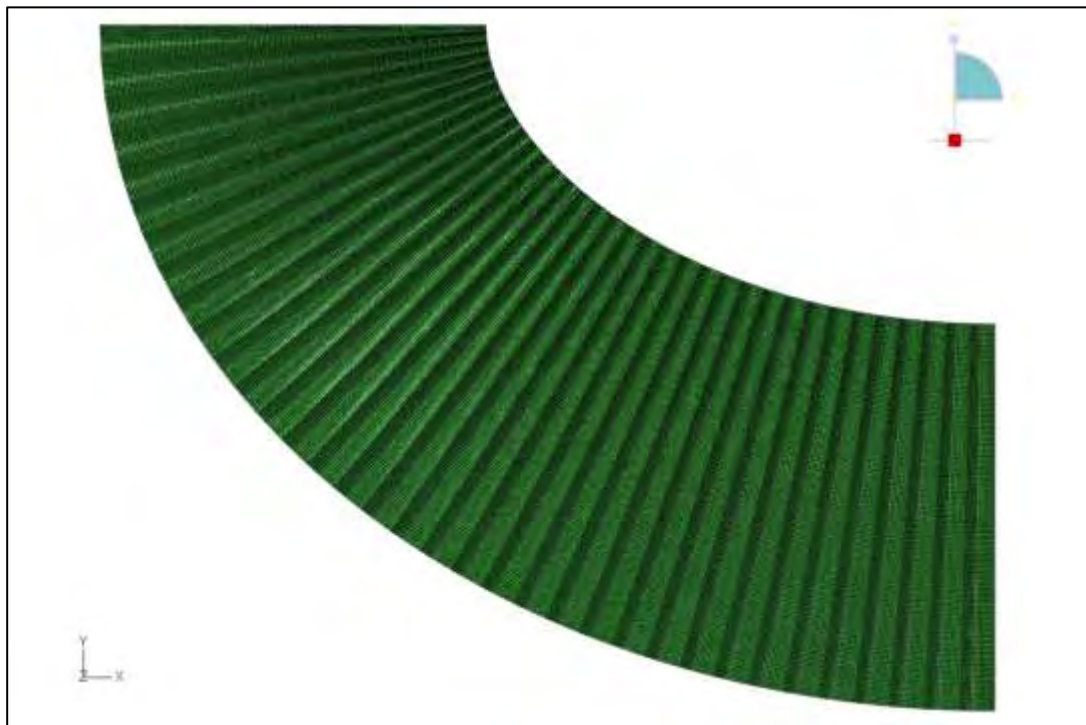


Figure 8 : VELUM=la toile

N*36 sets géométriques sont créés

Des sets géométriques sont créés dans ces parts pour faciliter la mise en données des chargements, et des conditions aux limites. Notamment la création des sets d'anneaux sur la toile de *R01 à R36*, les sets de symétries *SYM1* et *SYM2*, le set d'accroche de la toile sur les murs de l'arène *CLAMP*, le set d'accroche des poulies des drisses sur le mur de l'arène *RP bloc*, les sets de *RP01 à RP36* des extrémités des drisses côté intérieure de l'ellipse.

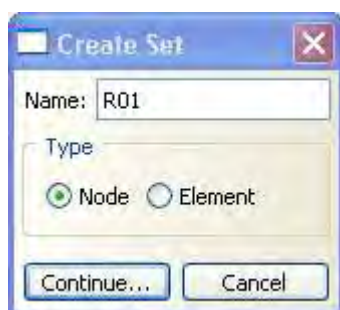


Figure 9 : création d'un set géométrique : anneaux (ring) sur la drisse n°1 nommée R01

L'assemblage

Dans l'assemblage est présent une seule toile, tandis que le squelette et la drisse sont instanciés 36 fois, pour le modèle présenté.

L'instanciation est une phase élémentaire, elle permet d'insérer les diverses pièces dans l'assemblage autant de fois que nécessaire.

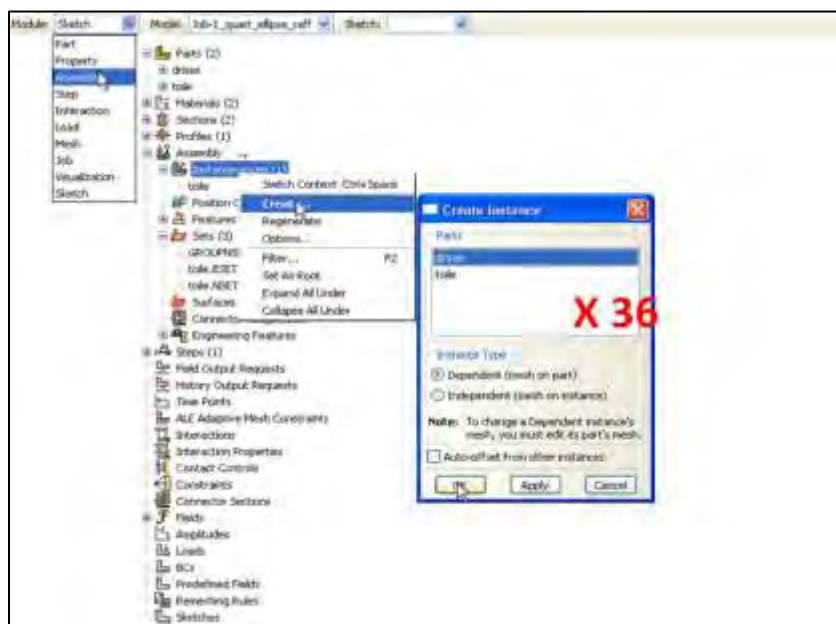


Figure 10 : création de l'assemblage par instanciation des drisses

La variation de la géométrie de la toile par les paramètres pilotés, définira le nombre d'instanciation à faire. Par exemple, si le nombre de drisses passe à 20, il ne faudra instancier les pièces drisse et squelette que 20 fois. **Toutefois Abaqus offre la possibilité d'automatiser la réalisation de tâches répétitives à travers l'écriture de macros (sous la forme de scripts Python).**

Suite à cette instanciation l'étape de **positionnement** des pièces les unes par rapport aux autres se fait par des contraintes de parallélisme entre le maillage de la toile et les repère locaux, mais aussi de coïncidence de points appartenant aux géométries.

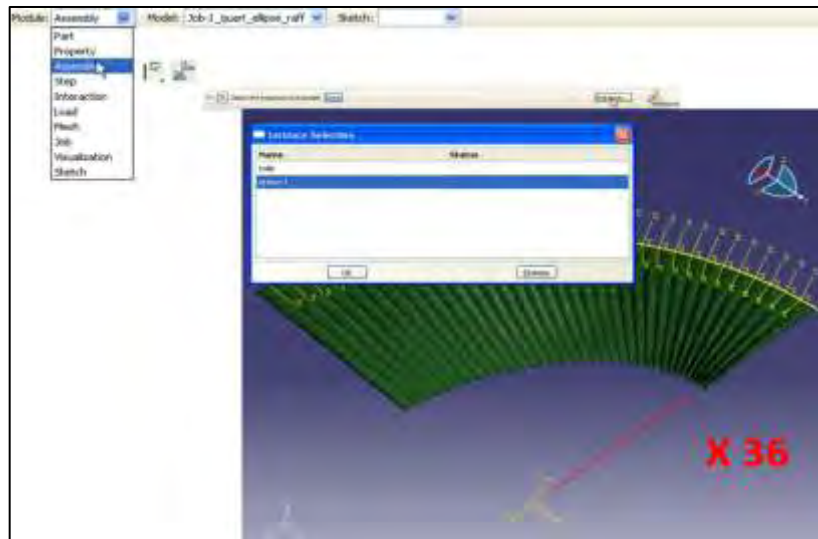


Figure 11 : positionnement des diverses entités les unes par rapport aux autres

La variation de la géométrie de la toile par les paramètres pilotés, exigera de mettre à jour et faire le tri concernant les différentes contraintes de positionnement.

Dans l'assemblage, la création de Reference point sur les *vertices* de toutes les pièces *squelette* instanciées est nécessaire pour l'application des *inerties*, représentant la masse des poulies.

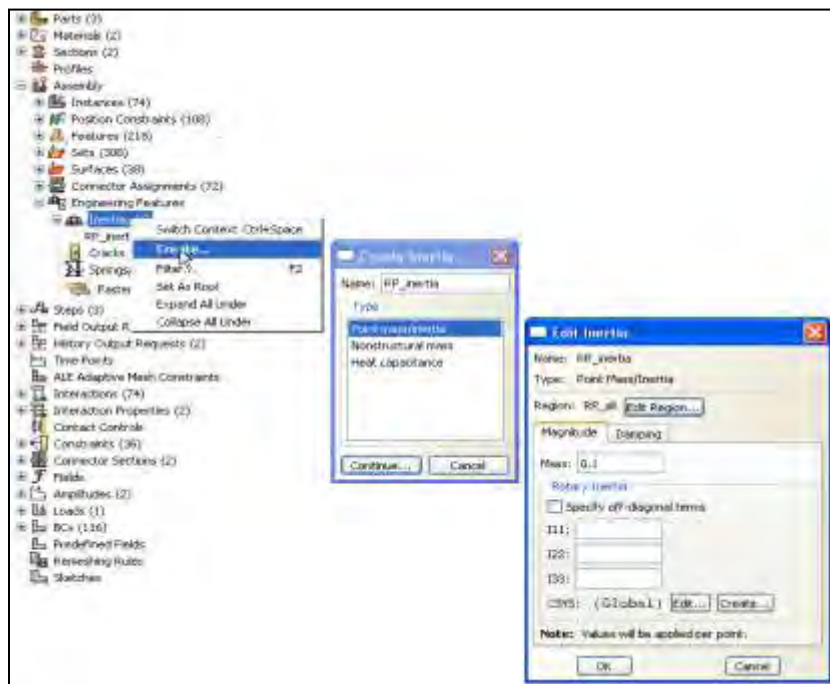


Figure 12 : création des inerties pour les masses des poulies

La variation de la géométrie de la toile par les paramètres pilotés, exigera de mettre à jour et faire le tri concernant les inerties mises en jeu dans l'étude.

Mise en données du modèle éléments finis

Les matériaux

Les caractéristiques des matériaux sont extraites du mémoire de René CHAMBON pour les drisses. Aucune information concernant la toile n'étant disponible, nous avons choisi d'approximer le comportement matériau de la toile à celui d'un matériau élastique avec un faible module d'Young, comme celui d'une ceinture de sécurité, extrait d'un exemple de la documentation *ABAQUS*.

Les caractéristiques des matériaux sont données dans la figure ci-dessous : *BELT* (pour la toile) et *CABLE* (pour les drisses).

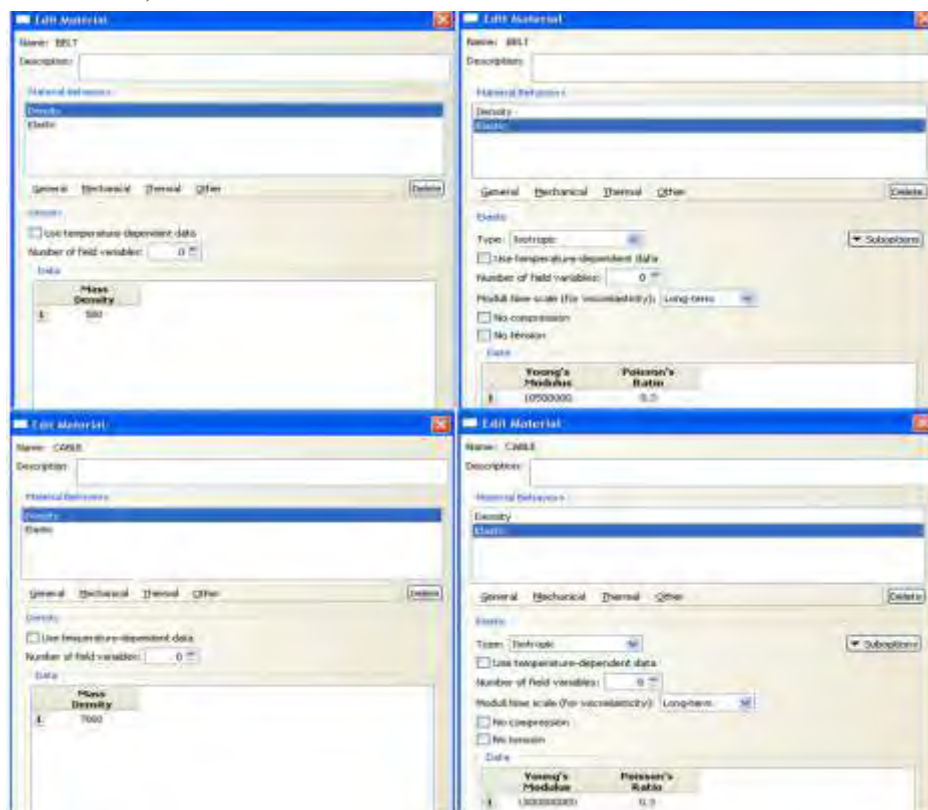



Figure 13 : caractéristiques des matériaux

Les propriétés

Dans Abaqus il est nécessaire de créer des **sections**  pour définir les propriétés des éléments : soit une membrane pour modéliser le tissu de la toile et des coques pour les drisses. En effet la propriété membrane ne présente pas de rigidité en flexion, contrairement à la propriété coque, et est donc plus appropriée pour modéliser une toile. Ces sections pointent sur les matériaux créés précédemment.

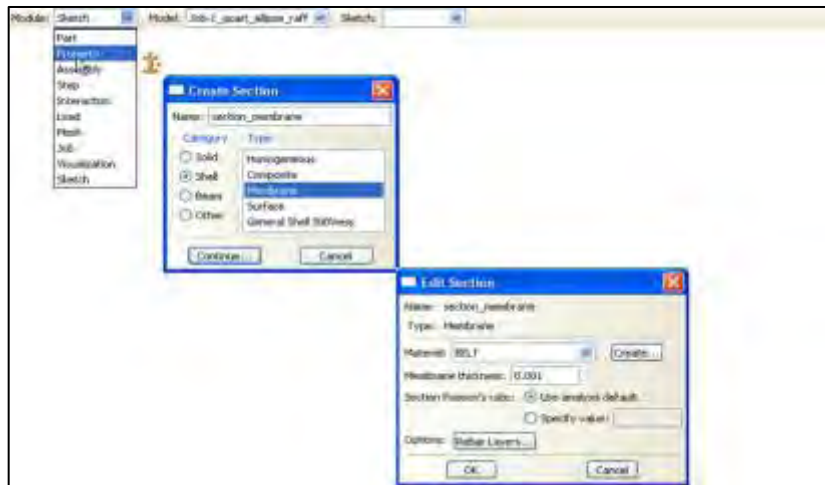



Figure 14: définition des propriétés et des sections

Il faut ensuite **appliquer les propriétés**  aux géométries ou aux maillages correspondants : soit les éléments du set *ESET-1 du VELUM* pour la membrane, et les surfaces *PART-3.surface* pour les coques.

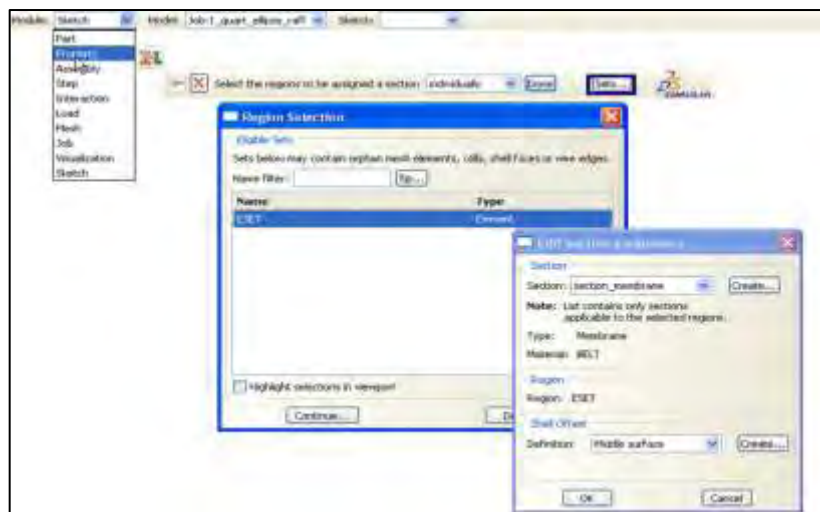




Figure 15 : assignation des propriétés

Le maillage

Le maillage est effectué préférentiellement sur la pièce et non dans l'assemblage.

La taille des éléments  du maillage est pilotée par le nombre d'anneaux à modéliser, et les dimensions d'un segment de toile. Ainsi pour le modèle à 14 anneaux et un segment de toile de l'ordre de 2140mm sur 22000mm, la taille des éléments du maillage de la toile est de l'ordre de 120mm (afin d'avoir suffisamment d'éléments entre 2 anneaux successifs pour tenir compte des replis de la toile), celui des drisses du même ordre de grandeur, pour faciliter la gestion des contacts entre ces deux surfaces : toile/drissé

Le **type d'éléments**  doit être en concordance avec les propriétés affectées précédemment : éléments de type *membrane* pour la toile (comme indiquée dans la figure ci-dessous) et de type *shell* pour les drisses.

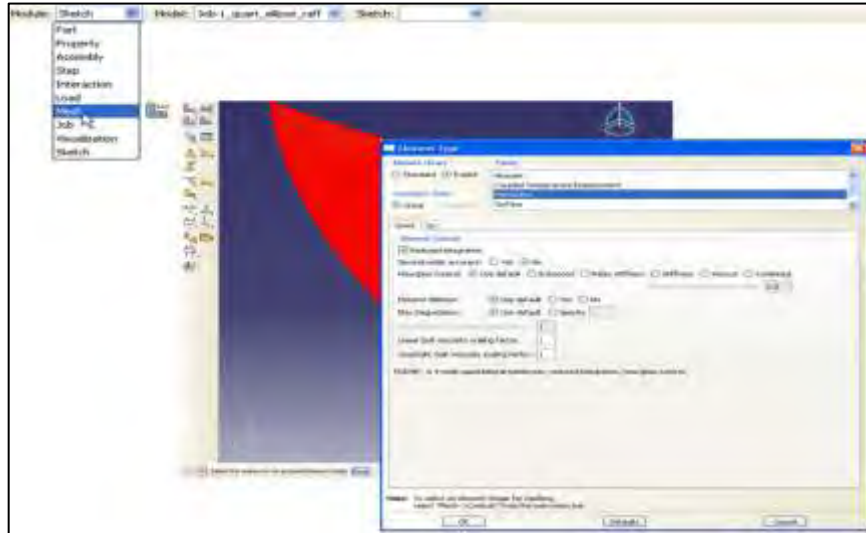


Figure 16 : définition des types d'éléments pour le maillage

Les steps

Trois étapes de calcul non linéaires sont mises en place :

L'étape **d'initialisation** ne compte pas pour un *step* à part entière. Elle permet de mettre en place les contacts, les conditions aux limites dès l'incrément 0.

La première étape consiste à mettre le système **dans un champ de gravité**, nécessaire pour obtenir une toile déformée par son propre poids. La durée de ce step est d'1s.

La seconde présente la mise en données du **repliement** de la toile sur elle même. Ce repliement de la toile est piloté par une condition aux limites de vitesse de repliement sur le connecteur *SLIPRING*. Ce repliement est simulé sur une durée de 60s.

La troisième étape décrit le **déploiement** de la toile sur l'arène. De la même façon que précédemment, une vitesse d'amplitude inverse est appliquée sur le connecteur *SLIPRING* sur une durée de 60s.

A noter que la gravité continue de s'appliquer lors des étapes de repliement et déploiement.

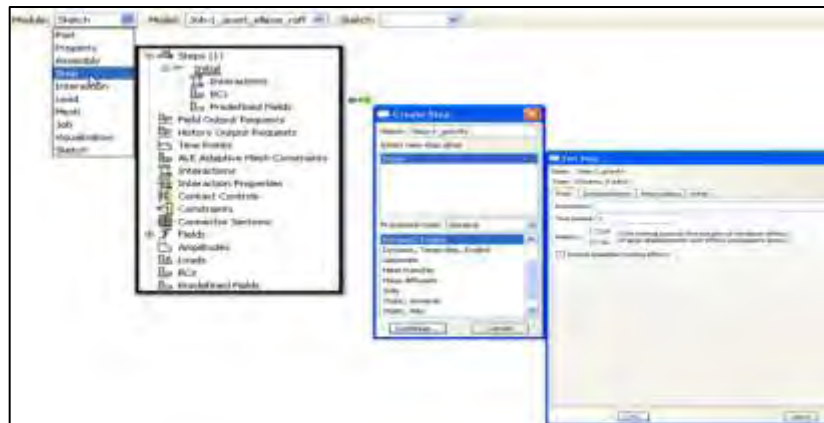



Figure 17 : création des steps

Les interactions

Dans un premier temps les **propriétés d'interaction**  sont nécessaires pour définir tous les types de contact. Cette étude présente deux types de contact : le contact de la toile sur elle-même (*contact_friction*), et la modélisation des anneaux par la gestion de contact « sans séparation » entre la toile et les drisses (*contact_no_separation*).

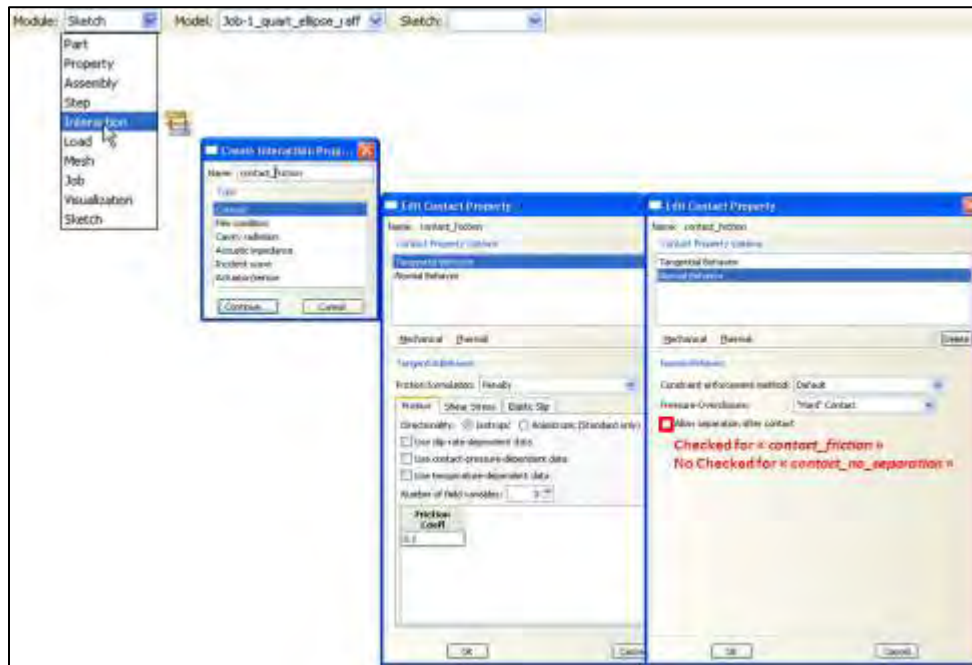



Figure 18: définition des interactions

Dans un second temps il faut définir les contacts (*self contact* pour le contact de la toile sur elle-même et *Surface-to-Surface* contact pour chaque contact des anneaux sur la drisse) et **assigner**  à chaque contact la propriété correspondante à son comportement. Remarque : la « *first surface* » correspond à la partie « maître » du contact (la surface par rapport à laquelle sont vérifiées les interpénétrations), la « *second* » à la partie « esclave ». La partie « maître » dans une étude tridimensionnelle est obligatoirement une surface de type continu. De plus pour suivre la physique du phénomène, il est nécessaire que la pièce drisse soit « maître », d'où la modélisation du câble drisse par une surface équivalente. Par ailleurs le contact drisse/ toile, « *sans séparation* », permet la modélisation des anneaux sans avoir à les matérialiser par des *Parts*. Afin de limiter les calculs de contact (couteux en temps CPU), les anneaux ne sont mis en contact qu'avec leur drisse correspondante, d'où la définition d'un contact pour chaque drisse (soit 36 contacts dans notre exemple) et non pas d'un contact unique.

A noter qu'Abaqus offre la possibilité d'automatiser la réalisation de tâches répétitives à travers l'écriture de macros (sous la forme de scripts Python).

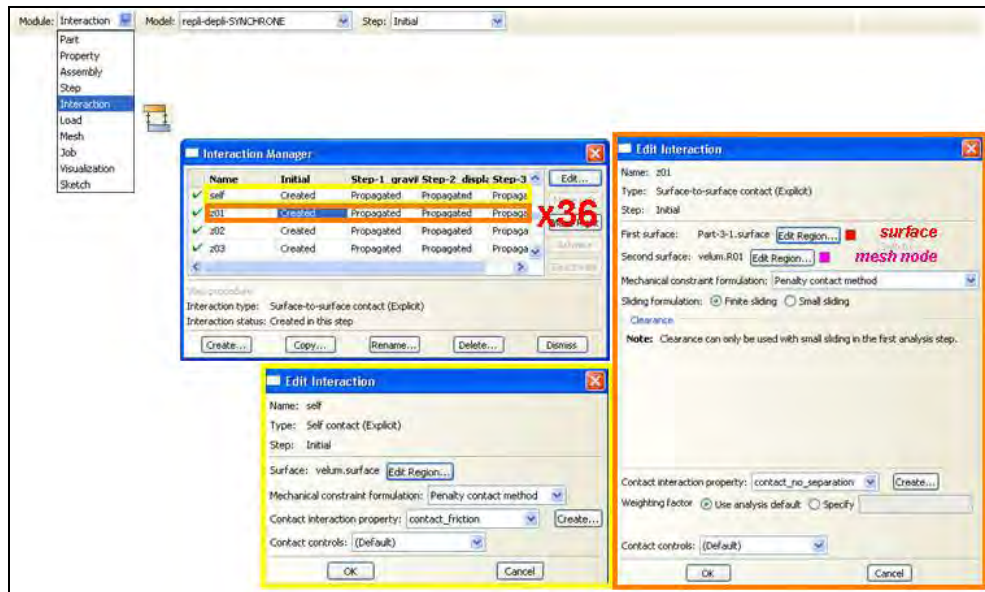


Figure 19: application des interactions sur des éléments ou des géométries

Les amplitudes

Des **amplitudes** sont utilisées pour l'application des conditions aux limites de vitesse de repliement/dépliement de la toile et de chargement non nul. Elles sont très pratiques pour piloter facilement un grand nombre de conditions aux limites et également pour définir des profils d'évolution au cours du temps de l'amplitude des conditions aux limites. Pour notre étude l'amplitude de **type Smooth step** est utilisée pour lisser les profils en imposant une tangence horizontale entre chaque palier de valeur, limitant le bruit numérique et se rapprochant plus du phénomène physique réel (ex : le repliement de la toile démarre avec une accélération nulle).

Deux amplitudes sont ainsi créées pour l'application :

- de la gravité : l'amplitude évolue linéairement sur toute la durée du step de mise en gravité (1s).
- des vitesses : la vitesse palier de 0.224m/sec pour le repliement/dépliement de la toile est appliquée entre les instants 0.5sec et 59.5 sec du step (rappel : les steps de repliement et de dépliement simulent une durée de 60s chacun).

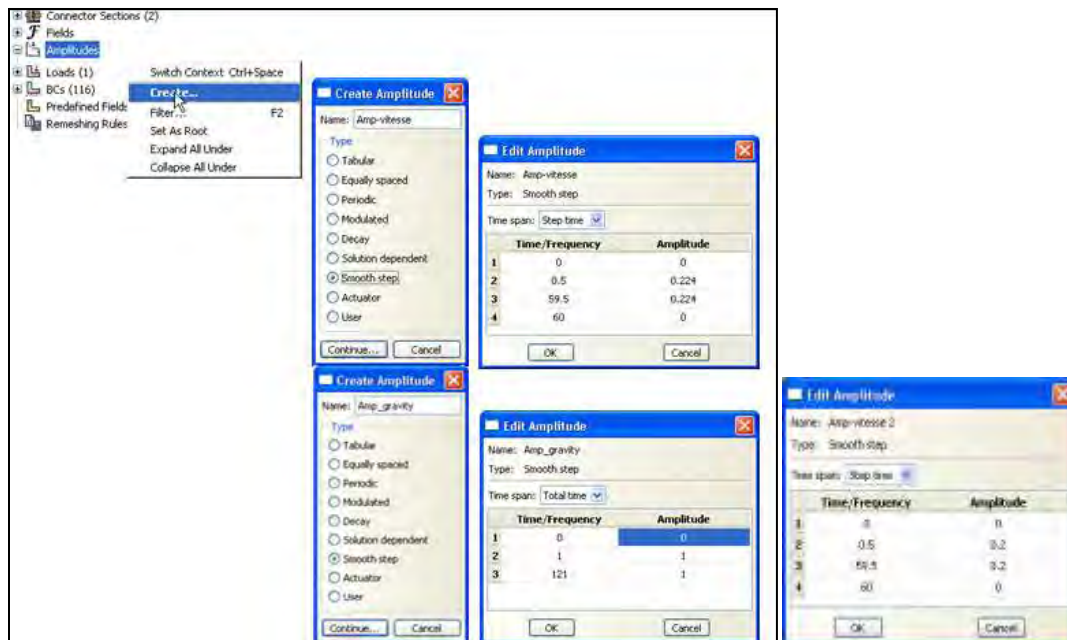


Figure 20 : définition des amplitudes utilisées pour la gravité et les déplacements de la toile pilotés en vitesse

Les chargements

Disponible uniquement à partir du *step1*, la notion de **gravité** est appliquée à tout le modèle. L'application du champ de gravité se fait en douceur à l'aide de l'amplitude décrite précédemment *Amp_gravity*.

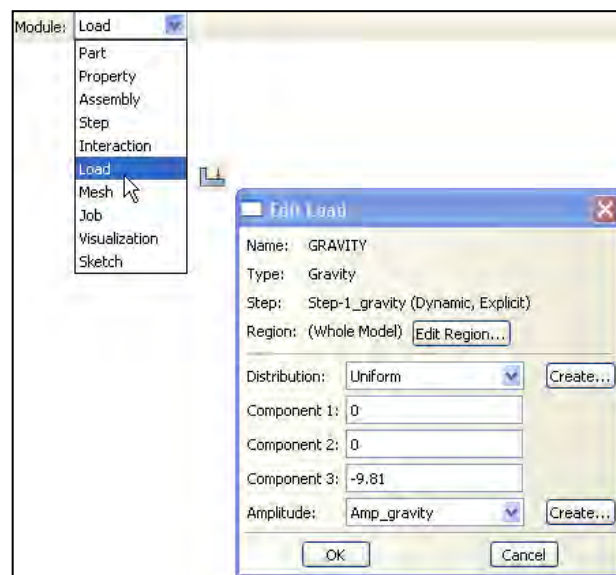


Figure 21: définition du chargement champ de gravité

Les conditions aux limites

Plusieurs types de conditions aux limites existent.

Toutes les conditions aux limites de **déplacement nul** sont définies au *step initial* du calcul.

- La **symétrie** : l'ellipse admet 2 symétries, c'est pourquoi aux limites du quart d'ellipse sont appliquées deux symétries telles que définies dans les figures ci-dessous ;

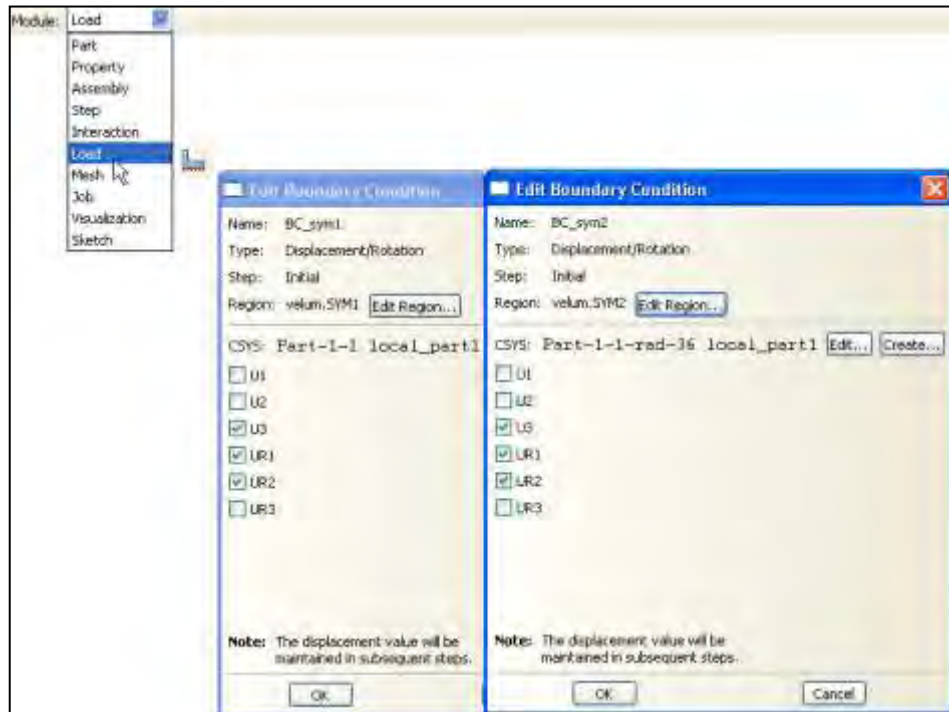


Figure 22 : définition des conditions aux limites concernant la symétrie du modèle

- L'encastrement des extrémités des drisses, des poulies et de la toile dans le mur,
- Le maintien des drisses et anneaux dans le plan des drisses.

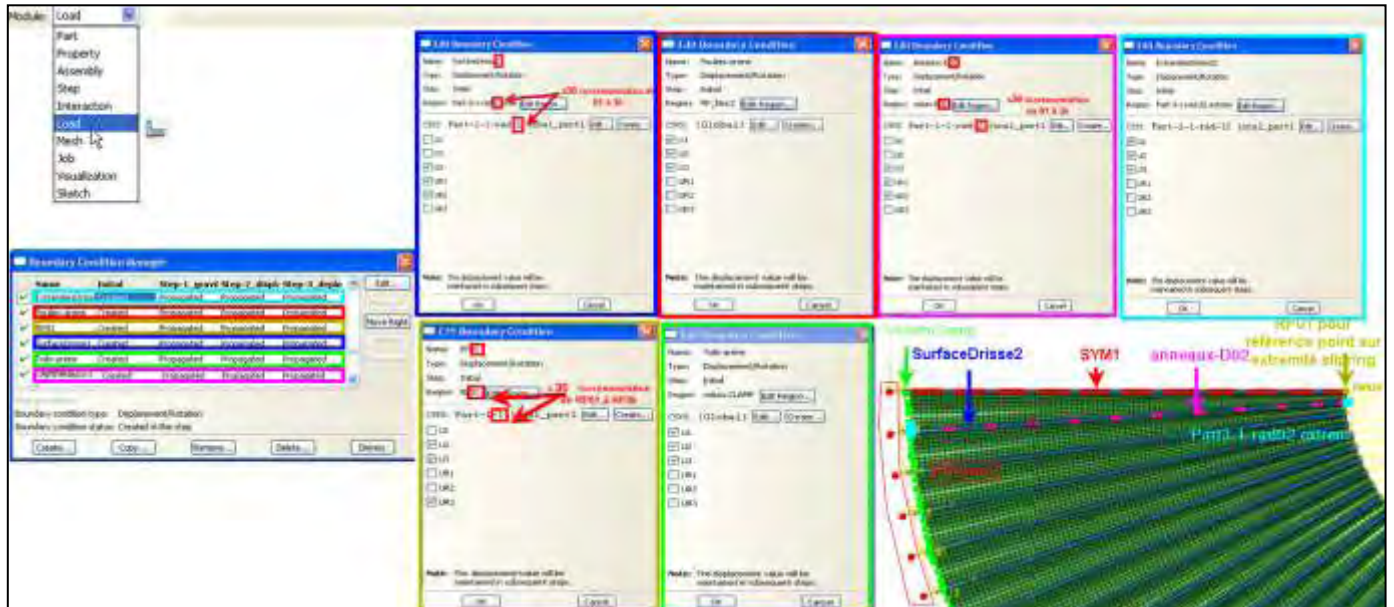


Figure 23 : définition des conditions aux limites de déplacements nuls

Seules les conditions aux limites **de vitesses** sont introduites respectivement aux étapes de repliement et de déploiement.

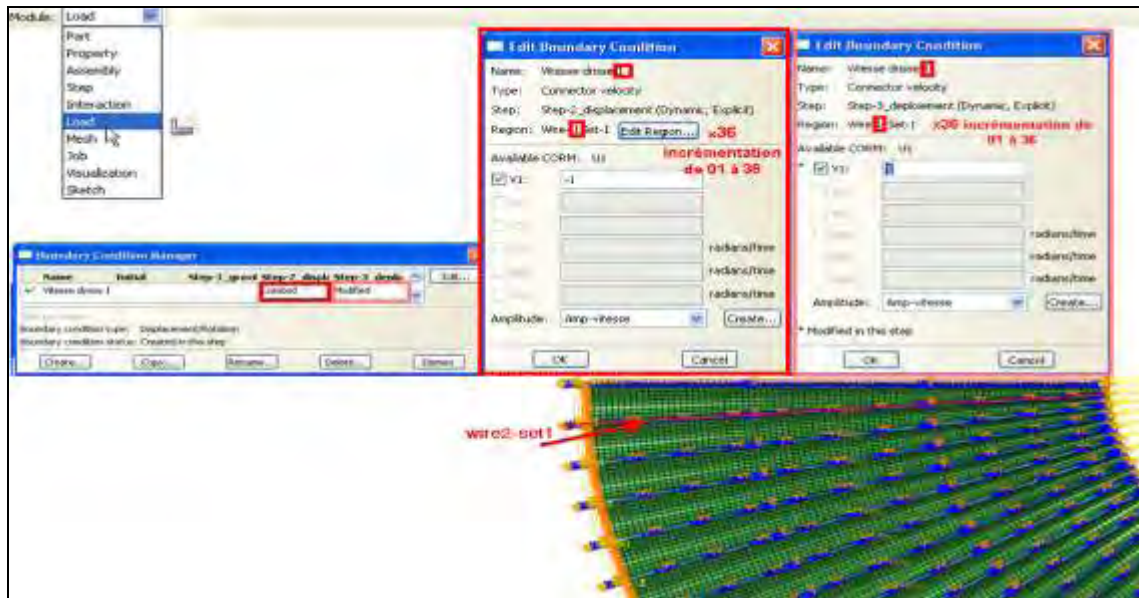



Figure 24 : définition des conditions aux limites de vitesses

Pour l'étude où les hommes remontent la toile en décalé, les wires impair sont pilotés par l'amplitude Amp-vitesse, les wires paires par l'amplitude Amp-vitesse2.

La configuration du calcul

Les sorties

Il est nécessaire de renseigner les sorties que l'on souhaite étudier. Deux types de données de sorties existent :

Les **field outputs**  ont été laissé par défaut. Elles permettent de visualiser les cartographies 3D des différentes grandeurs. Remarque : la fréquence d'écriture de ces sorties détermine l'espace disque nécessaire au calcul ainsi que la fluidité des animations en post-processing.

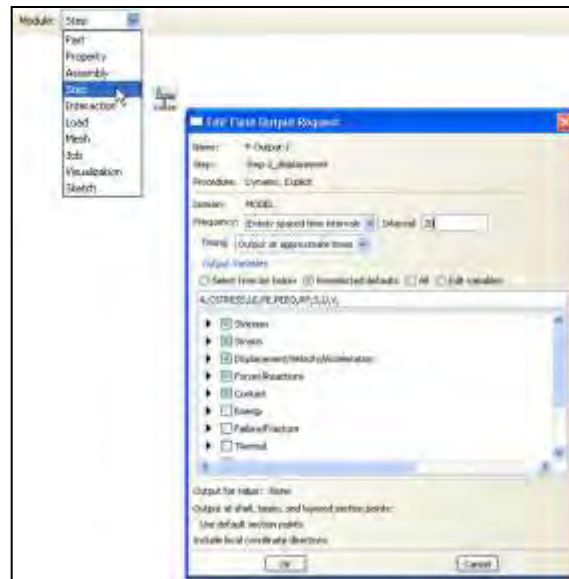



Figure 25 : création du field output

Les **history outputs**  correspondent des courbes d'évolution au cours du temps en un point ou intégrées sur un domaine. Remarque : la fréquence d'écriture de ces sorties détermine l'espace disque nécessaire au calcul et la résolution des courbes.

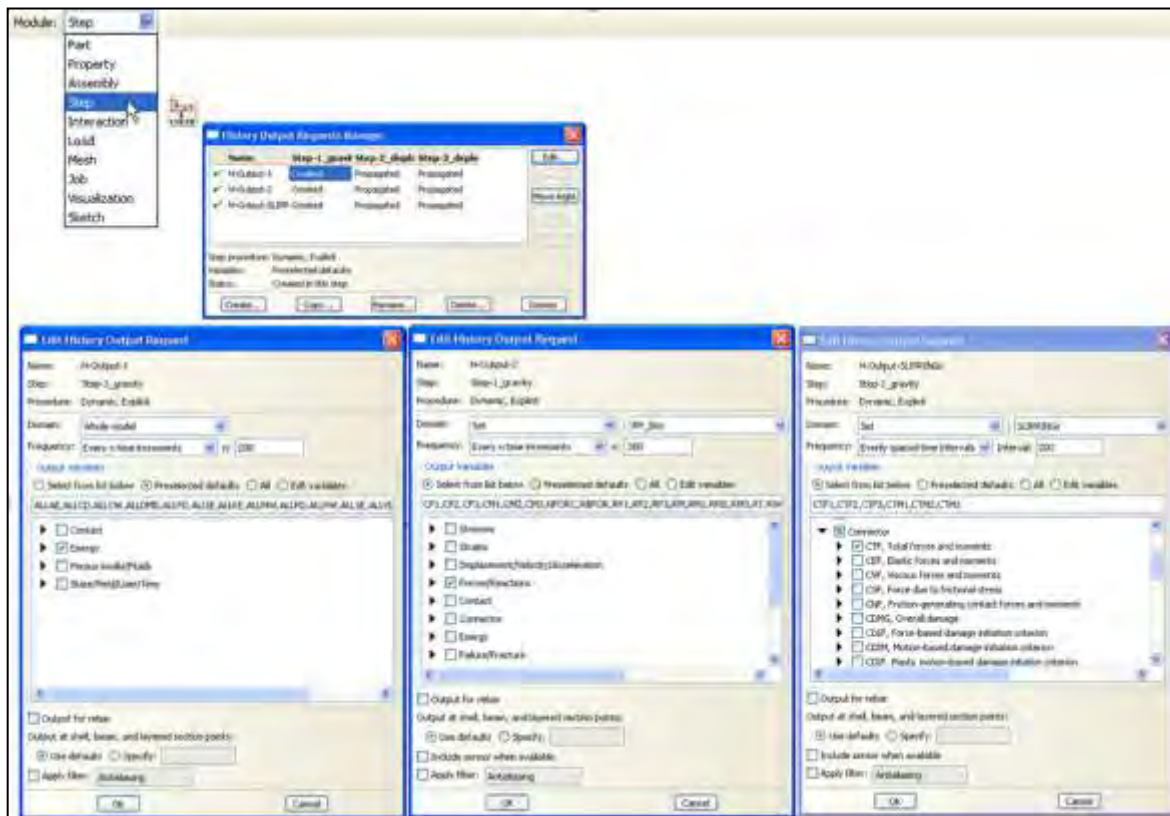


Figure 26 : création de l'history output



Création du JOB

Le lancement du calcul a été fait avec la configuration d'un *job* par défaut.

ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Le calcul non linéaire de repliement et déploiement de la toile sur l'arène prend moins de 10 heures CPU, pour 1 core sur un ordinateur portable dual core 2GHz.

Deux calculs sont menés : dans un premier temps on considère que les 140 hommes autour de l'arène activent en même temps leur treuil pour plier et déployer la toile sur l'arène. Dans un second temps le mouvement de pliage et déploiement de la toile sur l'arène est asynchrone pour refléter plus la réalité.

Première configuration : mouvement synchrone de repliement et déploiement de la toile

Les efforts mis en jeu sont présentés dans la figure ci-dessous. Les données sont brutes, sans filtre, ce qui explique le bruitage numérique dû au champ de gravité. Les efforts mis en jeu au niveau des connecteurs SLIPRING, c'est-à-dire du système de poulies, sont récupérés directement dans le repère local de chaque connecteur.

On observe que la valeur absolue de l'effort à fournir ne dépasse pas les 200N ce qui correspond à 20kg, on peut imaginer que les Romains savaient atteindre les 20kg sans problème. Rappelons que de nos jours 10kg est la valeur de l'effort dit de confort.

De plus, les efforts de repliement de la toile sur elle-même semblent d'intensité plus élevée en moyenne que celle des efforts de déploiement de la toile, ceci peut s'expliquer par l'inclinaison de la toile : le bord intérieur de l'ellipse de la toile est plus bas que l'extrémité accroché au mur. Lorsque les hommes replient la toile, celle-ci est soulevée à une altitude différente, il faut vaincre le champ de gravité car l'effort est opposé à ce champ, tandis que lorsqu'il s'agit de déployer la toile, cette force de gravité aide justement au déploiement.

L'allure globale de la courbe est similaire d'une drisse à l'autre sur le quart d'ellipse. Un pic d'effort est observable au début du cycle, ceci s'explique par l'inertie nécessaire à la mise en mouvement de la toile sur les drisses avec les frottements.

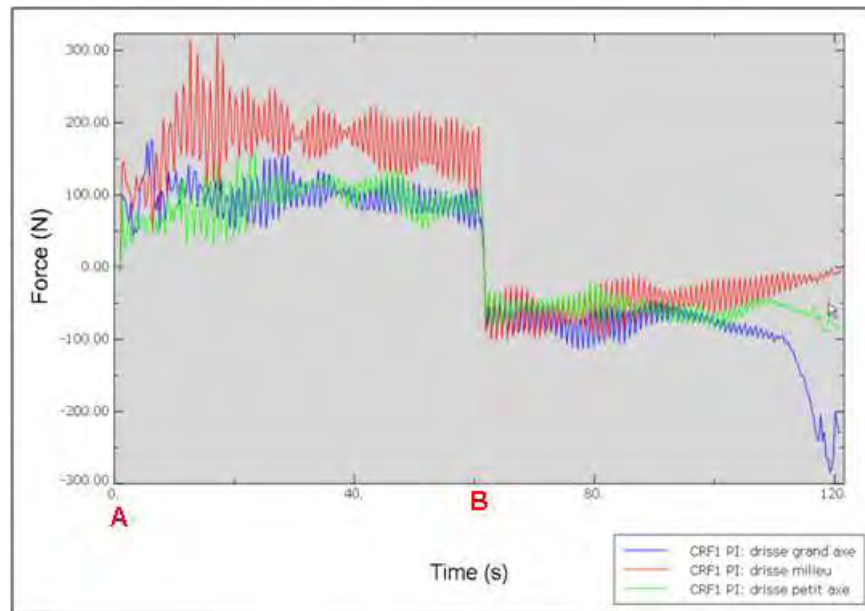


Figure 27 : Efforts en fonction des drisses (toutes les drisses étant tirées à la même vitesse)



Figure 28 : velum au temps A

-



Figure 29 : velum au temps B

Au temps B le velum est replié, et entame sa phase de déploiement.

Seconde configuration : mouvement asynchrone de repliement et déploiement de la toile

Les efforts mis en jeu sont présentés dans la figure ci-dessous. Les données sont brutes sans filtre, ce qui explique le bruitage numérique dû au champ de gravité.

En terme général, les efforts mis en jeu ne dépassent pas les 250N.

L'allure générale des courbes n'est pas la même selon l'emplacement sur le quart d'ellipse. La drisse 2 présente un retard puisqu'une vitesse plus petite de mouvement de la drisse lui est appliquée. Les efforts fournis par l'homme situé en drisse impaire (plus rapide) sont plus élevés, en effet l'homme aura davantage de masse de toile à surélever dans le premier temps de repliement de la toile. Cette masse supplémentaire permet de rendre plus facile la phase de déploiement puisque la masse est dans le champ de gravité.

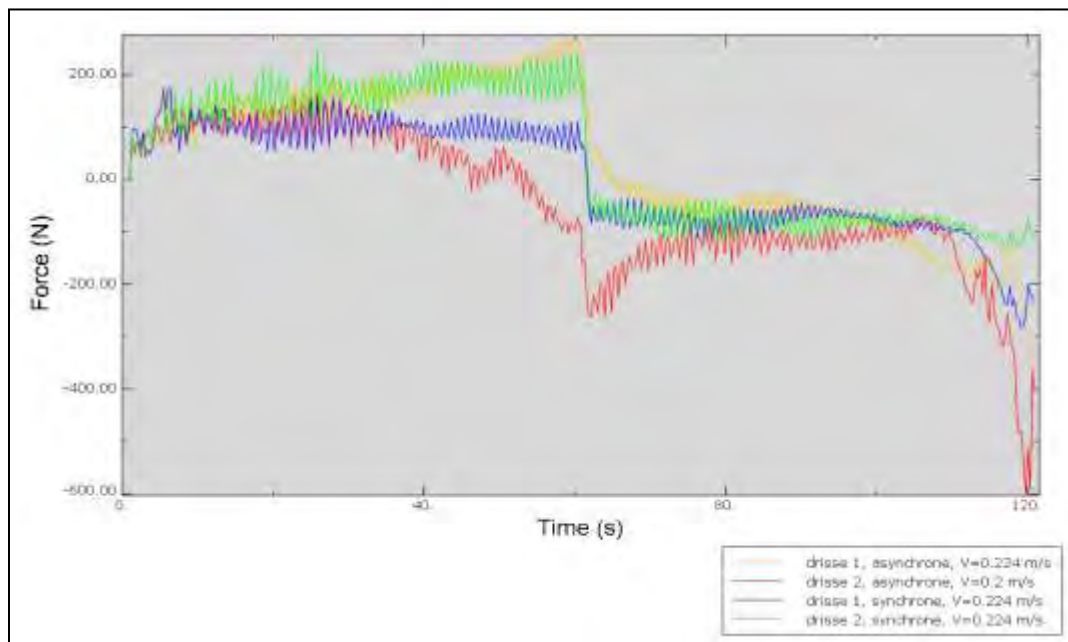


Figure 30 : Efforts en fonction des vitesses des drisses (les drisses « pairs » et « impairs » étant tirées avec 2 vitesses différentes)



CONCLUSION

Cette simulation montre que la force d'un homme était suffisante pour actionner chaque treuil, et ce même en cas de problème de synchronisation des tireurs ou défaillance passagère d'un tireur.

Le modèle paramétré de Dassault Systèmes, en permettant de faire varier le nombre de drisses réparties autour du stade, a permis de démontrer que le nombre de drisses effectivement recensé sur le Colisée était bien dimensionné relativement aux efforts à fournir par les tireurs, même lors des phases critiques à la fin du repliement, quand le poids de la toile et les frottements sont maximaux.

La simulation numérique est devenue indispensable pour expérimenter le comportement mécanique réel à moindre coût, dans les vraies dimensions et très tôt dans l'étape de conception. L'avancée technologique des fonctionnalités d'Abaqus/Explicit permet au scénario de test d'être facilement intégrable à l'étape de conception (validation du nombre de drisses nécessaire) et design (comportement de la toile au cours du temps), et ceci même sur ordinateur portable.

REFERENCES

Abaqus 6.8.1 documentation

- Analysis User's Manual.26.1.5
- Example Problems Manual.3.3