INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Département de Génie Mécanique

Projet Recherche & Ingénierie

Année 2019-2020 / Semestre 1

PRI-2019S9-VIL25-SA402

Modélisation de la dynamique vibratoire de train de tiges de forage, comparaison ADAMS/DrillSim

Pablo YARZA

N° étudiant : 04020839

29 janvier 2020

Site : Villeurbanne

Structure d'Accueil : SA VCS - Vibrations, Contrôle et Smart-structures

Tuteur(s) scientifique(s) : Régis Dufour - Lionel Manin

Organisme commanditaire : Labcom DrilLab

Contact(s) de l'organisme : Lionel Manin

Résumé

Ce rapport est un Projet de Recherche et Ingénierie mené au sein du laboratoire DrilLab. Il s'intéresse à la dynamique des équipements de forage. Les opérations de forage utilisent une longue structure en rotation introduite à l'intérieur du puits de forage. La dynamique non linéaire avec différents phénomènes peut provoquer une usure prématurée et des dommages pour les équipements de forage et devraient être étudiés pour améliorer la fiabilité des opérations de forage. Pour ces études, des logiciels de simulation sont employés pour arriver à prévenir ces événements avant qu'ils tiennent lieu. La préconisation de deux de ces logiciels va alors être faite. D'un côté DrillSim, logiciel développé au sein du laboratoire DrilLab qui emploie la méthode des éléments finis et d'un autre côté Adams Drill, logiciel de MSC Software basé sur la dynamique des multi-corps.

Abstract

This paper is a Research and Engineering Project carried out in DrilLab laboratory and deals with the dynamics of the drilling equipment. The drilling operations use a long rotatory frame inserted within the drilling pit. The non-linear dynamics with different phenomena can cause premature fatigue and damage to the drilling equipment and must be studied to improve the reliability of the drilling operation. For this research, simulation softwares are used to prevent these situations before they happen. Afterwards, a recommendation of two of these programmes will be made. On the one hand, DrillSim, software developed in the Laboratory DrilLab, which uses the finite element method, and, on the other hand, Adams Drill, software designed by MSC based on the multibody dynamics.

Table des matières

Chapitre 1. Introduction 4
1.1 Sujet 4
1.2 Contexte 4

Chapitre 2. Etat de l'art 6
2.1 Introduction au forage 6
2.1.1 Train de tiges de Forage 8
2.1.2 Paramètres de Forage 9
2.2 Logiciel DrillSim 10
2.3 Logiciel Adams Drill 12

Chapitre 3. Méthodologie 14
3.1 Prise en main de DrillSim 14
3.2 Prise en main d'Adams Drill 15
3.2.1 Règles d'utilisation 16
3.2.2 Sections principales 16
3.3.3 Equivalent Upper String 16
3.3.4 Type de tige de forage 18
3.3.5 Fluide 19
3.3.6 Instabilités 19
3.3.7 Valeurs par défaut 19
3.3 Géométrie des cas test 20

Chapitre 4. Résultats et analyse 23
4.1 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits horizontal 24
4.1.1 Analyse Equivalent Upper String 26
4.1.2 Analyse des coefficients de frottement 27
4.2 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits vertical 30
4.3 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits courbe 33

Chapitre 5. Conclusions et perspectives 38

Bibliographie 40

Annexes 41
Annexe 1 : Puits horizontal DrillSim 41
Annexe 2 : Puits vertical DrillSim 43
Annexe 3 : Puits vertical géométrie complexe DrillSim 45

Chapitre 1. Introduction

1.1 Sujet

L'objet de ce Projet de Recherche et Ingénierie est de comparer deux programmes de modélisation de la dynamique vibratoire de train de tiges de forage, DrillSim et Adams Drill. Pour ce faire, des cas de puits de forage vont être réalisés en utilisant le code de calcul par éléments finis DrillSim développé par DrilLab et le code de calcul basé sur la dynamique des multi-corps Adams Drill utilisé par MSC Software. L'étude se centrera sur un même puits simple en faisant varier des paramètres influents dans la dynamique du forage. Les déplacements et les orbites seront analysés dans les deux logiciels ainsi que les écarts et leurs origines. Pour finir, les capacités et les limitations de DrillSim et d'Adams Drill vont être développées.

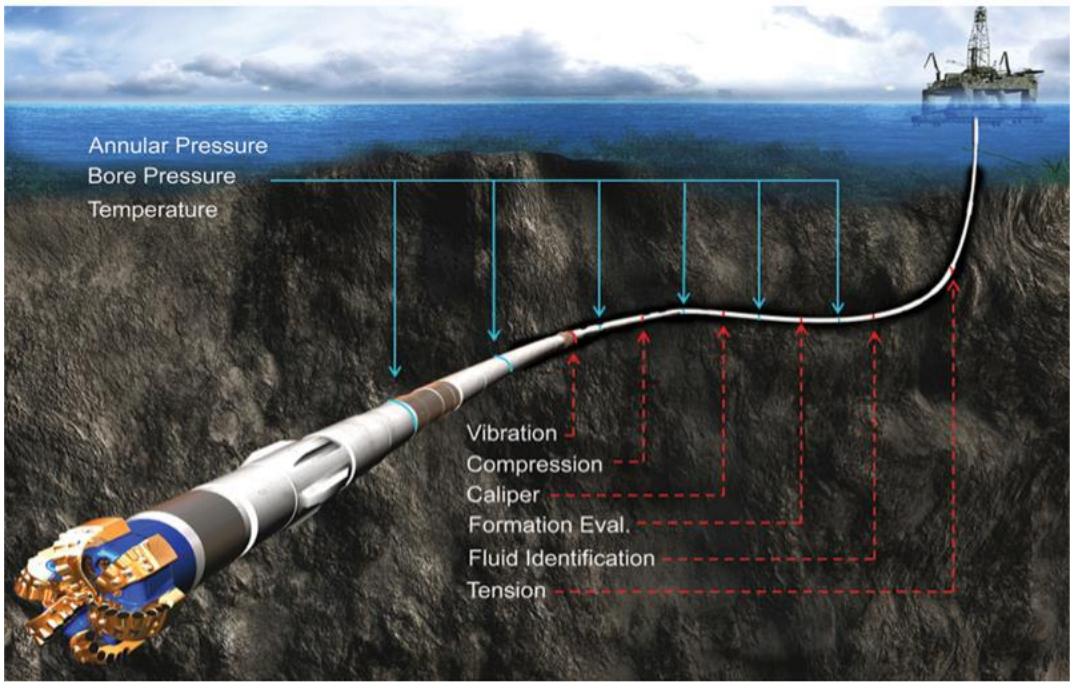


Figure 1 : Vue d'un forage pétrolier

1.2 Contexte

Ce Projet de Recherche et Ingénierie a été effectué au sein du laboratoire DrilLab qui est un laboratoire commun pour la simulation du forage pétrolier/géothermique qui s'intéresse plus particulièrement à la simulation du comportement dynamique non linéaire de trains de tiges de forage.

Figure 2: Logo de DrilLab

Créé en 2016, ce labcom est issu de la collaboration entre le LaMCoS et la PME DrillScan. Dans ce partenariat, le LaMCos apporte ses compétences en dynamique des rotors et en dynamique du forage. De son côté, DrillScan est spécialisée dans l'édition de logiciel de simulation du forage pétrolier ou géothermique. Cette entreprise possède une forte culture R&D et une compréhension complète des interactions entre les éléments roche, outil de forage et garniture de forage. Cette coopération fut rendue possible par la proximité entre les deux organismes ainsi que le soutien de l'ANR.

Chapitre 2. Etat de l'art

2.1 Introduction au forage

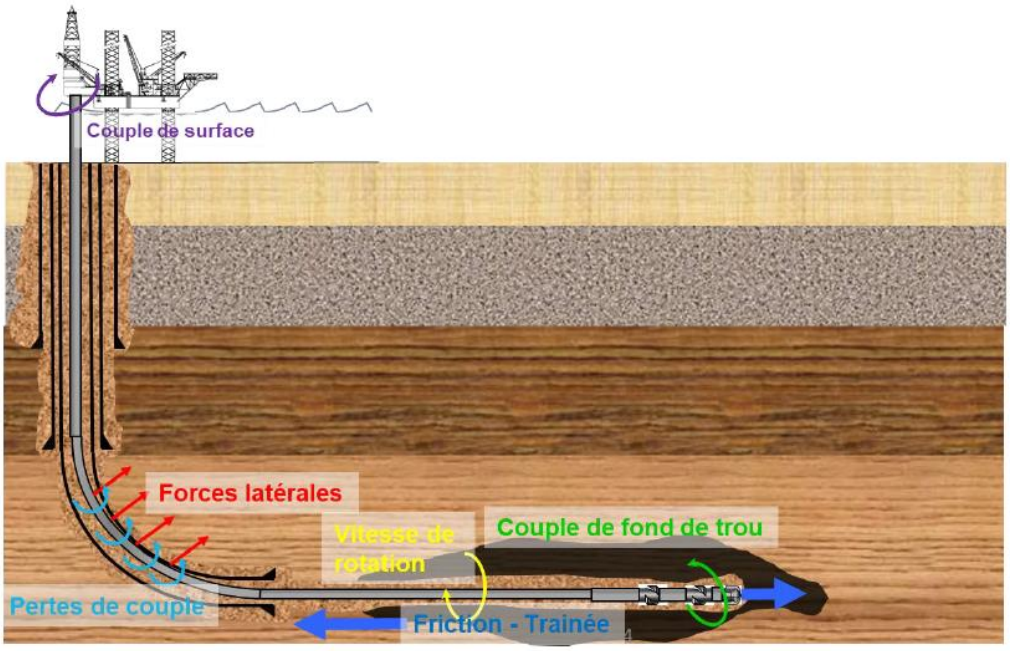


Figure 3 : Forces appliquées sur une structure de forage

Une structure de forage peut être destinée à l'extraction pétrolière ou géothermique. Afin d'atteindre une zone en profondeur, cette structure longue et élancée peut atteindre plusieurs kilomètres. Les tiges de forage constituent la première partie de cette structure, ce sont des tubes de 9 à 10 m de long en rotation et vissées les uns aux autres par des éléments de lien (tooljoint). A l'extrémité en profondeur de la structure se trouve l'ensemble de fond de trou appelé BHA (bottom-hole assembly) qui contient des masse-tiges, des stabilisateurs et une tête de forage. Les masse-tiges sont plus lourdes que les tiges de forage et assurent ainsi la transmission du couple de forage. Grâce aux masse-tiges et à la tension appliquée sur la structure en surface, les tiges de forage sont maintenues en tension ce qui simplifie le contrôle de la dynamique de la structure. Enfin, une variation de la répartition des masse-tiges permet de contrôler l'inclinaison de l'ensemble du fond de trou pour contrôler la direction de forage. Aujourd'hui de nouvelles technologies telles qu'un contrôle automatisé de la direction de rejet du fluide permet d'orienter la tête de forage en temps réel.

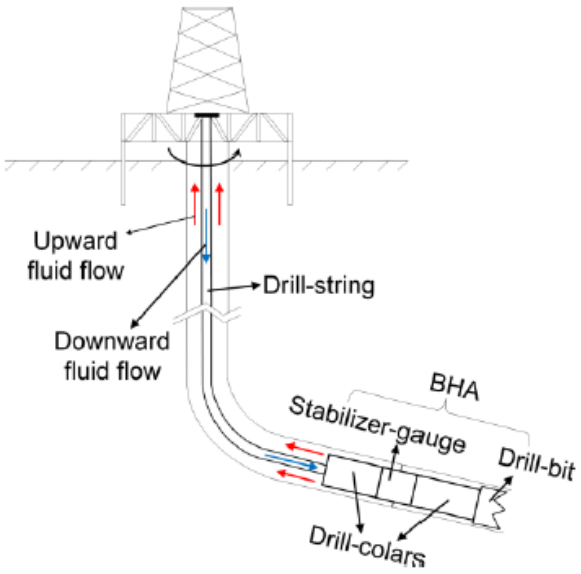


Figure 4 : Circulation du fluide au sein de la structure

L'ensemble de forage tourne dans un puits de plusieurs kilomètres de long, dont la partie supérieure est protégée par des tubages en acier. Le fluide de forage, qui est un fluide à base d'eau ou à base d'huile, circule vers le bas dans les tubes puis retourne à la surface dans l'espace entre les tubes et la paroi du forage. Ainsi, l'évacuation des débris rocheux, le refroidissement de l'outil, la lubrification de la tête de forage et la stabilité dynamique du système sont assurés par le fluide.

Le processus de forage induit des phénomènes dynamiques non linéaires dus aux contacts entre la roche et la tête de forage ainsi qu'entre le puits et les tiges. Au niveau de ces contacts se produisent des phénomènes de glissement ou d'adhérence et une interaction entre le fluide et la structure. De multiples vibrations couplant des mouvements axiaux, de torsion et latéraux peuvent causer des dommages dangereux à la structure de forage. Une étude approfondie de la dynamique de la structure est nécessaire pour éviter des vibrations nuisibles et améliorer la stabilité du processus de forage.

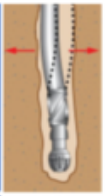
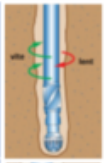
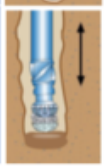
Vibrations de flexion - Précessions directe ou inverse - Instabilités latérales - Frottement - Chocs tiges-puits	Fatigue Rupture Cavage Consommation d'énergie	
Vibrations de torsion - Stick-slip - Blocage total puis déblocage - Frottement	Fatigue, rupture Dévissage des tiges Consommation d'énergie	
Vibrations longitudinales - Rebonds de l'outil - Frottement	Chocs, à-coup Dégradation Consommation d'énergie	

Figure 5 : Phénomènes vibratoires observés

2.1.1 Train de tiges de Forage

La partie inférieure du train de tiges de forage, le Bottom Hole Assembly (BHA), est l'élément qui intéresse le plus dans l'étude qui suit et nous tenterons de modéliser son comportement à l'intérieur du puits de forage. La connaissance des différents constituants d'un train de tiges s'avère donc nécessaire pour la modélisation.

De manière générale, un train de tiges se compose, de bas en haut, des éléments suivants :

- Un outil de forage : extrémité basse du train de tiges, l'outil est entraîné en rotation et permet la progression du train par son action directe sur le front de taille. On distingue deux types d'outils, à molettes (tricônes) et monoblocs (diamant, PDC).

- Des masses-tiges (Drill Collars, DC) : il s'agit d'une série de tubes massifs en acier (figure 6) dont le rôle est d'assurer une poussée suffisante sur l'outil. Par conséquent, pendant la phase de forage, le train de masses-tiges est en partie, voire en totalité, en état de compression.

- Des tiges de forage (Drill Pipes, DP) : c'est la partie la plus longue du train de tiges. Elle est constituée d'une série importante de tubes minces d'acier qui s'étendent jusqu'à la surface et dont le rôle est de transmettre le couple vers l'outil et de soutenir le train de masses tiges. Chaque tige est munie à ses extrémités de renflements appelés tool-joint (figure 6) servant pour le vissage des tiges entre elles et comme points d'appui du train de tiges sur la paroi de puits. En conditions normales, on s'arrange pour que le train de tiges soit en traction afin d'éviter son flambement car celui-ci favorise l'apparition de forces de contacts très élevées entre tiges et parois de puits. Ce train de tiges comporte parfois (cas du forage dirigé ou du forage horizontal) une série supplémentaire de tiges lourdes (Heavy weight Drill Pipe, HWDP) plus épaisses placées souvent juste après les masses tiges. Ces tiges lourdes ont pour but de réduire les risques de flambement des tiges.

Parmi les éléments complémentaires, on trouve :

- Le système de déviation : Ce système comporte le plus souvent des stabilisateurs et/ou des moteurs fonds du trou (PDM). Les stabilisateurs sont des tubes dotés sur leur pourtour de lames droites ou spiralées (figure 6). Leur rôle essentiel est de contrôler la direction de forage en jouant sur leur nombre et leurs positions. On distingue deux types de stabilisateurs: ceux à diamètre fixe et ceux à diamètre variable pouvant être actionnés hydrauliquement ou mécaniquement à partir de la surface. Les moteurs fond du trou (PDM) sont incorporés dans la partie inférieure de certains trains de tiges afin de permettre la rotation de l'outil de forage indépendamment de la rotation du train de tiges. Ces derniers ne sont pas utilisés dans les cas d'étude. Ce procédé est généralement utilisé pour amorcer des déviations ou pour faire des corrections de trajectoire (mode sliding).

- Les appareils de mesures (MWD) : Ce sont des appareils embarqués avec le train de tiges afin de mesurer l'évolution des certains paramètres comme l'inclinaison et l'azimut en fonction de la profondeur forée.

- Les raccords : Ce sont des pièces mécaniques servant à raccorder les différents composants du train de tiges (PDM/DC, DC/HWDP, HWDP/DP, etc.). Elles sont généralement de petite taille afin de ne pas encombrer la garniture.

Figure 6 : Quelques éléments de du train de tiges de forage

2.1.2 Paramètres de Forage

Les paramètres de forage sont les différents facteurs sur lesquels le foreur peut agir et qui conditionnent les performances d'un forage. Les cas d'étude vont se centrer sur les facteurs mécaniques :

- Le poids sur l'outil (WOB, Weight On Bit) : Il correspond à la force appliquée par le train de tiges sur l'outil de forage suivant son axe de révolution pour qu'il puisse pénétrer la roche. C'est en fait la différence entre le poids au crochet outil suspendu et outil posé sur le front de taille. Cette valeur dépend du type d'outil et de la trajectoire du puits. Des différences entre la valeur effective du poids sur l'outil et sa valeur mesurée en surface peuvent être enregistrées lorsque des frottements interviennent notamment dans le cas du forage dévié.

- Le couple à l'outil (TOB, Torque On Bit) : Il correspond au couple de rotation effectif appliqué à l'outil ou transmis depuis la surface. De même que pour le poids à l'outil, son estimation passe par une bonne évaluation des frottements le long du train de tiges.

- La vitesse de rotation : C'est la vitesse de rotation de l'outil par rapport à son axe de révolution. Cette vitesse varie en général de 50 à 250 tour/minute pour le forage rotary classique. La vitesse de rotation en surface peut être contrôlée précisément mais elle peut différer sensiblement de la vitesse de rotation instantanée de l'outil. Ces différences sont dues généralement à des instabilités dynamiques due à des vibrations (latérales : Whirl, de torsion : stick-slip et axiales : bit bounce) et à des frottements générés en forage dévié.

2.2 Logiciel DrillSim

DrillSim est le logiciel développé au sein du laboratoire DrilLab. C'est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis afin de modéliser le comportement dynamique d'un train de tiges de forage. Grâce à la méthode des éléments poutre, le logiciel est en mesure d'envisager une géométrie réaliste de la structure de forage dans des puits 3D et de donner une étude complète des phénomènes de couplage entre les vibrations axiales, en torsion et latérales.

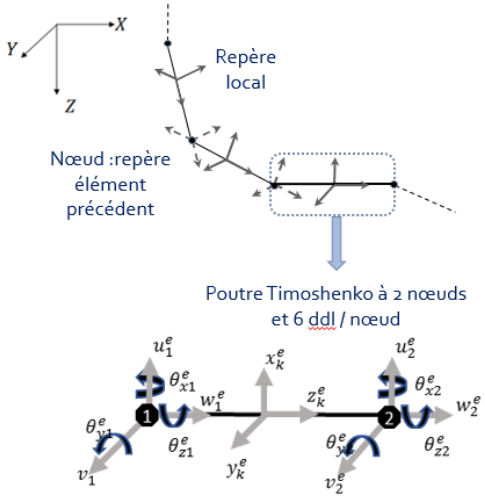


Figure 7 : Maille d'éléments finis du train de tiges. Vecteurs plein: cadre de référence élémentaire. Vecteur en pointillé: cadre de référence nodal.

Comme le montre la figure 7, la structure de forage est maillée le long de la direction curviligne axiale par une série d'éléments de poutre à deux nœuds par élément. Chaque nœud est caractérisé par six degrés de liberté comprenant trois déplacements (u, v, w), deux rotations latérales (θx, θy) et un angle de torsion θz. Les énergies d'un élément de poutre sont principalement dues aux mouvements cinétiques et à la contrainte de déformation.

Ce logiciel contient six différents modules qui peuvent être utilisés ou non en fonction des résultats recherché :

Le module PARC sert à calculer le parcours qui ramène la tige à la ligne neutre du puits à partir de sa position initiale droite. Ce module calcul les efforts axiaux et les chargements intérieurs de chaque élément après le parcours en utilisant la formulation co-rotationnelle. Les précontraintes dues à ce parcours sont prises en compte dans les étapes suivantes.

Le module POSI sert à calculer la position statique du train de tiges dans le puits en considérant les effets du fluide, les efforts statiques extérieurs, la gravité et le contact tige-puits avec ou sans frottement tangentiel. En utilisant la méthode de Newton-Raphson, ce module calcul les déplacements, les rotations et les efforts axiaux de chaque élément. De plus, il identifie les nœuds de contact.

Le module BASE sert à calculer la base modale linéaire en considérant les effets du fluide, les précontraintes du calcul statique et aucun amortissement. De plus, les nœuds de contact en statique sont supposés rester en contact pendant la dynamique et la vitesse de rotation est constante par

rapport au temps et homogène le long de la tige. En utilisant la fonction eigs de Matlab, ce module calcul les valeurs propres et les vecteurs propres pour réduire le système de calcul du diagramme de Campbell.

Le module CAMP calcul le diagramme de Campbell avec les mêmes hypothèses que le module BASE. Il donne donc la variation des valeurs propres du système en fonction de la vitesse de rotation et identifie les vitesses de rotation qui risquent d'induire des instabilités des vibrations ou des résonances dangereuses. Pour ce faire, il utilise soit le système complet, soit le système réduit donné par le module BASE. Les modes sont classifiés en quasi-flexion, quasi-torsion ou quasi-traction/compression et le suivi de la forme des modes est effectué par les critères MAC et NC2O.

Le module CB sert à calculer la base de Craig-Bampton en considérant les effets du fluide, les efforts extérieurs, la gravité, les précontraintes dues au calcul statique et aucun amortissement. De plus, la vitesse de rotation est supposée constante par rapport au temps et homogène le long de la tige. Ce module calcul donc la base de réduction la plus adaptée pour la dynamique non-linéaire due au contact tige-puits en choisissant les degrés de liberté de contour et en calculant les vecteurs propres des modes statiques et dynamique et les valeurs propres des modes dynamiques.

Enfin, le module DYN calcul la dynamique non-linéaire du train de tiges dans un puits en considérant les effets du fluide, les forces statiques extérieures, la gravité, l'amortissement et les précontraintes dues au calcul statique. Cependant, il peut y avoir plusieurs lois de vitesses de rotation et la vitesse de rotation est homogène le long de la tige et imposée à un seul nœud (le premier). L'objectif de ce module est de calculer les déplacements et les vitesses de la tige en fonction du temps en utilisant soit le système complet soit celui obtenu avec le module CB et avec le déplacement initial donné par la position statique. Si les vitesses de certains nœuds sont imposées, la vitesse initiale de chaque nœud est définie par une interpolation linéaire des vitesses imposées.

Le calcul n'utilise pas forcément tous les 6 modules. La relation entre ces modules pour différentes situations du calcul est représentée par la figure 8.

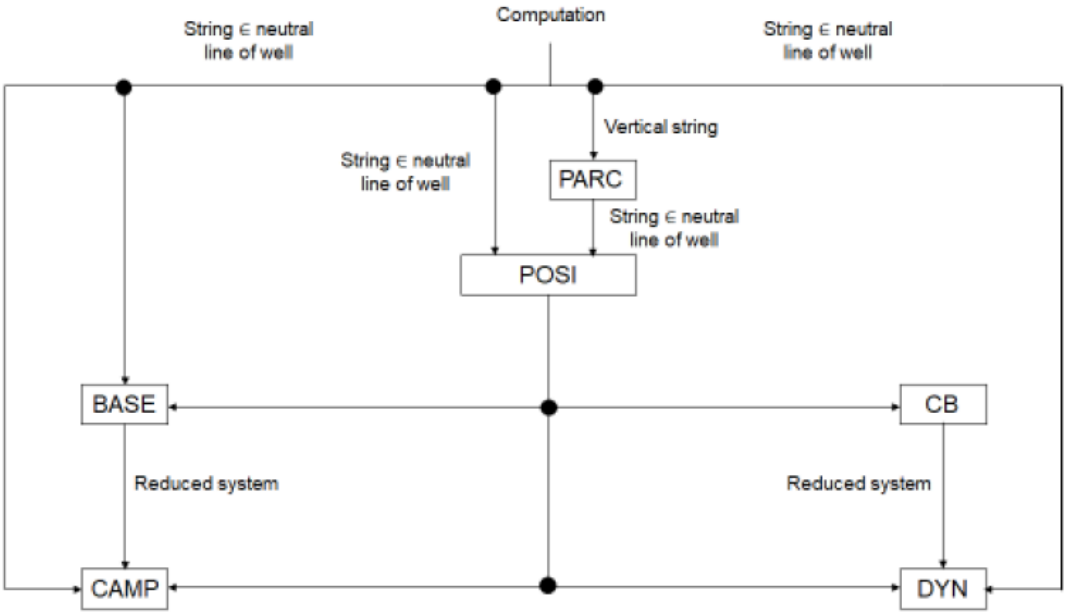


Figure 8 : Organigramme du logiciel DrillSim

2.3 Logiciel Adams Drill

De nombreuses approches ont été utilisées pour modéliser le forage à divers degrés de succès. Les éléments finis sont les plus courants. D'un côté, les modèles de dynamique structurelle linéaire très simples se sont avérés être une représentation très utile de la chaîne à des fins de planification de base. Les modèles d'éléments finis non linéaires avancés utilisés par les principales sociétés de services ont été employés pour étudier les dysfonctionnements du forage non linéaire. Bien que les éléments finis sont appropriés pour capturer des comportements non linéaires, ces modèles ont tendance à être lourd et coûteux en temps de calcul. D'un autre côté on trouve les systèmes d'équations. Ils sont assez rapides pour être utilisés dans l'analyse en temps réel, mais compliqués pour capturer avec suffisamment de fidélité pour tenir compte dans la conception ou dans les couplées complexe.

Adams Drill est un logiciel de calcul développé par MSC Software lequel est basé sur la dynamique des multi-corps pour arriver à avoir un compromis entre fidélité et efficacité de calcul tout en capturant le couplé des comportements non linéaires tridimensionnels du système de forage et divers sous-systèmes. Il est développé sous forme de feuille Excel et utilise uniquement le système d'unités impérial ce qui est un peu incommodant pour les utilisateurs qui travaillent avec le système international.

Le modèle réglé sert maintenant de plate-forme de forage virtuelle qui peut être utilisé pour tester diverses opportunités d'amélioration. Une conception systématique du BHA peut être accompli pour réduire la gravité des vibrations afin de gérer les risques et en maximisant l'efficacité du forage ou les taux de pénétration. Les ingénieurs de forage peuvent optimiser le placement des outils spécialisés dans le BHA et établir les meilleures pratiques et choisir les paramètres de fonctionnement optimaux pour atténuer le risque de dysfonctionnement. Les opérateurs peuvent aussi étudier les conditions menant aux défaillances des composants afin d'apprendre et d'éviter des circonstances futures. Tout cela peut être fait virtuellement, permettant aux ingénieurs de forage d'explorer la réponse du système et prendre des décisions éclairées tout au long du processus de conception.

Le risque peut être défini de multiples façons : dépassement des limites de charge à des concentrations de contraintes élevées, vibrations excessives, conditions dangereuses connues ou des dysfonctionnements dynamiques bien définis. Des risques élevés peuvent être évités ou gérés par une réflexion approfondie sur les alternatives ou acceptés dans des circonstances extrêmes. Un tracé tridimensionnel est généré en exerçant la simulation à travers un large éventail des conditions de fonctionnement et à plusieurs profondeurs dans le puits de forage.

La gravité du risque est évaluée en compilant un certain nombre de facteurs liés aux charges, mouvements et dynamiques connus pour causer des dommages ou un temps non productif. Des conceptions alternatives peuvent être comparées pour chercher de nouvelles améliorations sur les puits ultérieurs.

Pour augmenter la vitesse de calcul, avec une certaine perte de détails et de fidélité, la partie supérieure de la tige de forage dans Adams Drill peut être modélisée avec une « Equivalent Upper String" qui n'applique pas une modélisation détaillée face aux détails du BHA. Disons donc qu'Adams Drill va se centrer sur les détails du BHA face à l'ensemble de la tige de forage.

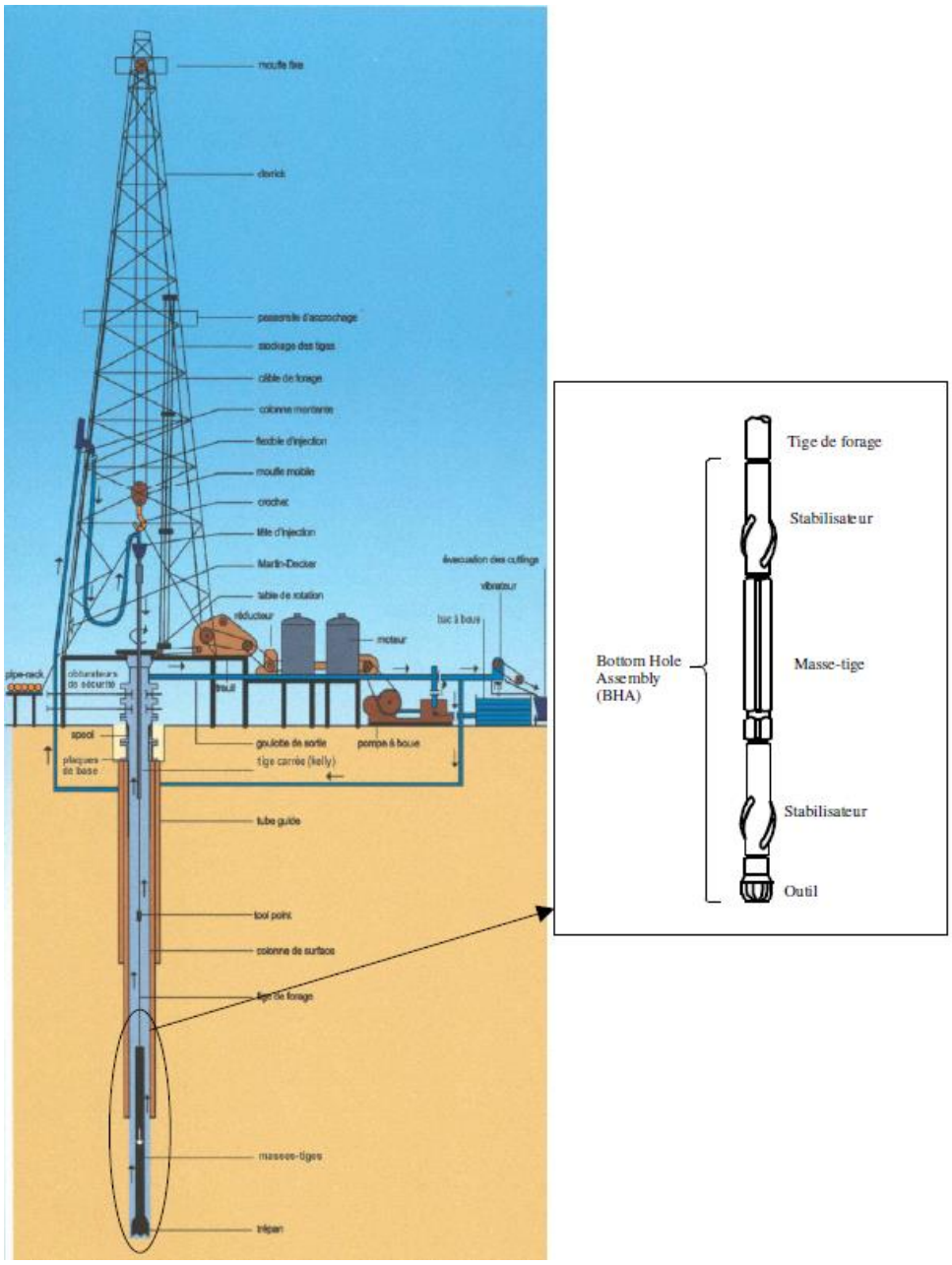


Figure 9 : Système de forage avec la BHA en détail

Chapitre 3. Méthodologie

3.1 Prise en main de DrillSim

Pour la prise en main de DrillSim la première tâche est de réaliser la collection de cas tests existants pour se familiariser avec le logiciel et la visualisation des résultats. En plus, d'un point de vue différent aux utilisateurs habituels du programme une première prise en main a servi pour chercher des bugs et des possibles améliorations.

Une fois fait, l'objectif est de se centrer sur les cas de calcul de la dynamique non-linéaire. Dans ces cas les points de contact entre le train de tiges et le puits ne sont pas supposés permanents.

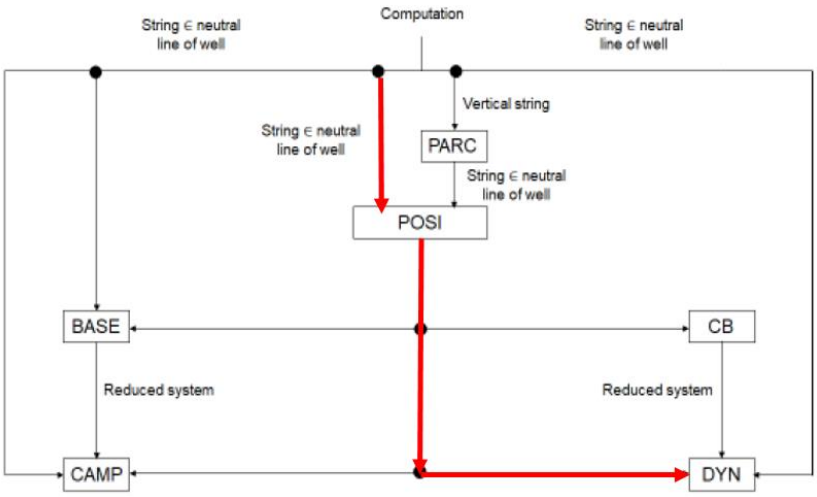


Figure 10 : Organigramme des modules utilisés pour le calcul du système complet de la dynamique non linéaire

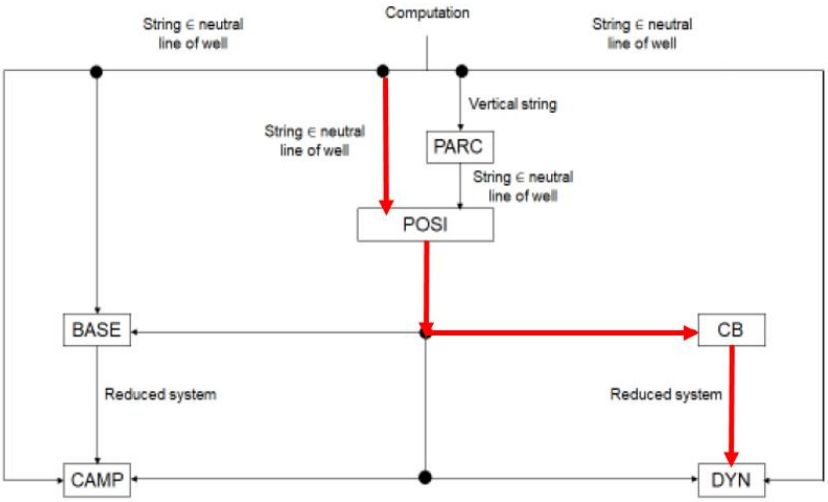


Figure 11 : Organigramme des modules utilisés pour le calcul du système réduit de Craig-Bampton de la dynamique non linéaire

Des calculs ont été effectués en utilisant le système complet et le système réduit de Craig-Bampton en calculant 150 modes. Cependant après comparaison entre les calculs, les résultats

obtenus sont très similaires étant la différence en temps de calcul important pour le cas horizontal étudié. Il est donc décidé d'effectuer le calcul avec le système réduit.

	Système complet (s)	Système réduit avec 150 modes dynamiques (s)
Temps de calcul	1020	410

Table 1: Temps de calcul (s) pour la dynamique de 20 s

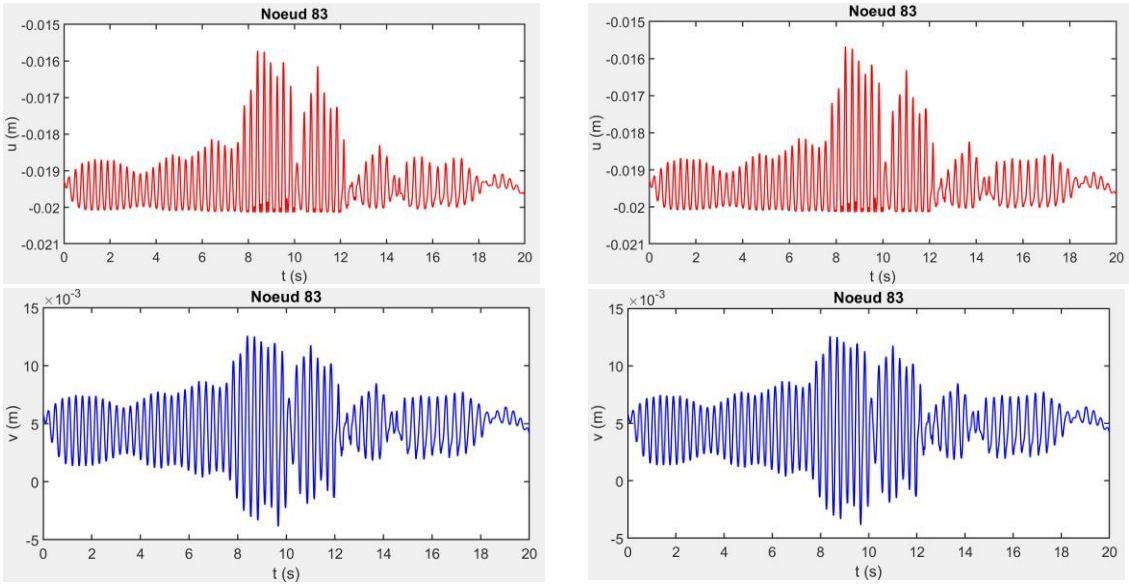


Figure 12 : Déplacements latéraux du nœud 83 en fonction du temps, calculé avec le système complet (à gauche) et avec le système réduit avec 150 modes dynamiques (à droite)

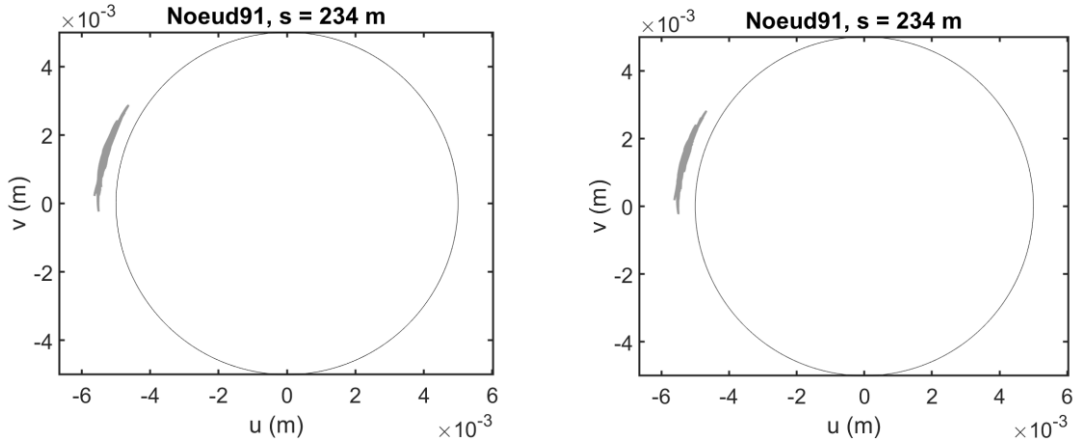


Figure 13 : Orbites du nœud 91 en fonction du temps, calculé avec le système complet (à gauche) et avec le système réduit avec 150 modes dynamiques (à droite)

3.2 Prise en main d'Adams Drill

Pour la prise en main d'Adams Drill le chemin a été plus compliqué dû aux problèmes d'installation de licence et à la méconnaissance du logiciel. Une fois compris la forme d'utilisation du programme et de ses cas test il y a plusieurs aspects à souligner qui vont être expliqués à continuation.

3.2.1 Règles d'utilisation

Adams Drill impose certaines règles concernant le contenu et l'ordre des éléments dans le train de tiges.

- Un PDC ou outil de forage doit être le composant le plus bas du train de tiges.
- Un Top Drive doit être le composant le plus élevé du train de tiges.
- Un « Equivalent Upper String » ou chaîne supérieure équivalente doit être présente directement sous le lecteur supérieur.
- Une chaîne supérieure équivalente doit représenter pas moins de 4 tiges de forage.
- Les seuls types de composants autorisés qui peuvent être directement sous une chaîne supérieure équivalente sont les Drill Pipes, HW (poids lourds) et les Drill Collar.

3.2.2 Sections principales

Adams Drill se divise en quatre étapes principales :

- Définir le train de tiges: Il faut spécifier la configuration du train de tiges de forage (quels outils, dans quel ordre, …). Pour ce faire, on peut sélectionner des outils dans un ensemble de fichiers qui définissent leurs caractéristiques pertinentes stockées dans des structures de répertoires organisées en grande partie par type d'outil que nous appelons « bases de données » d'Adams Drill ou les créer nous-même.

- Définir l'événement: Sur un onglet séparé il faut définir les conditions opérationnelles à simuler: le trou dans lequel le train de tiges fonctionne, le Weight on Bit (WOB), le taux de pénétration (ROP), etc. Il faut faire attention pendant la définition des coefficients frottement statique et dynamique du trou car ils sont aussi présents dans les caractéristiques de certains composants définis avants comme le PDC. Il faut que ces valeurs se correspondent.

- Exécuter la simulation: Sur un autre onglet il faut spécifier les types de sortie souhaités à partir de la simulation (avec animation, sans animation, …) et d'autres paramètres de simulation.

- Afficher les résultats: Une fois la simulation est terminée, une notification s'affiche dans l'interface Excel et un nouveau logiciel de visualisation va permettre d'inspecter les résultats: Adams View. Sur le nouveau logiciel il est possible de créer différents types de tracé pour des emplacements d'instrumentation tout le long du train de tiges sauf sur le EUS et animer le modèle.

3.2.3 Equivalent Upper String

Dans Adams Drill, l'utilisateur détermine la quantité de train de tiges au-dessus du BHA (assemblage de fond de trou) qui sera modélisée en détail, y compris de nombreuses pièces, poutres, contraintes, impacts et frottements. Pour augmenter la vitesse de calcul, avec une certaine perte de

détails et de fidélité, la partie supérieure du train de tiges de forage dans Adams Drill peut être modélisée avec une "chaîne supérieure équivalente" qui n'applique pas ce type de modélisation détaillée. La partie supérieure du train de tiges n'est pas ignorée, car elle sert de stockage et de transfert d'énergie d'une importance cruciale, sans laquelle de nombreux processus physiques significatifs dans la chaîne inférieure n'apparaîtront pas, par exemple, le stick-slip.

De manière générale, un train de tiges détaillé doit être utilisé dans les sections latérales et courbes du trou, le train supérieur équivalent (EUS) étant limité aux sections verticales ou quasi verticales. L'EUS est particulièrement approprié pour les sections tubées de la verticale.

- Equivalent Upper String pour le modèle de torsion

Adams Drill considère la partie supérieure comme un ensemble d'équations représentant un arrangement de ressorts et d'amortisseurs de torsion et d'inerties de rotation. Les seules entrées requises par les utilisateurs sont les propriétés normales du tube de forage et le nombre de joints de ce tube qui se trouvent dans la chaîne supérieure. Le couple d'entraînement de la chaîne se connecte au "haut" de ce système et le reste de la chaîne se connecte au "bas".

Figure 14 : Equivalent Upper String - Torsion

Conceptuellement, les équations des equivalent upper strings représentent quelque chose comme le système illustré ci-dessous. Dans le modèle Adams Drill, ces pièces et ressorts ne sont pas représentés graphiquement ni même topologiquement, mais uniquement via ces ensembles d'équations.

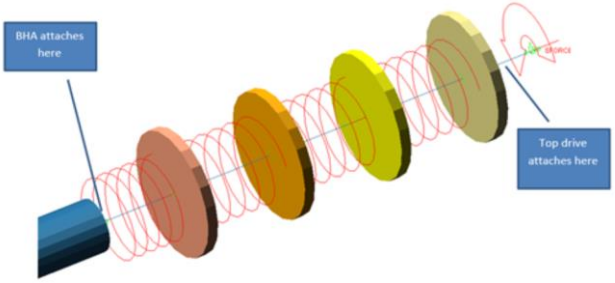


Figure 15 : Equivalent Upper String - Torsion

- Equivalent String pour le modèle axial

De façon similaire au modèle de torsion, la partie supérieure n'est qu'un ensemble d'équations représentant un arrangement de ressorts axiaux et d'amortisseurs et de masses. La force de charge du crochet se connecte en « haut » de ce système et le BHA se connecte au « bas ». Il ne faut pas oublier qu'il n'y a pas de pièces réelles dans ce système et qu'il est complètement découplé du système de torsion.

Figure 16 : Equivalent Upper String - Flexion

Tout comme pour la torsion, les équations équivalentes représentent quelque chose comme le système illustré ci-dessous, en se souvenant que les pièces et ressorts n'existent pas, seulement des ensembles d'équations.

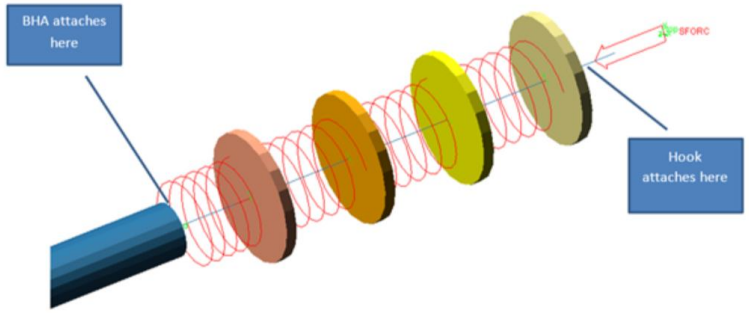


Figure 17 : Equivalent Upper String - Flexion

3.2.4 Type de tige de forage

En dessous de l'« Equivalent Upper String » on peut choisir des types différents de tige de forage lesquelles ont certaines différences les unes des autres. Pour comprendre plus clairement, les différences entre les « drill pipes » et les « flex pipes » (figure 18) vont être expliquées.

Les « drill pipe » ont 2 éléments parties dans et les « flex pipe » ont 3 éléments parties (les « beams » étant les parties cylindriques de plus petites sections). Les jonctions sont les parties de plus grande sections.

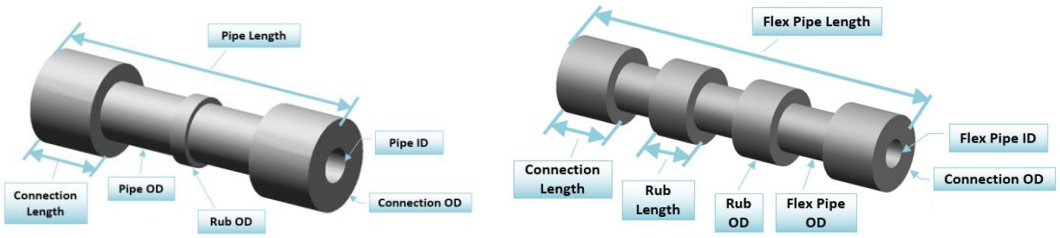


Figure 18 : Drill Pipe à gauche et Flex Pipe à droite

Au niveau de la modélisation ceux-ci utilisent une combinaison de formulation corps rigide (le corps est ramené à son centre de gravité et les points d'interaction du corps avec l'extérieur sont représentés par des marqueurs ou des points) et une formulation corps flexible avec un élément de type poutre.

Les parties intermédiaires (les jonctions) servent à identifier les points importants pour le calcul des efforts sur la tige mais aussi pour la formulation de l'élément flexible de type poutre.

L'élément « Flex pipe » du fait de nombre de section élevé ainsi et de la grande taille des « rub » dispose d'une plus grande flexibilité et est utilisé dans les forages directionnels notamment dans la partie courbe du puits de forage. Le « drill pipe » est utilisée dans les parties rectilignes.

3.2.5 Fluide

Pour ce qui est de la prise en compte du fluide (« mud »), il n'y a pas de fluide dans Adams. L'effet du fluide est représenté à travers les forces visqueuses appliquées sur la tige. Dans le calcul de ces forces on ne tient compte après plusieurs hypothèses que de l'effort de trainée induit par le fluide sur la drill bit. Cet effort de trainée est modélisé par une force latérale du type :

$$F_{lateral} = \frac{\rho}{2} V_{lateral}^2 A C_D$$

3.2.6 Instabilités

Les instabilités dérivent de la modélisation des efforts axiaux au niveau de la drill string générés et des efforts de contact latéraux. Ces efforts axiaux sont modélisés à travers d'une fonction périodique aléatoire. Elle vise à modéliser la variation des efforts liés à une dégradation du train de tiges entrainant des pertes périodiques de contact. Les vibrations et les efforts radiaux sont ainsi modélisés par une fonction impact pouvant prendre en compte les caractéristiques de la zone du sol creusé qui sont très souvent différentes de celles avec lesquelles sont en contact les parties supérieures de la drill string.

3.2.7 Valeurs par défaut

Une comparaison entre les valeurs par défaut des deux logiciels va être faite. Pour DrillSim les valeurs utilisés pour les cas tests vont être pris en compte et pour Adams Drill les valeurs que le logiciel propose lors de la conception du train de tiges de forage.

Les valeurs de la géométrie du train de tiges et ceux des conditions de calcul vont être étudiés.

Structure	Longueur (m)	Rayon extérieur (m)	Rayon intérieur (m)
Outil PDC	0.5	0.0795	0.0355
Masse tige	10	0.0795	0.0355
Stabilisateur	5	0.0795	0.0355
Corps de la tige	9	0.0635	0.0540
Tooljoint	0.3	0.0810	0.0480

Table 2: Géométrie des composants sur DrillSim

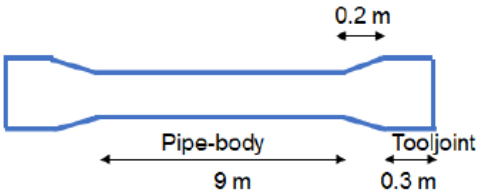


Figure 19 : Géométrie d'une tige DrillSim

Structure	Longueur (m)	Rayon extérieur (m)	Rayon intérieur (m)
Outil PDC	0.4572	0.1047	-
Masse tige	1.524+8.534	0.1047	0.0177
Stabilisateur	0.91	0.1047	0.0381

Corps de la tige	8.8392	0.0889	0.0508
Tool joint	0.3048	0.0635	0.0508

Table 3: Géométrie des composants sur Adams Drill

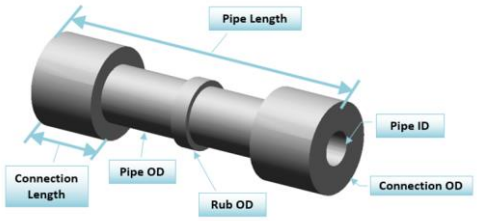


Figure 20 : Géométrie d'une tige Adams Drill

Sur la table précédente peut être vue que les plus grandes différences se trouvent dans les longueurs des stabilisateurs et dans la différence des diamètres extérieurs et intérieurs des masse-tiges. Pour le cas des stabilisateurs Adams Drill utilise des raccords qui font que sa longueur finale augmente tandis que pour les masse-tiges l'incrément de poids d'Adams Drill est résolu sur DrillSim en ajoutant plusieurs masse-tiges les unes à côtés des autres.

Conditions de calcul	DrillSim	Adams Drill
Vitesse de rotation imposé	120 tour/min	120 tour/min
Coefficient de frottement statique	0.3	0.9
Coefficient de frottement dynamique	0.2	0.3
Raideur	10^7 N/m	6.77 10^5 N/m
Amortissement	10^4 N/(m/s)	6.77 10^2 N/(m/s)

Table 4: Valeurs pas défaut des conditions de calcul

Les conditions de calcul sont différentes bien qu'elles puissent être modifiées à volonté dans les deux logiciels. Pour les cas d'analyse les conditions initiales de DrillSim vont être les conditions initiales sur les deux logiciels.

3.3 Géométrie des cas test

Les fichiers de base pour les calculs réalisés définissent un maillage du train de tiges de 260 m apte à fonctionner dans un puits soit horizontal et soit vertical. Comme l'objectif principale est de comparer Adams Drill et DrillSim les simulations pour ces deux cas vont utiliser des modélisations simplifiées du train de tiges qui permettent des temps de calcul courts et différents tests.

Les caractéristiques de tous les matériaux métalliques sont les mêmes et suivent les données suivantes :

- Masse volumique : 7900 $kg.m^{-3}$
- Module de Young : 2.03 10^{11} Pa
- Coefficient de Poisson : 0.3
- Coefficient de réduction de la section : 0 (poutre Bernoulli)

- Coefficient d'amortissement de Rayleigh de la masse : 0.03 s^{-1}
- Coefficient d'amortissement de Rayleigh de la raideur : 0 s

La géométrie de la tige est la suivante :

- Longueur : 260 m
- Rayon extérieur : 0.06 m
- Rayon intérieur : 0.04 m

Géométrie des disques :

- Rayon extérieur : 0.075 m
- Rayon intérieur : 0.06 m
- Largeur : 0.06 m

Maillage DrillSim :

- 101 noeuds équidistants
- 100 éléments de poutre
- Disques sont à la position des noeuds 91, 96, 101.
- 101 butées radiales, une butée par noeud :
    - Raideur de contact : 10^7 N/m
    - Jeu : 0.02 m pour des noeuds de la tige, 0.005 pour des noeuds des disques
    - Coefficient de régularisation de raideur : 7 10^7 m-1
    - Amortissement : 10^4 N/(m/s)
    - Coefficient de régularisation d'amortissement : 7 10^4 m-1
    - Coefficient de frottement statique : 0.3
    - Coefficient de frottement dynamique : 0.2

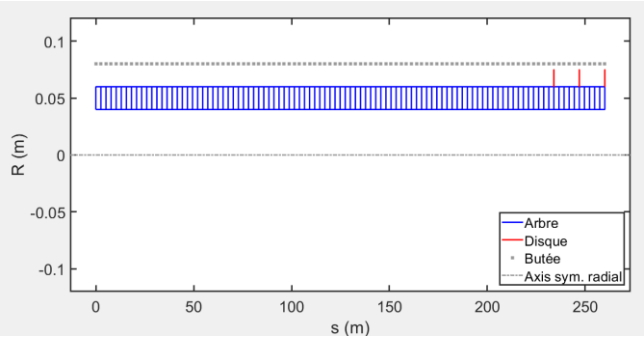


Figure 21 : Visualisation du maillage dans DrillSim

Maillage Adams Drill :

Les conditions de calcul sont les mêmes que sur DrillSim. Les disques sont ici représentés par des stabilisateurs. Le train de tiges qui va être pris en compte pour le calcul est composé des

composants qui suivent. Afin de se focaliser sur le plus important tous les calculs effectués au cours de ce projet ne seront pas exposés.

- Top Drive : 120 tour/min
- Equivalent Upper String : 19
- Drill Pipe : 5
- Flex Pipe : 1
- Blade Reamer : 1
- Crossover : 1
- MWD Tool : 1
- Stabilizer : 1
- MFR Tool : 1
- Short Collar : 1
- Stabilizer : 1
- PDC Bit : 1

Figure 22 : Visualisation du maillage dans Adams Drill

Paramètres du calcul :

- Gravité : 9.81 m. s^{-2}
- Sans fluide : 1 (modèle Axisa avec des matrices du fluide nulles)
- 0 : Calcul avec le système complet, 1 : calcul avec 150 modes dynamiques de Craig-Bampton
- 0 : temps initial, 200 : temps final
- 2 : méthode RK4-2
- Pas de temps initial : 10^{-6} s
- Facteur de division de pas de temps : 1.1
- Facteur de multiplication du pas de temps : 1.01
- Critère de l'erreur de troncature : 10^{-2}
- Weight on Bit : 50000 lb

Chapitre 4. Résultats et analyse

Les opérations de forage utilisent une structure élancée rotative introduite à l'intérieur du puits de forage. La dynamique non linéaire associée aux phénomènes de rebondissement des trépans, de glissement par friction et de flux de boue pulsée peut provoquer l'usure prématurée et l'endommagement du matériel de forage et devrait être étudiée pour améliorer la fiabilité des opérations de forage. Ce travail présente l'analyse de deux logiciels servant à prédire ces comportements. Les interactions fluide-structure ne sont pas considérées. Pour chaque cas on va analyser les différences entre les déplacements en X et Y (u et v sur DrillSim) ainsi que les orbites sur plusieurs points choisis le long de la tige.

Il faut tenir en compte que les logiciels travaillent dans des systèmes d'unités différents. Adams Drill emploie le système impérial et DrillSim travaille avec le système international. Dû à cette différence les valeurs sur Adams Drill sont transformés a des unités internationales pour pouvoir les comparer. Pour valider les valeurs entre les deux logiciels un intervalle de ±20% a été pris en compte.

Les points de contrôle sont les suivants :

- Nœud 96 (disque) = 40 ft du PDC (stabilisateur)
- Nœud 91 (disque) = 80 ft du PDC (stabilisateur)
- Nœud 83 (tige) = 150 ft du PDC (tige)
- Nœud 62 (tige) = 200 ft du PDC (tige)

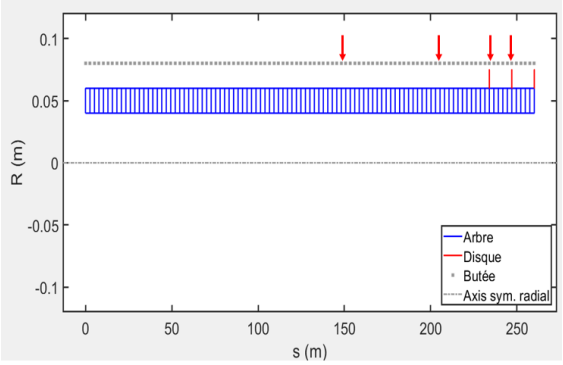


Figure 23 : Points de contrôle sur DrillSim

Figure 24 : Points de contrôle sur Adams Drill

A signaler aussi que sur Adams Drill les RPM du train de tiges et le Weight on bit ont une rampe d'action de pente 10 ce qui n'est pas le cas sur DrillSim. A cet effet l'analyse est fait dans le régime permanent.

4.1 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits horizontal

Pour commencer un puits horizontal va être modélisé vue que c'est le modèle où on trouve le plus d'information dans la bibliographie du forage à cause d'être la géométrie d'entré la plus commune au poches pétrolières et géothermiques.

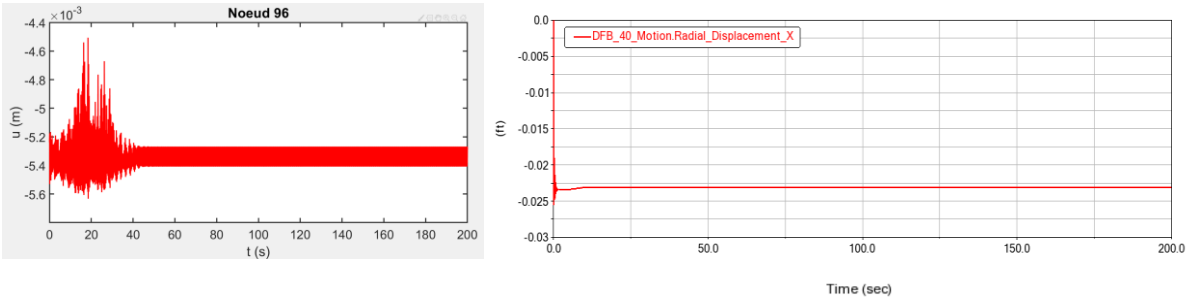


Figure 25 : Déplacements latéraux en X du nœud 96 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Nœud 96	- 0.0053	- 0.0067

Table 5 : Déplacements latéraux en X du nœud 96

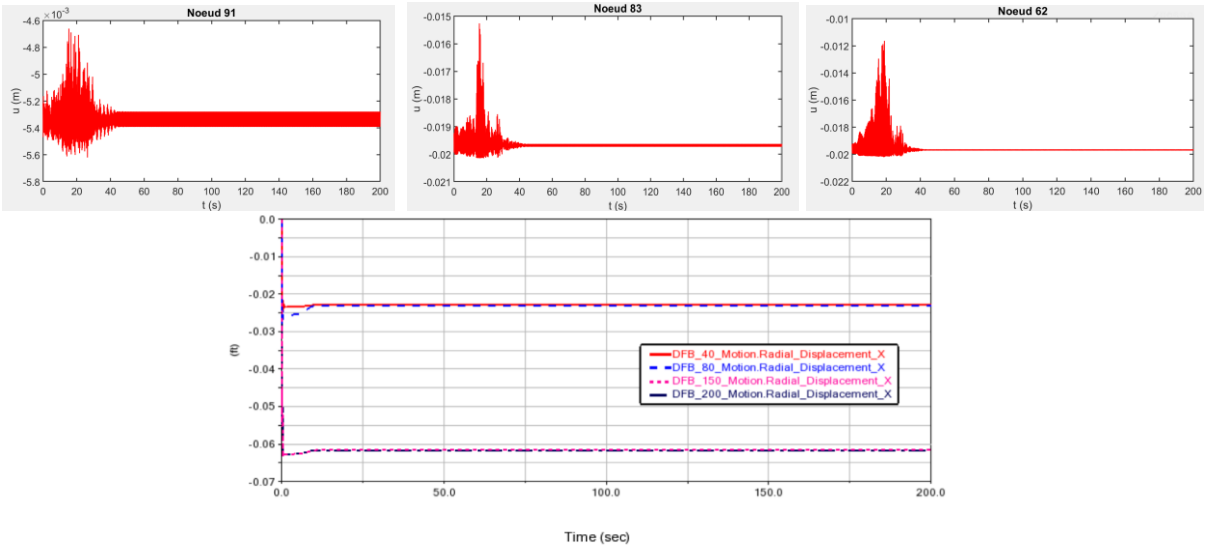


Figure 26 : Déplacements latéraux en X des nœuds 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (en haut) et Adams Drill (en bas)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Nœud 91	- 0.0053	- 0.0067
X Nœud 83	- 0.02	- 0.018
X Nœud 62	- 0.02	- 0.018

Table 6 : Déplacements latéraux en X des nœuds 91, 83 et 62

Les déplacements en X sont validés sur les deux logiciels en termes de résultats de calcul étant compris dans le même intervalle de ±20% pour un cas horizontal.

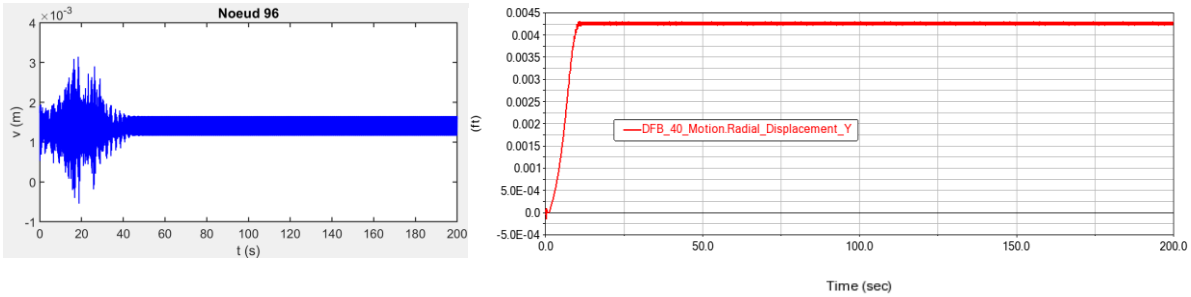


Figure 27 : Déplacements latéraux en Y du nœud 96 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
Y Nœud 96	0.0014	0.0013

Table 7 : Déplacements latéraux en Y du nœud 96

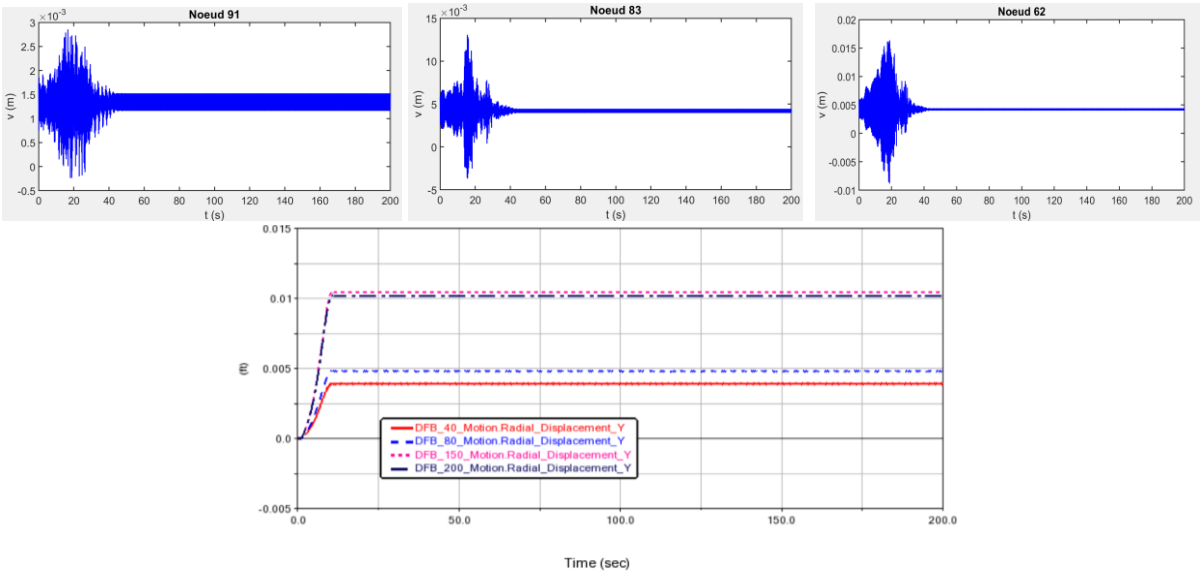


Figure 28 : Déplacements latéraux en Y des nœuds 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (en haut) et Adams Drill (en bas)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
Y Nœud 91	0.0014	0.0014
Y Nœud 83	0.004	0.0033
Y Nœud 62	0.004	0.0035

Table 8 : Déplacements latéraux en 8 des nœuds 91, 83 et 62

Les déplacements en Y sont aussi validés sur les deux logiciels en termes de résultats de calcul étant compris dans le même intervalle de ±20%.

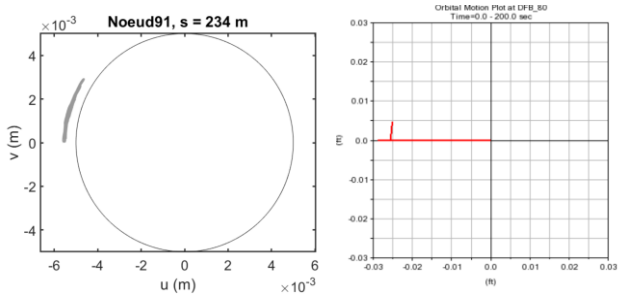


Figure 29 : Orbite du nœud 96, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Orbite Nœud 91	- 0.0055	- 0.007
Y Orbite Nœud 91	0.003	0.0015

Table 10 : Orbite du nœud 91

En termes d'orbites on peut observer sur le nœud 96 que DrillSim prend en compte la pénétration dans le trou et Adams Drill rebondit contre lui quand il y a un contact. En plus le calcul statique et dynamique sur DillSim est différencié ce qui fait que la tige à l'instant 0 du calcul dynamique commence déjà placée en tenant en compte les conditions du calcul statique. Par contre sur Adams Drill à l'instant 0 la tige est dans la ligne neutre et la force de la gravité (selon axe X Figure 12) l'amène à la position initiale.

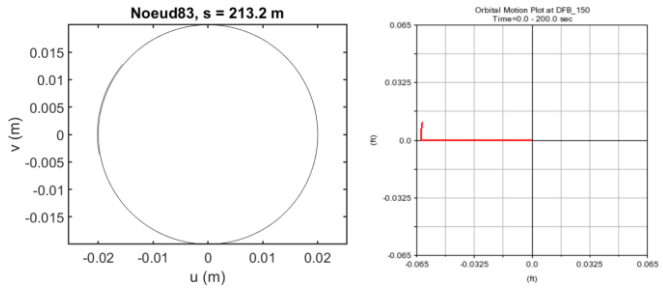


Figure 30 : Orbite du nœud 83, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Orbite Nœud 83	- 0.02	- 0.018
Y Orbite Nœud 83	0.013	0.0032

Table 11 : Orbite du nœud 83

Bien que les résultats ne sont pas validés dans ce cas pour les deux logiciels en termes de valeurs numériques sur les nœuds 96 et 83, le quadrant d'oscillation est le même dans les deux programmes.

	DrillSim (s)	Adams Drill (s)
Temps de calcul	3265	116

Table 12 : Temps de calcul (s) pour la simulation du puits horizontal

La différence de temps pour ce calcul est considérable. On peut voir l'efficacité des systèmes multi corps en termes de vitesse de calcul face aux élément finis.

4.1.1 Analyse Equivalent Upper String

Pour ce cas on a aussi analysé les différences en tant que résultats et temps de calcul en modifiant les composants sur Adams Drill pour éliminer les simplifications faites. Vue que le numéro d'equivalent upper strings minimum est 4, on remplace 15 equivalent upper strings par 15 drill pipe.

Pour commencer on va voir la comparaison des deux modélisations sur les déplacements latéraux dans le nœud 96. Les déplacements en X restent quasiment identiques mais en Y on voit un changement dans le déplacement du nœud 96.

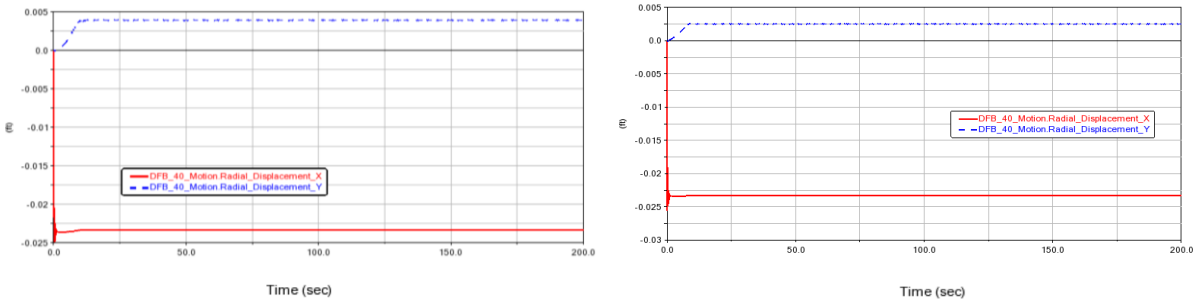


Figure 31 : Déplacements latéraux en X et Y du nœud 96 en fonction du temps, calculé avec 19 EUS (à gauche) et avec 4 EUS (à droite)

Pour avoir plus d'information on va étudier les déplacements en X et Y des 4 nœuds.

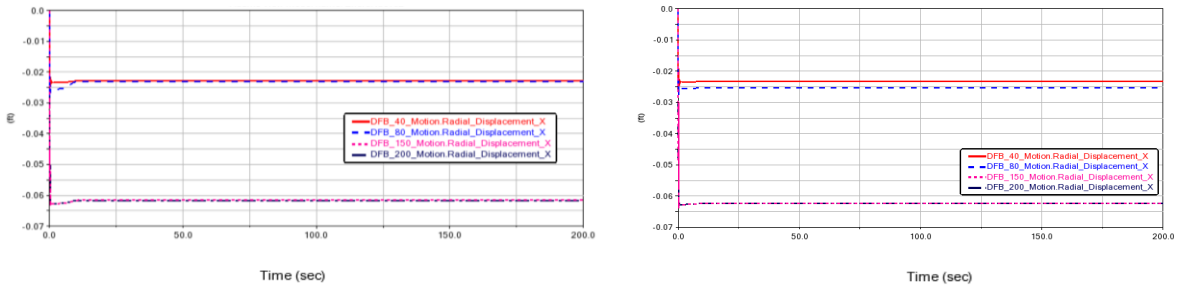


Figure 32 : Déplacements latéraux en X des nœud 96, 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec 19 EUS (à gauche) et avec 4 EUS (à droite)

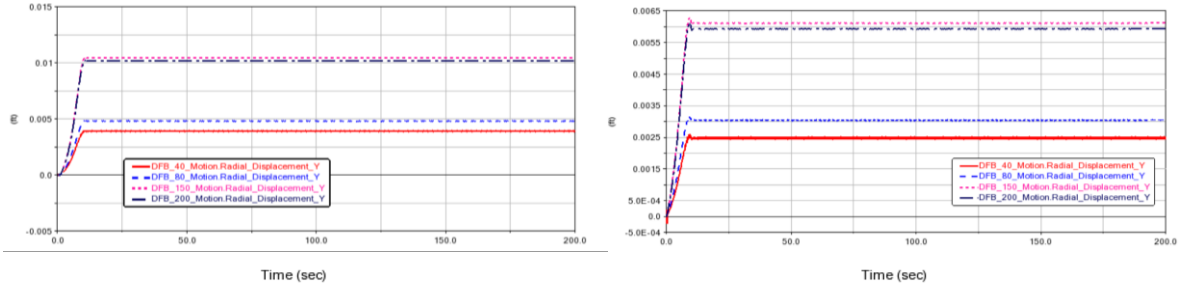


Figure 33 : Déplacements latéraux en Y des nœud 96, 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec 19 EUS (à gauche) et avec 4 EUS (à droite)

Les déplacements en X ne changent mais par contre les déplacements en Y se voient réduits en réduisant les EUS.

	Adams Drill 19 EUS (s)	Adams Drill 4 EUS (s)
Temps de calcul	116	182

Table 13 : Temps de calcul (s) pour la simulation du puits horizontal

Le temps de calcul est un 35% supérieur pour le cas sans simplification.

4.1.2 Analyse des coefficients de frottement

Ensuite les valeurs des coefficients de frottement statique et dynamique ont été modifiés dans les deux programmes pour étudier leur influence.

- Coefficient de frottement statique : 0.6
- Coefficient de frottement dynamique : 0.4

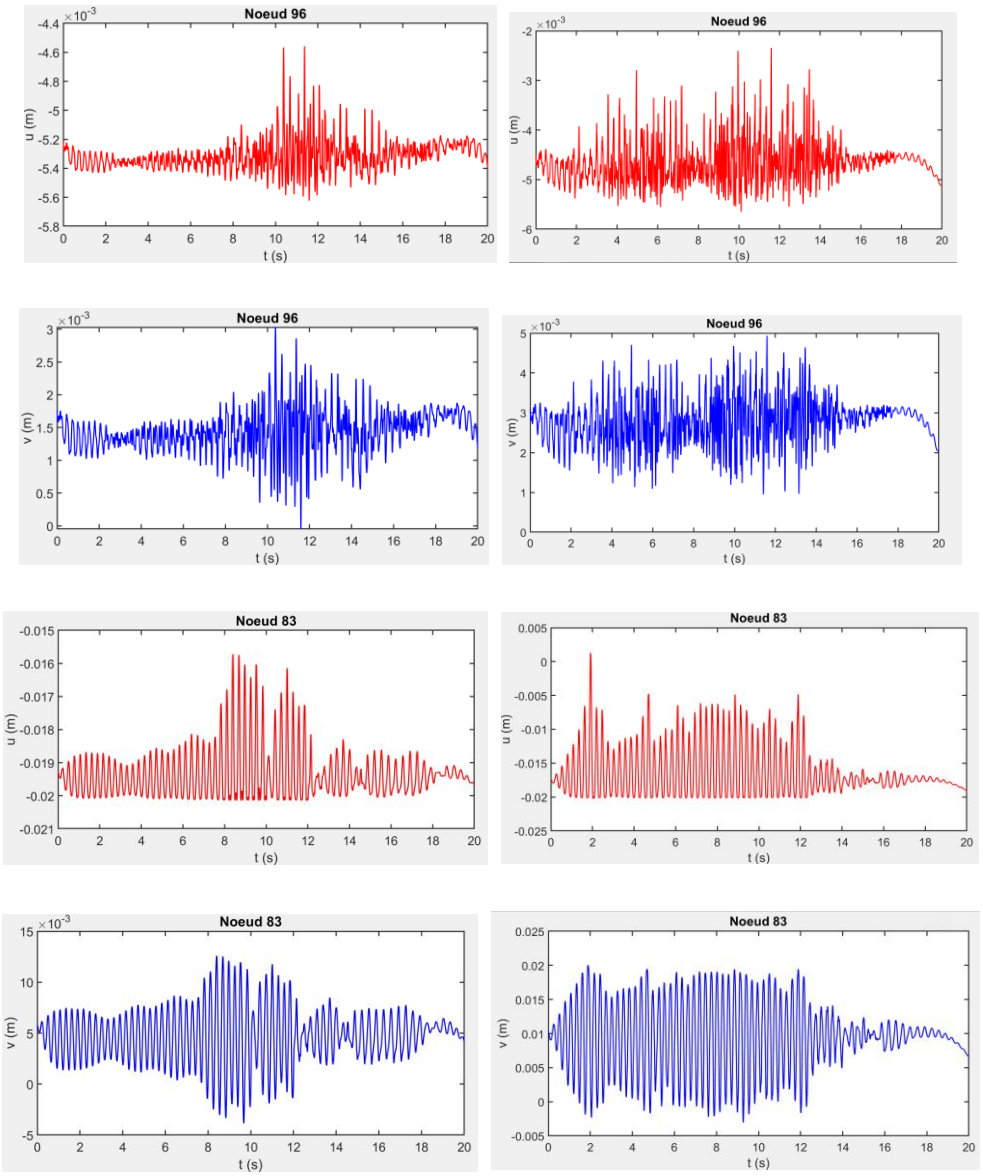


Figure 34 : Déplacements latéraux des nœuds 96 et 83 en fonction du temps, calculé avec les coefficients de frottement statique = 0.3 et dynamique = 0.2 (à gauche) et avec les coefficients de frottement statique = 0.6 et dynamique = 0.4 (à droite) - DrillSim

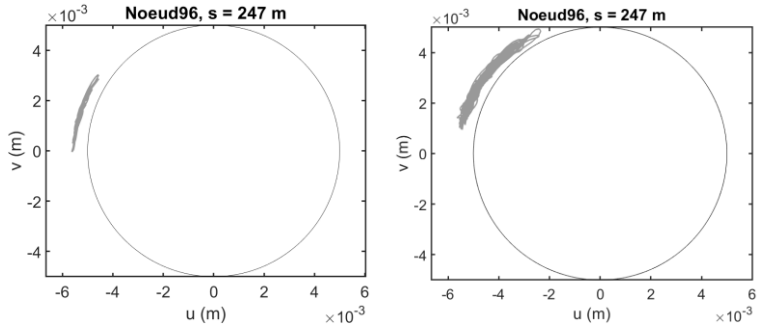


Figure 35 : Orbites du nœud 96, calculé avec les coefficients de frottement statique = 0.3 et dynamique = 0.2 (à gauche) et avec les coefficients de frottement statique = 0.6 et dynamique = 0.4 (à droite) – DrillSim

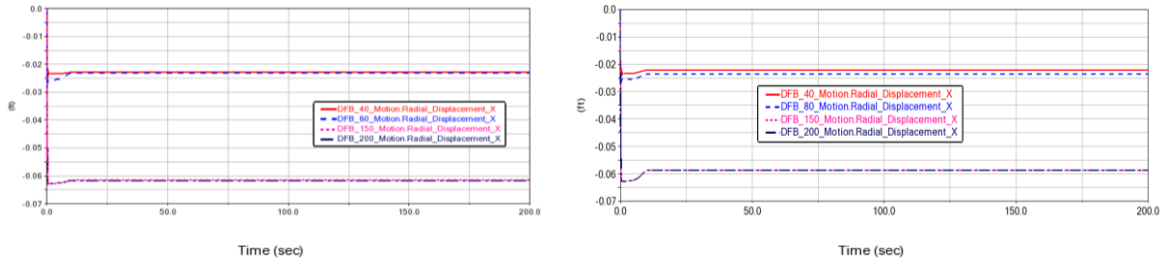


Figure 36 : Déplacements latéraux en X des nœuds 96, 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec les coefficients de frottement statique = 0.3 et dynamique = 0.2 (à gauche) et avec les coefficients de frottement statique = 0.6 et dynamique = 0.4 (à droite) - Adams Drill

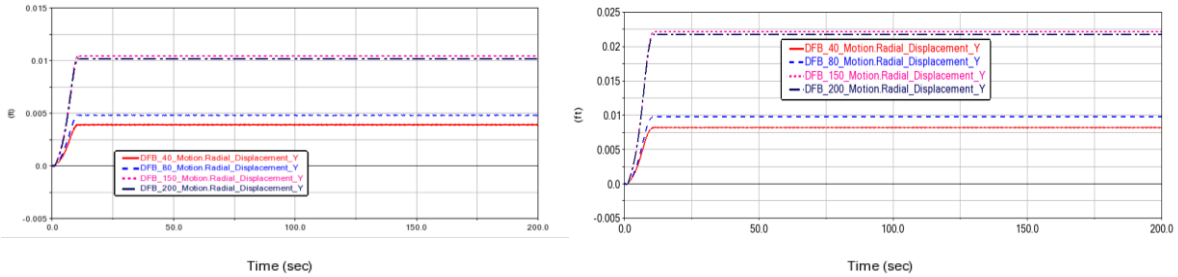


Figure 37 : Déplacements latéraux en X des nœuds 96, 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec les coefficients de frottement statique = 0.3 et dynamique = 0.2 (à gauche) et avec les coefficients de frottement statique = 0.6 et dynamique = 0.4 (à droite) - Adams Drill

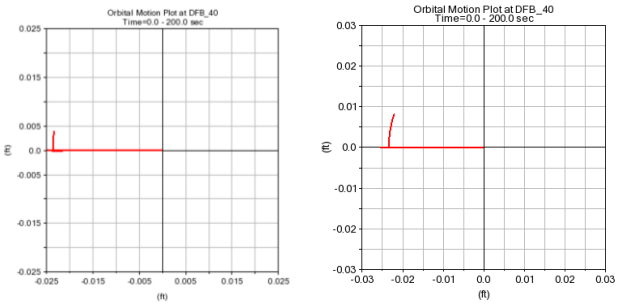


Figure 38 : Orbites du nœud 96, calculé avec les coefficients de frottement statique = 0.3 et dynamique = 0.2 (à gauche) et avec les coefficients de frottement statique = 0.6 et dynamique = 0.4 (à droite) – Adams Drill

La conclusion est que l'influence des coefficients de frottement statique et dynamique est la même dans les deux logiciels. Après avoir doublé les coefficients, les déplacements en X restent invariables et les déplacements en Y se multiplient par 2. Pour les orbites, le mouvement selon l'axe Y se double aussi.

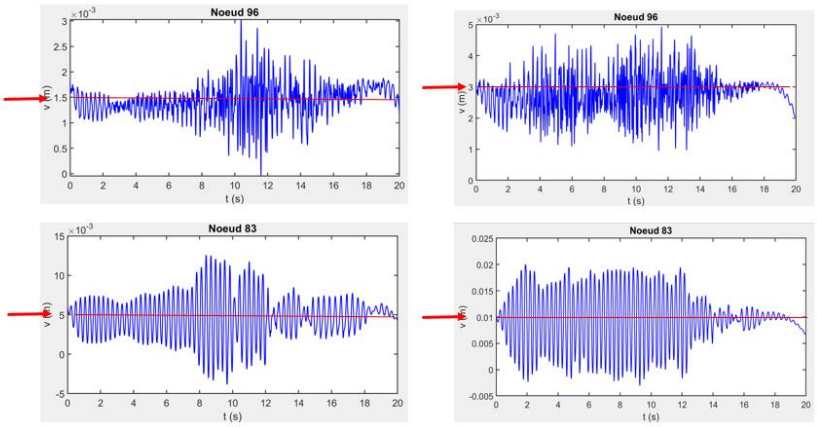


Figure 39 : Détail des valeurs des déplacements en Y doublés en relation avec les coefficients de frottement - DrillSim

4.2 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits vertical

Dans ce cas un puits vertical va être modélisé sur les deux logiciels. La géométrie du train de tiges et les conditions de calculs sont les mêmes que pour le cas horizontal.

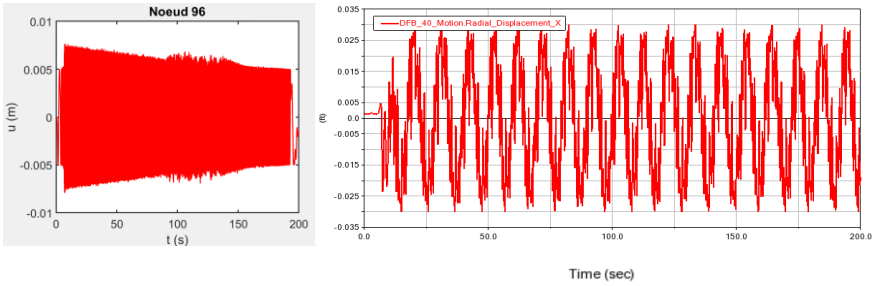


Figure 40 : Déplacements latéraux en X du nœud 96 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

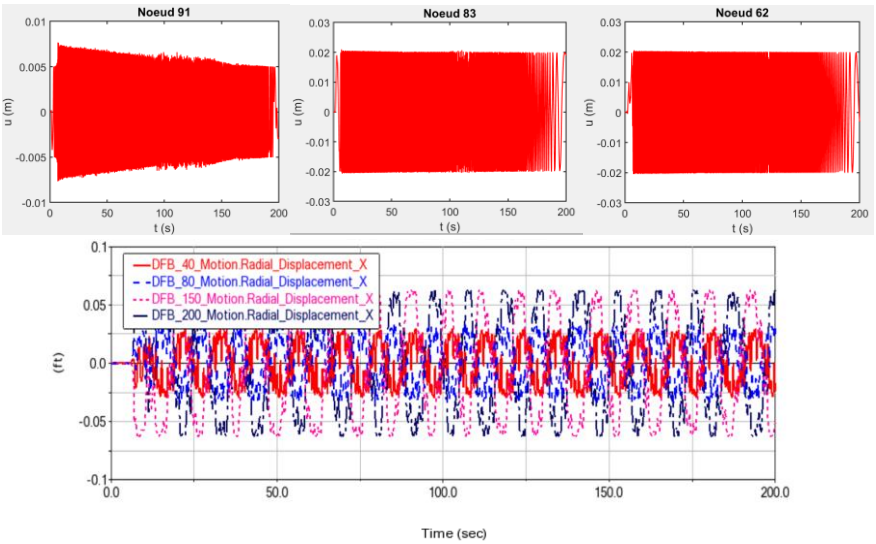


Figure 41 : Déplacements latéraux en X des nœuds 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (en haut) et Adams Drill (en bas)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Nœud 96	± 0.007	± 0.009

X Nœud 91	± 0.007	± 0.009
X Nœud 83	± 0.02	± 0.019
X Nœud 62	± 0.02	± 0.019

Table 14 : Déplacements latéraux en X des nœuds 96, 91, 83 et 62

Les déplacements en X sont validés sur les deux logiciels en termes de résultats de calcul étant compris dans le même intervalle de ±20% pour un cas vertical.

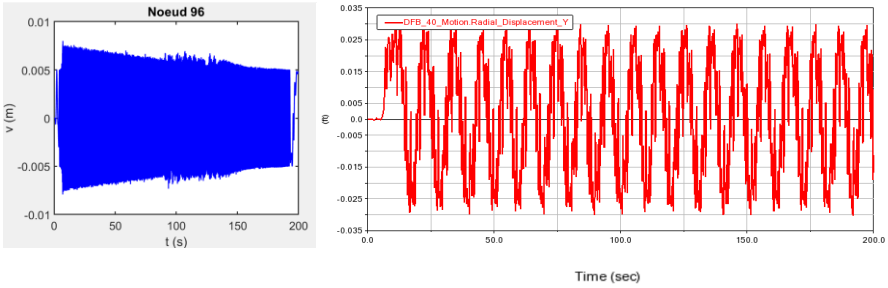


Figure 42 : Déplacements latéraux en Y du nœud 96 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

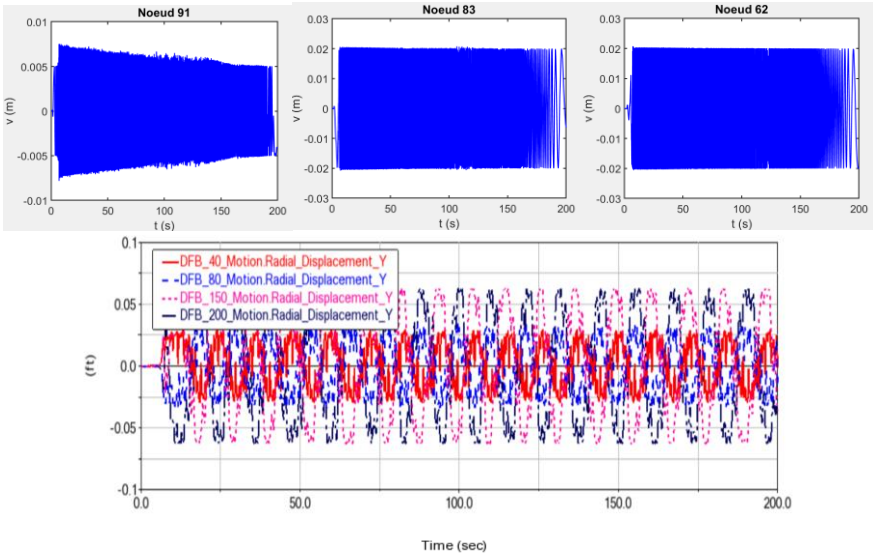


Figure 43 : Déplacements latéraux en Y des nœuds 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (en haut) et Adams Drill (en bas)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
Y Nœud 96	± 0.007	± 0.009
Y Nœud 91	± 0.007	± 0.009
Y Nœud 83	± 0.02	± 0.019
Y Nœud 62	± 0.02	± 0.019

Table 15 : Déplacements latéraux en Y des nœuds 96, 91, 83 et 62

Les déplacements en Y sont aussi validés sur les deux logiciels.

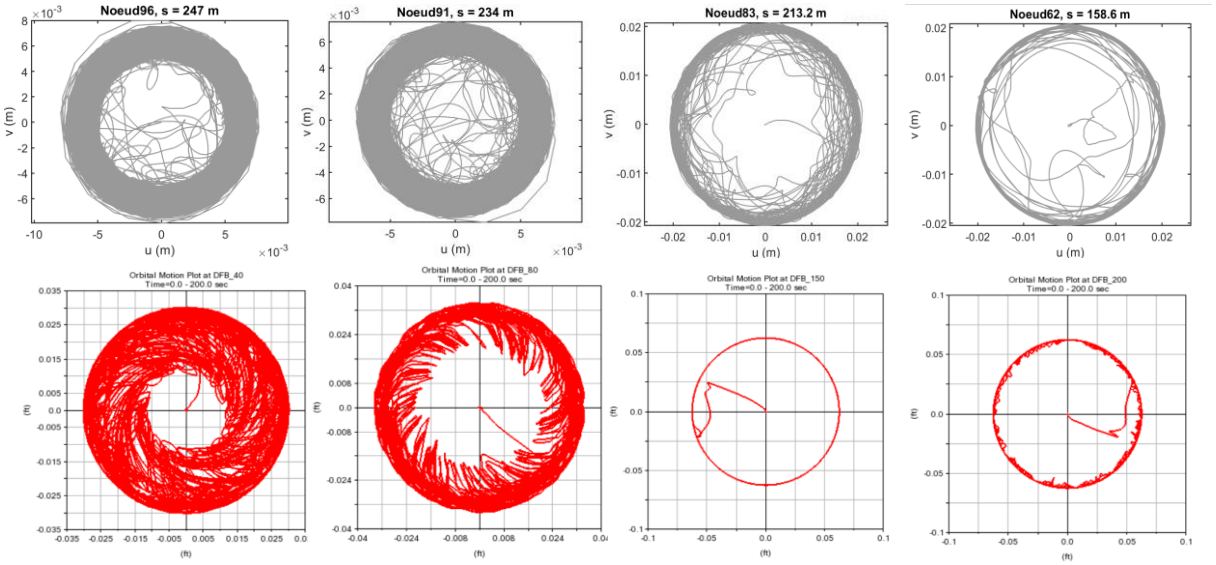


Figure 44 : Orbites des nœuds 96, 91, 83 et 62 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (en haut) et Adams Drill (en bas)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Orbite Nœud 96	± 0.007	± 0.009
Y Orbite Nœud 96	± 0.007	± 0.009
X Orbite Nœud 91	± 0.007	± 0.009
Y Orbite Nœud 91	± 0.007	± 0.009
X Orbite Nœud 83	± 0.02	± 0.019
Y Orbite Nœud 83	± 0.02	± 0.019
X Orbite Nœud 62	± 0.02	± 0.019
Y Orbite Nœud 62	± 0.02	± 0.019

Table 16 : Orbites des nœuds 96, 91, 83 et 62

Dans ce cas d'étude les orbites présentent les mêmes valeurs en termes de gamme de déplacements et de forme.

	DrillSim (s)	Adams Drill (s)
Temps de calcul	1425	156

Table 17 : Temps de calcul (s) pour la simulation du puits vertical

Pour le puits vertical les résultats sont très similaires en tant que déplacements latéraux et en tant qu'orbites entre DrillSim et Adams Drill. Dans ce cas le temps de calcul est presque 10 fois plus grand sur le premier logiciel.

	Adams Drill 19 EUS (s)	Adams Drill 4 EUS (s)
Temps de calcul	156	+ 32400

Table 16 : Temps de calcul (s) pour la simulation du puits vertical

Il faut souligner dans ce cas que le calcul en changeant 15 equivalent upper strings par des tiges de forage sans simplification a pris plus de 9 heures sans arriver à visualiser les résultats. Le temps de calcul était encore supérieur.

4.3 Comparaison DrillSim et Adams Drill dans un puits courbe

Pour le cas d'étude dans un puits courbe la géométrie du train de tiges a été amélioré face aux cas d'études précédents. Dans ce cas, elle varie tout le long du train en dépendant de la géométrie des composants (Table 17).

Géométrie du train de tiges :

Structure	Longueur (m)	Rayon extérieur (m)	Rayon intérieur (m)	Gauge
Outil PDC	0.5	0.0795	0.0355	Oui
Masse tige x 10	10	0.0795	0.0355	-
Stabilisateur x2	5	0.0795	0.0355	Oui
Corps de la tige	9	0.0635	0.0540	-
Tooljoint	0.3	0.0810	0.0480	-

Table 17 : Géométrie du train de tiges

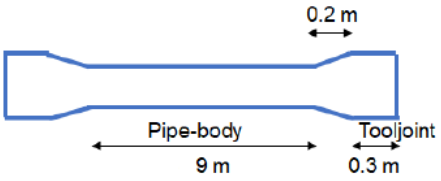


Figure 45 : Géométrie d'une tige

Maillage Drill Sim :

- 163 noeuds équidistants
- 162 éléments de poutre
- 163 butées radiales, une butée par noeud :
- Raideur de contact : 10^7 N/m
- Coefficient de régularisation de raideur : 7 10^7 m-1
- Amortissement : 10^4 N/(m/s)
- Coefficient de régularisation d'amortissement : 7 10^4 m-1
- Coefficient de frottement statique : 0.2
- Coefficient de frottement dynamique : 0.1
- Coefficient de régularisation de frottement : 0.033 (non utile pour ce calcul)
- Différents jeux :
  - Corps de la tige – puits : 0.0445 m
  - Tooljoint – puits : 0.0270 m
  - Stabilisateur/Masse-tige/Bit – puits : 0.0285 m
  - Gauge – puits : 0.0001 m

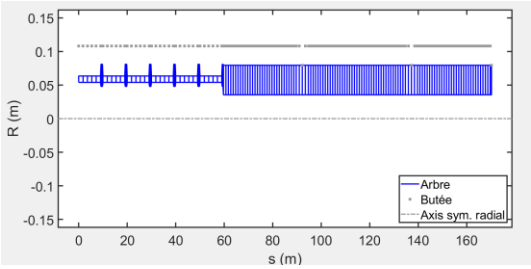


Figure 46 : Visualisation du maillage dans DrillSim

Une fois avec le modèle choisi sur DrillSim, le train de tiges est modélisé sur Adams Drill avec la même géométrie. Pour la connection entre quelques composants des raccords additionels ont dû être ajoutés de façon que la longueur totale ne soit pas affecté.

Maillage Adams Drill :

- Top Drive : 120 tour/min
- Equivalent Upper String : 5
- Drill Pipe : 2
- Flex Pipe : 1
- Crossover : 1
- MWD Tool : 1
- Stabilizer : 1
- Generic Long : 3
- MFR Tool : 1
- Short Collar : 1
- Stabilizer : 1
- Drill Collar : 3
- PDC Bit : 1

Les jeux et les conditions de calcul sont les mêmes que pour DrillSim.

Figure 47 : Visualisation du maillage dans Adams Drill

Un puits hélice déjà modélisé sur DrillSim pour un de ses cas tests a été tracé sur le logiciel de MSC Software. Après de nombreuses tentatives pour faire marcher le logiciel de calcul pour ce cas et un gran nombre d'erreurs, des différents géométries de puits ont été modélisés et testés sans succès (Figure 49).

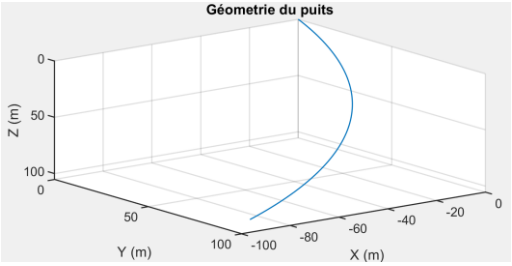


Figure 48 : Géométrie de puits hélice DrillSim

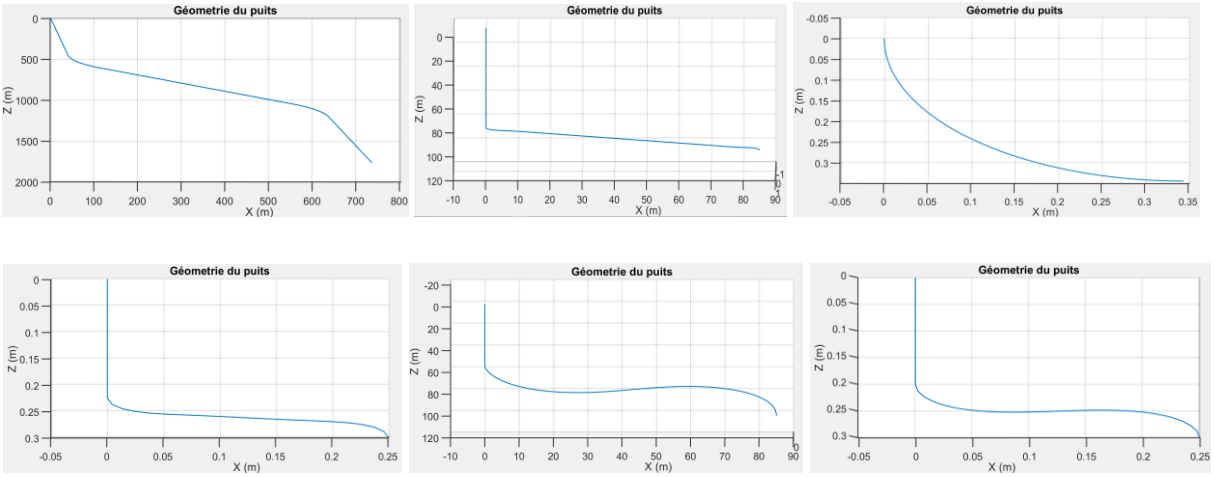


Figure 49 : Différents formes de puits modélisées

Au contraire que sur DrillSim où le train de tiges se modèlise avec le puits, c'est-à-dire la forme du puits est la forme du train de tiges, sur Adams Drill le train de tiges est droit et après il est introduit dans un puits qui est modélisé à part. Pour cela, sur Adams Drill le puits doit être toujours plus long que le train de tiges et sur DrillSim le puits et le train de tiges ont la même longueur.

En plus, après avoir étudié les différent cas test et éssayé un grand nombre de formes courbes sans succès on arrive à la conclusion que le logiciel Adams Drill a besoin d'une forme de puits assez droite au début avec une longueur supérieur au train de tiges pour pouvoir lancer le calcul. Dissons donc que le même train de tiges ne va pas être comparable dans le même puits courbe vue la différence de longueurs qui est nécéssaire entre eux.

Pour la forme suivante (Figure 50) le calcul n'est réalisable sur Adams Drill qu'en multipliant par 4 la composant « Z » de façon que le puits aie une zone droite assez longue au début pour que le train de tiges puisse se positioner.

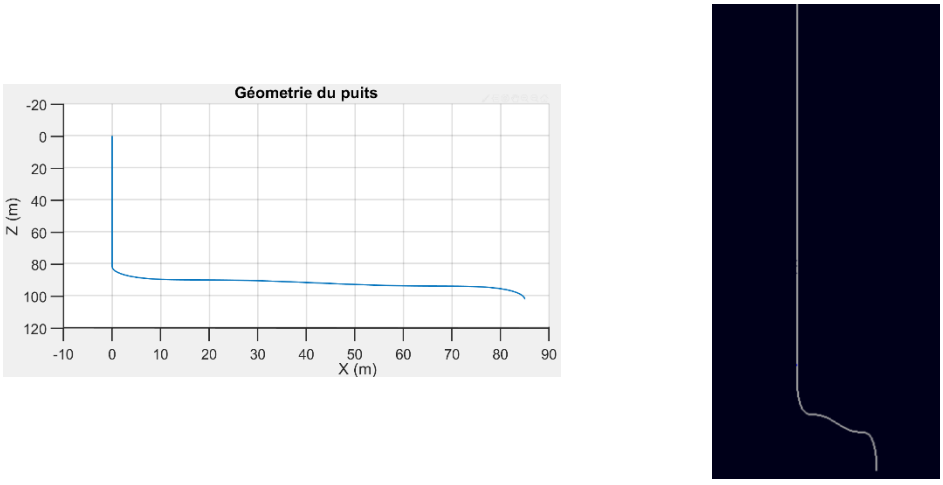


Figure 50 : Puits modélisé sur DrillSim (à gauche) et puits modélisé sur Adams Drill avec le composant « Z » multiplié par 4 (à droite)

Vue la nécéssité d'une partie vertical au début, une comparaison va être faite sur un puits vertical. A différence du cas précédent ce cas va avoir une géométrie du train de tiges complexe pour un train de tiges de 170.2 m de long.

Les points de contrôle sont les suivants :

- Nœud 148 (Masse-tige) = 50 ft du PDC (Drill Collar)
- Nœud 130 (Stabilisateur) = 108 ft du PDC (Stabilisateur)
- Nœud 96 (Masse-tige) = 225 ft du PDC (Generic Long)
- Nœud 86 (Stabilisateur) = 255 ft du PDC (Stabilisateur)

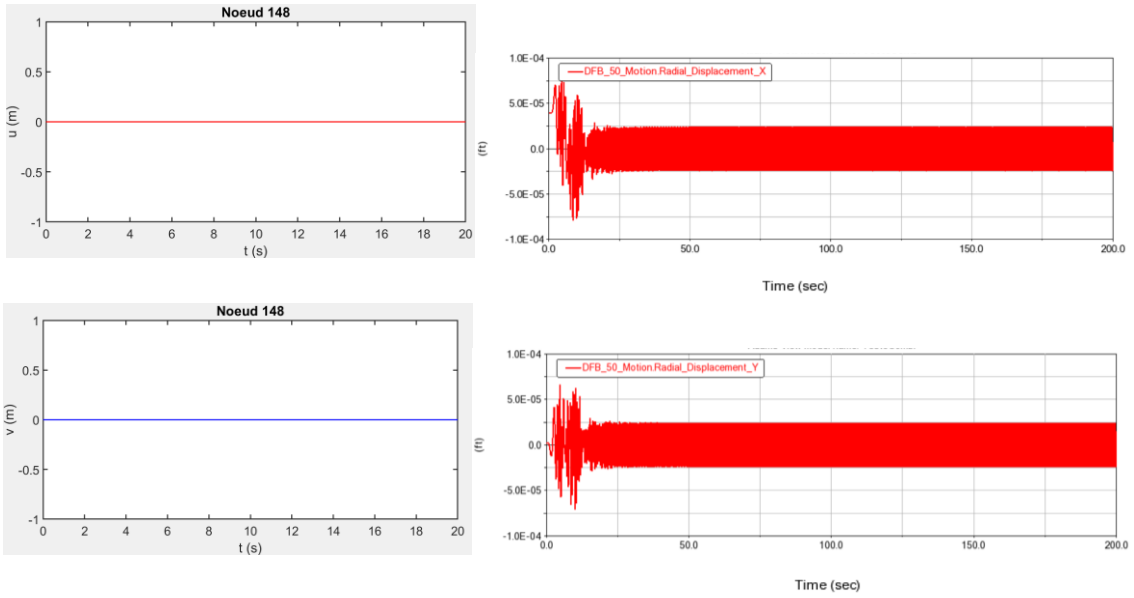
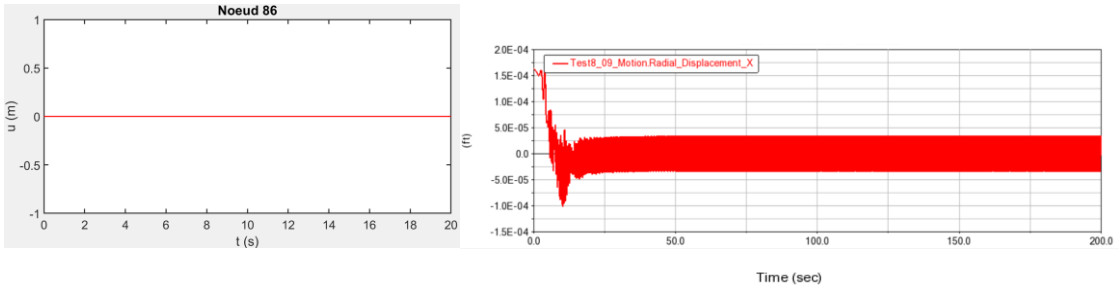


Figure 51 : Déplacements latéraux au nœud 148 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Nœud 148	0	7.2 E-6
Y Nœud 148	0	7.2 E-6

Table 18 : Déplacements latéraux du nœud 148



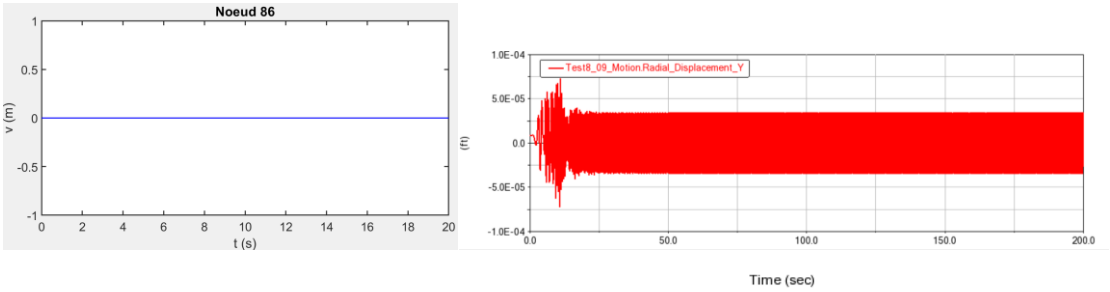


Figure 52 : Déplacements latéraux au nœud 86 en fonction du temps, calculé avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

	DrillSim (m)	Adams Drill (m)
X Nœud 86	0	1.0 E-5
Y Nœud 86	0	1.0 E-5

Table 19 : Déplacements latéraux du nœud 148

Les déplacements latéraux sont validés pour les deux logiciels bien que DrillSim travaille avec des milimétres et Adams Drill montre même des micrométres pour un train de tiges de plus d'une centaine de métres.

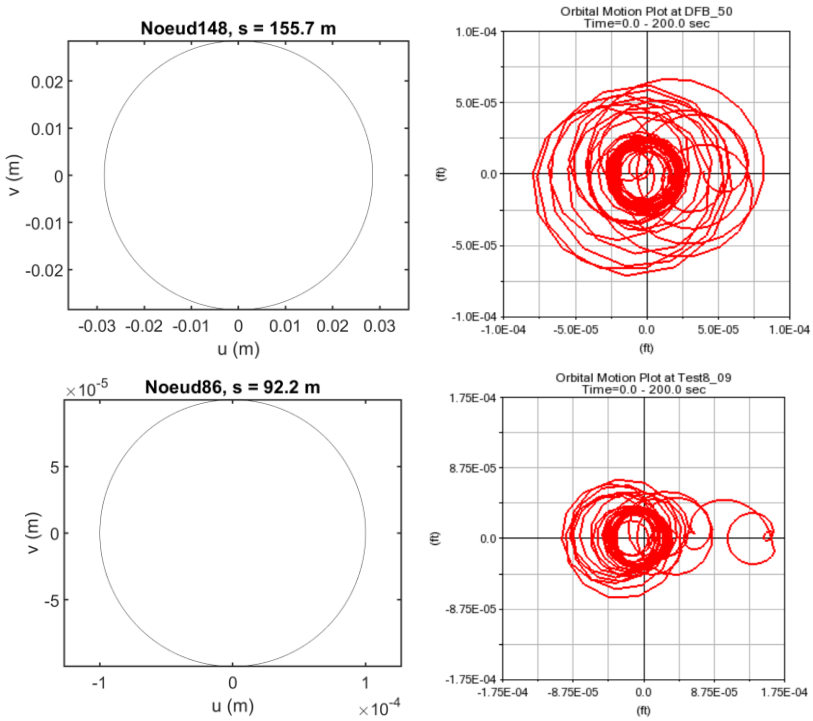


Figure 53 : Orbites des nœuds 148 et 86 calculés avec DrillSim (à gauche) et Adams Drill (à droite)

De la même façon que pour les déplacements latéraux les résultats sont de l'ordre des micrométres ce qui fait qu'ils soient 0 pour DrillSim. Les valeurs son aussi validés entre les deux logiciels.

	DrillSim pour 20 s de sim (s)	Adams Drill pour 200 s de sim (s)
Temps de calcul	1680	520

Table 20 : Temps de calcul (s) pour la simulation du puits vertical avec géométrie complexe

Chapitre 5. Conclusions et perspectives

Une fois effectués les différents tests on peut avoir une vision plus claire du fonctionnement des deux logiciels. A l'issue de ces études de simulation, il est maintenant possible de spécifier les différences entre Adams Drill et DrillSim. Cependant, une étude plus exhaustive des paramètres de calcul pourrait encore permettre d'approfondir plus l'analyse.

Adams Drill est un logiciel avec une interface assez simple en comparaison avec d'autres programmes de MSC Software mais très intuitive pour l'utilisateur du point de vue de la conception du train de tiges de forage, du puits, des conditions de calcul… grâce à des schémas et des images. Cependant le logiciel s'adresse à des spécialistes du forage pour comprendre la notice d'utilisation et pour construire de façon réaliste le train de tiges. Les modélisations du puits et du train de tiges sont indépendantes. Ainsi un modèle de train de tiges peut servir dans différentes configurations de puits, sans avoir à le modifier.

De l'autre côté DrillSim utilise des fichiers de texte pour la conception du train de tiges ce qui le rend moins visuel et intuitif qu'Adams Drill. Dans ce cas, une bonne assimilation de la notice doit être faite avant de l'utiliser. Le fichier d'entrées se complique avec la complexité du puits. DrillSim lie intimement les modélisations du puits et du train de tiges : les nœuds du train de tiges portent le jeu avec le puits.

Adams Drill emploie une méthode de calcul basé sur la dynamique des multi-corps articulés par des liaisons élastiques. Il utilise donc peu de degrés de liberté. De plus la partie supérieure du train de tiges qui est souvent dans des parties rectilignes peut être modélisée par des macro multi-corps articulés (Equivalent Upper String). Il se concentre sur les détails du BHA.

DrillSim qui travaille avec des éléments finis, donne à l'utilisateur la liberté de décider si une certaine zone du train de tiges peut être plus simplifié ou plus détaillé en fonction des dimensions du maillage sur chaque partie. En plus de la possibilité de simplifier le maillage sur les tiges, Drill Sim donne aussi l'option d'utilisation de la méthode de condensation dynamique de Craig-Bampton en constituant des super éléments dotés de quelques premières variables modales, super éléments assimilables aux EUS.

Les EUS et les super éléments de Craig-Bampton raccourcissent les temps de simulation.

Les simulations effectuées avec Adams Drill et DrillSim dans le cas des puits horizontal et vertical donnent des déplacements latéraux similaires. Par contre les orbites similaires dans le puits vertical différent légèrement dans le puits horizontal.

Avec 19 EUS, Adams Drill fournit des simulations dans un temps 10 (25) fois plus court que DrillSim avec une condensation de 150 modes pour le puits vertical (puits horizontal).

Ce projet est une première étape de la comparaison des deux logiciels. Il s'est attaché à s'approprié Adams Drill et DrillSim et de lancer des simulations sur des cas les plus simples possibles. A ce stade Adams Drill qui est équipé d'une IHM facilitant son utilisation, procure des simulations

plus rapides que DrillSim. Cependant ces avantages sont à confirmer lorsque Adams Drill est confronté à des cas de forage où il faut prendre en compte des effets, des phénomènes, des configurations que DrillSim peut considérer. Il peut être cité : le pré chargement de la géométrie 3D du puits, la pénétration dans les contacts tige-puits, l'interaction fluide-structure qui apporte masse ajouté, amortissement et effet de raidissement, la position décentrée des tiges dans le puits.

Bibliographie

1. Khac Long NGUYEN, Marie-Ange ANDRIANOELY, Quang Thinh TRAN, Lionel MANIN et Régis DUFOUR. Notice technique et d'utilisation de DrillSim. Version 2.4.1. Laboratoire commun LaMCoS – DrillScan, 2019.

2. Hédi SELLAMI. Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits à trajectoires complexes: application a la prédiction des frottements garniture-puits, 2005.

3. Fred HARVEY, MSC Software. Drilling Simulations Enhance Well Planning and Drilling Decisions. Engineering Reality Magazine.

4. Ahmed A. SHABANA. Dynamics of Multibody Systems. Second Edition. Cambridge University Press.

5. Michael LALANNE, Patrick BERTHIER et Johan DER HAGOPIAN. Mechanical Vibrations for Engineers, 1984. John Wiley & Sons.

6. Khac-Long NGUYEN, Quang-Thinh TRAN, Marie-Ange ANDRIANOELY, Lionel MANIN, Sébastien BAGUET, Régis DUFOUR, Mohamed MAHJOUB et Stéphane MENAND. Nonlinear rotordynamics of a drillstring in curved wells: models and numerical techniques. Laboratoire commun LaMCoS – DrillScan.

Annexes

Annexe 1 : Puits horizontal DrillSim

Code de la dynamique non-linéaire pour le forage horizontal de 260 m à 120 tr/min :

```
GEOM
 1, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
101,260.0000, 0.0000, 0.0,1
99999
1,7900.,2.03E11,0.3,0.0,0.03,0.0,
99999
1,0.06,0.04,
2,1.E7,0.02,7.E7,1.E4,7.E4,0.3,0.2,0.033,
3,1.E7,0.005,7.E7,1.E4,7.E4,0.3,0.2,0.033,
4,0.075,.06,.06,
99999
1,1,1,1,1,1,2,99,1,1,
101,5,1,2,0,1,0,89,1,1,
191,5,1,2,0,92,0,3,1,1,
195,5,1,2,0,97,0,3,1,1,
199,5,1,3,0,91,0,2,1,5,
202,4,1,4,0,91,0,2,1,5,
99999
POSI
9.81,1,0.0,
2,1.E-8,100,
1,1,1,1,0,0,1,
101,0,0,-222411,0,0,0,
99999
99999
DYN
1,1,1,1,0,0,1,
101,0,0,-222411,0,0,0,
99999
1,6,4,0.0,0.0,1.0,12.566370614359171,
99999
99999
99999
99999
99999
99999
99999
99999
9.81,1
```

1,150,
0,20,2,1.E-6,1.1,1.01,1.E-2,
99999
1.E-3,
1,101,-1,
99999
FIN*

Annexe 2 : Puits vertical DrillSim

Code de la dynamique non-linéaire pour le forage vertical de 260 m à 120 tr/min :

```
GEOM
 1, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
101,0.0000, 0.0000, 260.0000,1
99999
1,7900.,2.03E11,0.3,0.0,0.03,0.0,
99999
1,0.06,0.04,
2,1.E7,0.02,7.E7,1.E4,7.E4,0.3,0.2,0.033,
3,1.E7,0.005,7.E7,1.E4,7.E4,0.3,0.2,0.033,
4,0.075,.06,.06,
99999
1,1,1,1,1,1,2,99,1,1,
101,5,1,2,0,1,0,89,1,1,
191,5,1,2,0,92,0,3,1,1,
195,5,1,2,0,97,0,3,1,1,
199,5,1,3,0,91,0,2,1,5,
202,4,1,4,0,91,0,2,1,5,
99999
POSI
9.81,1,0.0,
2,1.E-8,100,
1,1,1,1,0,0,1,
101,0,0,-222411,0,0,0,
99999
99999
DYN
1,1,1,1,0,0,1,
101,0,0,-222411,0,0,0,
99999
1,6,4,0.0,0.0,1.0,12.566370614359171,
99999
99999
99999
99999
99999
99999
99999
99999
9.81,1
1,150,
0,200,2,1.E-6,1.1,1.01,1.E-2,
99999
```

1.E-3,
1,101,-1,
99999
FIN*

Annexe 3 : Puits vertical géométrie complexe DrillSim

Code de la dynamique non-linéaire pour le forage vertical de 170.2 m à 120 tr/min :

GEOM
1, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
2, 0.0000, 0.0000, 1.8000,
3, 0.0000, 0.0000, 3.6000,
4, 0.0000, 0.0000, 5.4000,
5, 0.0000, 0.0000, 7.2000,
6, 0.0000, 0.0000, 9.0000,
7, 0.0000, 0.0000, 9.2000,
8, 0.0000, 0.0000, 9.5000,
9, 0.0000, 0.0000, 9.8000,
10, 0.0000, 0.0000, 10.0000,
11, 0.0000, 0.0000, 11.8000,
12, 0.0000, 0.0000, 13.6000,
13, 0.0000, 0.0000, 15.4000,
14, 0.0000, 0.0000, 17.2000,
15, 0.0000, 0.0000, 19.0000,
16, 0.0000, 0.0000, 19.2000,
17, 0.0000, 0.0000, 19.5000,
18, 0.0000, 0.0000, 19.8000,
19, 0.0000, 0.0000, 20.0000,
20, 0.0000, 0.0000, 21.8000,
21, 0.0000, 0.0000, 23.6000,
22, 0.0000, 0.0000, 25.4000,
23, 0.0000, 0.0000, 27.2000,
24, 0.0000, 0.0000, 29.0000,
25, 0.0000, 0.0000, 29.2000,
26, 0.0000, 0.0000, 29.5000,
27, 0.0000, 0.0000, 29.8000,
28, 0.0000, 0.0000, 30.0000,
29, 0.0000, 0.0000, 31.8000,
30, 0.0000, 0.0000, 33.6000,
31, 0.0000, 0.0000, 35.4000,
32, 0.0000, 0.0000, 37.2000,
33, 0.0000, 0.0000, 39.0000,
34, 0.0000, 0.0000, 39.2000,
35, 0.0000, 0.0000, 39.5000,
36, 0.0000, 0.0000, 39.8000,
37, 0.0000, 0.0000, 40.0000,
38, 0.0000, 0.0000, 41.8000,
39, 0.0000, 0.0000, 43.6000,
40, 0.0000, 0.0000, 45.4000,

41, 0.0000, 0.0000, 47.2000,
42, 0.0000, 0.0000, 49.0000,
43, 0.0000, 0.0000, 49.2000,
44, 0.0000, 0.0000, 49.5000,
45, 0.0000, 0.0000, 49.8000,
46, 0.0000, 0.0000, 50.0000,
47, 0.0000, 0.0000, 51.8000,
48, 0.0000, 0.0000, 53.6000,
49, 0.0000, 0.0000, 55.4000,
50, 0.0000, 0.0000, 57.2000,
51, 0.0000, 0.0000, 59.0000,
52, 0.0000, 0.0000, 59.2000,
53, 0.0000, 0.0000, 59.5000,
54, 0.0000, 0.0000, 59.7000,
55, 0.0000, 0.0000, 60.7000,
56, 0.0000, 0.0000, 61.7000,
57, 0.0000, 0.0000, 62.7000,
58, 0.0000, 0.0000, 63.7000,
59, 0.0000, 0.0000, 64.7000,
60, 0.0000, 0.0000, 65.7000,
61, 0.0000, 0.0000, 66.7000,
62, 0.0000, 0.0000, 67.7000,
63, 0.0000, 0.0000, 68.7000,
64, 0.0000, 0.0000, 69.7000,
65, 0.0000, 0.0000, 70.7000,
66, 0.0000, 0.0000, 71.7000,
67, 0.0000, 0.0000, 72.7000,
68, 0.0000, 0.0000, 73.7000,
69, 0.0000, 0.0000, 74.7000,
70, 0.0000, 0.0000, 75.7000,
71, 0.0000, 0.0000, 76.7000,
72, 0.0000, 0.0000, 77.7000,
73, 0.0000, 0.0000, 78.7000,
74, 0.0000, 0.0000, 79.7000,
75, 0.0000, 0.0000, 80.7000,
76, 0.0000, 0.0000, 81.7000,
77, 0.0000, 0.0000, 82.7000,
78, 0.0000, 0.0000, 83.7000,
79, 0.0000, 0.0000, 84.7000,
80, 0.0000, 0.0000, 85.7000,
81, 0.0000, 0.0000, 86.7000,
82, 0.0000, 0.0000, 87.7000,
83, 0.0000, 0.0000, 88.7000,
84, 0.0000, 0.0000, 89.7000,
85, 0.0000, 0.0000, 90.9500,

86, 0.0000, 0.0000, 92.2000,
87, 0.0000, 0.0000, 93.4500,
88, 0.0000, 0.0000, 94.7000,
89, 0.0000, 0.0000, 95.7000,
90, 0.0000, 0.0000, 96.7000,
91, 0.0000, 0.0000, 97.7000,
92, 0.0000, 0.0000, 98.7000,
93, 0.0000, 0.0000, 99.7000,
94, 0.0000, 0.0000,100.7000,
95, 0.0000, 0.0000,101.7000,
96, 0.0000, 0.0000,102.7000,
97, 0.0000, 0.0000,103.7000,
98, 0.0000, 0.0000,104.7000,
99, 0.0000, 0.0000,105.7000,
100, 0.0000, 0.0000,106.7000,
101, 0.0000, 0.0000,107.7000,
102, 0.0000, 0.0000,108.7000,
103, 0.0000, 0.0000,109.7000,
104, 0.0000, 0.0000,110.7000,
105, 0.0000, 0.0000,111.7000,
106, 0.0000, 0.0000,112.7000,
107, 0.0000, 0.0000,113.7000,
108, 0.0000, 0.0000,114.7000,
109, 0.0000, 0.0000,115.7000,
110, 0.0000, 0.0000,116.7000,
111, 0.0000, 0.0000,117.7000,
112, 0.0000, 0.0000,118.7000,
113, 0.0000, 0.0000,119.7000,
114, 0.0000, 0.0000,120.7000,
115, 0.0000, 0.0000,121.7000,
116, 0.0000, 0.0000,122.7000,
117, 0.0000, 0.0000,123.7000,
118, 0.0000, 0.0000,124.7000,
119, 0.0000, 0.0000,125.7000,
120, 0.0000, 0.0000,126.7000,
121, 0.0000, 0.0000,127.7000,
122, 0.0000, 0.0000,128.7000,
123, 0.0000, 0.0000,129.7000,
124, 0.0000, 0.0000,130.7000,
125, 0.0000, 0.0000,131.7000,
126, 0.0000, 0.0000,132.7000,
127, 0.0000, 0.0000,133.7000,
128, 0.0000, 0.0000,134.7000,
129, 0.0000, 0.0000,135.9500,
130, 0.0000, 0.0000,137.2000,

131, 0.0000, 0.0000,138.4500,
132, 0.0000, 0.0000,139.7000,
133, 0.0000, 0.0000,140.7000,
134, 0.0000, 0.0000,141.7000,
135, 0.0000, 0.0000,142.7000,
136, 0.0000, 0.0000,143.7000,
137, 0.0000, 0.0000,144.7000,
138, 0.0000, 0.0000,145.7000,
139, 0.0000, 0.0000,146.7000,
140, 0.0000, 0.0000,147.7000,
141, 0.0000, 0.0000,148.7000,
142, 0.0000, 0.0000,149.7000,
143, 0.0000, 0.0000,150.7000,
144, 0.0000, 0.0000,151.7000,
145, 0.0000, 0.0000,152.7000,
146, 0.0000, 0.0000,153.7000,
147, 0.0000, 0.0000,154.7000,
148, 0.0000, 0.0000,155.7000,
149, 0.0000, 0.0000,156.7000,
150, 0.0000, 0.0000,157.7000,
151, 0.0000, 0.0000,158.7000,
152, 0.0000, 0.0000,159.7000,
153, 0.0000, 0.0000,160.7000,
154, 0.0000, 0.0000,161.7000,
155, 0.0000, 0.0000,162.7000,
156, 0.0000, 0.0000,163.7000,
157, 0.0000, 0.0000,164.7000,
158, 0.0000, 0.0000,165.7000,
159, 0.0000, 0.0000,166.7000,
160, 0.0000, 0.0000,167.7000,
161, 0.0000, 0.0000,168.7000,
162, 0.0000, 0.0000,169.7000,
163, 0.0000, 0.0000,170.2000,
99999
1,7900.,2.03E11,0.3,0.9,0.03,0.0,
2,1200,0.013,1.E-6,0.01,
99999
1,0.0635,0.0540,
2,0.0810,0.0480,
3,0.0795,0.0355,
4,1.E7,0.0445,7.E11,1.E4,7.E11,0.2,0.1,0.033,
5,1.E7,0.0270,7.E11,1.E4,7.E11,0.2,0.1,0.033,
6,1.E7,0.0285,7.E11,1.E4,7.E11,0.2,0.1,0.033,
7,1.E7,0.0001,7.E11,1.E4,7.E11,0.2,0.1,0.033,
8,0.1080,0.0635,

9,0.1080,0.0810,
10,0.1080,0.0795,
11,0.0540,0.0,
12,0.0480,0.0,
13,0.0355,0.0,
99999
1,1,1,1,1,1,2,4,1,1,
6,1,1,1,1,10,11,4,1,1,
11,1,1,1,1,19,20,4,1,1,
16,1,1,1,1,28,29,4,1,1,
21,1,1,1,1,37,38,4,1,1,
26,1,1,1,1,46,47,4,1,1,
31,1,1,2,2,7,8,5,1,9,
37,1,1,2,2,8,9,4,1,9,
42,1,1,1,2,6,7,5,1,9,
48,1,1,2,1,9,10,4,1,9,
53,1,1,2,3,53,54,
54,1,1,3,3,54,55,108,1,1,
163,5,1,4,0,1,0,5,1,1,
169,5,1,4,0,10,0,5,1,1,
175,5,1,4,0,19,0,5,1,1,
181,5,1,4,0,28,0,5,1,1,
187,5,1,4,0,37,0,5,1,1,
193,5,1,4,0,46,0,5,1,1,
199,5,1,5,0,7,0,5,1,9,
205,5,1,5,0,8,0,5,1,9,
211,5,1,5,0,9,0,4,1,9,
216,5,1,6,0,54,0,31,1,1,
248,5,1,6,0,87,0,42,1,1,
291,5,1,6,0,131,0,31,1,1,
323,5,1,7,0,86,0,
324,5,1,7,0,130,0,
325,5,1,7,0,163,0,
326,2,2,11,11,1,2,4,1,1,
331,2,2,11,11,10,11,4,1,1,
336,2,2,11,11,19,20,4,1,1,
341,2,2,11,11,28,29,4,1,1,
346,2,2,11,11,37,38,4,1,1,
351,2,2,11,11,46,47,4,1,1,
356,2,2,12,12,7,8,5,1,9,
362,2,2,12,12,8,9,4,1,9,
367,2,2,11,12,6,7,5,1,9,
373,2,2,12,11,9,10,4,1,9,
378,2,2,12,13,53,54,
379,2,2,13,13,54,55,108,1,1,

488,3,2,8,8,1,2,4,1,1
493,3,2,8,8,10,11,4,1,1,
498,3,2,8,8,19,20,4,1,1,
503,3,2,8,8,28,29,4,1,1,
508,3,2,8,8,37,38,4,1,1,
513,3,2,8,8,46,47,4,1,1,
518,3,2,9,9,7,8,5,1,9,
524,3,2,9,9,8,9,4,1,9,
529,3,2,8,9,6,7,5,1,9,
535,3,2,9,8,9,10,4,1,9,
540,3,2,9,10,53,54,
541,3,2,10,10,54,55,108,1,1,
99999
POSI
9.81,1,12.566370614359171
2,1.E-8,100,
1,1,1,1,0,0,1,
86,1,1,0,0,0,0,
130,1,1,0,0,0,0,
163,1,1,0,0,0,0,
99999
163,0,0,-10000,0,0,0,
99999
DYN
1,1,1,1,0,0,1,
163,0,0,-10000,0,0,0,
99999
1,6,1,12.566370614359171
99999
99999
99999
99999
99999
99999
99999
9.81,1
1,150,
0,20,2,1.E-6,1.1,1.01,1.E-2,
99999
1.E-3,
1,163,-1,
99999
FIN*