

# Laboratoire Commun DrillLab : Simulation du comportement dynamique non linéaire de train de tiges de forage pour l'extraction pétrolière ou géothermique

Lionel Manin <sup>a</sup>, Régis Dufour<sup>a</sup>, Marie-Ange Andrianoely<sup>a</sup>, Quang Thinh Tran<sup>a</sup>, Khac-Long Nguyen<sup>a,b</sup>, Stephane Menand<sup>b</sup>, Mohamed Mahjoub<sup>b</sup>

a. Univ Lyon, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, LaMCoS, F-69621, France,

lionel.manin@insa-lyon.fr

b. DrillScan, 26 Rue Emile Decorps 69100 Villeurbanne, France

stephane.menand@drillscan.fr

## Résumé :

*Le LabCom DrillLab (ANR-15-LCV4-0010) a pour objectif le développement de modèles non linéaires pour simuler le comportement dynamique de train de tiges de forage utilisé pour l'extraction pétrolière et/ou l'exploitation géothermique. Ce laboratoire commun implique l'entreprise DrillScan ainsi que le laboratoire LaMCoS de l'INSA Lyon. DrillLab a été établi afin de consolider et développer des connaissances et du savoir-faire dans le domaine de la dynamique et des vibrations des trains de tige de forage. DrillScan est une entreprise proposant des études et des solutions logicielles aux nombreux acteurs de l'industrie du forage pétrolier et géothermique. Le LaMCoS possède une expertise scientifique et des outils de calcul dans le domaine de la dynamique des rotors et a aussi développé des moyens de calculs pour prédire le comportement vibratoire de train de tiges de forage.. La complémentarité de compétences des deux entités a été utilisée au cours de ses trois années pour le développement d'un outil de prévision du comportement dynamique de train de tiges de forage, DrillSim: équilibre quasi-statique, analyse modale et réponse temporelle. Une validation des différents volets du modèle a été réalisée à l'aide de cas tests académiques et du métier du forage. Les résultats obtenus donnent bien entendu l'évolution du comportement dynamique le long de la tige et dans le temps. Ainsi peuvent être évitées les zones de fonctionnement où les niveaux de vibrations et les frottements sont trop importants. Par ailleurs, ce LabCom a permis des publications dans des journaux internationaux et des conférences, ainsi que la pérennisation d'un emploi.*

## Abstract :

*The purpose of DrillLab is to develop nonlinear models for predicting the dynamic and vibration behaviour of long drillstring assembly used in drilling operations ordered by the oil and geothermal industries. It implies the DrillScan company and the LaMCoS Laboratory from INSA Lyon. DrillLab has been launched to boost the knowledge and competencies of the two partners in the field of drillstring vibrations. DrillScan offers consulting studies, develops and sales simulation software to the actors of the oil and geothermal production. LaMCoS has a great expertise in rotordynamics and had also developed calculation tools for predicting drillstring dynamics. DrillLab involves one PhD student, a*

*post-doc researcher, the scientific advising and computing cluster of the LaMCoS, and the experience of DrillScan. The complementarity and competencies of the two partners has enabled the development of a simulation tool DrillSim that computes: static equilibrium of the drillstring, modal analysis, transient dynamics. Moreover, DrillLab has led to the publication of two research papers in journals, a job creation.*

**Mots clefs : LabCoM, Drilling, DrillString, Dynamics, Non linear, vibrations.**

## 1 Introduction - Contexte

L'objet du LabCom DrillLab est de développer des modèles non linéaires pour simuler le comportement dynamique de train de tiges de forage pour l'extraction pétrolière et pour l'exploitation géothermique. DrillLab implique la PME DrillScan (69, Villeurbanne) et le laboratoire LaMCoS (UMR 5259, CNRS) de l'INSA Lyon. DrillLab est supporté par l'Agence Nationale de la Recherche pour une durée de trois ans au travers d'un contrat et d'une subvention (ANR-15-LCV4-0010).

DrillScan est une entreprise innovante dans le domaine du forage pétrolier et géothermique proposant des études, des solutions logicielles et, des formations aux nombreux acteurs de cette industrie. Plusieurs acteurs existent sur le marché, mais DrillScan se différencie de ses compétiteurs dans le sens où DrillScan estime que l'optimisation et la résolution des problèmes du forage ne peut se faire qu'au travers de la compréhension complète des interactions entre les éléments du triptyque : « Roche – Outil de forage – Garniture de forage ». Elle développe et fait évoluer deux plateformes logicielles uniques à cet effet : WellScan & BitScan. Au sein du LaMCoS, c'est l'équipe Dynamique et Contrôle des Structure (DCS) qui est concernée par le LabCom. La dynamique des machines tournantes est une activité historique de l'équipe LaMCoS-DCS qui a développé une expertise dans ce domaine [1-6]. Il s'agit de prévoir le comportement dynamique des rotors afin de le maîtriser et ainsi garantir leur intégrité et réduire leur impact sur l'environnement même en présence de sollicitations dynamiques variables et évolutives. Par ailleurs, une expérience notable dans les problématiques liées à la dynamique du forage a été développée entre 1989 et 1996 avec le soutien de la société SNEAP-ELF (devenue aujourd'hui Total) pour prévoir le comportement dynamique linéaire en flexion, torsion et longitudinal du train de tige autour de sa position d'équilibre statique calculée de façon non-linéaire pour prendre en compte les contacts tige-puits avec la géométrie 3D du puits. La boue, les stabilisateurs, les couplages longitudinal-flexion et longitudinal-torsion, principalement, étaient pris en compte dans la modélisation et dans le code alors développé. Cependant la taille des modèles restait limitée et la prise en compte des actions de contacts et des interactions fluide-structure basique.

DrillScan possède une expertise reconnue sur la statique de la structure de forage (codes de calcul Abis & Modgar) sur la dynamique modale (codes Abis & Vbis) et souhaite progresser sur sa dynamique temporelle. Lorsque la structure est mise en rotation les éléments qui la constituent (tiges, rotules, drillcollars, bow springs...) sont soumis à des efforts, des chocs et des vibrations qui les détériorent et dégradent la vitesse et la qualité du forage. Le forage pétrolier mobilise des moyens importants en termes d'équipements et de personnels. Les opérations de forage consistent en la réalisation d'un ouvrage pour atteindre une cible géologique enfouie profondément sous terre. Le puits, ou trou de forage, est réalisé à l'aide de trépan mis en mouvement depuis la surface (Fig. 1). Une fois le trou réalisé ses parois – i.e. son intégrité – sont maintenues à l'aide de tubes (cuvelage ou casing) descendus et cimentés dans le puits. Un puits est constitué de différentes sections (couple d'opérations : forage du trou et descente casing) dont les diamètres, les longueurs et les points d'arrêts sont imposés par des contraintes

géologiques (pression de pore/de fracturation du massif et incident géologique – zone fracturée, incompatibilité de boue entre deux formations). Une fois l'objectif géologique atteint, le puits est équipé d'une colonne de production – étape appelée complétion.

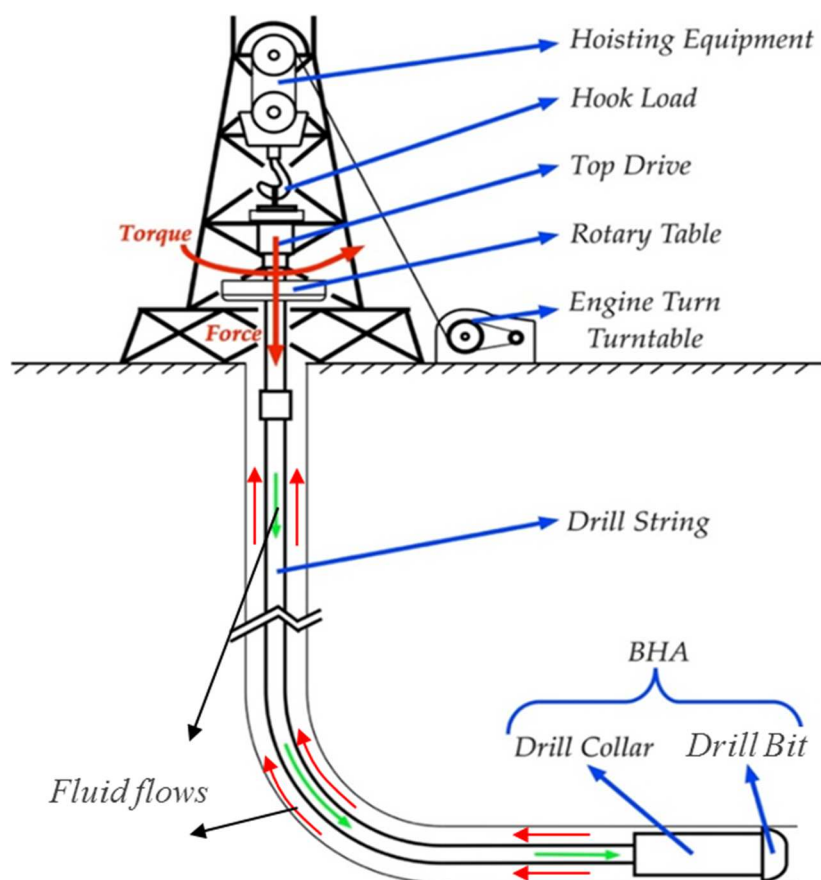


Figure 1. Eléments mis en jeu lors du forage d'un puits

Le train de tiges est un assemblage de tubes de 9 à 10 m de long confinés en tension dans un puits qui a un parcours 3D pouvant atteindre plusieurs kilomètres de long (Figs. 1&2). Vers l'outil, sur un à deux cents mètres de long, les tiges ont un diamètre extérieur plus important et sont en extension pour assurer le poids de l'outil sur la roche et constituent alors les masse-tiges (BHA). Des stabilisateurs jouent le rôle de paliers pour maintenir la masse-tige concentrique dans le puits et contribuer à l'orientation du forage. La masse-tige est gardée en compression avec, à son extrémité supérieure, le point neutre tension-compression.

Un des vecteurs clé d'optimisation et d'amélioration de la qualité des puits est la maîtrise et la compréhension du comportement vibratoire des éléments en rotation dans le puits. Ceci, premièrement afin de maîtriser le comportement dynamique du train de tiges pour intervenir le plus rapidement possible et pallier les défaillances, les casses et donc préserver un MTBF (mean time between failure) acceptable. D'autre part la qualité des forages dépend intrinsèquement du comportement vibratoire du train de tiges en rotation aux abords de l'outil de forage (Bore hole spiraling induit par le Whirling). Concernant le comportement à l'outil (trépan), lorsque les vibrations ne sont pas chaotiques en fond de puits, les vitesses d'avancement du forage sont accrues et la durée de vie des PDC (outils de forage) est améliorée en l'absence de stick slip, whirling (orbitage) et bit bouncing (rebond de l'outil).

Sollicité par les pulsations de la boue, les balourds, les interactions et les frottements tige-puits, les couples moteurs et résistants ainsi que les efforts axiaux des différentes formes d'outil, le train de tiges

de forage a un comportement dynamique régi par des équations du mouvement modélisant en particulier le couplage fluide-structure, les non linéarités de contact, les couplages axiaux et latéraux. Le train de tige est donc un système dynamique complexe car non conservatif, gyroscopique, à excitations paramétriques, et forcément non linéaire. Ainsi sont attendus dans les différentes portions du train de tiges des comportements instationnaire, stationnaire, périodiques, quasi périodiques voire chaotiques des précessions directes ou inverses.

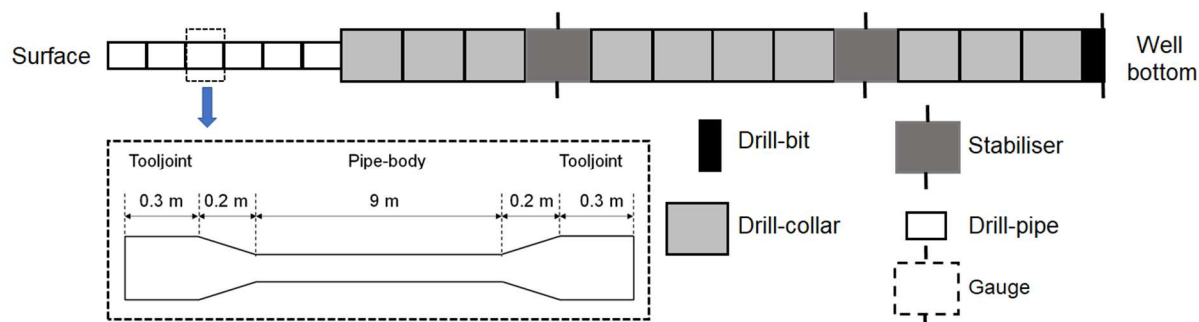


Figure 2. Composants d'une structure de forage de type 'train de tiges'

La feuille de route présentée, Tableau 1, a été établie et suivie afin de développer à partir des savoirs existants un outil de simulation répondant aux besoins exprimés dans les lignes précédentes. Ces travaux ont été réalisés au cours des trois dernières années par le biais d'un doctorat et d'un post-doctorat au sein d'une équipe formée des deux partenaires ainsi que du support informatique et des moyens de calculs du LaMCoS.

Etapes /TRL	Descriptif	Livrables, échéances
<b>1. Etat de l'art TRL 1</b>	Nouvelles architectures de forage. Modèles publiés dans la littérature. Critiques des modèles existant dans le commerce. Livrable: bibliographie et synthèse des codes de calculs existants.	T0+3 (mois)
<b>2. Appropriation des modèles existants TRL 1</b>	Appropriation des modèles développés soit par DrillScan, soit par le LaMCoS. Fonctionnement de ces codes sur des cas simples et aussi sur des puits écoles ou des puits avec données disponibles	T0+6
<b>3. Développement d'un modèle TRL2</b>	Développement d'un modèle et d'un code de calcul associé pour apporter une rupture par rapport aux logiciels de DrillScan et du LaMCoS existants: gestion des régimes stationnaire-instationnaire en adoptant les techniques de calcul appropriées. Prises en compte de la combinaison, non linéarité des multi-contacts tige-puits, couplage fluide-structures. Les volets suivants ont pour livrables un manuel d'utilisation du logiciel développé.	•Calcul statique : T0+9 •Analyse modale : T0+12 •Réponse dynamique avec intégration temporelle: T0+15
<b>4. Validation TRL 3-4</b>	Validation des différents volets du modèle à l'aide de cas tests académiques et du métier du forage, Livrable : rapport + Version 1 du logiciel	• T0 + 18
<b>5. Influence des paramètres TRL 3</b>	Influence des paramètres sur la réponse dynamique du train de tige de forage, études de la stabilité. Implémentation de la réduction de modèle par la méthode de Craig et Bampton. Livrable : rapport sur l'étude d'influence + Version 1.1 du logiciel.	•T0+24-28
<b>6. Finalisation des travaux TRL 3</b>	Rapport de thèse.Publications. Version 2 du logiciel.	T0+36

Tableau 1. Feuille de route des travaux de recherche du LabCom DrillLab

## 2 Travaux réalisés

### 2.1 Développement de modèles

Dans une première phase, un état de l'art sur la modélisation du comportement dynamique de train de tige de forage a été réalisé. Les modèles publiés dans la littérature ont été listés et critiqués. Ceci a permis de poser les bases de la modélisation à développer. Ensuite, les modèles existants développés soit par DrillScan, soit par le LaMCoS ont été mis en regard et comparés pour des cas simples et aussi sur des puits écoles ou des puits avec données disponibles. La deuxième et principale phase du travail a concerné le développement d'un modèle et d'un code de calcul associé pour apporter une rupture par rapport aux logiciels existants de DrillScan et du LaMCoS : gestion des régimes stationnaire et instationnaire en adoptant les techniques de calcul appropriées, prises en compte des couplages flexion-torsion-traction, non linéarité des multi-contacts tige-puits, couplage fluide-structures. Le train de tige de forage est modélisé par des éléments finis de type poutre à 6 degrés de libertés par nœuds (Fig. 3).

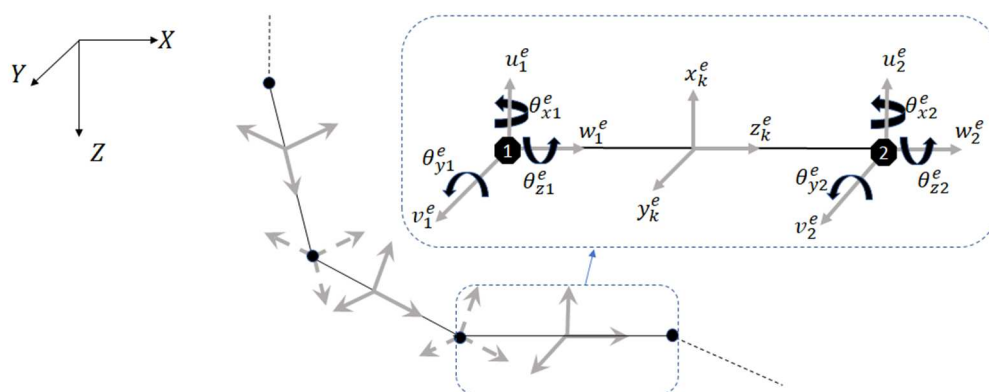


Figure 3 . Discretisation par éléments finis de poutre à 6ddl par nœuds de la structure de forage

Le modèle prend en compte : la géométrie 3D du puits, la gravité, la poussée d'Archimède de la boue, le flot descendant de boue interne aux tiges et le flot de boue-débris remontant dans l'espace annulaire tige-puits, les frottements et impacts des tiges contre la garniture du puits et contre la roche, les précontraintes variables dues aux tensions et aux compressions, les balourds, les couples et forces axiaux de l'outil. Les grandes étapes du calcul sont résumées et simplifiées dans ce qui suit, pour plus de détails se référer à [7-10]. Différents calculs peuvent être réalisés (Fig. 4) :

1. position statique du train de tiges dans le puits,
2. équilibre quasi-statique du train de tige dans le puits, avec couple et poids appliqué à l'outil, actions du fluide, actions de contact avec le puits,
3. analyse modale du train de tige pour une position d'équilibre quasi-statique, tracé du diagramme de Campbell, identification des vitesses critiques,
4. dynamique transitoire sur système complet ou réduit.

La grande longueur des trains de tiges a impliqué l'utilisation de méthode (Craig-Bampton) de réduction de modèle afin de réduire le nombre d'équations et les temps de calcul.

La mise en position du train de tige dans un puits tridimensionnel au parcours curviligne induit des chargements intérieurs et un état de précontrainte qu'il convient de prendre en compte. Une démarche simplifiée mais moins réaliste aurait consisté à positionner le train de tige directement sur la ligne neutre du puits. Ici, le train de tiges est considéré initialement vertical à la position  $P^0$  et est amené par

incréments successifs sur la ligne neutre du puits à la position  $P^N$ , cela permet de tenir compte des chargements intérieurs et donc des précontraintes induites. Des déplacements et des rotations sont imposés à certains nœuds. Ces déplacements et rotations sont divisés en  $N$  incréments. Pour chaque incrément  $k$  ( $k = 1, \dots, N$ ), le champ de déplacement  $\delta^k$  par rapport à la position  $P^{k-1}$  est la solution de l'équation (1):

$$\left( \mathbf{K}_a + \mathbf{K}_{\text{gpa}}(\delta^k) \right) \delta^k = \mathbf{R}_{\text{int}}(\delta^k) \quad (1)$$

où  $\mathbf{K}_a$  représente la matrice de raideur élastique du train de tiges,  $\mathbf{K}_{\text{gpa}}$  la matrice de raideur géométrique due à l'allongement et la torsion de chaque élément de poutre entre les positions  $P^0$  et  $P^{k-1}$ ,  $\mathbf{R}_{\text{int}}$  le vecteur de chargement intérieur dû au déplacement déformant à cet incrément. Pour chaque incrément, un algorithme de Newton Raphson est mis en oeuvre. Le passage d'un incrément au suivant utilise l'algèbre des quaternions et la formulation co-rotationnelle afin de prendre en compte les grandes rotations. Une méthode similaire à celle développée pour le calculer le parcours d'un ensemble câble-gaine a été utilisée [3]. Une fois déterminé l'état de pré-contrainte induit par le parcours du puits, la position du train de tige dans le puits est calculée et l'équilibre quasi-statique déterminé par la résolution de l'équation (2) :

$$\left( \mathbf{K}_a + \mathbf{K}_{\text{gpa}} + \mathbf{K}_{\text{gpo}}(\delta) \right) \delta = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_c(\delta) \quad (2)$$

avec,  $\mathbf{K}_a$  la matrice de rigidité,  $\mathbf{K}_{\text{gpa}}$  est la matrice de raideur géométrique induite par le parcours curviligne 3D du puits,  $\mathbf{K}_{\text{gpo}}$  est la matrice de raideur géométrique induite par la position initiale du train de tiges dans le puits soumis à la gravité,  $\mathbf{F}_s$  le vecteur des forces extérieures (fluides, gravité, couple et poids à l'outil),  $\mathbf{F}_c$  le vecteur des forces et moments du aux contacts frottant. La modélisation des interactions fluide-structure est présentée dans [8]. Les actions de contacts sont modélisées avec une raideur et un amortissement régularisés (Fig. 5). Les calculs (1) et (2) sont nécessaires pour les calculs (3) et (4) qui ont comme condition initiale le résultat de (2)  $\delta_5$ .

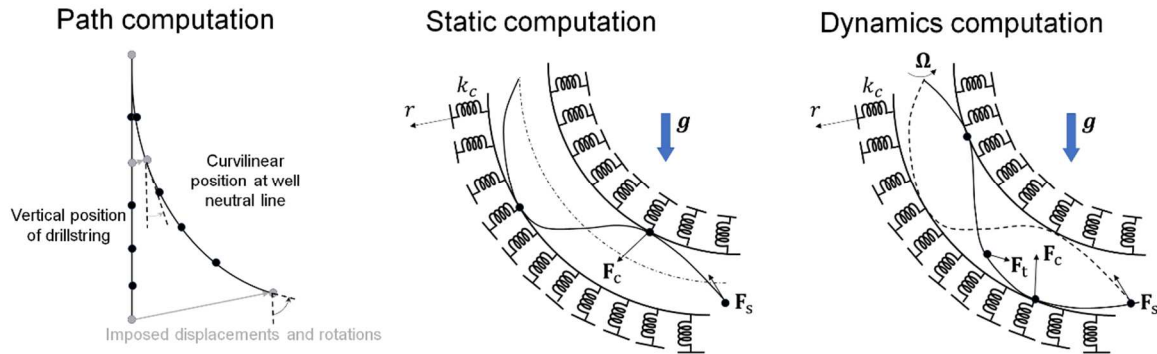


Figure 4. Les trois étapes du calcul complet : parcours, équilibre quasi-stique, dynamique.

L'analyse modale (3) de la structure de forage est réalisée en résolvant l'équation matricielle (3) :

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + [\mathbf{C}(\Omega) + \mathbf{C}_g(\Omega)]\dot{\delta} + \mathbf{K}(\Omega)\delta = \mathbf{0} \quad (3)$$

avec,  $\mathbf{M}$  matrice de masse de la structure de forage incluant les effets du fluide à l'intérieur du train de tiges,  $\mathbf{C}$  la matrice incluant l'effet gyroscopique et l'amortissement dû aux effets du fluide et des contacts,  $\mathbf{K}$  la matrice de raideur globale incluant les matrices ( $\mathbf{K}_{\text{elast}}$ ,  $\mathbf{K}_{\text{gpa}}$ ,  $\mathbf{K}_{\text{gpo}}$ ) ainsi que les raideurs aux points des contacts et les effets du fluide. Ensuite le diagramme de Campbell est établi en considérant une base modale réduite, les détails de cette étape sont donnés dans [9].

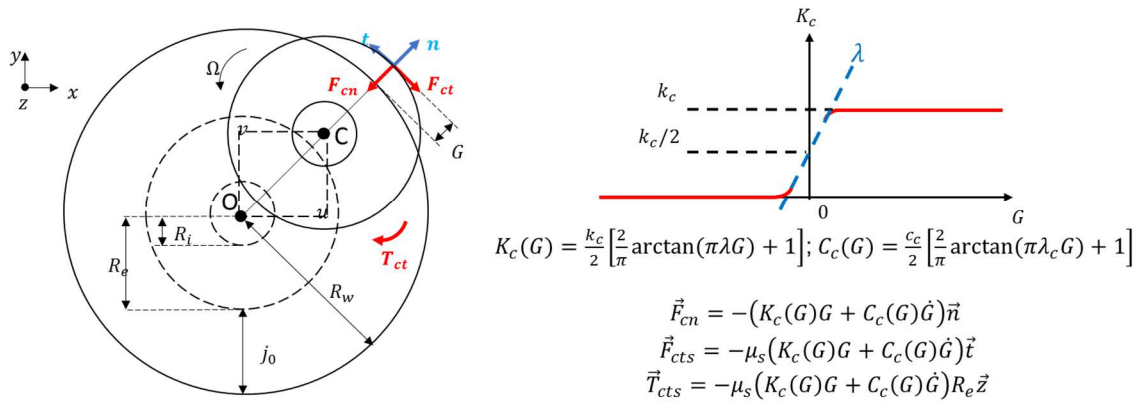


Figure 5. Interactions tige-puits, forces de contact et couple de frottement, raideur de contact régularisée.

Le calcul en dynamique transitoire (4) peut être réalisé soit sur le système complet soit sur un modèle réduit en utilisant la méthode de Craig-Bampton, cela dépend de la longueur du train de tiges. Le comportement dynamique du train de tiges est déterminé en résolvant l'équation matricielle non linéaire (4) :

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{F}(t, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) \quad (4)$$

Avec,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_a + \mathbf{M}_{fe} + \mathbf{M}_{fi} \\ \mathbf{C} &= \Omega(\mathbf{C}_{ac}^T - \mathbf{C}_{ac}) + \mathbf{C}_{ad} + \mathbf{C}_{fe}(\Omega) \\ \mathbf{K} &= \mathbf{K}_{pa} + \mathbf{K}_{gpo}(\boldsymbol{\delta}_s) + \mathbf{C}_{ac}^T \dot{\Omega} \\ \mathbf{K}_{pa} &= \mathbf{K}_a + \mathbf{K}_{gpa} + \mathbf{K}_{fe} \\ \mathbf{F} &= \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_u(t) + \mathbf{F}_c(\boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) - \mathbf{F}_{\theta_z} \dot{\Omega} + \mathbf{R}_{ipa} \\ \mathbf{C}_{ad} &= c_M \mathbf{M}_a + c_K (\mathbf{K}_a + \mathbf{K}_{gpa} + \mathbf{K}_{gpo}(\boldsymbol{\delta}_s)) \end{aligned}$$

$\mathbf{M}_a$  matrice totale de masse du train de tiges,  $\mathbf{M}_{fi}$  matrice totale de masse correspondant au fluide à l'intérieur des tiges de forage,  $\mathbf{M}_{fe}$ ,  $\mathbf{C}_{fe}$ ,  $\mathbf{K}_{fe}$ , contributions du fluide à l'extérieur du train de tiges en terme de masse ajoutée, d'amortissement, et de raideur,  $\mathbf{C}_{ac}$  traduit l'effet gyroscopique dû à la rotation du train de tiges,  $\mathbf{F}_{\theta_z} \dot{\Omega}$  correspond au moment total de torsion,  $\mathbf{C}_{ad}$  est la matrice d'amortissement caractérisée par deux coefficients de Rayleigh  $c_M$  et  $c_K$ .  $\mathbf{F}_c$  est le vecteur des actions de contact,  $\mathbf{F}_u$  correspond aux forces variables dues par exemple au balourd,  $\mathbf{R}_{ipa}$  est le chargement intérieur résultat du calcul statique. La résolution est exécutée au moyen d'un schéma numérique de Runge Kutta à pas adaptatif [10]. La vitesse de rotation  $\Omega(t)$  est imposée en surface au premier nœud. Dans le cas d'une réduction de modèle par la méthode de Craig-Bampton, les nœuds de contacts identifiés lors du calcul (2) quasi-statique sont pris comme nœuds d'interface.

## 2.2 Résultats

Les différentes modélisations développées ont été mises en œuvre dans l'environnement Matlab et constituent le cœur du logiciel DrillSim, voir la Fig. 6. Des exemples de résultats sont donnés dans les figures suivantes pour illustrer les différents calculs présentés au paragraphe 2.1.

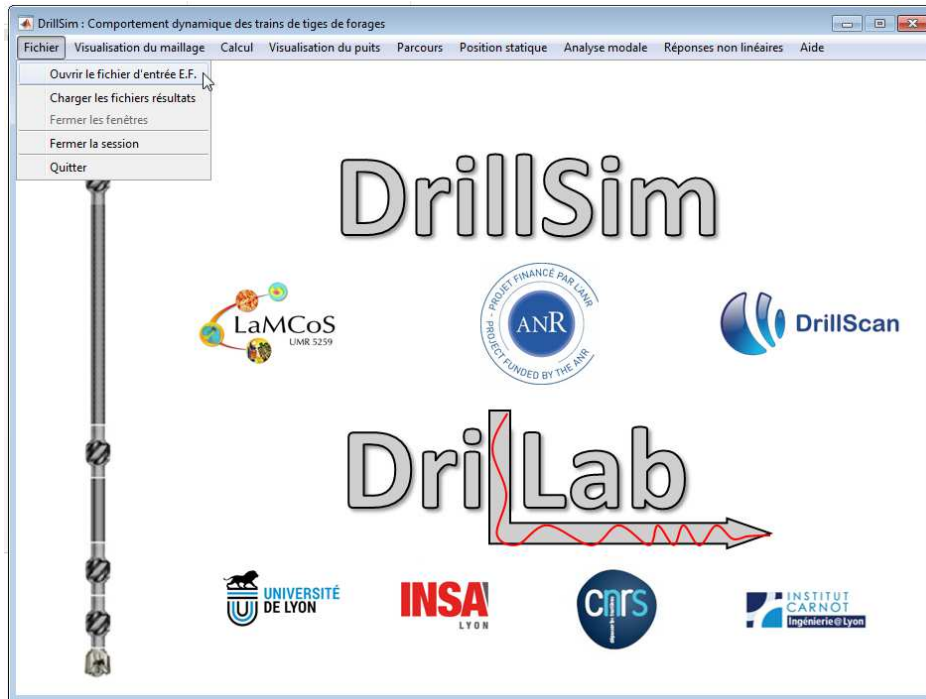


Figure 6. Interface utilisateur du logiciel DrillSim.

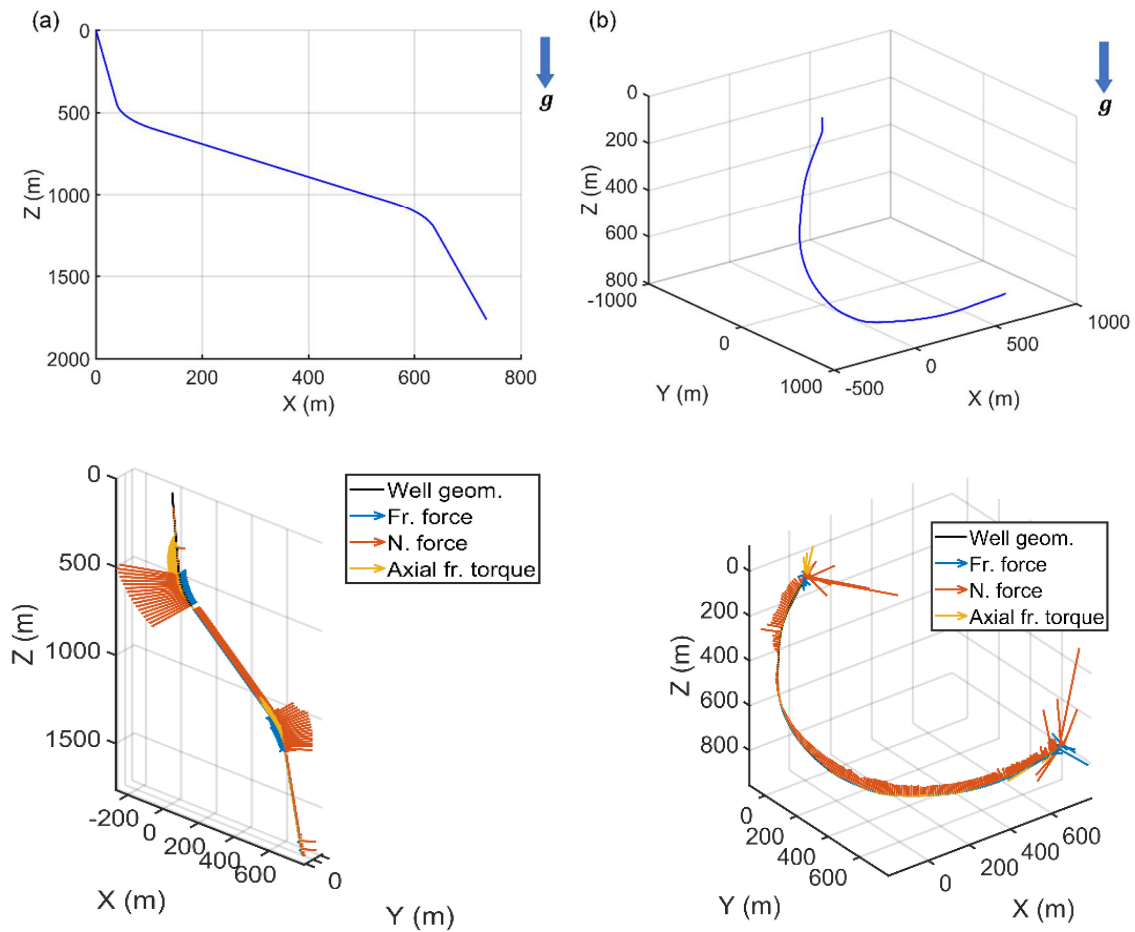


Figure 7. Forces normales de contact (orange), forces tangentes de contact (bleu), couples de frottement (jaune) appliqués au train de tiges pour (a) puits 2D et (b) puits 3D



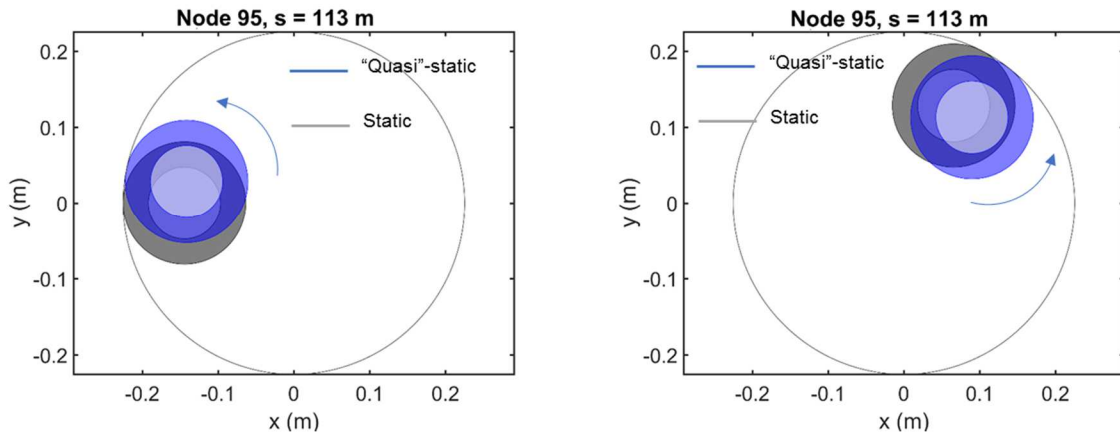


Figure 8. Exemple de résultat, Position de la tige de forage pour un calcul statique et quasi-statique dans un puits 2D en S (gauche) et 3D (droite)

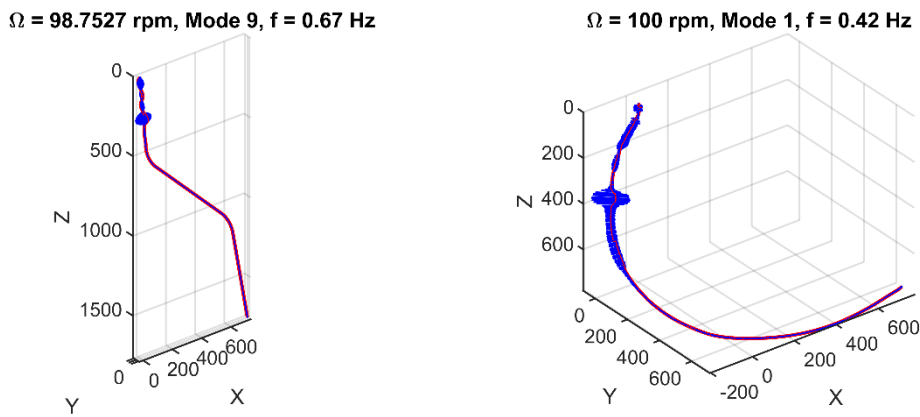


Figure 9. Formes modales pour des fréquences de résonance, puits 2D (gauche) et 3D (droite)

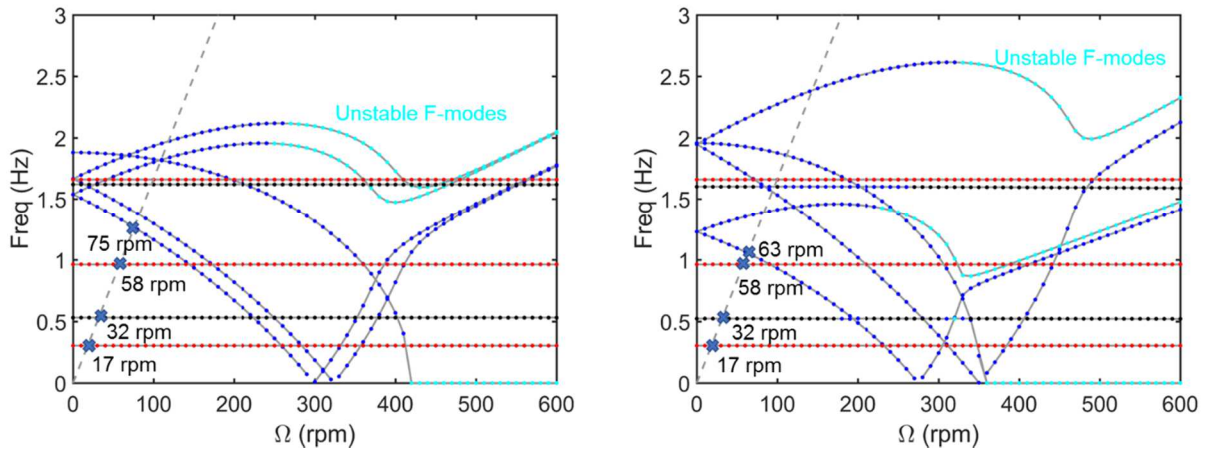


Figure 10. Diagramme de Campbell pour les puits 2D (gauche) et 3D (droite), Identification des vitesses rotation critiques

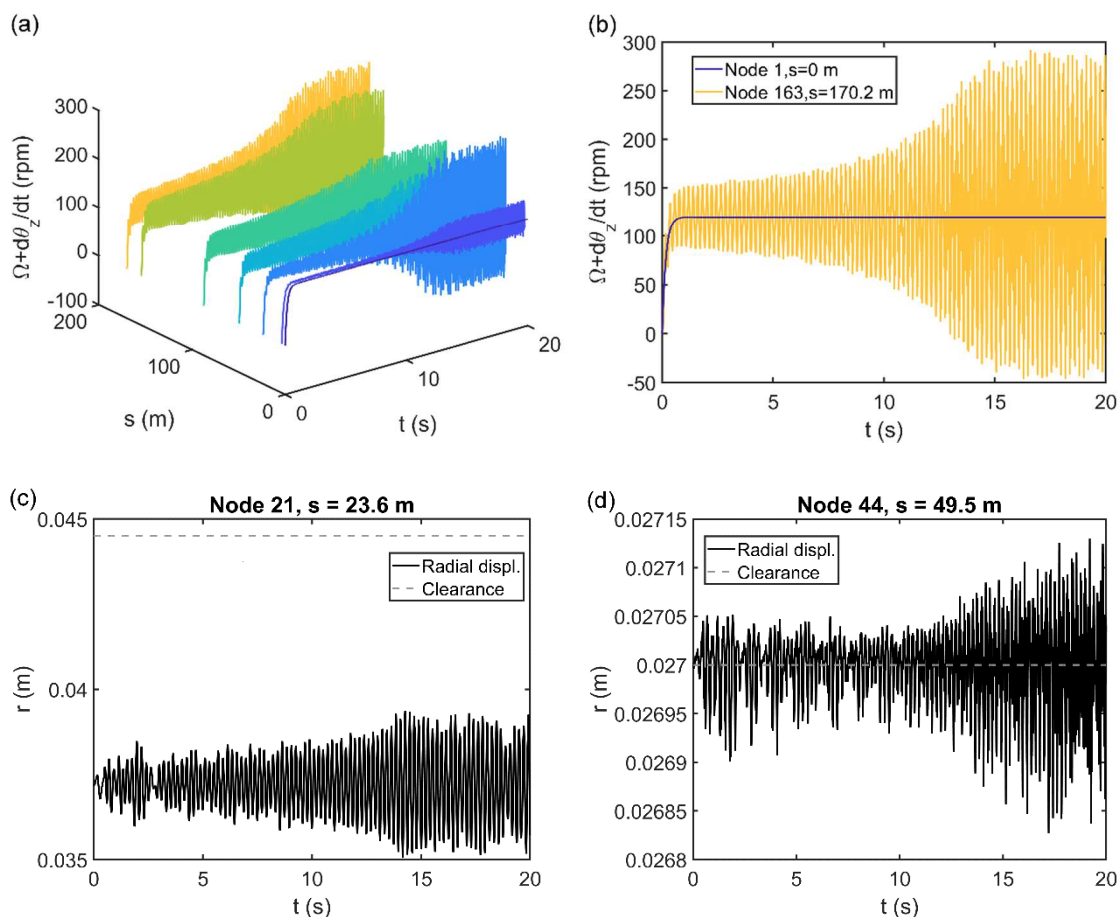


Figure 10 : Résultats en dynamique transitoire, vitesses de rotation (a, b) déplacements radiaux (c,d) d'un train de tige de longueur 170.2 m dans un puits hélicoïdal.

### 3 Conclusions et perspectives

Prévoir avec précision les nombreux phénomènes de la dynamique du train de tige de forage est difficile car il s'agit de prendre en compte les particularités qui lui sont inhérentes, telles que la géométrie 3D, les interactions fluide-structure, les multi-contacts tige-puits, la vitesse de rotation variable en temps et en espace, les excitations paramétriques. Les équations du mouvement sont donc non linéaires et multi-physiques, avec des coefficients variables dans le temps, et de plus renferment des incertitudes au niveau de nombreux paramètres et des lois de comportement. Eviter des temps de calcul prohibitifs nécessite la mise en œuvre des techniques de synthèse modale et des calculateurs de grande puissance dotés d'algorithmes performants. L'alliance d'un laboratoire académique et d'une entreprise innovante a pour but de surmonter ces défis scientifiques voire techniques et ainsi répondre aux problématiques technologiques de fiabilité. L'objectif futur est d'arriver à informer le foreur en temps réel pour aboutir à la maîtrise des nombreux phénomènes dynamiques indésirables. Pour cela il doit être fait appel à des modèles qui repoussent de plus en plus la méconnaissance et à des techniques de résolutions surmontant la lourdeur des maillages EF trop denses et implémentées dans des calculateurs de hautes performances.

### Remerciements

Ces travaux sont soutenus par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) convention ANR-15-LCV4-0010.



## Références

- [1] Melakhessou H., Berlioz A., Ferraris G., A nonlinear well-drillstring interaction model, *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME* 125 (1) (2003) 46–52 (2003).
- [2] Berlioz A., Der Hagopian J., Dufour R., Draoui E., Dynamic behavior of a drill-string: Experimental investigation of lateral instabilities, *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME* 118 (3), 292–298, 1996.
- [3] Manin L., Dufour R., Baranger T., Levecque N., Nonlinear dynamic interactions between a cable with no axial preload and its casing. Application to automotive gearshift command systems, in: ISMA2010 Leuven, Belgium, 2010, 15p, 2010.
- [4] Lalanne L., Ferraris G., *Rotordynamics Prediction in Engineering*. Second edition, Wiley, 1998.
- [5] Duran C., Manin L., Andrianoely M-A., Bordegaray C., Dufour R., An analysis of rotor-stator interaction, in: IMechE – VIRM10 September 11-13, London, 2012.
- [6] Duran C., Manin L., Andrianoely M-A., Bordegaray C., Battle F., Dufour R., Effect of rotor-stator contact on the mass unbalance response, in: 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics, September 22-25, Milano, Italy, 2014, pp. 1965–1975, 2014.
- [7] Nguyen K.L., Tran Q.T., Andrianoely M-A., Manin L., Menand S., Dufour R. (2019) A Rotordynamics Model for Rotary Drillstring with Nonlinear Interactions in a 3D Well. In: Cavalca K., Weber H. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science*, vol 62. Springer, Cham  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-99270-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99270-9_23)
- [8] Tran Q.T., Nguyen K.L., Manin L., Andrianoely M-A., Baguet S., Menand S., Dufour R. (2019) Nonlinear Dynamics of a Rotary Drill-String Immersed in a 3D Geometry Well. In: Cavalca K., Weber H. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science*, vol 63. Springer, Cham  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-99272-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99272-3_19)
- [9] Nguyen K.L., Tran Q.T., Andrianoely M-A., Manin L., Menand S., Dufour R., Majhoub M.. Campbell diagram computation for a drillstring immersed in curved wells. *ASME. J. Vib. Acoust.* 2019; In Press:1-32. doi:10.1115/1.4042933.
- [10] Nguyen K.L., Tran Q.T., Manin L., Baguet S., Andrianoely M-A., Piau L., Dufour R., Un schéma d'intégration temporelle pour la réponse transitoire de systèmes mécaniques avec butées de contact, 23ème Congrès Français de Mécanique (CFM2017), Lille, Septembre, 2017.