

Modélisation tridimensionnelle du flambage des tiges de forage

Joël AKOWANOU, Hedi SELLAMI, Stéphane MENAND et Michel TIJANI

Centre de Geosciences, Groupe Hydro-Géo-Ingénierie,
Ecole des Mines de Paris
35 rue saint-honoré, 77305 Fontainebleau - France
joel.akowanou@ensmp.fr

Résumé

Le flambage des structures élancées est un thème qui fait toujours l'objet de nombreuses études. On traite ici du cas particulier des longs tubes minces en acier utilisés dans les forages pétroliers. Un code de calcul unique permettant d'aborder pour la première fois à notre connaissance, la problématique du flambage des tiges de forage dans un puits tridimensionnel, en tenant compte du frottement et de la rotation des tiges a été élaboré. Ce code de calcul a été validé sur des données réelles de forage de puits pétroliers ainsi qu'à partir d'essais sur un dispositif expérimental à échelle réduite, reproduisant le phénomène du flambage des tiges dans un trou de forage présentant ou non de la tortuosité. Ce code de calcul devrait contribuer à mieux prédire l'occurrence du flambage lors des opérations de forage, phénomène qui peut être à l'origine de nombreux dysfonctionnements, comme la rupture par fatigue des tiges.

Abstract :

Buckling of long slender structures is still the subject of many studies. Here we deal with the long thin steel tubes used in the oilfield drilling. For the first time to our knowledge a single computer code which allows to tackle the problem of drillpipe buckling in three-dimensional wells, by taking into account the friction and the rotation of the drillpipe has been developed. A comparison of the model is proposed with an experimental set up that enables to reproduce the wellbore tortuosity. This computer code is then validated on real data of drilling, as well as on lab tests with a reduced scale experimental facility which reproduces the buckling phenomena of drillpipe in actual well conditions. This model should contribute to better predict the occurrence of buckling on drilling operations, phenomena that can be in the beginning of many dysfunction, like the fatigue failure of drillstring.

Mots-clefs :

Flambage ; tige de forage ; frottement ; rotation ; fatigue ;

1. Introduction

Aujourd'hui, les puits devenant de plus en plus complexes, avoir un modèle d'analyse réaliste du flambage qui peut être utilisé pour la planification et la réalisation de ces puits pétroliers est un atout.

Plusieurs méthodes de résolution du flambage ont été élaborées ces dernières années. Ces approches, qu'elles soient analytiques, numériques ou expérimentales ignorent souvent l'effet des frottements tige et paroi du puits, ne tiennent pas compte de la rotation des tiges ou de la tortuosité du puits de forage. Le milieu industriel aborde généralement le problème du flambage en calculant uniquement la charge critique (de compression) à partir de laquelle les tiges flambent. L'ambition de ce papier est de contribuer à une bonne compréhension et à une meilleure analyse du flambage dans les conditions réelles de forage, c'est à dire en tenant compte du frottement, de la rotation et de la tortuosité de la trajectoire. Le code de calcul développé sera décrit dans la première partie de cet article, puis le dispositif expérimental permettant de valider le code de calcul sera présenté. Enfin on montrera dans la dernière partie de l'article, une confrontation entre ces simulations numériques et l'expérience démontrant la robustesse du code de calcul.

2. Modèle 3D de flambage des tiges de forage

2.1. Définition du problème

La distribution de la force axiale le long d'une tige de forage met en évidence le risque de flambement de la partie comprimée (fig. 1-a). Ainsi lorsque la compression subie par la tige dépasse une valeur critique, la tige flambe sous une forme sinusoïdale ou hélicoïdale (fig. 1-b).

En effet, on parlera du flambage sinusoïdal, quand la tige prend une configuration sinusoïdale, lorsque la compression est plus grande qu'un premier effort critique (notée F_{cr_sin}). Paslay et al (1984) en se basant sur les travaux de Dawson (1964) ont trouvé que la force critique de flambage sinusoïdal d'une tige dans un puits incliné vaut :

$$F_{cr_sin} = 2\sqrt{\frac{EIw\sin(inc)}{r}} \quad (1)$$

Où EI est la rigidité de la tige, w le poids linéique déjaugé de la tige, inc l'inclinaison du puits et r le jeu entre la tige et le puits.

Dans cette configuration de tige flambée, les points de contact, voire les lignes de contact de la tige avec la paroi font apparaître des efforts latéraux dit de contact, qui génèrent une augmentation des forces de frottement. Lorsque l'effort axial croît et devient supérieur à un deuxième effort critique (notée F_{cr_hel}), on parle de flambage hélicoïdal de la tige, ce qui correspond à une forme hélicoïdale prise par cette dernière. Si les différents auteurs arrivent à la même valeur de l'effort critique de flambement sinusoïdal, il existe des divergences vis à vis de l'effort critique de flambage hélicoïdal. En effet, l'équation de la force critique de flambage hélicoïdal développée par Chen et al (1989) pour des puits inclinés est :

$$F_{cr_hel} = \beta * F_{cr_sin} \text{ avec } \beta = \sqrt{2} . \quad (2)$$

Wu (1993) propose de corriger cette équation en considérant une autre valeur de β . Ce qui donne :

$$F_{cr_Wu} = (2\sqrt{2} - 1) * F_{cr_sin} . \quad (3)$$

Contrairement aux auteurs précédents, Mitchell (1995) dans ses premiers travaux sur l'étude analytique du flambage hélicoïdal trouve que F_{cr_hel} vaut plutôt :

$$F_{cr_Mitt} = (2\sqrt{2}) * F_{cr_sin} . \quad (4)$$

Les différences entre les auteurs sont probablement dues aux différentes hypothèses retenues dans leur travail et notamment à l'état de chargement ou de déchargement de la tige.

2.2. Description du modèle

L'analyse du flambage d'une tige se fait tant sur le plan quantitatif (détermination des forces critiques) que qualitatif (sur le trajet d'équilibre en post-flambage). Une détermination analytique des charges critiques de post-flambage n'est possible que lorsque les structures étudiées sont relativement simples. Dans le cas contraire, l'utilisation d'un outil numérique devient indispensable.

Le code de calcul décrit ici, appelé ABIS, vient compléter celui décrit par Belaid et al (2005) où l'on peut retrouver les principales hypothèses du modèle et les étapes de résolution. Ce modèle fait appel à une résolution numérique des équations globales et à un algorithme de contact, permettant de faire une analyse tridimensionnelle du comportement mécanique des garnitures de forage. Ce nouveau code de calcul basé sur une approche semi-analytique permet aujourd'hui de mener une analyse du flambage de l'ensemble du train de tige de forage dans un puits tridimensionnel, et ceci sans avoir recours à la méthode des éléments finis. Cette avancée numérique est particulièrement intéressante lorsque les longueurs des tiges atteignent plusieurs centaines de mètres, permettant un gain de temps de calcul très apprécié.

Le principe de l'analyse de flambage dans ABIS consiste à perturber une solution initiale simple, puis de faire tourner un algorithme itératif jusqu'à stabilisation, et obtention de la solution finale, équilibre du système. La figure 2 est le résultat d'un calcul de flambage (avec ABIS) d'une tige de forage dans un parfait puits horizontal, avec la mise en exergue des vecteurs contacts 3D entre le puits et la garniture.

La figure 3 montre l'exemple du flambage d'Euler. Il s'agit dans ce cas de déterminer la configuration prise par une poutre de longueur 20 m, encastrée à un bout et encastrée glissant à l'autre bout, non contrainte latéralement et soumise à une compression de 200 N. Comme on le remarque sur cette figure, il a fallu seulement 10 itérations, pour obtenir la solution au problème posé.

3. Banc expérimental de flambage

3.1. Dispositif expérimental et matrice d'essais

Le premier simulateur de flambage de tige a été initié par Sorenson (1984) pour une modélisation du flambage des tiges conditionné par un cylindre circulaire. Par la suite, Wu (1993), puis Saliès (1994) se sont intéressés à la modélisation expérimentale du flambage des tiges dans des puits verticaux, inclinés et horizontaux. Ces travaux ont été étendus à des puits courbes par Suryanarayana (1995). Ces diverses études expérimentales ont été réalisées pour des cas spécifiques et idéalisés de puits où la géométrie est parfaitement droite. Les puits de forage étant naturellement tortueux, nous pensons que la prise en compte de cet aspect dans notre analyse expérimentale est primordiale (fig. 4-b). Cette tortuosité a été représentée par des dog legs, terme utilisé dans le milieu pétrolier pour décrire la courbure de la trajectoire du puits.

Le dispositif expérimental de flambage a été construit à l'échelle réduite via un facteur d'échelle (diamètre extérieure de la tige/diamètre intérieure du puits) qui permet de respecter la similarité géométrique.

Une tige en acier de diamètre extérieure 13.5 mm et d'épaisseur 2 mm, de 16.75 m de long a été introduite dans un tube transparent en PVC (de diamètre intérieur 42 mm) qui représente le puits. Ce tube est maintenu par des manchons sur un banc parfaitement horizontal grâce à des supports ajustables (fig. 4-a). De plus le tube transparent est assez flexible pour produire des dog legs le long du chemin afin de reproduire la tortuosité d'un puit de forage. Les extrémités de la tige sont fixées au bâti via des liaisons à la fois de type rotule ou encastrement selon la nature de l'essai à effectuer et pour connaître l'effet des conditions aux limites. Deux capteurs de forces permettent la mesure des efforts aux deux extrémités. La compression axiale est appliquée par un vérin hydraulique au niveau de l'une des extrémités. Un moteur asynchrone installé à cette extrémité permet de mettre la tige en rotation. A cette extrémité un capteur de déplacement mesure le déplacement axial généré. Les efforts (force et couple) et le déplacement longitudinal de la tige sont enregistrés sur un ordinateur via un système d'acquisition pour une analyse post expérimentale.

Ces essais sont effectués à une vitesse de chargement axial contrôlée de 3.510^{-3} m/s pour éviter tout effet dynamique. Un essai type se déroule comme suit. On commence par initialiser le système d'acquisition et on déclenche le vérin hydraulique pour un chargement, durant lequel, on enregistre les efforts et le déplacement longitudinal. Cette phase de chargement, est suivie par une phase de déchargement.

Nous avons réalisé les essais de flambage dans 4 types de trajectoire :

1- Trajectoire parfaitement horizontale : le tube est horizontal (inclinaison = 90° , fig. 5a).

2- Trajectoire tortueuse avec variation d'inclinaison : le tube reste dans le plan vertical, fig. 5b.

3- Trajectoire tortueuse avec variation d'azimut : le tube reste dans le plan horizontal, fig. 5c.

4- Trajectoire tortueuse avec variation d'inclinaison et d'azimut : trajectoire 3D, fig. 5d.

Les tests sont répétés plusieurs fois pour vérifier la reproductibilité des essais. Par ailleurs la déformée de la tige est mesurée tous les 10 cm de tige en repérant sa position vis à vis du tube.

4. Résultats expérimentaux et prédiction du modèle

• Trajectoire parfaitement horizontale

La figure 6 montre la comparaison entre les résultats d'ABIS et ceux d'un essai réalisé sur le banc parfaitement horizontal. L'historique du chargement se décompose en 4 phases repérées par les points O-A-B-C. Les observations suivantes ont été effectuées.

En effet, le point A correspond au déclenchement du flambage sinusoïdal prédit par ABIS. Le code de calcul permet également de prédire l'amplitude de cette sinusoïde en fonction de la

compression appliquée (Menand et al (2006)). La force critique F_{cr_sin} à partir de laquelle la tige se met à flamber sinusoïdalement est également bien estimée avec l'équation (1). Dès lors que la tige a flambé de façon sinusoïdale, une légère augmentation de la compression entraîne une grande augmentation du déplacement, et la tige commence à flamber de manière hélicoïdale. Cet état correspond au point B qui caractérise la formation de la première hélice. Elle est obtenue expérimentalement à une compression de 1000 N, valeur assez proche de la force critique F_{cr_hel} prédite par l'équation (2). Notons que la première hélice théorique calculée par ABIS est obtenue pour une force de compression égale à 1250 N. Le trajet BC détermine l'occurrence des autres hélices. Quant au point C, c'est le point où l'on observe la forme hélicoïdale complète pour une compression de 2000 N avec la formation de 4/5 hélices. Cette valeur de la compression est proche de celle prédite par ABIS (2100 N) pour avoir la formation complète de toutes les hélices. Au-delà d'une compression de 2700 N, la tige est déchargée. Les hélices se défont, la tige perd aussi sa forme sinusoïdale, et retourne finalement à son état d'origine.

La figure 7-a montre une comparaison entre la configuration hélicoïdale de la tige mesurée au laboratoire et celle calculée avec ABIS (pour une force axiale fixée à 2100 N). Comme on peut le voir, excepté les deux extrémités de la tige, ABIS est capable de prédire correctement le pas de l'hélice qui est égale à 2.90 m

- **Trajectoire tortueuse : variation d'inclinaison**

Le tableau 1 montre une synthèse des résultats expérimentaux obtenus après les tests de variation d'inclinaison (configuration de la fig. 5-b). On remarque que la force critique d'obtention de la première hélice diminue à mesure que les dog legs de la conduite augmente. Les simulations avec ABIS des configurations testées au laboratoire confirment cette tendance. Il semblerait donc que la tortuosité observée dans les puits de forage favorise l'apparition du flambage hélicoïdal.

- **Trajectoire tortueuse : variation d'azimut**

Contrairement à la trajectoire précédente, les essais ont révélé que plus le gradient d'azimut est grand, plus la force critique de flambage hélicoïdal est grande (tableau 1, configuration de la fig. 5-c). Cela montre que dans les puits horizontaux où l'azimut uniquement varie, les tiges pourraient avoir plus de résistance à flamber.

- **Trajectoire tortueuse et tridimensionnelle**

La combinaison des deux configurations précédentes donne lieu à la configuration tridimensionnelle de la figure 5d où on fait varier simultanément l'azimut et l'inclinaison. Dans ce cas de figure, c'est l'effet de la variation d'azimut sur la force critique qui l'emporte sur celui de l'inclinaison. En effet la force critique de flambage est du même ordre de grandeur que celle obtenu pour le cas précédent.

Les graphes de la figure 7 montrent la comparaison entre la déformée obtenue par ABIS et celle mesurée au laboratoire. On remarque clairement que le code de calcul permet de prédire correctement la déformée de la tige dans un puits 3D lorsque celle-ci flambe, et ceci quelle que soit le type de trajectoire.

5. Conclusion

Le dispositif expérimental présenté valide bien le nouveau modèle ABIS pour des configurations de puits complexe. Ce modèle d'analyse du flambage des tiges de forage a permis de montrer l'importance de la prise en compte des dog legs dans le calcul de flambage. Les effets de la rotation et des connexions sur le flambage seront prochainement étudiés pour se rapprocher au mieux des conditions opérationnelles du milieu pétrolier.

References

- [1] Dawson R. and Paslay P.R. (1984) *Drillpipe Buckling in Inclined Holes*, Journal of Petroleum Technology 36(11), p 1734-1738.
- [2] Paslay P.R. and Bogy D.B. (December 1964) *The Stability of a Circular Rod Laterally Constrained to Be in Contact With an Inclined Circular Cylinder*, Journal of Applied Mechanics, p 605-610.

- [3] Chen Y.C., Lin Y.H. and Cheatham J.B. (1989) *An Analysis of Tubing and Casing Buckling in Horizontal Wells*, The 21st Annual OTC, Houston, TX.
- [4] Wu J. and Juvkam-Wold H.C. and Lu R. (January-February 1993) *Preventing Helical Buckling of Pipes in Extended Reach and Horizontal Wells*, Energy-Sources Technology Conferences & Exhibition, Houston, TX.
- [5] Mitchell R. (April 1995) *Effects of Well Deviation on Helical Buckling*, Production Operations Symposium, Oklahoma City, OK.
- [6] Belaid A., Sellami H., Menand S. et Tijani M. (Septembre 2005) *Modélisation du comportement mécanique d'une structure élancée rigide à l'intérieur d'un trou à trajectoire complexe : application au dimensionnement du forage pétrolier*, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes.
- [7] Sorenson K. (1984) *Post-buckling behavior of a circular rod constrained within a circular cylinder*, Ph.D. thesis, Rice University.
- [8] Wu J. and Juvkam-Wold H.C. (1993) *Helical Buckling of Pipes in Extended Reach and Horizontal Wells - part 2 : Frictional drag analysis*, Transaction of the ASME, 115:196-201.
- [9] Saliès J.B. (1994) *Experimental Study and Mathematical Modeling of helical Buckling of Tubulars in Inclined Wellbores*, Ph.D. Dissertation, University of Tulsa.
- [10] Suryanarayana P.V.R. and McCann R.C. (1995) *An experimental Study of Buckling and Post-Buckling of Laterally Constrained Rods*, Journal of Energy Resources Technology, vol. 117.
- [11] Menand S., Sellami H., Tijani M. and Akowanou J. (September 2006) *Buckling of tubulars in Actual Field Conditions*, papier spe 102850 presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX.

Gradient (°/30 m)\ Force (N)	Pour l'inclinaison	Pour l'azimut
0	1000	1000
1	971	1355
1.5	823	1760
2	721	2268
2.5	700	2634

Tableau 1 : Variation de la force critique de flambage hélicoïdale (expérimentale) en fonction du gradient d'inclinaison et d'azimut.

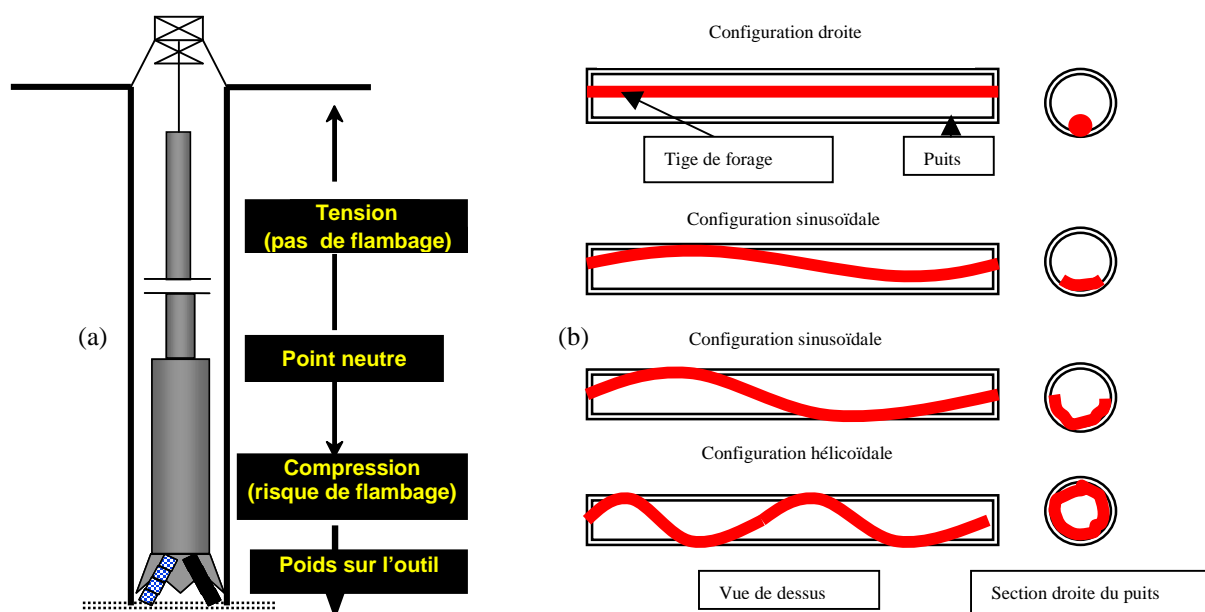


Fig. 1: (a) Profil de la force axiale dans un train de tige de forage – (b) Configuration successive d'une tige comprimée

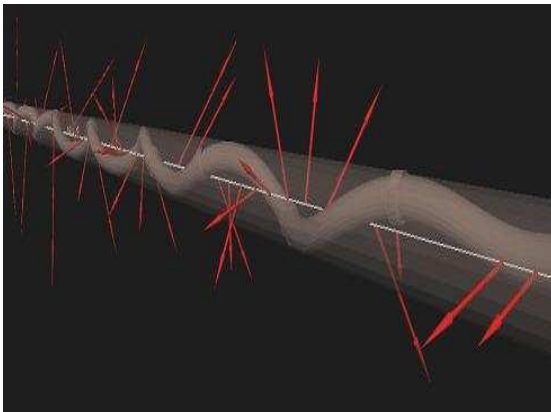


Fig. 2 : Simulation ABIS : Visualisation 3D du flambage dans un puits horizontal – les vecteurs contacts sont représentés par les flèches rouges.

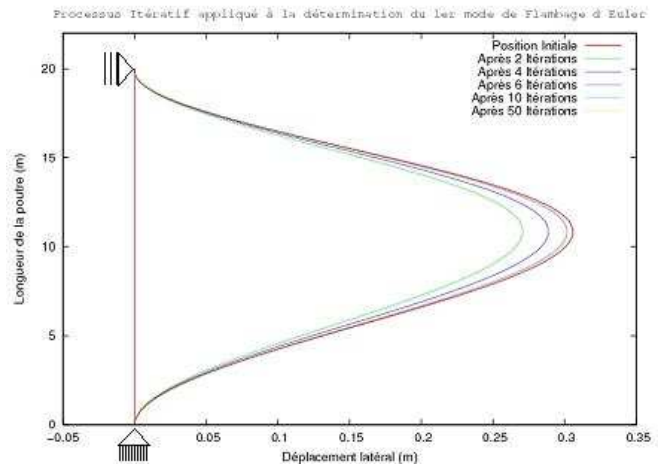


Fig. 3 : Flambage d'Euler d'une poutre de 20 mètres de long soumise à la compression de 200 N.

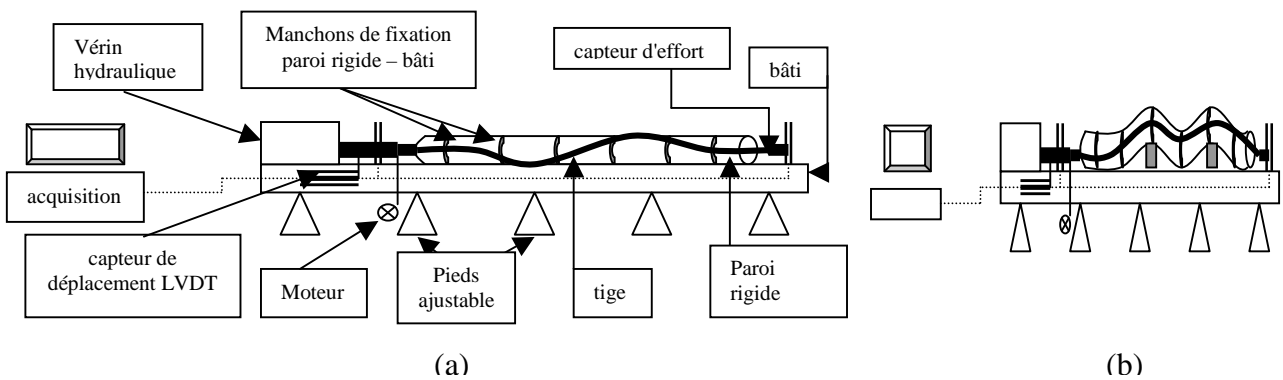


Fig. 4: Schéma simplifié du simulateur à l'état horizontal et avec des dog legs

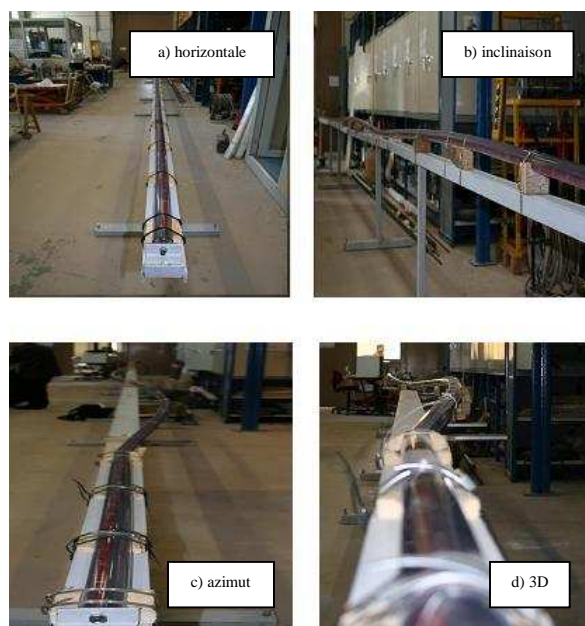


Fig. 5: Exemple de configurations de trajectoires adoptées lors des essais

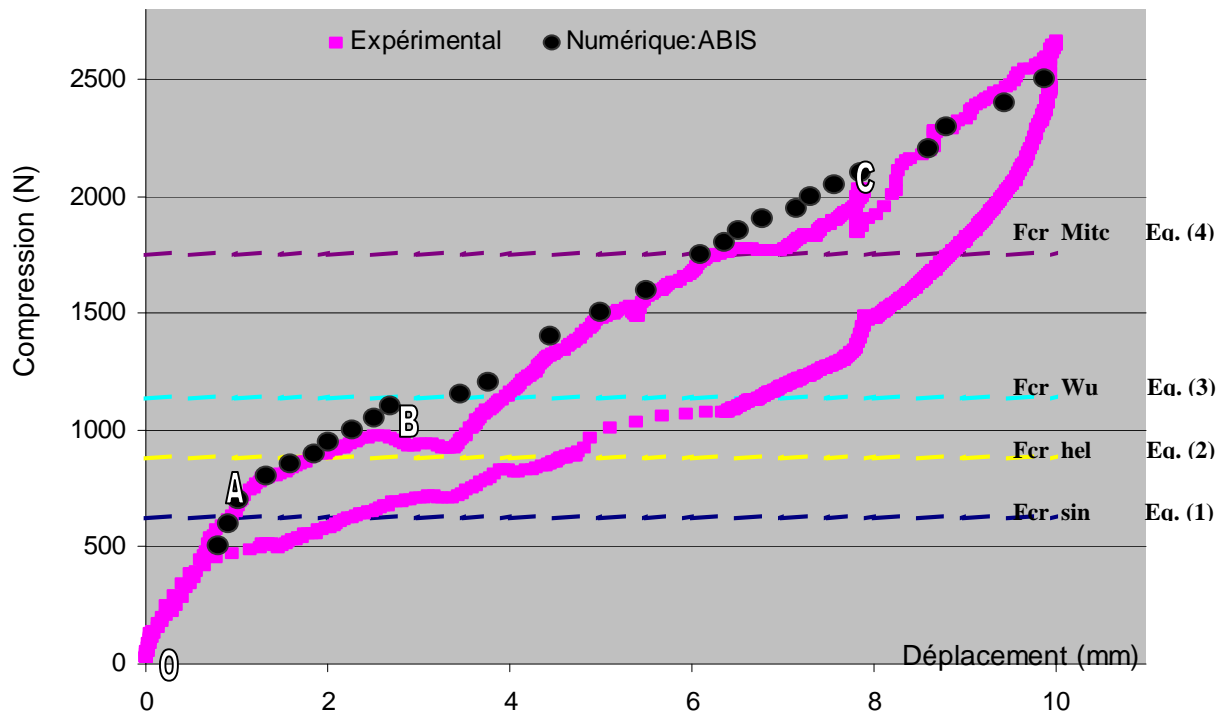


Fig. 6 : Courbes théorique et expérimentale de la compression en fonction du déplacement longitudinal dans le cas du banc horizontal

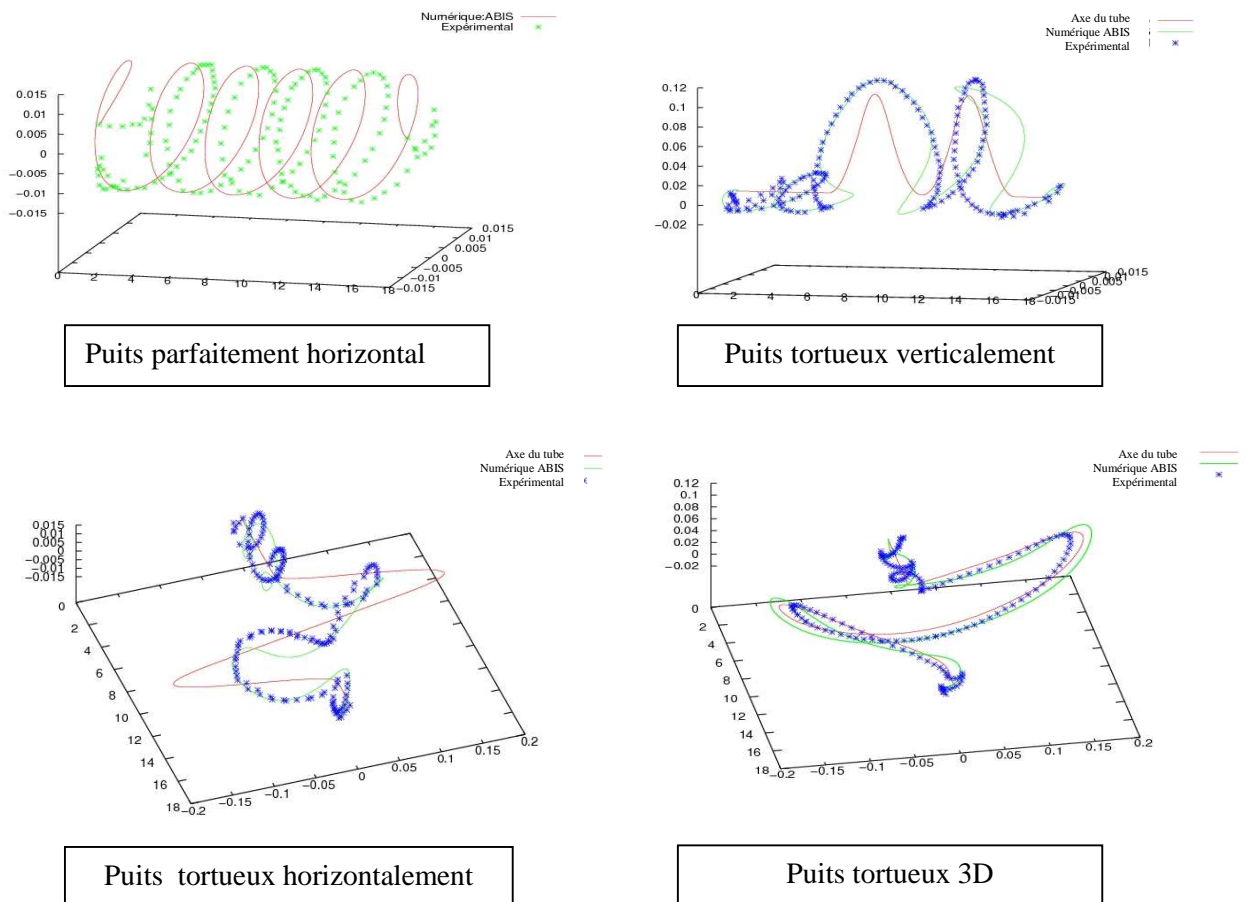


Fig. 7 : Essais de flambage dans le cas de trajectoires horizontale et tortueuses