
APPLICATION DU NOUVEAU MODELE A LA PREDICTION DES PERTES EN FROTTEMENT DANS LES PUIITS PETROLIERS

IV-1 INTRODUCTION

Nous proposons dans ce chapitre une analyse de la validité du modèle tridimensionnel de calcul du comportement mécanique des garnitures de forage à l'intérieur des puits pétroliers, que nous avons présenté au chapitre précédent et cela à partir de sa confrontation d'une part aux modèles classiques de calcul des frottements et d'autre part à des mesures réelles de forage pétrolier. Pour cela, nous disposons de mesures sur plusieurs puits à différentes trajectoires.

Notre analyse sera partagée en trois parties :

- la première concerne la présentation et le traitement des données du problème (trajectoire, garniture, paramètres de forage, etc,...) ainsi que celles des mesures réelles de forage ; nous présentons aussi la procédure de simulation,
- la deuxième partie porte sur une étude de sensibilité de notre modèle aux différents paramètres de simulation (discrétisation de la garniture, méthode de reconstitution de la trajectoire, jeu entre la garniture et les parois du puits, coefficients de frottement, etc,...),
- la troisième et dernière partie est consacrée à la simulation numérique du couple de torsion en surface "*Torque*" et des tensions de remontée et de descente "*Drag*" des tiges ainsi que les forces de contact structure-parois du puits ; la confrontation aux mesures de terrain permet de vérifier les prédictions de notre modèle et sa comparaison avec les modèles classiques permet d'évaluer son apport par rapport aux modèles existants.

IV-2 TRAITEMENT DES DONNEES

IV-2.1 Données

Les données obtenues pour chaque puits pétrolier concernent :

IV-2.1.1 La trajectoire

Les fichiers de données de la trajectoire (connus sous le nom de fichiers *survey*) que nous avons traité, comportent l'évolution, en fonction de la profondeur forée, de l'inclinaison et de l'azimut (en degrés). Les fréquences classiques de mesures de la trajectoire varient généralement entre 10 et 30 m (à chaque rajout d'une, deux ou de trois tiges de forage) ; nous disposons également de certaines mesures en "continu" (chaque mètre voire même chaque 50 cm).

L'incertitude sur la mesure d'inclinaison varie de $\pm 0.18^\circ$ (pour les valeurs $> 5^\circ$) à $\pm 0.25^\circ$ (pour les valeurs $< 5^\circ$). L'incertitude sur la mesure de l'azimut est plus élevée que celle sur l'inclinaison. Elle varie de $\pm 1.5^\circ$ (pour les valeurs $> 5^\circ$) à $\pm 1.0^\circ$ (pour les valeurs $< 5^\circ$).

IV-2.1.2 La garniture

Les phases 17 ½, 12 ¼ et 8 ½ de forage ont été réalisées le plus souvent en mode *rotary* avec des garnitures à symétrie de révolution comportant plusieurs éléments (outil de forage, masses tiges (DC), stabilisateurs, tiges lourdes (HWDP), tiges de forage (DP) et beaucoup d'autres éléments complémentaires de longueur réduite (connexions, moteurs, appareils de mesure, etc,...).

Pour chaque élément, nous disposons des caractéristiques géométriques (diamètre extérieur, diamètre intérieur, diamètre extérieur maximal, longueur de l'élément). Le diamètre extérieur maximal est une donnée importante car comme nous le verrons plus loin, c'est ce paramètre qui conditionne le contact garniture-parois du puits. En effet, pour les tiges de forages, le diamètre maximal est celui au niveau du raccord ("*Tool Joint*"), sa connaissance est indispensable car c'est là que s'établit généralement le contact avec les parois du puits.

Ainsi, pour faciliter la simulation, les données réelles de la garniture sont pré-traitées de manière à garder tel quels les éléments importants (DP, HWDP, DC) et à transformer les nombreux petits éléments de moindre importance en un nombre très réduit d'éléments avec des caractéristiques équivalentes. Cette procédure de "moyennisation" s'effectue en terme de poids et de rigidité. Cette transformation n'a pas d'influence sur le calcul du "*Torque&Drag*" dans le puits de forage car la partie transformée représente une partie négligeable de toute la garniture ; nous donnons dans la partie consacrée aux simulations numériques un exemple de calcul du "*Torque&Drag*" avec garniture réelle et garniture "simplifiée" qui montre que le résultat est pratiquement identique pour les deux cas.

IV-2.1.3 Structure du puits de forage

Pour chaque puits de forage, nous disposons également de données sur le diamètre du puits et sur le programme de tubage (côte inférieure, côte supérieure, diamètres intérieur et extérieur du tubage). Ces données permettent entre autres de différencier les sections tubées des sections trou-ouvert du puits (ayant généralement des coefficients de frottement différents contre la structure de forage) .

IV-2.1.4 Les paramètres de forage

Les principaux paramètres de forage dont nous avons besoin pour faire nos simulations sont :

- la densité de la boue de forage qui nous sert à déterminer le poids déjaugé de la garniture (en tenant compte de la poussé d'Archimède)
- le poids à l'outil (WOB), le couple à l'outil (TOB) pendant la phase de forage pour pouvoir appliquer correctement les condition aux limites dans cette phase. Notons que contrairement au WOB, le TOB n'est pas toujours mesuré, il peut être mesuré que si l'on dispose d'un dispositif de mesure fond de trou, et peut être estimé à partir du WOB par une loi d'interaction outil-roche. Ceci dit, la majorité de nos simulations sont faites quand l'outil ne fore pas la formation ("*Off Bottom*"), et donc à WOB et TOB nuls.

D'autres paramètres comme la vitesse de rotation de la garniture (RPM), la vitesse d'avancement (ROP) et les vitesses axiales des manœuvres ("*trip_velocity*"), quand elles sont connues, peuvent nous renseigner sur les rapports entre les coefficients de frottement tangentiel et axial.

En outre, dans toutes nos simulations, nous avons considéré que la garniture est constituée d'un acier d'un poids volumique de 7850 Kg/m^3 , de module d'Young de $2.1 \text{ E}+11 \text{ N/m}^2$ et de coefficient de Poisson de 0.3.

IV-2.1.5 Les mesures in-situ

Les mesures dont nous disposons sont des mesures de "*Torque&Drag*" c'est à dire des mesures du couple en surface ("*TORQUE*") et des tensions ("*DRAG*") de remontée (PUW), de descente (SOW) et en suspension statique (STW ou FRW).

Il existe deux types de mesures :

- mesures effectuées par le foreur : c'est lui qui dans sa cabine note les valeurs des tensions ou du couple de torsion lues sur le "Martin Decker". La fréquence de ces mesures est généralement espacée (généralement tous les 30 m).
- mesures effectuées par la société de "mud logging" utilisant des enregistrements automatiques et en continu avec une fréquence beaucoup plus importante (nous disposons de valeurs moyennées tous les mètres). Ceci dit, les enregistrements du poids au crochet en surface (WOH) doivent subir un traitement préalable, pour distinguer les différentes opérations (descente des tiges, remontée de tiges, forage, suspension, etc,...) et savoir de quelle phase et de quelle garniture il s'agit. Cette distinction est possible en analysant en même temps les autres paramètres enregistrés ("*Bit Depth*", WOB, TOB, RPM, ROP).

Les mesures dont nous disposons appartiennent généralement aux deux catégories. Les mesures en cabine sont données dans le rapport journalier de forage (DDR) fourni par le foreur et rempli de manière quotidienne sur chantier. En outre, ce dernier rapport permet de signaler si d'éventuels dysfonctionnements se sont produits. Ainsi, une bonne lecture de ce rapport, permet non seulement de se renseigner sur les valeurs mesurées du "*Torque&Drag*" pour chaque phase mais parfois aussi d'expliquer par exemple une augmentation brusque de tension, du couple ou d'autres paramètres.

IV-2.2 Procédure de simulation avec *ABIS*

Pour effectuer une simulation de "*Torque&Drag*" à l'aide du programme *ABIS*, il faut préparer le fichier de données (figure 4.1). Pour cela, nous avons développé un utilitaire qui, lit le fichier "*survey*" et le fichier "garniture" (auquel on a incorporé les données sur le puits ainsi que les paramètres de forage), et permet de construire un fichier d'entrée pour *ABIS* de manière automatique. Notons au passage, que lors de la construction du fichier *ABIS*, nous faisons appel au code *TRAJ* qui permet de reconstituer la trajectoire à partir du fichier "*survey*" par la méthode du minimum de torsion (MMT) avec respect du caractère gauche éventuel du puits (tenant compte de la torsion géométrique qui est un paramètre géométrique important notamment pour les puits à trajectoire complexe et à caractère tridimensionnel).

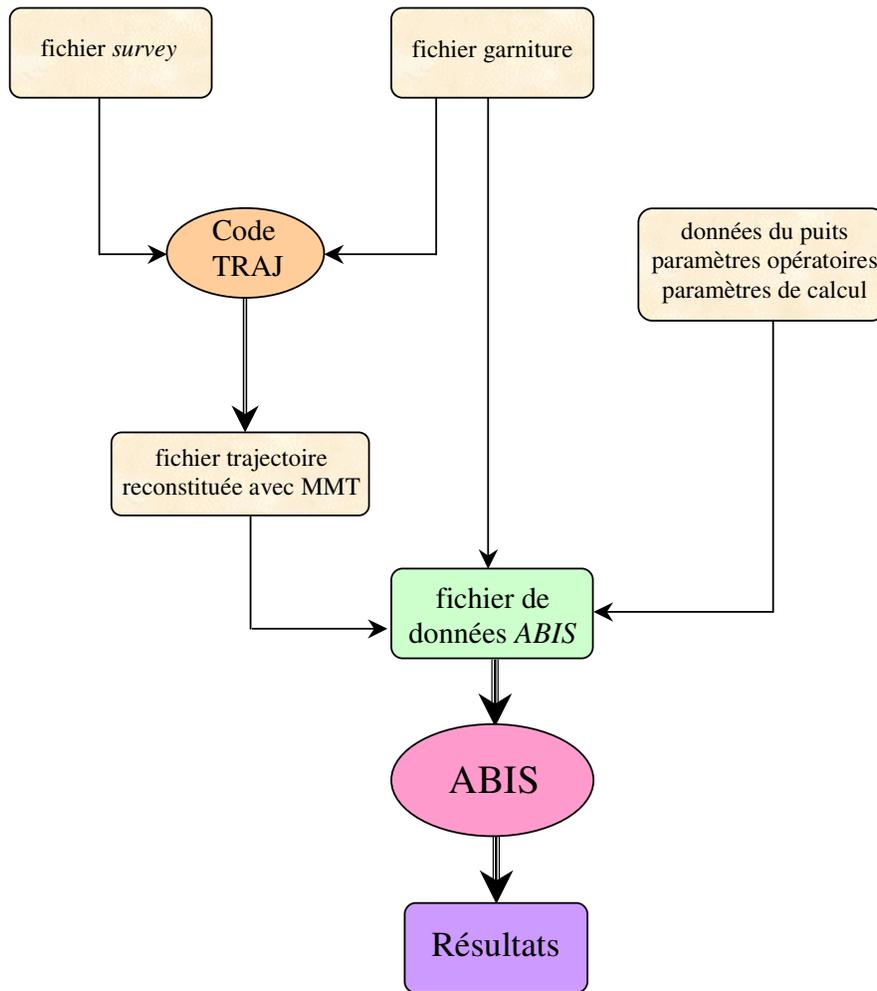


Figure 4.1 : Organigramme de la simulation avec *ABIS*

Lors de la reconstitution de la trajectoire, le maillage est affiné selon la géométrie de la garniture en question et cela afin de pouvoir simuler la présence des “*Tool Joints*” aux extrémités des tiges de forage et celle de stabilisateurs afin de se rapprocher de la réalité et de valider avec *ABIS* (algorithme de contact) le contact qui s’établit entre les “*Tool Joints*” et les parois du puits.

La garniture est décomposée en 5 types d'éléments comme le montre le tableau 4.1.

Type d'Élément	Nom	Désignation
1	STB	Stabilisateurs
2	DC	Masses tiges
3	OC	Autres composants
4	HWDP	Tiges lourdes
5	DP	Tiges de forage

Tableau 4.1 : Éléments de discrétisation de la garniture sous ABIS

L'élément OC désigne tout élément de la garniture qui n'appartient pas aux types (1,2,4 ou 5) comme par exemple (connexions, moteurs, appareils de mesure, etc,...). Pour les trois premiers types d'éléments (STB, OC et DC) la discrétisation se fait de manière uniforme avec un petit pas de discrétisation (de longueur $d = 30$ cm) comme le montre la figure 4.2.

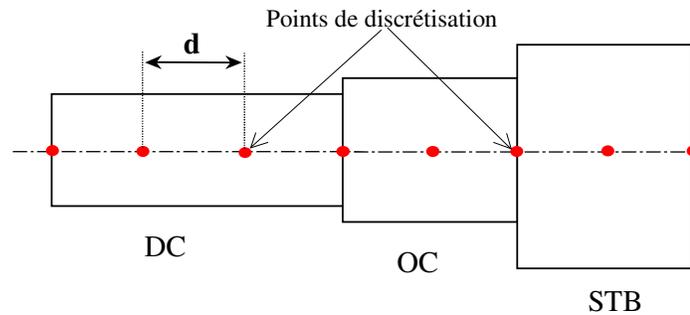


Figure 4.2 : Discrétisation des éléments type 1, 2 et 3 de la garniture sous ABIS

Pour les tiges lourdes (HWDP) et les tiges classiques de forage (DP), la discrétisation se fait comme présentée sur la figure 4.3. Chaque tige de forage est discrétisée en 3 grands pas (de longueur $D = 3$ m) et 2 petits pas ($d = 30$ cm), ce qui donne une longueur totale ($L_{DP} = 9.6$ m). Les nœuds à petits pas sont incorporés afin de mettre en évidence la présence des “*Tool-Joints*” avec leurs masses linéiques plus importantes et surtout leurs jeux réduits avec les parois du puits. Ainsi, tout comme les stabilisateurs, les “*Tool-Joints*” sont généralement des zones de contact.

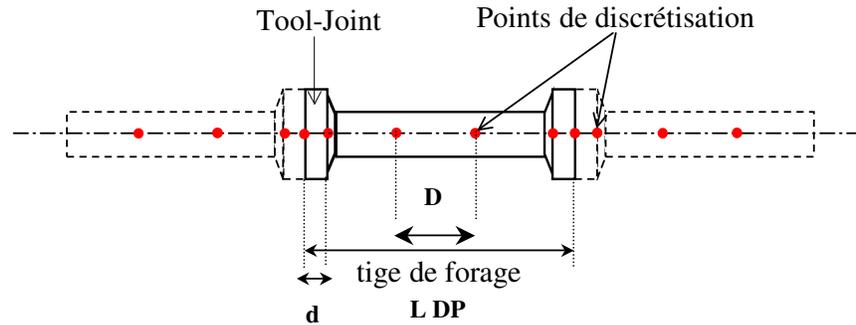


Figure 4.3 : Discrétisation des tiges avec présence de *Tool-Joints* sous *ABIS*

Lorsque les masses tiges (DC) sont relativement longues (de l'ordre de quelques centaines de mètres), le maillage des tiges est aussi appliqué aux masses tiges avec un diamètre de "*Tool-Joint*" fictif égal au diamètre extérieur des masses tiges (car les masses tiges ont un diamètre extérieur constant) réduisant ainsi le nombre de nœuds (6 nœuds au lieu de 32 nœuds pour une longueur de 9.6 m) et par suite le temps de calcul. Nous verrons dans l'étude de sensibilité avec *ABIS* que ce procédé n'a pas d'influence sur les résultats des calculs.

Par ailleurs, nous avons aussi effectué des simulations de descente des tubages à l'intérieur du puits pour déterminer l'évolution de la tension en surface en fonction de la profondeur de la côte basse du tubage au fur et à mesure de son introduction dans le puits. Sachant que le diamètre extérieur est le même sur toute la longueur du tubage (cylindre), une discrétisation uniforme à pas approprié (variant de 1 à 3 m selon la longueur totale du tubage) est appliquée.

IV-3 ETUDE DE SENSIBILITE A L'AIDE D'ABIS

IV-3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons étudier la sensibilité du code *ABIS* aux différents paramètres du problème (“simplification” de la garniture réelle, pas de discrétisation, méthode de reconstitution de la trajectoire, jeu entre la garniture et les parois du puits, etc,...). Cette étude est conduite afin d’élucider l’effet de la variation de tel ou tel paramètre sur les résultats de la simulation et ainsi de souligner son importance dans le calcul du “*Torque&Drag*”.

IV-3.2 “Simplification” de la garniture réelle

Le tableau 4.2 donne la composition de la garniture réelle (la longueur totale est de 2200 m).

N°	L (m)	D INT (")	D EXT (")	D MIN (")	D MAX (")
1	0.28	1.00	12.15	1.00	12.25
2	2.27	2.8125	7.875	2.8125	12.20
3	0.77	2.8125	8.00	2.8125	8.00
4	6.75	3.0313	8.6875	3.0313	12.00
5	8.32	2.75	8.000	2.75	8.00
6	2.26	2.8125	7.875	2.8125	12.20
7	11.70	2.8125	8.25	2.8125	8.25
8	1.47	2.8125	7.875	2.8125	12.20
9	18.08	2.75	8.00	2.75	8.00
10	26.99	2.875	8.00	2.875	8.00
11	9.73	2.8125	8.25	2.8125	8.25
12	18.21	2.875	8.00	2.875	8.00
13	10.22	2.8125	8.125	2.8125	8.125
14	0.86	2.8125	7.9375	2.8125	7.9375
15	9.10	5.00	6.625	4.00	8.50
16	0.88	2.8125	8.00	2.8125	8.00
17	0.58	3.50	7.00	3.50	7.00
18	154.74	5.00	6.625	4.00	8.50
19	1916.79	4.78	5.50	3.00	7.50

Tableau 4.2 : Composition de la garniture réelle

Après la procédure de “simplification” de la garniture avec moyennisation sur les rigidités et les poids linéiques, nous obtenons la garniture donnée dans le tableau 4.3 :

N °	Nom E.	Type E.	L (m)	DINT (")	DMIN (")	DMIN (")	DMAX (")
1	OC	3	50.0	3.00	9.50	3.00	9.505
2	DC	1	66.0	2.875	8.00	2.875	8.005
3	HWDP	4	164.0	5.00	6.625	4.00	8.50
4	DP	5	1920.0	4.78	5.50	3.00	7.50

Tableau 4.3 : Composition de la garniture après “simplification”

Les types d’éléments ainsi que leurs désignations ont été présentés dans le paragraphe IV.2.

Nous donnons dans la suite la trajectoire du puits simulé par les variations de l'inclinaison et de l'azimut en fonction de la profondeur forée.

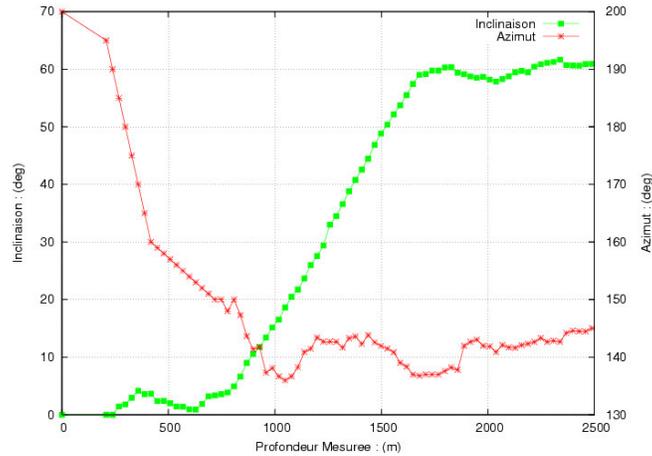


Figure 4.4 : Trajectoire du puits de forage

En plus, nous avons supposé que le puits comporte deux sections : la première avec tubage (de la surface à 660 m) avec un coefficient de frottement de **0.1**, et la deuxième est en découvert (de 660 à 2200 m) avec un coefficient de frottement de **0.15**.

Les résultats en terme de couple en surface sont présentés sur la figure 4.5.

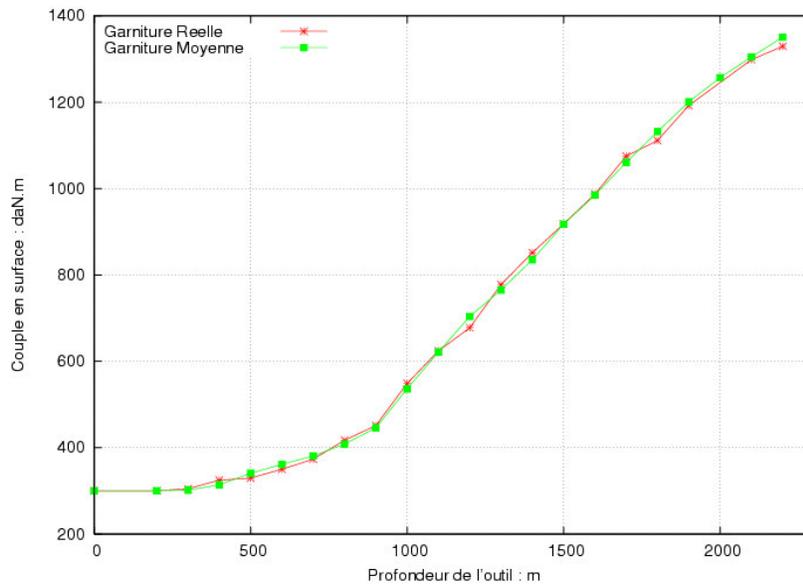


Figure 4.5 : Comparaison du couple en surface en utilisant la garniture réelle et la garniture "simplifiée"

Nous remarquons que les deux garnitures donnent pratiquement le même résultat d'où l'intérêt d'utiliser de la garniture "simplifiée" facilitant la procédure de simulation et réduisant donc le temps de saisi des données.

IV-3.3 Discrétisation de la garniture

Pour évaluer l'effet du pas de discrétisation sur les calculs par le code *ABIS* des tensions et du moment de torsion, nous avons choisi une section de 500 m d'un puits de forage (figure 4.6) et nous avons fait varier le pas de discrétisation uniforme de la garniture de 10 cm à 10 m. Cette section comporte 120 m de phase inclinée à 45°, une phase montante de 180m avec un gradient d'inclinaison de 2°/30m et 200 m avec un double gradient d'inclinaison et d'azimut de 2°/30m (trajectoire classique avec des gradients standards). La tige choisie pour la simulation est une tige pesante type DC (masses tiges) avec un diamètre intérieur de 3'' et un diamètre extérieur de 8''. Le diamètre du puits est de 12 ¼ '' et le coefficient de frottement est supposé égal à 0.3.

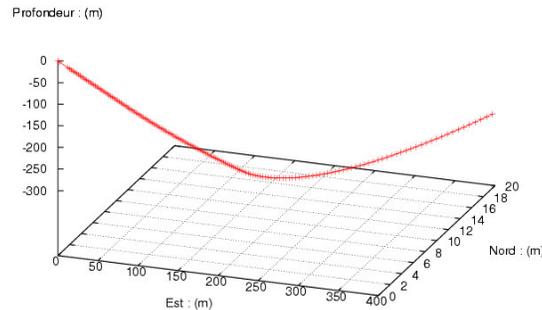


Figure 4.6 : Géométrie de la section du puits de 500 m

Les résultats de la simulation de la tension dans les tiges (figure 4.7) sont les mêmes pour tous les pas de discrétisation choisis alors que le moment de torsion (figure 4.8) commence à changer dès le pas de 5 m et l'écart est plus important avec un pas de 10 m alors que pour des pas inférieurs ou égaux à 3 m, le résultat est le même. Ainsi, pour effectuer une simulation "Torque&Drag" un pas de longueur inférieure ou égale à 3 m suffit. Dans toutes nos simulations du "Torque&Drag", le pas de discrétisation choisi est toujours inférieur à 3m (0.3 m, pour la BHA et les "Tool Joints", et 3 m entre deux "Tool Joints" d'une tige de forage).

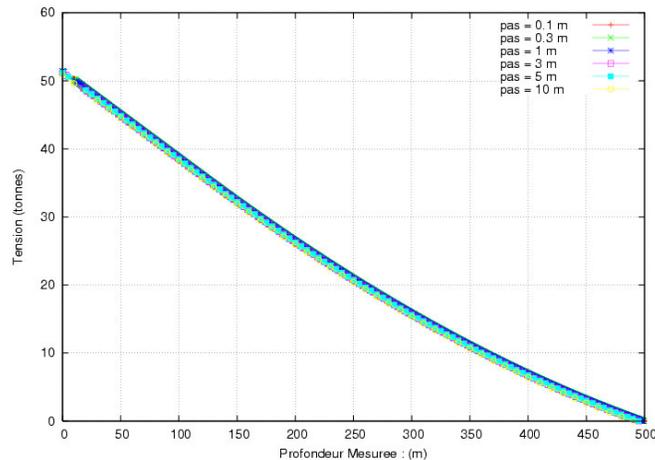


Figure 4.7 : Influence du pas de discrétisation de la garniture sur le calcul par *ABIS* de la tension dans les tiges

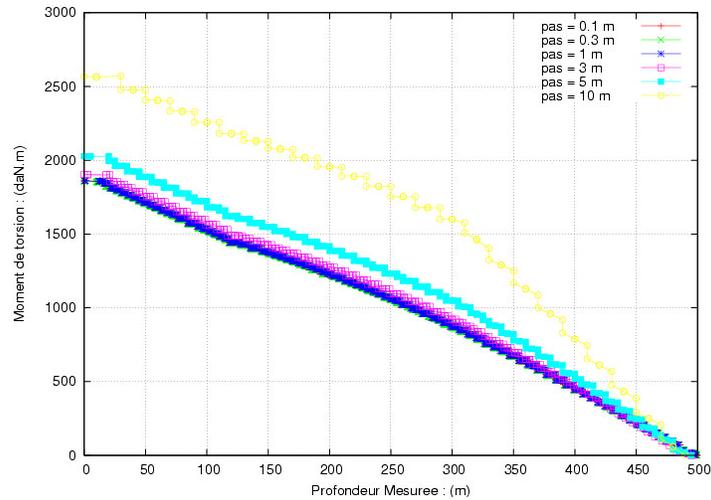


Figure 4.8 : Influence du pas de discrétisation de la garniture sur le calcul du moment de torsion dans les tiges

IV-3.4 Jeu entre garniture et parois du puits

Avec les mêmes conditions que celles du paragraphe précédent (même section de puits, même tige et même coefficient de frottement) nous avons fait varier le diamètre du puits afin d’analyser l’influence du jeu sur les calculs fournis par *ABIS*.

Les résultats en terme de tensions et de moment de torsion sont les mêmes pour différents jeux (voir figure 4.9 pour le moment de torsion). Ainsi, pour la trajectoire choisie, le diamètre du puits n’a pas d’influence sur les résultats du calcul du “*Torque&Drag*”.

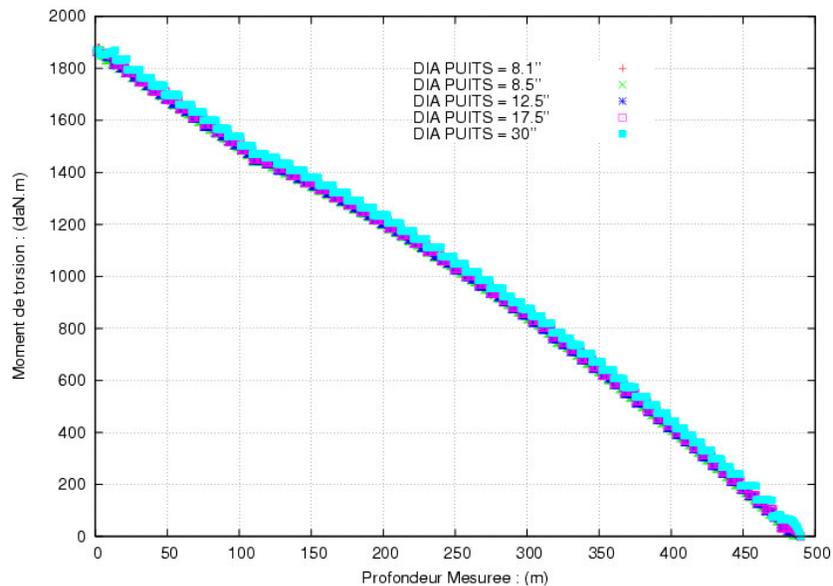


Figure 4.9 : Influence du jeu entre la tige et les parois du puits sur le calcul du moment de torsion

IV-3.5 Conditions aux limites

Comme expliqué dans le troisième chapitre de ce rapport, la condition au limite adaptée lors des manœuvres (remontée, descente ou suspension statique), dans le calcul des frottements, au point bas de la garniture est une condition au limite type “*Torque&Drag*” avec blocage des rotations et déplacements latéraux et libération des déplacement et rotation axiaux. Nous avons voulu savoir l’influence d’une condition au limite totalement libre au point bas sur les résultats des calculs.

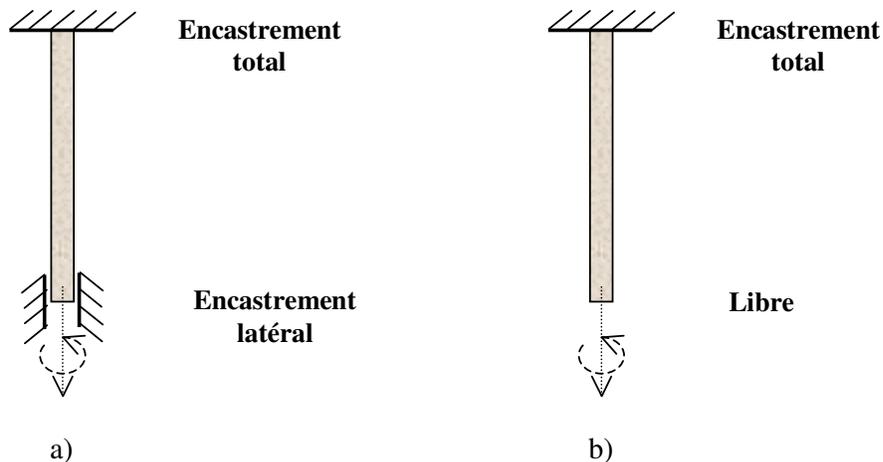


Figure 4.10 : Conditions au limite au point bas de la garniture a) *Torque&Drag* , b) Libre

Pour la simulation, nous avons repris les mêmes conditions que celles du paragraphe IV-3.3. Les résultats des simulations montrent que les tensions ainsi que le moment de torsion sont insensibles au blocage ou non des déplacements et rotations latéraux.

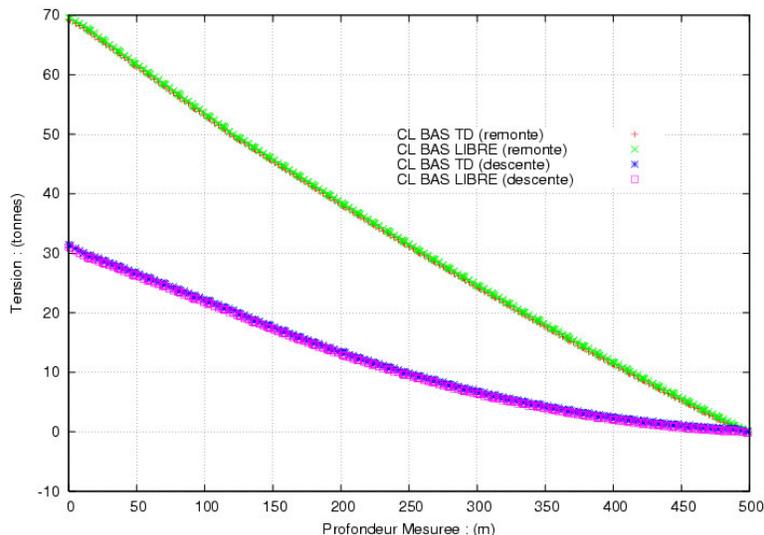


Figure 4.11 : Influence de la condition aux limites au point bas de la garniture entre la tige et les parois du puits sur le calcul des tensions

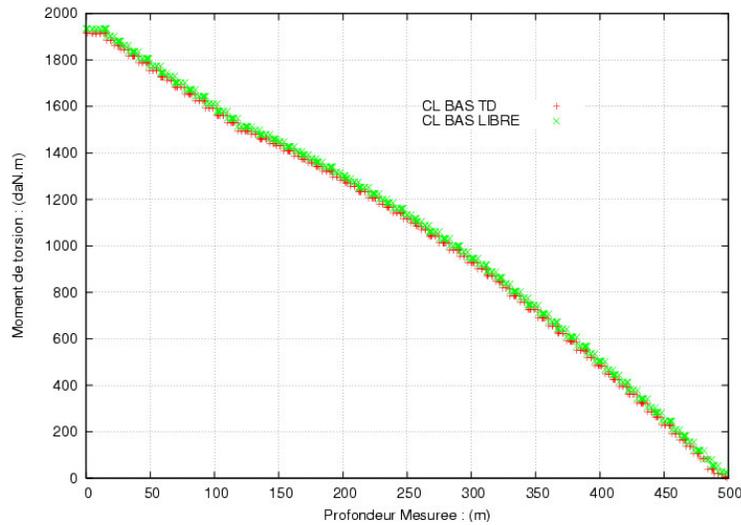


Figure 4.12 : Influence de la condition aux limites au point bas de la garniture entre la tige et les parois du puits sur le calcul du moment de torsion

IV-3.6 Influence du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est le paramètre le plus important dans les calculs du "Torque & Drag". Pour cette raison, il est important d'élucider l'influence de sa variation sur les valeurs calculées du moment de torsion et des tensions de descente et de remontée. En effet, cela permet de quantifier l'effet de la diminution de ce coefficient par exemple suite au changement de la nature de la boue de forage ou à l'incorporation d'un accessoire anti-frottement ou simplement l'effet d'une mauvaise estimation de ce coefficient.

La trajectoire du puits et les caractéristiques de la tige sont toujours celles du paragraphe IV.3.3 et le coefficient de frottement varie de 0.05 à 0.4 par pas de 0.05.

Les figures 4.13 et 4.14 montrent que les tensions et le moment de torsion sont sensibles aux variations du coefficient de frottement (la tension de descente est plus sensible que la tension de remontée). Ainsi, le coefficient de frottement doit être connu avec précision car même une petite variation se répercute par une variation importante du moment de torsion et des tensions (par exemple le passage de 0.35 à 0.4 se répercute par l'augmentation de la tension en remontée de l'ordre de 5%, de la diminution de la tension de descente de 16% et de l'augmentation du moment de torsion de 12%). En revanche, le coefficient de frottement ne joue aucun rôle dans le calcul du poids statique (STW) car il est simplement supposé égal à zéro.

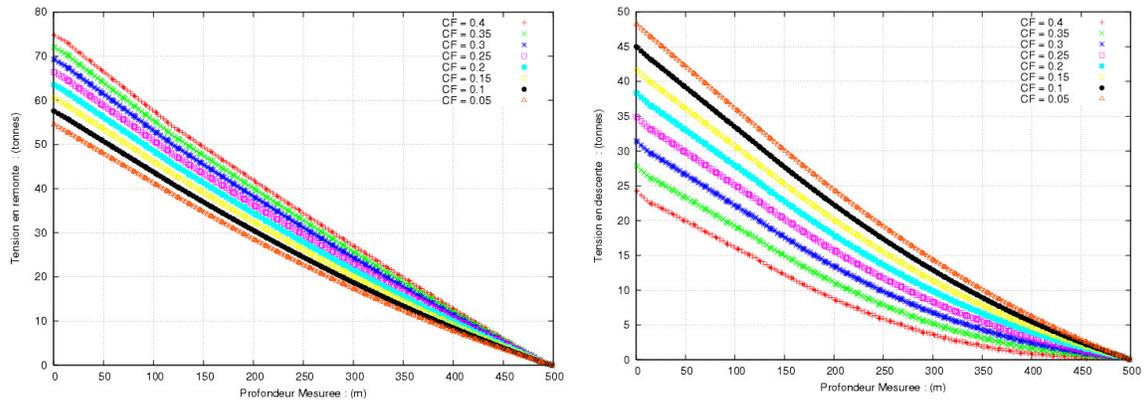


Figure 4.13 : Influence de la variation du coefficient de frottement sur le calcul des tensions de remontée et de descente des tiges

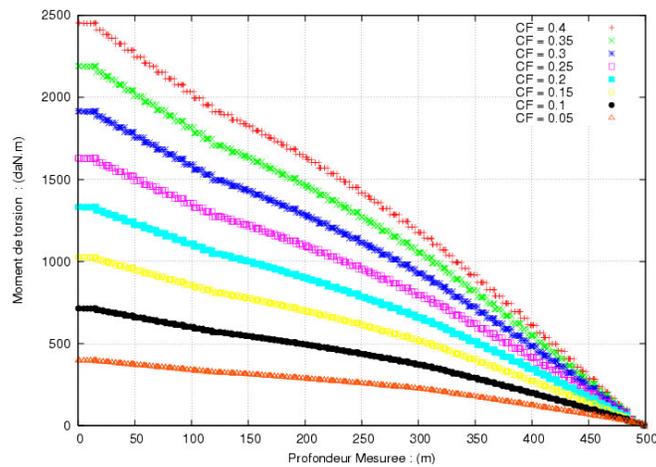


Figure 4.14 : Influence de la variation du coefficient de frottement sur le calcul du moment de torsion dans les tiges

IV-3.7 Influence de la méthode de reconstitution de la trajectoire

Pour les simulations du “*Torque&Drag*” avec le code *ABIS*, nous avons utilisé la méthode tridimensionnelle MMT (méthode du minimum de torsion géométrique) pour reconstituer la trajectoire du puits (calcul de la tangente et des coordonnées cartésiennes sur la trajectoire). En pratique, c’est la méthode du minimum de courbure MMC qui reste encore couramment utilisée pour la reconstitution.

Pour connaître l’influence de l’utilisation du type de méthode sur les calculs, nous avons simulé trois tronçons à trajectoires gauches de puits de longueur 300m avec une inclinaison de 45° et trois gradients d’azimut GA élevés (5°/30m, 15°/30m et 30°/30m).

Nous donnons dans le tableau 4.4 les valeurs de la courbure et de la torsion géométrique moyens avec chacune des deux méthodes de reconstitution selon la valeur du gradient d’azimut GA.

Nous remarquons que plus GA augmente plus la torsion géométrique τ (obtenue par MMT) augmente (τ est nulle avec la MMC car cette méthode ne prend pas en compte la torsion géométrique).

<i>Gradients GA</i>	<i>MMC</i>		<i>MMT</i>	
5°/30m	$\rho = 2.05 \cdot 10^{-3}$	$\tau = 0$	$\rho = 2.05 \cdot 10^{-3}$	$\tau = 2.05 \cdot 10^{-3}$
15°/30m	$\rho = 6.17 \cdot 10^{-3}$	$\tau = 0$	$\rho = 6.17 \cdot 10^{-3}$	$\tau = 6.17 \cdot 10^{-3}$
30°/30m	$\rho = 1.23 \cdot 10^{-2}$	$\tau = 0$	$\rho = 1.23 \cdot 10^{-2}$	$\tau = 1.23 \cdot 10^{-2}$

Tableau 4.4 : Valeurs de la courbure et de la torsion géométrique obtenues par les méthodes MMC et MMT

L'allure des trajectoires pour les trois gradients est présentée sur la figure 4.15 :

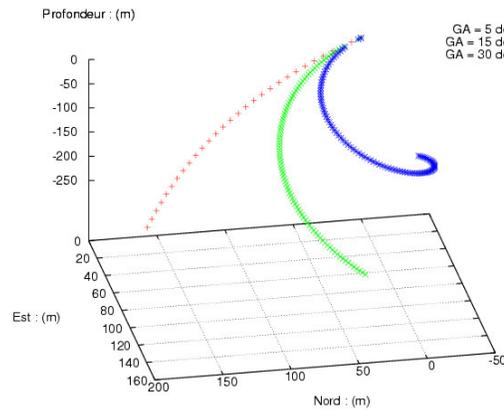


Figure 4.15 : Allure des trajectoires pour différents GA

Le coefficient de frottement choisi pour la simulation vaut **0.3**.

Les simulations de la tension et du moment de torsion montrent que les deux méthodes de reconstitution donnent toujours les mêmes résultats en tension et que les différences entre les deux méthodes n'apparaissent qu'avec un gradient d'azimut GA=30°/30m (gradient très élevé) dans le calcul du moment de torsion. Ainsi, nous pouvons dire que pour les trajectoires réalistes (gradients d'azimut < 15°/30m) les deux méthodes MMC et MMT donnent le même résultat en terme de tension et de moment de torsion.

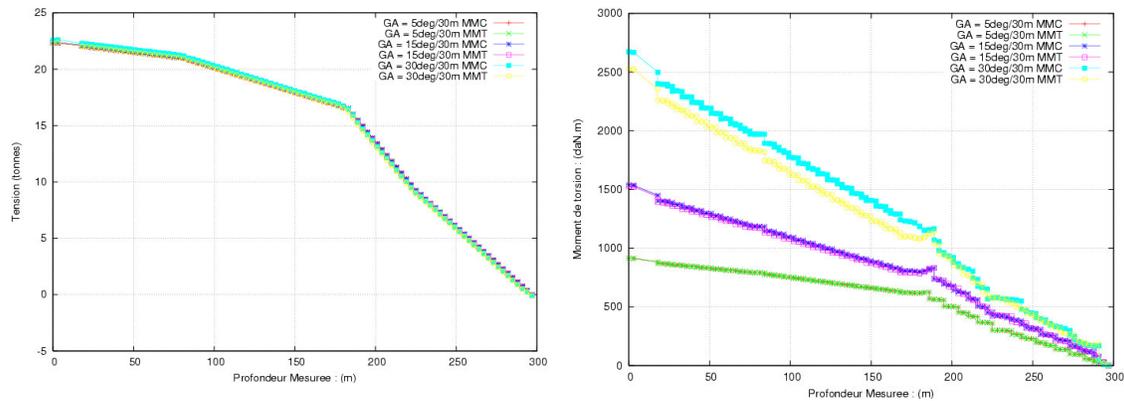


Figure 4.16 : Influence de la méthode de reconstitution de la trajectoire sur le calcul de la tension et du moment de torsion dans les tiges

IV-3.8 Influence de la tortuosité dans la phase verticale

IV-3.8.1 Trajectoires

Nous nous intéressons ici à un puits classique composé d'une phase verticale de 1200 m et d'une phase montante de 300 m. Nous cherchons à évaluer l'influence de l'inclinaison en phase verticale sur le "Torque&Drag" évalué par ABIS.

La forme des trajectoires ainsi que l'évolution de l'inclinaison pour chaque cas sont données par la figure 4.17.

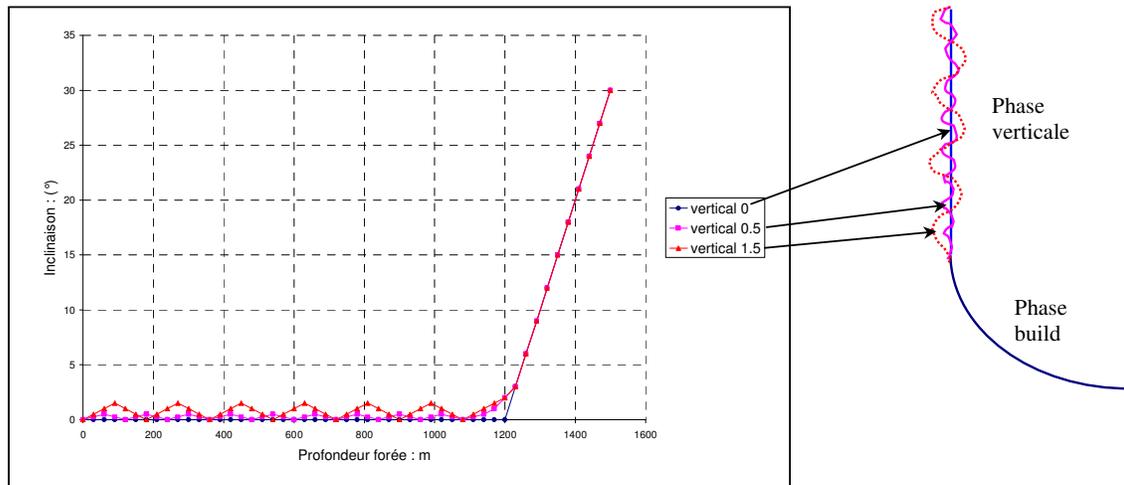


Figure 4.17 : Evolution de l'inclinaison en fonction de la profondeur forée pour les trois cas et formes des trajectoires associées

IV-3.8.2 Simulations du "Torque&Drag"

Les résultats des simulations sont donnés sur la figure 4.18. La courbe rouge désigne la référence (phase verticale parfaitement droite avec une inclinaison nulle sur toute la section). Par rapport à cette référence, nous remarquons que, plus la sinuosité en phase verticale est importante, plus le couple de torsion augmente de manière remarquable (les tensions ne varient pas assez). Cette augmentation du couple de torsion peut atteindre presque le double de la valeur enregistrée avec la trajectoire de référence si la sinuosité atteint 1.5°; elle est de l'ordre de 25% si la sinuosité n'est que de 0.5°. Ainsi, même si la sinuosité est relativement faible en phase verticale (0.5°), le couple de torsion perdu par frottement à cause de cette sinuosité est assez important. Sachant que l'incertitude sur la mesure de l'inclinaison pour les angles inférieures à 5° est de 0.25°, nous pouvons conclure que cette incertitude de mesure de l'inclinaison peut influencer les résultats de prédiction du "Torque&Drag". Il en résulte que les foreurs doivent veiller à ce que la phase verticale soit la plus droite possible afin de minimiser les pertes inutiles en frottement tangentiel et ainsi transmettre convenablement le couple à l'outil pour la foration.

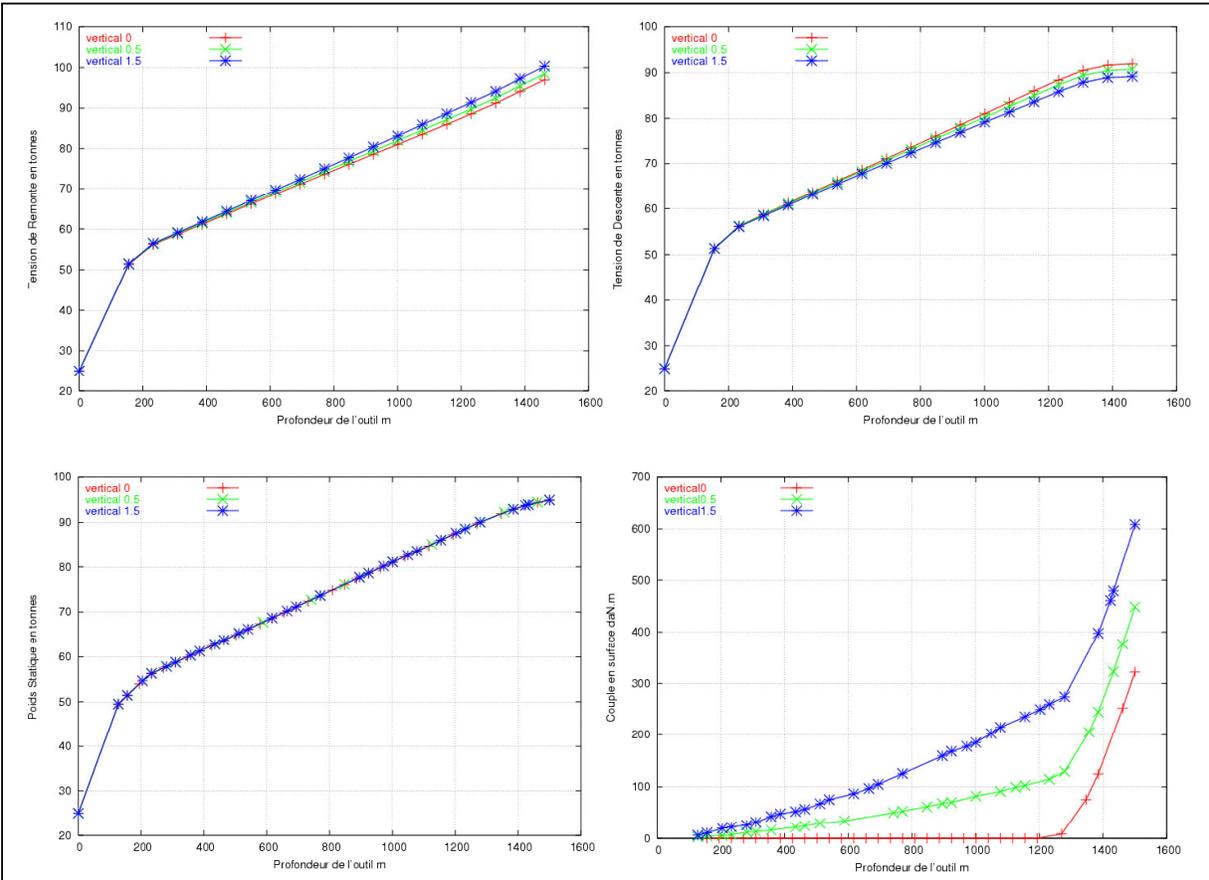


Figure 4.18 : Evolution des grandeurs du “Torque&Drag” (phase 12’’ ¼)

IV-3.9 Conclusion

L’étude de sensibilité nous a montré, entre autres, que :

- un pas de discrétisation de la garniture inférieur ou égal à 3m est suffisant pour faire un calcul “Torque&Drag” avec ABIS pour les trajectoires standards
- même des petites variations du coefficient de frottement peuvent influencer les résultats de calcul “Torque&Drag” de manière significative (notamment pour la tension de descente et le couple de torsion)
- les calculs des tensions et du moment de torsion sont peu sensibles au jeu qui sépare les tiges aux parois du puits ainsi qu’à la méthode de reconstitution de la trajectoire utilisée (MMC ou MMT) pour les trajectoires standards
- les petites variations de l’inclinaison en phase verticale ont des répercussions importantes sur les calculs du “Torque&Drag” notamment pour le couple en surface.

IV-4 SIMULATIONS NUMERIQUES ET ETUDE COMPARATIVE

IV-4.1 Introduction

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des simulations numériques afin d'établir une étude comparative entre le modèle couramment utilisé par l'industrie du forage (Modèle LISSE) sans gestion des contacts et notre modèle rigide avec gestion des contacts (Code ABIS). Nous avons restreint les comparaisons uniquement avec le modèle LISSE pour deux raisons : d'abord parce que ce modèle est très répandu dans l'industrie du forage et qu'il est le plus utilisé comme outil de diagnostic et de monitoring. Ensuite parce que les modèles rigides existants qui s'appuient sur la même hypothèse de contact que le modèle LISSE (modèle de Ho 1987) donnent presque les mêmes résultats que ce dernier pour les puits les plus habituellement forés ; les différences observées dues à la rigidité ne deviennent significatives que pour les parties lourdes de la garniture contraintes à des "doglegs" théoriques très élevés (20°/30m ou plus).

Nous commençons par l'étude comparative avec des puits à géométrie "relativement simple" (bidimensionnelle ou faiblement tridimensionnelle et sans tortuosité locale). Ensuite, nous passons à l'étude des trajectoires particulières à géométrie "relativement complexe" (présentant un fort gauchissement et/ou des tortuosités locales assez prononcées) afin de mettre en valeur l'apport de notre nouveau modèle en analysant l'influence de divers critères tel que la tortuosité ou le gauchissement. Pour chaque puits, nous traçons l'allure tridimensionnelle de la trajectoire, l'évolution de l'inclinaison et de l'azimut en fonction de la profondeur forée ainsi que les résultats des simulations.

Outre les simulations du "Torque&Drag", nous traçons aussi, pour certains puits, l'évolution des forces de contact latéral entre la garniture et les parois du puits en fonction de la profondeur, obtenue par les deux modèles pour différents scénarios possibles (remontée, descente, poids statique ou rotation de la garniture).

En outre, nous confrontons, pour plusieurs puits réels, les prévisions du "Torque&Drag" de deux modèles (LISSE et ABIS) aux mesures *in situ* afin de s'assurer de la validité de notre modèle.

Par ailleurs, contrairement à plusieurs auteurs (Maidla (1987), Hendricks (1999), etc,...) qui calent leurs coefficients de frottement avec les mesures *in situ* selon la nature de l'opération (remontée, descente, rotation de la garniture), nous avons gardé le caractère intrinsèque du coefficient de frottement en utilisant les mêmes coefficients (un pour le frottement garniture-tubage et un autre pour le frottement garniture-roche) pour les puits forés dans un même champ pétrolier et ceci indépendamment de la nature de l'opération.

IV-4.2 Puits à géométrie simple

IV-4.2.1 Puits bidimensionnel

a) trajectoire

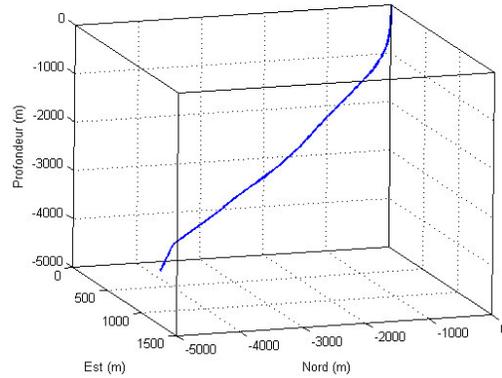


Figure 4.19 : Trajectoire du puits P1

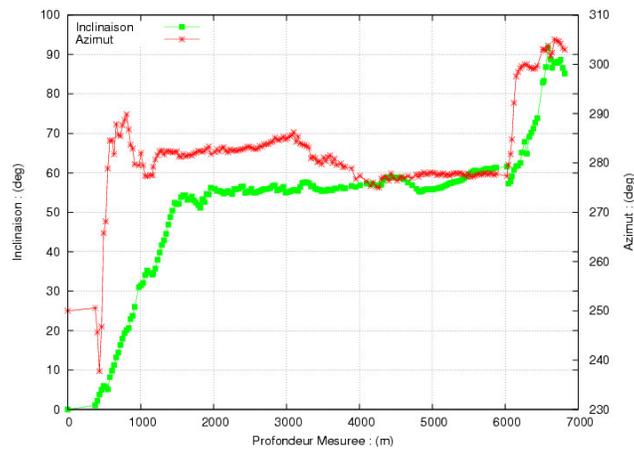


Figure 4.20 : Evolution de l'inclinaison et de l'azimut en fonction de la profondeur

Le puits P1 considéré ici est un puits assez long (6814 m), mais sa géométrie est presque bidimensionnelle comme le montre la figure 4.19 surtout sur les premiers 6000 m. D'ailleurs les DLS ("*dogleg severity*") sont relativement faibles tout au long du puits (inférieurs à $2^{\circ}/30$ m sauf dans les derniers 800 m où les DLS dépassent localement $4^{\circ}/30$ m).

Remarque : de manière générale, les variations mêmes importantes de l’azimut, quand elles sont accompagnées d’une faible inclinaison (inférieure à 10° ou 20° : comme pour les premiers 1000m du puits P1) sont sans importance sur la forme de la trajectoire et donc ensuite sur les calculs des frottements. En revanche, lorsque des variations importantes sont accompagnées d’une forte inclinaison (supérieure à 40°), elles induisent des gauchissements, changent l’allure de la trajectoire et peuvent affecter les calculs de frottements.

b) garniture

Nous donnons dans le tableau 4.5, après homogénéisation, la garniture de forage utilisée en phase 12 ” ½ ainsi que les sections tubées et trou découverts du puits et les coefficients de frottement correspondants.

Nom	Type	Long. (m)	D INT (’)	D EXT (’)	D MIN (’)	D MAX (’)
OC	3	54	2.81	8.00	2.81	8.00
HWDP	4	277	5.00	6.625	5.0	8.00
HWDP	4	345	5.965	6.625	5.0	8.0
DP	5	6138	4.778	5.50	3.50	7.248

Tableau 4.5 : Composition de la garniture du puits P1

D MIN et D MAX sont introduits pour décrire les diamètres intérieur et extérieur des “Tool Joints” pour les tiges de forage (DP) et les tiges lourdes (HWDP).

c) structure du puits (voir tableau 4.6)

Sections	Longueur (m)	Diamètre intérieur (’)	Coefficient de frottement	Densité de la boue
Tubée	0 à 3127	12.515	0.25	1.2
Trou découvert	3127 à 6814	12.25	0.34	1.2

Tableau 4.6 : Structure du puits P1

d) simulations du “Torque&Drag”

Nous remarquons sur la figure 4.21 que les deux modèles LISSE et ABIS donnent pratiquement les mêmes résultats en terme de prédictions du “Torque&Drag” avec un tout petit écart à la fin pour le moment de torsion dû à l’augmentation des DLS entre 6000 m et 6800 m comme indiqué au paragraphe précédent sur la trajectoire. Pour les données expérimentales, nous disposons de celles associées au poids statique (FRW) et ces données confortent relativement bien les prédictions des deux modèles notamment entre 3000 et 6000 m.

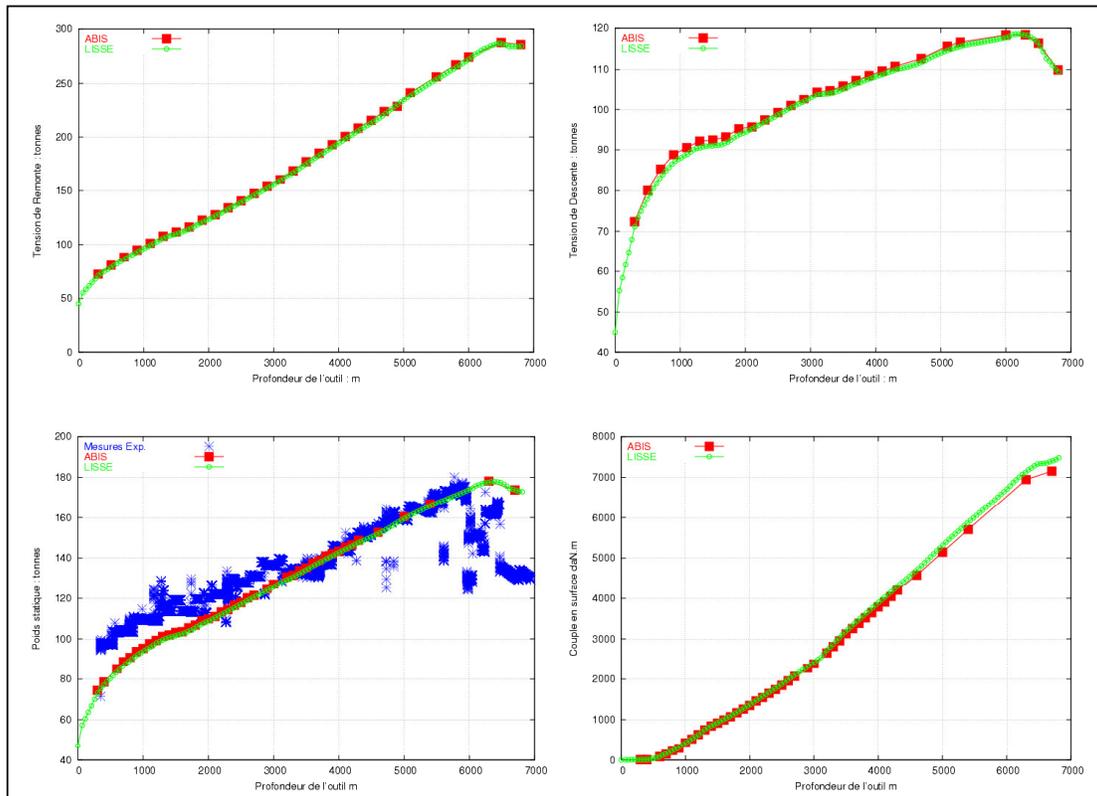


Figure 4.21 : Evolution des grandeurs “Torque&Drag” dans le cas du puits P1 (phase 12'' ¼)

IV-4.2.2 Puits bidimensionnels en cours de forage

a) trajectoire

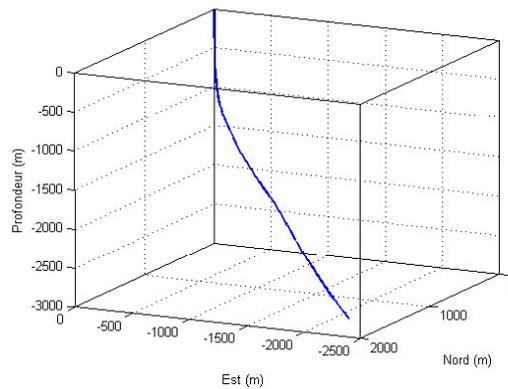


Figure 4.22 : Trajectoire du puits P2

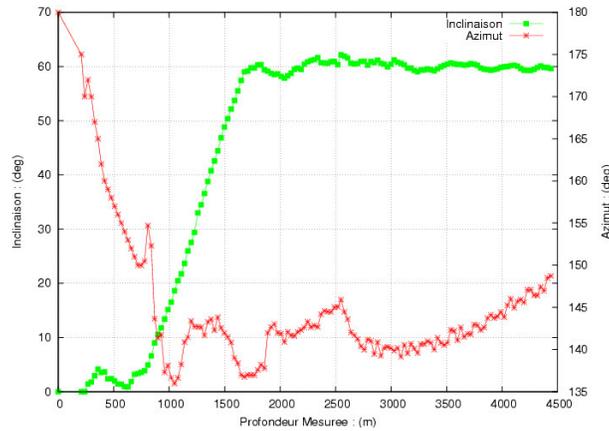


Figure 4.23 : Evolution de l'inclinaison et de l'azimut en fonction de la profondeur

Le puits P2, comme le montre sa géométrie (figure 4.22), est un puits bidimensionnel avec absence de tortuosité et *dog legs* locaux. En effet, le gradient d'inclinaison est partout faible (maximum $2^\circ/30$ m entre 500 et 1500 m dans la phase montante) et le gradient d'azimut est presque inexistant (inférieur à $1^\circ/30$ m).

b) structure du puits et coefficients de frottement

Le puits de forage comporte une section tubée entre 0 et 657 m et une section en découvert entre 657m et 4440 m. Pour les simulations, nous avons utilisé un coefficient de frottement de **0.1** en tubage et un coefficient de frottement de **0.15** en trou découvert.

c) simulations du "Torque&Drag"

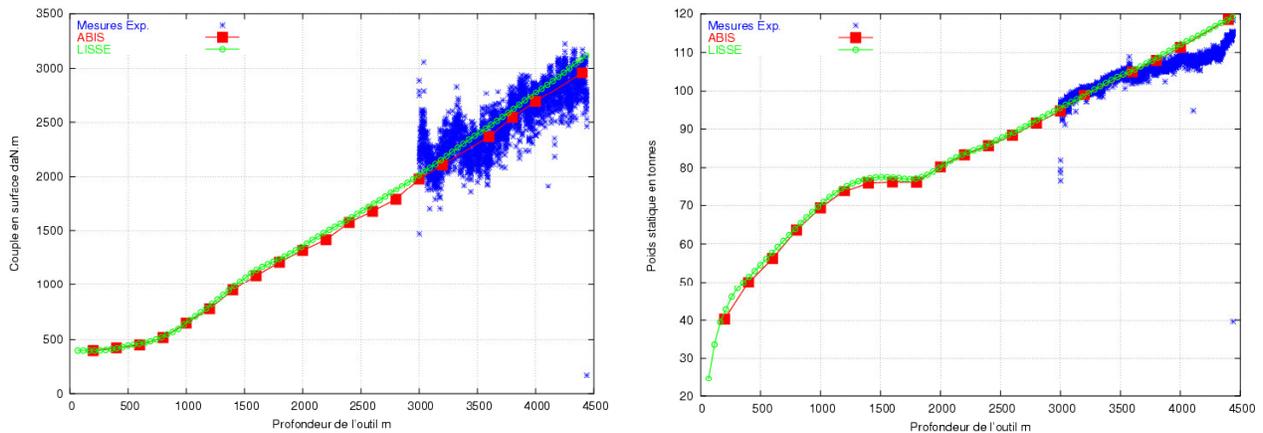


Figure 4.24 : Evolution des grandeurs "Torque&Drag" dans le puits P2 (phase 8'' 1/2)

Les simulations du couple et du poids statique pour ce puits ont été effectuées pour le cas où l’outil fore la formation avec les conditions aux limites suivantes : un poids à l’outil (WOB) de 10 tonnes , et un couple estimé à l’outil (TOB) de 400 daN.m. Nous remarquons que les résultats des simulations obtenus par les deux modèles (figure 4.24) sont presque identiques et que les prédictions de ces deux modèles sont assez proches des mesures *in-situ*.

IV-4.2.3 Puits tridimensionnels avec faible gauchissement

a) trajectoire

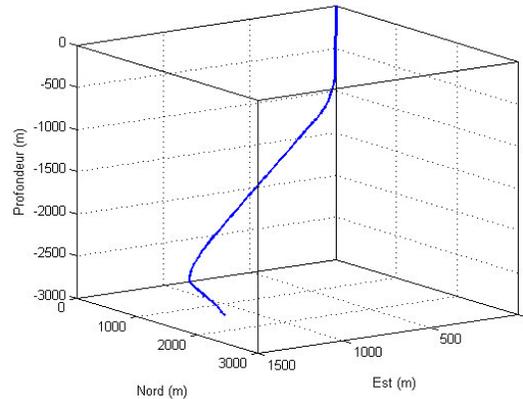


Figure 4.25 : Géométrie du puits P3

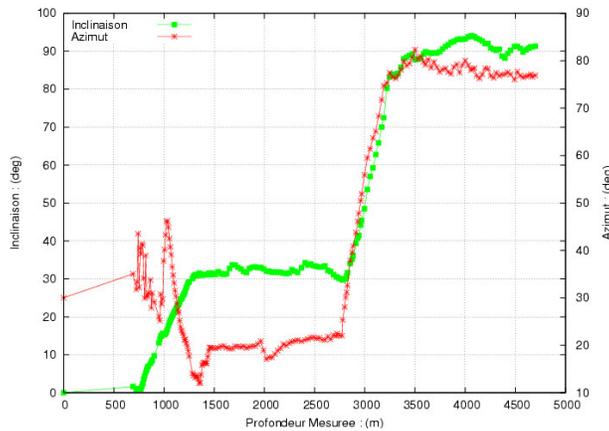


Figure 4.26 : Evolution de l’inclinaison et de l’azimut en fonction de la profondeur

On note ici que, les gradients d’inclinaison et d’azimut les plus importants se situent entre 800 et 1300 m (de l’ordre de 2.5°/ 30 m) et entre 2800 et 3500 m (3°/ 30 m) ; et partout ailleurs, ils sont assez faibles (figures 4.25 et 4.26). Ainsi, globalement, les courbures ne sont pas assez élevées et la trajectoire du puits ne présente pas de tortuosités ou de *dog legs* locaux importants ; la trajectoire est donc assez “lisse”.

b) structure du puits et coefficients de frottement

Nous avons ajusté un coefficient de frottement de **0.25** dans la section tubée (de 0 à 3182 m) et un coefficient de frottement de **0.34** dans la section découverte.

c) simulations du “Torque&Drag”

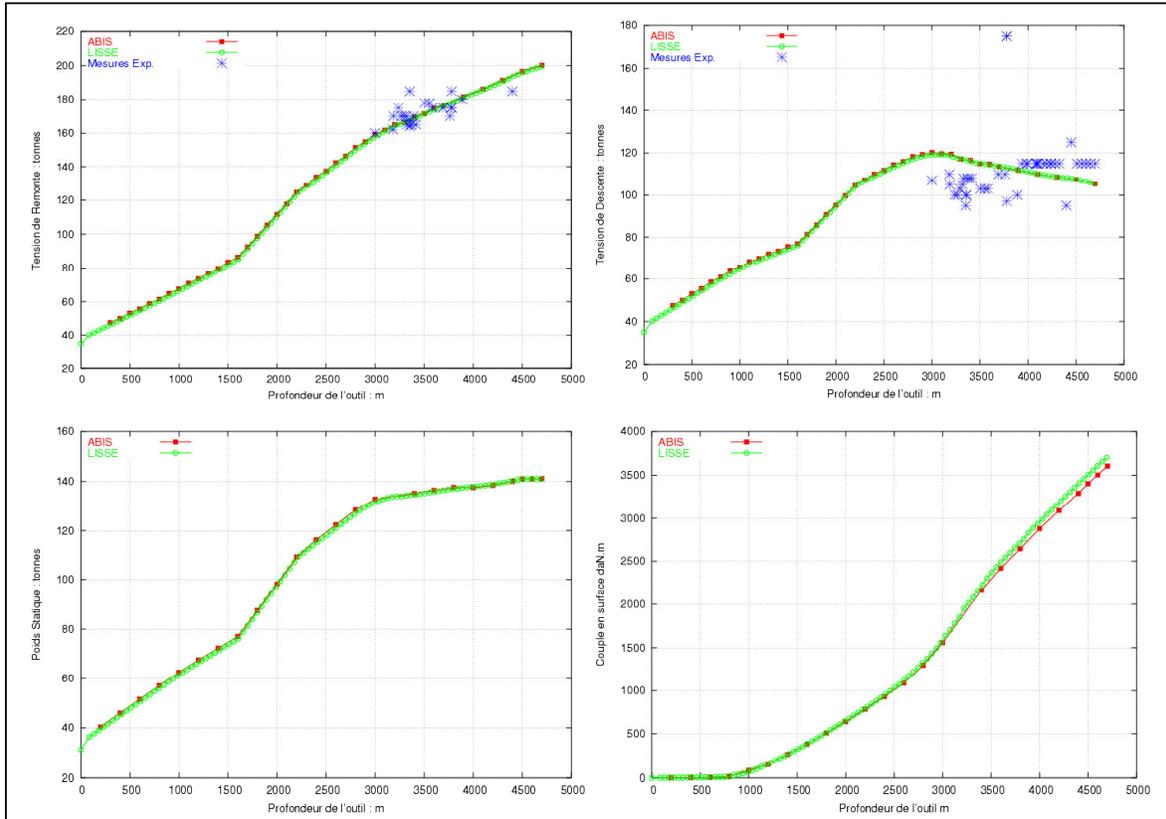


Figure 4.27 : Evolution des grandeurs du “Torque&Drag” dans le puits P3 (phase 8’’ 1/2)

Comme pour les deux puits précédents, les deux modèles donnent les mêmes résultats en terme de tensions, couple en surface (figure 4.27) ainsi qu’en terme de forces de contact latéral entre les parois du puits et la garniture (figure 4.28).

En annexe, nous avons présenté les résultats d’autres simulations numériques effectuées sur d’autres puits, pour lesquels nous disposons de mesures, où nous avons montré que les prédictions des deux modèles (ABIS et LISSE) restent proches. Ceci dit, les trajectoires de ces puits sont aussi relativement lisses et ne présentent pas de “dog legs”, micro-tortuosités ou gauchissement importants.

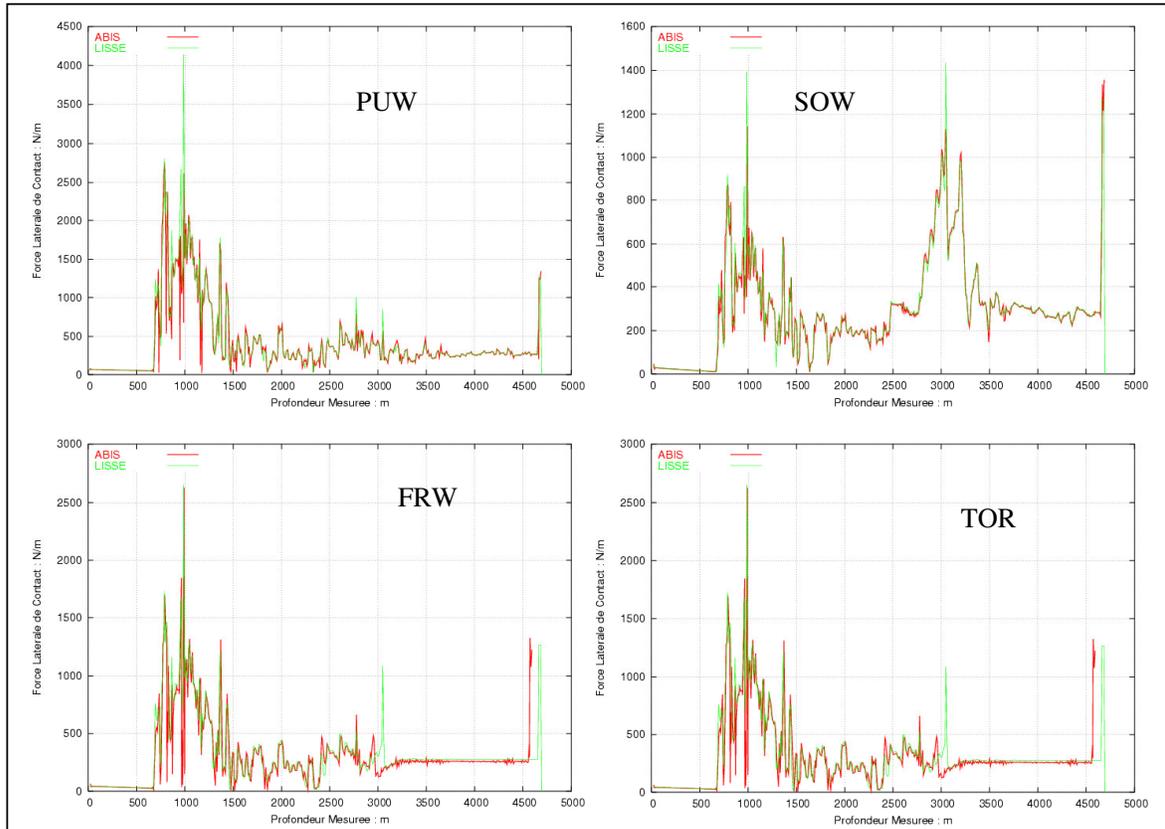


Figure 4.28 : Evolution des forces de contact dans le puits P3 phase 8'' ½

IV-4.3 Puits à géométrie complexe

IV-4.3.1 Puits avec forte micro-tortuosité

a) trajectoire

Nous étudions ici l'influence de la micro-tortuosité (tortuosité à l'échelle du mètre en moyenne) sur les résultats obtenus par les deux modèles (LISSE et ABIS) en terme de "Torque & Drag". Pour cela nous disposons, de la trajectoire d'un puits réel avec micro-tortuosité où deux types de mesures d'inclinaison et d'azimut ont été établies : une mesure standard (chaque 10 m environ) et une mesure en continu (tout les 0.5 à 1 m). Cette micro-tortuosité est attribuée au forage à l'aide du système raccord moteur-coudé en mode "sliding" en alternance avec le mode "rotary" en double rotation. La longueur totale du puits est de 1800 m et les mesures en continu se concentrent principalement entre (1200 et 1800 m).

Nous donnons par la suite (figure 4. 29) les valeurs de l'inclinaison et de l'azimut sur une section de la trajectoire. Sur cette figure, nous observons la différence entre les deux méthodes de mesures et nous remarquons que seule la mesure en continu permet de mettre en évidence la présence ou non de tortuosité dans la trajectoire.

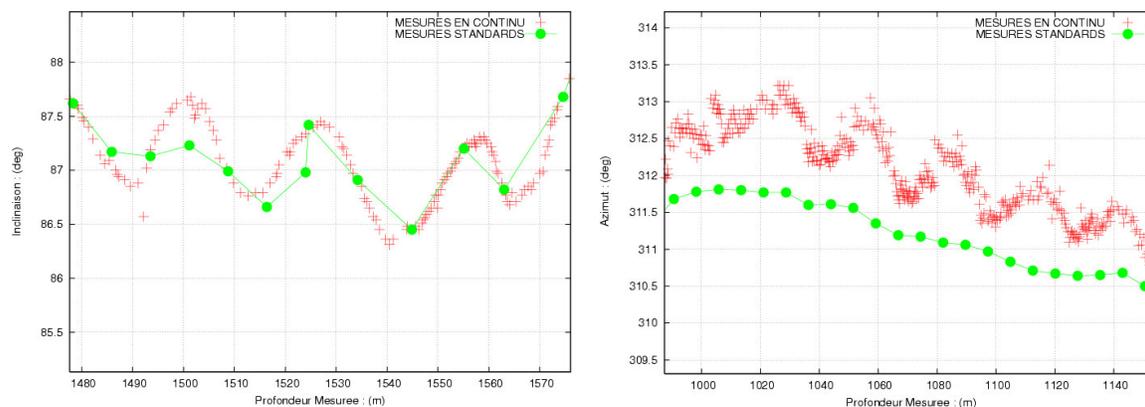


Figure 4.29 : Evolution de l'inclinaison et de l'azimut selon les mesures en continu et standard (puits P4)

b) structure du puits et coefficients de frottement

Lors des simulations du "Torque&Drag" sur ce puits, nous avons ajusté un coefficient de frottement de **0.3** dans la section tubée (0 à 650 m) et un coefficient de frottement de **0.4** dans la partie découverte (650 à 1800 m).

c) simulations du "Torque&Drag"

Les simulations montrent que pour le cas standard (figures 4.30 et 4.31) les résultats des deux modèles coïncident parfaitement (sauf pour le couple où des petites différences sont dues à des forts DLS et à des gauchissements). En revanche, pour le cas des mesures continues, les différences entre les deux modèles sont significatives (sauf bien sûr pour le poids statique ou les frottements ne jouent aucun rôle). En effet, en regardant ces courbes nous remarquons, pour les mesures en continus, un écart entre les prédictions du modèle LISSE et ceux d'ABIS (environ 20 % en remontée, 25 % en descente, 10% en couple et 15 % pour la descente du

tubage). La différence est aussi vérifiée sur les forces de contacts (les forces de contact fournies par le modèle LISSE deviennent 2 à 3 fois supérieures à celles du modèle ABIS : figure 4.32) ; ceci est aussi vraie pour la garniture de forage que pour le tubage (figure 4.33). Cette différence entre les deux modèles s’explique par le fait que le modèle LISSE épouse partout l’allure de la trajectoire tortueuse (hypothèse du contact continu) et surestime par la suite la zone de contact et donc les valeurs du “*Torque & Drag*” ou les forces de contact via les frottements.

Cette grande sensibilité du modèle LISSE à la qualité de la trajectoire est reconnue par plusieurs auteurs qui utilisent ce type de modèle et qui recommandent d’utiliser des mesures plus au moins espacées (toutes les 30 mètres) afin de ne pas surestimer le poids au crochet ou de couple en surface (Johancsick et al. , 1983 ; Aadnoy, 2000). Pour palier ce défaut et prendre en compte la présence de la tortuosité, les utilisateurs du modèle LISSE introduisent des coefficients de correction dans leurs calculs (*tortuosity factor*) au lieu de procéder à des simulations avec un pas de discrétisation petit.

Le modèle ABIS qui se base sur l’hypothèse de contacts ponctuels (contact qui s’établit généralement au niveau des “*Tool Joints*” espacés de 10 m) n’est pas sensible à cet effet de trajectoire. En effet, la différence en terme des tensions en surface (lors de remontée ou de descente de la garniture et lors de descente du tubage) entre le cas continu et le cas standard n’est que relativement faible (comparée avec la différence observée chez le modèle LISSE). Ceci s’explique par le fait qu’avec ABIS, la zone de contact entre la structure et les parois du puits ne suit pas forcément de manière continue la ligne de la trajectoire et qu’elle est souvent concentrée sur les “*Tool-Joints*” (voir le paragraphe consacrée à la visualisation de la déformée).

Selon ABIS, la trajectoire déterminée à partir de mesures continues pour ce puits engendre plus de frottements lors de la remontée et la descente de la garniture ou du tubage que la trajectoire constitué à partir de mesures standards, entraînant une différence d’environ 7%.

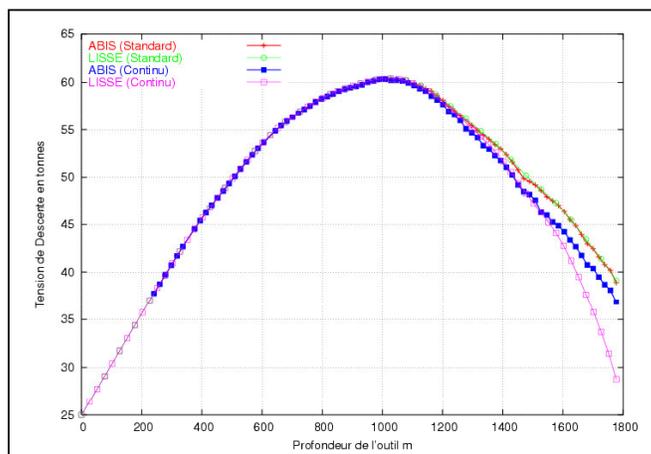


Figure 4.30 : Evolution de la tension en surface lors de la descente du tubage du puits P4 (phase 9'' 5/8)

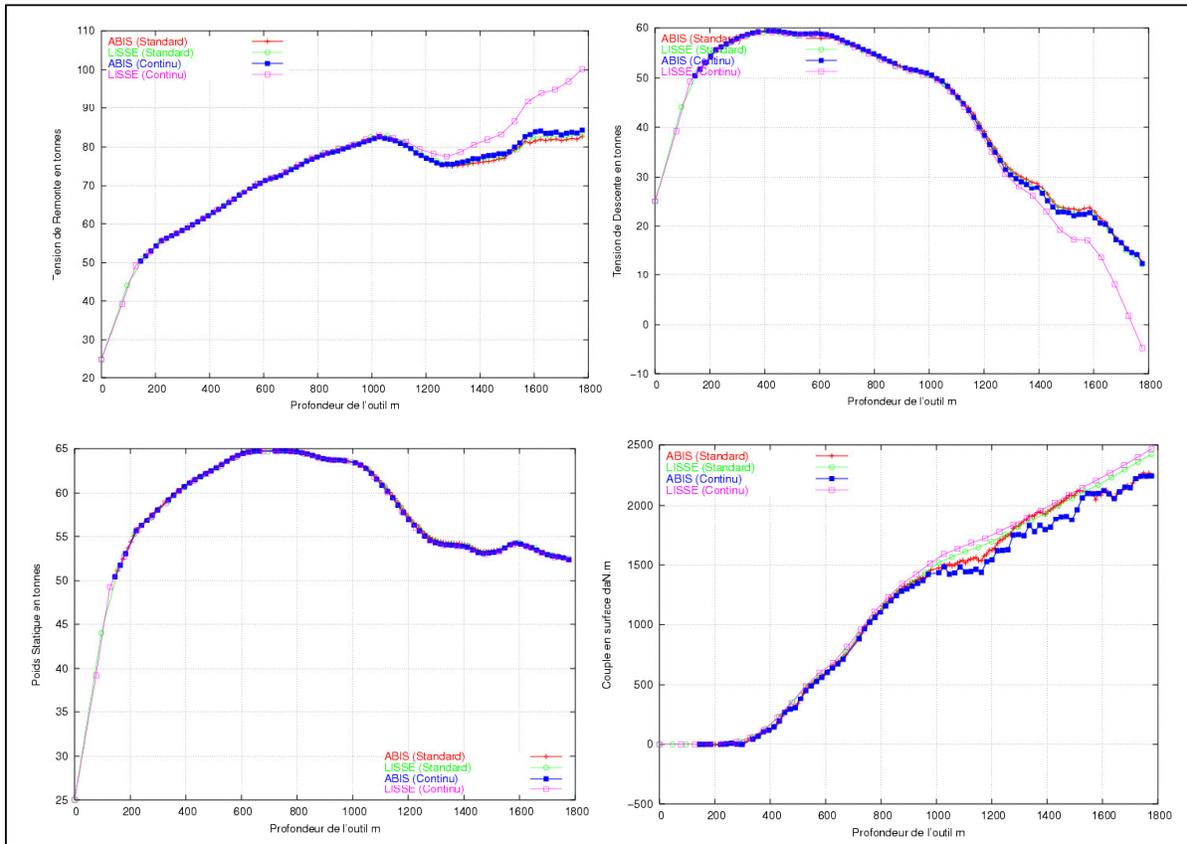


Figure 4.31 : Evolution des grandeurs du *Torque & Drag* dans le puits P4 (phase 12'' 1/4)

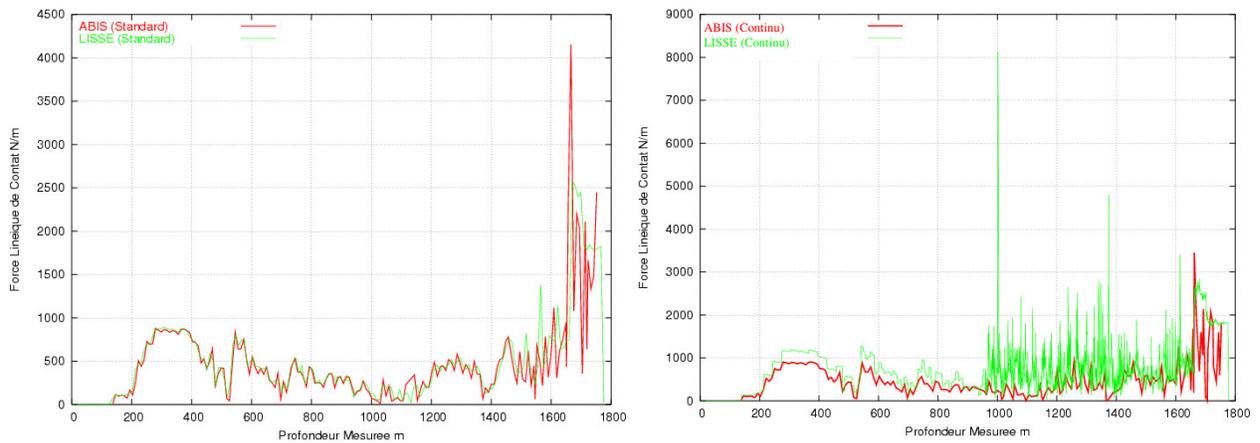


Figure 4.32 : Evolution des forces de contact dans le puits P4 (cas de remonté : PUW)

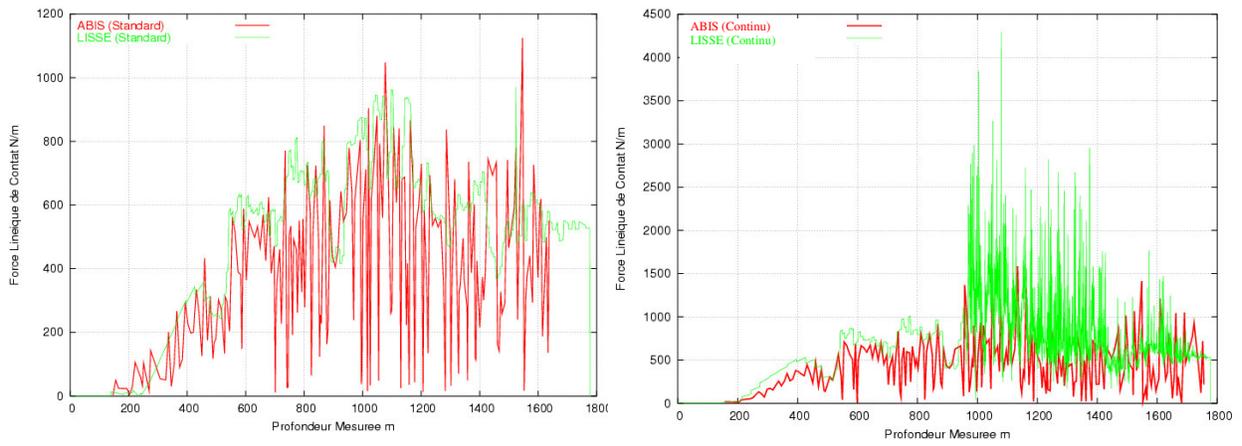


Figure 4.33 : Evolution des forces de contact dans le puits P4 (cas descente de tubage)

IV-4.3.2 Puits théoriques avec gauchissement prononcé

a) trajectoire

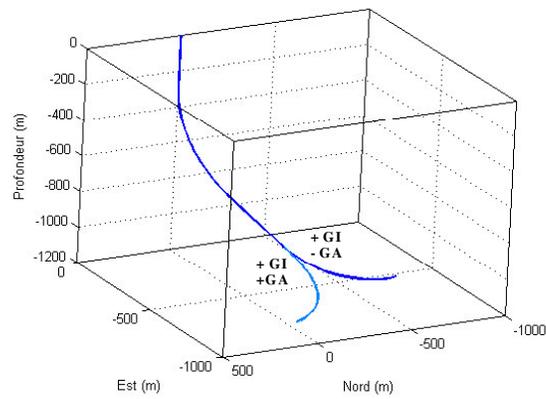


Figure 4.34 : Géométrie du puits P5

Ici, nous allons étudier l'influence du gauchissement sur les résultats obtenus par les deux modèles LISSE et *ABIS* en terme du *Torque & Drag*. Pour cela, nous avons imaginé deux puits de longueur totale de 1800 m chacun et dont la première section de 1200 m est commune, ensuite l'un bifurque vers la droite (+GI, +GA) et l'autre vers la gauche (+GI, -GA). En fait, les deux trajectoires possèdent un même gradient d'inclinaison GI mais deux gradients d'azimut opposés GA. Ainsi, pour ces deux puits le DLS est le même mais la torsion géométrique est inversée (figure 4.35).

La géométrie de deux trajectoires commence avec une phase verticale de 300 m puis une remontée entre 300 et 900 m (avec un DLS de 3°/30m) puis une phase stabilisée entre 900 et 1200 m. Ensuite, deux arcs d'hélices successifs l'un en combinant un gradient d'inclinaison avec un gradient d'azimut (entre 1200 et 1500 m) et l'autre avec uniquement un gradient d'azimut (entre 1500 et 1800 m).

Le gradient d'azimut choisi est de 5°/30m, gradient généralement atteint dans les trajectoires réelles à tendance tridimensionnelle dans les phases de virages.

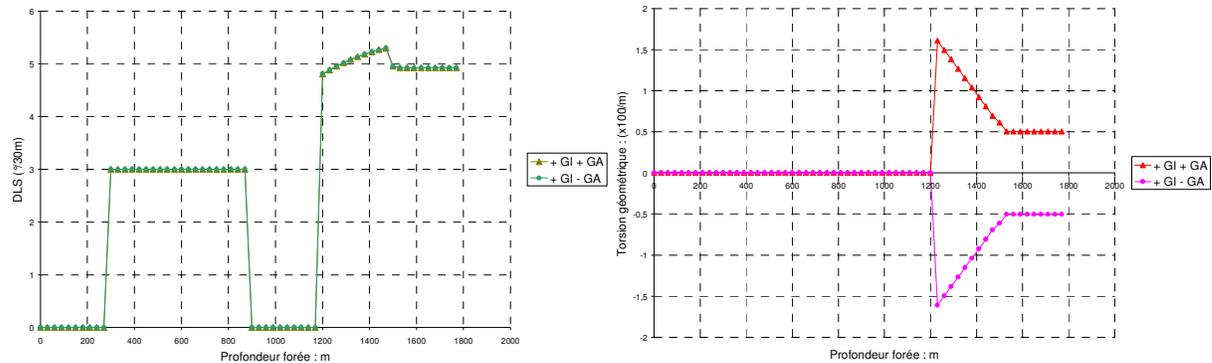


Figure 4.35 : Evolution du DLS et de la torsion géométrique dans la trajectoire du puits P5

b) structure du puits et coefficients de frottements

Comme pour le puits précédent lors des simulations du “*Torque&Drag*”, nous avons utilisé un coefficient de frottement de **0.3** dans la section tubée (0 à 650 m) et un coefficient de frottement de **0.4** dans le trou découvert (650 à 1800 m).

c) simulations du “*Torque&Drag*”

Avec ces deux trajectoires ayant deux gauchissement différents, nous allons voir la réponse des deux modèles LISSE et *ABIS* à cette différence de torsion géométrique. Pour cela, nous traçons l'évolution des tensions en surface (remontée, descente et suspension statique) de la garniture ainsi que l'évolution du couple de torsion en surface en fonction de la position de l'outil qui décrit la trajectoire pour les deux cas (+GI, +GA) et (+GI, -GA) avec les deux modèles (figure 4.36).

Les résultats obtenus par les deux modèles en terme de tensions sont identiques (différence inférieur à 2 %). En revanche, pour le couple de torsion la différence est assez nette. En effet, avec le modèle LISSE, il n'y a pas de différence en terme de couple en surface entre les deux trajectoires, alors qu'avec le modèle ABIS la trajectoire (+GI, -GA) qui tourne vers la gauche exhibe environ 20% moins de couple en surface que la trajectoire (+GI,+GA) qui tourne vers la droite. Ainsi, contrairement au modèle ABIS, le modèle LISSE se montre insensible au signe de la torsion géométrique. La différence en couple peut être expliquée de la manière suivante : sachant que la garniture tourne dans le même sens (sens conventionnel) pour les deux trajectoires, la tendance de cette garniture à rouler et à frotter contre les parois du puits n'est pas la même pour les deux configurations géométriques. Cette différence de tendance modifie l'effort de frottement et par suite celui du couple de frottement.

Le résultat obtenu avec le modèle ABIS est très important dans la mesure où il permet le choix d'une trajectoire optimale (en fonction de l'orientation de la courbe dans l'espace) réduisant le couple en surface et donc le coût du forage, d'où l'intérêt de ce nouveau modèle pour la phase de planification des puits (*well planning*).

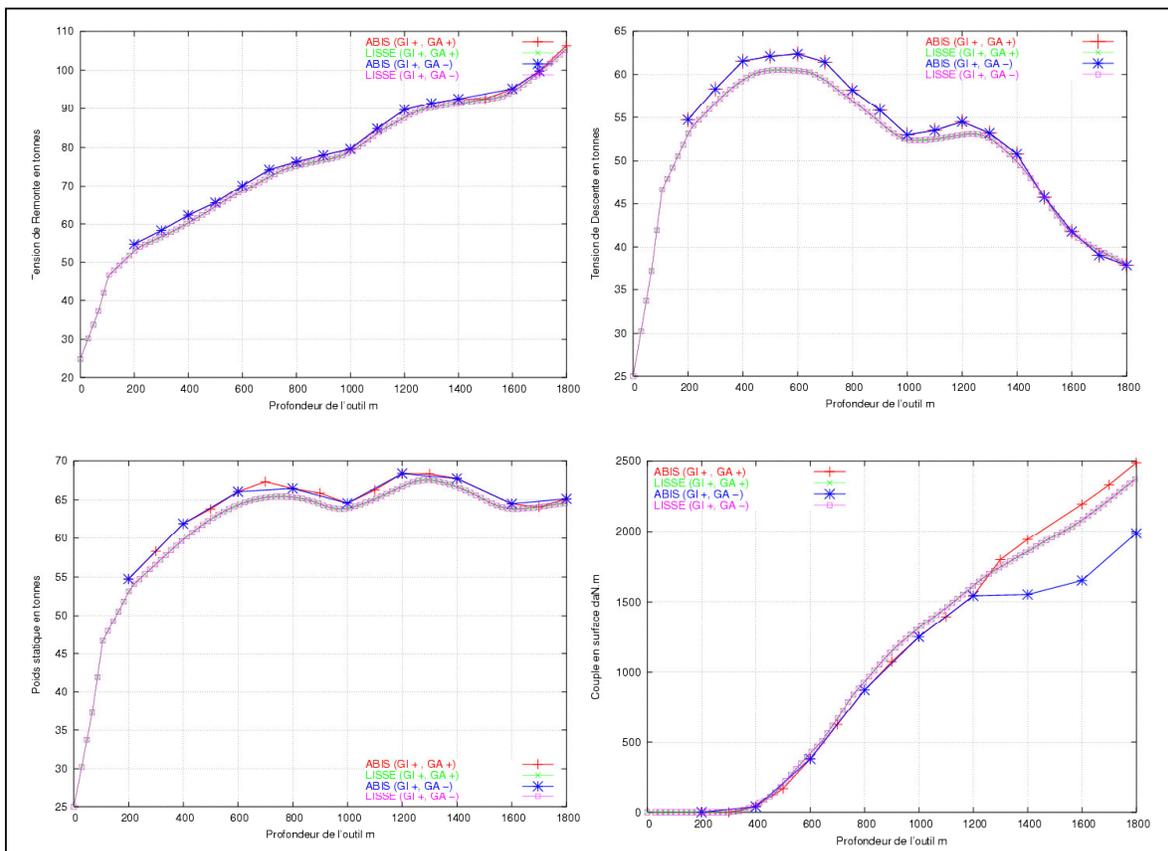


Figure 4.36 : Evolution des grandeurs *Torque & Drag* dans le puits P5 (phase 12'' 1/4)

IV-4.3.3 Puits réels présentant du gauchissement

a) trajectoire

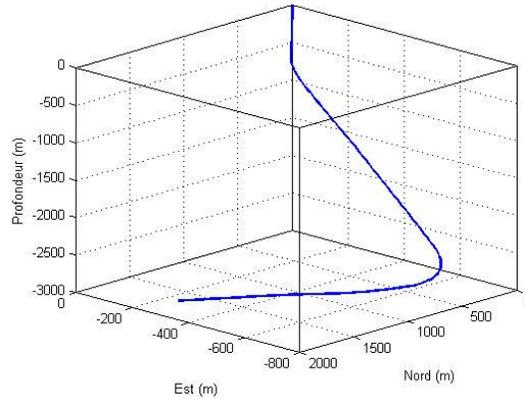


Figure 4.37 : Géométrie du puits P6

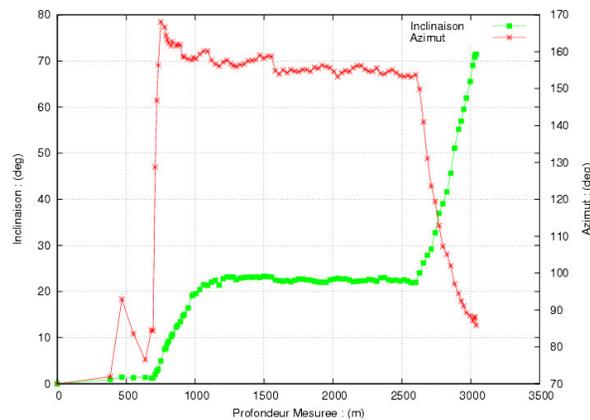


Figure 4.38 : Evolution de l'inclinaison et de l'azimut en fonction de la profondeur

Comme le montre l'allure de la trajectoire (figure 4.37), ce puits est tridimensionnel avec une phase “*turn right*” qui succède à une phase stabilisée et qui est suivie à la fin par une phase horizontale. En plus d'une géométrie relativement complexe, les “*dog legs*” enregistrés sont assez élevés (supérieurs à $6^\circ/30\text{m}$ entre 2500 et 3500 m : figure 4.38) et les torsions géométriques ne sont pas négligeables (un fort gradient d'azimut à des inclinaisons importantes induit du gauchissement).

b) structure du puits et coefficients de frottement

Ce puits comporte une section tubée (0 à 1276 m) avec un coefficient de frottement correspondant de **0.25** et une partie découverte (de 1276 à 3040m) avec un coefficient de frottement correspondant de **0.34**.

c) simulation du “Torque&Drag”

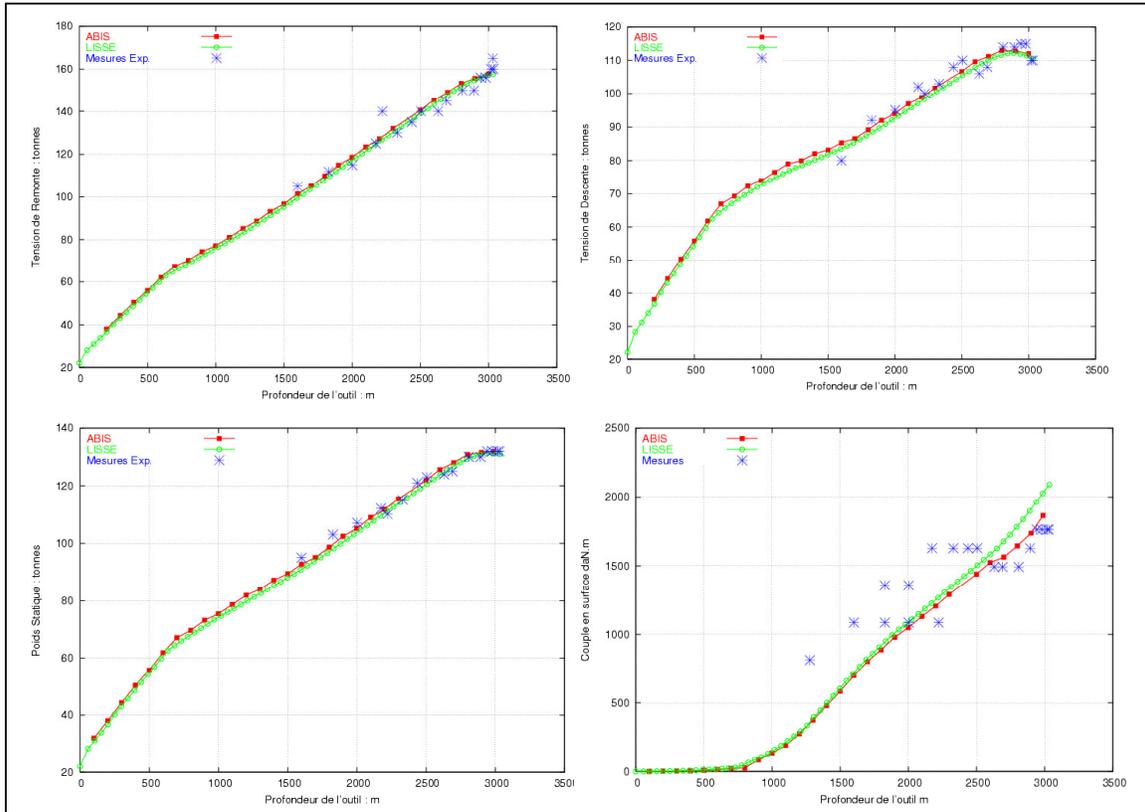


Figure 4.39 : Evolution des grandeurs “Torque & Drag” dans le puits P6 (phase 12’’ ¼)

Pour la phase 12’’ ¼, nous remarquons qu’en terme de tensions (remontée, descente ou poids statique) les deux modèles (LISSE et ABIS) donnent pratiquement les mêmes résultats qui coïncident parfaitement avec les mesures de chantier. En revanche, pour le couple de torsion, le modèle ABIS donne de meilleurs résultats notamment pour le tronçon 2500 à 3000 m (c’est dans cette zone qu’apparaît de forts *dog legs* ; figure 4.38). Cet écart dans l’évaluation du couple en surface à la profondeur de 3000 m entre les deux modèles avoisine les 12 %. Ainsi, cet exemple montre que lorsque les *dog legs* et/ou les gauchissements sont faibles ou moyens, les deux modèles LISSE et ABIS donnent pratiquement les mêmes résultats en terme de prédiction de “Torque&Drag” et lorsque les *dog legs* et/ou les gauchissements sont élevés, des différences entre les deux modèles apparaissent notamment pour les prédictions de pertes en couple de torsion. Ces différences entre les deux modèles, dans le cas de forts *dog legs* et/ou gauchissements, sont dues notamment à la non prise en compte de la rigidité et aussi les contacts (roulement sur la paroi) par le modèle LISSE. Au delà de 2500 m, les valeurs théoriques obtenues avec ABIS valent bien aux mesures *in situ* (figure 4.39).

IV-4.4 Localisation des contacts de la garniture déformée à l'intérieur du trou de forage

IV-4.4.1 Introduction

Les modèles LISSE et rigides sans gestion des contacts supposent que la garniture repose de manière continue par gravité sur la paroi basse du trou de forage. Cette hypothèse simplificatrice permet de résoudre plus facilement le problème des pertes en frottement. Mais cette hypothèse n'est pas toujours justifiée notamment lorsque la forme de la trajectoire ou même celle de la garniture devient complexe.

Le modèle *ABIS* n'a aucune hypothèse limitatrice sur le contact, et les zones de contact structure-paroi figurent parmi les inconnues du problème à résoudre. En plus, parmi les résultats de simulation, le modèle donne les déplacements et les rotations de chaque point de discrétisation de la structure permettant entre autres de connaître la position des points de contacts par rapport aux parois du puits.

En exploitant ces résultats sur les déplacements, nous pouvons visualiser la déformée de la structure à l'intérieur du trou de forage et connaître par conséquent la nature des contacts (ponctuels ou continus) et leur localisation sur les parois du puits.

IV-4.4.2 Contact sur la paroi haute du puits

Nous avons d'abord étudié un puits en forme de J de longueur totale de 600 m dont 150 m de section verticale, 300 m de phase montante (avec un gradient d'inclinaison de 3°/30m) et 150 m de phase stabilisée (à inclinaison constante de 30°). Le puits comporte une section tubée de 0 à 320 m de 17 ½ '' de diamètre et une section découverte de 320 à 600m de 15 ½ '' de diamètre (le puits est représenté en bleu sur la figure 4.25) .

La garniture choisie pour la simulation comporte 5 éléments :

- un élément de 10 m (Type STB) avec un diamètre intérieur (D INT = 2.875'') et un diamètre extérieur (D OUT = 15.25'')
- un élément de 40 m (Type OC) avec un diamètre intérieur (D INT = 2.875'') et un diamètre extérieur (D OUT = 12.25'')
- un élément de 50 m (Type DC) avec un diamètre intérieur (D INT = 2.5'') et un diamètre extérieur (D OUT = 9.25'')
- un élément de 200 m (Type HWDP) avec un diamètre intérieur (D INT = 5.0'') et un diamètre extérieur (D OUT = 6.625'') et un diamètre "Tool Joint" (DTJ = 7.5'')
- un élément de 300 m (Type DP) avec un diamètre intérieur (D INT = 4.78'') et un diamètre extérieur (D OUT = 5.5'') et un diamètre "Tool Joint" (DTJ = 7.5'')

Nous réalisons une simulation pour une garniture uniquement en rotation (pas de mouvement axial) avec un coefficient de frottement égal à 0.3.

D'après la visualisation de la déformée (figure 4.40), nous remarquons que contrairement à l'hypothèse des modèles "*Torque&Drag*" sans gestion de contacts qui supposent que la garniture touche par gravité et de manière continue la paroi basse du trou, les contacts peuvent aussi avoir lieu contre la paroi haute du trou sur une bonne partie de la garniture (entre -150 et -450 m) et ceci même pour des puits à géométrie simple (forme en J).

Notons aussi que des calculs de la déformée avec frottement axial (remontée ou descente de la garniture) donnent la même allure de la déformée à l'intérieur du puits (contact contre les parois haute et basse du puits) mais sans roulement sur les parois (le roulement sur les parois n'apparaît qu'avec le mouvement de rotation).

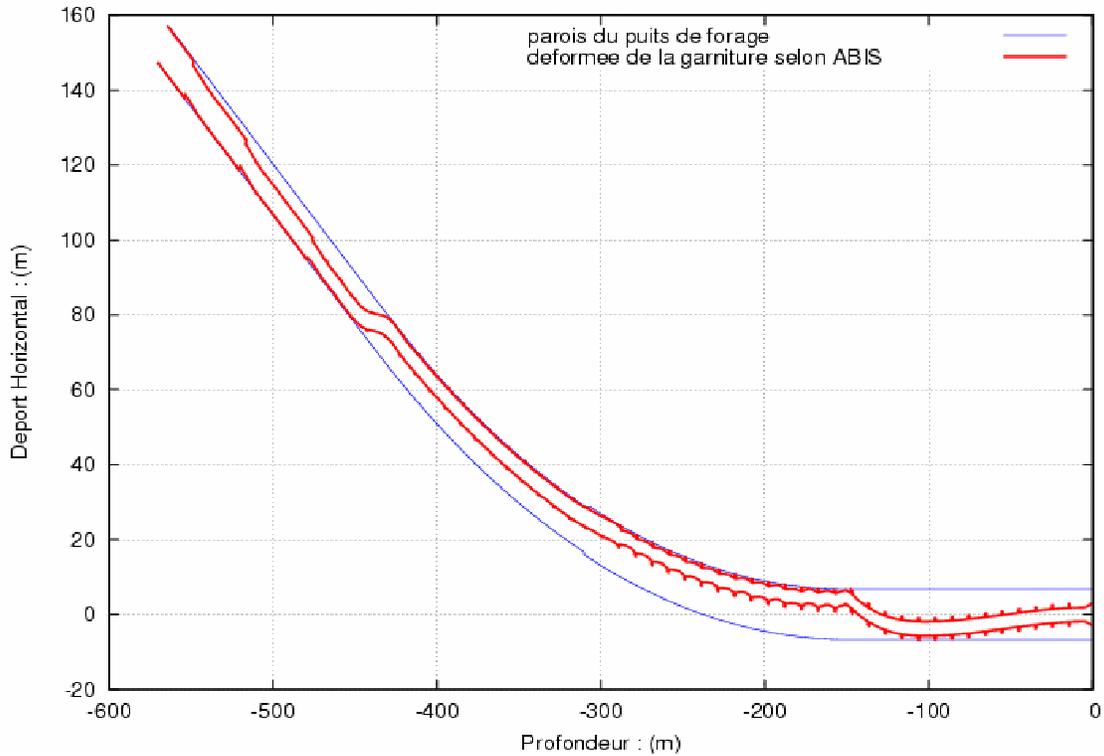


Figure 4.40 : Déformée de la garniture à l'intérieur du puits calculée par ABIS (amplification x 100 sur les déplacements et les diamètres)

En agrandissant la zone des contacts entre les tiges de forages (même les tiges lourdes) et la paroi haute du puits (figure 4.42), nous nous apercevons que les contacts s'effectuent au niveau des "Tool Joints", ce qui est "logique" car ces derniers possèdent un diamètre extérieur plus important et que les tiges sont en tension (pas de flambage local). L'agrandissement sur la figure 4.41 montre aussi la transition tubage-puits découvert vers 310 m de profondeur verticale.

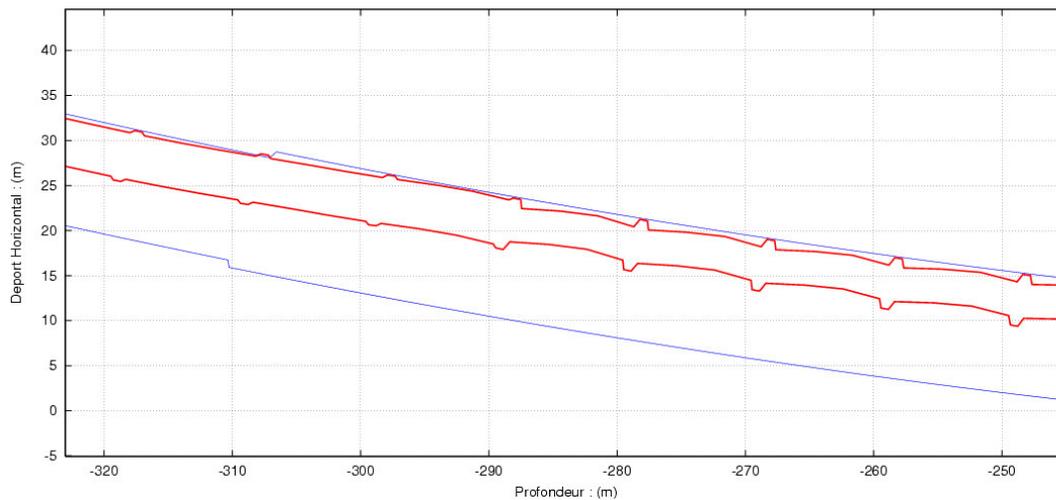


Figure 4.41 : Garniture déformée à l'intérieur du puits calculée par ABIS (amplification x 100 sur les déplacements et les diamètres)

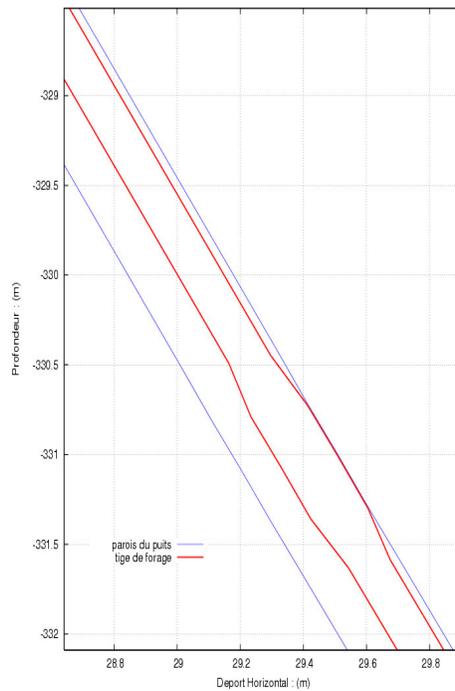


Figure 4.42 : Contact au niveau d'un "Tool Joint" calculé par ABIS (sans amplification sur les déplacements et les diamètres)

IV-4.4.3 Contact en cas de micro-tortuosité : contacts ponctuels

Nous voulons confirmer le schéma théorique des contacts ponctuels (voir figure 2.21, fin chapitre II) ; pour cela, nous avons imaginé un puits de 12 ¼ '' de diamètre) avec forte tortuosité locale dans lequel est introduit une structure LISSE (diamètre extérieur constant égal à 5.5'') et nous avons visualisé les contacts établis par ABIS afin de les comparer au contact continu adopté par les modèles sans gestion des contacts.

Sur la figure 4.43, nous avons tracé les deux déformées (celle supposée d'un modèle sans gestion des contact et celle obtenue par ABIS). Nous remarquons une grande différence entre les deux déformées.

En effet, selon les modèles sans gestion de contacts, la garniture ne se déforme pas à l'intérieur du puits et épouse de manière continue la paroi basse du trou (courbe verte sur la figure 4. 43), alors qu'avec ABIS, la garniture se déforme nettement à l'intérieur du puits et les contacts avec les parois du puits ne s'établissent qu'en quelques points ponctuels contre les parois haute et basse du puits (courbe rouge sur la figure 4. 43). Ce résultat des simulations "numériques" reproduit parfaitement le schéma théorique sur les contacts et justifie bien le fait qu'en cas de micro-tortuosité, le modèle LISSE surestime de manière nette la zone de contact par rapport au modèle ABIS et donc surestime les forces de contact et les forces de frottement qui en résulte. En plus, contrairement au modèle LISSE, ABIS montre la possibilité de présence de contacts ponctuels contre les parois haute ou basse du puits même pour les structures lisses mono-diamètre (masses tiges, tubage, etc,...).

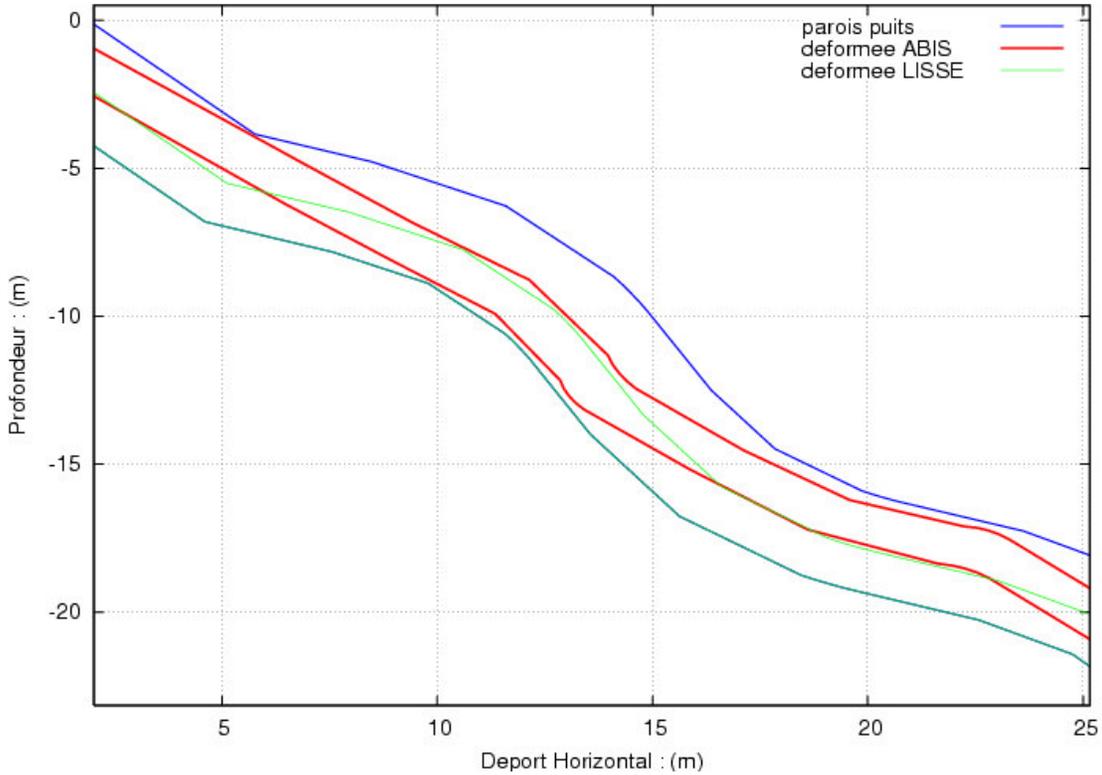


Figure 4.43 : Déformée de la garniture en présence de micro-tortuosité du puits, calculée par ABIS comparée à celle supposée par le modèle LISSE (amplification x10 sur les déplacements et les diamètres)

IV-4.5 Comparaison des performances d'ABIS avec un modèle en éléments finis

Comme expliqué dans le chapitre III, le code *ABIS* ne fait pas appel à la méthode des éléments finis lors de la résolution des équations d'équilibre local et procède par une intégration des équations différentielles de manière directe. Pour prouver l'avantage en terme de temps de calcul de cette nouvelle méthode adaptée dans *ABIS*, nous avons comparé le temps de calcul entre ce modèle avec celui d'un modèle analogue *STEL* développé au CGES et utilisant la méthode des éléments finis comme outil de résolution (l'algorithme de contact est le même pour les deux modèles).

Le tableau 4.7 donne une comparaison en terme de temps de calcul entre *ABIS* et *STEL* pour deux longueurs de garniture (500 et 1600 m).

Longueur garniture	<i>ABIS</i>	<i>STEL</i>
L = 500 m	2 secondes	1minute 20 secondes
L = 1600 m	2 minute 50 s	37 minutes 40 secondes

Tableau 4.7 : Comparaison des temps de calcul par *ABIS* et *STEL*

Ce tableau donne une idée sur l'avantage que présente la méthode de résolution directe adaptée dans *ABIS* par rapport à la méthode variationnelle classique type éléments finis (au moins dix fois plus rapide). Ceci provient du fait qu'avec la méthode élément finis, le calcul se fait par détermination, à chaque itération de l'algorithme de contact, de la matrice de rigidité et son inversion, alors qu'avec la méthode directe les efforts et les déplacements sont calculés directement par intégration simple sur l'abscisse curviligne.

Les résultats des deux modèles en terme d'efforts et de déplacements sont les mêmes et sont donnés sur les figures 4.44 et 4.45.

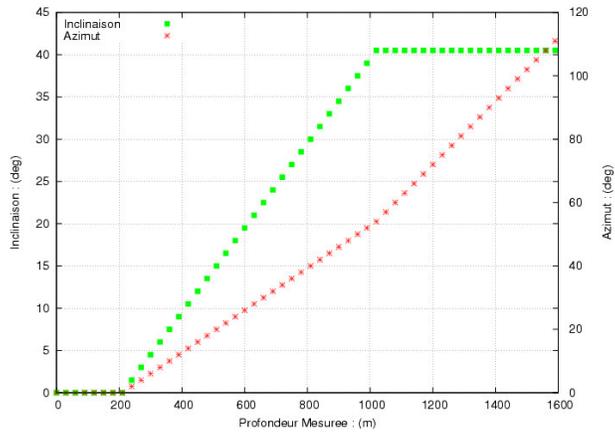


Figure 4.44 : Trajectoire du puits de forage de longueur 1600 m

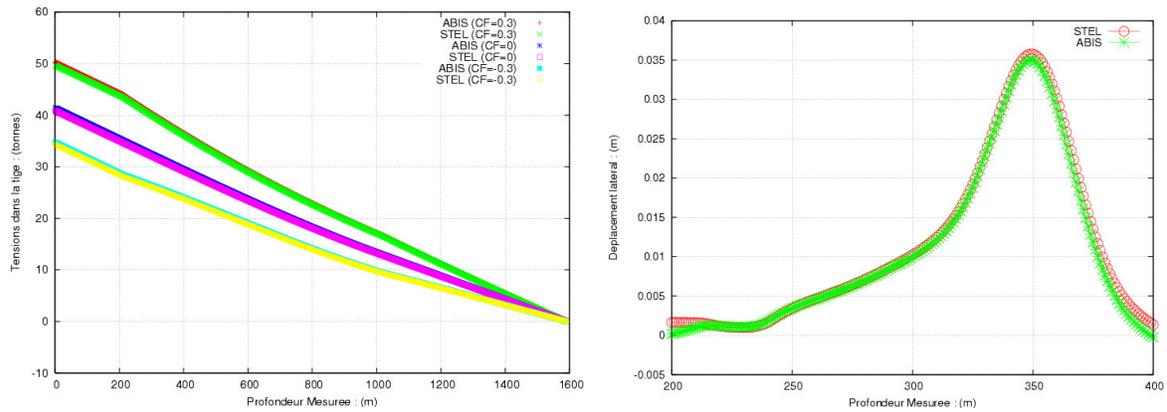


Figure 4.45 : Comparaison des résultats d' *ABIS* et de *STEL* en terme de tensions et déplacement latéral

IV-4.6 Synthèse

Les simulations numériques ont montré que les prédictions du “*Torque&Drag*” fournies par le code *ABIS* coïncident généralement avec ceux du modèle LISSE ainsi qu’avec les mesures *in-situ* lorsque la géométrie du puits est “relativement simple” et ne présente pas des “*doglegs*” ou gauchissements locaux importants. En revanche, des écarts apparaissent entre les deux modèles en cas de fortes courbures, gauchissements et de micro-tortuosités dans la trajectoire du puits de forage. La confrontation avec les mesures *in situ* semble conforter mieux le modèle *ABIS*.

En outre, nos simulations numériques pour les puits réels avec mesures ont été effectuées tout en conservant le caractère intrinsèque du coefficient de frottement (les mêmes coefficients sont utilisés pour les différentes simulations du couple, tensions de remontée et descente, et pour les puits forés dans un même champ).

Par ailleurs, la visualisation des contacts entre la garniture de forage et les parois du puits par *ABIS* montre un contact “plus réaliste” qui s’établit au niveau des “*Tool Joints*” pour les tiges de forage et qui peut avoir lieu contre la paroi haute ou basse du trou même pour les puits à géométrie simple contrairement à l’hypothèse adoptée dans les modèles sans gestion de contacts.

En présence de micro-tortuosité, la zone de contact entre la garniture et les parois du puits fournies par le modèle *ABIS* est nettement moins importante (contacts ponctuels) que celle supposée par le modèle LISSE (contact continu), ce qui explique les différences observées en termes de “*Torque&Drag*” entre les deux modèles.

Enfin, le modèle *ABIS* avec sa méthode d’intégration directe des équations d’équilibre local présente un gain très important en temps de calcul par rapport au même modèle utilisant la méthode des éléments finis comme outil de résolution.

IV-5 CONCLUSION

Ce chapitre a été principalement consacré d'une part à la comparaison entre les modèles les plus couramment utilisés dans le métier (modèle LISSE type Johancsick, 1983) et le nouveau modèle élaboré et intégré dans le code de calcul *ABIS*, et d'autre part à la confrontation avec les mesures réelles du terrain.

Cette comparaison nous a permis d'identifier les principales faiblesses des modèles classiques :

- une surestimation des forces et des zones de contact notamment dans les puits à trajectoires tortueuses conduisant à une surestimation des pertes en frottement pouvant atteindre le 25%
- le contact des tiges n'est pas toujours sur la paroi basse du trou
- l'incapacité du modèle à différencier les virages à droite des virages à gauche (gradient d'azimut + ou -)

Le modèle *ABIS*, se basant sur une modélisation mécanique plus juste, n'adoptant aucune hypothèse limitatrice sur le contact unilatéral entre la garniture et les parois de puits et se dotant d'une reconstitution plus réaliste de la trajectoire (Méthode du Minimum de Torsion) a été élaboré afin de palier au maximum ces faiblesses et d'être un outil de prédiction des pertes en frottement *Torque & Drag* plus fiable et "plus proche" de la réalité du problème.

Ceci dit, la confrontation avec les mesures du terrain pour la plupart des puits à géométrie bidimensionnelle (type J ou S) ou faiblement tridimensionnelle avec des faibles *dog legs* (ne dépassant pas 2 à 3 °/30 m) fournit de faibles différences entre les deux types de modèles.

Par ailleurs, nous avons montré que la phase verticale de tout puits revêt une importance capitale pour le calcul "Torque&Drag". En effet une déviation infime de la verticale (de l'ordre 0.5 à 1°) peut engendrer des pertes en frottement importantes préjudiciables pour la poursuite de forage, surtout pour les puits à long déport.