

CARACTERISATION D'EFFETS DE SILLAGES RENCONTRES EN MILIEU OFFSHORE

CHARACTERISATION OF WAKE EFFECTS IN OFFSHORE FIELD

B. GAURIER^{*}, G. GERMAIN^{*}, M. LE BOULLUEC^{}
E. GIRY^{***}, E. FONTAINE^{****}**

^{*} IFREMER, Centre Manche – Mer du Nord, BP 699, 62 321 Boulogne-sur-Mer

^{**} IFREMER, Centre de Brest, BP 70, 29 280 Plouzané

^{***} SAIPEM SA, Av. San Fernando, 78884 St-Quentin en Yvelines

^{****} IFP, Av. Bois Préau, 92852 Rueil Malmaison

Résumé

Les interactions entre plusieurs cylindres placés en espace proche font l'objet de nombreuses études, du fait des fortes sollicitations répétées qu'elles créent sur ces structures. Lorsque ces dernières sont souples ou mobiles, comme dans le cas des risers, les effets de sillages peuvent produire des mouvements de grandes amplitudes. Ces déplacements peuvent être supérieurs à ceux considérés pendant l'accrochage d'un unique cylindre, pour atteindre plusieurs diamètres d'excentricité. Selon la distance qui les sépare, ils aboutissent parfois à des chocs d'intensité variable, entre les cylindres. De manière à mieux appréhender ces phénomènes, une étude expérimentale, portant sur l'interaction entre deux maquettes de bouée de tensionnement soutenant des risers hybrides, a été menée. Après avoir vérifié que les maquettes utilisées étaient capables de reproduire correctement les mouvements induits par les *VIV* sur un cylindre seul, la réponse de deux cylindres en tandem a été étudiée. L'article présente une étude des phases de rapprochements et de chocs relevés, pour plusieurs écartements initiaux.

Summary

The interactions between several cylinders placed in close proximity are the subject of many studies, because of the strong repeated loads that they create on these structures. For flexible or mobile structures, the wake effects can produce large amplitudes motions. These displacements can be higher than those considered during the lock-in of a single cylinder, to reach several diameters. Depending the initial spacing, they lead sometimes to clashes with potentially high intensity, between the cylinders. To better understand these phenomena, an experimental study was carried out, bearing on the interaction between two models of tensioning buoy supporting hybrid risers. After checking that the models used were able to correctly reproduce the movements induced by the *VIV* on a single cylinder, the response of two cylinders in tandem arrangement was studied. This article presents a study of the phases of clashes which were observed for several initial spacing.

I – INTRODUCTION

Les phénomènes de vibrations induites par vortex (*VIV*) sont bien connus et concernent la plupart des structures cylindriques, soumises à de forts vents et courants. Ils sont la cause d'une augmentation des efforts auxquels sont soumises ces structures et d'un accroissement de fatigue, ce qui limite leur durée de vie.

Lorsque plusieurs structures de ce type sont placées en interaction proche, les effets de sillage (*Wake Induced Oscillations*) rencontrés entraînent, dans certaines configurations, de fortes instabilités. Si ces structures sont souples ou mobiles, des mouvements de plusieurs diamètres d'excentricité peuvent être observés et des chocs entre les structures se produire [1], [2].

L'utilisation de telles structures cylindriques est répandue dans le secteur pétrolier, où l'extraction de pétrole par grands fonds peut être effectuée à l'aide de risers hybrides. Ces risers sont connectés à un FPSO maintenus en position par des bouées de tensionnement (Figure 1). Ces bouées sont positionnées en sub-surface, à une profondeur pour laquelle les mouvements dus à la houle n'ont pas d'influence sur leur comportement. Cependant, les courants rencontrés dans ces zones peuvent parfois être conséquents. C'est pourquoi les ingénieries proposent aujourd'hui des configurations garantissant des interactions hydrodynamiques négligeables en terme de fatigue pour les structures et l'absence de collision.

Cependant, afin de mieux caractériser les effets de sillage, une étude expérimentale a été menée dans la veine de circulation de l'IFREMER à Boulogne-sur-Mer. Une configuration a été définie à partir d'un cas fourni par les ingénieries. Cette configuration a été volontairement pénalisée de manière à observer des phénomènes d'interactions hydrodynamiques forts (voire Figure 1, où les bouées ont été volontairement placées à la même profondeur). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet CLAROM CEPM CO 3007/04 portant sur l'étude des interférences entre risers, en partenariat avec DORIS Engineering, SAIPEM SA, IFP, OCEANIDE, ECM et TOTAL.

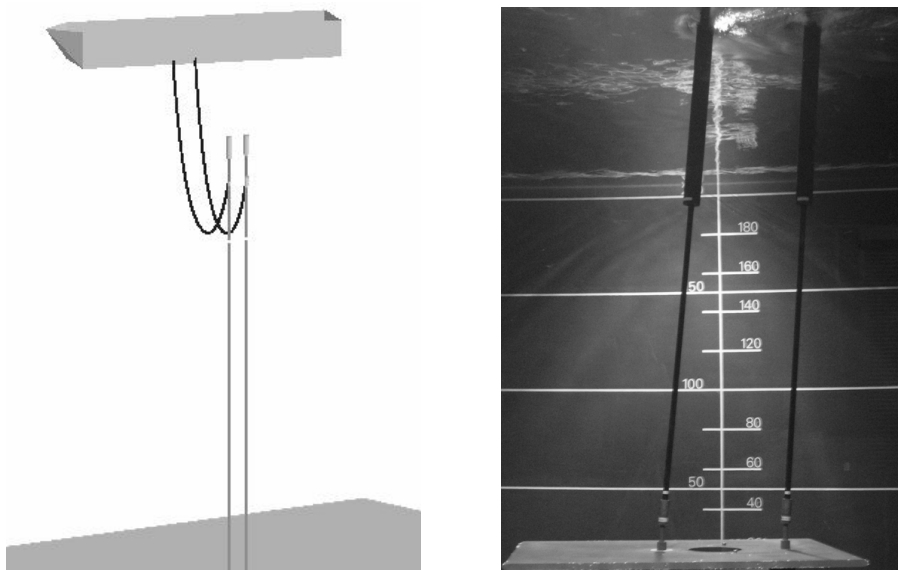


Figure 1 : Schéma représentant la structure étudiée (à gauche) et montage expérimental (à droite)

L'ensemble des moyens expérimentaux utilisés pour ces essais est tout d'abord présenté, avant d'aborder la réponse d'un cylindre seul soumis aux vibrations induites par détachements tourbillonnaires. Cette première phase d'essais a permis de confronter différentes maquettes de risers, chacune représentant une bouée et une portion de riser formant un ensemble rigide, afin d'estimer leur degré de similitude. Une base de données a été établie en vue de quantifier l'amplification des vibrations induites par effet de sillage, pour l'étude de la réponse de deux risers en tandem. Les deux dernières parties traiteront des effets d'interactions entre deux cylindres en espace proche, en quantifiant les effets de masquage et de blocage, ainsi que les risques de chocs entre les structures. Pour cela, plusieurs orientations et espacements entre les cylindres ont été considérés.

II – MOYENS EXPERIMENTAUX

Les caractéristiques des maquettes (Figure 2) sont issues du modèle mathématique proposé dans [3], pour lequel on considère le mouvement pendulaire d'un cylindre rigide monté sur rotule élastique et placé dans un courant, dont la dynamique est régie par l'équation :

$$I\ddot{\theta}_i(t) + B\dot{\theta}_i(t) + K\theta_i(t) = M_i(t)$$

L'indice i désigne la direction du mouvement, I étant le moment d'inertie de l'ensemble du système en rotation, B l'amortissement structural et $K=120 \text{ N.m/rad}$ la raideur angulaire. On fait ici l'hypothèse que les angles restent petits et que L , la hauteur du cylindre, est très grande devant D , son diamètre.

Les paramètres de chaque maquette ont été déterminés de manière à satisfaire au mieux les grandeurs adimensionnelles du système réel, tout en respectant les contraintes liées à l'instrumentation. Ils permettent, par conséquent, de conserver les principales caractéristiques du système réel (bouée + riser) : la vitesse réduite : $Vr = \frac{U}{f_n D}$ avec $f_n = 0,73 \text{ Hz}$ la fréquence propre de la structure et U la vitesse amont du courant et le nombre de Scruton : $K_s = \zeta m^* = 11$.

Pour des considérations expérimentales, la masse réduite n'a pu être conservée : $m^* = \frac{I}{I_a} = 1,30$ au lieu de 0,8 et le taux d'amortissement $\zeta = \frac{B}{2\sqrt{K(I+I_a)}}$, variable pour ce type de structure selon la direction du courant, a été fixé à une valeur moyenne de 50% .

Pour étudier les effets de sillage et quantifier les risques de chocs pour ce type de structure en proximité, cinq positions relatives des cylindres au repos (Figure 3) ont été considérées :

- configuration en ligne avec un écartement initial de $5D$ et $7D$ (Cas 1 et 2),
- configurations décalées d'un angle de $11,5^\circ$: $L = 4,9D$ / $T = 1D$, et $L = 6,9D$ / $T = 1,4D$ (Cas 3 et 4),
- configuration de front : $L = 0$ / $T = 5D$ (Cas 5).

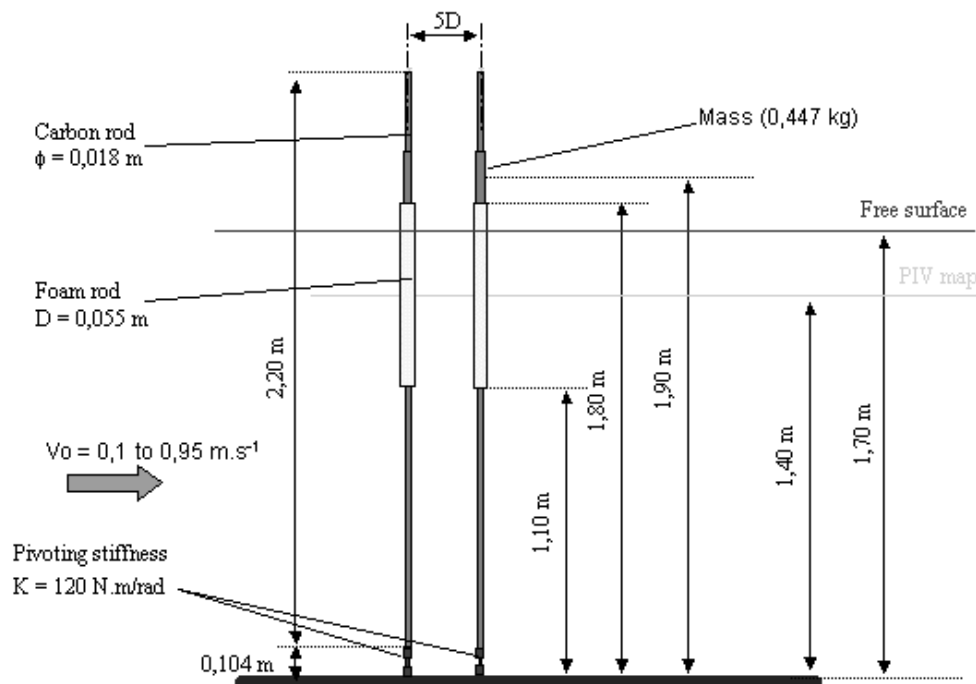


Figure 2 : Schéma du montage expérimental de deux maquettes en tandem

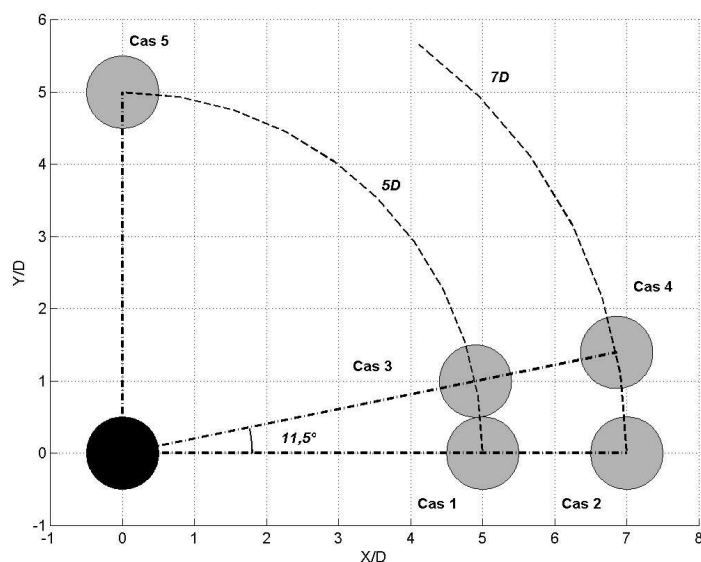


Figure 3 : Configurations d'essais réalisées

Cette étude a été réalisée dans la veine à circulation et surface libre de l'IFREMER, à Boulogne-sur-Mer (Figure 4) qui dispose d'une section utile de $4 \times 2 \text{ m}^2$. L'écoulement généré, dont la gamme de vitesse s'étend de 0,1 à 2 m/s, présente un taux de turbulence inférieur à 4 %. Dans cette gamme, les composantes transverses des vitesses sont inférieures à 1 % de la composante axiale.

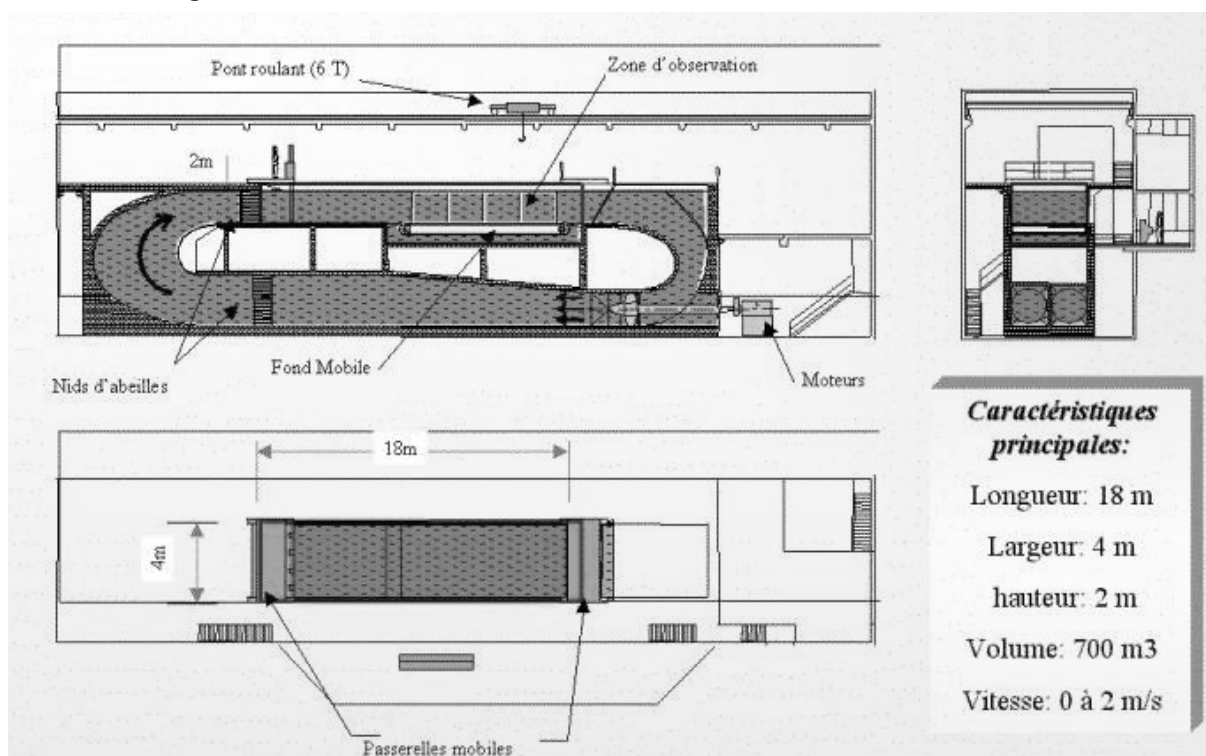


Figure 4 : Caractéristiques de la veine d'essais de l'IFREMER

Les mouvements de translation sont enregistrés à l'aide d'un système de trajectométrie 2D. Ce système permet d'acquérir la position des têtes de risers munies de cibles lumineuses à une fréquence de 25 Hz. Par la suite (parties III et IV), les déplacements sont reportés aux milieux des longueurs immergées des cylindres en mousse.

Un système *PIV* est également utilisé. Il est constitué d'un laser double cavité *Nid-Yag* $2 \times 120 \text{ mJ}$ à 15 Hz, d'une caméra *Hi-sense* $1280 \times 1024 \text{ pixels}^2$ et d'un objectif de 60 mm de focale, muni d'un filtre de 3 nm de longueur d'onde. La sonde laser utilisée permet de créer

des nappes horizontales, à différentes altitudes. Les traitements d'images sont effectués grâce au logiciel *FlowMap 1500* de la société *Dantec Dynamics*, par inter-corrélation d'images sur des zones pouvant être réduites à 32×32 pixels², avec des taux de recouvrement de 25 %.

III – CYLINDRE SEUL SOUMIS AUX EFFETS DU COURANT

Afin de caractériser la réponse du système sur une gamme de vitesses réduites importante ($3 < Vr < 15$), les essais couvrent une gamme de vitesse de veine comprise entre 0,1 et 0,6 m/s, par pas de 0,02 m/s dans la zone d'accrochage et par pas de 0,05 m/s autour, soit 16 points de mesures par cas d'étude. La gamme de Reynolds considérée ici varie entre 5 500 et 33 000.

Sur les courbes de la Figure 5, est présentée la réponse du cylindre (moyenne et écart-type) en fonction de la vitesse réduite Vr . On y distingue deux comportements distincts (taux d'apparition identique pour chaque type de réponse) et ce, quelle que soit la maquette utilisée. Ce phénomène, rencontré lors de différentes études ([4], [5]), est schématisé dans [6] par une *initial branch*, correspondant à l'amplification du mouvement avec la vitesse réduite, et une *lower branch*, correspondant à l'amortissement du mouvement.

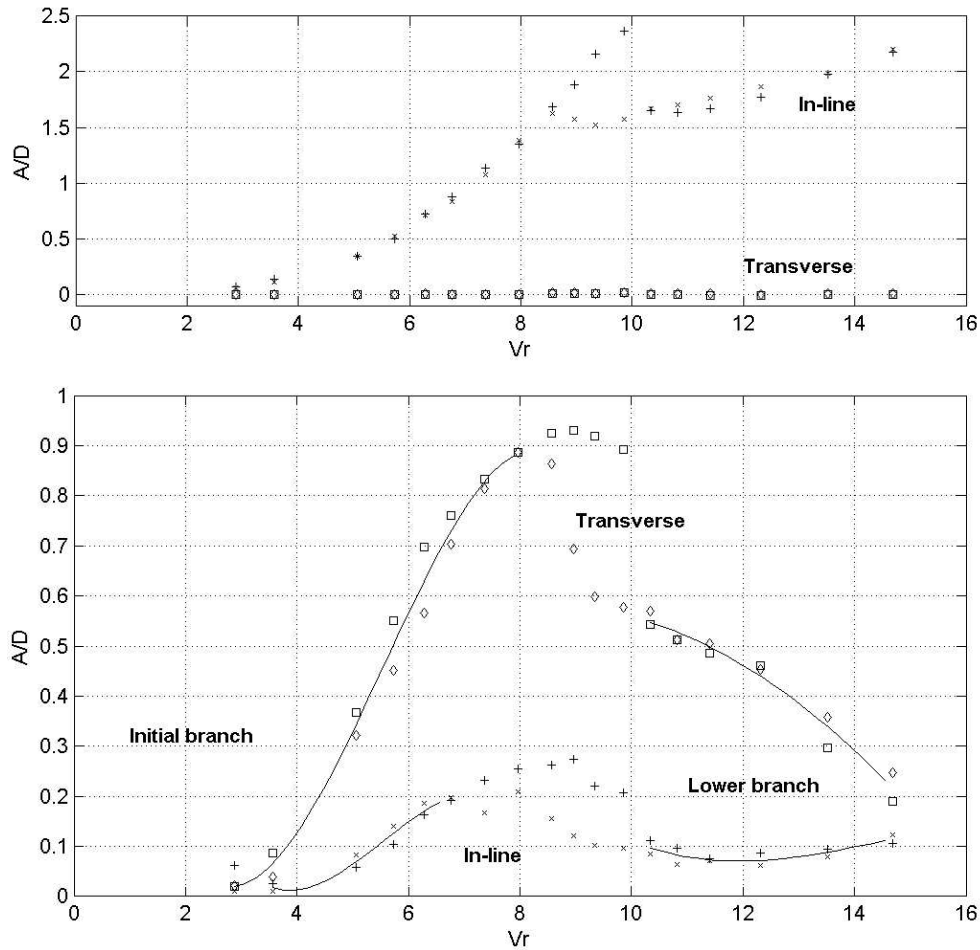


Figure 5 : Réponse en moyenne (haut) et écart-type (bas) en fonction de la vitesse réduite (□ et ◇ : mouvements transverses ; + et x : mouvements en ligne)

Lorsque la vitesse réduite augmente, l'écart-type du mouvement transverse augmente continuellement jusqu'à un maximum $A^* \sim 0,92$ pour Vr proche de 9 ($A^* \sim 0,89$ pour $Vr \sim 8$). Parallèlement, le cylindre recule, en moyenne, assez fortement jusqu'à des valeurs atteignant plus de $2D$. On note ensuite une décroissance rapide de l'amplitude du mouvement lorsque la vitesse réduite continue de croître. La transition entre les deux branches intervient de manière intermittente pour Vr entre 8 et 10. Pour ces vitesses, il est intéressant d'observer que l'amplitude du mouvement fluctue entre la valeur haute et basse du signal, de manière

aléatoire, tout au long de l'acquisition (Figure 6). Parallèlement, on note également une variation de la fréquence de ces mouvements.

Ce phénomène est assez éloigné de ceux généralement étudiés, dans le sens où la transition ne s'effectue pas pour une valeur précise de Vr , mais sur une gamme assez large et qu'il ne s'agit pas, ici, d'un phénomène d'hystérésis.

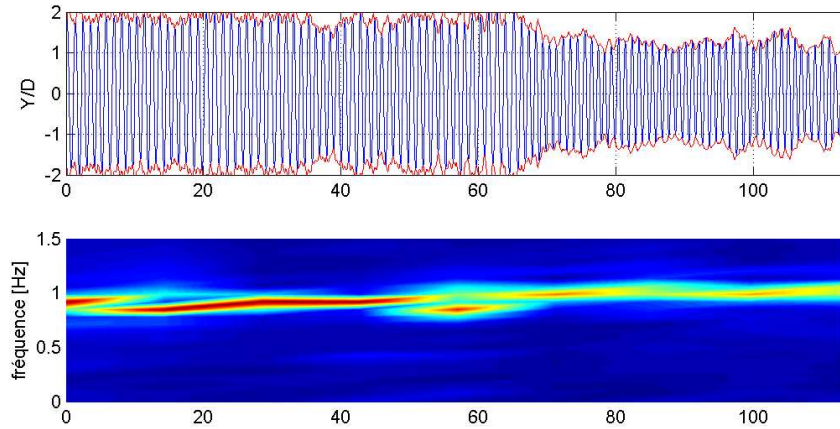


Figure 6 : Variation de l'amplitude réduite des mouvements transverse pour $Vr = 9$. On relève, parallèlement, une fluctuation de la fréquence d'oscillation du cylindre. Courbe supérieure : signal (bleu) et transformée de Hilbert (rouge), courbe inférieure : transformée de Fourier glissante.

De plus, on observe que les trajectoires (rapportées au centre du cylindre) ressemblent à des 8 plus ou moins aplatis, voire à des bananes (Figure 7). Pour l'ensemble de la gamme de vitesse considérée, les fréquences des mouvements en ligne correspondent ainsi au double de la fréquence des mouvements transverse. On peut également ajouter que l'amplitude des spectres atteint ses valeurs maximales entre $Vr = 6$ et $Vr = 10$.

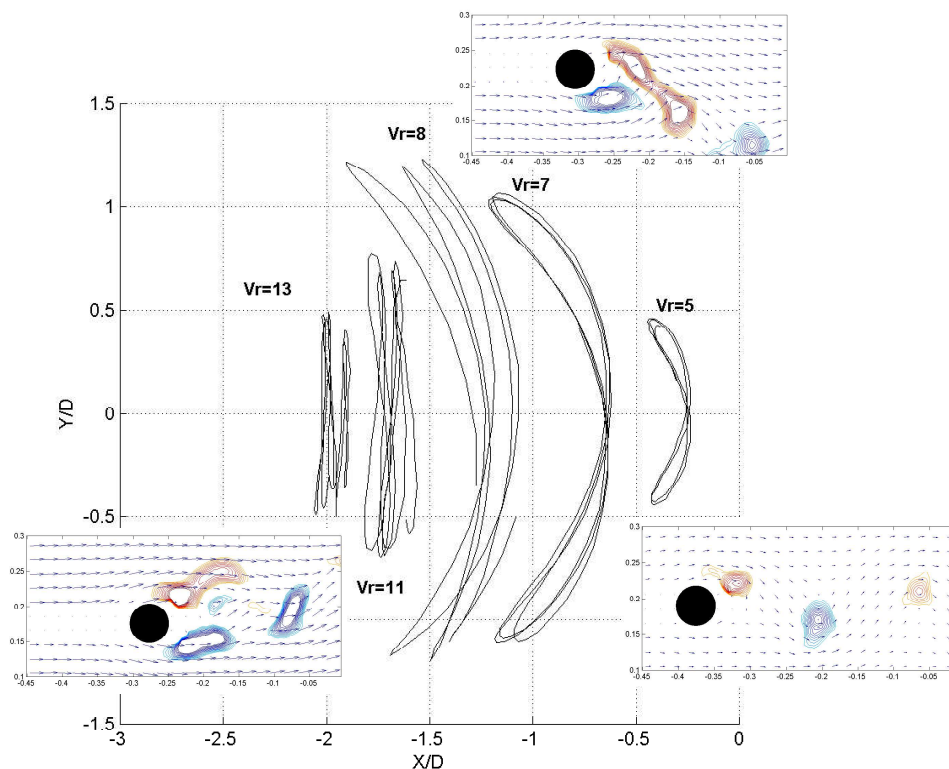


Figure 7 : Exemple de trajectoires dues aux VIV et sillages obtenus par PIV

Des mesures *PIV* ont été effectuées pour plusieurs vitesses réduites (Figure 7). Avant l'accrochage (pour $Vr < 7$), le sillage est bien structuré avec un détachement tourbillonnaire à chaque extrémité du mouvement (type 2S). Pendant l'accrochage ($7 < Vr < 10$), les structures se désorganisent progressivement (2, 3 ou 4 tourbillons peuvent être émis par cycle), pour finalement aboutir à un détachement double (type 2P) pour $Vr > 10$.

IV – EFFETS DE SILLAGE

Afin d'étudier les effets d'interaction entre deux cylindres en espace proche et soumis à l'action d'un courant pour une large gamme de vitesses réduites ($3 < Vr < 24$), nous réalisons les essais pour cinq configurations initiales des deux cylindres, présentées précédemment. On étudie ainsi l'influence du positionnement relatif (L distance en ligne et T distance transverse) entre des cylindres sur une gamme de vitesses de veine allant de 0,1 à 0,95 m/s, par pas de 0,02 m/s dans la zone d'accrochage et par pas de 0,05 m/s autour ; soit 25 points de mesures par cas d'étude. La gamme de Reynolds balayée ici varie de 5 500 à 52 000.

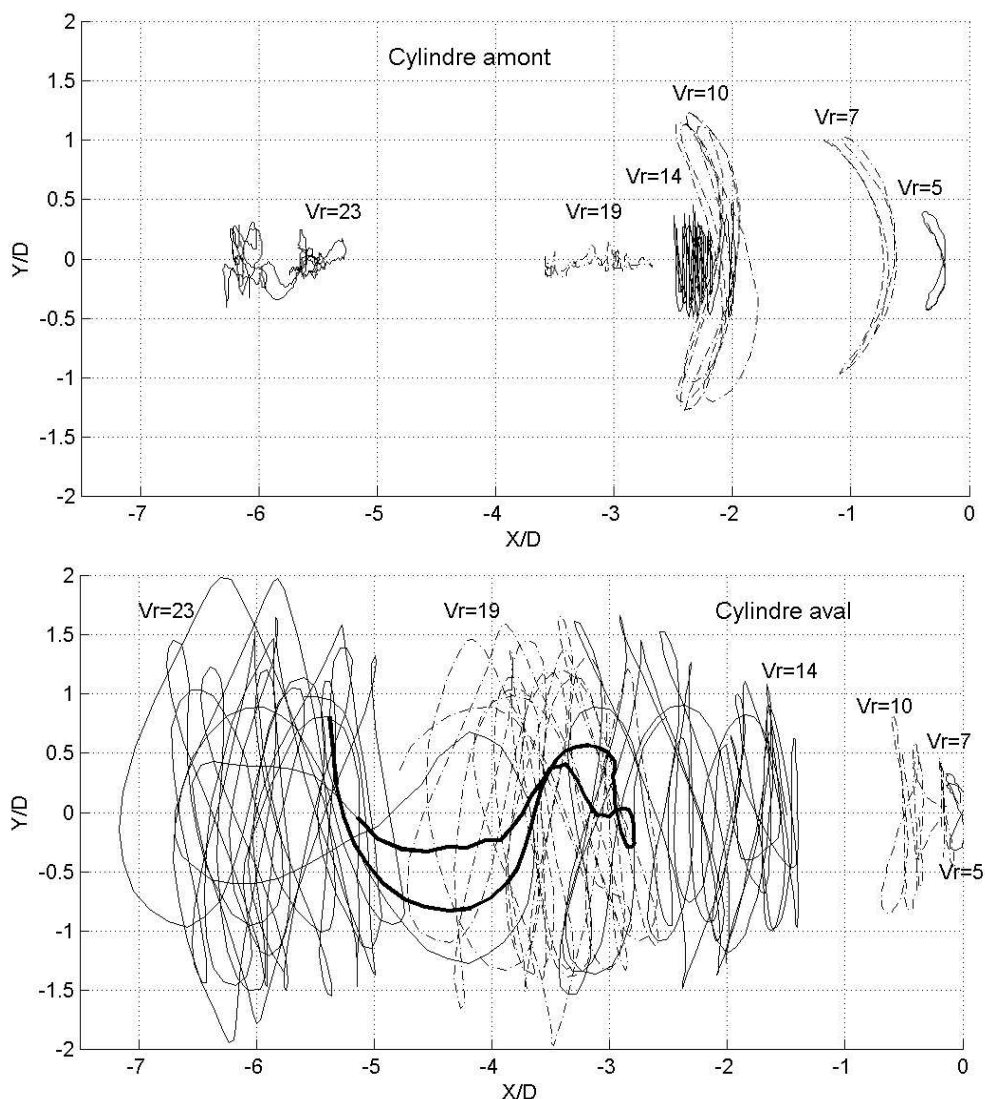


Figure 8 : Trajectoires des risers amont et aval à différentes vitesses réduites, dans le cas en tandem à $L = 5D$. (l'écoulement vient de la droite, la position initiale des risers étant centrée sur 0)

Sur la Figure 8, sont reportées les trajectoires des mouvements de chaque riser pour différentes vitesses réduites, dans le cas en tandem à $L = 5D$ (cas 1). Sur la figure du haut, on remarque que le comportement du riser amont est peu perturbé par la présence d'une structure

dans son sillage immédiat. Sur la Figure 9 (haut et centre), où on a représenté les moyennes et écart-types des mouvements des cylindres, on constate que les amplitudes des mouvements transverses et en ligne de ce cylindre amont, sont très proches de celles observées sur la Figure 7 dans le cas d'un cylindre isolé, pour les mêmes vitesses réduites. Les effets de blocage ou de modification des vibrations induites par détachements tourbillonnaires dus à la présence du deuxième cylindre ne sont apparemment pas, dans ces configurations et pour $Vr < 15$, en mesure d'influencer la réponse du cylindre amont.

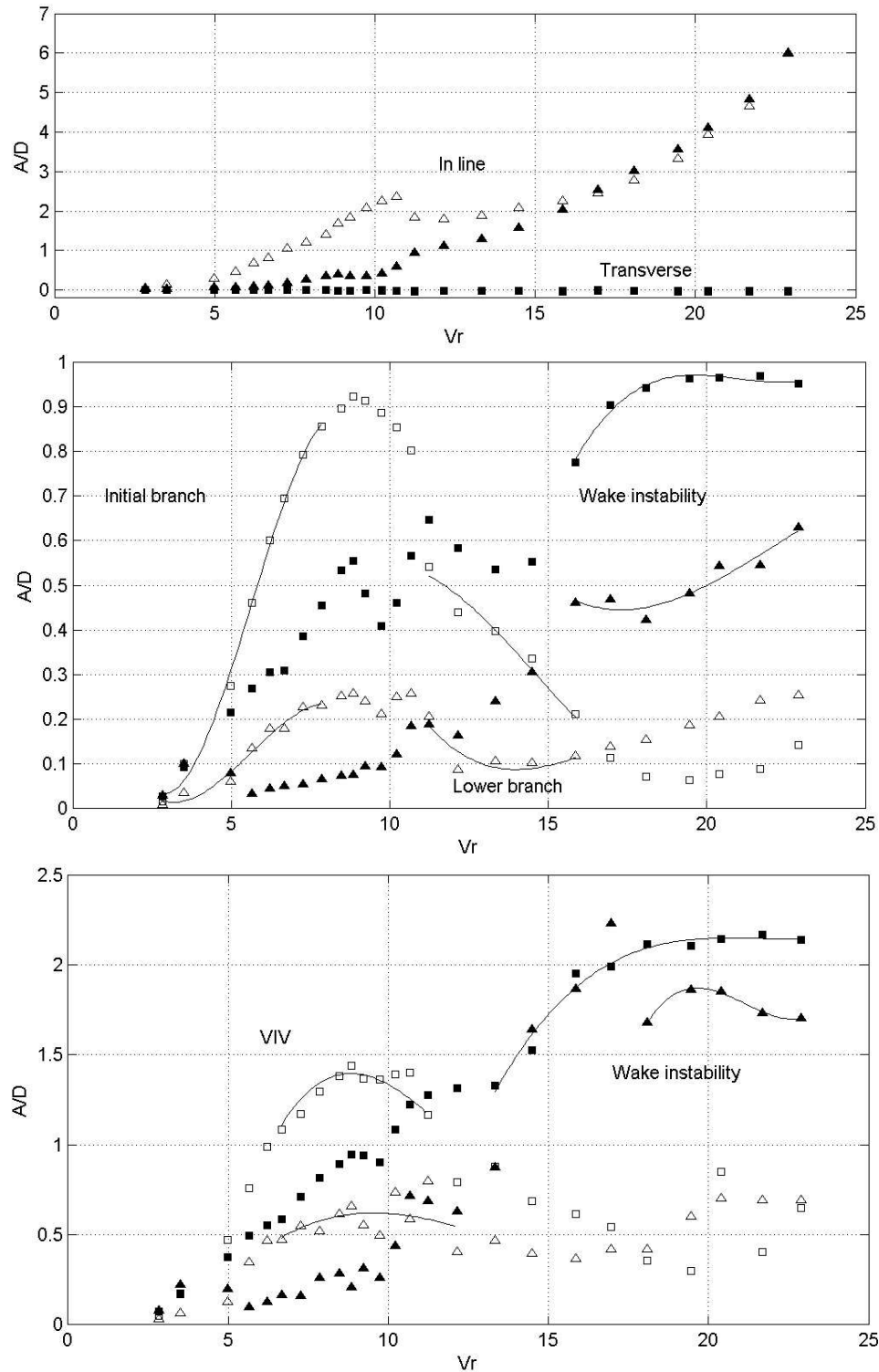


Figure 9 : Réponse des mouvements pour chacun des cylindres en fonction de la vitesse réduite, dans le cas en tandem à $L = 5D$. Courbe supérieure : moyenne, courbe centrale : écart-type, courbe inférieure : maximum retranché de la moyenne (\square et Δ : mouvements transverses et en ligne du riser amont, \blacksquare et \blacktriangle : mouvements transverses et en ligne du riser aval)

Sur la Figure 9 (bas), est représentée la valeur maximale de chaque signal à laquelle on a retranché le déplacement moyen, de manière à s'affranchir de l'augmentation continue du recul des cylindres. Sur ces courbes, on observe bien l'amplification des mouvements du cylindre amont liée aux *VIV*, avec des valeurs maximales de mouvements transverses allant jusqu'à $1,4D$ pour $Vr = 9$.

Pour le cylindre aval, on note que l'effet de masquage, dû à la présence du cylindre amont, influence grandement son comportement. La diminution de la vitesse moyenne dans le sillage du cylindre amont (étudiée par [9], [10] et [11]) modifie les efforts hydrodynamiques s'exerçant sur le cylindre aval. Il existe une nette diminution des amplitudes d'oscillations ainsi que du recul moyen, dans le domaine d'accrochage du cylindre amont ($Vr < 10$). Au contraire, pour des vitesses réduites supérieures à 10, la réponse en amplitude des mouvements du cylindre aval est chaotique et atteint rapidement, pour des $Vr > 15$, des valeurs plus importantes (de l'ordre de la dizaine de diamètre), ne pouvant être attribuées à des *VIV* (Figure 9).

Pour ce cylindre aval, on remarque tout de même quelques effets des *VIV*. On observe ainsi la présence de deux maximums (décrit dans [7] et également observés dans [8]) :

- un premier maximum à $0,59D$ pour $Vr = 8,5$ (Figure 9, centre), visible uniquement sur le signal transverse, et correspondant à l'accrochage du premier riser,
- un second maximum d'amplitude un peu plus importante pour $Vr = 11$, que l'on retrouve sur les écart-types des mouvements transverses mais aussi en ligne. Il s'agit certainement de l'accrochage propre du second riser qui apparaît à des vitesses plus élevées, en raison de la diminution de la vitesse moyenne dans le sillage du premier [12].

Pour les plus grandes vitesses réduites ($Vr > 11$), les mouvements du cylindre aval sont alors très irréguliers et fonction de la synchronisation ou non avec les mouvements du riser amont. Les amplitudes maximales de mouvement peuvent dépasser $2D$ pour les mouvements transverses et $1,5D$ pour les mouvements en ligne, aux plus grandes vitesses. A ces vitesses, les déplacements sont amplifiés par des effets de sillage, comme on le constate sur les courbes de la Figure 9.

Les effets de sillage rencontrés lors de cette étude sont tels qu'ils peuvent être la source de mouvements critiques comme ceux observés à $Vr = 23$ en trait épais, sur la Figure 8. Ces effets peuvent conduire à des situations dans lesquelles les deux risers se trouvent en proximité réduite pouvant entraîner des chocs. Comme observé dans [7], les chocs sont assez brefs, mais apparaissent ici à des vitesses réduites relativement peu élevées (dès $Vr > 19$), contrairement aux valeurs annoncées dans [9].

Dans le cas en tandem à $7D$ (cas 2), les résultats sont sensiblement les mêmes. On relève cependant, pour les plus grandes vitesses, des mouvements particuliers du cylindre amont, notamment pour les valeurs maximales des mouvements en ligne (retranchées de leurs moyennes), qui peuvent atteindre ponctuellement $2D$.

Les résultats des configurations décalés de $11,5^\circ$ (cas 3 et 4 de la Figure 3) ne sont pas très éloignés des essais en tandem. La principale différence réside dans le fait que le cylindre aval a tendance à s'orienter progressivement dans l'axe du cylindre amont, dès les plus faibles vitesses. On relève ainsi une dissymétrie dans son comportement et les trajectoires qu'il décrit ne ressemblent plus à celles observées précédemment (Figure 10 et Figure 11). Cette modification d'orientation du cylindre conduit à des rapprochements répétés, des chocs entre les cylindres ayant été relevés pour $Vr > 19$.

Entre ces deux cas, tout comme entre les deux cas en tandem (à $5D$ et $7D$), on remarque une différence, pour les vitesses les plus élevées. Comme le constate déjà [13], plus les deux cylindres sont éloignés, moins l'amplitude des mouvements du cylindre aval est importante. En effet, à $5D$ (Figure 10) pour $Vr \approx 20$ la région balayée transversalement par le riser aval est de l'ordre de $4D$, alors qu'à $L = 7D$ (Figure 11) pour la même valeur de Vr , la région balayée transversalement par le riser aval n'est que de l'ordre de $2,5D$.

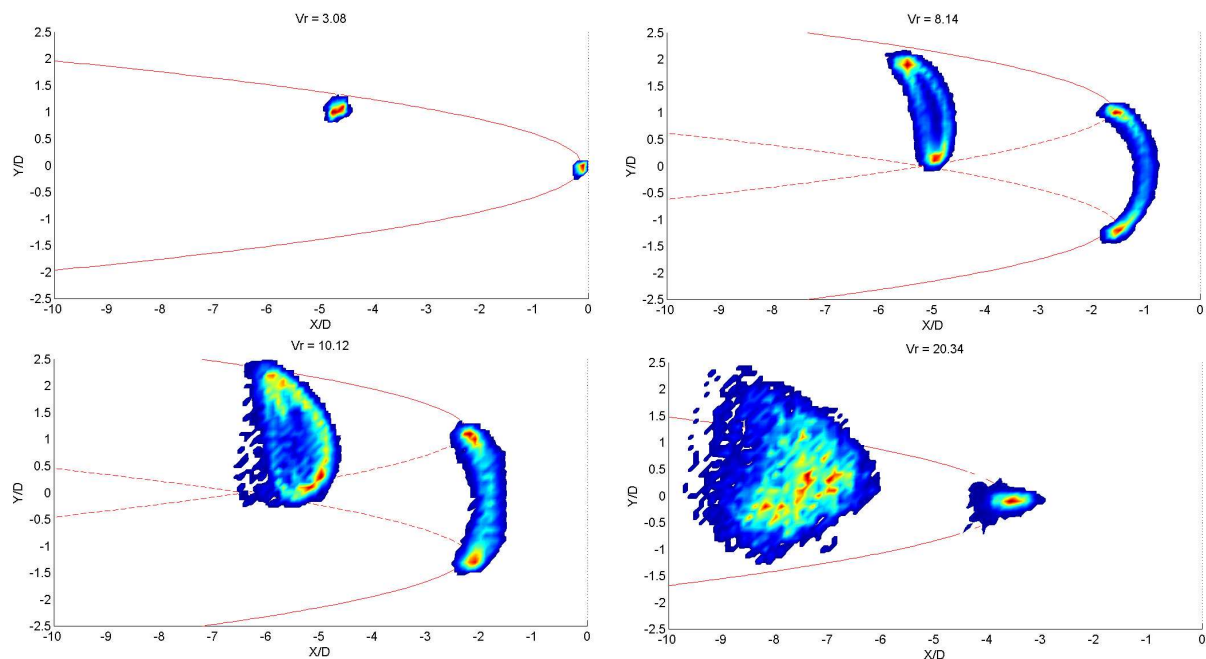


Figure 10 : Trajectoires des deux cylindres dans le cas $L=4.9D$ et $T=1D$ pour différentes vitesses réduites. Les couleurs désignent le taux de passage des cylindres pour chaque point. Les traits rouges désignent le sillage (au sens de Schlichting) derrière le(s) point(s) le(s) plus fréquent(s) du cylindre amont.

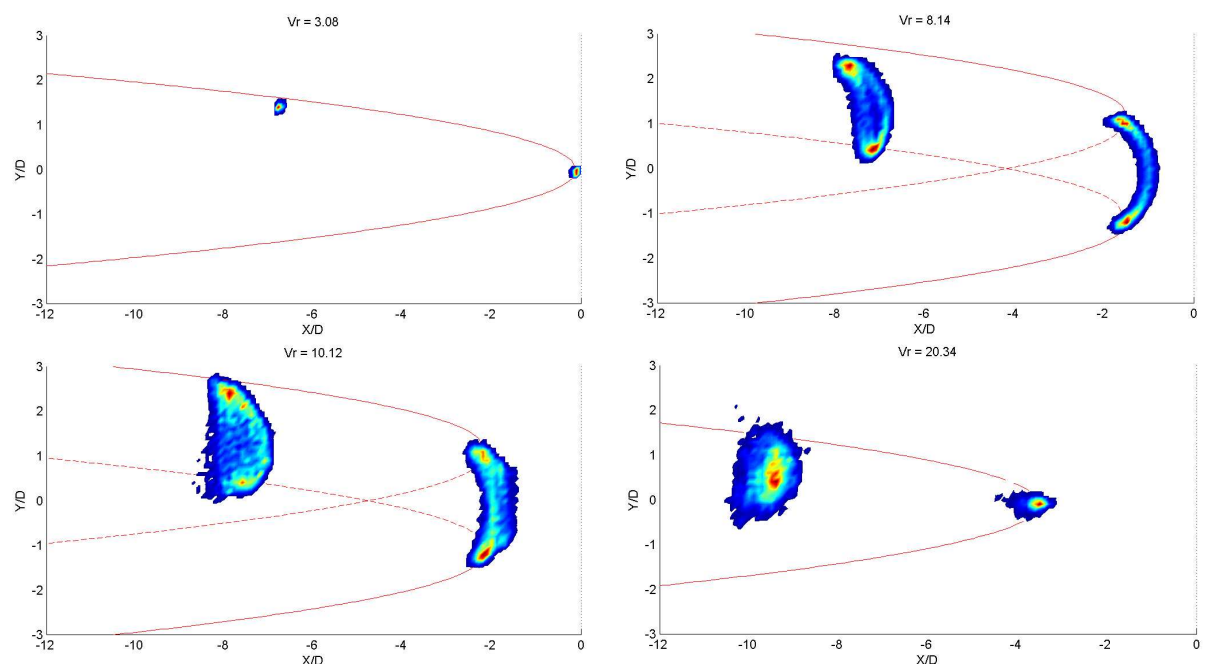


Figure 11 : Trajectoires des deux cylindres dans le cas $L=6.9D$ et $T=1.4D$ pour différentes vitesses réduites. Les couleurs désignent le taux de passage des cylindres pour chaque point. Les traits rouges désignent le sillage (au sens de Schlichting) derrière le(s) point(s) le(s) plus fréquent(s) du cylindre amont.

En ce qui concerne le dernier cas testé (cas 5 de la Figure 3) $L=0$ et $T=5D$, les deux cylindres se sont comportés en première approche comme des cylindres isolés, pour l'ensemble des vitesses. Toutefois, une très légère dissymétrie est également observée, sur les mouvements transverses, pour les plus grandes amplitudes d'oscillation des deux cylindres (pendant l'amplification des VIV et pour les plus grandes Vr) : la moyenne de ces signaux n'étant pas nulle (une positive et une négative), les deux cylindres ont tendance à se repousser et s'écartent l'un de l'autre d'une valeur restant inférieure à $0,5D$. Contrairement aux quatre autres cas, aucun contact n'a été observé durant ces essais.

V – ETUDE DES CHOCS

Les quatre premiers types d'essais ont donc tous montré des rapprochements significatifs entre les deux cylindres, pouvant même aller, parfois, jusqu'au choc en tête des structures (partie haute des cylindres en mousse). Ces chocs ont été observés à des vitesses réduites toujours supérieures à 19, et cela quelle que soit la configuration étudiée. Deux types de rapprochements ressortent de l'analyse des positions de chacun des risers en fonction du temps (Figure 12, où les déplacements en tête ont été considérés) :

- un premier type pour lequel le cylindre aval semble aspiré par le cylindre amont et vient jusqu'au contact,
- un second type pour lequel le recul du cylindre amont est la source du choc avec le second cylindre.

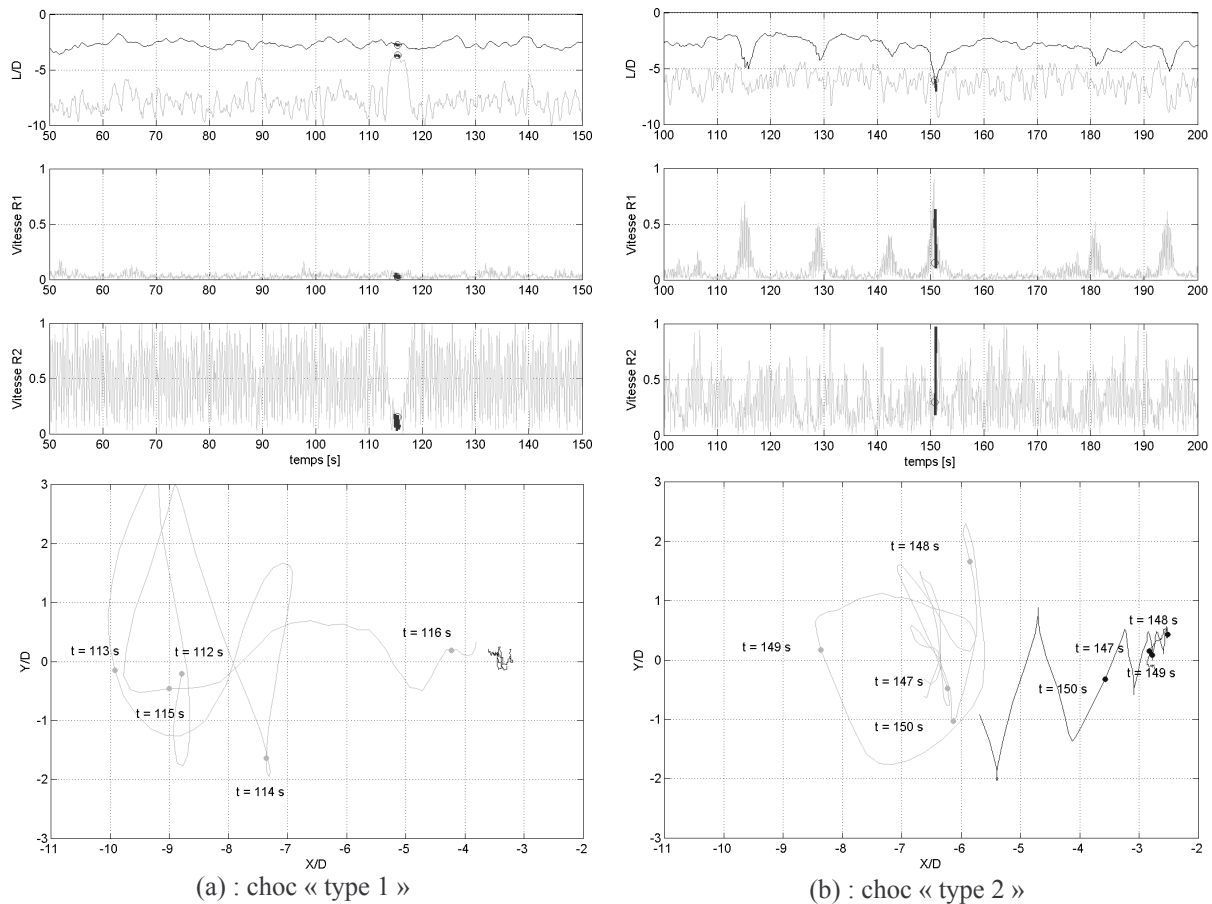


Figure 12 : Deux différents types de chocs observés pour $V_r = 23$. Gauche : $L=5D$ et $T=0$, droite : $L=6,9D$ et $T=1,4D$. Courbes supérieures : distance des cylindres au point initial rapportée au diamètre. Courbe foncée : cylindre amont, courbe claire : cylindre aval. Deux courbes suivantes : vitesse instantanée des cylindres en m/s : R1 cylindre amont, R2 : cylindre aval. Courbes du bas : trajectoires des cylindres juste avant le choc (foncée cylindre amont, claire cylindre aval).

En observant l'évolution des vitesses des risers au cours du temps, on remarque que les chocs de type 1 s'accompagnent d'une diminution marquée et brève de la vitesse du cylindre aval. Il semble que celui-ci soit aspiré dans le sillage du premier cylindre, de manière relativement lente. Le comportement du cylindre amont ne semble pas perturbé par ce brusque changement de comportement du cylindre aval.

L'analyse des chocs du type 2 montre que, contrairement au cas précédent, c'est le cylindre amont qui recule pour venir percuter le cylindre aval. Chaque tentative de rapprochement et phase de choc s'accompagne d'une augmentation très nette de la vitesse du premier cylindre. Il faut noter que ces phases de rapprochement sont beaucoup plus fréquentes que dans le cas précédent mais qu'elles ne donnent pas toujours lieu à un choc.

L'ensemble des chocs observés pendant ces essais ont été répertoriés sur la Figure 13 en fonction des vitesses d'impact de chacun des deux cylindres, adimensionnalisées par la fréquence propre et le diamètre des cylindres (les indices 1 et 2 désignent les cylindres amont et aval respectivement) :

$$Vi_{1,2} = \frac{V_{impact\ 1,2}}{f_n D}$$

Notons que les vitesses d'impact $V_{impact\ 1}$ et $V_{impact\ 2}$ sont déterminées en moyennant la vitesse de chacun des cylindres immédiatement avant le choc, sur un temps arbitraire d'un dixième de seconde.

On observe bien deux régions distinctes correspondantes aux deux catégories de chocs. Les chocs de type 1 se produisent toujours à faible vitesse d'impact réduite ($Vi_1 \leq 2$) du cylindre amont. Cependant, on remarque que, même si la grande majorité des points vont de paire avec une faible vitesse d'impact du cylindre aval ($Vi_2 \leq 5$), certains points singuliers du cas $L=4.9D$ et $T=1D$ correspondent à des Vi_2 supérieures à 6. Au contraire, les chocs de type 2 se produisent à des vitesses d'impact réduites du cylindre amont (Vi_1) toujours supérieures à 5 et sur une large gamme de Vi_2 (entre 3 et 9).

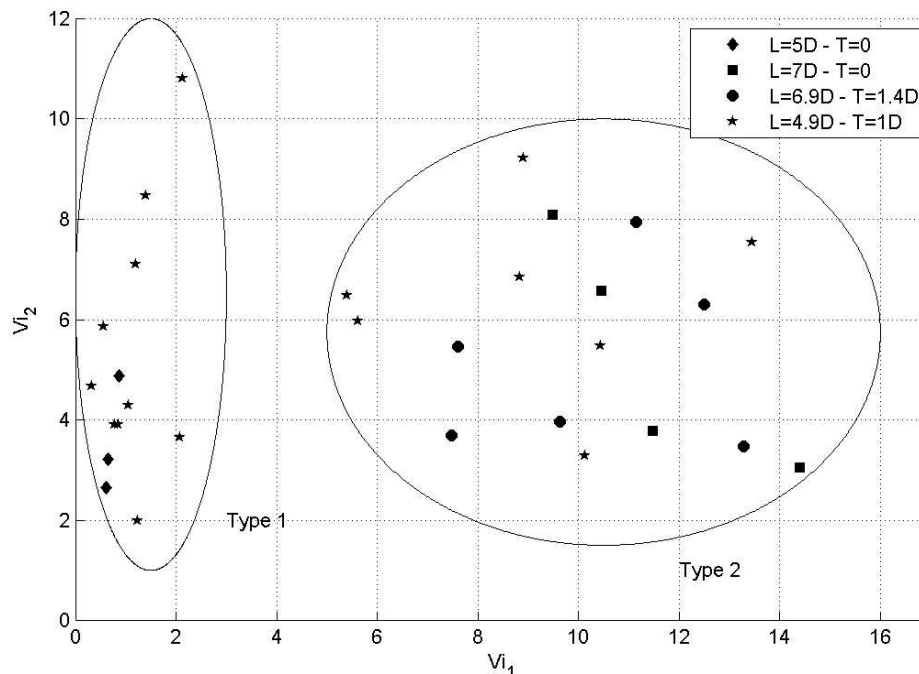


Figure 13 : Ensemble des chocs observés durant les essais, classés par configuration et en fonction des vitesses d'impact adimensionnalisées des cylindres amont (R1) et aval (R2).

On remarque également sur cette figure que les chocs de type 1 n'ont été comptabilisés que pour les configurations dont l'écartement initial entre riser est égal à $5D$ (que les risers soient positionnés en ligne ou en configuration décalée) alors que ceux du type 2 ont été rencontrés pour les cas d'étude 2, 3 et 4 (à 5 et $7D$). De plus, il n'y a que pour la configuration décalée de $11,5^\circ$ avec un écartement initial de $5D$ que les deux types de choc sont présents.

En résumé :

- les chocs de type 1 se produisent plus particulièrement dans des configurations initiales proches. Dans ce cas et sous certaines conditions qui restent à préciser (espacement et position instantané, mouvements des deux risers), le cylindre aval peut être aspiré dans le sillage du premier, jusqu'à venir au contact de celui-ci de manière peu brutale
- les chocs de type 2 se produisent dans des configurations plus générales. Comme précédemment, sous certaines conditions qui restent à préciser (synchronisation

des tourbillons sur la hauteur du cylindre, position instantanée des risers), le cylindre amont peut s'animer soudainement. L'amplification de ses mouvements transverse et en ligne le fait reculer rapidement jusqu'à venir au contact du cylindre aval, de manière assez brutale.

Sur la Figure 14, on a reporté les fréquences d'occurrence des chocs en fonction de la vitesse réduite, pour toutes les configurations, en séparant les deux types de choc. On constate que cette fréquence d'occurrence est croissante avec la vitesse, mais, qu'à une vitesse donnée, elle diffère suivant les configurations.

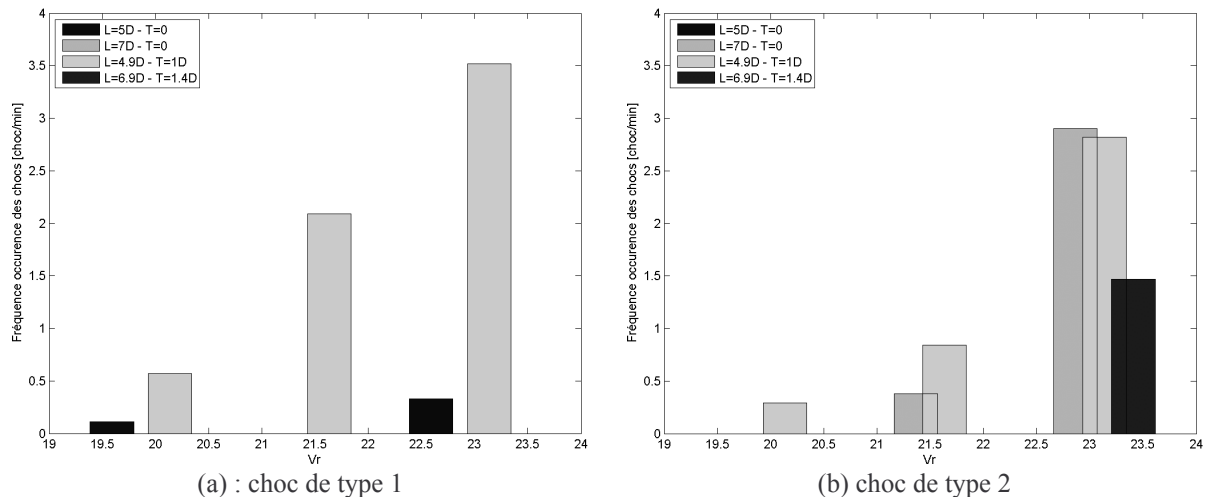


Figure 14 : Fréquence d'occurrence des chocs (en choc/min) pour les différentes configurations testées en fonction de la vitesse réduite.

Précisons tout de même que ces résultats sont à prendre avec un certain recul car les temps d'acquisition des mouvements des risers étaient de l'ordre de 5 minutes et ne permettent donc pas de définir avec précision une fréquence d'occurrence des chocs. Certaines acquisitions ont même été écourtées en raison des limitations matérielles, notamment liées au système de trajectométrie (perte des cibles) ou à la casse de la raideur en pied de la maquette. Ces faibles durées d'acquisition ont tout de même le mérite de donner quelques indications sur les phénomènes rencontrés. Pour quantifier plus précisément les phases de chocs, il est nécessaire de mener une étude particulière sur des structures souples.

VI – CONCLUSION

Les résultats de l'étude des phénomènes d'interaction entre deux cylindres rigides, montés sur rotule élastique, et soumis à un courant ont été présentés. Pour le cas test d'un cylindre seul, une large gamme de vitesses réduites a été couverte, typiquement entre 6 et 13, pour lesquelles l'amplitude des mouvements du cylindre était fortement augmentée. Parallèlement, on a pu constater une modification de la formation tourbillonnaire dans le sillage, d'un mode 2S à 2P, liée au changement de comportement très marqué du cylindre avant, pendant et après l'accrochage.

L'étude des deux cylindres placés en espace proche a montré que la réponse du cylindre aval était très différente de celle d'un cylindre seul. En effet, mis à part pour l'incidence de 90°, celui-ci se trouve dans le sillage du premier et est donc fortement influencé par les effets de sillage qui en sont issus (diminution de vitesse locale). Malgré une augmentation assez sensible de l'amplitude de ses mouvements, on ne retrouve pas de maximum bien marqué pour les vitesses correspondant à l'accrochage. Par contre, les fluctuations des mouvements transverses restent importantes pour les vitesses supérieures à l'accrochage (supérieures à 0,5D) et continuent d'augmenter avec la vitesse, pour atteindre des valeurs supérieures à celles des V_{IV} pour des vitesses réduites supérieures à 17. Le riser amont semble, lui, assez peu perturbé par la présence du second dans son sillage. Sa réponse est proche de celle d'un

cylindre seul jusqu'à la vitesse réduite de 17. Au-delà, quelques dissemblances apparaissent, pour certaines configurations, en particulier dans les fluctuations des mouvements.

Pendant ces essais, a été comptabilisé un certain nombre de chocs pour des vitesses réduites toujours supérieures à 19. Parmi ceux-ci, deux phases d'approche distinctes ont été répertoriées. Dans le premier cas, le riser aval semble aspiré dans le sillage du premier et se déplace à relativement faible vitesse jusqu'à lui (type 1). Dans le second cas, l'amplitude des mouvements transverses du cylindre amont augmente brutalement et s'accompagne d'un recul marqué de ce cylindre, jusqu'à atteindre parfois le second (type 2).

L'observation de ces phénomènes dans le cadre de ce projet amène un certain nombre de questions qui nécessiteraient une étude plus approfondie (notamment en terme de conservation des paramètres caractéristiques du système), en vue d'une meilleure définition des critères d'occurrence au réel. Cette étude permet néanmoins une meilleure compréhension des phases de chocs rencontrés dans ce type de configuration.

REFERENCES

- [1] Ongoing Research on Risers Hydrodynamic Interference, E. Fontaine & al., UDEO Tokyo, Japan 2005
- [2] Vortex and wake effects on closely spaced marine risers, G. Germain & al., Flow Induced Vibration PVP ASME, Vancouver 2006
- [3] Risers in tandem: Wake Induced Oscillation Modeling for Basin Testing, JP. Morel & al., rapport Ifremer 2005
- [4] The measurements of vortex-induced effects in flow past a stationary and oscillating circular cylinders, C.C. Feng, Master's thesis, Univ. B. Columbia, Vancouver 1968
- [5] Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder, D. Brika & A. Laneville, J. Fluid Mech. 1993
- [6] Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder, R. Govardhan & C.H.K. Williamson, J. Fluid Mechanics, 2000
- [7] Dynamic simulation of marine risers moving relative to each other due to vortex and wake effects, S.I. Sagatun & al., Journal of Fluids and Structures, 2002
- [8] The fluid and mechanical coupling between two circular cylinders in tandem arrangement, A. Laneville & D. Brika, Journal of Fluids and Structures, 1999
- [9] Multiple stable/unstable equilibria of a cylinder in the wake of an upstream cylinder, Wu & al., OMAE Rio de Janeiro, Brazil 2001
- [10] Boundary-Layer Theory, H. Schlichting, Reissued 1987 by Mac Graw Hill, chapitre XXIV, pages 729 à 757 dont pages 739 à 743
- [11] Model for forces and stability of a cylinder in a wake, Blevins R.D., Flow Induced Vibration, Ecole Polytechnique, 2004.
- [12] Interaction in Deep-Sea Riser Arrays, Huse E., Offshore Technology Conference, OTC 7237, 1993.
- [13] Experimental investigation of flow-induced vibrations interference between two circular cylinders in tandem arrangements, Assi G. R. S. & al., OMAE Halkidiki, Greece 2005