

Annexe A

Etude numérique du cylindre manipulé

Sommaire

| | | |
|------------|---|------------|
| A.1 | "Optimisation" par manipulation d'écoulement | 215 |
| A.2 | Synchronisation des fréquences de l'écoulement | 219 |
| A.3 | Existence d'une valeur optimale pour l'angle maximal de contrôle | 221 |
| A.4 | Cas test : $A=3$ | 222 |

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus par l'étude numérique de la manipulation du cylindre. L'objectif est double, d'un côté, cette expérimentation numérique permet de valider *a posteriori* les résultats obtenus par modèles réduits POD et contrôle optimal, de l'autre, d'analyser la physique de l'écoulement. Etant donné le caractère modèle d'écoulement décollé, une littérature relativement abondante s'est intéressée récemment au sillage d'un cylindre circulaire, citons pour l'essentiel Lu et Sato (1996); Chou (1997); Baek et Sung (1998); Mahfouz et Badr (2000); Baek et Sung (2000); Cheng *et al.* (2001a,b); Choi *et al.* (2002). Contrairement à certains de ces travaux qui s'intéressaient à l'évolution des caractéristiques physiques de l'écoulement en fonction du nombre de Reynolds, notre étude s'est limitée à une seule valeur du nombre de Reynolds, soit $Re = 200$ qui correspond à la configuration que l'on cherche à contrôler. Cependant, nous avons considéré un domaine de variation \mathcal{D} des paramètres de contrôle A et St beaucoup plus importants que dans les travaux précités, et cela en dépit de coûts de calcul relativement élevés. Les simulations numériques ont été réalisées pour une amplitude A variant entre 0,5 et 6,5 par pas de 0,5, et un nombre de Strouhal St variant entre 0,1 et 1,0 par pas de 0,1. Au final, 130 simulations des équations de Navier-Stokes ont été réalisées. Seuls les résultats les plus importants pour la compréhension de ce mémoire sont présentés ici. Par ailleurs, le lecteur trouvera dans Bergmann (2004) :

- les isovaleurs de la vorticité en écoulement non contrôlé pour $Re = 4, 20, 40, 50, 75, 100, 150, 200$ (solutions instationnaires stables),
- les isovaleurs de la vorticité en écoulement non contrôlé pour $Re = 50, 75, 100, 150, 200$ (solutions instationnaires stables),
- les isovaleurs de la vorticité en écoulement contrôlé pour $Re = 200$ et des paramètres de contrôle variant sur \mathcal{D} ,
- les évolutions temporelles des coefficients aérodynamiques (traînée et portance) en écoulement non contrôlé et en écoulement contrôlé pour $Re = 200$ et des paramètres de contrôle variant sur \mathcal{D} ,
- les densités spectrales de puissance et polaires des coefficients aérodynamiques pour $Re = 200$ et des paramètres de contrôle variant sur \mathcal{D} ,
- enfin, le bilan de puissance associé au contrôle pour $Re = 200$ et des paramètres de contrôle variant sur \mathcal{D} .

A.1 "Optimisation" par manipulation d'écoulement

Cette section présente de manière succincte une étude de contrôle en boucle ouverte. On recherche, par manipulation de l'écoulement, la loi de contrôle de forme sinusoïdale qui minimise le coefficient de traînée

moyen sur \mathcal{D} . Les coûts de calcul liés à l'expérimentation numérique sont tellement importants que cette approche n'est pas une méthode adaptée pour l'optimisation en général et encore moins pour le contrôle d'écoulement en temps réel. Cependant, elle va permettre d'évaluer l'évolution du coefficient de traînée moyen de l'écoulement en fonction des paramètres de contrôle et ainsi de valider notre méthode d'optimisation. Le coefficient de traînée moyen peut être estimé sur un nombre donné de périodes d'oscillations de celui-ci. Cependant, comme nous le verrons par la suite, plusieurs fréquences peuvent être présentes dans l'écoulement, rendant alors cette méthode difficilement applicable. Dans cette étude, toutes les simulations d'écoulement ont atteint un régime asymptotique au bout d'un temps sans dimension égal à 100. Le coefficient de traînée moyen est alors évalué entre $t = 100$ et $t = 130$ ¹.

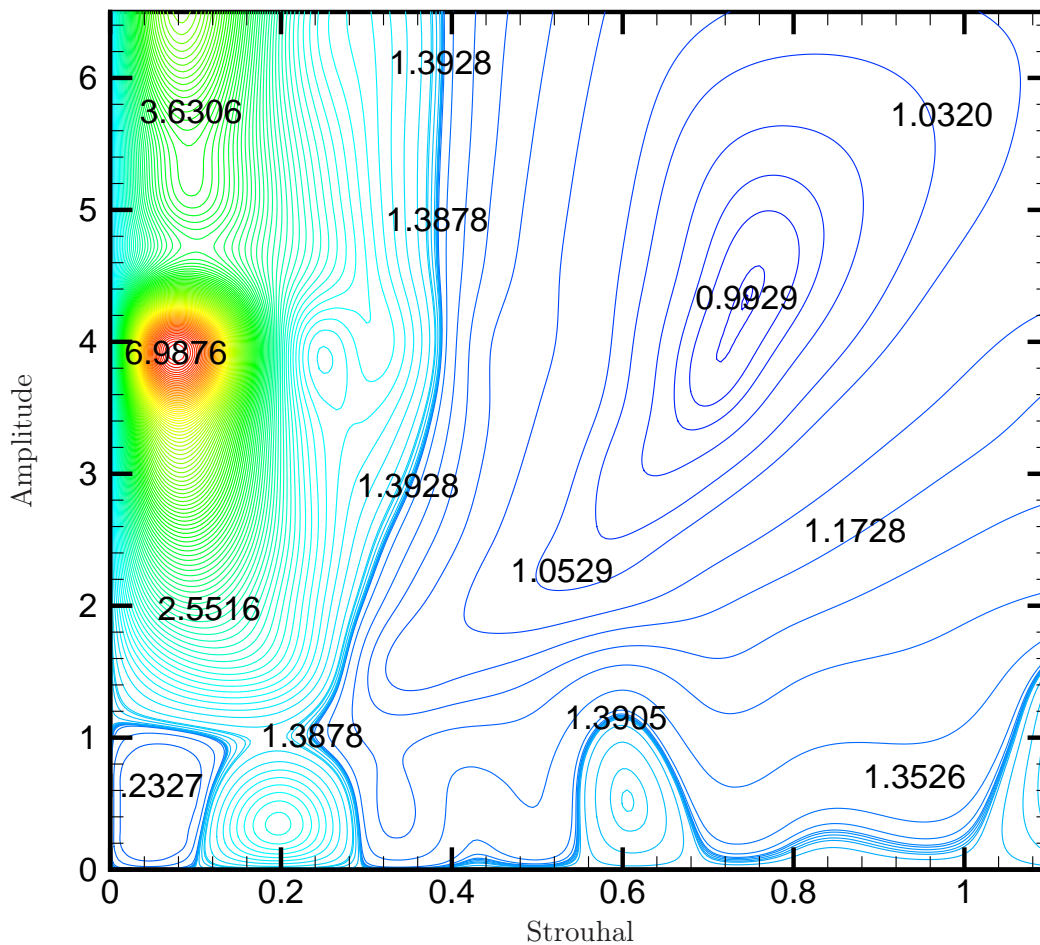


FIGURE A.1 – Isovaleurs du coefficient de traînée moyen en fonction de l'amplitude et de la fréquence de forçage.

La figure A.1 représente les isovaleurs du coefficient de traînée moyen en fonction de l'amplitude et de la fréquence de forçage. Sur cette figure, une interpolation à l'aide de fonctions splines a été réalisée entre les valeurs obtenues par résolution des équations de Navier-Stokes. Le minimum global du coefficient de traînée

1. Il aurait sans doute été préférable de fixer une période d'observation plus longue. Ceci n'a pas été réalisé en raison du temps de calcul nécessaire.

moyen dans le domaine \mathcal{D} de variation des paramètres est égal à 0,99. Cette valeur est atteinte lorsque les paramètres de contrôle $A = 4,3$ et $St = 0,74$ sont appliqués. On constate également que le minimum se situe dans une vallée assez plate. La recherche de minimum peut alors être assez difficile avec un algorithme d'optimisation. Le maximum est, quant à lui, localisé sur un pic assez étroit. La valeur de ce maximum est approximativement égale à 7, et est obtenue pour $A = 3,9$ et $St = 0,1$.

Les figures A.2 et A.3 représentent respectivement les isovaleurs de la contribution de pression et de la contribution visqueuse au coefficient de traînée moyen. Dans ces deux cas, les résultats sont tracés en fonctions des paramètres de contrôle A et St . Bien que la contribution visqueuse soit assez faible, son apport modifie tout de même quelque peu la cartographie de la traînée de pression.

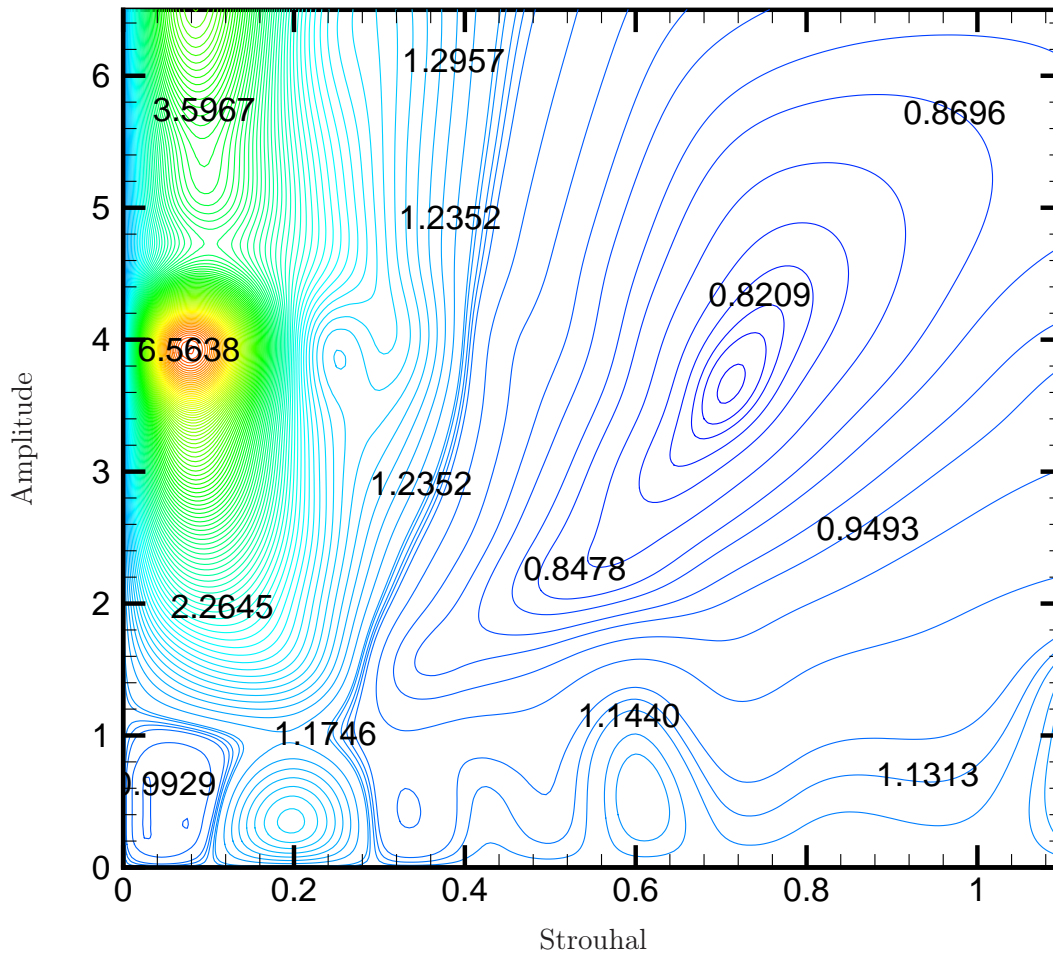


FIGURE A.2 – Isovaleurs de la contribution de pression du coefficient de traînée moyen en fonction de l'amplitude et de la fréquence de forçage.

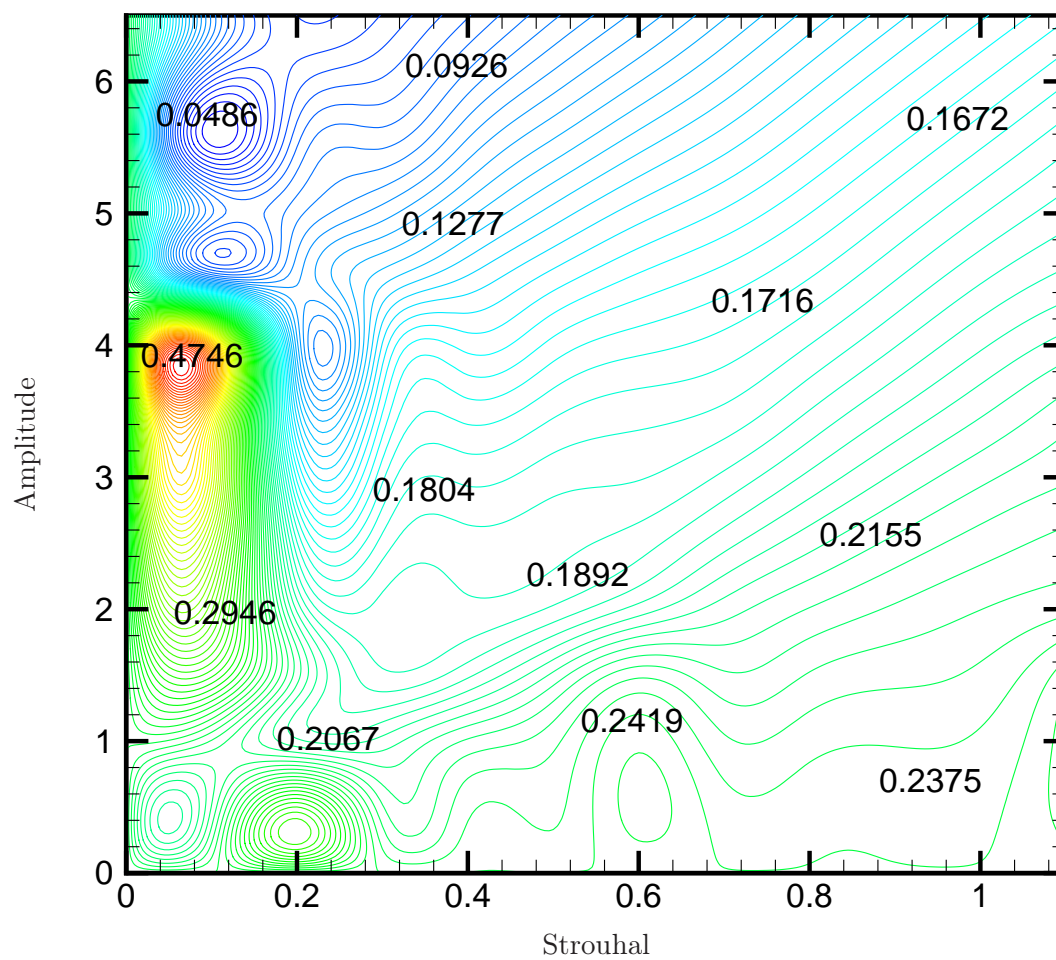


FIGURE A.3 – Isovaleurs de la contribution visqueuse du coefficient de traînée moyen en fonction de l'amplitude et de la fréquence de forçage.

A.2 Synchronisation des fréquences de l'écoulement

Lorsque l'écoulement manipulé oscille de manière globale à la fréquence de forçage St_f , on dit qu'il y a accrochage en fréquence. Dans ce cas, on parle de *lock-on flow*. De plus, lorsque la fréquence de forçage est égale à la fréquence naturelle St_n de l'écoulement, on parle alors de *lock-in flow*.

Sur les figures A.4 et A.5 sont représentées, de deux manières différentes, les zones de l'espace des paramètres de contrôle correspondant respectivement aux états "lock-on" et "no lock-on" de l'écoulement. Comme nous l'avons déjà évoqué dans l'introduction de ce chapitre, les autres études numériques, réalisées dans la littérature sur l'écoulement de sillage manipulé, ont un domaine plus restreint de variation des paramètres de contrôle de l'écoulement. Souvent l'amplitude A ne varie que de 0 à 3. Sur le domaine commun de variation des paramètres de contrôle de l'écoulement, nos résultats de sélection de fréquence sont qualitativement en accord avec ceux déterminés précédemment (Lu et Sato, 1996; Cheng *et al.*, 2001a,b; Choi *et al.*, 2002). Par ailleurs, nos simulations numériques permettent d'étendre ces précédents résultats à des valeurs plus élevées de l'amplitude de contrôle A .

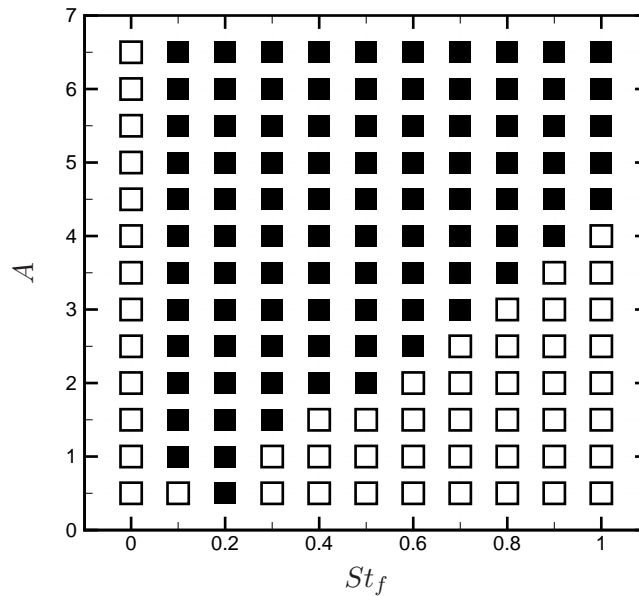


FIGURE A.4 – Écoulements "lock-on" ■ et "no lock-on" □ en fonction de l'amplitude A et du nombre de Strouhal St_f de forçage.

Enfin, sur la figure A.6, nous avons représenté pour différentes valeurs croissantes du nombre de Strouhal de forçage situées hors de la zone de "lock-on" pour $A = 3$ (voir figure A.5), l'évolution du pic du spectre de puissance du coefficient de portance. Afin d'obtenir une excellente précision sur la localisation de ces pics, permettant ainsi de conclure, nous avons réalisé des simulations numériques sur un temps adimensionnel de 1000, soit $\Delta St = 0,001$. On constate alors, conformément aux résultats présentés par Baek et Sung (2000), que lorsque le nombre de Strouhal de forçage augmente dans une zone de "no lock-on", un nouveau nombre de Strouhal caractéristique apparaît, qui tend au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de Strouhal de forçage vers le nombre de Strouhal naturel St_n de l'écoulement.

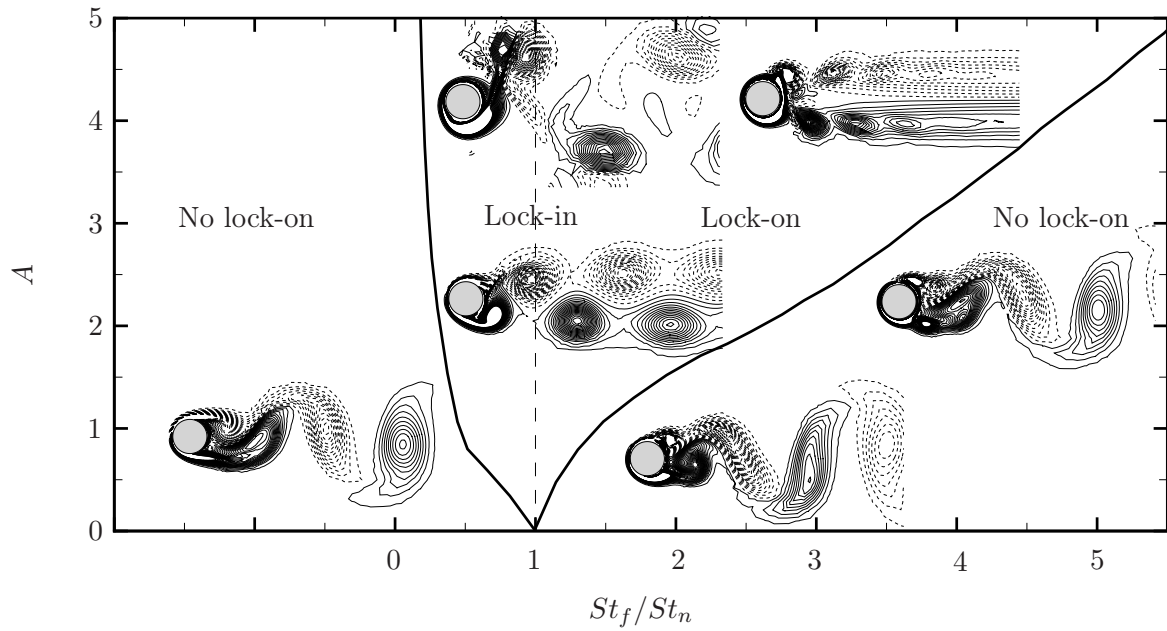


FIGURE A.5 – Bande fondamentale "lock-on" et iso-contours de vorticité ω_z dans le sillage proche.

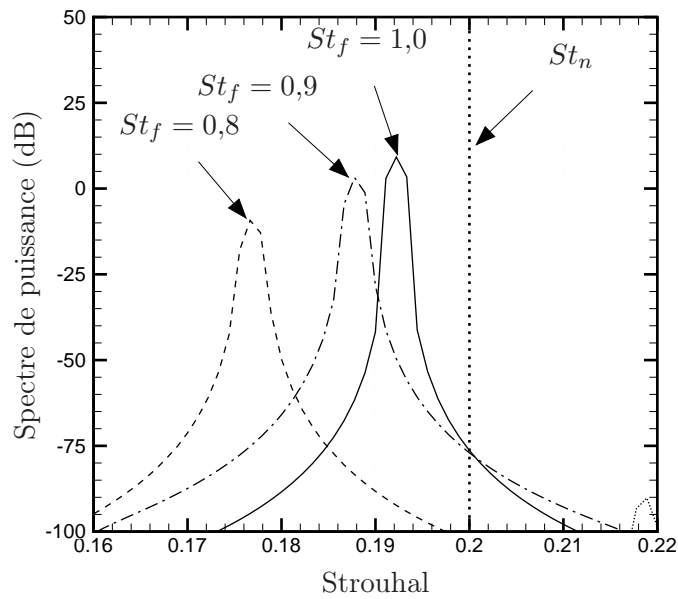


FIGURE A.6 – Evolution des spectres de puissance du coefficient de portance pour $A = 3$ et trois valeurs croissantes du nombre de Strouhal de forçage comprises en dehors de la zone de "lock-on".

A.3 Existence d'une valeur optimale pour l'angle maximal de contrôle

Pour un couple de paramètres de contrôle donné, l'angle maximal de rotation peut être évalué de la manière suivante :

$$\Theta = \max_t \{\theta(t)\} = \frac{A}{\pi St}.$$

Pour les différents nombres de Strouhal étudiés, la figure A.7 représente le coefficient de traînée moyen en fonction de l'angle maximal de rotation. Par ailleurs, pour chaque nombre de Strouhal, la figure A.8 représente l'angle maximal de rotation qui produit le coefficient de traînée minimal. Cet angle est noté Θ_{opt} . Il semble qu'il existe une valeur optimale, Θ_{max} , pour l'angle maximal de rotation. La réduction de traînée maximale est obtenue, en moyenne, aux alentours de $\Theta_{opt} = 95^\circ$, et ce, pour toutes les fréquences étudiées. On pose alors $\Theta_{max} = 95^\circ$.

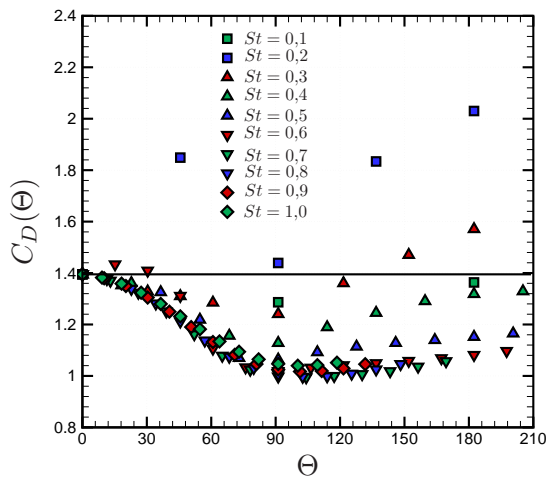


FIGURE A.7 – Evolution pour différents nombres de Strouhal du coefficient de traînée moyen en fonction de l'angle maximal de rotation.

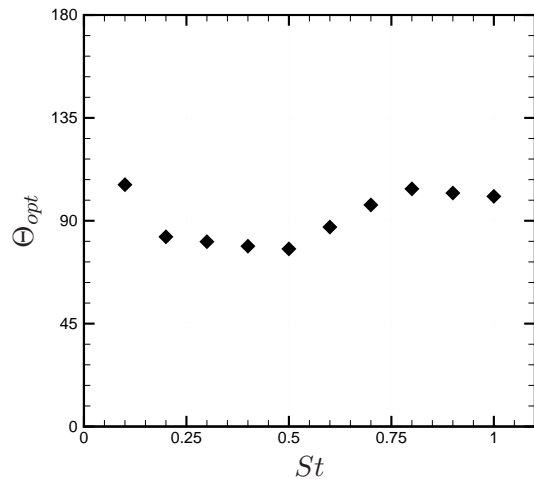


FIGURE A.8 – Angle maximal optimal de rotation en fonction du nombre de Strouhal.

Dans ce qui suit, on utilise les notations suivantes :

$$C_{Dmin}(St) = \min_{A \in \mathbb{R}} C_D(\Theta, St) \quad \text{et} \quad C_{D\Theta_{max}}(St) = C_D(\Theta_{max}, St).$$

On observe sur la figure A.9 une bonne concordance entre C_{Dmin} et $C_{D\Theta_{max}}$, et cela, pour toutes les fréquences étudiées. Les paramètres de contrôle A et St qui correspondent au minimum de traînée semblent être dépendants. Il existe alors une relation optimale entre ces deux paramètres. Pour $\Theta_{max} = 95^\circ$, on a :

$$A/St = 5,2.$$

La figure A.10 représente la dépendance optimale des paramètres de contrôle, ainsi que cette forme linéaire prédite.

En d'autres termes, si l'on veut minimiser le coefficient de traînée moyen pour un nombre de Reynolds égal à 200, les paramètres de contrôle ne doivent pas être choisis aléatoirement. Par exemple, si l'on souhaite utiliser une amplitude $A = 2$, il est nécessaire d'appliquer une fréquence égale à $A/5,2$, soit $St = 0,38$. De même, si l'on souhaite utiliser une fréquence égale à $St = 0,5$, il faut appliquer une amplitude égale à $5,2 St$, soit $A = 2,6$.

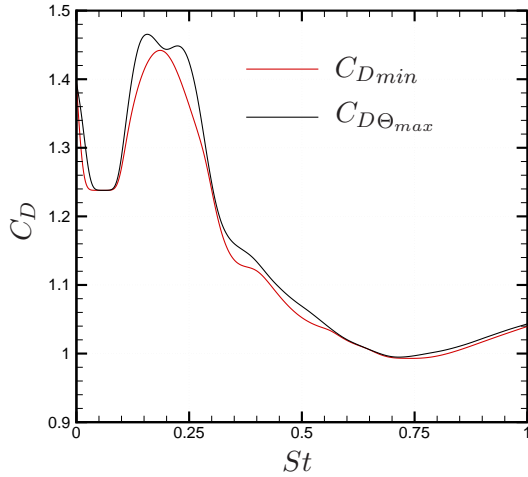


FIGURE A.9 – Evolution du coefficient de traînée moyen en fonction du nombre de Strouhal.

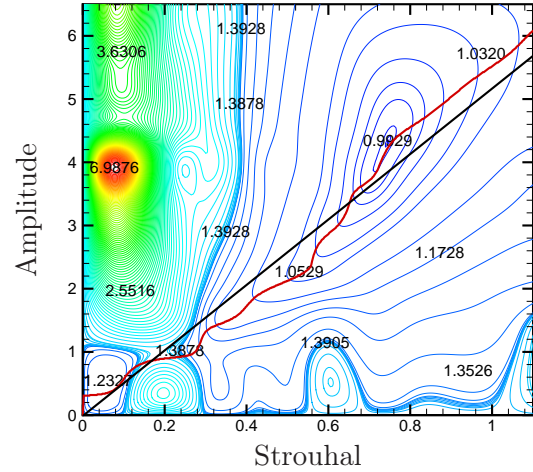
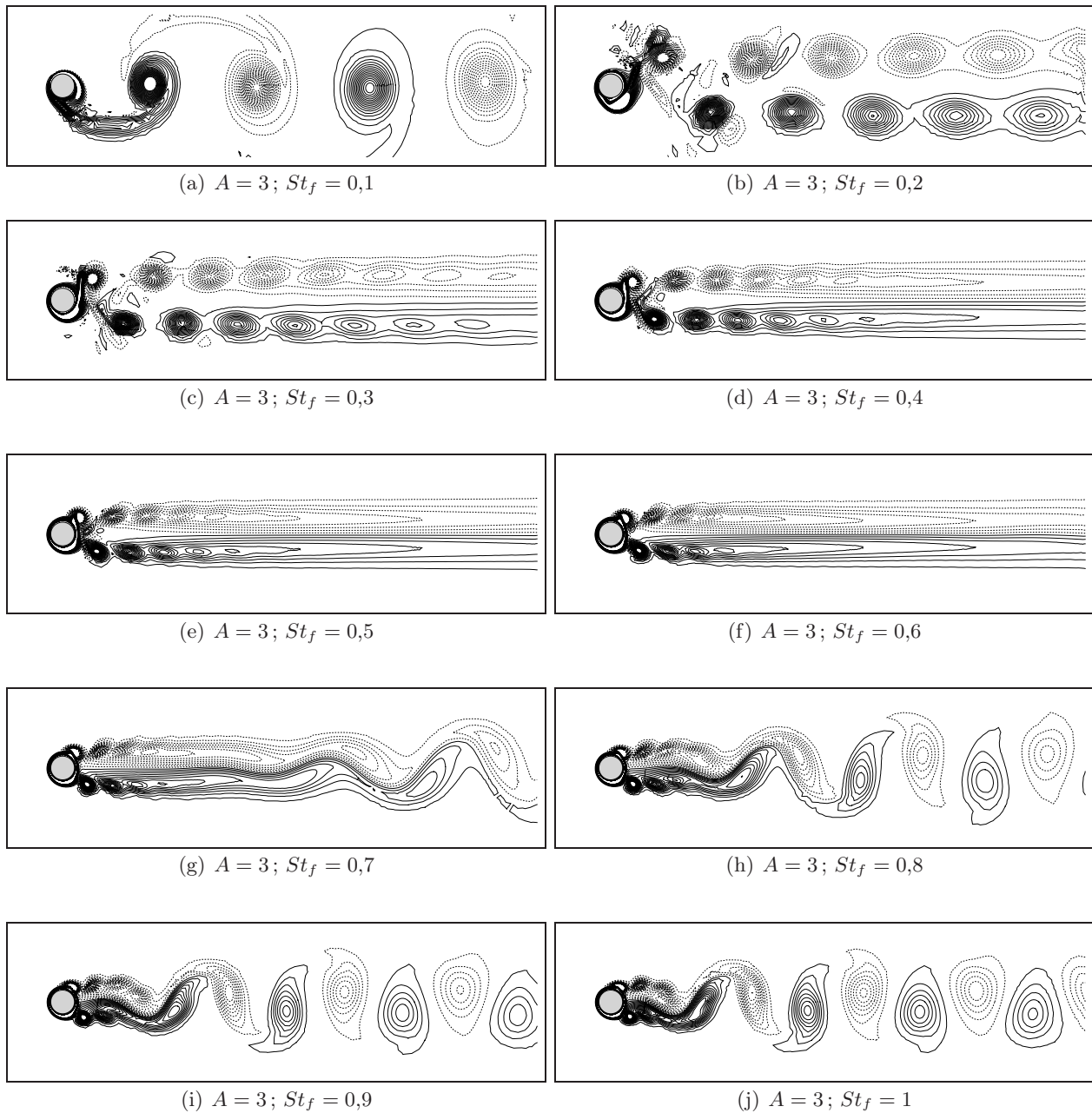


FIGURE A.10 – Superposition des isovaleurs du coefficient de traînée moyen en fonction de l'amplitude et de la fréquence de forçage avec les courbes de dépendance optimale des paramètres de contrôle (ligne rouge) et la forme linéaire prédite (ligne noire).

A.4 Cas test : $A=3$

Dans ce qui suit un cas test qui correspond à une amplitude de forçage fixée à une valeur $A = 3$ est présenté. Le nombre de Strouhal varie entre $St_f = 0,1$ et $St_f = 1,0$ par pas de $0,1$. La figure A.11 représente les isovaleurs de la vorticité ω_z pour les différentes configurations étudiées. L'écoulement est en "lock-on" pour les valeurs du nombre de Strouhal égaux à $St_f = 0,1$ jusqu'à $St_f = 0,65$ (par interpolation). Les valeurs de $St_f = 0,5$ et $St_f = 0,6$ permettent d'obtenir des sillages quasi-symétriques par rapport à $y = 0$.

FIGURE A.11 – *Iso omega z*. $T = 200$; $\Delta t = 0,01$.

