

Annexe E

Contrôle par rotation partielle du cylindre

Sommaire

E.1	Généralités	261
E.2	Contrôle amont défini par $\theta_c = 0^\circ$ (écoulement non contrôlé)	265
E.3	Contrôle amont défini par $\theta_c = 30^\circ$	267
E.4	Contrôle amont défini par $\theta_c = 60^\circ$	269
E.5	Contrôle amont défini par $\theta_c = 90^\circ$	271
E.6	Contrôle amont défini par $\theta_c = 120^\circ$	273
E.7	Contrôle amont défini par $\theta_c = 150^\circ$	275
E.8	Contrôle amont défini par $\theta_c = 180^\circ$	277
E.9	Récapitulatif	279

Dans le reste du mémoire, nous avons considéré une rotation en bloc du cylindre autour de sa génératrice. L'objet de cette annexe, est de montrer qu'il est possible d'obtenir une réduction encore plus importante du coefficient de traînée moyen, en mettant en rotation uniquement¹ certaines parties du cylindre (Milano et Koumoutsakos, 2002).

L'ensemble des résultats est récapitulé à la section E.9.

E.1 Généralités

Le coefficient de traînée moyen s'écrit² :

$$\overline{C_D}(u, p) = \int_{\Gamma_c} \int_0^T \frac{P - P_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2} n_x dt d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \int_0^T \frac{2}{Re} \left(\frac{\partial u}{\partial x} n_x + \frac{\partial u}{\partial y} n_y \right) dt d\Gamma.$$

Le cylindre étant circulaire, le coefficient de traînée moyen peut s'écrire en coordonnées cylindriques sous la forme :

1. Notre propos est de démontrer, par une expérience numérique, que sous certaines conditions de rotation, une réduction du coefficient de traînée moyen, encore plus importante que celle obtenue par rotation en bloc, est possible. On ne se pose donc pas, en particulier, la question de la faisabilité pratique du contrôle, même si il semble qu'une technologie de type MEMS devrait pouvoir être appliquée.

2. On rappelle (chapitre 1) que $p = P/(\rho U_\infty^2)$.

$$\overline{C_D}(u, p) = \int_0^{2\pi} \underbrace{\int_0^T \frac{P - P_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2} n_x dt R d\theta}_{\widetilde{C_D^p}(\theta)} - \int_0^{2\pi} \underbrace{\int_0^T \frac{2}{Re} \left(\frac{\partial u}{\partial x} n_x + \frac{\partial u}{\partial y} n_y \right) dt R d\theta}_{\widetilde{C_D^v}(\theta)}, \quad (\text{E.1})$$

où R représente le rayon du cylindre et θ un angle définissant l'abscisse curviligne d'un point quelconque de Γ_c . Par la suite, cet angle sera initialisé au point d'arrêt amont, conformément à la figure E.1.

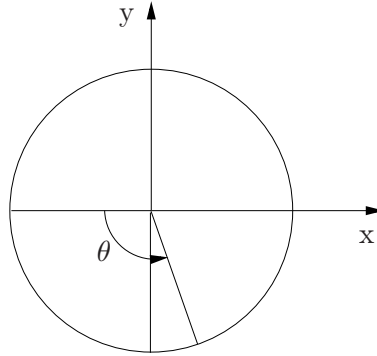


FIGURE E.1 – Représentation de l'abscisse curviligne du cylindre définie par l'angle θ .

Afin de déterminer les parties du cylindre sur lesquelles l'application du contrôle est bénéfique, il peut sembler intéressant d'examiner, en fonction de l'angle θ , les contributions respectives des termes $\widetilde{C_D^p}$ et $\widetilde{C_D^v}$ à $\widetilde{C_D} = \widetilde{C_D^p} + \widetilde{C_D^v}$.

La figure E.2 représente la distribution des coefficients de traînée moyen en fonction de l'angle θ . Cette distribution est respectivement représentée pour un écoulement non contrôlé ($\gamma = 0$) et pour un écoulement forcé par les paramètres de contrôle optimaux ($\gamma = \gamma_{opt}$) obtenus au chapitre 7, à savoir $A = 4,25$ et $St = 0,738$. Dans les deux cas, la contribution du terme visqueux, $\widetilde{C_D^v}$, la contribution du terme de pression, $\widetilde{C_D^p}$, et la contribution totale, $\widetilde{C_D}$, sont représentées. Les parties grisées en clair et en foncé correspondent respectivement aux angles pour lesquels le fluide exerce sur le cylindre une force de résistance, et aux angles pour lesquels le fluide exerce une force de poussée.

La figure E.3 représente la différence entre les deux cas précédents (figure E.2(a) moins figure E.2(b)). On constate que l'application du contrôle est bénéfique (coefficient de traînée négatif) sur toute la partie amont du cylindre. On peut, par conséquent, imaginer améliorer les résultats, en terme de réduction de traînée, en couplant une partie contrôlée ($\gamma = \gamma_{opt}$) en amont du cylindre, avec une partie non contrôlée ($\gamma = 0$) en aval de celui-ci. Par la suite, on appliquera donc le contrôle par rotation sur des parties amont du cylindre délimitées par les angles $-\theta_c$ et $+\theta_c$ (voir figure E.4 pour la définition de θ_c). Plus exactement, on considérera successivement que θ_c varie de 0 degrés (écoulement non contrôlé) à 180 degrés (cylindre entièrement contrôlé) par pas de trente degrés (§ E.2 à § E.8). Les résultats obtenus pour ces différentes valeurs de θ_c sont récapitulés à la section E.9.

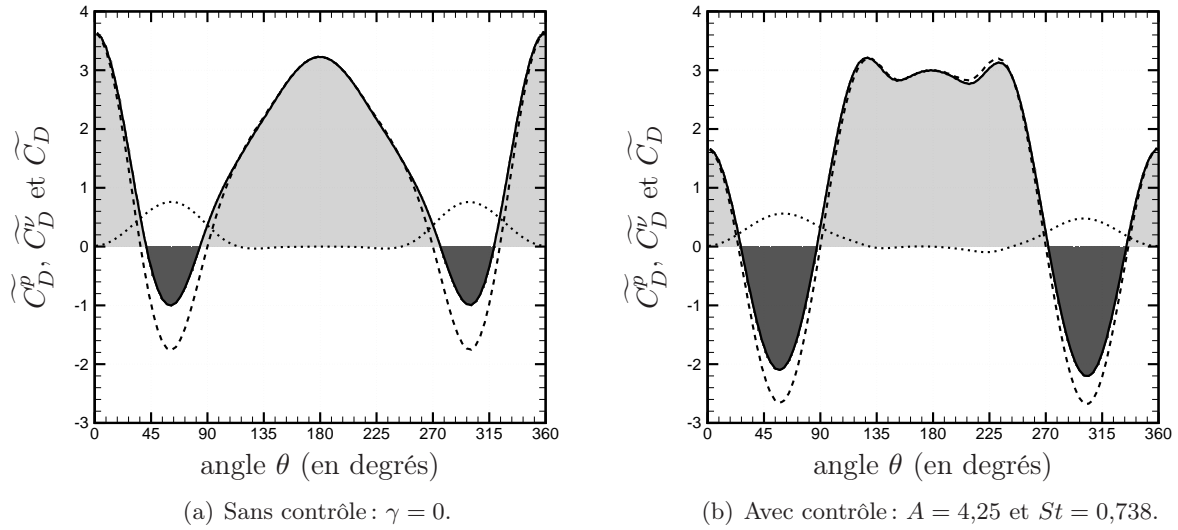


FIGURE E.2 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $Re = 200$. — \widetilde{C}_D , $\cdots \widetilde{C}_D^v$ et $--- \widetilde{C}_D^p$.

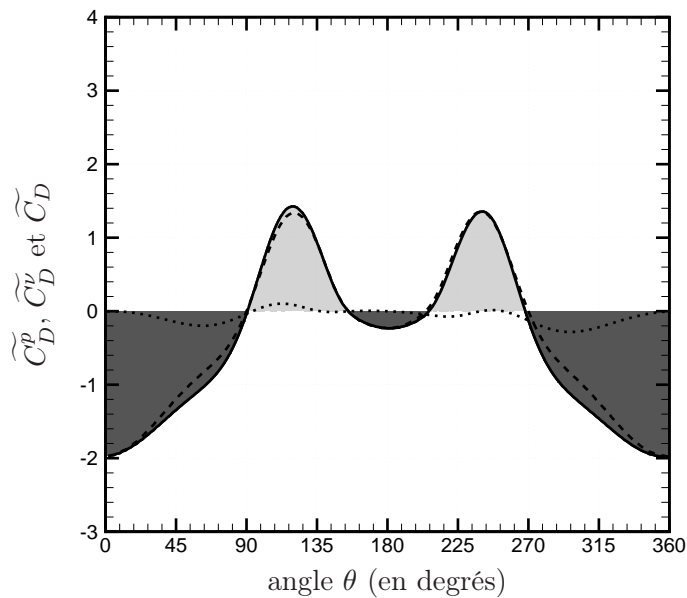


FIGURE E.3 – Répartition de la différence des coefficients de traînée moyen sur le cylindre entre le cas non contrôlé ($\gamma = 0$) et le cas où le contrôle optimal est appliqué ($\gamma = \gamma_{opt}$).

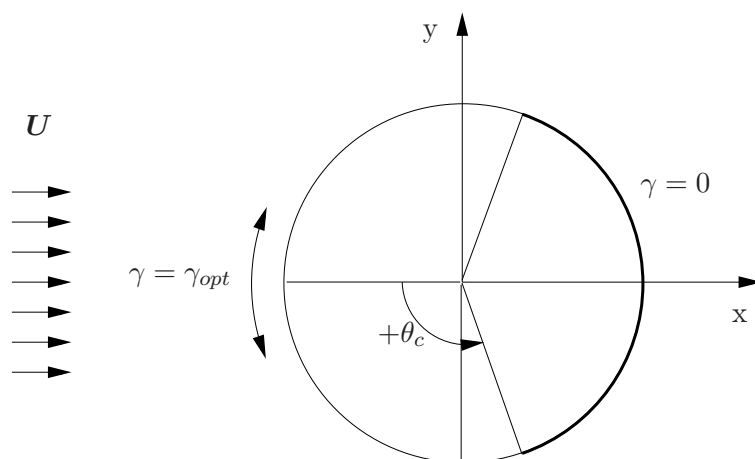


FIGURE E.4 – Configuration de contrôle: partie amont contrôlée ($\gamma = \gamma_{opt}$) et partie aval non-contrôlée ($\gamma = 0$).

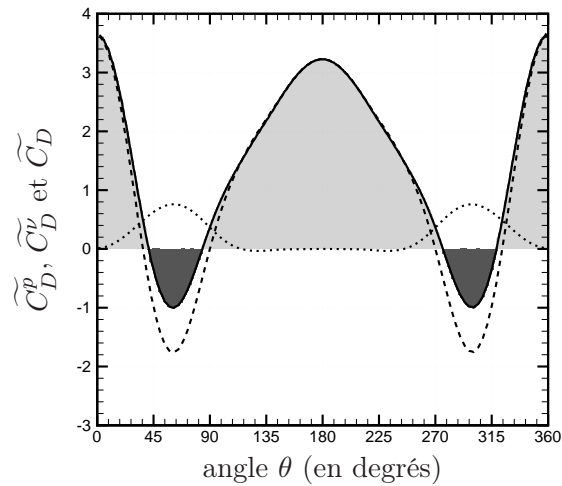
E.2 Contrôle amont défini par $\theta_c = 0^\circ$ (écoulement non contrôlé)

FIGURE E.5 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 0^\circ$ (écoulement non contrôlé). — \widetilde{C}_D , $\cdots \widetilde{C}_D^\nu$ et $-\cdots \widetilde{C}_D^p$.

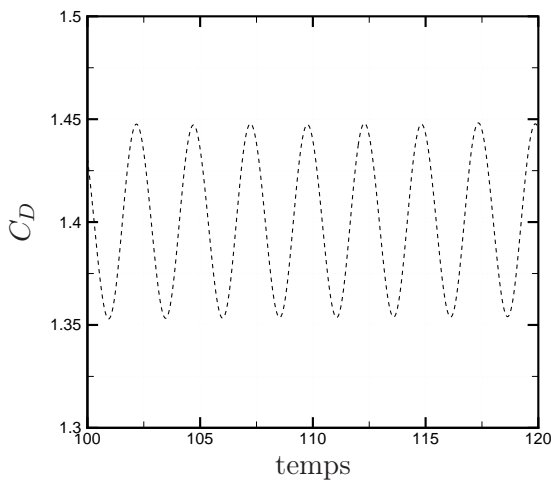


FIGURE E.6 – Evolution temporelle du coefficient de traînée pour un écoulement non contrôlé.

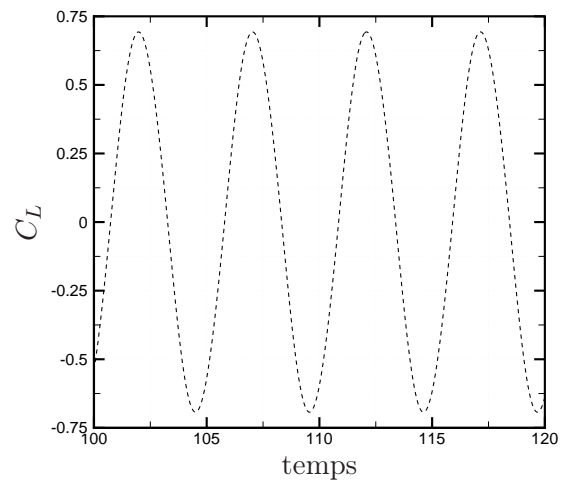


FIGURE E.7 – Evolution temporelle du coefficient de portance pour un écoulement non contrôlé.

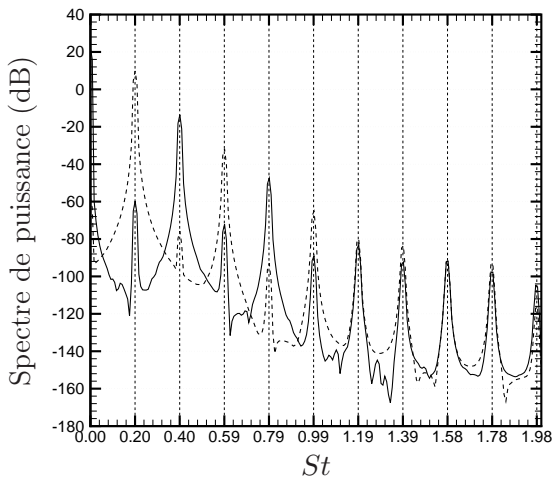


FIGURE E.8 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 0^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

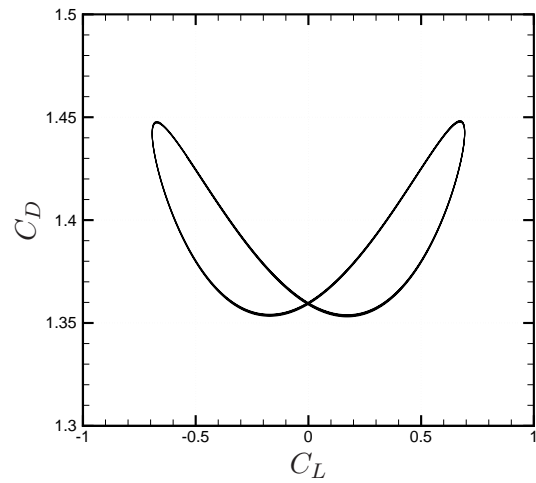
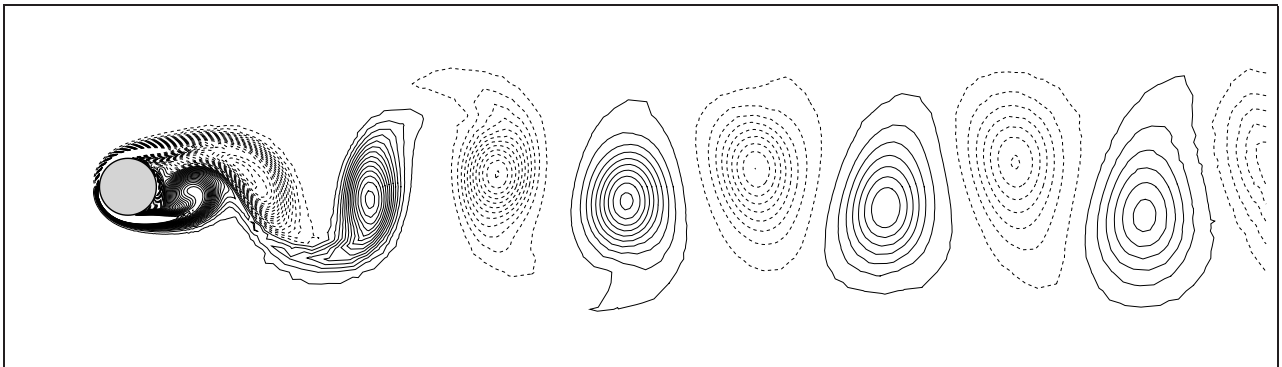
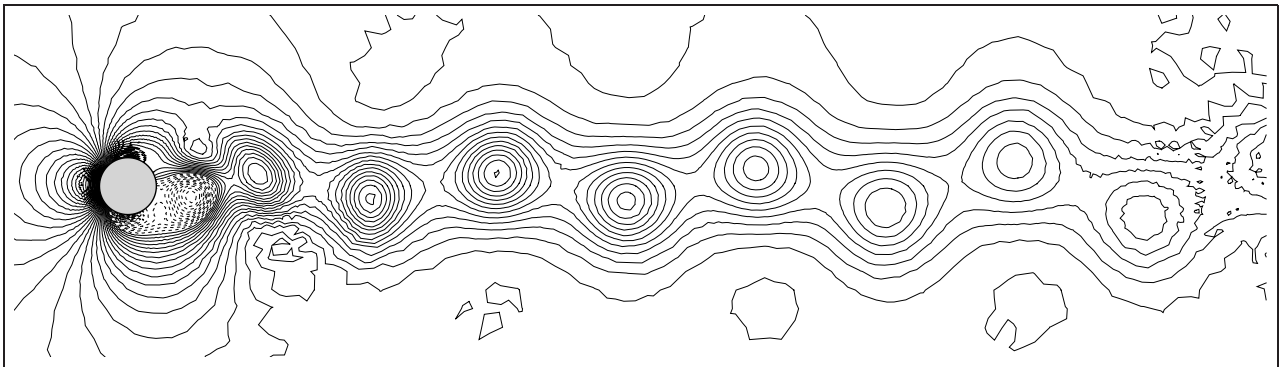


FIGURE E.9 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 0^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.10 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 0^\circ$ à $t = 150$.

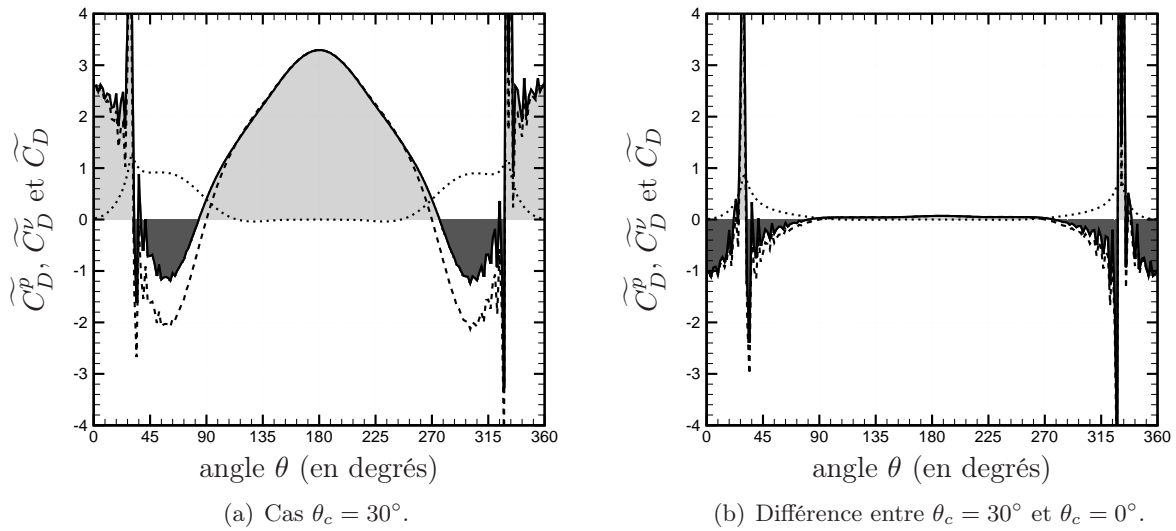
E.3 Contrôle amont défini par $\theta_c = 30^\circ$ 

FIGURE E.11 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 30^\circ$. — \widetilde{C}_D , $\cdots \widetilde{C}_D^v$ et $--- \widetilde{C}_D^p$.

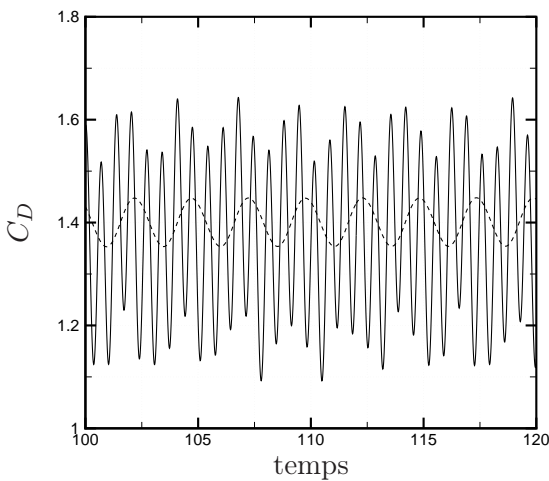


FIGURE E.12 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 30^\circ$ (traits pleins).

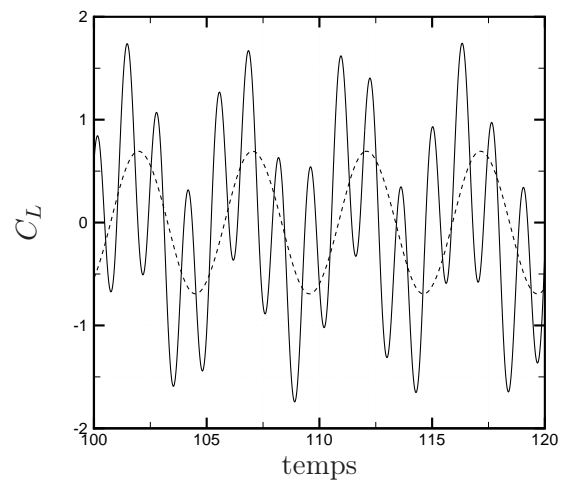


FIGURE E.13 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 30^\circ$ (traits pleins).

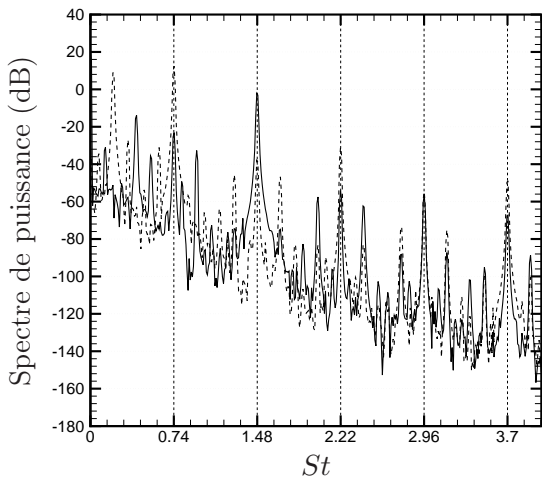


FIGURE E.14 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 30^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

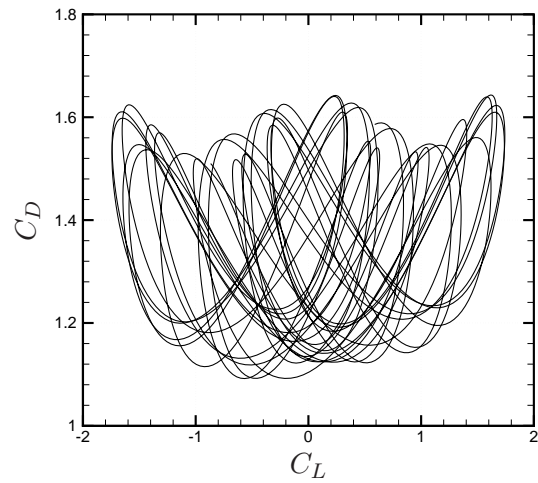
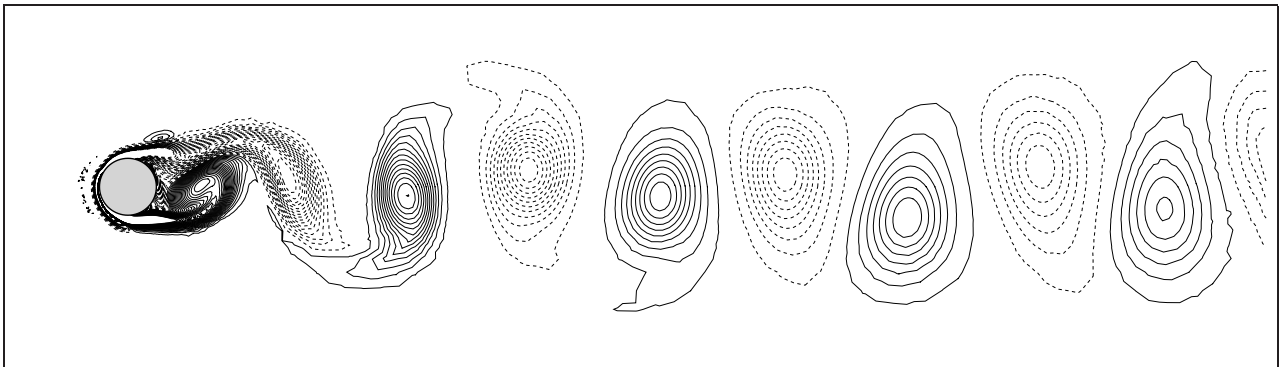
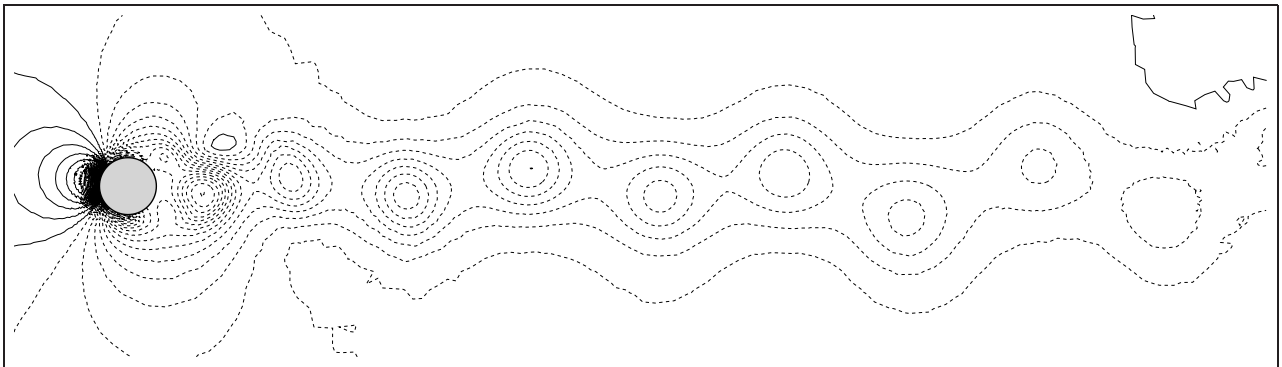


FIGURE E.15 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 30^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.16 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 30^\circ$ à $t = 150$.

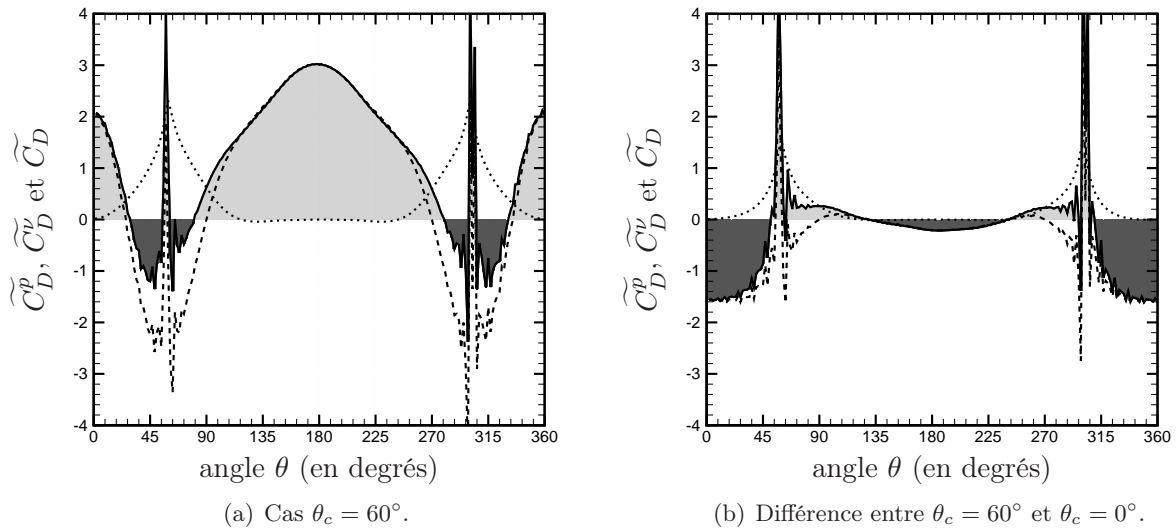
E.4 Contrôle amont défini par $\theta_c = 60^\circ$ 

FIGURE E.17 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 60^\circ$. — \widetilde{C}_D , $\cdots \widetilde{C}_D^v$ et $--- \widetilde{C}_D^p$.

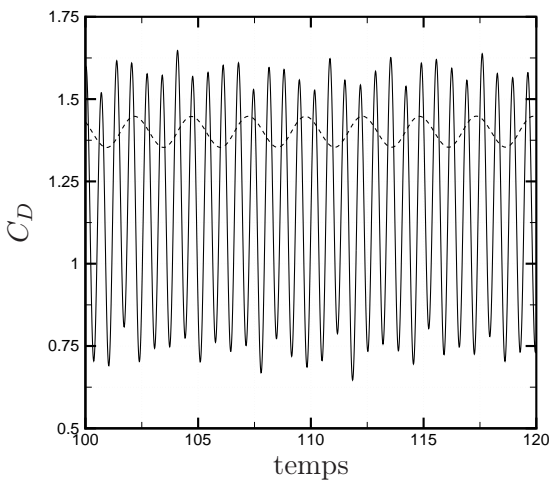


FIGURE E.18 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 60^\circ$ (traits pleins).

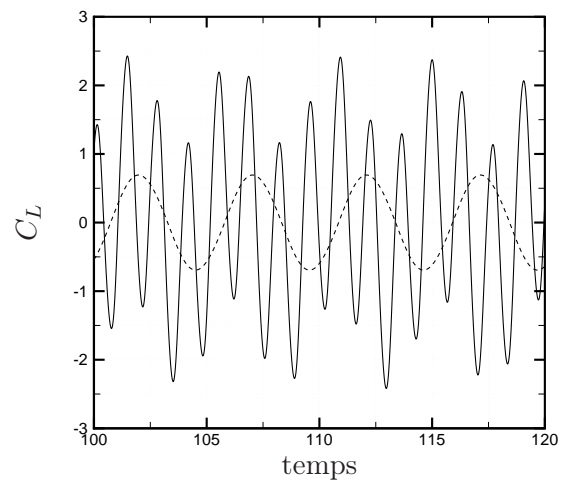


FIGURE E.19 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 60^\circ$ (traits pleins).

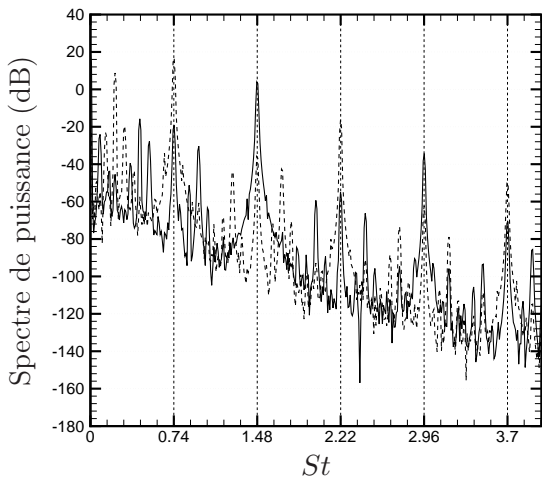


FIGURE E.20 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 60^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

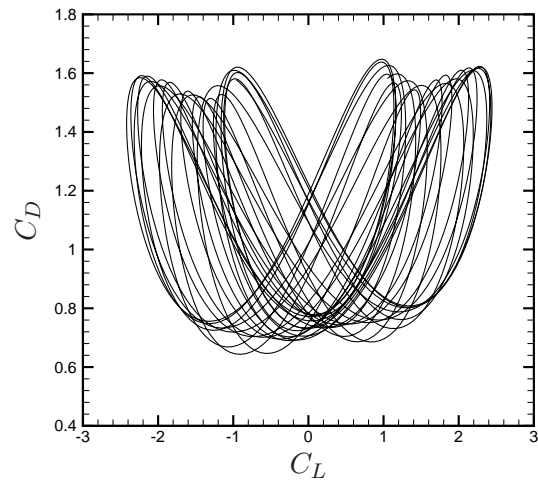
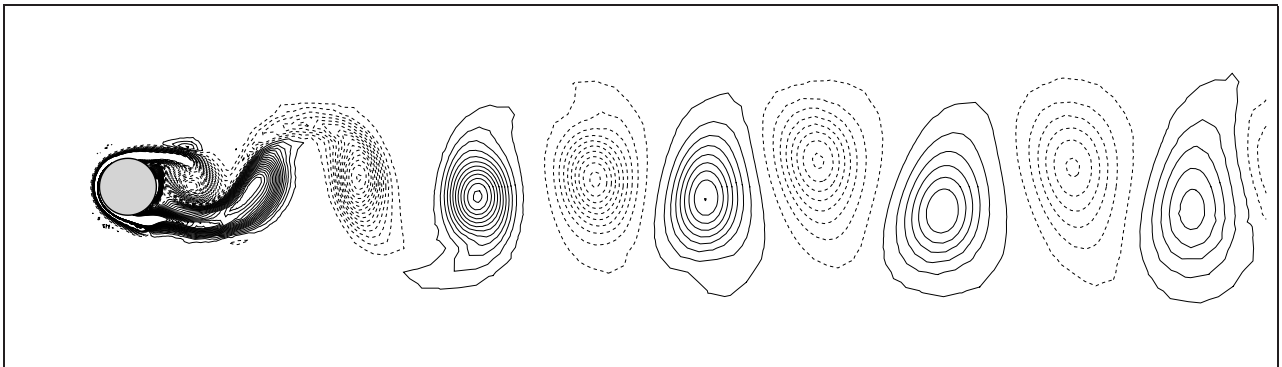
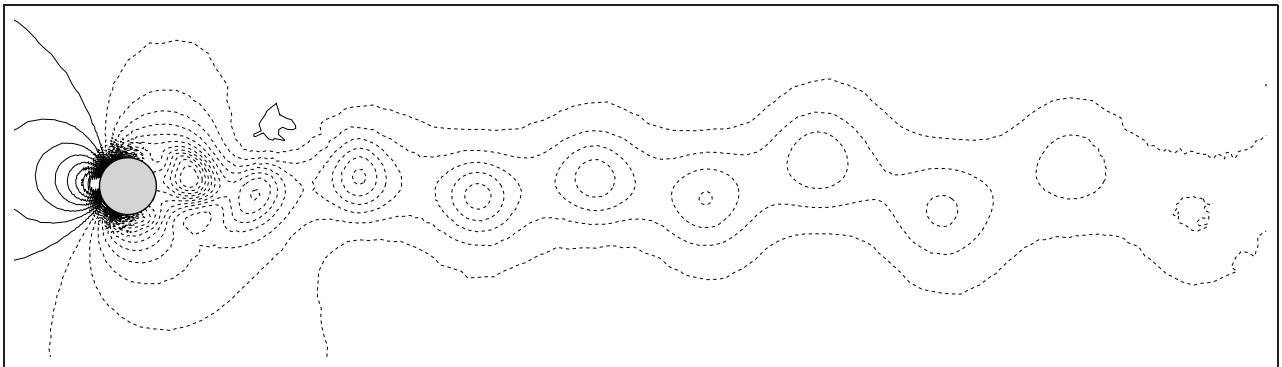


FIGURE E.21 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 60^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.22 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 60^\circ$ à $t = 150$.

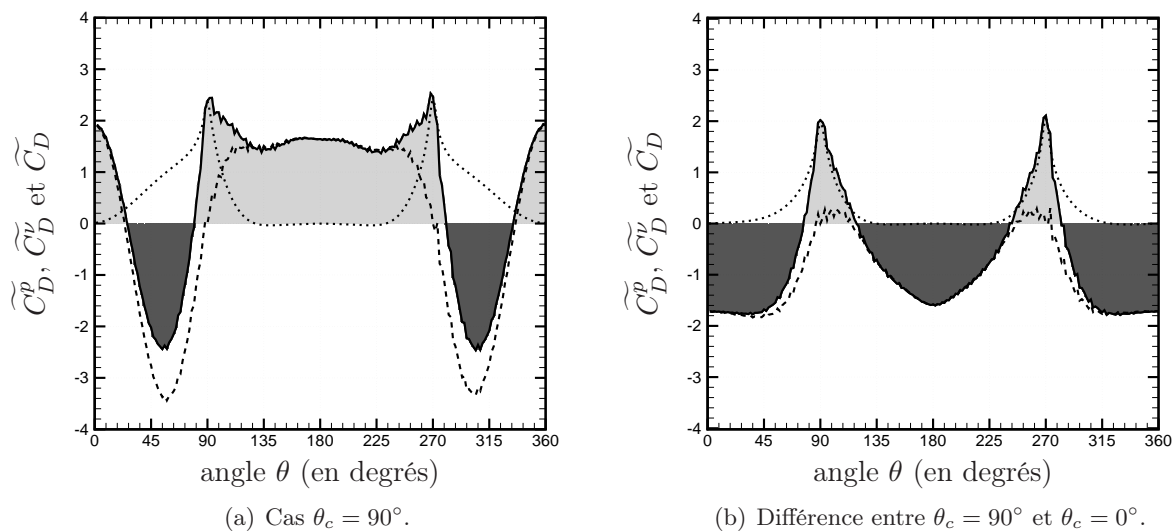
E.5 Contrôle amont défini par $\theta_c = 90^\circ$ 

FIGURE E.23 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 90^\circ$. — \widetilde{C}_D , $\cdots \widetilde{C}_D^v$ et $--- \widetilde{C}_D^p$.

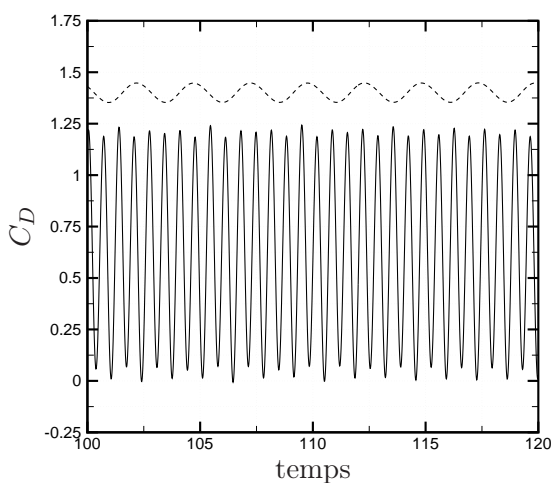


FIGURE E.24 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 90^\circ$ (traits pleins).

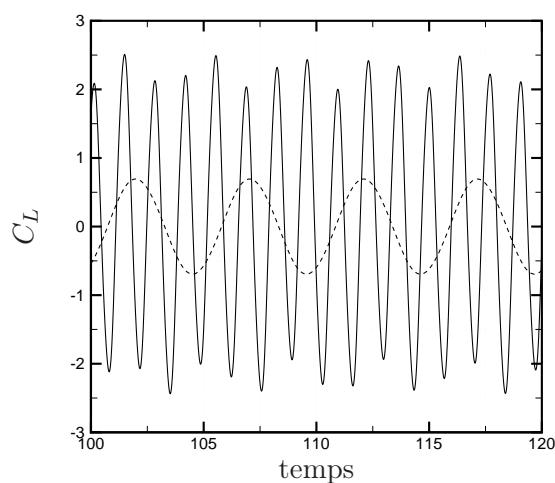


FIGURE E.25 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 90^\circ$ (traits pleins).

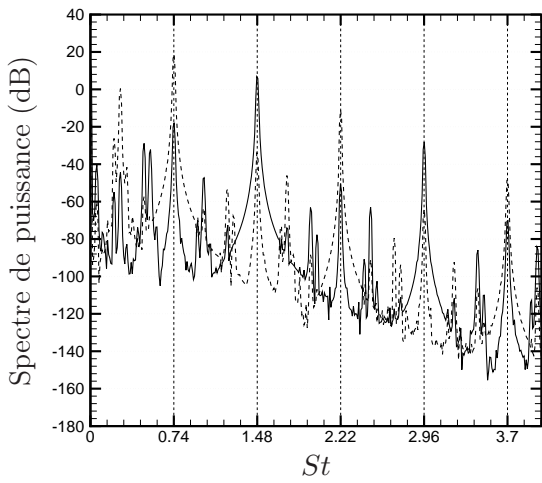


FIGURE E.26 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 90^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

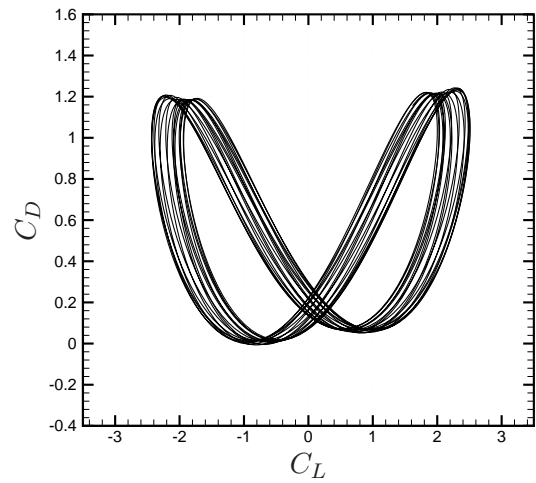
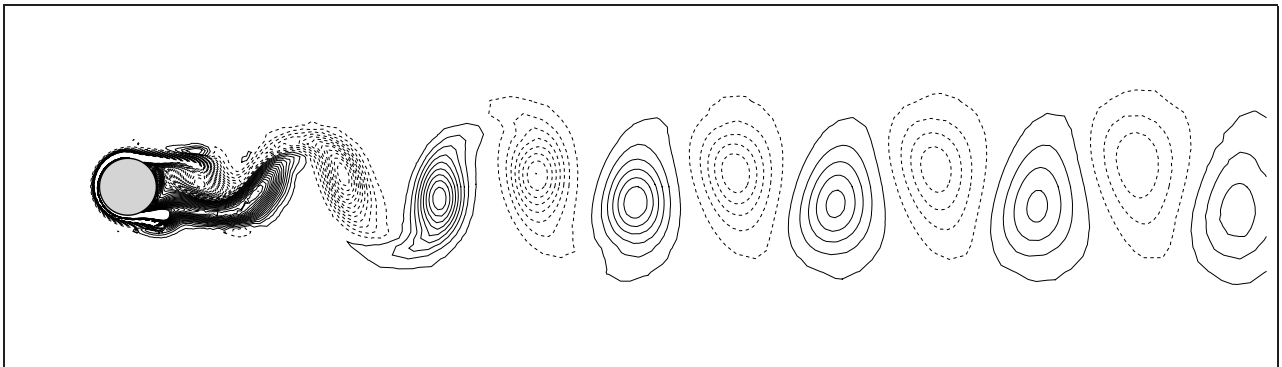
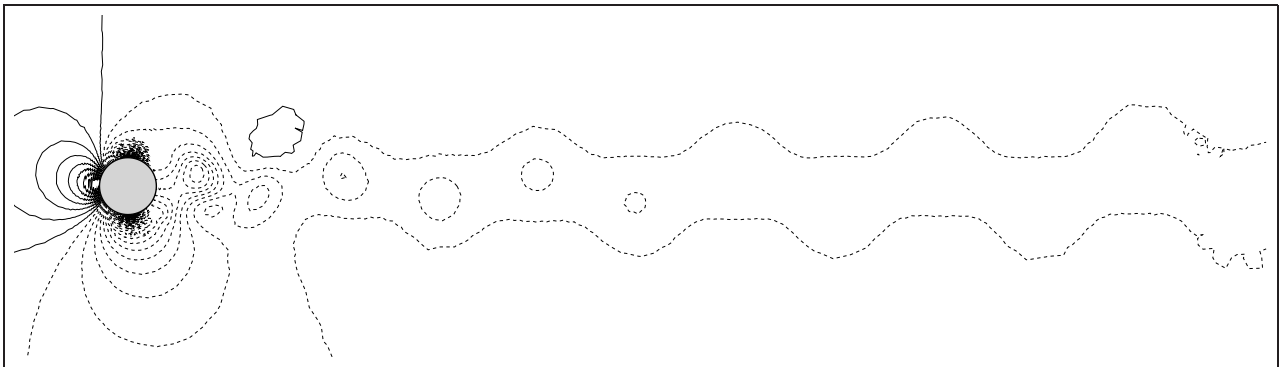


FIGURE E.27 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 90^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.28 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 90^\circ$ à $t = 150$.

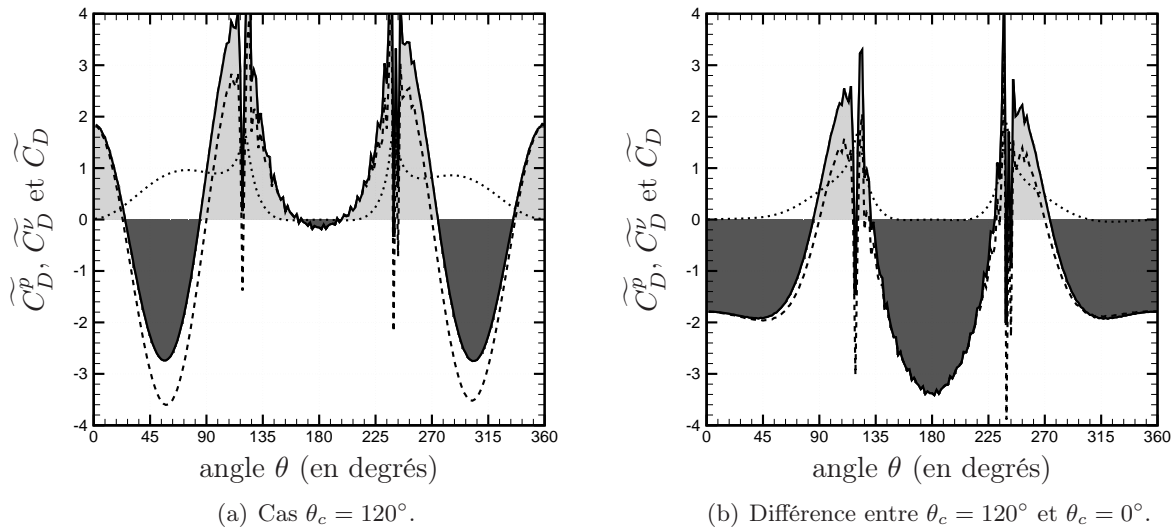
E.6 Contrôle amont défini par $\theta_c = 120^\circ$ 

FIGURE E.29 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 120^\circ$. — \tilde{C}_D , $\cdots \tilde{C}_D^\psi$ et $--- \tilde{C}_D^p$.

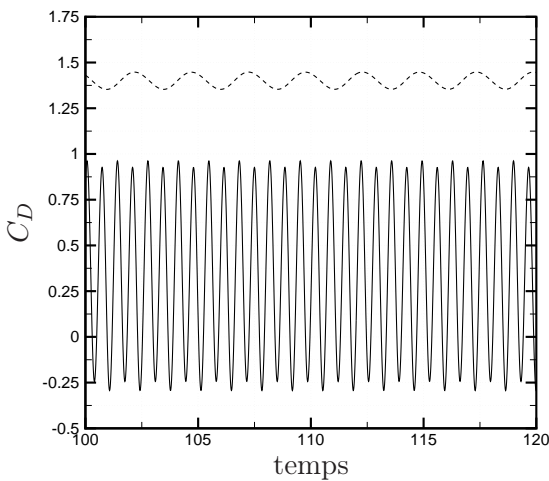


FIGURE E.30 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 120^\circ$ (traits pleins).

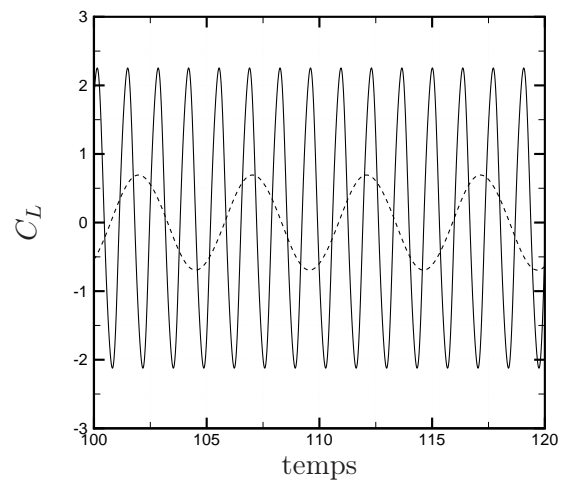


FIGURE E.31 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 120^\circ$ (traits pleins).

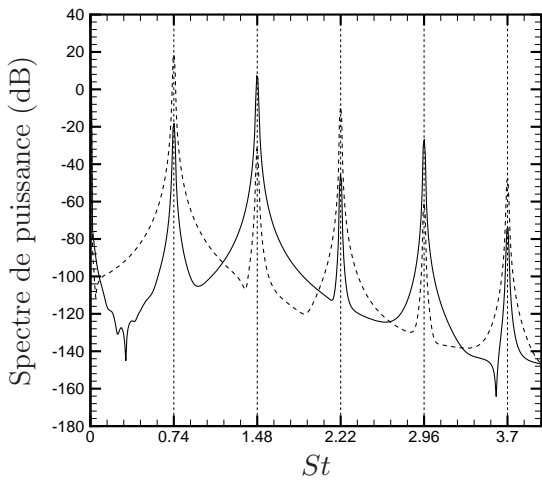


FIGURE E.32 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 120^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

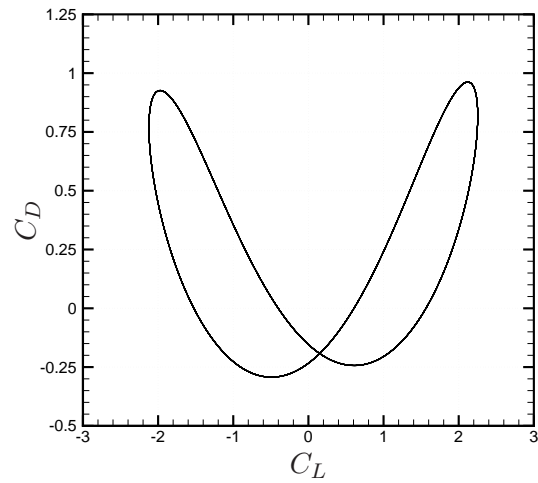
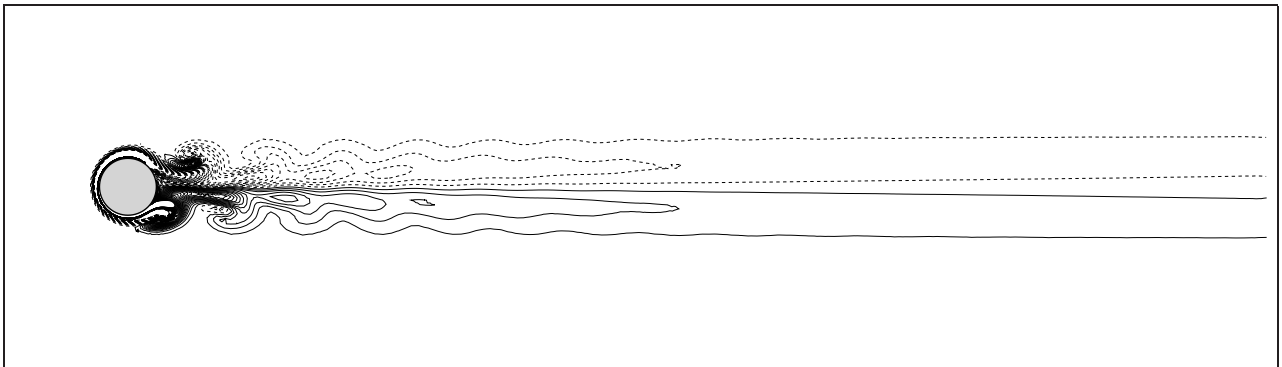


FIGURE E.33 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 120^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.34 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 120^\circ$ à $t = 150$.

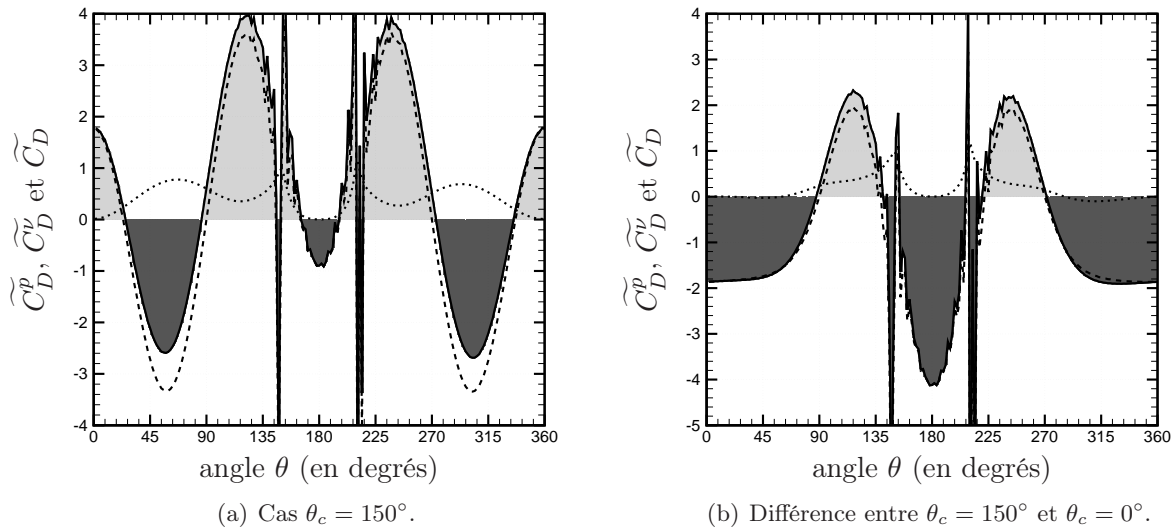
E.7 Contrôle amont défini par $\theta_c = 150^\circ$ 

FIGURE E.35 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 150^\circ$. — \tilde{C}_D , $\cdots \tilde{C}_D^v$ et $--- \tilde{C}_D^p$.

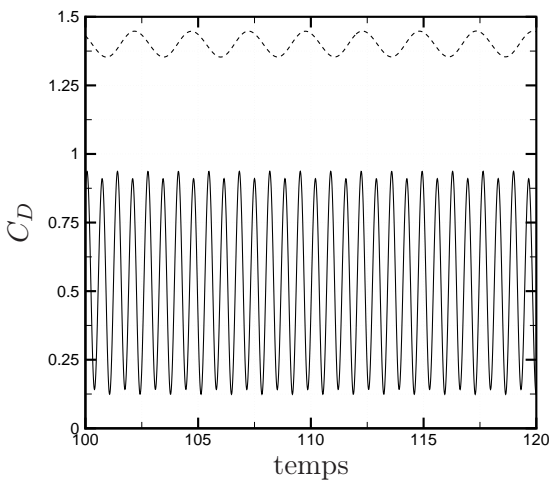


FIGURE E.36 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 150^\circ$ (traits pleins).

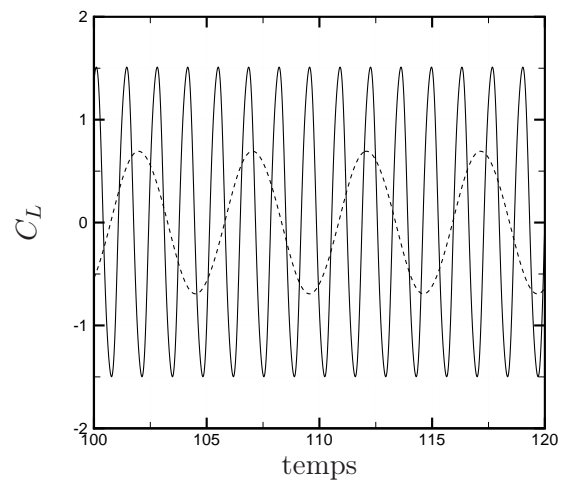


FIGURE E.37 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 150^\circ$ (traits pleins).

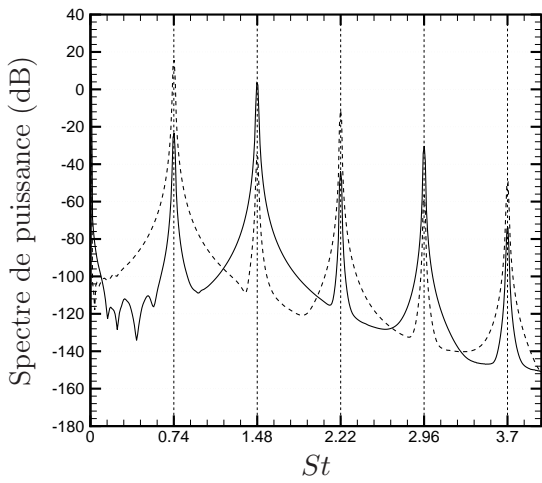


FIGURE E.38 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 150^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

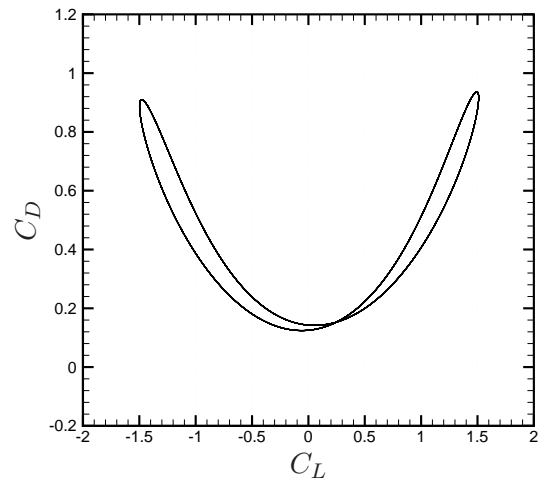
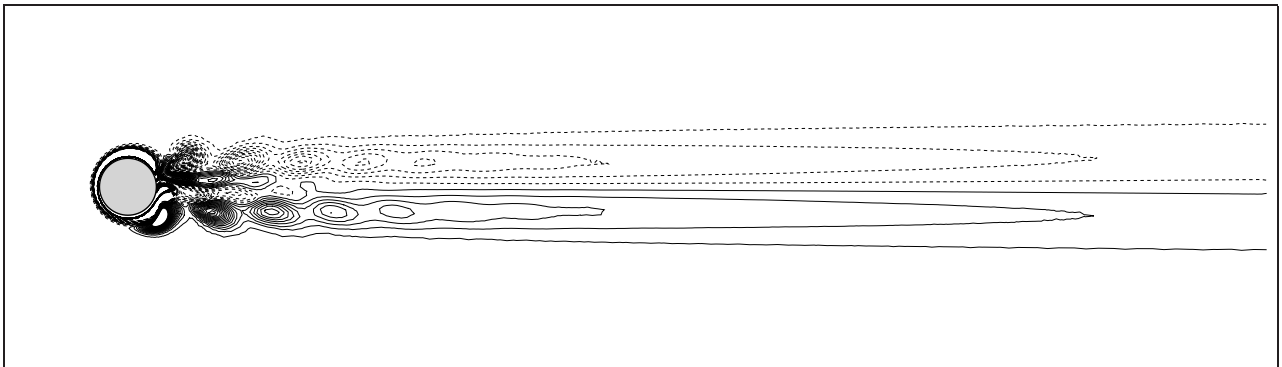


FIGURE E.39 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 150^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.40 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 150^\circ$ à $t = 150$.

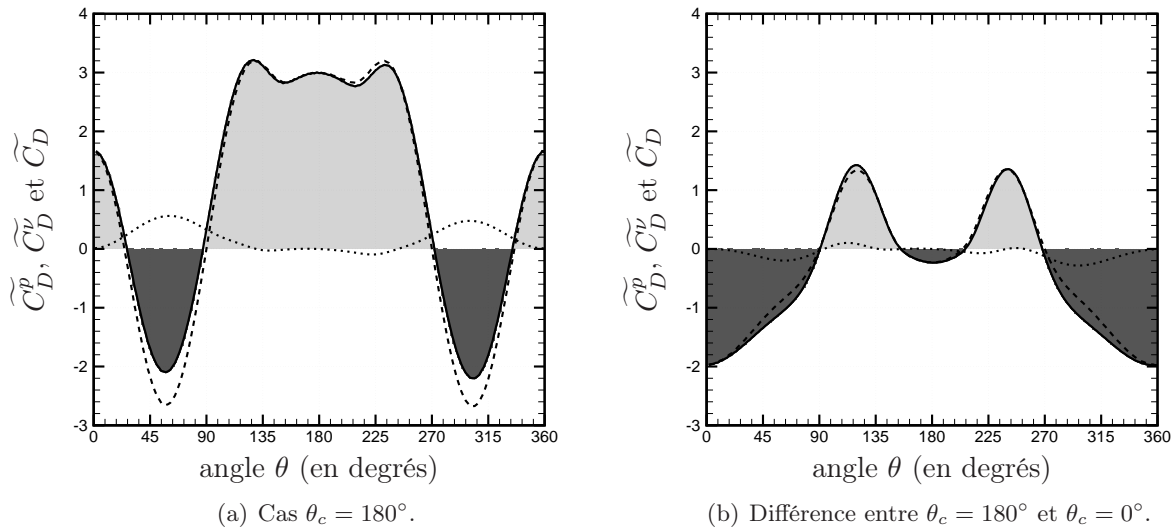
E.8 Contrôle amont défini par $\theta_c = 180^\circ$ 

FIGURE E.41 – Répartition du coefficient de traînée moyen sur le cylindre pour $\theta_c = 180^\circ$. — \tilde{C}_D , $\cdots \tilde{C}_D^\psi$ et $--- \tilde{C}_D^p$.

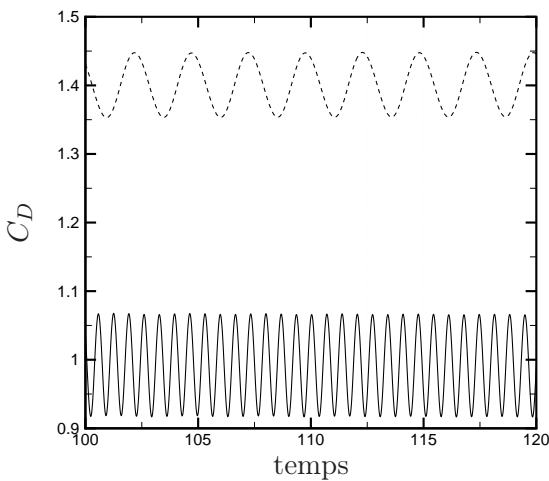


FIGURE E.42 – Comparaison de l'évolution temporelle de la traînée dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 180^\circ$ (traits pleins).

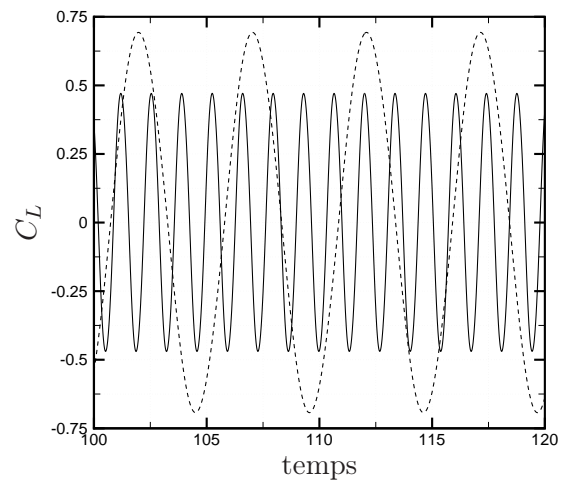


FIGURE E.43 – Comparaison de l'évolution temporelle de la portance dans le cas non contrôlé (traits discontinus) et dans le cas contrôlé $\theta_c = 180^\circ$ (traits pleins).

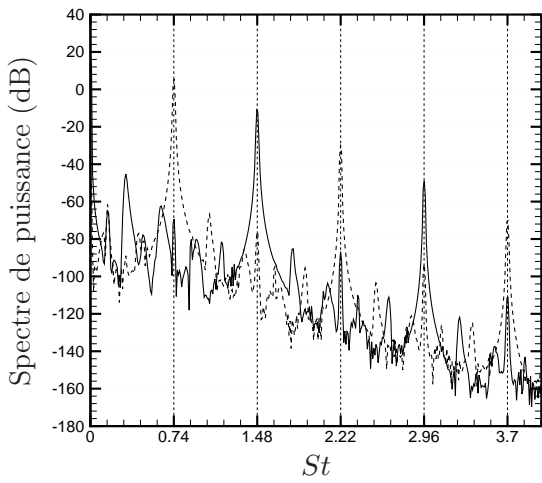


FIGURE E.44 – Spectres de puissance des coefficients aérodynamiques dans le cas contrôlé avec $\theta_c = 180^\circ$. Traits pleins : traînée, traits discontinus : portance.

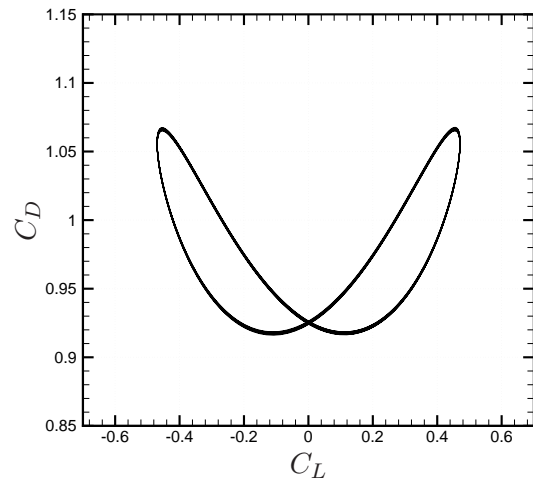
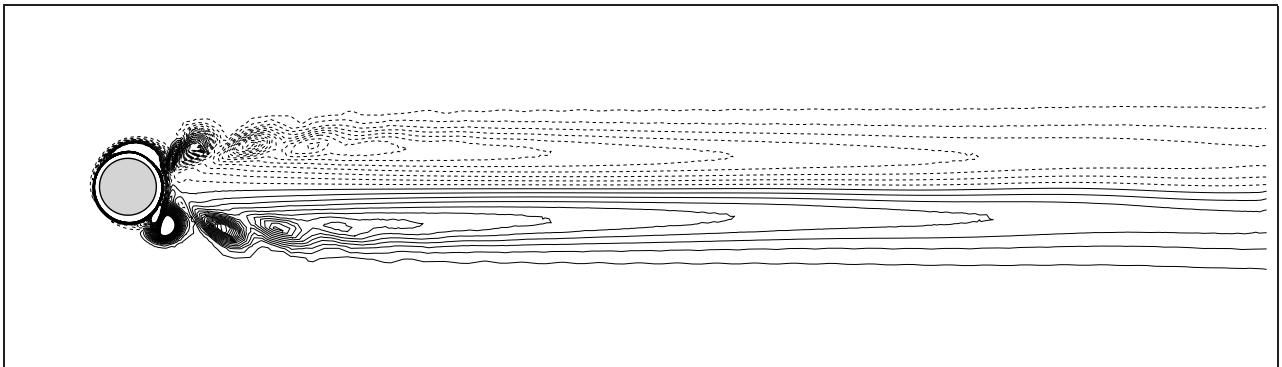


FIGURE E.45 – Courbe polaire : coefficient de traînée en fonction du coefficient de portance dans le cas contrôlé $\theta_c = 180^\circ$.



(a) Iso-contours de vorticités ω_z .



(b) Isobares.

FIGURE E.46 – Iso-contours de vorticités ω_z et isobares pour l'écoulement contrôlé avec $\theta_c = 180^\circ$ à $t = 150$.

E.9 Récapitulatif

θ_c (°)	\widetilde{C}_D	\widetilde{C}_D^p	\widetilde{C}_D^v
0	1,4006	1,1577	0,2429
30	1,3721	1,0254	0,3466
60	1,1593	0,7060	0,4534
90	0,6284	0,1057	0,5227
120	0,3439	-0,1764	0,5203
150	0,5320	0,1136	0,4184
180	0,9926	0,8182	0,1744

TABLE E.1 – Evolution du coefficient de traînée total, du coefficient de traînée de pression et du coefficient de traînée visqueux en fonction de l'angle θ_c définissant le contrôle.

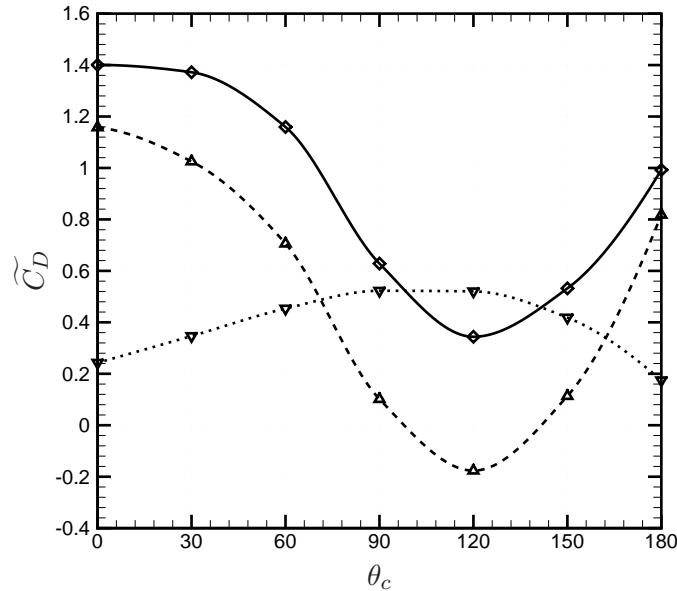


FIGURE E.47 – Evolution du coefficient de traînée total —, du coefficient de traînée de pression — — — et du coefficient de traînée visqueux \cdots en fonction de l'angle θ_c définissant le contrôle.

La figure E.47 montre que la réduction maximale du coefficient de traînée est obtenue pour $\theta_c = 120^\circ$. Par ailleurs, on observe sur la figure E.34(a), qui représente les isovaleurs de ω_z correspondantes, que l'écoulement est parfaitement symétrique et que l'épaisseur du sillage est extrêmement faible en comparaison avec les autres cas de contrôle considéré ici.