



HAL
open science

Comparaison des méthodes d'estimation du centre du sillage des éoliennes en mer modélisées en soufflerie par un disque poreux

Antonin Hubert, Boris Conan, Sandrine Aubrun

► To cite this version:

Antonin Hubert, Boris Conan, Sandrine Aubrun. Comparaison des méthodes d'estimation du centre du sillage des éoliennes en mer modélisées en soufflerie par un disque poreux. 25e Congrès Français de Mécanique, 2022, Nantes (France), France. hal-04712204

HAL Id: hal-04712204

<https://hal.science/hal-04712204v1>

Submitted on 27 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comparaison des méthodes d'estimation du centre du sillage des éoliennes en mer modélisées en soufflerie par un disque poreux

A. HUBERT^a, B. CONAN^b, S. AUBRUN^c

a. LHEEA, UMR CNRS 6598, Centrale Nantes, Nantes, France, antonin.hubert@ec-nantes.fr

b. LHEEA, UMR CNRS 6598, Centrale Nantes, Nantes, France, boris.conan@ec-nantes.fr

c. LHEEA, UMR CNRS 6598, Centrale Nantes, Nantes, France, sandrine.aubrun@ec-nantes.fr

Résumé

L'intérêt de plus en plus important pour les technologies d'éoliennes en mer telles que les éoliennes flottantes nécessite une plus grande compréhension de leur sillage, ce qui permet une meilleure optimisation des nouveaux parcs. De fait, plusieurs algorithmes de suivi de sillage permettant d'estimer le centre du sillage ont été développés avec une méthode de calcul différente. Trois de ces approches sont présentées dans ce papier et leurs résultats sont analysés afin d'observer les biais qu'elles peuvent impliquer lors, par exemple, de futures études sur le sillage d'éoliennes flottantes. Ainsi, les trois algorithmes sont la méthode par produit de convolution, la méthode par fit gaussien et celle par centres géométriques pondérés, avec pour cas d'étude celui d'un disque poreux fixe en soufflerie atmosphérique. D'autres 'sous-méthodes', c'est-à-dire liées à une des trois approches citées précédemment, sont aussi développées afin d'étoffer les résultats. Les algorithmes sont comparés par l'intermédiaire de la position des centres de sillage instantané, de la vitesse aux centres trouvés ou encore de la surface du sillage. Un coefficient de fiabilité est construit ici dans le cadre de l'algorithme par centres géométriques pondérés et est aussi comparé avec celui de la méthode par fit gaussien. Le champ moyen mobile, qui représente le sillage réel qu'une éolienne en aval, est aussi présenté pour chaque méthode. Finalement, les données montrent que, si les méthodes venant du même algorithme ont des résultats très proches, les algorithmes entre eux peuvent avoir de grandes différences.

Abstract

The growing interest in offshore wind technologies such as floating wind turbines requires a better understanding of their wake, which allows a better optimization of new wind farms. Indeed, several wake tracking algorithms to estimate the center of the wake have been developed with different computational methods. Three of these approaches are presented in this paper and their results are analyzed in order to observe the biases they may imply, for example, during future studies on the wake of floating wind turbines. Thus, the three algorithms are the convolution method, the Gaussian fit method and the weighted geometric center method, with the case study of a fixed porous disk in an atmospheric wind tunnel. Other 'sub-methods', i.e. linked to one of the three approaches mentioned above, are also developed to enrich the results. The algorithms are compared through the position of the instantaneous wake centers, the velocities at the found center or the wake surface. A reliability coefficient is constructed here for the

weighted geometric center algorithm and is also compared with the one of the Gaussian fit method. The mean mobile field, which represents the actual wake of a downstream wind turbine, is also presented for each method. Finally, the data show that, if the methods coming from the same algorithm have very close results, the algorithms between them can have significant differences.

Mots clés : Éolienne flottante ; Sillage ; Méandrement ; Algorithmes

1 Introduction

Au fil des années, les fermes d'éoliennes en mer deviennent une solution énergétique de plus en plus efficace grâce à l'absence d'obstacle, qui permet une meilleure efficacité grâce à des vents plus forts et plus constants. En effet, le facteur de charge, qui est le rapport entre l'énergie électrique produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite en fonctionnant à puissance nominale durant la même période, est de 23% en moyenne pour une éolienne terrestre et de 35% pour une éolienne en mer (les nouveaux modèles atteignant 30-35% sur terre et 42-55% en mer ([17]). De plus, le développement d'éoliennes flottantes permet de les placer encore plus loin des côtes, où les eaux sont trop profondes pour des éoliennes posées, permettant d'obtenir des puissances encore plus importantes. Pourtant les stratégies d'organisation des éoliennes sont souvent limitées par les interactions de sillages des éoliennes, ce qui ne permet pas d'avoir de parcs denses. Dans les fermes d'éoliennes, il est donc important de connaître le sillage que peut laisser une éolienne en amont sur celle placée en aval. En effet, l'éolienne en amont affecte le vent par un déficit de vitesse et par une augmentation de l'intensité de turbulence qui diminue l'efficacité énergétique et accélère l'usure des pales de l'éolienne en aval. Différentes études ont montré qu'en plus de ces caractéristiques stationnaires en moyenne du sillage, une composante instationnaire est responsable du mouvement du sillage lointain dans son ensemble à basse fréquence : le méandrement du sillage. *Espana et al.* [11] ont montré que le méandrement du sillage est dû aux structures turbulentes de grande échelle (de la taille de deux fois le diamètre de l'éolienne et plus) de la couche limite atmosphérique et semble exister principalement dans la direction horizontale plutôt que verticale. L'étude d'éoliennes en soufflerie est très complexe de part les lois qu'elle doit respecter. En général, pour obtenir un sillage réaliste, la conformité des dimensions du modèle est négligée, ce qui donne des pales d'éolienne plus épaisses que dans la réalité. Ainsi, plusieurs études ont montré que le disque poreux était un outil efficace qui pouvait représenter très simplement la physique du sillage lointain ($x/D > 4/5$) d'une éolienne ([1], [3], [20]).

Ce papier est dans la continuité de l'étude de *Schliffke et al.* [21], qui présente les différentes caractéristiques des profils de vitesses et d'intensités de turbulence en aval d'un disque poreux en mouvement, afin de représenter une éolienne flottante. Les résultats montrent la possibilité que la signature du mouvement imposé au modèle de l'éolienne puisse être récupérée dans son sillage lointain, ce qui implique que les mouvements de l'éolienne flottante influencent directement son sillage lointain (à $4.6D$ de distance du disque poreux dans ce cas). Maintenant, pour aller plus loin et ainsi mieux connaître le sillage d'une éolienne flottante, il est nécessaire de connaître plus de caractéristiques du sillage comme son centre, sa surface, la vitesse en son centre, etc... Pour récupérer ces informations, plusieurs méthodes existent dans la littérature : la méthode par centres géométriques pondérés ([11], [14], [18]), par produit de convolution ([7], [13]) ou encore par fit de gaussienne ([22]). Ainsi, cette étude a pour but de présenter ces trois approches, de les utiliser pour un cas de disque poreux fixe en soufflerie et de comparer leurs résultats

afin de mieux connaître leurs différences et les biais qu'elles pourraient avoir.

2 Installation expérimentale

2.1 Dispositif expérimental

Les différentes expérimentations sont effectuées dans la soufflerie à couche limite atmosphérique du Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique de Centrale Nantes (LHEEA). Cette soufflerie dispose d'une veine d'essai de $26m$ de long et une section $2m \times 2m$. Elle possède un ventilateur centrifuge couplé à un moteur électrique de $45kW$ qui permet d'atteindre des vitesses allant jusqu'à $10m/s$ au maximum. Une grille et des pointes en métal sont installées en entrée de la soufflerie et de la tôle perforée est placée au sol, à $15m$ de la section test, pour modéliser au mieux une couche limite atmosphérique marine. Les paramètres de cette couche limite sont détaillés dans le paragraphe §2.2.

De plus, le modèle utilisé lors des expérimentations représente l'éolienne flottante de $2MW$ du projet FLOATGEN, présentée par *Bayard-Lenoir* [4] et installée au site d'essai en mer de Centrale Nantes SEM-REV. C'est une éolienne avec un rotor de $80m$ de diamètre et d'une hauteur de moyeu de $60m$ (pour en savoir plus, l'article de *Choisnet* [6] présente plus de caractéristiques de l'installation). Ainsi, le modèle est un disque poreux (*actuator disk* ou *porous disk* en anglais) de $160mm$ de diamètre et d'une hauteur au moyeu de $120mm$, ce qui donne un ratio de blocage d'à peine 2% dans la section de test. Le principe du disque poreux est de simuler le gradient de pression entre un écoulement amont et un écoulement aval qu'il est possible de retrouver sur une éolienne réelle. La turbulence et la quantité de mouvement du sillage créées par le moyeu ou par le bout des pales ne sont pas modélisées par le biais de ce modèle, mais *Espana et al.* [11] et *Vermeer et al.* [24] ont montré que ces propriétés propres au sillage d'éolienne deviennent négligeables à grande distance $x/D > 5$. Le disque poreux possède une solidité de 57% telle que le sillage soit le même que celui d'une éolienne de mêmes dimensions, avec un coefficient de traînée $C_T \approx 0.65$ (les calculs sont précisés par *Aubrun et al.* [2]). Le modèle est donc placé dans la veine d'essai de la soufflerie et le champ de vitesse transversal à $x/D = 8$ est récupéré grâce au système SPIV, comme visible sur la figure 1.

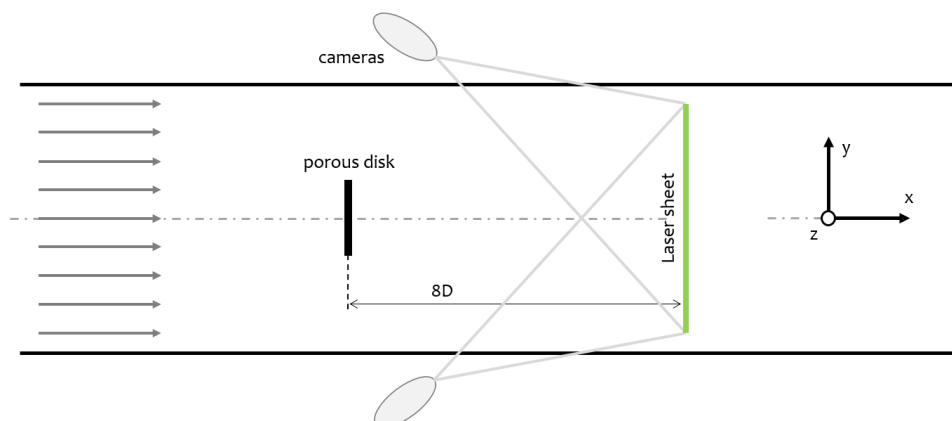


FIGURE 1 – Schéma de l'installation dans la soufflerie atmosphérique

2.2 Conditions d'essai

Afin d'avoir des résultats au plus proche de la réalité, l'écoulement atmosphérique marin en amont du modèle étudié est reproduit en respectant les recommandations de *Counihan* [8] ou des guides *EDSU* [10] et *VDI* [23] pour un terrain légèrement accidenté. Ainsi, les valeurs références pour obtenir un tel écoulement en amont incluent l'intensité de turbulence I (I_u , I_v et I_w), l'échelle intégrale de longueur L_u^x , la longueur de rugosité z_0 , l'exposant du profil α et la hauteur de déplacement d_0 . Les valeurs réelles et celles recherchées sont résumées dans le tableau 1, qui vient directement des mesures à la sonde Cobra de l'article de *Schliffke et al.* [21].

TABLE 1 – Caractéristiques de l'écoulement recherché et de l'écoulement incident dans la soufflerie (directement récupérées de l'article de *Schliffke et al.* [21])

Quantité	Cible	Modélisée
z_0 [m]	10^{-5} to 5×10^{-3}	5.5×10^{-6}
α [-]	0.08 to 0.12	0.1
L_u^x [m]	≈ 250	200
d_0 [m]	≈ 0	0

2.3 Méthodes d'estimation du centre du sillage

L'imagerie récupérée grâce à la SPIV permet d'obtenir des champs de vitesse selon les trois directions (u, v, w) dans le plan transversal (y, z) à 8 diamètres en aval du modèle dans la soufflerie. La figure 2, sur l'image de gauche, montre le champ ainsi récupéré où le sillage du modèle est bien visible (zone rouge). Ainsi, en retirant le champ d'entrée récupérée par la méthode expliquée dans le paragraphe 2.1, on récupère le champ de déficit de vitesse. Le résultat est ensuite rapporté au champ d'entrée pour obtenir le champ du déficit de vitesse normalisé.

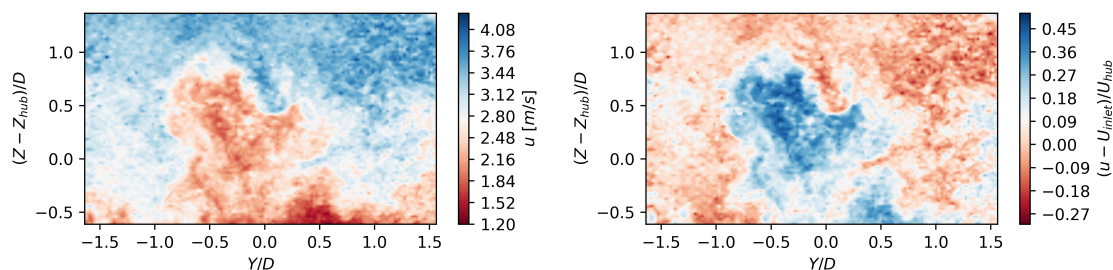


FIGURE 2 – Champs de vitesse (à gauche) et du déficit de vitesse normalisé (à droite) à 8D du modèle

Les zones de déficit de vitesse obtenues après expérimentation, définies comme le sillage instantané du modèle, permettent de caractériser le sillage global du cas étudié. L'un des buts de cet article est donc de comparer les différentes méthodes afin de connaître la plus précise et la plus fiable d'entre elles. Pour cela, différents paramètres sont étudiés dans cette section :

- (y_c, z_c) [m × m] : le centre du sillage instantané
- $S_{sillage}$ [m²] : la surface du sillage instantané
- U_c [m/s] : la vitesse au centre du sillage

Dans les paragraphes suivants, les algorithmes de calcul du centre du sillage sont présentés.

La méthode par centres géométriques pondérés

La première, et aussi la plus simple, méthode utilisée est la méthode par Centres Géométriques Pondérés (CGP), Weighted Geometric-Center (WGC) en anglais. Elle fonctionne comme la méthode du calcul d'un barycentre en considérant le sillage comme étant la zone où le déficit de vitesse est le plus important. Cette approche est utilisée par exemple par *Howland et al.* [14] pour étudier l'allure du sillage d'un disque poreux avec un angle de lacet. Elle est définie par :

$$\forall \Delta u_i > \Delta u_{thresh} : \begin{cases} y_c = \frac{\sum_i \Delta u_i \cdot y_i}{\sum_i \Delta u_i} \\ z_c = \frac{\sum_i \Delta u_i \cdot z_i}{\sum_i \Delta u_i} \end{cases}$$

avec Δu_i et (y_i, z_i) respectivement le déficit de vitesse et la position du point i et Δu_{thresh} un déficit de vitesse seuil définie en amont par l'utilisateur.

L'intérêt du déficit de vitesse seuil est de ne pas prendre en compte les valeurs inutiles, sachant qu'elles ne peuvent pas être une partie intégrante du sillage. Cela permet à ce que le résultat ne soit pas biaisé par la taille du domaine. Cette valeur est en général choisie par rapport à un déficit de vitesse ou à un champ de déficit de vitesse référence. Cette méthode a l'avantage d'être rapide et efficace mais présente quelques défauts. En effet, *Trujillo et al.* [22] ont remarqué que des erreurs peuvent se produire lorsqu'il existe des zones de faible vitesse en même temps que le sillage, causés par des sillages proches, des structures turbulentes dont les dimensions spatiales caractéristiques sont comparables à celles du déficit du sillage ou encore simplement par des erreurs de mesures.

Le résultat des expérimentations a montré que l'écoulement était très bruité et que le sillage n'était que très rarement un bloc uni, ressemblant à une gaussienne. L'image de droite de la figure 3 montre un exemple où une grande zone de sillage n'est pas récupérée. Aussi, pour prendre en compte cette zone du sillage et pour atténuer le bruit, l'image du champ de déficit de vitesse a été convoluée avec un filtre de Gauss de paramètre $\sigma = 3$, c'est-à-dire avec une fonction gaussienne 2D telle que :

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right)$$

Ainsi, les deux images de gauche (a) de la figure 3 montrent le champ de déficit de vitesse avec la vitesse seuil tracée en trait plein noir, l'image du dessus étant le champ original et l'image du dessous le champ convolué. Ensuite, le champ est binarisé (b) : en blanc les pixels ayant un déficit de vitesse inférieur au déficit de vitesse seuil Δu_{thresh} et en noir ceux avec un déficit de vitesse supérieur (images du centre 3). Par la suite, un code inspiré par les algorithmes "ligne de partage des eaux", présenté par *Beucher* [5] ou par *Ruet* [19], permet d'éliminer les zones 'parasites' du champ en unissant le sillage. Cela permet de réduire le risque d'erreur de centre de sillage comme expliqué par *Trujillo et al.* [22] lors de leur utilisation du Lidar. Le résultat est visible sur les images de droite (c) de la figure 3. Enfin, seuls les pixels considérés dans la zone du sillage (pixels en noir) sont pris en compte dans le calcul du centre du sillage expliqué plus tôt. Le principal problème de l'élimination des zones 'parasites' est que l'algorithme ne prend que les pixels dans la plus grande zone de sillage. Ainsi, comme montré sur la figure 3, le calcul du centre de masse peut ne pas prendre en compte une autre zone proche de la première. La méthode modifiée avec filtre gaussien permet donc aussi de récupérer ces zones parfois importantes. Ce principe de calcul est aussi utilisé par *Espana et al.* [11] pour l'étude de centre de sillage d'un disque poreux selon un plan longitudinal (plan (x,y) dans le repère utilisé ici).

En plus de la méthode générale et de celle avec utilisation du filtre gaussien, une troisième approche est étudié ici : la méthode par centres géométriques pondérés modifiée. L'idée est de donner plus d'influence

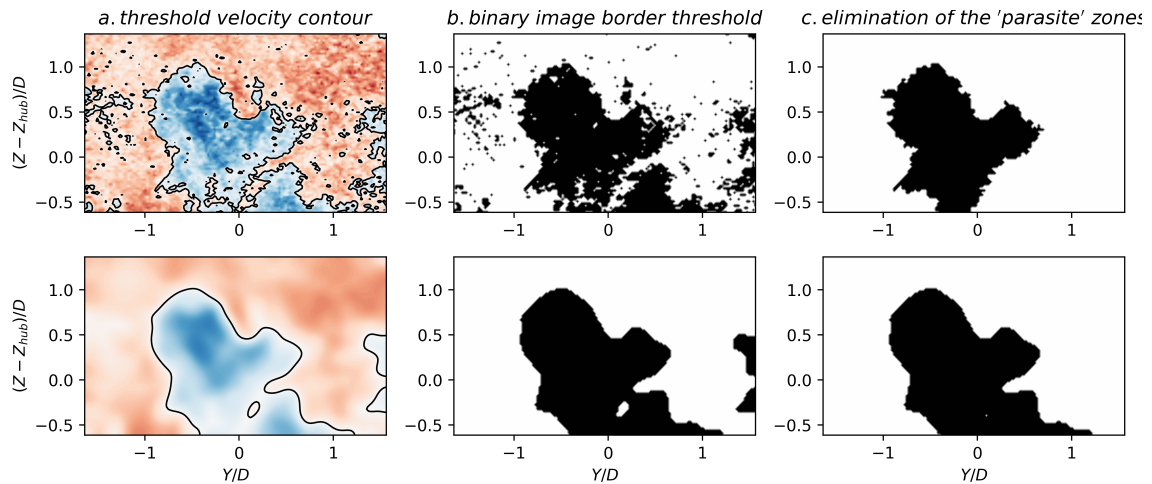


FIGURE 3 – Traitement par la méthode par centres géométriques pondérés : a.récupération du champ de déficit de vitesse et du contour par la vitesse seuil, b.binarisation de l'image, c.élimination des zones 'parasites' du champ. Les images du dessus sont pour la méthode originale et les images du dessous pour la méthode avec filtre gaussien

aux grands déficit de vitesse par l'utilisation de l'exponentielle. Cette approche est utilisée par *Muller et al.* [18] pour étudier le méandrement du sillage d'une éolienne. Ainsi, la méthode reste globalement la même mais le calcul du centre de masse devient :

$$\forall \Delta u_i > \Delta u_{thresh} : \begin{cases} y_c = \frac{\sum_i e^{\Delta u_i} y_i}{\sum_i e^{\Delta u_i}} \\ z_c = \frac{\sum_i e^{\Delta u_i} z_i}{\sum_i e^{\Delta u_i}} \end{cases}$$

Maintenant, afin de savoir si le résultat trouvé par la méthode est réellement pertinent lors de l'analyse des résultats, il est nécessaire d'avoir un critère de fiabilité. Le principe du critère utilisé ici est d'associer une valeur d'éirement du sillage pour chaque image. Comme le sillage peut être considéré comme une ellipse dans le plan transversal, le critère est calculé par le pourcentage de pixel du sillage dans l'ellipse inscrite dans le rectangle des valeurs de y et z minimums et maximums. La figure 4 montre un exemple du calcul de ce pourcentage dans le cadre de la méthode originale (image de gauche) et de la méthode floutée avec le filtre gaussien (image de droite). Les traits droits en pointillés représentent les y et z minimums et maximums de l'image, la partie du sillage hachurée montre la zone dans l'ellipse inscrite dans le rectangle des minimums/maximums. Le critère de fiabilité est donc calculé par :

$$R_{WGC} = 100 \times \frac{\text{surface du sillage dans l'ellipse}}{\text{surface de l'ellipse}}$$

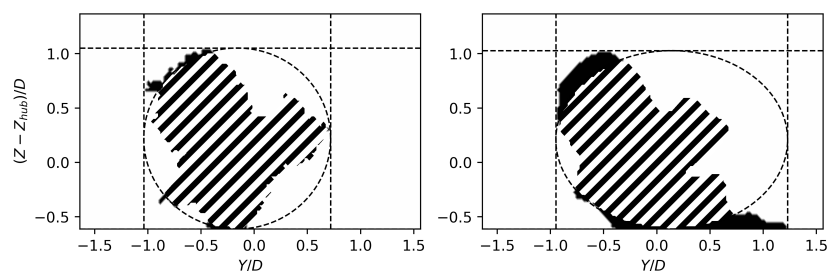


FIGURE 4 – Définition du critère de fiabilité pour la méthode des centres géométriques pondérés de l'approche générale (à gauche) et de l'approche avec convolution par filtre gaussien (à droite)

L'avantage de cette méthode est qu'elle est robuste grâce à l'algorithme de ligne de partage des eaux et qu'elle permet d'avoir la surface $S_{sillage}$ très facilement, connaissant le nombre de pixel dans le sillage. De plus, le temps de calcul est relativement court, par rapport à la méthode par produit de convolution par exemple, surtout en utilisant un filtre gaussien.

La méthode par produit de convolution

Le produit de convolution est un opérateur mathématiques bilinéaire et un produit commutatif qui, à deux fonctions f et g , associe la fonction $f * g$ qui, en chaque point, correspond à l'intégrale d'une des fonctions autour de ce point pondéré par la deuxième. Il est défini sous sa forme temporelle par :

$$(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-t)g(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(x-t)dt$$

ou dans la forme discrète par (avec N le nombre d'itérations total) :

$$(f * g)(n) = \sum_{m=1}^N f(n-m)g(m)dt = \sum_{m=1}^N f(m)g(n-m)dt$$

Finalement, le produit de convolution permet de connaître la corrélation de deux fonctions en tout point de leur domaine de définition. Dans le cas d'un sillage, il est intéressant de réaliser un produit de convolution entre le sillage instantané mesuré et une fonction gaussienne 2D. Néanmoins, ?? a montré que, par rapport au champ de vitesse seul, le produit de convolution entre une fonction gaussienne et le champ de puissance disponible garantissait des résultats plus précis car ce dernier donnait plus d'importance aux grands déficits de vitesse (points où le centre du sillage devrait logiquement se trouver). L'approche est expliquée par la figure 5. Ainsi, dans un premier temps, la méthode consiste à calculer le champ de puissance du vent disponible, défini par :

$$p = \frac{1}{2}u \cdot |u|^2$$

où u est la composante longitudinale de la vitesse (en m/s).

Ensuite, la fonction gaussienne est construite :

$$f_G(y, z) = A.exp \left[- \left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

avec $A = -1$ le coefficient pré-exponentiel et $\sigma_y = \sigma_z = D/2$ les paramètres représentant les variances associées à l'axe Y et Z .

Et enfin, le point maximum du produit de convolution entre le champ de puissance disponible et la fonction gaussienne est calculée. Il correspond au lieu où les deux fonctions devrait avoir les formes les plus proches et donc où devrait se situer le centre du sillage :

$$(y_c, z_c) = argmax(p * f_G)$$

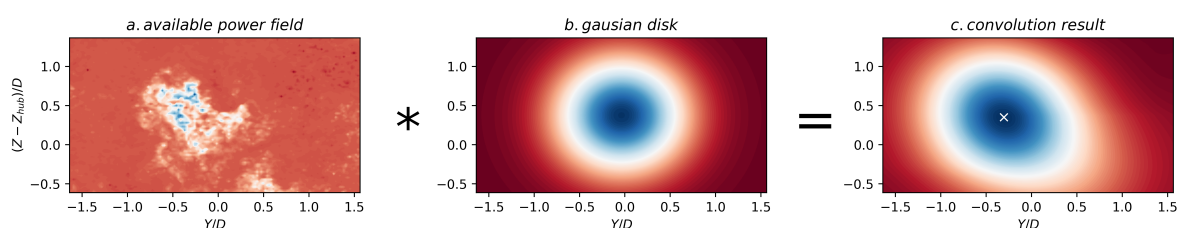


FIGURE 5 – Traitement par la méthode par produit de convolution : l'image a. présente le champ de puissance disponible, l'image b. représente le disque gaussien utilisé pour la convolution et l'image c. le résultat de la convolution (le point est le centre du sillage trouvé)

Cette méthode a déjà été utilisée par *Coudou et al.* [7] et *Garcia et al.* [13] pour retrouver le centre du sillage d'une éolienne. Elle possède l'avantage d'être très facile à mettre en place, d'être robuste et d'obtenir de bons résultats. Maintenant, cette approche possède aussi des inconvénients, comme le fait qu'une hypothèse demande à ce que le sillage instantané ressemble à la même fonction gaussienne tout au long de l'expérience. Il est possible de modifier la taille de la fonction gaussienne en exploitant une propriété du laplacien de la convolution : plus le laplacien au maximum de la convolution est petit, plus les deux fonctions convoluées sont proches. Ainsi, il suffit de modifier le paramètre de la fonction gaussienne σ et vérifier le laplacien au centre du sillage trouvé pour obtenir le rayon optimal et donc le rayon le plus proche du sillage réel. Cette propriété est utilisée par *Coudou et al.* [7] mais ici le sillage instantané ne ressemble pas suffisamment à une gaussienne pour que cette propriété fonctionne. De plus, les autres inconvénients de cette méthode est qu'elle ne possède pas de critère de fiabilité simple à mettre en place, il est donc difficile de savoir si le résultat peut être pris en compte, et que le produit de convolution prenant du temps, le processus est long comparé aux autres méthodes.

En plus de la méthode générale décrite ci-dessus, une autre approche par la méthode par produit de convolution est expérimentée. Cette deuxième approche reste la même et n'est modifiée que par les fonctions utilisées dans le produit de convolution. En effet, au lieu de construire une fonction gaussienne 2D générale, la fonction convoluée avec le champ de puissance disponible est un fit gaussien du champ moyen mobile de puissance disponible. La méthode pour calculer ce champ est expliquée en détail dans le paragraphe 3.2.

La méthode par fit gaussien

La troisième et dernière méthode est l'approche par fit gaussien. Le principe est de rapprocher au maximum le sillage instantané à une fonction gaussienne 2D par la méthode des moindres carrés en optimisant ses paramètres. La position du centre du sillage (y_c, z_c) est alors récupérée dans la définition de la fonction gaussienne 2D :

$$f_G(y, z) = A.exp \left[- \left(\frac{(y - y_c)^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z - z_c)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] + B$$

avec B une constante (*offset*).

Cette méthode est utilisée par *Trujillo et al.* [22] qui ont étudié les dynamiques du sillage d'éoliennes et qui y voient une méthode moins impactée par les petites fluctuations du champ de vitesse et par les interactions entre sillages d'éoliennes. Elle est très proche de celle par produit de convolution par l'hypothèse d'un sillage de la forme d'une fonction gaussienne 2D. Néanmoins, elle a l'avantage de faire une estimation de la surface du sillage instantané, par les σ_y et σ_z associés à la fonction de Gauss, et de posséder un critère de qualité intrinsèque, par le coefficient de détermination linéaire de Pearson (r^2) défini par la formule :

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

où n est le nombre de mesure, y_i la valeur de la i^{me} mesure, \hat{y}_i la valeur prédite correspondante et \bar{y} la moyenne des mesures.

Finalement, les méthodes sont résumés dans le tableau 2 avec leur nom respectif pour le reste de l'étude.

TABLE 2 – Tableau des différentes méthodes utilisées dans cette étude

Convolution 1	Par produit de convolution avec une fonction gaussienne
Convolution 2	Par produit de convolution avec le champ de vitesse moyenne mobile
Fit gaussien	Par fit gaussien
CGP 1	Par centres géométriques pondérés
CGP 2	Par centres géométriques pondérés avec filtre gaussien
CGP 3	Par centres géométriques pondérés avec filtre gaussien et pondération exponentielle

3 Analyse des résultats

3.1 Centre du sillage

Dans un premier temps, le résultat des centres de sillage en fonction des différentes méthodes est présenté sur la figure 6. Chaque point de la figure représente une densité de centres du sillage instantané retrouvés à l'aide de chaque approche : plus le point est jaune, plus le nombre de centres de sillage trouvé est important. Aussi, la figure 7 complète l'analyse de la figure 6 en montrant les statistiques des résultats tels que la moyenne, les écarts-types, le coefficient de symétrie, le coefficient d'aplatissement et le temps de calcul de chaque méthode.

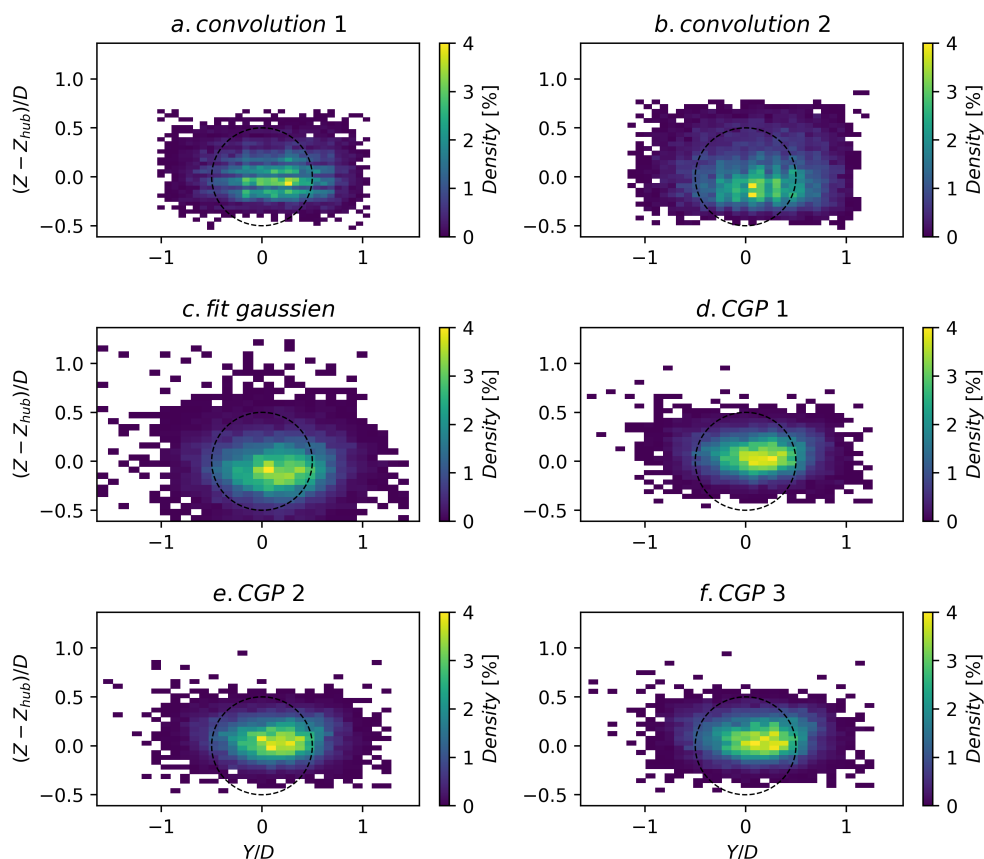


FIGURE 6 – Distribution de position du centre du sillage selon les différentes méthodes, le cercle en pointillé représente l'emplacement du disque poreux

Ainsi, les deux méthodes par produit de convolution, tout comme les trois méthodes par centres géométriques pondérés, montrent des similitudes. En effet, la position moyenne des centres de sillage ins-

tantané est très proche pour les sous-méthodes (la plus grande différence entre sous-méthodes est d'un peu moins de $0.018D$ pour la différence entre la méthode CGP 1 et CGP 3 sur l'axe Z). Aussi, à part quelques différences, notamment sur le coefficient d'aplatissement (*kurtosis* en anglais) sur l'axe Z pour les deux méthodes par produit de convolution, les autres moments de la position du centre du sillage restent très proches inter-méthodes (fig.7). De plus, les coefficients de corrélation entre les différentes méthodes étudiées ici, visibles dans le tableau 3, montrent bien la similitude des sous-méthodes entre elles. Alors que les coefficients de corrélation des méthodes venant du même algorithme (les trois premières lignes) sont en moyenne de plus de 0.9, ceux inter-méthode sont d'environ 0.6. Les tendances des positions du centre du sillage (y_c, z_c) entre les trois principaux algorithmes montrent des similarités, leurs coefficients de corrélation sont compris entre 0.87 et 0.71 pour les plus bas, ce qui reste proche de 1 comparé aux autres valeurs récupérés lors de ces expérimentations. De plus, les points de positions de centre de sillage montrent bien un étalement selon l'axe Y, surtout pour les méthodes par centres géométriques pondérés, l'écart-type moyen pour toutes les méthodes est d'environ 0.38 selon Y et d'à peine 0.19 selon Z. Cela peut être expliqué par le fait que le méandrement du sillage semble être moins important selon l'axe Z, comme suggéré par *Espana et al.* ([11]).

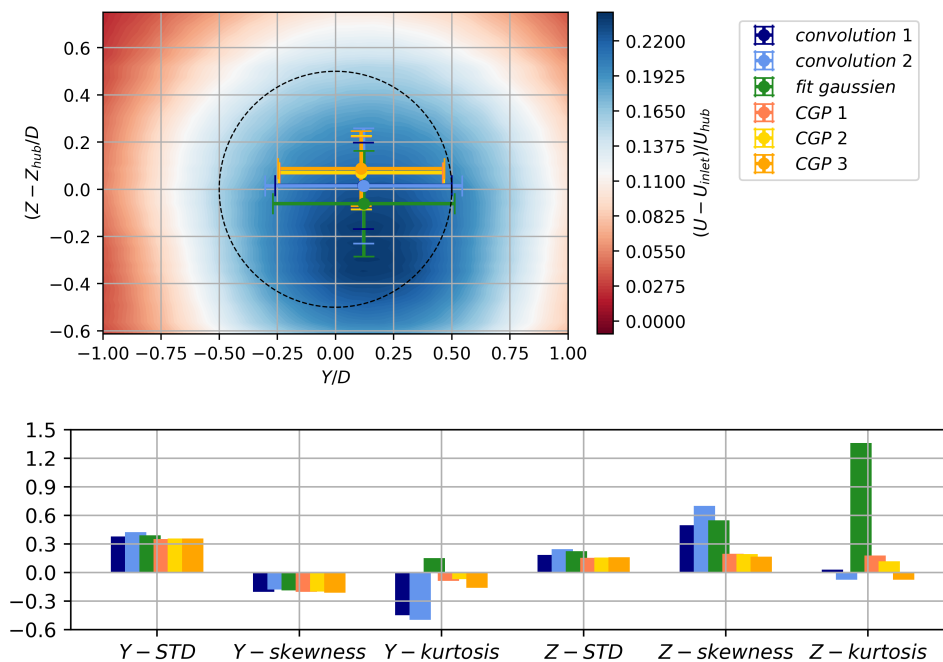


FIGURE 7 – Statistiques des résultats de position du centre du sillage pour les différentes méthodes

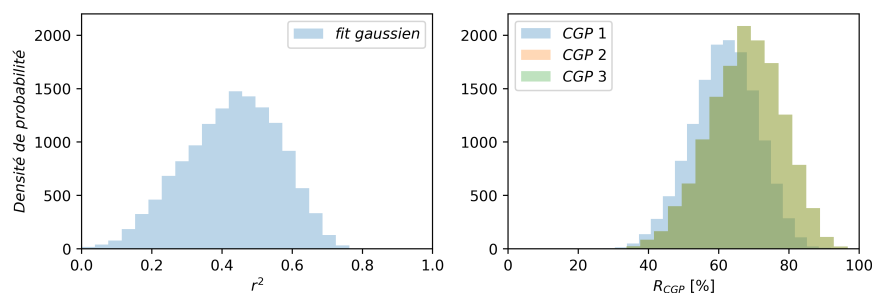
Alors que les centres de sillage des autres algorithmes sont plus concentrés, avec que quelques points éloignés, ceux des méthodes par fit gaussien sont étalés sur le plan de la PIV. La méthode de calcul pour le fit gaussien est plus influencé par les zones de grands déficits de vitesse et moins par la taille du sillage, contrairement au calcul pour les méthodes par CGP où la taille du sillage est très importante. Le coefficient de symétrie (*skewness*) représente la symétrie d'une courbe, un coefficient égal à zéro signifie que la courbe est parfaitement symétrique. Ainsi, si les résultats des méthodes par CGP semblent symétriques, les résultats des trois autres méthodes ont une dissymétrie vers les Z négatifs. Ces trois approches trouvent donc des centres plus étalés loin du mur, par exemple lorsqu'une zone de faible vitesse se détache du sillage. De plus, le coefficient d'aplatissement (*kurtosis*) représente l'aplatissement d'une courbe, un coefficient égal à zéro définit la courbe normale. Les méthodes par CGP ont un coefficient de symétrie et un coefficient d'aplatissement proches de 0, ce qui signifie que la distribution de ces trois ap-

TABLE 3 – Coefficients de corrélation entre les différentes méthodes pour les différentes caractéristiques du centre du sillage et du sillage

Méthodes	Y_c	Z_c	U_c	$S_{sillage}$	Coef. fiabilité
Convolution 1	0.96	0.93	0.57	-	-
Convolution 2					
CGP 1	0.98	0.97	0.90	0.98	0.87
CGP 2					
CGP 1	0.97	0.95	0.78	0.98	0.87
CGP 3					
Convolution 1	0.85	0.76	0.47	-	-
Fit gaussien					
Convolution 1	0.85	0.74	0.45	-	-
CGP 1					
CGP 1	0.87	0.71	0.44	0.38	0.42
Fit gaussien					

proches est normale en Y comme en Z. Tandis que la méthode par fit gaussien a une distribution proche de la loi logistique et asymétrique vers les négatifs en Z, logiquement dû à la présence du sol, mais reste proche d'une loi normale symétrique en Y.

Les critères de fiabilité des différentes méthodes sont visibles sur la figure 8, avec à gauche le critère de fiabilité de la méthode du fit gaussien et à droite le pourcentage de sillage dans une ellipse, calculé selon l'explication §2.3, pour les méthodes par CGP. Les r^2 de l'approche par fit gaussien sont assez bas, en moyenne de 0.43, ce qui signifie que l'hypothèse d'un champ de déficit de vitesse proche d'une gaussienne n'est pas vérifiée et donc que les résultats trouvés par cette méthode sont potentiellement faux. De plus, les méthodes CGP montrent des pourcentages du sillage entre moins de 20 à plus de 90%, avec une moyenne d'environ 62% pour la méthode par CGP 1 et de plus de 67% pour les méthodes par CGP 2 et 3. Les deux méthodes CGP 2 et CGP 3 ont des distributions de critère de fiabilité exactement égales : le fait d'utiliser la pondération à l'exponentielle dans les calculs ne modifie pas les valeurs du pourcentage du sillage.

FIGURE 8 – Distribution des critères de fiabilité des différentes méthodes. r^2 de la méthode par fit gaussien (à gauche) et pourcentage du sillage des méthodes par CGP (à droite)

3.2 Champ moyen mobile

Le champ de déficit de vitesse moyen mobile représente le sillage réel qu'une éolienne en aval verrait à chaque instant. Ce champ est très intéressant pour connaître les caractéristiques du sillage directement appliqué sur les pâles d'une potentielle éolienne en aval, telles que les charges, le champ de puissance

disponible, l'intensité de turbulence, etc... Ainsi, le champ de puissance disponible est récupéré pour chaque itération temporelle et, pour chaque méthode, est centré sur le centre du sillage instantané calculé. Les champs sont ainsi moyennés temporellement. Ainsi, soit P_n le champ de puissance disponible à l'itération temporelle n et N le nombre total d'itérations temporelles, la formule obtenue est la suivante :

$$P(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N P_n(y - y_c, z - z_c)$$

où (y_c, z_c) est le centre du sillage récupéré pour chaque méthode. La formule peut être écrite dans la forme discrète par :

$$P[i, j] = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{n=0}^N P_n[i - i_c, j - j_c]$$

avec $[i_c, j_c]$ le centre discret du sillage instantané et N_{ij} la matrice telle que $N_{ij}[i, j]$ représente la somme de champ additionné au point $[i, j]$.

Les résultats de ces calculs sont montrés sur la figure 9, où les contours du champ moyen mobile sont visibles en pointillés et ceux de la fonction gaussienne 2D fittée sont en traits pleins. Le r^2 de ce fit est noté entre parenthèses dans le titre de chaque image et les paramètres de la fonction gaussienne sont dans le tableau 4. De plus, les centres du champ moyen et de la gaussienne sont notés respectivement d'un point bleu et d'une croix rouge. Les valeurs des différents contours représentent les vitesses (du rouge au bleu) : $[0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.3]$. Les coefficients de Pearson (r^2) sont tous très proches de 1, néanmoins les deux méthodes par produit de convolution montrent une légère baisse. Ces deux dernières approches ont leur centre de champ moyen mobile éloigné du centre de la fonction gaussienne, pour la méthode convolution 1 l'écart est de plus de $0.1D$ selon l'axe Y et d'environ $0.12D$ selon l'axe Z.

TABLE 4 – Paramètres de la fonction gaussienne fittée au champ de moyenne mobile

Méthode	r^2	A	B	σ_y	σ_z	Déficit max	y_c/D	z_c/D
Convolution 1	0.977	0.30	0.02	0.49	0.62	0.32	-0.04	0.33
Convolution 2	0.953	0.29	0.03	0.46	0.60	0.36	-0.04	0.38
Fit gaussien	0.993	0.29	0.00	0.55	0.57	0.29	-0.02	0.38
CGP 1	0.993	0.29	0.00	0.58	0.69	0.29	-0.02	0.16
CGP 2	0.987	0.29	0.00	0.59	0.70	0.29	-0.02	0.16
CGP 3	0.986	0.29	0.00	0.60	0.72	0.28	-0.01	0.14

Les paramètres des fonctions gaussiennes 2D sont très proches les uns des autres : le coefficient pré-exponentiel A sont presque tous égaux, la valeur *offset* B n'a que des différences de moins de 0.03. Les autres paramètres sont globalement similaires, avec néanmoins quelques différences entre méthodes. En effet, les approches par produit de convolution possèdent des valeurs de σ moins grandes ce qui montre que le sillage moyen mobile est plus étroit, mais possède un déficit maximum plus important (une différence relative d'environ de 20% pour la convolution 2 par rapport aux autres algorithmes). Maintenant, le calcul du champ moyen mobile fait en sorte de placer le centre de chaque sillage instantané au centre de l'image de la PIV, c'est-à-dire à $-0.038D$ selon Y et à $0.376D$ selon Z. Ainsi, le déficit maximum de vitesse devrait logiquement se trouver à ces valeurs, ce qui est le cas selon l'axe Y. Cependant, sur l'axe Z, si les résultats des méthodes par produit de convolution et par fit gaussien ne sont pas éloignés de $0.376D$ (avec des différences allant de $0.01D$ à moins de $0.05D$), les résultats de l'approche par centres géométriques pondérés montrent des différences beaucoup plus importantes (de l'ordre de $0.25D$). Cela peut être justifié par le fait que, par rapport aux autres approches, les méthodes par CGP sont moins influencées par des grandes zones de déficit de vitesse et plus par la taille du sillage. Néanmoins, la mé-

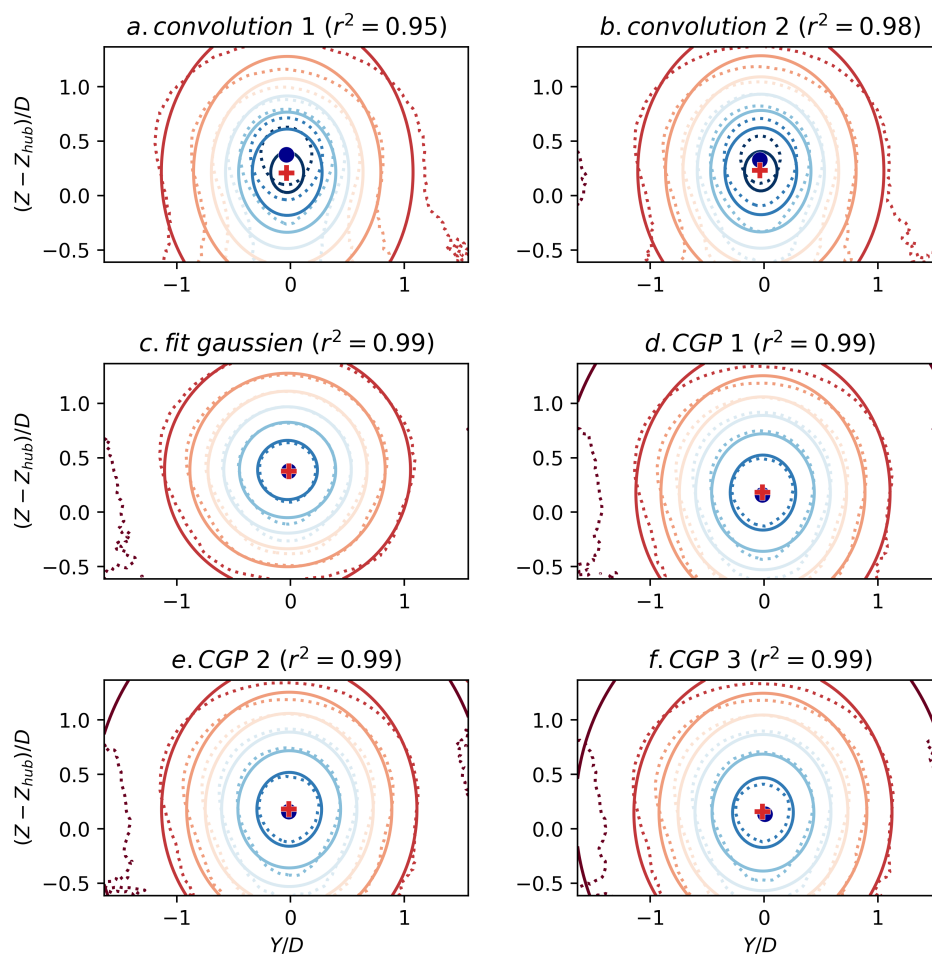


FIGURE 9 – Champs de moyenne mobile pour les six différentes méthodes avec leur fit de gaussienne respectif. Le r^2 est noté en haut à gauche de chaque image et les centres du champ moyen mobile (point bleu) et de la gaussienne (croix rouge) sont notés

thode CGP 3 utilise le déficit de vitesse à l'exponentielle dans son calcul, ce qui devrait mettre en avant les grands déficit de vitesse. Ici, le résultat montre que la méthode CGP 3 est l'approche qui éloigne le plus le centre du sillage moyen mobile au maximum du déficit de vitesse. Finalement, une synthèse des caractéristiques de chaque méthode utilisée ici est écrite en conclusion.

4 Conclusion

La technologie des éoliennes flottantes devrait être de plus en plus utilisée dans les années à venir, que ce soit pour répondre à la demande d'électricité toujours croissante ou pour changer de mixte énergétique. Ainsi, pour optimiser les futures fermes et décider des positions des éoliennes, il est important de connaître le sillage qu'elles pourraient potentiellement avoir. Pour cela, plusieurs paramètres du sillage sont importants à connaître, que ce soit le centre du sillage instantané, sa surface ou encore la vitesse en son centre. Pour récupérer ces données, plusieurs méthodes de calculs ont été mis au point, dont trois globales étudiés ici : l'approche par produit de convolution, par fit gaussien ou encore par centres géométriques pondérés. Des sous-méthodes ont aussi été présentées, utilisées dans d'autres articles et permettant d'étoffer les résultats et les analyses à en tirer. Ainsi, le but de ce papier est de comparer ces méthodes et sous-méthodes entre elles afin de mieux connaître les biais qu'elles peuvent apporter.

Ainsi, les résultats entre sous-méthodes sont très similaires, avec des coefficients de corrélation pour les paramètres du sillage trouvés proche de 1, contrairement aux coefficients de corrélation entre méthodes qui sont en moyenne de 0.6. Néanmoins, les coefficients de corrélation entre les trois différentes méthodes (convolution/fit gaussien ; convolution/CGP ; CGP/fit gaussien) soulignent le fait que les tendances de la position du centre du sillage restent proches, avec une valeur de 0.8.

Maintenant, chaque méthode donnent des résultats légèrement différents de part leur méthode de calcul et des hypothèses impliquées. Les approches par produit de convolution font l'hypothèse d'un sillage instantané proche d'une fonction gaussienne 2D, ce qui est vrai pour un sillage moyenné comme montré sur la figure 9. Ces méthodes donnent des centres de sillage instantané statistiquement distribués vers les Z positifs. Aussi, les deux champs moyens mobiles sont plus larges et possèdent une valeur de déficit maximal de vitesse plus important que celle des autres approches. Les méthodes par produit de convolution donnent des résultats qui ne semblent pas incohérents mais ont comme inconvénient de ne pas posséder de critère de fiabilité.

La méthode par fit gaussien, tout comme les approches par produit de convolution, retrouve aussi des centres de sillage instantané plus éparses et allongé vers les Z positifs. C'est la seule méthode à avoir des centres de sillage aussi loin du centre du plan de la PIV, certains résultats sont même en dehors de ce plan (ce qui n'est pas montré dans ce papier). Néanmoins, elle a l'avantage de posséder un critère de fiabilité intrinsèque, le coefficient de Pearson, qui est facilement calculable. Cependant, le calcul du fit gaussien fait l'hypothèse d'un sillage instantané proche d'une gaussienne 2D, ce qui n'est pas toujours vérifié. En effet, dans ces calculs, la méthode par fit gaussien possède un r^2 moyen de 0.43.

Les approches par centres géométriques pondérés ont des centres de sillage très condensés par rapport aux autres méthodes, les CGP ont une distribution très similaire à celle d'une loi normale que ce soit selon l'axe Y ou l'axe Z. Cette approche ne possède pas de critère de fiabilité intrinsèque, mais un critère a été proposé dans cet article par le biais du pourcentage du sillage instantané compris dans une ellipse, le R_{CGP} . Les résultats donnent un R_{CGP} moyen de plus de 60% pour les trois approches. De plus, étant donné que ces approches sont plus influencées par la taille du sillage que des valeurs de grand déficit de vitesse, ou du moins pas autant que les méthodes par produit de convolution et par fit gaussien, les approches par centres géométriques pondérés ne confondent pas le centre du sillage moyen mobile à la position du déficit maximum de vitesse.

Maintenant, il serait intéressant de voir l'influence de ces différentes méthodes sur un cas avec un modèle avec des déplacements similaires à ce qu'il est possible de retrouver sur une éolienne flottant, afin de comparer les résultats et de voir si les approches parviennent à détecter l'influence du mouvement du disque poreux sur la position du sillage instantané.

Références

- [1] S AUBRUN et al. « Experimental Study on the Wind Turbine Wake Meandering with the Help of a Non-Rotating Simplified Model and of a Rotating Model ». In : *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (2011).
- [2] S. AUBRUN et al. « Round-Robin Tests of Porous Disc Models ». In : *J. Phys.: Conf. Ser.* 1256.1 (1^{er} juill. 2019), p. 012004. ISSN : 1742-6588, 1742-6596. DOI : 10.1088/1742-6596/1256/1/012004.
- [3] S. AUBRUN et al. « Wind Turbine Wake Properties: Comparison between a Non-Rotating Simplified Wind Turbine Model and a Rotating Model ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 120 (sept. 2013). ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2013.06.007.
- [4] Marie BAYARD-LENOIR. *First Offshore Wind Turbine in France*. ec-nantes. 2017. URL : https://www.ec-nantes.fr/medias/fichier/floatgen_press_release_2_1484058015544.pdf.

- [5] Serge BEUCHER. « algorithmes sans biais de ligne de partage des eaux ». In : (2004), p. 36.
- [6] Thomas CHOISNET. *Report on the Requirements of the Floating Structure*. floatgen. 2013. URL : https://floatgen.eu/sites/default/files/pdf/floatgen_d3.1_report_on_the_requirements_of_the_floating_structure.pdf.
- [7] Nicolas COUDOU. « Numerical and Experimental Investigations of the Meandering Phenomenon in Wind Turbine Wakes ». Thèse de doctorat. Belgique : Université de Mons, 2021.
- [8] Joseph COUNIHAN. « Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880–1972 ». In : (1975). DOI : 10.1016/0004-6981(75)90088-8.
- [9] A. CRESPO, J. HERNÁNDEZ et S. FRANDSEN. « Survey of Modelling Methods for Wind Turbine Wakes and Wind Farms ». In : *Wind Energ.* 2.1 (jan. 1999), p. 1-24. ISSN : 1095-4244, 1099-1824. DOI : 10.1002/(SICI)1099-1824(199901/03)2:1<1::AID-WE16>3.0.CO;2-7.
- [10] EDSU. « Characteristics of Atmospheric Turbulence near the Ground ». In : 85020 (1985).
- [11] G. ESPAÑA et al. « Spatial Study of the Wake Meandering Using Modelled Wind Turbines in a Wind Tunnel: Spatial Study of the Wake Meandering ». In : *Wind Energ.* 14.7 (oct. 2011), p. 923-937. ISSN : 10954244. DOI : 10.1002/we.515.
- [12] G. ESPAÑA et al. « Wind Tunnel Study of the Wake Meandering Downstream of a Modelled Wind Turbine as an Effect of Large Scale Turbulent Eddies ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 101 (fév. 2012), p. 24-33. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2011.10.011.
- [13] L Pardo GARCIA et al. « Experimental Analysis of the Wake Meandering of a Floating Wind Turbine under Imposed Surge Motion ». In : (2022), p. 9.
- [14] Michael F. HOWLAND et al. « Wake Structure in Actuator Disk Models of Wind Turbines in Yaw under Uniform Inflow Conditions ». In : *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 8.4 (juill. 2016), p. 043301. ISSN : 1941-7012. DOI : 10.1063/1.4955091.
- [15] Giacomo Valerio IUNGO. « Experimental Characterization of Wind Turbine Wakes: Wind Tunnel Tests and Wind LiDAR Measurements ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 149 (fév. 2016), p. 35-39. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2015.11.009.
- [16] Haojun Ji. *The Influence of Wake Tracking Methods on Wind Turbine Statistics*. 2019.
- [17] Ivan KOMUSANAC et al. *Wind Energy in Europe - 2021 Statistics and the Outlook for 2022-2026*. 2022.
- [18] Yann-Aël MULLER, Sandrine AUBRUN et Christian MASSON. « Determination of Real-Time Predictors of the Wind Turbine Wake Meandering ». In : *Exp Fluids* 56.3 (mars 2015), p. 53. ISSN : 0723-4864, 1432-1114. DOI : 10.1007/s00348-015-1923-9.
- [19] Nils RUET. *Segmentation d'image Par Détection de Contours et Algorithme "Ligne de Partage Des Eaux"*. lama.univ-savoie. 2018. URL : https://www.lama.univ-savoie.fr/mediawiki/index.php/Segmentation_d%27image_par_d%C3%A9tection_de_contours_et_algorithme_%22ligne_de_partage_des_eaux%22 (visité le 30/03/2022).
- [20] B SANDERSE. « Review of CFD for Wind-Turbine Wake Aerodynamics ». In : (2010), p. 28.
- [21] Benyamin SCHLIFFKE, Sandrine AUBRUN et Boris CONAN. « Wind Tunnel Study of a “Floating” Wind Turbine’s Wake in an Atmospheric Boundary Layer with Imposed Characteristic Surge Motion ». In : *J. Phys.: Conf. Ser.* 1618.6 (1^{er} sept. 2020), p. 062015. ISSN : 1742-6588, 1742-6596. DOI : 10.1088/1742-6596/1618/6/062015.
- [22] Juan-José TRUJILLO et al. « Light Detection and Ranging Measurements of Wake Dynamics. Part II: Two-Dimensional Scanning ». In : *Wind Energy* 14.1 (2011), p. 61-75. ISSN : 1099-1824. DOI : 10.1002/we.402.
- [23] VDI-GUIDELINE. « Physical Modelling of Flow and Dispersion Processes in the Atmospheric Boundary Layer, Application of Wind Tunnels ». In : 3793/12 (2000).
- [24] L. J. VERMEER, J. N. SØRENSEN et A. CRESPO. « Wind Turbine Wake Aerodynamics ». In : *Progress in Aerospace Sciences* 39.6 (1^{er} août 2003), p. 467-510. ISSN : 0376-0421. DOI : 10.1016/S0376-0421(03)00078-2.