

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 21.06.17.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 28.12.18 Bulletin 18/52.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : IFP ENERGIES NOUVELLES Etablis-
sement public — FR.

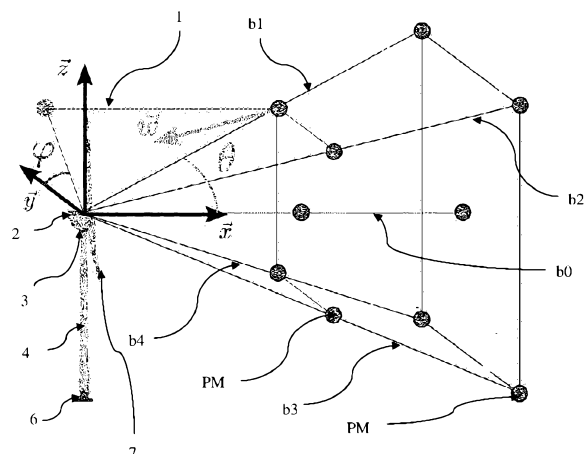
72 Inventeur(s) : NGUYEN HOAI-NAM et GUILLEMIN
FABRICE.

73 Titulaire(s) : IFP ENERGIES NOUVELLES Etablis-
sement public.

74 Mandataire(s) : IFP ENERGIES NOUVELLES.

54 PROCÉDE D'ACQUISITION ET DE MODELISATION PAR UN CAPTEUR LIDAR D'UN CHAMP DE VENT
INCIDENT.

57 L'objet de l'invention concerne un procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident. L'acquisition et la modélisation comprennent une étape d'estimation des amplitudes et des directions du vent pour un ensemble de points discrétisés, ainsi qu'une étape de reconstruction du champ de vent incident en trois dimensions et en temps réel. L'invention concerne également un procédé de contrôle et/ou de surveillance d'une éolienne équipée d'un tel capteur LiDAR à partir du champ de vent incident reconstruit en trois dimensions et en temps réel.



La présente invention concerne le domaine des capteurs LiDAR (Light Detection And Ranging ou détection et localisation par la lumière) utilisés comme moyen de télédétection pour mesurer la vitesse du vent. Elle concerne également le domaine des éoliennes équipées de capteur LiDAR, ainsi que le contrôle de celles-ci.

5 Les performances des capteurs LIDAR en terme de précision, fiabilité et disponibilité des mesures, permettent d'élaborer des estimations et des prédictions d'un état de vent pour un volume d'aérosol visé. Cependant les capteurs LiDAR présentent certaines limitations de précision et de disponibilité de la donnée. D'une part ils ne fournissent qu'une mesure brute du vent, c'est à dire une projection du vent sur un axe de mesure (autrement appelé faisceau
10 LASER pour light amplification by stimulated emission of radiation ou amplification de lumière par une émission stimulée de rayonnements) et d'autre part ils ne permettent d'accéder qu'à une bande passante limitée et bruitée du contenu spectral du vent. Comme la mesure brute est une mesure indirecte du vent qui correspond à la projection du vent sur l'axe d'un faisceau LASER, il est alors nécessaire de combiner plusieurs mesures brutes de
15 plusieurs faisceaux (ou axes de mesure) de directions distinctes, pour obtenir une estimation précise du vecteur vent.

De telles estimations ne sont cependant pas accessibles de manière triviale ni directe, et nécessitent la conception et la mise au point d'algorithmes de reconstruction précis et robustes liés à la qualité variable du signal, à la géométrie du capteur, et aux
20 conditions de vent.

La plupart des méthodes de reconstruction élaborées jusqu'à maintenant s'appuient sur l'hypothèse d'un champ de vent homogène et stable sur toute la surface balayée par le rotor comme cela est décrit dans la publication '*A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms*', In 2009 American Control Conference. IEEE. 2009, pp. 2076–
25 2089.

Cependant cette hypothèse n'est pas représentative ni réaliste, étant donné que la vitesse de vent varie considérablement en fonction de l'altitude, au sein de la couche limite atmosphérique, avec une dynamique très complexe.

La publication de "*P Towers and B Li Jones, 'Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation*', In *Wind Energy* 19.1 (2016), pp. 133– 150", propose un algorithme d'estimation pour reconstruire un champ de vent. L'approche consiste à utiliser un filtre de Kalman « unscented » (sans parfum) intégrant un modèle d'écoulement basé sur les équations de Navier-Stokes simplifiées. Cependant, cette technique fournit une reconstruction en deux dimensions (2D) du champ
30 de vent, à une altitude fixée. De plus, la technique, telle que décrite dans cette publication,

s'appuie sur une hypothèse non réaliste qui est que toutes les mesures du LiDAR sont disponibles pour tous les faisceaux, au même instant.

Enfin, on connaît également un algorithme de reconstruction proposé par certains fabricants de capteur LiDAR. Le principe est dans ce cas d'obtenir une estimation instantanée de la vitesse du vent en des points de l'espace non-mesurés, à partir d'interpolations sur les mesures. Cependant, dans de tels cas il n'est possible d'obtenir, en temps réel et en ligne, qu'une estimation de la composante du vent dans l'axe du LiDAR. La vitesse de vent longitudinale et la direction ne sont obtenues que sur la base d'une moyenne glissante, et ne sont pas exploitables pour des applications en temps réel.

Dans le domaine des éoliennes, la productivité des éoliennes et les coûts de maintenance dépendent fortement de la capacité de monitoring du système, et en particulier de la capacité à exploiter une information de vent pertinente. En effet les principales sources de dommages infligés à la structure et aux organes de l'éolienne sont liées aux conditions de vent impliquant des chargement extrêmes (fort vent turbulent, rafales) et à la fatigue des matériaux soumis à des phénomènes vibratoires et oscillants. Ceux-ci sont générés par les interactions entre l'éolienne et le champ de vent, avec notamment des problèmes de vibrations excitant les modes propres de l'éolienne. Il existe certaines stratégies de contrôle qui sont actuellement implémentées mais elles ne disposent pas d'une information de vent fiable et intégrable dans la boucle de contrôle pour assurer la durée d'exploitation prévue. Dans certains cas la vitesse du rotor est régulée par le couple génératrice et le couple aérodynamique (via l'orientation des pâles). Dans d'autres cas il n'y a pas d'utilisation directe de la mesure de vent dans la boucle de contrôle ce qui fait que la régulation de vitesse du rotor se fait en rétroaction. On peut également avoir un alignement à partir d'un capteur anémométrique situé en zone turbulente (nacelle) et soumis à des dérives ce qui conduit à avoir une éolienne souvent désalignée.

Dans tous les cas, ceci oblige à intégrer des contraintes dans le design de l'éolienne, avec des structures renforcées et un surcout d'investissement associé, et également avec une perte de production et des risques de chargement de la structure associés.

Afin de pallier aux inconvénients mentionnés précédemment, un premier aspect de l'invention consiste donc à développer une méthode améliorée pour estimer la vitesse et la direction d'un champ de vent en trois dimensions (3D) en ligne, en temps réel, dans un volume situé en amont d'un capteur LiDAR de manière à disposer d'une estimation et d'une prévision court terme du champ de vent incident sur le capteur LiDAR. Un second aspect de l'invention vise à utiliser cette méthode et ce capteur LiDAR dans une stratégie de contrôle

d'une éolienne de manière à avoir des prévisions de chargement du rotor de l'éolienne, à détecter des rafales, des turbulences, des cisaillements, etc.

A cet effet, l'invention concerne un procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident dans un espace situé en amont dudit capteur LiDAR.

5 Pour le procédé on réalise les étapes suivantes :

- a) une étape de maillage de l'espace situé en amont dudit capteur LiDAR dans laquelle le maillage de l'espace est réalisé par un ensemble de points discrétisés positionnés selon une grille tridimensionnelle prédéfinie qui comprend un ensemble de mailles composées de points d'estimation et de points de mesure.

10 L'étape de maillage permet de discrétiser (ou échantillonner) l'espace en amont du capteur LiDAR en une grille tridimensionnelle composée de points discrétisés et de pouvoir faire coïncider ces différents points discrétisés soit en points de mesure soit en points d'estimation nécessaires au procédé de modélisation. Il permet en outre de positionner relativement entre eux les points de mesure et d'estimation et de connaître les distances séparant l'ensemble
15 de ces points discrétisés.

- b) une étape de mesure de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure situés dans l'espace en amont et positionnés à au moins deux distances distinctes du capteur LiDAR, le long d'au moins trois axes de mesure,

Les mesures effectuées dans cette étape permettent d'obtenir des données initiales
20 suffisantes et fiables pour alimenter un algorithme destiné à estimer l'amplitude et la direction du vent sur les points d'estimation.

- c) une étape d'estimation de l'amplitude et de la direction du vent à un instant quelconque sur l'ensemble des points d'estimation et l'estimation est effectuée au moyen de l'optimisation par une méthode de moindres carrés récursifs pondérés
25 d'une fonction de coût J qui utilise au moins les données des points mesurés, des données de cohérence spatiale de la vitesse du vent, des données de cohérence temporelle de la vitesse du vent, ainsi que des données qualifiant la qualité des mesures effectuées sur les points de mesure.

La prise en compte de ces différents paramètres dans une fonction de coût à optimiser est
30 ce qui va permettre d'accéder à une estimation de l'amplitude et de la direction du vent sur chaque point d'estimation du maillage.

- d) une étape de reconstruction, en temps réel et dans un repère défini, du champ de vent incident en trois dimensions (3D) à partir des amplitudes et des directions du vent estimées et mesurées pour chaque point.

35 Cette étape permet de reconstruire en 3D dans le volume échantillonné par la grille tridimensionnelle le champ de vent incident. Dans cette étape on réalise un historique des

mesures LiDAR ce qui permet de connaître les états passés du champ de vent, et celui-ci est incorporé dans la synthèse des estimations courante et future du champ de vent 3D ce qui permet une reconstruction en temps réel.

5 L'intérêt d'utiliser une approche par optimisation, utilisant une forme récursive des moindres carrés pondérés, est de pouvoir déterminer une image complète en trois dimensions (3D) du vent incident se propageant dans l'espace situé en amont du capteur LiDAR.

Selon un aspect de l'invention, la mesure m de l'amplitude et de la direction du vent en un point de mesure est donnée par une relation de la forme :

$$10 \quad m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

où $v_{j,x}(k)$, $v_{j,y}(k)$, $v_{j,z}(k)$ sont des valeurs de la vitesse du vent projetées sur un repère x, y, z à un temps initial (k) , et a_j , b_j , c_j avec $j = 0, 1, 2, 3, 4$, sont des coefficients de mesure, qui sont donnés comme,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\varphi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\varphi_j) \end{cases}$$

15 où θ_j, φ_j sont respectivement le zénith et l'azimut de l'axe de mesure dans un système de coordonnées sphérique.

De cette manière le vecteur vent, à chaque instant échantillonné, pour l'ensemble des points de l'espace est composé des trois composantes qui vont permettre de déterminer l'image complète en trois dimensions. En outre le choix des coefficients de mesure permet de
20 ne dépendre que des angles des faisceaux et ne sont pas fonction des distances de mesure ce qui facilite la programmation informatique de la fonction de cout J .

Selon un aspect de l'invention, la fonction de cout J à un instant (t) quelconque s'écrit sous la forme suivante :

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \\ + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

25 où ω est un vecteur ordonné composé de toutes les composantes de la vitesse des points de l'espace où le vent est estimé, $\hat{\omega}(0)$ est l'estimation de la vitesse du vent au temps 0, P_0 , Q , R_s et R_m sont des matrices de pondération de dimension appropriée, et C_s , C_m sont des matrices qui prennent en compte la vitesse du vent et les bruits de mesure.

En utilisant une telle fonction de coût, il est possible d'estimer la vitesse du vent en un point d'estimation. En outre une telle fonction permet d'avoir une interprétation claire des matrices de pondération P_0 , Q , R_s et R_m .

5 Selon un aspect de l'invention, les mesures de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure s'effectuent à un taux d'échantillonnage d'au moins 0.25Hz. L'utilisation d'une telle plage de fréquences d'échantillonnage a pour effet d'obtenir plusieurs mesures en simultané sur un même axe de mesure tout en ayant des mesures qui soient fiables et précises.

10 Selon un aspect de l'invention, les mesures de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure sont prises à au moins deux distances différentes le long de l'axe de mesure. Des mesures effectuées à au moins deux distances permettent de définir un volume tridimensionnel suffisant pour englober les pâles d'une éolienne comme cela sera décrit par la suite.

15 Selon un aspect de l'invention, les mesures de l'amplitude et de la direction du vent sont prises le long d'au moins trois axes de mesure. Le fait d'avoir au moins trois axes de mesures permet un maillage fin de l'espace en amont et permet également d'avoir une quantité de mesures suffisante pour l'étape d'estimation de la vitesse du vent.

Selon un aspect de l'invention, la cohérence spatiale de la vitesse du vent suivant des axes x , y et z d'un repère cartésien est estimée par une formule du type :

20

$$\text{où : } C_s \omega \approx 0 \quad \text{avec} \quad C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

- C_l caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe longitudinal x et
- 25 ○ C_t caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe latéral y et
- C_v caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe vertical z et

30 Une telle caractérisation a pour effet de rendre possible le codage informatique d'une telle fonction.

Selon un aspect de l'invention, la cohérence spatiale de la vitesse du vent suivant les axes x , y et z du repère cartésien est estimée avec les hypothèses suivantes :

- La variation de la vitesse du vent le long de l'axe longitudinal x est faible et la dérivée partielle dv_x/dx est relativement petite le long de l'axe longitudinal,
- 35 ○ le vent change sans à-coup le long de l'axe latéral y et la dérivée partielle dv_x/dy est petite le long de l'axe latéral y ,

- le vent change avec une loi de puissance suivant l'axe vertical z qui est donnée par :

$$v_l = v_{lr} \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

- 5 où α est un exposant de la loi de puissance, v_l est le vent longitudinal à une altitude z au-dessus du sol, et z_r une altitude de référence.

De telles hypothèses sont réalistes et permettent des estimations de vitesses du vent qui sont fiables et précises.

- 10 Selon un aspect de l'invention, la qualité des mesures effectuées par le LiDAR est représentée par un modèle de la forme :

$$C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

où ϵ_m décrit les bruits de mesure.

La formulation de ce type permet de prendre en compte les inexactitudes des mesures du LiDAR.

- 15 Selon un aspect de l'invention, l'estimation des amplitudes et des directions du champ de vent à un instant (t) sur l'ensemble des points d'estimation est donnée par la formule suivante :

$$\omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

- 20 La formule précédente a pour intérêt de relier les estimations de la vitesse du vent dans le temps pour les points d'estimation.

L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur qui comprend des instructions de code agencées pour mettre en œuvre les étapes du procédé d'acquisition et de modélisation précédemment décrit. Le programme est exécuté sur une unité de traitement du LiDAR.

- 25 L'invention concerne aussi un capteur LiDAR qui comprend en mémoire les instructions de code d'un produit programme d'ordinateur tel que décrit précédemment et qui est agencé pour exécuter un tel produit programme d'ordinateur.

- 30 De cette manière, un capteur LiDAR qui exécute un tel produit programme d'ordinateur renverra une information fiable d'un champ de vent incident en trois dimensions et en temps réel.

Un objet de l'invention concerne également une éolienne qui comprend un capteur LiDAR tel que décrit précédemment.

Selon un aspect de l'invention, le capteur LiDAR est disposé sur la nacelle de ladite éolienne.

Enfin l'invention concerne également un procédé de contrôle et/ou de surveillance d'une éolienne équipée d'un capteur LiDAR et un automate de pilotage, et le procédé

5 comprend les étapes suivantes :

a) Une étape d'élaboration d'une stratégie de contrôle par anticipation de ladite éolienne en exploitant la reconstruction du champ de vent incident en trois dimensions et en temps réel,

10 b) Une étape de pilotage intégrant la stratégie de contrôle élaborée qui consiste à piloter l'angle des pâles ou l'orientation de la nacelle.

De cette manière la mise à disposition d'une information suffisamment robuste et précise de l'état de vent incident en approche du rotor, permet une nouvelle approche de contrôle, avec l'intégration d'un terme de pré-positionnement dynamique et préventif. En outre, la capacité de reconstruire en ligne, en temps réel, un champ de vent incident en

15 approche du plan rotor ouvre de nombreuses perspectives d'exploitation : quantification du désalignement de l'éolienne, courbe de puissance, fonction de transfert de la nacelle, détection de rafales, surveillance et diagnostic du chargement et des risques de fatigue, optimisation de la maintenance préventive, analyse de la ressource, optimisation de la production. Ceci permet alors d'augmenter le rendement des éoliennes, de réduire les coûts

20 de maintenance, d'augmenter la durée de vie des composants et de réduire les coûts d'investissement en optimisant le design.

Présentation succincte des figures

D'autres caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de réalisation, en se référant aux

25 figures annexées et décrites ci-après.

La figure 1 illustre une éolienne équipée d'un capteur LiDAR selon l'invention.

La figure 2 illustre les étapes du procédé d'acquisition et de modélisation par le capteur LiDAR selon l'invention.

La figure 3 est une vue de face du maillage de l'espace selon l'invention.

30 La figure 4 est une vue en perspective du maillage de l'espace selon l'invention.

La figure 5 illustre un champ de vent en 3D reconstruit à partir des mesures du LiDAR dans un cas particulier.

La figure 6 illustre les étapes du procédé de pilotage de l'éolienne selon l'invention.

Description détaillée de l'invention

35 Notations

Au cours de la description, les notations suivantes sont utilisées :

- x, y, z : directions du repère tridimensionnel, avec z l'axe vertical et x la direction principale du vent.
- θ et φ : angles d'orientation dudit capteur LiDAR. Ces angles sont explicités sur la figure 1 : l'angle θ est l'angle fait par la projection de l'axe de mesure du LiDAR dans le plan (y, z) , et φ est l'angle fait par la projection de l'axe de mesure du LiDAR dans un plan constitué de l'axe x et de la projection de l'axe de mesure du LiDAR dans le plan (y, z) .
- $m(t)$: mesure du capteur LiDAR à un point de mesure.
- $v_{j,x}(k), v_{j,y}(k), v_{j,z}(k)$: projections de la vitesse du vent sur x, y, z .
- ω : vecteur ordonné composé de toutes les composantes de la vitesse du vent aux points de l'espace où le vent est estimé sur les axes x, y et z du repère tridimensionnel.
- $\hat{\omega}(t)$: estimation de $\omega(t)$ à l'instant t .
- $P(t)$: matrice auxiliaire variable dans le temps, qui peut être obtenue à l'instant t .
- P_0, Q, R_s et R_m sont des matrices de pondération de dimension appropriée.

Dans la suite de la description, le terme « LiDAR » est utilisé pour désigner un capteur « LiDAR ».

L'invention concerne en premier lieu un procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident dans le but d'estimer la vitesse et la direction du vent pour un champ de vent en approche et en amont du LiDAR et ceci de la manière la plus fiable possible. Cette estimation doit être faite en ligne, en temps réel, pour un champ de vent 3D échantillonné.

La figure 2 représente les différentes étapes du procédé d'acquisition et de modélisation selon l'invention :

1. Maillage (MA) de l'espace situé en amont dudit capteur LiDAR, le maillage comprend des points d'estimation (PE) et des points de mesure (PM).
2. Mesure (MES) de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure (PM).
3. Estimation (EST) de l'amplitude et de la direction du vent à un instant (t) quelconque pour l'ensemble des points d'estimation (PE).
4. Reconstruction (MOD 3D) du champ de vent incident en trois dimensions (3D) et en temps réel sur l'ensemble des points discrétisés.

La figure 1 représente une éolienne 1 équipée d'un capteur LiDAR 2. Le capteur LiDAR 2 est utilisé pour mesurer la vitesse du vent à une distance donnée sur un point de mesure PM. La connaissance en avance de la mesure de vent permet à priori de donner beaucoup d'informations.

- 5 Il existe plusieurs types de capteur LiDAR, par exemple les capteurs LiDAR scannés, LiDAR continu ou LiDAR pulsés. Dans le cadre de l'invention, on utilise de préférence un LiDAR pulsé. Cependant les autres technologies de LiDAR peuvent être utilisées tout en restant dans le cadre de l'invention. Comme visible à la figure 1, qui est un exemple de réalisation, le LiDAR utilisé comporte 5 faisceaux ou axes de mesures (b0, b1, b2, b3, b4).
- 10 De manière non limitative, le procédé d'acquisition et de modélisation fonctionne également avec un LiDAR comportant trois faisceaux ou plus. Le capteur LiDAR pulsé 5 faisceaux est monté sur une nacelle 3 d'éolienne 1.

Classiquement une éolienne 1 permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique. Pour la conversion du vent en énergie électrique, elle se

15 compose des éléments suivants :

- un mât 4 permettant de placer un rotor (non représenté) à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) ou de placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol 6. Le mât 4 abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, ...) ;
- 20 - une nacelle 3 montée au sommet du mât 4, abritant des composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques (non représentés), nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle 3 peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction ;
- 25 - le rotor, fixé à la nacelle, comprenant plusieurs pales 7 (en général trois) et le nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il est relié par un arbre mécanique directement ou indirectement (via un système de boîte de vitesse et d'arbre mécanique) à une machine électrique (générateur électrique...) (non représentés) qui convertit l'énergie recueillie en énergie électrique. Le rotor est potentiellement doté de systèmes
- 30 de contrôle tels que des pâles à angle variable ou des freins aérodynamiques ;
- une transmission, composée de deux axes (arbre mécanique du rotor et arbre mécanique de la machine électrique) reliés par une transmission (boîte de vitesse) (non représentés).

Dans la description exposée ci-après, le procédé d'acquisition et de modélisation décrit est théorique et fonctionne indépendamment de l'éolienne 1. Cependant les différents exemples et développements sont donnés dans le cas d'un LiDAR monté sur la nacelle 3 de l'éolienne 1 de manière à réaliser les différentes étapes du procédé d'acquisition et de modélisation représentées à la figure 2 à une certaine altitude par rapport au sol 6.

Dans cette partie, les différentes étapes du procédé d'acquisition et de modélisation selon l'invention sont décrits :

1. Maillage (MA) de l'espace situé en amont dudit capteur LiDAR

Dans cette première étape, l'espace en amont du capteur LiDAR est défini selon un maillage comme visible aux figures 1, 3 et 4. Dans cette étape un système de coordonnées dans lequel le Lidar effectue des mesures est défini. Le système de coordonnées défini est le trièdre direct illustré sur les figures 1 et 3. Les origines $x - y$ de ce système sont au niveau du positionnement du LiDAR sur la nacelle 3, et l'origine z est au niveau du sol 6.

L'axe x pointe horizontalement dans la direction du vent, l'axe z pointe verticalement vers le haut et l'axe y est perpendiculaire pour former un repère tridimensionnel direct (conformément à la règle de la main droite).

Dans cette étape, le maillage de l'espace comprend un ensemble de points discrétisés placés en amont et qui définissent une grille tridimensionnelle. Pour chaque distance x fixée, le plan $y - z$ est divisé en cellules sans chevauchement comme visible sur la figure 3. Le maillage comprend des points de mesure (PM) et des points d'estimations (PE) de la vitesse du vent.

En lien avec ce maillage de l'espace, on définit également des variables sous-jacentes, dites variables d'optimisation, nécessaires à l'étape d'estimation décrite ci-dessous. Afin de permettre une implémentation astucieuse et efficace de l'algorithme d'optimisation décrit plus bas, on rassemble toutes les variables d'optimisation dans un vecteur ordonné, noté ω . L'ordre déterminé pour ces variables d'optimisation est un élément d'ingénierie crucial pour la faisabilité et la performance d'un algorithme de codage de ce procédé.

Un vecteur ω est défini pour chaque point de l'espace discrétisé et il est composé de toutes les composantes v_x des points de l'espace (PE) où le vent est estimé, suivies respectivement par les composantes v_y et v_z . L'estimation de la vitesse du vent en n points implique la construction d'un vecteur ω de taille $3n$, avec W_1 à W_n contenant tous les v_x , W_{n+1} à W_{2n} contenant tous les v_y , et W_{2n+1} à W_{3n} contenant tous les v_z .

L'exemple suivant est donné pour les composantes v_x de la vitesse du vent, étant entendu que la méthode est identique pour v_y et v_z . Comme cela a été réalisé dans l'étape

initiale, et comme visible sur la figure 3, l'espace est discrétisé en x , y et z avec n_x points en x , n_y points en y et n_z points en z .

Dans cette configuration on a :

$$n = n_x n_y n_z$$

On définit par $v_{i,j,k}$ la composante de la vitesse du vent v_x , dont la coordonnée est (x_i, y_j, z_k) .

L'indice l de W_l , où se situe l'estimation correspondante, s'obtient ainsi :

$$l = (n_x - i)n_y n_z + (k - 1)n_y + j$$

Par exemple, si $i = n_x$, $k = 1$ et $j = 1$, alors

$$l = (n_x - i)n_y n_z + (k - 1)n_y + j = 1$$

Cela correspond au coin supérieur gauche du domaine d'estimation, à la distance la plus éloignée en amont du plan rotor, comme illustré sur la figure 4.

2. Mesure (MES) de l'amplitude et de la direction du vent à différents points de mesure

Dans un second temps, le capteur LiDAR réalise une mesure $m(t)$ relative à la vitesse du vent en un point de mesure (PM) situé en amont de l'éolienne 1. Cette mesure $m(t)$ correspond au signal reçu par le capteur en provenance du point de mesure (PM) en réponse au signal émis par le capteur LiDAR. En effet, par interférométrie et effet Doppler, une partie de signal Laser émis par le capteur LiDAR est réfléchi par les molécules d'air au point de mesure et également par les aérosols, (poussières et microparticules en suspension). Le point de mesure est défini par les caractéristiques du capteur LiDAR, notamment la distance focale, ainsi que par son orientation. Cette mesure, dépendante de la vitesse du vent, est un temps et dépend de l'orientation du capteur LiDAR.

Pour le cas étudié du LiDAR pulsé, les mesures sont obtenues successivement selon le maillage défini à l'étape précédente, en commençant par le faisceau longitudinal b0, puis le faisceau oblique b1, jusqu'au faisceau b4. Une caractéristique intéressante de ce système est qu'il permet de mesurer la projection de la vitesse du vent à plusieurs distances, simultanément, pour un faisceau donné. Il est ainsi possible d'obtenir, par exemple, 10 distances successives entre 50m et 400m, à un taux d'échantillonnage de 0.25Hz ou de 1 Hz. Il est bien sûr possible de se limiter à deux mesures, qui sont suffisantes pour reconstruire un modèle en trois dimensions. A chaque temps d'échantillonnage, les seules mesures du faisceau courant sélectionné sont rafraîchies.

Dans un cas particulier, conforme à la figure 4, les mesures sont faites à sept distances et notamment à $x = [50 \ 80 \ 120 \ 160 \ 200 \ 240 \ 280]$ m pour les cinq faisceaux. Ainsi pour chaque x fixé, le plan $y - z$ est divisé en cellules comme suit :

- Les quatre premiers points (PM) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 280$ m.
- Les quatre seconds points (PM1) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 240$ m.
- Les quatre troisièmes points (PM2) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 200$ m.
- Les quatre quatrièmes points (PM3) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 160$ m.
- Les quatre cinquièmes points (PM4) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 120$ m.
- Les quatre sixièmes points (PM5) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 80$ m.
- Les quatre septièmes points (PM6) correspondent aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour les faisceaux 1, 2, 3, 4 de la distance $x = 50$ m.
- Le point central (PM7) correspond aux coordonnées $y - z$ des points de mesure pour le faisceau 0 pour toutes les distances.

Les mesures $m(k)$ de LiDAR pour les faisceaux $j = 0, 1, 2, 3, 4$ à la distance x mètres, et à l'instant k sont données par la formule $m_{j,x}(k)$, avec $j = 0, 1, 2, 3, 4$.

Par exemple, $m_{0,50}(1)$ est la mesure de LiDAR pour le faisceau $j = 0$ à la distance $x = 50$ mètres et à l'instant instantané $k = 1$. Dans le cadre de l'invention, la mesure LiDAR est alors donnée par une formule du type :

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

où $v_{j,x}(k)$, $v_{j,y}(k)$, $v_{j,z}(k)$ sont des valeurs de la vitesse du vent projetées sur un repère donné au temps initial (k), et a_j , b_j , c_j , avec $j = 0, 1, 2, 3, 4$ sont des coefficients de mesure, qui sont donnés comme,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\varphi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\varphi_j) \end{cases}$$

où θ_j, φ_j , avec $j = 0, 1, 2, 3, 4$ sont respectivement le zénith et l'azimut de l'axe de mesure dans un système de coordonnée sphérique.

L'avantage de définir l'équation de mesure LiDAR dans le repère précédemment défini, avec le choix de discrétisation spatiale choisi, est que celle-ci peut être utilisée directement, puisque les coordonnées du point de mesure coïncident avec un point particulier de l'espace discrétisé.

3. Estimation (EST) de l'amplitude et de la direction du vent à un instant (t) quelconque sur l'ensemble des points discrétisés

Cette étape consiste à obtenir une valeur du vent sur les points d'estimation (PE) du maillage.

A cet effet l'estimation est effectuée au moyen de l'optimisation par une méthode de moindres carrés récursifs pondérés d'une fonction de coût qui utilise les données mesurées $m(k)$ du LiDAR, mais aussi des données de cohérence spatiale de la vitesse du vent, des données de variation temporelle de la vitesse du vent, ainsi que des données qualifiant la qualité des mesures $m(k)$ du LiDAR. C'est ce qui est explicité par la suite.

3.1 Différences spatiales

Ces sous sections visent à définir les données de cohérence spatiale du vent dans le cadre de l'invention et plus particulièrement dans le cadre d'un LiDAR monté sur la nacelle 3 d'une éolienne 1.

Dans cette étape, on considère les composantes de la vitesse du vent sur les axes x, y et z du repère précédemment défini.

Lors de cette étape d'estimation, il est admis que la vitesse du vent change relativement peu dans l'espace, et que le vent a une forte cohérence spatiale dans un faible volume de l'espace. L'exposé suivant est fait ici pour les composantes v_x , c'est-à-dire pour les premières n variables de ω avec un domaine d'estimation représenté sur la figure 4 (L'approche est similaire pour les composantes v_y et v_z) et en prenant $n_x = n_y = n_z = 3$.

3.1.1 Différence longitudinale

La différence longitudinale correspond au changement de v_x le long de l'axe x et celui-ci change doucement selon l'invention. Dans ce cas la dérivée partielle dv_x/dx est relativement petite. En d'autres termes,

$$\begin{cases} \omega_1 - \omega_{10} \approx 0 \\ \omega_2 - \omega_{11} \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{18} - \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

L'équation précédente peut être écrite sous une forme vectorielle compacte comme :

$$C_{xl}\omega \approx 0$$

où

$$C_{xl} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & +1 & \dots & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & +1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$$

5

Il est à noter que chaque ligne de C_{xl} contient un +1 et un -1.

De façon analogue, on peut calculer la variation de v_y et v_z le long de l'axe longitudinal comme :

$$\begin{cases} C_{yl}\omega \approx 0, \\ C_{zl}\omega \approx 0 \end{cases}$$

10

où C_{yl} , C_{zl} sont, des matrices de coefficients, qui contiennent seulement un +1 et un -1 sur chaque ligne.

En définissant :

$$C_l = \begin{bmatrix} C_{xl} \\ C_{yl} \\ C_{zl} \end{bmatrix}$$

15 on obtient l'équation :

$$C_l\omega \approx 0$$

qui caractérise la variation de la vitesse du vent pour le domaine d'estimation le long de l'axe longitudinal.

20

3.1.2 Différence latérale

La différence latérale est le changement de v_x le long de l'axe y. De façon analogue, puisque le vent change sans à-coup, la dérivée partielle dv_x/dy est relativement petite. En d'autres termes,

$$\begin{cases} \omega_1 - \omega_2 \approx 0 \\ \omega_2 - \omega_3 \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{26} - \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

On peut écrire l'équation précédente dans une forme vectorielle compacte comme

$$C_{xt}\omega \approx 0$$

où

$$C_{xt} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & +1 & -1 \end{bmatrix}$$

- 5 Chaque ligne de C_{xt} contient un +1 et un -1.

De façon analogue, la variation de v_y et v_z le long de l'axe latéral peut être calculée comme,

$$\begin{cases} C_{yt}\omega \approx 0, \\ C_{zt}\omega \approx 0 \end{cases}$$

où C_{yt} , C_{zt} sont des matrices de coefficients qui ne contiennent qu'un +1 et un -1 pour chaque ligne.

- 10 En définissant :

$$C_t = \begin{bmatrix} C_{xt} \\ C_{yt} \\ C_{zt} \end{bmatrix}$$

Il est clair que l'équation :

$$C_t\omega \approx 0$$

caractérise la variation de la vitesse du vent pour le domaine d'estimation le long de l'axe latéral.

15

3.1.3 Différence verticale

Le profil vertical de la vitesse du vent est donné par une loi de puissance ce qui permet d'obtenir une description de la composante de vitesse du vent v_x à différentes hauteurs qui est beaucoup plus précise.

20

Le profil vertical de la vitesse de vent décrit l'évolution de la vitesse de vent longitudinale en fonction de l'altitude relative au sol. La loi de puissance ("power law") du profil de la vitesse du vent est généralement utilisée pour estimer la vitesse du vent longitudinal v_l à une altitude au-dessus du sol z , compte tenu de la vitesse longitudinale du vent v_{lr} à une altitude de référence z_r , en utilisant l'équation,

25

$$v_l = v_{lr} \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

où alpha est l'exposant de loi de puissance, qui est généralement spécifié en fonction de la stabilité.

- 5 La valeur constante $\alpha = 1/7$ est couramment utilisée, en cohérence avec une hypothèse de cisaillement du vent relativement faible. Cependant, il faut noter que considérer alpha constant, revient à faire abstraction de la rugosité de la surface du sol, des interactions du vent avec d'éventuels obstacles, et de la stabilité de l'atmosphère.

En utilisant cette loi de puissance on a ainsi une différence verticale du vent donnée par :

$$\begin{cases} \omega_1 - \left(\frac{z_1}{z_4} \right)^\alpha \omega_4 \approx 0 \\ \omega_2 - \left(\frac{z_2}{z_5} \right)^\alpha \omega_5 \approx 0 \\ \vdots \\ \omega_{24} - \left(\frac{z_{24}}{z_{27}} \right)^\alpha \omega_{27} \approx 0 \end{cases}$$

- 10 où z_j est la hauteur de ω , α est l'exposant de loi de puissance, qui est supposé être 1/7. On peut écrire l'équation précédente dans une forme vectorielle compacte comme :

$$C_{xv} \omega \approx 0$$

où

$$C_{xv} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_1}{z_4}\right)^\alpha & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_2}{z_5}\right)^\alpha & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & +1 & 0 & 0 & -\left(\frac{z_{24}}{z_{27}}\right)^\alpha \end{bmatrix}$$

- 15 De façon analogue, on peut quantifier la variation de v_y et v_z le long de l'axe vertical comme

$$\begin{cases} C_{yv} \omega \approx 0, \\ C_{zv} \omega \approx 0 \end{cases}$$

Cependant, comme la loi de puissance du profil du vent ne s'applique qu'à la vitesse longitudinale du vent, C_{yv} , C_{zv} ne contiennent qu'un +1 et un -1 pour chaque ligne.

En définissant :

$$C_v = \begin{bmatrix} C_{xv} \\ C_{yv} \\ C_{zv} \end{bmatrix}$$

20

On obtient l'équation :

$$C_v \omega \approx 0$$

qui caractérise la variation de la vitesse du vent pour le domaine d'estimation le long de l'axe vertical.

Enfin, en utilisant :

$$C_l \omega \approx 0$$

5

et

$$C_t \omega \approx 0$$

on a :

$$\begin{cases} C_l \omega \approx 0, \\ C_t \omega \approx 0, \\ C_v \omega \approx 0 \end{cases}$$

10

où de manière équivalente,

$$C_s \omega \approx 0$$

qui est l'équation qui caractérise la variation de la vitesse totale du vent le long de l'axe x, y et z.

15 Avec :

$$C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

3.2 Mesures LiDAR

Pour les besoins du calcul, il est important de réécrire l'équation de mesure sous forme vectorielle de w . Dans l'exemple précédent d'un LiDAR à cinq faisceaux et pour sept

20

mesures par faisceaux, on a $j = 0, 1, 2, 3, 4$, et $x = [50, 80, 120, 160, 200, 240, 280]$,

$$\begin{cases} v_{j,x} = [0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0] \omega = C_{j,xx} \omega \\ v_{j,y} = [0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0] \omega = C_{j,xy} \omega \\ v_{j,z} = [0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0] \omega = C_{j,xz} \omega \end{cases}$$

En combinant avec :

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

on obtient,

$$m_{j,x} = C_{j,x}\omega$$

où

$$C_{j,x} = [a_j \ b_j \ c_j] \begin{bmatrix} C_{j,xx} \\ C_{j,xy} \\ C_{j,xz} \end{bmatrix}$$

que l'on peut réécrire sous une forme vectorielle compacte :

$$C_m \omega = m_m$$

5

où

$$m_m = \begin{bmatrix} m_{0,50} \\ m_{1,50} \\ \vdots \\ m_{4,280} \end{bmatrix}, \quad C_m = \begin{bmatrix} C_{0,50} \\ C_{1,50} \\ \vdots \\ C_{4,280} \end{bmatrix}$$

Pour prendre en compte les bruits de mesure, un modèle plus réaliste pour les mesures de Lidar peut être introduit comme suit,

$$C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

10

où ϵ_m décrit les bruits de mesure.

3.3 La méthode des moindres carrés récurrents pondérés

15 Il est admis que la vitesse du vent change peu non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps. Dans ce qui suit, on fournit un moyen de prendre en compte cette information dans l'approche par optimisation. $\hat{\omega}(0)$ est l'estimation de la vitesse du vent au temps 0. A chaque instant, le problème d'optimisation est le suivant :

$$\min_{\omega(t)} J(t)$$

avec

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

20

Il existe quatre termes dans la fonction de coût précédente.

- Le premier terme pénalise la connaissance de la vitesse initiale du vent $\omega(0)$.

- Le second terme pénalise la variation de la vitesse du vent dans le temps.
- Le troisième terme pénalise la variation de la vitesse du vent dans l'espace.
- Le quatrième terme pénalise la qualité de mesure Lidar.

5 En utilisant la formule précédente, on peut avoir une interprétation claire des matrices de pondération P_0 , Q , R_s et R_m . Ainsi :

- Si la vitesse du vent $\omega(t)$ au temps $t = 0$ est bien connue, alors $\omega(0) = \hat{\omega}(0)$, alors P_0 est petit. Autrement P_0 est grand.
- S'il y a beaucoup de variations de la vitesse du vent dans le temps, alors Q est grand.

10 Autrement Q est petit.

- Si la vitesse du vent change rapidement, alors R_s est grand. Autrement R_s est petit.
- S'il y a beaucoup de bruits dans les mesures Lidar, alors R_m est grand. Sinon, R_m est petit.

Dans le cas où l'on considère les trois cas limitatifs suivants :

- 15 • Aucune information sur la vitesse initiale du vent n'est disponible. Par conséquent P_0 est très grand. Le terme :

$$(\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0))$$

peut ainsi être négligé dans la fonction de coût.

- 20 Il n'y a aucune relation entre la vitesse du vent à l'instant t et la vitesse du vent à l'instant $t-1$. Dans ce cas, on peut choisir Q très grand. Le terme suivant peut être négligé :

$$\sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1))$$

- La variation de la vitesse du vent dans l'espace est très faible. Dans ce cas, on peut prendre R_s très petit. Le terme suivant est important dans la fonction de coût :

$$\sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j)$$

25

On définit :

$$C = \begin{bmatrix} C_s \\ C_m \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_m \end{bmatrix}$$

La méthode des moindres carrés récursifs pondérés utilisée pour résoudre le problème d'optimisation se présente de la façon suivante :

30

- On initialise les variables d'optimisation de la manière suivante :

$$\begin{cases} \omega(0) = \hat{\omega}(0), \\ P(0) = P_0 \end{cases}$$

- À chaque instant t :
 - on définit :

$$y(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ y_m(t) \end{bmatrix}$$

où $\mathbf{0}$ est un vecteur nul de dimension appropriée.

- On calcule une matrice auxiliaire K telle que

$$K = (P(t-1) + Q)C(C^T(P(t-1) + Q)C + R)^{-1}$$

- On calcule la matrice $P(t)$ telle que

$$P(t) = (I - KC)P(t-1)$$

où I est une matrice d'identité de dimension appropriée.

- La vitesse du vent à l'instant t est alors estimée ainsi :

$$\omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

4. Reconstruction du champ de vent incident en trois dimensions (3D) et en temps réel

Dans cette étape, un processeur intégré au capteur LiDAR récupère l'ensemble des données d'amplitude et de direction du vent mesurées et estimées durant les étapes précédentes. La récupération de ces données se fait en temps réel pour chaque point de mesure (PM) et d'estimation (PE) définis précédemment. Ainsi le capteur LiDAR est en mesure de reconstruire l'ensemble du champ de vent incident sur le LiDAR comme visible à la figure 5.

Sur la même figure 5, un champ de vent reconstruit est représenté pour un temps à 68 secondes. En ordonnée, il est représenté l'altitude relative au sol (en m) et en abscisse il est représenté la distance à la nacelle (en m) et les positions relatives latérales au LiDAR (en m).

L'invention concerne en second lieu un procédé de contrôle et/ou de surveillance d'une éolienne équipée avec un capteur LiDAR tel que décrit précédemment et un automate de pilotage 10 afférent qui comprend les étapes suivantes :

i) Une étape d'élaboration d'une stratégie de contrôle (CON) par anticipation de ladite éolienne 1 en exploitant la reconstruction du champ de vent incident en trois dimensions et en temps réel obtenu par le procédé selon l'invention,

5 ii) Une étape de pilotage (PIL) intégrant la stratégie de contrôle élaborée qui consiste notamment à piloter l'angle des pâles 7 ou l'orientation de la nacelle 3.

10 La figure 6 représente le fonctionnement global d'une telle éolienne 1. L'éolienne 1 comprend à cet effet un capteur LiDAR 2 conforme à l'invention, et son unité de traitement, un dispositif informatique comprenant une solution logicielle de reconstruction 3D du champ de vent, un automate de pilotage intégrant la stratégie de contrôle et un dispositif de pilotage des pales et/ou de la nacelle de l'éolienne. En lien avec la figure 6, l'invention appliquée à une éolienne fonctionne de la manière suivante :

- 15 • Premièrement, le LiDAR effectue l'étape d'acquisition et de modélisation du champ de vent incident telle que décrite précédemment de manière à reconstruire un champ de vent incident 3D (étapes ME, MA, EST, MOD 3D de la figure 6),
- Deuxièmement, l'automate de pilotage 10 élabore la stratégie de contrôle (CON) et effectue le pilotage (PIL) des organes de l'éolienne 1 en tenant compte de la stratégie de contrôle élaborée.

20 Ce procédé selon l'invention permet d'analyser en temps réel le vent incident ou détecter des rafales, des courbes de puissance et des intensités de turbulence ce qui peut servir à réguler ou superviser l'éolienne de manière à obtenir un meilleur alignement de l'éolienne, ce qui conduit à une optimisation de la production et une minimisation des charges et de la fatigue.

Revendications

1) Procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident dans un espace situé en amont dudit capteur LiDAR caractérisé en ce que le

5

a) une étape de maillage (MA) de l'espace situé en amont dudit capteur LiDAR dans laquelle le maillage de l'espace est réalisé par un ensemble de points discrétisés positionnés selon une grille tridimensionnelle prédéfinie qui comprend un ensemble

10

b) une étape de mesure (MES) de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure (PM) situés dans l'espace en amont et positionnés à au moins deux distances distinctes du capteur LiDAR, le long d'au moins trois axes de mesure,

15

c) une étape d'estimation (EST) de l'amplitude et de la direction du vent à un instant (t) quelconque sur l'ensemble des points d'estimation et l'estimation est effectuée au moyen de l'optimisation par une méthode de moindres carrés récursifs pondérés d'une fonction de coût qui utilise au moins les données des points de mesure (PM), des données de cohérence spatiale de la vitesse du vent, des données de cohérence temporelle de la vitesse du vent, ainsi que des données qualifiant la qualité des mesures effectuées sur les points de mesure,

20

d) une étape de reconstruction (MOD 3D), en temps réel et dans un repère défini, du champ de vent incident en trois dimensions (3D) à partir des amplitudes et des directions du vent estimées et mesurées pour chaque point dudit maillage (MA).

25

2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la mesure m de l'amplitude et de la direction du vent en un point de mesure (PM) est donnée par une relation de la forme :

30

$$m_{j,x}(k) = a_j v_{j,x}(k) + b_j v_{j,y}(k) + c_j v_{j,z}(k)$$

où $v_{j,x}(k)$, $v_{j,y}(k)$, $v_{j,z}(k)$ sont des valeurs de la vitesse du vent projetées sur un repère donné au temps initial (k), et a_j , b_j , c_j avec $j = 0, 1, 2, 3, 4$ sont des coefficients de mesure, qui sont donnés comme,

$$\begin{cases} a_j = \cos(\theta_j), \\ b_j = \sin(\theta_j) \cos(\varphi_j), \\ c_j = \sin(\theta_j) \sin(\varphi_j) \end{cases}$$

où θ_j, φ_j , $j = 0, 1, 2, 3, 4$ sont respectivement le zénith et l'azimut de l'axe de mesure dans un système de coordonnées sphérique.

- 5 3) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la fonction de coût J à un instant (t) quelconque s'écrit sous la forme suivante :

$$J(t) = (\omega(0) - \hat{\omega}(0))^T P_0^{-1} (\omega(0) - \hat{\omega}(0)) + \sum_{j=1}^t (\omega(j) - \omega(j-1))^T Q^{-1} (\omega(j) - \omega(j-1)) + \sum_{j=1}^t \omega(j)^T C_s^T R_s^{-1} C_s \omega(j) + \sum_{j=1}^t (C_m \omega(j) - m_m)^T R_m^{-1} (C_m \omega(j) - m_m(j))$$

10 dans laquelle ω est un vecteur ordonné composé de toutes les composantes de la vitesse des points de l'espace où le vent est estimé, $\hat{\omega}(0)$ est l'estimation de la vitesse du vent au temps 0, P_0 , Q , R_s et R_m sont des matrices de pondération de dimension appropriée, et C_s , C_m sont des matrices qui prennent en compte la vitesse du vent et les bruits de mesure.

- 15 4) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les mesures de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure (PM) s'effectue à un taux d'échantillonnage d'au moins 0.25Hz.

- 20 5) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les mesures de l'amplitude et de la direction du vent aux différents points de mesure (PM) sont prises à au moins deux distances différentes le long de l'axe de mesure.

- 25 6) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les mesures de l'amplitude et de la direction du vent sont prises le long d'au moins trois axes de mesure.

- 7) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la cohérence spatiale de la vitesse du vent suivant des axes x, y et z d'un repère cartésien est estimée par une formule du type:

$$C_s \omega \approx 0$$

avec

$$C_s = \begin{bmatrix} C_l \\ C_t \\ C_v \end{bmatrix}$$

où :

- 5
- C_l caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe longitudinal x et
 - C_t caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe latéral y et
 - C_v caractérise la variation de la vitesse du vent pour un domaine d'estimation le long de l'axe vertical z et
- 10
- le vecteur ω est un vecteur ordonné composé de toutes les composantes de la vitesse du vent aux points de l'espace où le vent est estimé.

8) Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la cohérence spatiale de la vitesse du vent suivant les axes x, y et z du repère cartésien est estimée avec les hypothèses suivantes :

- 15
- La variation de la vitesse du vent le long de l'axe longitudinal x est faible et la dérivée partielle dv_x/dx est relativement petite le long de l'axe longitudinal,
 - le vent change sans à-coup le long de l'axe latéral y et la dérivée partielle dv_x/dy est petite le long de l'axe latéral y,
 - le vent change avec une loi de puissance suivant l'axe vertical z qui est donnée par :
- 20

$$v_l = v_{lr} \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

25 où alpha est un exposant de la loi de puissance, v_l est le vent longitudinal à une altitude z au-dessus du sol, et z_r une altitude de référence.

9) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la qualité des mesures effectuées par le capteur LiDAR est représentée par un modèle de la forme :

$$C_m \omega = m_m + \epsilon_m$$

30

Où ϵ_m décrit les bruits de mesure.

10) Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'estimation des amplitudes et des directions du champ de vent à un instant (t) sur l'ensemble des points d'estimation est donnée par la formule suivante :

35

$$\omega(t) = \omega(t-1) + K(y(t) - C\omega(t-1))$$

- 11) Produit programme d'ordinateur caractérisé en ce qu'il comprend des instructions de code agencées pour mettre en œuvre les étapes d'un procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident selon l'une des revendications précédentes, lorsque ledit programme est exécuté sur une unité de traitement dudit capteur LiDAR.
- 12) Capteur LiDAR caractérisé en ce qu'il comprend en mémoire les instructions de code d'un produit programme d'ordinateur selon la revendication précédente et agencé pour exécuter un tel produit programme d'ordinateur.
- 13) Éolienne 1 caractérisée en ce que ladite éolienne 1 comprend un capteur LiDAR 2 selon la revendication précédente.
- 14) Éolienne 1 selon la revendication précédente caractérisé en ce que ledit capteur LiDAR est disposé sur la nacelle de ladite éolienne.
- 15) Procédé de contrôle et/ou de surveillance d'une éolienne 1 équipée avec un capteur LiDAR 2 et un automate de pilotage, caractérisé en ce qu'on réalise les étapes suivantes :
- i) Une étape d'élaboration d'une stratégie de contrôle (CON) par anticipation de ladite éolienne en exploitant la reconstruction du champ de vent incident en trois dimensions et en temps réel obtenu par le procédé d'acquisition et de modélisation par un capteur LiDAR d'un champ de vent incident selon l'une des revendications 1 à 10,
 - ii) Une étape de pilotage (PIL) intégrant la stratégie de contrôle élaborée qui consiste à piloter l'angle de pâles 7 ou l'orientation d'une nacelle 3.

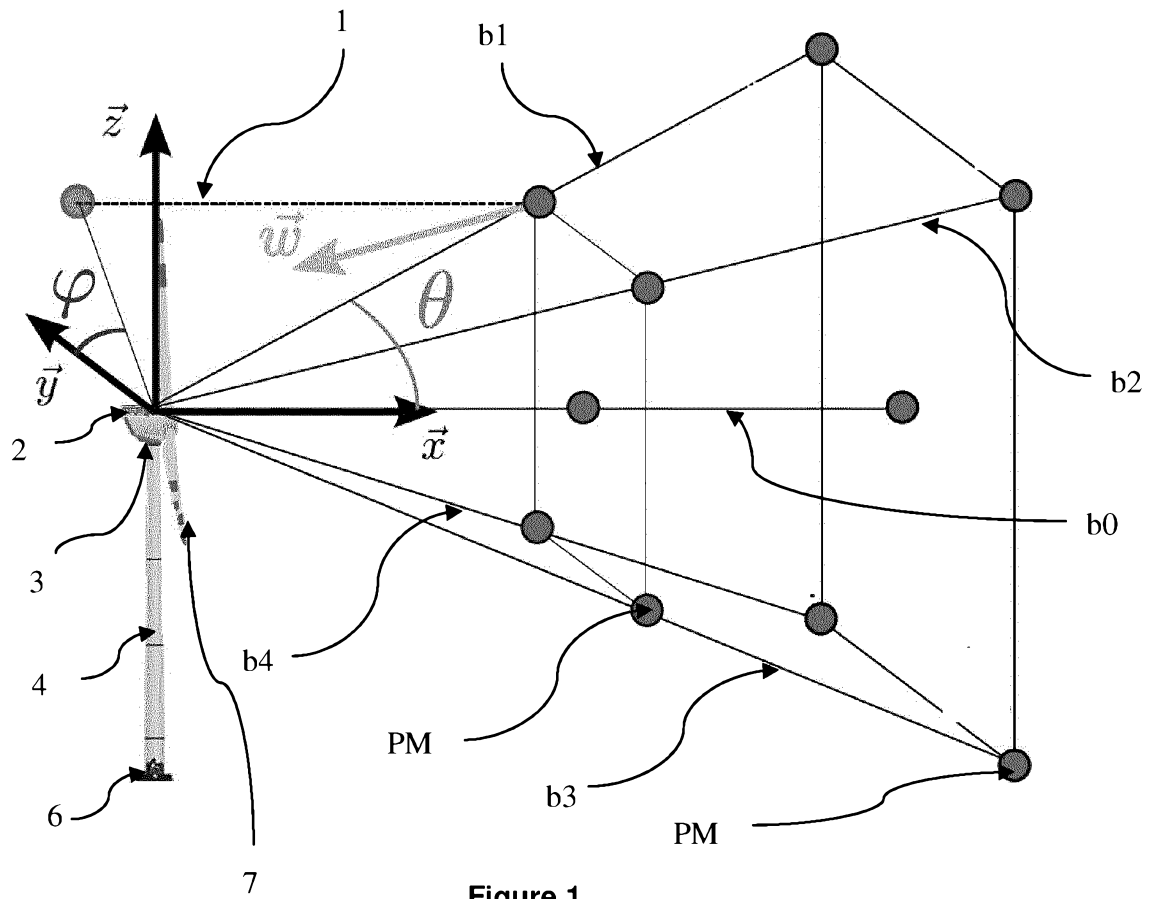


Figure 1

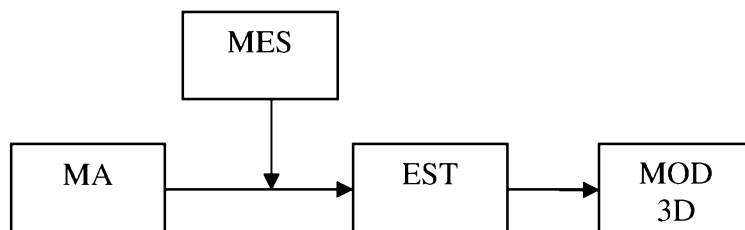


Figure 2

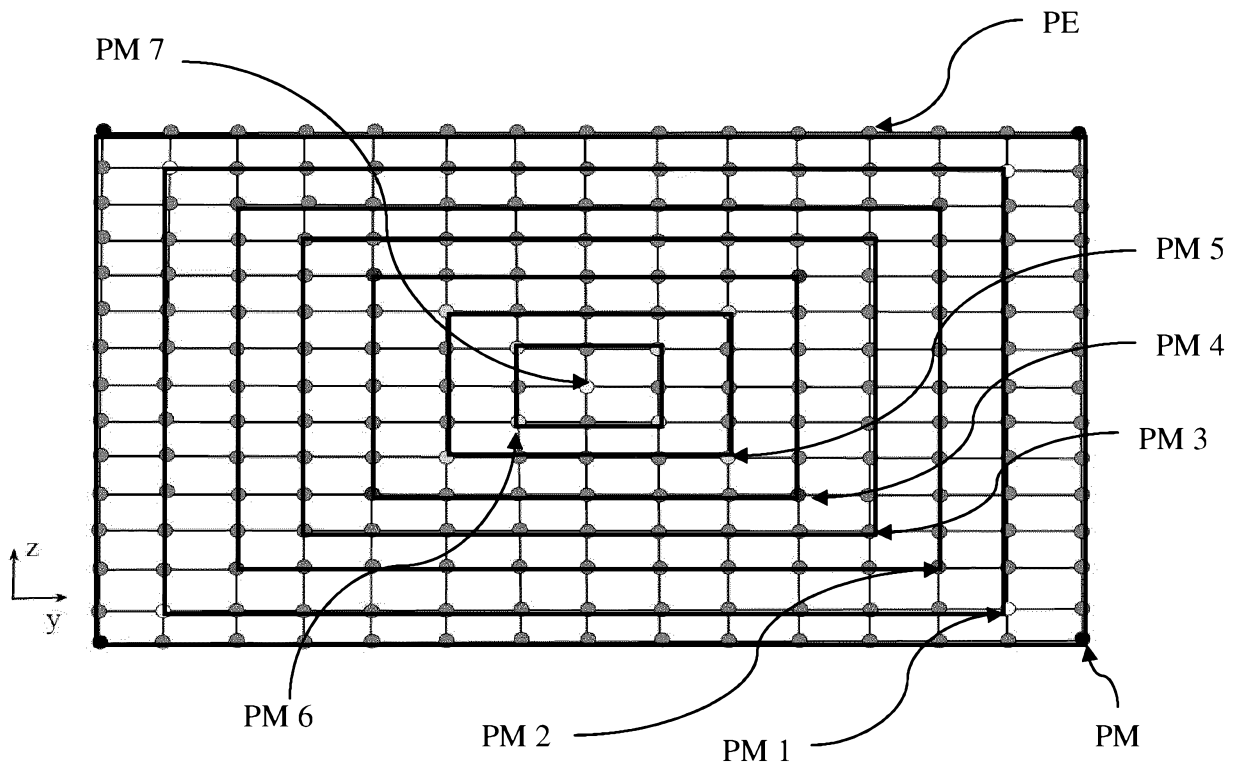


Figure 3

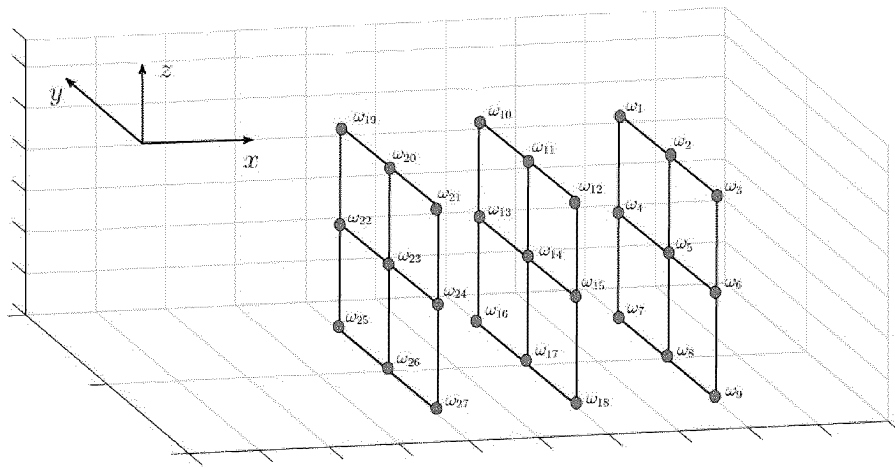


Figure 4

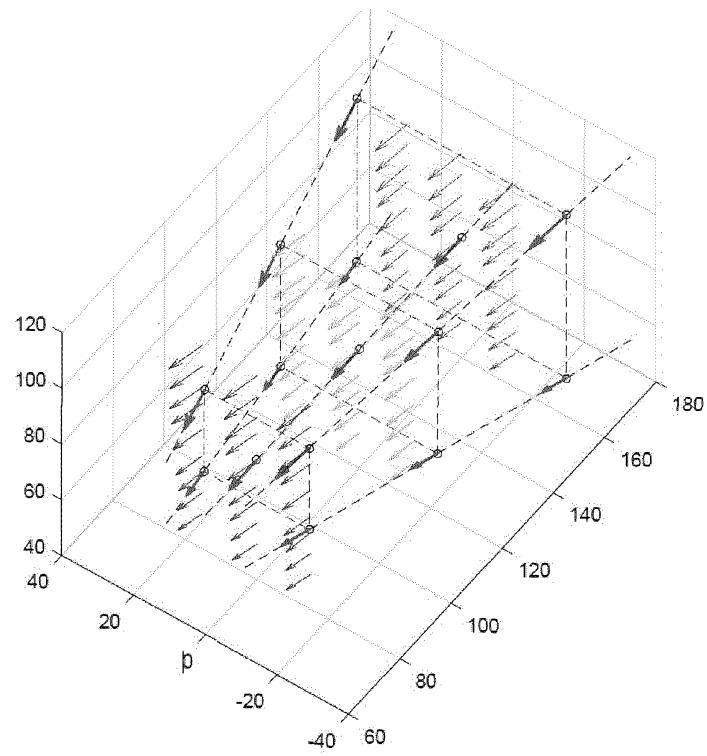


Figure 5

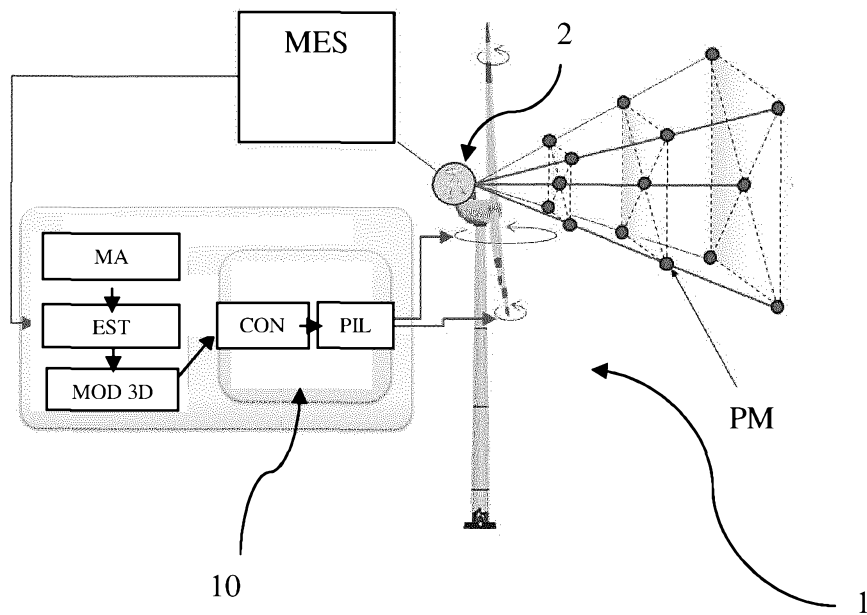


Figure 6

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 840992
FR 1755675

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	F. GUILLEMIN ET AL: "Nacelle LiDAR online wind field reconstruction applied to feedforward pitch control", JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES, vol. 753, 1 septembre 2016 (2016-09-01), page 052019, XP055451670, GB ISSN: 1742-6588, DOI: 10.1088/1742-6596/753/5/052019	1,2,4-6, 9,11-15	G01S17/95 G01F1/66
A	* abrégé; figures 1,4 * * page 4, alinéa 3.2 - page 6, ligne 13 * -----	3,7,8	
X	OUDE NIJHUIS A C P ET AL: "Outlook for a new wind field retrieval technique: The 4D-Var wind retrieval", 2014 INTERNATIONAL RADAR CONFERENCE, IEEE, 13 octobre 2014 (2014-10-13), pages 1-6, XP032746351, DOI: 10.1109/RADAR.2014.7060421 [extrait le 2015-03-12]	1,2,4-6, 9,11-15	
A	* le document en entier * -----	3,7,8	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
X	ANTOINE BORRACCINO ET AL: "Wind field reconstruction from nacelle-mounted lidar short-range measurements", WIND ENERGY SCIENCE, vol. 2, no. 1, 24 mai 2017 (2017-05-24), pages 269-283, XP055451422, DOI: 10.5194/wes-2-269-2017	1,2,4-6, 9,11-15	G01S
A	* abrégé; figures 1,2,5 * * page 270, colonne de droite, alinéa 2 Wind field reconstruction - page 273, colonne de droite, alinéa 2.4.1 Wind model * ----- -/-	3,7,8	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
19 février 2018		Mercier, Francois	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 840992
FR 1755675

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A,D	R MAYES ET AL: "Topics in Experimental Dynamics Substructuring and Wind Turbine Dynamics, Volume 2 : Proceedings of the 30th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2012", PROCEEDINGS OF THE 30TH IMAC,, 1 janvier 2012 (2012-01-01), XP055451327, New York, NY DOI: 10.1007/978-1-4614-2422-2 ISBN: 978-1-4614-2421-5 * le document en entier * -----	1-15	
A,D	P. TOWERS ET AL: "Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation : LiDAR wind field estimation", WIND ENERGY, vol. 19, no. 1, 21 novembre 2014 (2014-11-21), pages 133-150, XP055451329, GB ISSN: 1095-4244, DOI: 10.1002/we.1824 * le document en entier * -----	1-15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)

Date d'achèvement de la recherche		Examineur
19 février 2018		Mercier, Francois

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire	T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant
---	--