

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de détection d'un tourbillon dans une étendue d'eau et système associé.

②② Date de dépôt : 24.12.21.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *Centre national de la recherche
scientifique Etablissement public à caractère
scientifique et technique Française —FR, ECOLE
POLYTECHNIQUE Autre établissement public national
d'enseignement Française FR, ECOLE NORMALE
SUPERIEURE Etablissement public national à
caractère scientifique, culturel et professionnel
Française FR et Sorbonne Université Etablissement
public national à caractère scientifique, culturel et
professionnel Française — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 30.06.23 Bulletin 23/26.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 19.07.24 Bulletin 24/29.

⑦② Inventeur(s) : MOSCHOS EVANGELOS, STEGNER
Alexandre, LE VU Briac et SCHWANDER Olivier.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦③ Titulaire(s) : *Centre national de la recherche
scientifique (EPST), ECOLE POLYTECHNIQUE Autre
établissement public national d'enseignement
Française, ECOLE NORMALE SUPERIEURE
(EPSCP), Sorbonne Université (EPSCP).*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HAUTIER.



Description

Titre de l'invention : Procédé de détection d'un tourbillon dans une étendue d'eau et système associé

- [0001] La présente invention concerne un procédé de détection d'au moins un tourbillon dans une étendue d'eau. La présente invention se rapporte également à des procédés utilisant le résultat du procédé de détection. La présente invention concerne aussi un système de détection correspondant
- [0002] Les tourbillons océaniques ont un impact sur les courants de surface et en profondeur. Cela peut en particulier gêner la circulation des navires.
- [0003] En outre, les tourbillons correspondent à des anomalies de température et de salinité qui s'étendent profondément en-dessous de la surface, de sorte que ces tourbillons modifient localement les propriétés de transport et de mélange dans chaque direction. Cela entraîne notamment des modifications dans la distribution des espèces bio-chimiques et des polluants.
- [0004] Il est donc souhaitable de pouvoir détecter de manière automatique et fiable les tourbillons dans une étendue d'eau.
- [0005] Pour cela, il est connu d'utiliser des données altimétriques et d'utiliser des outils de prédiction de la présence de tourbillons appliqués sur ces données.
- [0006] Toutefois, la précision est faible car d'une part, les données altimétriques comportent des erreurs intrinsèques difficiles à corriger et, d'autre part, la résolution de ces données ne permet pas de détecter les petits tourbillons, c'est-à-dire des tourbillons présentant un rayon inférieur à 25 kilomètres.
- [0007] Il existe donc un besoin pour un procédé de détection d'au moins un tourbillon dans une étendue d'eau qui soit efficace.
- [0008] A cet effet, la description décrit un procédé de détection d'au moins un tourbillon dans une étendue d'eau, le procédé étant mis en œuvre par ordinateur et comportant la réception d'une image de l'étendue d'eau prise avec une résolution inférieure ou égale à 10 km, l'application d'un réseau de neurones sur l'image reçue pour détecter la présence éventuelle d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau et, le cas échéant, la position d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau, le réseau de neurones étant un réseau de neurones entièrement convolutif, le réseau de neurones ayant été appris par des données d'apprentissage, les données d'apprentissage comportant des données synthétiques, chaque donnée synthétique étant un couple image d'une étendue d'eau et position des tourbillons contenus dans ladite image, la position de chaque tourbillon étant obtenue par application d'un détecteur de tourbillons sur l'image de la donnée synthétique et sur le champ de vitesse de chaque tourbillon contenu dans l'image de la

donnée synthétique.

- [0009] Selon des modes de réalisation particuliers, le procédé de détection présente une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0010] - l'image comporte des pixels, et dans lequel, lors de l'étape d'application, le réseau de neurones classe chaque pixel selon au moins deux catégories, une catégorie étant l'appartenance à un tourbillon et une autre catégorie étant la non-appartenance à un tourbillon.
- [0011] - le réseau de neurones classe chaque pixel selon trois catégories : une première catégorie étant l'appartenance à un tourbillon anticyclonique, une deuxième catégorie étant l'appartenance à un tourbillon cyclonique et une troisième catégorie étant la non-appartenance à un tourbillon.
- [0012] - chaque image est une image de température de surface.
- [0013] - chaque image est une image visible.
- [0014] - l'image reçue présente une résolution inférieure ou égale à 3 kilomètres.
- [0015] - il est défini pour chaque tourbillon un contour extérieur, le procédé comportant, en outre, l'affichage de l'image reçue dans laquelle les contours extérieurs des tourbillons détectés sont mis en évidence.
- [0016] - les données d'apprentissage comportent également des données dérivées des données synthétiques par une technique d'augmentation de données.
- [0017] - le réseau de neurones est un réseau de neurones entièrement convolutionnel.
- [0018] La description concerne aussi un procédé comportant la mise en œuvre du procédé de détection tel que précédemment décrit, le procédé comportant, en outre, l'exploitation des tourbillons détectés en mettant en œuvre une étape choisie parmi l'optimisation d'une trajectoire d'un navire pour utiliser les courants induits par les tourbillons détectés, la prédiction de la trajectoire de polluants, et la prédiction des zones de regroupement de poissons.
- [0019] La description porte aussi sur un produit programme d'ordinateur comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur mémorisé sur un support lisible d'informations, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre un procédé tel que précédemment décrit lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement des données.
- [0020] La description décrit également un support lisible d'informations comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre un procédé tel que précédemment décrit lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement de données.

- [0021] Des caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :
- [0022] - [Fig.1] la [Fig.1] est une représentation schématique d'un système et d'un produit programme d'ordinateur,
- [0023] - [Fig.2] la [Fig.2] est un ordinogramme d'un exemple de mise en œuvre de procédé de détection de tourbillons dans une image, et
- [0024] - [Fig.3] la [Fig.3] est une représentation schématique de la structure d'un réseau de neurones utilisé dans le procédé de détection.
- [0025] Un système 10 et un produit programme d'ordinateur 12 sont représentés sur la [Fig.1].
- [0026] L'interaction entre le système 10 et le produit programme d'ordinateur 12 permet la mise en œuvre d'un procédé de détection de la présence d'un tourbillon dans une étendue d'eau. Le procédé de détection est ainsi un procédé mis en œuvre par ordinateur.
- [0027] Le système 10 est un ordinateur de bureau. En variante, le système 10 est un ordinateur monté sur un rack, un ordinateur portable, une tablette, un assistant numérique personnel (PDA) ou un smartphone.
- [0028] Dans le cas de la [Fig.1], le système 10 comprend un calculateur 14, une interface utilisateur 16 et un dispositif de communication 18.
- [0029] Le calculateur 14 est un circuit électronique conçu pour manipuler et/ou transformer des données représentées par des quantités électroniques ou physiques dans des registres du système 10 et/ou des mémoires en d'autres données similaires correspondant à des données physiques dans les mémoires de registres ou d'autres types de dispositifs d'affichage, de dispositifs de transmission ou de dispositifs de mémorisation.
- [0030] En tant qu'exemples spécifiques, le calculateur 14 comprend un processeur monocœur ou multicœurs (tel qu'une unité de traitement centrale (CPU), une unité de traitement graphique (GPU), un microcontrôleur et un processeur de signal numérique (DSP)), un circuit logique programmable (comme un circuit intégré spécifique à une application (ASIC), un réseau de portes programmables in situ (FPGA), un dispositif logique programmable (PLD) et des réseaux logiques programmables (PLA)), une machine à états, une porte logique et des composants matériels discrets.
- [0031] Le calculateur 14 comprend une unité de traitement de données 20 adaptée pour traiter des données, notamment en effectuant des calculs, des mémoires 22 adaptées à stocker des données et un lecteur 24 adapté à lire un support lisible par ordinateur.
- [0032] L'interface utilisateur 16 comprend un dispositif d'entrée 26 et un dispositif de sortie 28.

- [0033] Le dispositif d'entrée 26 est un dispositif permettant à l'utilisateur du système 10 de saisir sur le système 10 des informations ou des commandes.
- [0034] Sur la [Fig.1], le dispositif d'entrée 26 est un clavier. En variante, le dispositif d'entrée 26 est un périphérique de pointage (tel qu'une souris, un pavé tactile et une tablette graphique), un dispositif de reconnaissance vocale, un oculomètre ou un dispositif haptique (analyse des mouvements).
- [0035] Le dispositif de sortie 28 est une interface utilisateur graphique, c'est-à-dire une unité d'affichage conçue pour fournir des informations à l'utilisateur du système 10.
- [0036] Sur la [Fig.1], le dispositif de sortie 28 est un écran d'affichage permettant une présentation visuelle de la sortie. Dans d'autres modes de réalisation, le dispositif de sortie 28 est une imprimante, une unité d'affichage augmenté et/ou virtuel, un haut-parleur ou un autre dispositif générateur de son pour présenter la sortie sous forme sonore, une unité produisant des vibrations et/ou des odeurs ou une unité adaptée à produire un signal électrique.
- [0037] Dans un mode de réalisation spécifique, le dispositif d'entrée 26 et le dispositif de sortie 28 sont le même composant formant des interfaces homme-machine, tel qu'un écran interactif.
- [0038] Le dispositif de communication 18 permet une communication unidirectionnelle ou bidirectionnelle entre les composants du système 10. Par exemple, le dispositif de communication 18 est un système de communication par bus ou une interface d'entrée / sortie.
- [0039] La présence du dispositif de communication 18 permet que, dans certains modes de réalisation, les composants du calculateur 14 soient distants les uns des autres.
- [0040] Le produit programme informatique 12 comprend un support lisible par ordinateur 30.
- [0041] Le support lisible par ordinateur 30 est un dispositif tangible lisible par le lecteur 14 du calculateur 14.
- [0042] Notamment, le support lisible par ordinateur 30 n'est pas un signal transitoire en soi, tels que des ondes radio ou d'autres ondes électromagnétiques à propagation libre, telles que des impulsions lumineuses ou des signaux électroniques.
- [0043] Un tel support de stockage lisible par ordinateur 30 est, par exemple, un dispositif de stockage électronique, un dispositif de stockage magnétique, un dispositif de stockage optique, un dispositif de stockage électromagnétique, un dispositif de stockage à semi-conducteur ou toute combinaison de ceux-ci.
- [0044] En tant que liste non exhaustive d'exemples plus spécifiques, le support de stockage lisible par ordinateur 30 est un dispositif codé mécaniquement, tel que des cartes perforées ou des structures en relief dans une gorge, une disquette, un disque dur, une mémoire morte (ROM), une mémoire vive (RAM), une mémoire effaçable pro-

grammable en lecture seule (EROM), une mémoire effaçable électriquement et lisible (EEPROM), un disque magnéto-optique, une mémoire vive statique (SRAM), un disque compact (CD-ROM), un disque numérique polyvalent (DVD), une clé USB, un disque souple, une mémoire flash, un disque à semi-conducteur (SSD) ou une carte PC telle qu'une carte mémoire PCMCIA.

- [0045] Un programme d'ordinateur est stocké sur le support de stockage lisible par ordinateur 30. Le programme d'ordinateur comprend une ou plusieurs séquences d'instructions de programme mémorisées.
- [0046] De telles instructions de programme, lorsqu'elles sont exécutées par l'unité de traitement de données 20, entraînent l'exécution d'étapes du procédé de détermination.
- [0047] Par exemple, la forme des instructions de programme est une forme de code source, une forme exécutable par ordinateur ou toute forme intermédiaire entre un code source et une forme exécutable par ordinateur, telle que la forme résultant de la conversion du code source via un interpréteur, un assembleur, un compilateur, un éditeur de liens ou un localisateur. En variante, les instructions de programme sont un microcode, des instructions firmware, des données de définition d'état, des données de configuration pour circuit intégré (par exemple du VHDL) ou un code objet.
- [0048] Les instructions de programme sont écrites dans n'importe quelle combinaison d'un ou de plusieurs langages, par exemple un langage de programmation orienté objet (FORTRAN, C++, JAVA, HTML), un langage de programmation procédural (langage C par exemple). Dans la mise en œuvre expérimentale de la demanderesse, le langage choisi était le Python.
- [0049] Alternativement, les instructions du programme sont téléchargées depuis une source externe via un réseau, comme c'est notamment le cas pour les applications. Dans ce cas, le produit programme d'ordinateur comprend un support de données lisible par ordinateur sur lequel sont stockées les instructions de programme ou un signal de support de données sur lequel sont codées les instructions de programme.
- [0050] Dans chaque cas, le produit programme d'ordinateur 12 comprend des instructions qui peuvent être chargées dans l'unité de traitement de données 20 et adaptées pour provoquer l'exécution du procédé de détection lorsqu'elles sont exécutées par l'unité de traitement de données 20. Selon les modes de réalisation, l'exécution est entièrement ou partiellement réalisée soit sur le système 10, c'est-à-dire un ordinateur unique, soit dans un système distribué entre plusieurs ordinateurs (notamment via l'utilisation de l'informatique en nuage).
- [0051] Le fonctionnement du système 10 est maintenant décrit en référence à la [Fig.2] qui est un ordinogramme illustrant un exemple de mise en œuvre du procédé de détection.
- [0052] Le procédé de détection cherche à détecter au moins un tourbillon dans une étendue d'eau.

- [0053] Selon l'exemple décrit, le procédé comporte une phase d'établissement P1 d'un outil de prédiction et une phase d'exploitation P2 de l'outil de prédiction établi.
- [0054] Il sera bien compris qu'en pratique, les phases d'établissement P1 et d'exploitation P2 sont mises en œuvre de manière indépendantes, la phase d'établissement P1 étant réalisée préalablement et la phase d'exploitation P2 étant réalisée ultérieurement à un autre endroit, et en particulier avec deux systèmes distincts.
- [0055] A titre d'exemple particulier, la phase d'établissement est mise en œuvre hors ligne et la phase d'exploitation est mise en œuvre en ligne à l'aide du système 10.
- [0056] La phase d'établissement P1 vise à obtenir un outil de prédiction.
- [0057] L'outil de prédiction permet à partir d'images d'une étendue d'eau de prédire sur une zone réduite le contour caractéristique d'un ou plusieurs tourbillons présents dans la zone.
- [0058] En l'occurrence, l'outil de prédiction est un réseau de neurones qui sera décrit plus précisément dans ce qui suit.
- [0059] La phase d'établissement P1 comporte une étape de constitution E50 d'une base de données d'apprentissage et une étape d'apprentissage E52.
- [0060] L'étape de constitution E50 vise à générer des données qui serviront à l'apprentissage et qui sont de ce fait des données synthétiques.
- [0061] En l'espèce, la base de données est une base de données de taille importante, comportant plusieurs milliers, de préférence plusieurs dizaines de milliers de données.
- [0062] Chaque donnée synthétique est un couple formé par une image de température de surface d'une étendue d'eau d'une part et les contours caractéristiques des tourbillons contenus dans ladite image d'autre part.
- [0063] Ce couple de données synthétiques utilisé dans l'étape d'apprentissage E52 est issu d'un modèle numérique de circulation océanique.
- [0064] La résolution de ce modèle numérique présente une résolution comparable, de préférence au moins égale, à la résolution des images satellites, typiquement 2 km par 2 km. Une telle résolution permet d'assurer l'obtention de l'ensemble des structures filamentaires entourant le tourbillon et permettant de caractériser sa forme et son sens de rotation (cyclonique ou anticyclonique).
- [0065] Le modèle océanique est ainsi un modèle à haute résolution. Ce modèle est propre à résoudre des équations dynamiques de l'océan en trois dimensions forcé par les vents de surface et les flux radiatifs atmosphériques.
- [0066] Une image de température de surface d'une étendue d'eau est une image satellite. Une telle image est souvent désignée sous le terme image SST, l'abréviation SST renvoyant à la dénomination anglaise correspondante de « *Sea Surface Temperature* ».
- [0067] La position de chaque tourbillon est obtenue par application d'un détecteur de

tourbillons sur l'image de température de surface de la donnée synthétique et sur le champ de vitesse de chaque tourbillon contenu dans l'image de température de surface de la donnée synthétique. Le contour caractéristique de chaque tourbillon est obtenu à l'aide du champ de vitesse du modèle numérique de circulation océanique.

- [0068] Le détecteur de tourbillons est également capable de déterminer le contour du tourbillon.
- [0069] Le contour d'un tourbillon est défini comme la ligne de courant fermée englobant le centre du tourbillon et dont la moyenne des vitesses le long du contour est maximum. Pour cela, la vitesse moyenne est calculée le long de chaque ligne de courant fermée qui entoure le centre du tourbillon et la ligne de courant retenue comme le contour du tourbillon est la ligne de courant présentant la plus forte valeur.
- [0070] Le détecteur de tourbillons est, par exemple, l'outil AMEDA décrit dans l'article B. Le Vu et al. intitulé « Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation » J. Atmos. Oceanic Technol, v. 35, 739-762.
- [0071] Dans la base de données, le contour du tourbillon est ajouté sur chaque image SST pour améliorer la qualité de la prédiction du réseau de neurones à apprendre.
- [0072] Pour générer une donnée, il est ensuite extrait une partie de l'image pour obtenir une image de température de surface est centrée sur la zone où se trouve le tourbillon détecté.
- [0073] De préférence, la taille de la zone imagée est liée à celle du tourbillon à détecter. Typiquement, le rapport entre la taille de la zone imagée et la taille du tourbillon est supérieur ou égale à quatre et inférieure ou égale à 8.
- [0074] En considérant que l'image de température de la surface comporte des pixels, la taille d'une zone est évaluée en déterminant le nombre de pixels que comporte la zone.
- [0075] Sur une image SST, il sera ainsi possible de générer plusieurs données.
- [0076] En complément optionnel, lors de l'étape de constitution, il est utilisé une technique d'augmentation de données pour obtenir des données dérivées des données synthétiques. Dans un tel cas, la base de données d'apprentissage comporte à la fois des données synthétiques et des données dérivées des données synthétiques. Par exemple, pour augmenter la variance des données, il est généré une image artificielle en faisant tourner l'image de la zone. La nouvelle image artificielle peut ainsi être utilisée comme donnée en combinaison avec la détermination du même tourbillon.
- [0077] Cela permet d'avoir une grande variété d'échantillons de signatures de tourbillons tout en évitant de surreprésenter une catégorie de ces signatures.
- [0078] Lors de l'étape d'apprentissage E52, le réseau de neurones est appris en utilisant la base de données.
- [0079] Selon l'exemple décrit, à l'aide d'une image SST, le réseau de neurones est propre à

- déterminer le contour d'un tourbillon et déterminer les pixels comportant le tourbillon.
- [0080] Le réseau de neurones classe chaque pixel selon au moins deux catégories, à savoir une catégorie d'appartenance à un tourbillon et une autre catégorie de non-appartenance à un tourbillon.
- [0081] Selon une version plus élaborée, le réseau de neurones classe chaque pixel selon trois catégories : une première catégorie étant l'appartenance à un tourbillon anticyclonique, une deuxième catégorie étant l'appartenance à un tourbillon cyclonique et une troisième catégorie étant la non-appartenance à un tourbillon
- [0082] Pour cela, le réseau de neurones est un réseau de neurones entièrement convolutif.
- [0083] Le réseau de neurones présente une structure de type U-Net.
- [0084] Un tel réseau de neurones est un réseau de neurones entièrement convolutionnels. Un tel réseau permet d'obtenir des segmentations d'images plus précises tout en fonctionnant avec moins d'images d'entraînement.
- [0085] La structure du réseau de neurones est présentée sur la [Fig.3].
- [0086] La structure du réseau de neurones présente une forme en U dans la mesure où ils utilisent deux branches, une première et une deuxième se correspondant. La première branche B1 est une partie contractante tandis que la deuxième branche B2 est une voie expansive.
- [0087] La première branche est un réseau de convolution consistant en une application répétée de filtres convolutifs de taille 3x3, chacune suivie d'une unité linéaire rectifiée (désigné par ReLU dans la [Fig.3]) et d'une opération de MaxPooling (pooling maximum). Le processus d'apprentissage consiste à déterminer les coefficients des filtres convolutifs, qui servent chacun à extraire certaines caractéristiques de l'image d'entrée. La couche notée ReLU est une fonction d'activation, qui décide si un certain filtre doit être activé ou non, et qui introduit une non-linéarité dans le processus d'apprentissage.
- [0088] Pendant la contraction, les informations spatiales sont réduites tandis que les informations sur les caractéristiques sont augmentées.
- [0089] La deuxième branche combine les informations de caractéristiques géographiques et spatiales à travers une séquence de convolutions et de concaténations ascendantes avec des caractéristiques haute résolution issues de la voie contractante.
- [0090] Le nombre de cartes de caractéristiques extraites par l'opération convolutive augmente dans la première branche tandis qu'il diminue dans la deuxième branche. Le nombre des filtres convolutifs appliqués à chaque couche de convolution est égal à ce nombre de cartes de caractéristiques à chaque étape. Plus précisément, le réseau de neurones comporte dans la première branche un nombre croissant de cartes des caractéristiques d'abord N puis 2N et ainsi de suite en augmentant de 2 à chaque fois pour parvenir jusqu'à 16N puis dans une deuxième branche des couches convolutionnelles

de plus en plus petites en diminuant de 2 à chaque fois pour revenir à N. Les couches convolutionnelles de la deuxième branche appliquent l'opération inverse de celles de la première branche, appelée convolution transposée (d'où l'emploi de la notation N^*). Les cartes caractéristiques de chaque étape de la deuxième branche sont également concaténées (voir notation C dans la [Fig.3]) avec les cartes correspondantes issues de la première branche par l'opération de concaténation illustrée à la [Fig.3], avant l'application de la convolution transposée suivante.

- [0091] Entre chaque couche convolutionnelle se trouve une couche dite de « MaxPooling » (MP dans la [Fig.3]) dans la première branche et une couche dite de « UpSampling » (UP dans la [Fig.3]) dans la deuxième branche. Ces couches vont diminuer (MP) ou agrandir (UP) les dimensions spatiales des cartes de caractéristiques issues de l'étape précédente.
- [0092] Il est à noter que pour la dernière convolution N^* , en sortie de la couche ReLU, il y a une couche supplémentaire de convolution CONV qui projette les N cartes de caractéristiques vers un nombre C de cartes d'occurrences, où C est le nombre de classes souhaitées comme indiqué précédemment. Via l'application d'une fonction soft max, ces C occurrences sont transformées en C cartes de pseudo-probabilité pour chaque classe C. Le label de chaque pixel du masque de sortie est alors déduit en sélectionnant la classe avec la pseudo-probabilité la plus élevée pour ce pixel. Le contour prédit par le réseau de neurones est ensuite récupéré à partir du contour du masque de sortie et labellisé de manière correspondante.
- [0093] Le réseau de neurones ainsi appris est capable de prédire à partir d'une image SST si un tourbillon est présent et quel est son contour.
- [0094] Le réseau de neurones n'a pas besoin de prendre en entrée d'autres données, dont notamment pas des données altimétriques.
- [0095] La phase d'exploitation P2 comporte une étape de réception E54, une étape d'application E56 et une étape d'affichage E58.
- [0096] Lors de l'étape de réception E54, le système 10 reçoit une image de l'étendue d'eau.
- [0097] L'image est une image à haute-résolution, c'est-à-dire une image prise avec une résolution inférieure ou égale à 10 kilomètres (km).
- [0098] De préférence, l'image reçue présente une meilleure résolution, par exemple une résolution inférieure ou égale à 2 km.
- [0099] Selon l'exemple décrit, l'image reçue est une image de température de surface.
- [0100] Lors de l'étape d'application E56, le système 10 applique le réseau de neurones appris sur l'image reçue pour détecter la présence éventuelle d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau et, le cas échéant, la position d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau.
- [0101] Lors de l'étape d'affichage E58, le système 10 affiche de l'image reçue dans laquelle

les contours extérieurs des tourbillons détectés sont mis en évidence.

- [0102] Pour évaluer les performances du procédé de détection, la demanderesse a effectué un test sur images SST issues de modèles numériques et de données altimétriques simulées tirées de ce même modèle numérique qui reproduisent une année entière de circulation océanique en Mer Méditerranée. Cela correspond à un ensemble d'échantillons test de tourbillons dont le rayon moyen est supérieur à 20 km.
- [0103] La demanderesse a permis de montrer que le procédé de détection détecte 98% de ces tourbillons alors qu'une technique basée sur des données altimétriques n'en détecte que 65% en Mer Méditerranée.
- [0104] Ce test de fiabilité montre que la détection sur des images SST est nettement plus efficace que les méthodes se basant sur des données altimétriques
- [0105] Le procédé permet ainsi de déterminer, de manière efficace, la présence des tourbillons dans une étendue d'eau de taille restreinte en l'absence de nuages.
- [0106] La totalité d'un bassin océanique pouvant être découpé en plusieurs zones de taille restreinte, le procédé n'est pas limité par la taille de la zone étudiée, quitte à mettre en œuvre le procédé pour plusieurs zones.
- [0107] De plus, par rapport à une technique basée sur des données altimétriques, le procédé permet la détection de tourbillons de faible taille.
- [0108] La détection de tourbillons dans une étendue d'eau est intéressante pour de multiples applications.
- [0109] A titre d'exemple, il peut être envisagé un procédé comportant, en outre, l'exploitation des tourbillons détectés.
- [0110] Une telle exploitation est, par exemple, l'optimisation d'une trajectoire d'un navire dans l'étendue d'eau pour éviter d'être face aux courants engendrés par les tourbillons détectés. Inversement, l'optimisation de la trajectoire peut viser à modifier la trajectoire d'un navire pour aller dans le sens des courants engendrés par les tourbillons détectés.
- [0111] Selon un autre exemple, un procédé de prédiction de la trajectoire de polluants comporte la mise en œuvre du procédé de détection et la prédiction de la trajectoire de polluants sur la base des tourbillons.
- [0112] Similairement, il est possible d'envisager un procédé de prédiction de la trajectoire du phytoplancton et du zooplancton et donc des zones de regroupement des poissons qui s'en nourrissent.
- [0113] D'autres modes de réalisation du procédé de détection sont également possibles.
- [0114] En particulier, au lieu d'utiliser des images SST en entrée, il est possible d'utiliser des images prises dans le visible (c'est-à-dire dont les longueurs d'ondes d'acquisition sont comprises entre 400 nm et 800 nm).

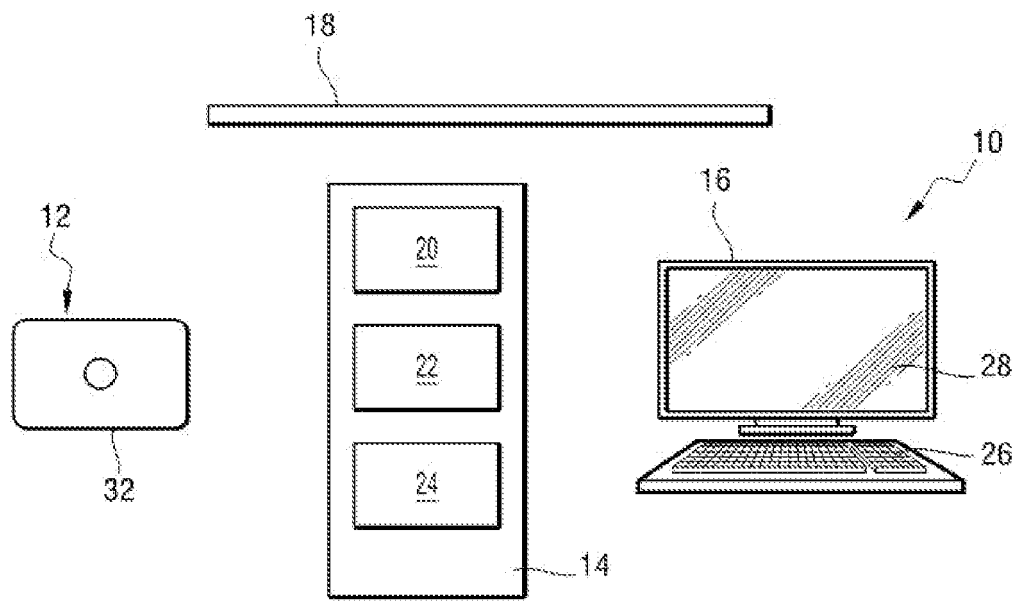
Revendications

- [Revendication 1] Procédé de détection d'au moins un tourbillon dans une étendue d'eau, le procédé étant mis en œuvre par ordinateur et comportant :
- la réception d'une image de l'étendue d'eau prise avec une résolution inférieure ou égale à 10 km,
 - l'application d'un réseau de neurones uniquement sur l'image reçue pour détecter la présence éventuelle d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau et, le cas échéant, la position d'au moins un tourbillon sur l'étendue d'eau,
- le réseau de neurones étant un réseau de neurones entièrement convolutif, le réseau de neurones ayant été appris par des données d'apprentissage, les données d'apprentissage comportant des données synthétiques, chaque donnée synthétique étant un couple formé d'une image d'une étendue d'eau et de la position des tourbillons contenus dans ladite image, la position de chaque tourbillon étant obtenue par application d'un détecteur de tourbillons sur l'image de la donnée synthétique et sur le champ de vitesse de chaque tourbillon contenu dans l'image de la donnée synthétique.
- [Revendication 2] Procédé de détermination selon la revendication 1, dans lequel, l'image comporte des pixels, et dans lequel, lors de l'étape d'application, le réseau de neurones classe chaque pixel selon au moins deux catégories, une catégorie étant l'appartenance à un tourbillon et une autre catégorie étant la non-appartenance à un tourbillon.
- [Revendication 3] Procédé de détermination selon la revendication 2, dans lequel le réseau de neurones classe chaque pixel selon trois catégories : une première catégorie étant l'appartenance à un tourbillon anticyclonique, une deuxième catégorie étant l'appartenance à un tourbillon cyclonique et une troisième catégorie étant la non-appartenance à un tourbillon.
- [Revendication 4] Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel chaque image est une image de température de surface.
- [Revendication 5] Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel chaque image est une image visible.
- [Revendication 6] Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel l'image reçue présente une résolution inférieure ou égale à 3 kilomètres.
- [Revendication 7] Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel il est défini pour chaque tourbillon un contour extérieur,

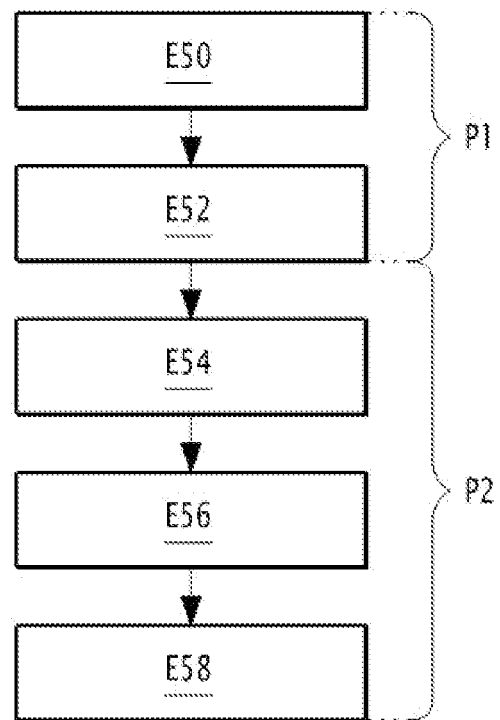
le procédé comportant, en outre, l'affichage de l'image reçue dans laquelle les contours extérieurs des tourbillons détectés sont mis en évidence.

- [Revendication 8] Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel les données d'apprentissage comportent également des données dérivées des données synthétiques par une technique d'augmentation de données.
- [Revendication 9] Procédé comportant la mise en œuvre du procédé de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, le procédé comportant, en outre, l'exploitation des tourbillons détectés en mettant en œuvre une étape choisie parmi :
- l'optimisation d'une trajectoire d'un navire pour utiliser les courants induits par les tourbillons détectés,
 - la prédiction de la trajectoire de polluants, et
 - la prédiction des zones de regroupement de poissons.
- [Revendication 10] Produit programme d'ordinateur comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur mémorisé sur un support lisible d'informations, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre un procédé l'une quelconque des revendications 1 à 9 lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement des données.
- [Revendication 11] Support lisible d'informations comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement de données.

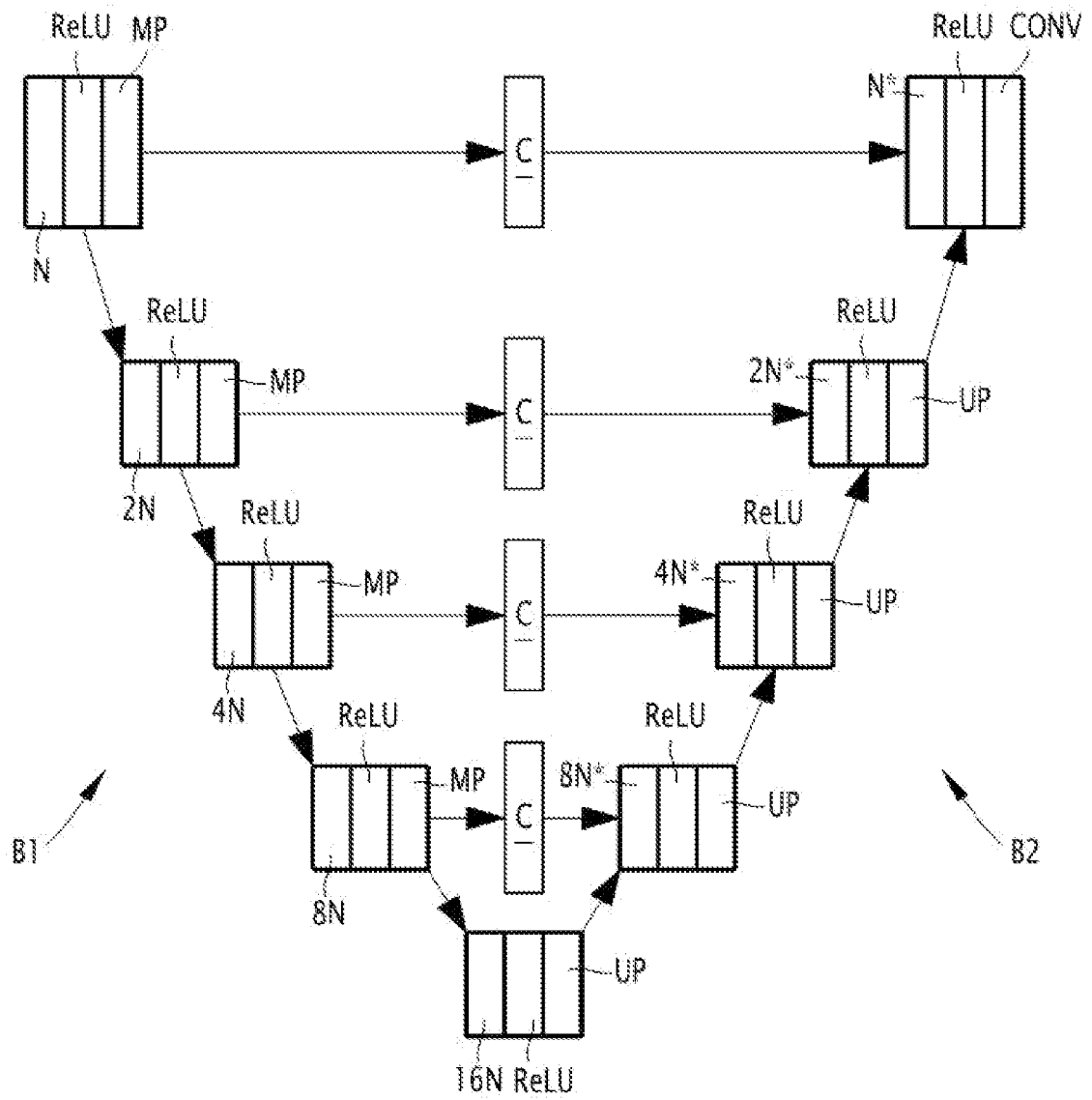
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

LAMBHATE DEVYANI ET AL: "W-Net: A Deep Network for Simultaneous Identification of Gulf Stream and Rings From Concurrent Satellite Images of Sea Surface Temperature and Height",
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE, USA,
vol. 60, 26 juillet 2021 (2021-07-26),
pages 1-13, XP011897709,
ISSN: 0196-2892, DOI:
10.1109/TGRS.2021.3096202
[extrait le 2022-01-13]

REDOUANE LGUENSAT ET AL: "EddyNet: A Deep Neural Network For Pixel-Wise Classification of Oceanic Eddies",
ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201
OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY
14853,
10 novembre 2017 (2017-11-10),
XP080836205,

CN 112 102 325 A (INST OCEANOLOGY CAS)
18 décembre 2020 (2020-12-18)

LU XIRONG ET AL: "Mesoscale Ocean Eddy Detection Using High-Resolution Network",
2020 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AWARENESS SCIENCE AND TECHNOLOGY (ICAST),
IEEE,
7 décembre 2020 (2020-12-07), pages 1-6,
XP033879771,
DOI: 10.1109/ICAST51195.2020.9319490
[extrait le 2021-01-08]

MOSCHOS EVANGELOS ET AL:
"Deep-SST-Eddies: A Deep Learning Framework to Detect Oceanic Eddies in Sea Surface Temperature Images",
ICASSP 2020 - 2020 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP), IEEE,
4 mai 2020 (2020-05-04), pages 4307-4311,
XP033793635,
DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053909
[extrait le 2020-04-01]

MOSCHOS EVANGELOS ET AL: "Classification of Eddy Sea Surface Temperature Signatures Under Cloud Coverage",
IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING,

IEEE, USA,
vol. 13, 11 juin 2020 (2020-06-11), pages
3437-3447, XP011797433,
ISSN: 1939-1404, DOI:
10.1109/JSTARS.2020.3001830
[extrait le 2020-07-07]

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT