

DESCRIPTION

Titre de l'invention : Système et méthode pour la détermination améliorée de paramètres de trajectoire d'aéronefs

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne la détermination paramètres de trajectoires d'aéronef, par exemple des temps de roulage, ou des temps de vol. La présente invention concerne également l'utilisation de ces paramètres de trajectoires d'aéronefs par des opérateurs tels que des contrôleurs aériens pour réguler le trafic aérien.

Etat de l'art précédent

[0002] Les systèmes de contrôle aérien ont pour but de rendre l'exécution des vols plus sûrs, rapides et efficaces. Ils permettent de prévenir les collisions entre aéronefs, ou les situations dangereuses entre un aéronef et son environnement (météo, relief...). Ils permettent ainsi, en synchronisant de manière aussi fine que possible la circulation des aéronefs, de s'assurer d'une circulation aérienne sécurisée, mais permettent également aux aéronefs de respecter les heures de vols prévues, et d'adopter des trajectoires aussi économes que possible en carburant.

[0003] A cet effet, des contrôleurs aériens reçoivent un ensemble d'informations relatives à l'espace aérien : position et trajectoires prédites des aéronefs, météo... Les contrôleurs peuvent également communiquer, via des messages écrits ou des communications orales, avec les pilotes des aéronefs afin de récupérer les cas échéant des informations complémentaires, et leur donner des instructions adaptées à la situation, pour garantir la sécurité de la circulation aérienne, tout en s'assurant de la meilleure qualité de service possible aux usagers du transport aérien. Par exemple, les contrôleurs aériens peuvent communiquer aux pilotes le moment opportun pour atterrir ou décoller d'un aéroport, ou au contraire leur donner l'instruction de différer leur approche si une piste d'atterrissage est utilisée par des aéronefs à l'heure initialement prévue.

[0004] Dans un contexte de trafic aérien de plus en plus dense, les instructions fournies aux aéronefs se basent sur des prédictions de présence des aéronefs en différents endroits. Par exemple, les contrôleurs aériens peuvent prévoir, à l'avance quel sera la durée de roulage d'un aéronef donné avant décollage, la durée du

décollage, la durée de croisière, etc. Ceci permet d'évaluer, pour chaque aéronef, son temps de présence en un endroit donné, et inversement de la densité du trafic en un endroit et à un temps donné. Ceci permet aux contrôleurs aériens de fournir aux aéronefs les instructions adaptées, pour assurer la sécurité mais également l'optimisation du trafic aérien. La capacité des contrôleurs aériens à prévoir à l'avance l'emplacement des aéronefs, et la durée des différentes phases de circulation aérienne est donc essentielle, pour garantir tant la sécurité que l'efficacité de la circulation aérienne, et gérer les flux d'arrivée et de départ des aéronefs des aéroports.

[0005] Les contrôleurs s'appuient aujourd'hui sur des outils de gestion de flux permettant à un contrôleur de bénéficier d'une prédiction des paramètres de trajectoires des aéronefs. Ces outils de gestion de flux sont aujourd'hui basés sur des informations issues d'une grande quantité de paramètres définis hors ligne, qui sont fastidieux à introduire dans le système et/ou issues de calculs analytiques basés sur une modélisation qui peut s'avérer approximative. Les outils actuels nécessiteraient donc, pour fournir une prédiction efficace des paramètres de vol des aéronefs, d'introduire manuellement des résultats de prédictions correspondant virtuellement à toutes les situations possibles. Ceci n'étant en pratique pas réalisable, les outils actuels fournissent des prédictions imprécises, ne permettant ainsi pas aux contrôleurs aériens de bénéficier d'un support adéquat pour la gestion de flux.

[0006] Il y a donc besoin d'une méthode de prédiction de paramètres de trajectoires d'aéronefs, pouvant fournir des résultats fiables pour toute situation de gestion de flux aérien, tout nécessitant une quantité de données d'entraînement limitées.

Résumé de l'invention

[0007] A cet effet, l'invention a pour objet une méthode mise en œuvre par ordinateur recevant en entrée un ensemble de descriptions de trajectoires d'aéronefs, associées chacune à un ensemble de paramètres d'entrée, comprenant, pour chaque trajectoire d'un aéronef : au moins un paramètre de l'aéronef ; au moins un paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef ; ladite méthode comprenant, pour chaque trajectoire : une étape de formation d'un vecteur de paramètres d'entrée comprenant lesdits paramètres d'entrée ; une étape d'extraction d'au moins un paramètre de la trajectoire ; ladite méthode comprenant une étape

d'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé prenant en entrée des associations, pour chaque trajectoire respectivement, entre son vecteur de paramètres d'entrée et moins un paramètre de la trajectoire.

[0008] Avantageusement, le moteur d'apprentissage automatique supervisé est un réseau de neurones à couches complètement connectées.

[0009] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est un temps de roulage en sortie, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un identifiant de porte de parking ; un identifiant de piste de décollage, et ou de point d'alignement ; des informations météorologiques ; un type d'aéronef ; un identifiant de compagnie aérienne ; un niveau de trafic au sol ; une accessibilité de piste de roulage ; une heure de la journée.

[0010] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est un temps d'occupation d'une piste d'atterrissage, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un identifiant de piste d'atterrissage ; un identifiant de porte de parking ; des informations météorologiques ; un type d'aéronef ; un identifiant de compagnie aérienne ; un type d'approche.

[0011] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est un temps de roulage en entrée, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un identifiant de piste d'atterrissage ; un identifiant de porte de parking ; des informations météorologiques ; un type d'aéronef ; un identifiant de compagnie aérienne ; un niveau de trafic au sol ; une indication des pistes de roulage fermées ; une heure de la journée.

[0012] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est un temps d'occupation de piste d'atterrissage, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un identifiant de piste d'atterrissage ; un identifiant de porte de parking ; des informations météorologiques ; un type d'aéronef ; un identifiant de compagnie aérienne ; un niveau de trafic au sol ; une indication des pistes de roulage fermées ; une heure de la journée.

[0013] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est une description d'une trajectoire d'approche, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : une vitesse d'aéronef ; un type d'aéronef ; une altitude au point dit de rassemblement ; des informations météorologiques ; un identifiant de compagnie aérienne ; une procédure et/ou un type d'approche ; une heure de la journée ; un niveau de trafic aérien ; des données de plan de vol ; des données de vol issues d'un système de contrôle aérien.

[0014] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est un temps de vol en route, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un type d'aéronef, ou une classe de vitesse de l'aéronef ; une altitude de vol ; des informations météorologiques ; une description de secteur ATC ; une description de zones de restrictions aériennes ; un identifiant de compagnie aérienne des données de plan de vol ; des données de vol issues d'un système de contrôle aérien.

[0015] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est une prédiction de trajectoire de l'aéronef sur un horizon temporel, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : une position 3D de l'aéronef ; un cap de l'aéronef ; des informations envoyées de l'aéronef au contrôle aérien ; des données de plan de vol ; des données de vol issues d'un système de contrôle aérien ; un type d'approche.

[0016] Avantageusement, l'au moins un paramètre de trajectoire est une possibilité de l'aéronef de dépasser un deuxième aéronef, et l'ensemble de paramètres d'entrée comprend au moins un paramètre choisi dans un groupe comprenant : un identifiant de couloir aérien, dans lequel se situent les aéronefs ; un type de l'aéronef ; un type du deuxième aéronef ; une altitude de l'aéronef ; une altitude du deuxième aéronef ; une vitesse de l'aéronef ; une vitesse du deuxième aéronef ; un plan de vol de l'aéronef ; un plan de vol du deuxième aéronef.

[0017] L'invention a également pour objet un système comprenant : au moins une unité de calcul apte à entraîner un moteur d'apprentissage automatique supervisé ; un accès à au moins un support de stockage d'information stockant, pour chaque trajectoire d'un aéronef parmi un ensemble de trajectoires d'aéronefs : une description de la trajectoire ; un ensemble de paramètres d'entrée associés à la

trajectoire comprenant : au moins un paramètre de l'aéronef ; au moins paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef ; l'au moins une unité de calcul étant configurée, pour chaque trajectoire, pour : former un vecteur de paramètres d'entrée comprenant les paramètres d'entrée associés à la trajectoire ; extraire au moins un paramètre de la trajectoire ; l'au moins une unité de calcul étant configurée pour entraîner un moteur d'apprentissage automatique supervisé prenant en entrée des associations, pour chaque trajectoire respectivement, entre son vecteur de paramètres d'entrée et moins un paramètre de la trajectoire.

[0018] L'invention a également pour objet un programme d'ordinateur comprenant instructions de code de programme pour l'exécution des étapes de la méthode selon l'invention lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[0019] L'invention a également pour objet une méthode mise en œuvre par ordinateur recevant en entrée, pour une trajectoire d'un aéronef, un ensemble de paramètres d'entrée comprenant : au moins un paramètre de l'aéronef ; au moins un paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef ; ladite méthode comprenant : une étape de formation, pour la trajectoire, d'un vecteur de paramètres d'entrée comprenant lesdits paramètres d'entrée ; une étape d'exécution d'un moteur d'apprentissage supervisé pour calculer, à partir du vecteur d'entrée, au moins un paramètre de la trajectoire, ledit moteur ayant été entraîné par une méthode selon l'invention.

[0020] L'invention a également pour objet un programme d'ordinateur comprenant instructions de code de programme pour l'exécution des étapes de la méthode selon l'invention lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[0021] L'invention a également pour objet un système comprenant : au moins une unité de calcul apte à exécuter un moteur d'apprentissage automatique supervisé ; au moins une unité de calcul apte à exécuter un moteur d'apprentissage automatique supervisé ; au moins un port d'entrée apte à recevoir, pour une trajectoire d'un aéronef, un ensemble de paramètres d'entrée comprenant : au moins un paramètre de l'aéronef ; au moins un paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef ; l'au moins une unité de calcul étant configurée pour : former, pour la trajectoire, un vecteur de paramètres d'entrée comprenant lesdits paramètres d'entrée ; exécuter ledit moteur d'apprentissage supervisé pour calculer, à partir du vecteur d'entrée, au

moins un paramètre de la trajectoire, ledit moteur ayant été entraîné par une méthode l'invention.

[0022] Avantageusement, l'au moins une unité de calcul est configurée pour utiliser l'au moins un paramètre de la trajectoire dans le cadre d'une application de gestion de flux aérien.

[0023] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple et qui représentent, respectivement :

- la figure 1, un système de contrôle aérien, dans lequel l'invention peut être implémentée ;
- la figure 2, un ensemble de phases de vols sur lesquelles l'invention est apte à prédire des paramètres de trajectoire ;
- la figure 3, un système de calcul permettant l'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé de prédiction d'au moins un paramètre de trajectoire d'aéronef, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 4, une méthode d'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé de prédiction d'au moins un paramètre d'une trajectoire d'aéronef, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 5, un système de calcul d'au moins un paramètre de trajectoire d'aéronef utilisant un moteur d'apprentissage automatique supervisé, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 6, une méthode mise en œuvre par ordinateur de calcul d'au moins un paramètre d'une trajectoire d'aéronef utilisant un moteur d'apprentissage automatique supervisé, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

Certains acronymes anglo-saxons couramment utilisés dans le domaine technique de la présente demande pourront être employés au cours de la description. Ces acronymes sont listés dans le tableau ci-dessous, avec notamment leur expression anglo-saxonne et leur signification.

Acronyme	Expression	Signification
ACC	Area Control Center	Centre de Contrôle Régional : Centre Régional

		assurant la sécurité du trafic aérien.
AOC	Aeronautical Operational Control	Contrôle Opérationnel Aéronautique. Un ensemble ou sous-ensemble des applications utilisées par un aéronef pour communiquer avec des services au sol.
AMAN	Arrival MANager	Gestionnaire d'arrivées. Fonctionnalité d'une application de gestion de flux aériens consistant à gérer les arrivées d'aéronefs (i.e allocation d'un créneau d'atterrissage, assignation d'une piste d'atterrissage, d'une porte...).
ATC	Air Traffic Control	Contrôle de Circulation Aérienne (CCA). Service fourni par des contrôleurs aériens au sol pour diriger un aéronef au sol en sécurité.
ATFM	Air Traffic Flow Management	Gestion des Flux du Trafic Aérien. Partie de la gestion du trafic aérien visant à éviter la congestion des aéroports.
ATM	Air Traffic Management	Gestion du Trafic Aérien : ensemble des activités menées pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic aérien.
CPDLC	Controller-Pilot Data Link Communications	Lien de données de communication contrôleur-pilote. Méthode de communication entre les contrôleurs et les pilotes, définissant un ensemble de messages élémentaires pouvant être échangés. Ces messages correspondent aux procédures utilisées pour le contrôle aérien.
DMAN	Departure MANager	Gestionnaire de départ. Fonctionnalité d'une application de gestion de flux aérien consistant à gérer les départs d'aéronefs d'un aéroport, par exemple en leur allouant un créneau horaire de départ, et une piste de décollage.
FCN	Fully Connected Network	Réseau Complètement Connecté. Réseau de neurones dans lequel chaque couche est entièrement connectée, c'est-à-dire que chaque neurone d'une couche possède une connexion vers tous les neurones de la couche précédente.
FIR	Flight Information Region	Région d'Information de Vol : volume dans lequel un centre de contrôle donné s'assure du bon déroulement des vols. En France les FIR

		recoupent un espace de vol jusqu'à 19500 pieds.
FL	Flight Level	Niveau de Vol. En aéronautique, désigne une altitude exprimée en centaines de pieds au-dessus de la surface isobare 1013,25 hPa.
GPS	Global Positionning System	Système de Positionnement Global. Système de positionnement par satellite.
GRIB	GRIdded Binary	Format de fichier utilisé pour la diffusion des données de prévisions météorologiques. Le format GRIB est standardisé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).
ILS	Instrument Landing System	Système d'atterrissage aux instruments. Type d'approche dite de précision, caractérisée par l'utilisation de radionavigation précise pour l'approche d'un aéronef.
NAS	Network Accessed Server	Serveur de Stockage en Réseau. Serveur de fichiers autonome, relié à un réseau et dont les données sont accédées à distance.
ROT	Runway Occupancy Time	Temps occupation par un aéronef d'une piste d'atterrissage ou de décollage.
SIGMET	SIGNificant METeorological Information	Information Météorologique Significative. Type de message destiné aux aéronefs en vol signalant des phénomènes météorologiques très dangereux observés ou prévus.
UIR	Upper Information Région	Région d'Information Supérieure : Région d'Information de vol recouvrant, en France, l'espace aérien située au-delà de 19500 pieds.
VCS	Voice Communication Systems	Systèmes de Communication Vocaux. Systèmes de communication vocale utilisés dans le trafic aérien.
XMAN	X MANager	Gestionnaire « X ». Fonctionnalité d'une application de gestion de flux aérien consistant en une combinaison d'un gestionnaire de départ (DMAN) et d'arrivée (AMAN).

[0024] La figure 1 représente un exemple de système de contrôle aérien, dans lequel l'invention peut être implémentée.

[0025] Le système de contrôle aérien représenté en figure 1 comprend une tour de contrôle 110, équipée d'un radar 111 permettant de repérer les aéronefs 120, 121 volant dans un secteur donné. La tour de contrôle 110 peut communiquer avec les aéronefs, par exemple via une liaison radio, afin de donner des informations et instructions aux aéronefs, mais aussi de recevoir des informations et requête des aéronefs. Afin de fournir aux aéronefs les indications les plus pertinentes, la tour de contrôle peut recevoir des données de fournisseurs externes, tels qu'un serveur météo 130. Ainsi, un contrôleur aérien peut fournir des indications et instructions aux pilotes des aéronefs à partir d'un ensemble de données comprenant les trajectoires prévues des aéronefs sur son secteur, les interactions avec les pilotes, et des données d'environnement telles que des prévisions météo.

[0026] Le système de la figure 1 est donné à titre d'exemple non limitatif uniquement, et l'invention peut être implémentée dans de nombreux systèmes pour le contrôle aérien, tels que des systèmes ATC ou ATFM.

[0027] La figure 2 représente un ensemble de phases de vols sur lesquelles l'invention est apte à prédire des paramètres de trajectoire.

[0028] L'invention peut être appliquée à de nombreuses phases de vol.

[0029] La figure 2 représente un exemple d'une trajectoire d'aéronef 200 comprenant les phases suivantes :

- une phase de roulage (en anglais taxi) à l'aéroport de départ 210 ;
- une phase de décollage (en anglais take-off) 220 ;
- une phase de montée (en anglais departure) 230 ;
- une phase de croisière (en anglais cruise) composée elle-même de phases de route 240, 260, et de survol océanique 250 ;
- une phase de descente (en anglais descent) 270) ;
- une phase d'atterrissage (en anglais landing) 280 ;
- une phase de roulage à l'aéroport d'arrivée 290.

[0030] Chacune de ces phases peut être associée, dans le plan de vol de l'aéronef, à une durée nominale. Cependant, chacune d'entre elles peut également subir des retards, pour des raisons pouvant être liées à l'aéronef ou à son environnement. Par

exemple, la phase de roulage 210 pourra être rallongée si la piste de décollage est encombrée et ne permet pas le décollage à l'heure initialement prévue. Ces différents retards peuvent également se répercuter sur les phases ultérieures de la trajectoire. La trajectoire représentée en figure 2 est fournie à titre d'exemple uniquement, et l'invention pourrait être appliquée à de nombreuses autres trajectoires, caractérisées par des phases de vol différentes.

[0031] Cette incertitude diminue la capacité des contrôleurs aériens à effectuer une gestion des flux efficace. L'invention permet de prévoir, à partir d'un ensemble de paramètres liés à l'aéronef et/ou à son environnement, des paramètres de la trajectoire de l'aéronef, et notamment la durée des différentes phases d'une trajectoire, en vol ou au sol.

[0032] La figure 3 représente un système de calcul permettant l'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé de prédiction d'au moins un paramètre de trajectoire d'aéronef, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0033] Le système 300 est un système de calcul. Selon un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le système 300 peut être un dispositif de calcul unique tel qu'un ordinateur, un serveur, ou tout autre système apte à effectuer des calculs informatiques. Le système 300 peut également comporter une pluralité de dispositifs de calcul. Par exemple, le système 300 peut être une ferme de serveurs comportant plusieurs serveurs de calcul.

[0034] Le système 300 comprend ainsi au moins une unité de calcul 310 apte à entraîner un moteur d'apprentissage automatique supervisé (ou en anglais supervised machine learning engine) 320.

[0035] L'au moins une unité de calcul 310 peut être n'importe quel type d'unité de calcul apte à effectuer des calculs informatiques. Par exemple, l'unité de calcul peut être un processeur configuré avec des instructions machines, un microprocesseur, un circuit intégré, un microcontrôleur, un circuit logique programmable, ou tout autre unité de calcul apte à être programmée pour effectuer des opérations de calcul.

[0036] Le moteur d'apprentissage automatique supervisé 320 peut être n'importe quel type de moteur d'apprentissage automatique supervisé. Par exemple, il peut s'agir d'une forêt d'arbres décisionnels (en anglais random forest), d'un réseau de

neurones artificiel, d'une machine à support de vecteur, ou d'un moteur d'apprentissage profond (de l'anglais deep learning), tel qu'un réseau de neurones profond, un réseau de neurones à couches entièrement connectées (FCN), ou un réseau neuronal convolutif. Bien que tout type de moteur d'apprentissage supervisé puisse être utilisé dans l'invention, un moteur d'apprentissage supervisé basé sur un réseau de neurones est particulièrement avantageux, car il permet, une fois l'apprentissage effectué, de s'exécuter dans un temps borné. L'exécution d'un réseau de neurone artificiel, une fois entraînée, nécessite également une quantité de ressources de calcul limitée.

[0037] Un réseau de neurones complètement à couches complètement connectées (FCN) est particulièrement avantageux, car il permet un apprentissage utilisant des inférences entre tous les paramètres, et donc très efficace pour prédire des interactions entre des paramètres très différents.

[0038] Le système 300 comprend un accès à au moins un support de stockage d'informations 330. L'au moins un support de stockage d'information 330 peut être de tout type de stockage apte à stocker des informations : disque dur, CD, DVD, bande magnétique, une carte mémoire, une clé USB, une mémoire Flash, une mémoire vive.

[0039] Le support de stockage d'informations peut être intégré au système 300. Par exemple, si le système 300 est un dispositif de calcul tel qu'un serveur, le support de stockage d'information peut être un disque dur du dispositif. Dans le cas où le système 300 est composé d'une pluralité de dispositifs de calcul, l'au moins un support de stockage peut être un ensemble de mémoires réparties sur les différents dispositifs de calcul.

[0040] Le système 300 peut également avoir accès à l'au moins un support de stockage d'information 330 via une connexion. Par exemple, l'au moins un support de stockage d'information peut consister en au moins un disque dur accédé à distance, par exemple via au moins un serveur NAS, ou via un système d'informatique en nuage (de l'anglais cloud computing).

[0041] L'au moins un support de stockage d'information 330 stocke, un ensemble de descriptions de trajectoires d'aéronefs 340, et, pour chaque trajectoire d'aéronef, un ensemble de paramètres d'entrée associés comprenant :

- des paramètres de l'aéronef 341 ;
- des paramètres d'environnement 342 de la trajectoire de l'aéronef.

[0042] Les trajectoires d'aéronefs 340 peuvent être décrites de différentes manières. Par exemple, les trajectoires peuvent être exprimées sous la forme de trajectoires 4D, avec des points de passage définis par une latitude, longitude, et un FL et un temps de passage. Les trajectoires peuvent également comprendre, pour chaque point de passage, un cap associé. Une trajectoire peut également être associée à un type d'avion et/ou un callsign (dénomination d'un aéronef donné). Les trajectoires peuvent comprendre non seulement des parties en route, mais également des parties au sol, comprenant notamment la trajectoire et les temps de roulage de l'aéronef.

[0043] Les paramètres de l'aéronef 341 peuvent comprendre différents paramètres tels que le type d'aéronef ou la compagnie aérienne à laquelle appartient l'aéronef. Ces paramètres peuvent également comprendre des paramètres liés à la trajectoire passée ou au plan de vol de l'aéronef, tels que :

- des paramètres du le plan de vol de l'aéronef ;
- un type d'approche ;
- une heure de départ ou d'arrivée prévue ;
- le cap de l'aéronef ;
- l'altitude de vol ;
- la position de l'aéronef ;
- un type d'approche utilisé par l'aéronef.

De manière plus générale, ces paramètres peuvent comprendre tout type de paramètre lié à l'aéronef lui-même ou à sa trajectoire prévue.

[0044] Les paramètres d'environnement 342 peuvent comprendre de nombreux types de paramètres liés à l'environnement de la trajectoire de l'aéronef. Ces paramètres peuvent par exemple comprendre des paramètres relatifs à la circulation aérienne, à l'aéroport de départ, à l'aéroport d'arrivée, aux conditions météorologiques, à un secteur traversé par l'aéronef. Selon différents modes de réalisation de l'invention, les paramètres d'environnement 342 peuvent par exemple comprendre :

- un identifiant d'un parking de l'aéronef ;

- une piste de décollage ou d'atterrissage de l'aéronef ;
- des données météorologiques, mesurées ou prédites : vent, humidité, pluie, neige, visibilité... ;
- le trafic au sol ;
- la disponibilité de pistes de roulage (également appelées pistes de taxi) dans un aéroport de départ ou d'arrivée ;
- la piste de roulage affectée à l'aéronef ;
- l'heure ;
- le trafic en vol.

De manière plus générale, tout paramètre relatif à l'environnement de l'aéronef peut être utilisé selon différents modes de réalisation de l'invention. La notion d'environnement de l'aéronef peut faire référence aussi bien à l'environnement physique, avec des paramètres météorologique, qu'à des paramètres liés à la circulation et au trafic aériens. La présente description décrira plus en détail quelques associations de paramètres particulièrement pertinentes.

[0045] Les paramètres peuvent être exprimés de n'importe quelle manière appropriée en fonction du paramètre considéré.

[0046] Par exemple, des paramètres météorologiques peuvent notamment comprendre au moins une des informations suivantes : informations chiffrées (températures, vents, pressions...), par exemple par le biais d'un fichier GRIB, texte descriptif de la météo (par exemple, présence d'une tempête, orage, etc.), messages SIGMET. De manière plus générale, tout type de données fournissant des indications sur la météo au sein du secteur peut être utilisé.

[0047] Des paramètres liés au trafic aérien, ou au trafic au en roulage ou peuvent être exprimés par exemple sous la forme d'une densité d'aéronefs. Cette densité peut être exprimée de différentes manières, comme un nombre d'aéronefs dans un secteur donné, ou un nombre d'aéronefs dans un volume donné.

[0048] Ces paramètres correspondent à des enregistrements de situations réelles s'étant produites pour les trajectoires considérées. Ils définissent ainsi, pour chaque trajectoire, les paramètres d'entrée ayant une influence sur la trajectoire, et

permettant de prédire certaines caractéristiques de celle-ci. Comme indiqué ci-dessus, ces paramètres comprennent au moins un paramètre de l'aéronef, de sa trajectoire passée ou de son plan de vol, et au moins un paramètre de l'environnement de l'aéronef.

[0049] De manière plus générale, les paramètres peuvent comprendre, selon différents modes de réalisation de l'invention, tout type de paramètres pouvant avoir un impact sur la trajectoire, de roulage ou de vol, de l'aéronef.

[0050] Les trajectoires d'aéronefs 340, paramètres des aéronefs 341, et paramètres d'environnement 342 stockés peuvent être issus de différentes sources : mesures de capteurs, données recueillies par les services de contrôle aérien, par des services météo, données de vol. De manière générale, une grande quantité de données est recueillie et stockée pour chaque vol d'aéronef, issue par exemple de capteurs de l'aéronef que du contrôle aérien. L'un des objectifs de l'invention est de valoriser ces données, en les utilisant comme données d'apprentissage, afin de disposer de prédicteurs de paramètres de trajectoires plus fiables que les prédicteurs de l'état de l'art.

[0051] L'au moins une unité de calcul 310 est configurée pour entraîner le moteur d'apprentissage automatique à calculer, pour une trajectoire donnée, au moins un paramètre de la trajectoire, à partir des paramètres d'entrée correspondants. La méthode d'apprentissage mise en œuvre par l'au moins une unité de calcul 310 est décrite plus en détail en référence à la figure 4 ci-dessous.

[0052] La figure 4 représente une méthode d'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé de prédiction d'au moins un paramètre d'une trajectoire d'aéronef, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0053] La méthode 400 prend en entrée un ensemble de descriptions de trajectoires d'aéronefs telles que les trajectoires 340, ainsi que, pour chaque trajectoire, un ensemble de paramètres d'entrée comprenant au moins un paramètre de l'aéronef 341, et au moins un paramètre d'environnement 342 de la trajectoire de l'aéronef. Ces paramètres peuvent par exemple correspondre aux paramètres discutés en référence à la figure 3, et d'autres exemples concrets de paramètres selon différents modes de réalisation de l'invention seront fournis ci-dessous.

[0054] La méthode 400 comprend un sous-ensemble d'étapes destinées à associer, à chaque trajectoire, un vecteur de paramètre d'entrée et au moins un paramètre de la trajectoire. Les étapes de la méthode 400 peuvent être exécutées sur tout ou partie des trajectoires.

[0055] La méthode 400 comprend une étape 410 de formation, d'un vecteur de paramètres d'entrée comprenant les paramètres d'entrée associés à une trajectoire donnée. Cette étape permet de formaliser, pour chaque trajectoire, les paramètres d'entrée pertinents sous la forme d'un vecteur utilisable en entrée d'un moteur d'apprentissage automatique.

[0056] La méthode comprend une étape 420 d'extraction d'au moins un paramètre de la trajectoire. Cette étape consiste à extraire, à partir d'une trajectoire donnée, les paramètres pour lesquels une prédiction est souhaitée. Ces paramètres peuvent par exemple comprendre un ou plusieurs paramètres choisis parmi :

- un temps de roulage en sortie (en anglais taxi-out time) ;
- un temps de roulage en entrée (en anglais taxi-in time) ;
- un temps de vol ;
- un temps de vol en route ;
- une trajectoire d'approche ;
- un temps d'occupation d'une piste (en anglais Runway Occupancy Time, ou ROT) ;
- la réalisation d'une procédure d'attente (en anglais holding pattern) avant un atterrissage ;
- l'utilisation d'une procédure de remise de gaz (en anglais missed approach / go around) ;
- une trajectoire la plus probable suivie par un aéronef ;
- une possibilité de dépassement d'un aéronef.

[0057] De manière générale, de nombreux paramètres de trajectoires peuvent être prédits. L'invention est plus particulièrement adaptée à la prédiction de paramètres de trajectoire ayant un impact sur la gestion des flux aériens par les contrôleurs aériens. Par exemple, chacun des paramètres de trajectoire ci-dessus impacte la

gestion des flux aériens, par exemple en impactant les périodes de disponibilité des pistes d'un aéroport, ou la capacité des aéronefs à dépasser d'autres aéronefs plus lents.

[0058] L'extraction de chacun des paramètres peut s'effectuer de manières différentes selon le paramètre extrait. Par exemple, certains paramètres (remise des gaz, possibilité de dépassement d'un aéronef...) peuvent être enregistrés comme événements dans la trajectoire. Ils peuvent également être déduits de données enregistrées, telles que les messages échangés entre l'aéronef et le service ATC. D'autres encore peuvent être calculés, tels que les temps de roulage en sortie, en calculant la différence entre l'heure de décollage et l'heure de sortie du hangar. L'homme de l'art pourra sans difficulté définir la manière la plus appropriée d'extraire un paramètre donné, en fonction des l'ensemble des données disponibles. De manière générale, toutes ces données sont stockées dans le system ATM ont sont aisément accessibles.

[0059] Chacun des paramètres pourra être obtenu selon la forme la plus adaptée. Par exemple, les temps (de vol, de vol en croisière, de roulage...) pourront être obtenus sous la forme d'une durée, exprimée par exemple en minutes, secondes... ; certains paramètres, comme l'utilisation d'une procédure de remise de gaz, la réalisation d'une procédure d'attente ou la réalisation d'un dépassement, pourront être obtenus sous forme binaire, indiquant si l'événement a eu lieu ou non. L'homme de l'art pourra sans difficulté identifier la forme la plus pertinente pour chacun des paramètres.

[0060] Les étapes 410 et 420 sont répétées pour chaque trajectoire.

[0061] Lorsqu'un vecteur de paramètres d'entrée, et au moins un paramètre de la trajectoire ont été obtenus pour les trajectoires voulues, la méthode 400 comprend une étape 430 d'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé tel que le moteur 320, ledit moteur prenant en entrée les associations, pour chaque trajectoire respectivement, entre le vecteur de paramètres d'entrée et l'au moins un paramètre de la trajectoire correspondant à chaque trajectoire.

[0062] Ainsi, pour chaque trajectoire, le vecteur de paramètres d'entrée sert de vecteur de caractéristiques, et l'au moins un paramètre de la trajectoire de label. Le moteur d'apprentissage automatique 320 peut ainsi être entraîné pour prédire l'au

moins un paramètre, pour chaque trajectoire, à partir du vecteur de paramètres d'entrée.

[0063] Une fois entraîné, le moteur d'apprentissage automatique 320 est capable de prédire, pour une nouvelle trajectoire, l'au moins un paramètre de celle-ci en fonction du vecteur de paramètres d'entrée associé. Un tel moteur présente l'avantage de nécessiter des ressources limitées pour prédire l'au moins un paramètre d'une trajectoire donnée. Les moteurs d'apprentissage automatique peuvent ainsi prédire les paramètres voulus des trajectoires dans un temps borné. Ceci permet donc de s'assurer qu'il est possible de déterminer les paramètres désirés des trajectoires pratiquement en temps réel, permettant ainsi une utilisation des paramètres dans une application de gestion de flux aériens en temps réel.

[0064] Une fois le moteur d'apprentissage 320 entraîné, il est capable de calculer l'au moins un paramètre d'une nouvelle trajectoire, à partir d'un vecteur de données du même type que ceux avec lesquels il a été entraîné, comprenant notamment au moins un paramètre de l'aéronef, et au moins un paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef.

[0065] Ceci permet de prédire, pour de nouveaux aéronefs et de nouvelles trajectoires, les paramètres désirés, ce qui permet une prédiction fiable du ou des paramètres de la trajectoire. Ceci permet notamment leur utilisation dans des applications de gestion de flux aérien.

[0066] Dans la figure 4, les étapes de la méthode 400 sont présentées dans l'ordre suivant : étapes 410, 420 puis 430. Cependant, cet ordre est donné à titre indicatif, et, selon certains modes de réalisation de l'invention, certaines étapes peuvent effectuées dans des ordres différents. Par exemple, il est possible d'effectuer les étapes 410 et 420 dans l'ordre inverse de celui indiqué, ou de les exécuter en parallèle.

[0067] Nous allons maintenant décrire quelques exemples concrets d'application de l'invention.

[0068] Exemple 1 – Entraînement d'un moteur pour le calcul de paramètres de trajectoires liés à un gestionnaire de départs (DMAN).

[0069] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer des paramètres utilisables dans un module DMAN. Un des

objectifs principaux d'un module DMAN est de construire une séquence de pré-départs d'aéronefs, c'est-à-dire de déterminer l'ordre dans lequel les aéronefs vont quitter un aéroport. Un paramètre essentiel pour ce faire est le temps dit de « taxi-out », ou temps de roulage en sortie d'un aéronef, c'est-à-dire le temps que l'aéronef devra rouler dans l'aéroport entre la sortie du hangar et le décollage. Dans la pratique, ce temps dépend d'un nombre de facteurs très différents. Par exemple, la météo a un impact sur ce temps : un pilote d'aéronef roulera plus lentement en cas de brouillard ou de neige qu'en cas de temps dégagé ; la densité de trafic au sol aura également un impact ; le modèle de l'aéronef pourra également avoir un impact, puisque les aéronefs n'ont pas les mêmes performances ; la compagnie aérienne peut également entrer en ligne de compte, car les pilotes des différentes compagnies peuvent avoir des pratiques et formations différentes.

[0070] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable du temps de roulage en sortie. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire le temps de roulage en sortie, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- un identifiant de porte de parking ;
- un identifiant de piste de décollage, et ou de point d'alignement (en anglais line-up point) ;
- des informations météorologiques ;
- un type d'aéronef ;
- un identifiant de compagnie aérienne ;
- un niveau de trafic au sol ;
- une accessibilité de piste de roulage ;
- une heure de la journée.

[0071] Le moteur 320 est ainsi capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux temps de roulage en sortie effectivement constatés, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable de temps de roulage en sortie, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux.

[0072] Bien entendu, l'application de l'invention au calcul de temps de roulage en sortie n'est pas restreinte à cette liste de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant le temps de roulage en sortie, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0073] Si des informations météorologiques sont utilisées, les informations ayant un impact sur la visibilité (neige, pluie, brouillard...) sont particulièrement pertinentes.

[0074] Selon différents modes de réalisation, le moteur 320 peut être entraîné, soit de manière générique avec des données issues de plusieurs aéroports, soit de manière spécifique pour un aéroport donné.

[0075] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement le temps de roulage en sortie permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens au sein d'un module de type AMAN.

[0076] Exemple 2 – Entraînement d'un moteur pour le calcul de paramètres de trajectoires liés à un gestionnaire d'arrivées (AMAN).

[0077] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer des paramètres utilisables dans un module AMAN. Un des objectifs principaux d'un module AMAN est d'optimiser le choix des pistes d'arrivées et portes allouées aux aéronefs arrivant à un aéroport, ainsi que d'indiquer les temps d'arrivée aux aéroports voisins.

[0078] Un premier paramètre essentiel pour ce faire est le ROT (Temps occupation par un aéronef d'une piste d'atterrissage).

[0079] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable du ROT. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire le ROT, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- un identifiant de piste d'atterrissage ;
- un identifiant de porte de parking ;
- des informations météorologiques ;
- un type d'aéronef ;

- un identifiant de compagnie aérienne ;
- un type d'approche (pouvant par exemple être choisi parmi une approche visuelle, une approche ILS ...).

[0080] En effet, le moteur 320 est capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux ROT effectivement constatés, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable des ROT, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux.

[0081] Un second paramètre essentiel pour optimiser l'opération d'un AMAN est le temps de roulage en entrée (en anglais taxi-in time).

[0082] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable du temps de roulage en entrée. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire le temps de roulage en entrée, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- un identifiant de piste d'atterrissage ;
- un identifiant de porte de parking ;
- un type d'aéronef ;
- un identifiant de compagnie aérienne ;
- une heure de la journée ;
- un niveau de trafic au sol ;
- des informations météorologiques ;
- une indication des pistes de roulage fermées.

[0083] En effet, le moteur 320 est capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux temps de roulage en entrée effectivement constatés, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable des temps de roulage en entrée, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux.

[0084] Bien entendu, l'application de l'invention au calcul de temps de roulage en entrée et de ROT n'est pas restreinte à ces listes de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au

contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant le temps de roulage en entrée et/ou le ROT, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0085] Si des informations météorologiques sont utilisées, les informations ayant un impact sur la visibilité (neige, pluie, brouillard...) sont particulièrement pertinentes.

[0086] Selon différents modes de réalisation, le moteur 320 peut être entraîné, soit de manière générique avec des données issues de plusieurs aéroports, soit de manière spécifique pour un aéroport donné.

[0087] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement le temps de roulage en entrée et/ou le ROT permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens au sein d'un module de type AMAN.

[0088] Exemple 3 – Entraînement d'un moteur pour le calcul de trajectoires en approche.

[0089] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer des trajectoires en approches, utilisées notamment dans des modules de type AMAN. En effet, une prédiction efficace des trajectoires en approche permet de calibrer l'arrivée des aéronefs dans un aéroport. Cependant, les trajectoires en approche effectivement appliquées dépendent d'un grand nombre de facteurs. Par exemple, la météo a un impact sur ces trajectoires : un pilote d'aéronef n'utilisera pas la même trajectoire en fonction de la météo, que ce soit à cause d'une visibilité différente, ou de différences au niveau du comportement de l'aéronef ; le modèle de l'aéronef pourra également avoir un impact, puisque les aéronefs n'ont pas les mêmes performances ; la compagnie aérienne peut également entrer en ligne de compte, car les pilotes des différentes compagnies peuvent avoir des pratiques et formations différentes.

[0090] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable des trajectoires en approche. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire une trajectoire en approche, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- une vitesse d'aéronef ;

- un type d'aéronef ;
- une altitude au point dit de rassemblement (point vers lequel convergent les trajectoires en entrée de zones de d'aéroport - en anglais feeder –fix) ;
- des informations météorologiques ;
- un identifiant de compagnie aérienne ;
- une procédure et/ou un type d'approche ;
- une heure de la journée ;
- un niveau de trafic aérien ;
- des données de plan de vol ;
- des données de vol issues d'un système de contrôle aérien.

[0091] En effet, le moteur 320 est ainsi capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux trajectoires d'approche effectivement constatées, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable de trajectoire d'approche, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux.

[0092] La trajectoire d'approche peut être représentée de différentes manières. Elle peut par exemple être représentée sous la forme d'un temps d'approche. Celui-ci peut par exemple être représenté comme une durée d'approche, ou une distribution de probabilités de temps d'approche. La trajectoire d'approche peut également être représentée sous la forme d'une trajectoire 4D, c'est-à-dire d'une suite de point 3D associés à des temps de passage, pouvant être fournie à un moteur de calcul avionique pour en construire une trajectoire avionique.

[0093] La trajectoire d'approche peut également comprendre une indication de situation d'approche spécifiques, telles qu'une indication que l'aéronef effectue une procédure d'approche (en anglais holding pattern), une procédure de remise de gaz (en anglais misse approach/go around), ou une autre situation particulière (zone d'exclusion temporaire, piste d'atterrissage fermée, etc.). Le moteur d'apprentissage 320 sera ainsi capable de prédire de manière efficiente la survenue de situations particulières, ce qui lui permet également de mieux prédire la trajectoire d'approche, quelle que soit la forme utilisée (temps d'approche, trajectoire 3D, etc.).

[0094] Bien entendu, l'application de l'invention à la détermination de trajectoires d'approche n'est pas restreinte à cette liste de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant la trajectoire d'approche, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0095] Selon différents modes de réalisation, le moteur 320 peut être entraîné, soit de manière générique avec des données issues de plusieurs aéroports, soit de manière spécifique pour un aéroport donné.

[0096] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement des trajectoires d'approche en sortie permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens au sein d'un module de type AMAN.

[0097] Exemple 4 – Entraînement d'un moteur pour le calcul de temps de vol en route.

[0098] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer des temps de vol en route, utilisées notamment dans des modules de type AMAN. En effet, une prédiction efficace des temps passés par les aéronefs en route pour différentes trajectoires permet de mieux connaître leur temps d'arrivée dans un aéroport. Cependant, les temps de vol en route dépendent d'un grand nombre de facteurs.

[0099] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable des temps de vol en route. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire des temps de vol en route, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- un type d'aéronef, ou une classe de vitesse de l'aéronef ;
- une altitude de vol ;
- des informations météorologiques ;
- une description de secteur ATC ;
- une description de zones de restrictions aériennes (en anglais temporary segregated area) ;

- un identifiant de compagnie aérienne
- des données de plan de vol ;
- des données de vol issues d'un système de contrôle aérien.

[0100] En effet, le moteur 320 est ainsi capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux temps de vol en route effectivement constatées, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable de temps de vol en route, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux.

[0101] Dans des modes de réalisation dans lesquels des informations météo sont utilisées, des informations météo ayant un impact sur la capacité d'un aéronef à survoler une zone, ou affectant la vitesse et/ou la manière de survoler la zone (vent, tempêtes, orages...) sont particulièrement pertinentes.

[0102] Bien entendu, l'application de l'invention à la détermination temps de vol en route n'est pas restreinte à cette liste de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant le temps de vol en route, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0103] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement des temps de vol en route permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens au sein d'un module de type AMAN, en permettant une meilleure connaissance des heures d'arrivée des aéronefs.

[0104] Exemple 5 – Prédiction d'une trajectoire la plus probable.

[0105] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer une trajectoire la plus probable d'un aéronef. En effet, les aéronefs ne suivent pas toujours exactement leurs plans de vol, mais il est très difficile de déterminer a priori quelle sera leur trajectoire exacte. Cette prédiction permet notamment de s'adapter aux flux réel des aéronefs.

[0106] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable des trajectoires les plus probables. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur

320 à prédire des trajectoires les plus probables, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- une position 3D de l'aéronef ;
- un cap de l'aéronef ;
- des informations envoyées de l'aéronef au contrôle aérien ;
- des données de plan de vol ;
- des données de vol issues d'un système de contrôle aérien ;
- un type d'approche.

[0107] La trajectoire la plus probable peut être représentée sous diverses formes, par exemple une suite de positions 4D (positions 3D associées à un temps de passage). De manière générale, la trajectoire la plus probable consistera en une prédiction de trajectoire sur un horizon temporel défini, correspondant à la poursuite de la trajectoire de l'aéronef sur une durée donnée.

[0108] Le moteur 320 est ainsi capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée aux trajectoires 3D effectivement suivies, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable de la trajectoire de l'aéronef, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais également les interactions entre eux. Le moteur ainsi entraîné sera donc capable de prédire, dans une situation donnée, la trajectoire effectivement suivie par l'aéronef à un horizon temporel donné, de manière beaucoup plus précise que les méthodes de l'état de l'art.

[0109] Bien entendu, l'application de l'invention à la prédiction de trajectoire sur un horizon temporel n'est pas restreinte à cette liste de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant la trajectoire effectivement suivies, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0110] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement une trajectoire sur un horizon temporel permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens aussi bien au sein d'un module de type AMAN que d'un module DMAN, en

permettant une meilleure connaissance des trajectoires effectivement suivies par les aéronefs.

[0111] Exemple 6 – Prédiction d'une possibilité de dépassement.

[0112] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur 320 peut être entraîné à calculer une possibilité de dépassement, c'est-à-dire la capacité d'un aéronef à dépasser un aéronef situé devant lui et volant à plus basse vitesse. La possibilité de dépassement modifie le temps auquel un aéronef arrive à un aéroport, mais dépend d'un grand nombre de facteurs, tels que le couloir aérien suivi, ou les vitesses respectives des aéronefs. Cette prédiction permet notamment de s'adapter aux flux réel des aéronefs.

[0113] Les solutions de l'état de l'art ne permettent pas une prédiction fiable des possibilités de déplacement. Au contraire, l'invention permet d'entraîner le moteur 320 à prédire la capacité d'un aéronef à dépasser un deuxième aéronef, en prenant comme paramètres d'entrée au moins un paramètre choisi parmi :

- un identifiant de couloir aérien, dans lequel se situent les aéronefs ;
- un type de l'aéronef ;
- un type du deuxième aéronef ;
- une altitude de l'aéronef ;
- une altitude du deuxième aéronef ;
- une vitesse de l'aéronef ;
- une vitesse du deuxième aéronef ;
- un plan de vol de l'aéronef ;
- un plan de vol du deuxième aéronef.

[0114] La possibilité de dépassement peut être représentée de différentes manières, par exemple sous la forme d'une valeur binaire (dépassement autorisé ou non).

[0115] Le moteur 320 est ainsi capable, en comparant, au sein des situations historiques, les valeurs de ces paramètres d'entrée à une validation effective de la possibilité de dépassement du deuxième aéronef, de s'entraîner à fournir une prédiction fiable de la possibilité de dépassement d'un deuxième aéronef, prenant en compte non seulement les paramètres d'entrée pris individuellement, mais

également les interactions entre eux. Le moteur ainsi entraîné sera donc capable de prédire, dans une situation donnée, si un aéronef est capable de dépasser un deuxième aéronef, de manière beaucoup plus précise que les méthodes de l'état de l'art.

[0116] Bien entendu, l'application de l'invention à la prédiction de possibilité de dépassement n'est pas restreinte à cette liste de paramètres : selon différents modes de réalisation de l'invention, seule une partie d'entre eux est utilisée. Au contraire, d'autres paramètres peuvent être utilisés en complément. Le choix des paramètres peut dépendre des paramètres influençant la possibilité de dépassement, mais également de la disponibilité de mesures pour les différents paramètres.

[0117] L'entraînement du moteur 320 à calculer efficacement une capacité de dépassement permet d'améliorer considérablement la gestion de flux aériens, notamment au sein d'un module de type AMAN, en permettant une meilleure connaissance des heures d'arrivée des aéronefs.

[0118] La figure 5 représente un système de calcul d'au moins un paramètre de trajectoires d'aéronef utilisant un moteur d'apprentissage automatique supervisé, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0119] Le système 500 peut être par exemple un système ATM, ATC ou ATFM, utilisant une application de gestion de flux aérien, permettant aux contrôleurs aériens de gérer le flux d'aéronefs dans une zone donnée, par exemple au sein d'applications AMAN, DMAN ou XMAN.

[0120] Le système 500 est un système de calcul. Selon un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le système 500 peut être un dispositif de calcul unique tel qu'un ordinateur, un serveur, ou tout autre système apte à effectuer des calculs informatiques. Le système 500 peut également comporter une pluralité de dispositifs de calcul. Par exemple, le système 500 peut être une ferme de serveurs comportant plusieurs serveurs de calcul.

[0121] Le système 500 comprend ainsi au moins une unité de calcul 510 apte à exécuter un moteur d'apprentissage automatique supervisé 320, similaire au moteur d'apprentissage supervisé présenté en figure 3. Selon un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le moteur d'apprentissage automatique supervisé 320 a été

entraîné par une méthode telle que la méthode 400, et/ou un système tel que le système 300.

[0122] L'au moins une unité de calcul 510 peut être n'importe quel type d'unité de calcul apte à effectuer des calculs informatiques. Par exemple, l'unité de calcul peut être un processeur configuré avec des instructions machines, un microprocesseur, un circuit intégré, un microcontrôleur, un circuit logique programmable, ou tout autre unité de calcul apte à être programmée pour effectuer des opérations de calcul.

[0123] Le système 500 comprend au moins un port d'entrée 530 apte à recevoir, pour une trajectoire d'un aéronef, des paramètres d'entrée. Les paramètres d'entrée 541, 542 sont du même type que les paramètres d'entrée 341, 342. Le système 500 peut donc recevoir :

- au moins un paramètre 541 de l'aéronef ;
- au moins un paramètre 542 d'environnement de la trajectoire d'aéronef.

[0124] Selon divers mode de réalisation, d'autres types de paramètres d'entrée peuvent être reçus. En particulier, tous les modes de réalisation évoqués aux figures 3 et 4 peuvent être appliqués au système 500.

[0125] Les paramètres d'entrée peuvent être reçus de différentes manières. Par exemple, les plans de vol, et paramètres instantanés d'aéronefs ou de leurs trajectoires peuvent être reçus par communication radio avec les aéronefs, par le biais de mesures radars, etc. Les informations d'environnement de l'aéronef peuvent être reçues par exemple par le biais de mesures (radar, radar météo...), par abonnement à un service externe (service météo...), ou par des services ATC.

[0126] A cet effet, l'au moins un port 530 peut être de différents types : connexion internet, liaison radio, etc. L'invention n'est pas restreinte à un type de port d'entrée, et l'homme de l'art pourra adapter la réception des paramètres d'entrée aux canaux d'entrée disponibles. De même, selon différents modes de mise en œuvre de l'invention, les différents paramètres d'entrée peuvent être reçus sur un port unique, ou plusieurs ports, de même type ou de types différents. Par exemple, l'au moins un paramètre de l'aéronef 541 peut être reçues par liaison radio, et l'au moins un paramètre d'environnement de la trajectoire de l'aéronef 542 par une connexion internet.

[0127] L'au moins une unité de calcul 510 est configurée pour former, pour la trajectoire, un vecteur de paramètres d'entrée comprenant lesdits paramètres d'entrée.

[0128] L'au moins une unité de calcul 510 est également configurée pour calculer, à partir du vecteur d'entrée, au moins un paramètre de la trajectoire. De nombreux paramètres de trajectoire peuvent être calculés. En particulier, tous les modes de réalisation discutés en référence aux figures 3 et 4 peuvent être utilisés ici.

[0129] Le système 500 est ainsi capable de calculer au moins un paramètre de la trajectoire de l'aéronef, tout en bénéficiant des avantages de l'entraînement du moteur d'apprentissage supervisé.

[0130] En particulier, le moteur d'apprentissage supervisé 320 permet de calculer les paramètres de la trajectoire avec des besoins en ressources limités, et un temps d'exécution déterministe. Ceci permet d'utiliser les paramètres de manière réactive, par exemple au sein d'une application de gestion de flux aérien, dans laquelle il est important de pouvoir évaluer l'impact des aéronefs les uns sur les autres, en temps réel.

[0131] Une fois l'au moins un paramètre de trajectoire calculé, le système 500 peut l'utiliser de différentes manières. Par exemple, il peut l'afficher à au moins un opérateur, par exemple un contrôleur aérien, par le biais d'au moins un écran 550. Ceci permet à l'opérateur d'utiliser ce paramètre pour son interaction avec les aéronefs. Il peut également lever une alerte, si la valeur du paramètre une difficulté dans la gestion du flux aérien.

[0132] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, l'au moins une unité de calcul 510 est configurée pour utiliser l'au moins un paramètre calculé de la trajectoire dans le cadre d'une application de gestion de flux aérien.

[0133] Ceci peut par exemple être réalisé en utilisant un temps de roulage calculé par le moteur d'apprentissage automatique supervisé 320 pour déterminer à quel moment une piste de décollage sera disponible pour un nouvel aéronef, en utilisant le calcul d'une capacité de dépassement pour disposer d'une prédiction plus fiable de la position d'un aéronef dans le futur, etc. Ainsi, l'invention permet de disposer d'un calcul fiable et rapide de paramètres de trajectoires des aéronefs, permettant ainsi une gestion de flux à la fois fiable et réactive.

[0134] Bien que la figure 5 représente un unique moteur d'apprentissage supervisé 320, selon différents modes de réalisation de l'invention, plusieurs moteurs différents peuvent être utilisés. Par exemple, un premier moteur peut être utilisé pour calculer des paramètres de trajectoires pour une application de type « DMAN » (temps de roulage en sortie, heure du décollage...), et un deuxième moteur pour calculer des paramètres de trajectoires pour une application de type « AMAN » (heure d'arrivée, temps d'utilisation d'une piste pour l'atterrissage, temps de roulage à l'arrivée...). Ceci permet d'optimiser simultanément différents modules d'un système de gestion de flux aérien, et disposer ainsi d'une amélioration conjointe de la gestion du flux.

[0135] La figure 6 représente une méthode mise en œuvre par ordinateur de calcul d'au moins un paramètre d'une trajectoire d'aéronef utilisant un moteur d'apprentissage automatique supervisé, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0136] La méthode 600 reçoit en entrée, pour une trajectoire d'aéronef, un ensemble de paramètres d'entrée comprenant :

- au moins un paramètre 541 de l'aéronef ;
- au moins un paramètre d'environnement 542 de la trajectoire de l'aéronef.

[0137] La méthode comprend une étape 610 de formation, pour la trajectoire, d'un vecteur de paramètres d'entrée comprenant lesdits paramètres d'entrée.

[0138] La méthode comprend ensuite une étape 620 d'exécution d'un moteur d'apprentissage supervisé 320 pour calculer, à partir du vecteur d'entrée, au moins un paramètre de la trajectoire, ledit moteur ayant été entraîné par la méthode 400.

[0139] Tous les modes de réalisation discutés en référence aux figures 3 à 5 sont respectivement applicables à la méthode 600.

[0140] Les exemples ci-dessus démontrent la capacité de l'invention calculer des paramètres de trajectoires d'aéronef, et d'utiliser ces paramètres dans des applications de gestion de flux aérien. Ils ne sont cependant donnés qu'à titre d'exemple et ne limitent en aucun cas la portée de l'invention, définie dans les revendications ci-dessous.