

DESCRIPTION

Titre de l'invention : Système et méthode pour une détection rapide et fiable de complexité de secteurs aériens

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne la détermination de la complexité de traitement de situations de contrôle aérien sur des secteurs par des opérateurs, par exemple des contrôleurs aériens. La présente invention concerne également la définition de secteurs aériens, et l'affectation de ces secteurs à des opérateurs.

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, la météo... Les contrôleurs peuvent également communiquer, via des messages écrits ou des communications orales, avec les pilotes des aéronefs afin de récupérer le 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. La qualité du travail des contrôleurs aériens est donc essentielle, pour garantir tant la sécurité que l'efficacité de la circulation aérienne.

[0004] Afin de garantir que les contrôleurs aériens sont pleinement opérationnels pour leurs missions, leur travail est régi par un cadre réglementaire strict : en

particulier, afin de limiter leur fatigue, les réglementations nationales peuvent fixer un nombre d'heures de travail maximales d'affilée, par jour ou par semaine.

[0005] Le travail des contrôleurs aériens est organisé par secteurs géographiques. La complexité du travail à effectuer sur un secteur est variable en fonction d'un certain nombre de facteurs, le plus important d'entre eux étant la complexité du trafic : un contrôleur aérien ne pourra traiter efficacement qu'un nombre limité de vols simultanément. Afin de limiter la charge de travail de chaque contrôleur, un nombre variable de contrôleurs peut être affecté à chaque secteur, pour que chaque contrôleur ne traite qu'une situation dont la complexité est suffisamment faible (par exemple, comprenant un nombre de vols, de conflits de trajectoires limités, le cas échéant par rapport à des caractéristiques environnementales telles que la météo par exemple) pour exécuter son travail correctement.

[0006] Il convient donc d'affecter en permanence à chaque secteur un nombre de contrôleurs adéquat et/ou définir des secteurs de complexité adaptée pour garantir la sécurité et l'efficacité du trafic aérien. Aujourd'hui cette affectation est effectuée de manière manuelle par les équipes de contrôleurs aériens. Cependant cette affectation manuelle présente un certain nombre de limites : compte tenu des contraintes réglementaires régissant le travail des contrôleurs aériens, il n'est pas toujours aisé de disposer d'un vivier de contrôleurs aériens mobilisables en cas d'augmentation de la complexité de traitement d'un secteur, sauf à conserver en réserve un nombre élevé de contrôleurs en permanence, ce qui s'avère inefficace et coûteux.

[0007] Il est de plus difficile d'estimer a priori la complexité de traitement du trafic dans un secteur : si le nombre de vols à traiter est la principale caractéristique, elle ne prend pas en compte les interactions entre les trajectoires.

[0008] Afin d'automatiser l'évaluation de la complexité de traitement d'un secteur aérien, des fonctions analytiques ont été développées, qui permettent d'évaluer à partir d'un ensemble de paramètres (positions et trajectoires prédites des aéronefs, météo...) un indice de complexité de traitement du trafic sur un secteur. Par exemple, la publication "*Sector Complexity Study – SESAR 2020*", A study commissioned by the Croatia Control Ltd, Faculty of Transport and Traffic Sciences, Univ of Zagreb, July 2018 définit des fonctions analytiques permettant de calculer un indice de

complexité ATC sur un secteur aérien selon un ensemble d'indicateurs impactant la complexité de traitement d'une situation aérienne : nombre d'aérodrome, surface d'un secteur, nombre de secteurs environnants, nombre d'altitudes utilisées, vitesse moyenne des aéronefs, nombre de vols entrants, nombre de vols sortants nombre d'aéronefs en conflit, angle de convergence moyen pour les conflits, densité du trafic... Ces indicateurs peuvent être combinés au sein de fonctions complexes. La définition de fonctions analytiques de complexité a donné lieu à de très nombreuses publications telles que Laudeman, I. V., Sheldon, S. G., Branstrom, R., & Brasil, C. L. (1998). Dynamic density: An air traffic management metric, Netjasov, F., Janić, M., & Tošić, V. (2011). Developing a generic metric of terminal airspace traffic complexity. *Transportmetrica*, 7(5), 369-394., ou Hilburn, B., & Flynn, G. (2005). Toward a non-linear approach to modeling air traffic complexity. *Human Performance, Situation Awareness, and Automation: Current Research and Trends HPSAA II, Volumes I and II*, 207. La publication "Sector Complexity Study – SESAR 2020", A study commissioned by the Croatia Control Ltd, Faculty of Transport and Traffic Sciences, Univ of Zagreb, July 2018 liste également un grand nombre de publications traitant du calcul de la complexité d'un secteur.

[0009] Cependant, ces fonctions analytiques présentent plusieurs désavantages. En premier lieu, les fonctions analytiques sont extrêmement complexes, et leur temps d'exécution varie en fonction des paramètres d'entrée, notamment du nombre et de la complexité des trajectoires d'aéronefs sur un secteur. Pour des secteurs particulièrement importants, le temps de calcul peut ainsi devenir très important, de l'ordre de plusieurs secondes. Les fonctions analytiques calculées sur CPU ne permettent ainsi pas de garantir un temps de réponse fixe et faible pour l'évaluation de la complexité d'un secteur. Dans les cas de secteurs complexes, elles ne permettent pas de garantir un temps d'exécution suffisamment faible pour assigner dynamiquement des contrôleurs en fonction de l'évolution du trafic aérien.

[0010] Il y a donc besoin d'une méthode de détermination de la complexité de traitement d'un secteur aérien par un contrôleur, qui puisse fournir une estimation fiable de la complexité de traitement du secteur aérien par le contrôleur dans un temps borné et avec une complexité de calcul faible.

Résumé de l'invention

[0011] A cet effet, l'invention a pour objet une méthode mise en œuvre par ordinateur comprenant : l'obtention d'une situation ATC définie par un secteur et une période de temps, et d'un ensemble de paramètres d'entrée comprenant, pour le secteur et la période de temps, les trajectoires d'aéronefs traversant le secteur, lesdites trajectoires étant définies par un ensemble de paramètres de trajectoire comprenant au moins les positions des aéronefs ; le calcul, pour chacune des trajectoires d'aéronefs, de paramètres de trajectoire à un ensemble de pas de temps identique pour toutes les trajectoires ; la formation d'une matrice comprenant, pour chaque couple possible de trajectoires, les paramètres des trajectoires du couple auxdits pas de temps ; l'application à ladite matrices d'une transformation ayant pour propriété de concentrer l'énergie par composante ; le calcul de l'énergie par composante ; le calcul d'un indice de complexité de la situation ATC, en fonction d'un niveau de concentration de l'énergie par composante.

[0012] Avantageusement, ledit calcul, pour chacune des trajectoires d'aéronefs, des positions de l'aéronef à l'ensemble de pas de temps consiste à interpoler les positions des aéronefs sur les trajectoires.

[0013] Avantageusement, chaque ligne de la matrice représente un couple de trajectoires ; les colonnes de la matrice représentent respectivement, par pas de temps successif, les valeurs de chacun des paramètres des trajectoires, pour la première puis pour la deuxième trajectoire du couple.

[0014] Avantageusement, le niveau de concentration de l'énergie par composante est égal au nombre minimum de composantes concentrant une énergie supérieure ou égal à un ratio prédéfini de l'énergie totale.

[0015] Avantageusement, le niveau d'énergie par composante est défini par l'indice de la dernière composante pour laquelle une dérivée du niveau d'énergie global des composantes est supérieure ou égale à un seuil prédéfini.

[0016] Avantageusement, l'indice de complexité est défini par l'une des formules

suivantes : $C = \frac{k}{k_{max}} * [1 - (E_{c,k} - E_{c,(k-1)})]$ ou

$$C = \frac{k}{k_{max}} * \left[1 - \frac{(E_{c,(k+1)} - E_{c,(k-1)})}{2} \right]$$

où : les composantes sont rangées par énergie croissante, selon un indice $k = [1 \dots$

$N]$; E_{c_k} représente la somme de l'énergie des composantes, de l'indice 1 à l'indice k ; k est l'indice de la dernière composante pour laquelle la dérivée de l'énergie totale des composantes est supérieure ou égale à un seuil prédéfini ; k_{max} est l'indice de la composante pour laquelle la somme des énergies est supérieure ou égale à un seuil prédéfini de l'énergie totale des composantes.

[0017] L'invention a également pour objet un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes d'une méthode selon l'un des modes de réalisation de l'invention lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[0018] L'invention a également pour objet un système comprenant : au moins un port d'entrée apte à recevoir, pour une situation ATC courante définie par un secteur courant et une période de temps, un ensemble de paramètres comprenant, pour le secteur courant, les trajectoires d'aéronefs traversant le secteur ; au moins une unité de calcul configurée pour exécuter une méthode selon l'un des modes de réalisation de l'invention pour calculer un indice de complexité de la situation ATC.

[0019] Avantageusement l'au moins une unité de calcul est configurée pour redéfinir dynamiquement les secteurs d'un espace aérien, à partir de l'indices de complexité de la situation ATC calculées par ladite méthode.

[0020] Avantageusement, l'au moins une unité de calcul est configurée pour résoudre un problème d'optimisation sous contrainte, visant à minimiser le nombre total de secteurs sur un espace aérien, tout en s'assurant que l'indice de complexité ATC calculée pour chaque secteur et période de temps est inférieure à une complexité prédéfinie.

[0021] 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 secteurs sur lesquels l'invention peut être implémentée ;

- la figure 3, un système de calcul de la complexité de traitement d'une situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 4, une méthode mise en œuvre par ordinateur de calcul de la complexité de traitement d'une situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 5, un exemple de calcul de positions des trajectoires d'aéronefs selon un ensemble de pas de temps commun, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 6, un exemple de matrice de paramètres par couple de trajectoires, selon un ensemble de modes de réalisation de l'invention ;
- la figure 7a, un exemple de calcul de la complexité d'une première situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 7b, un exemple de calcul de la complexité d'une deuxième situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0022] 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.
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.
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 Positioning 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).
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.
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.

[0023] La figure 1 représente un exemple de système de contrôle aérien, dans lequel l'invention peut être implémentée.

[0024] 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.

[0025] 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.

[0026] La figure 2 représente un ensemble de secteurs sur lesquels l'invention peut être implémentée.

[0027] Un espace aérien est dit contrôlé lorsque les manœuvres des aéronefs sont soumises à clearance, c'est-à-dire une autorisation par un contrôleur aérien. La figure 2 représente l'espace aérien contrôlé en France. Le territoire métropolitain français est contrôlé par cinq centres de contrôle contrôlant chacune une FIR :

- le centre de Bordeaux contrôle la FIR LFBB ;
- le centre de Reims gère la FIR LFEE ;
- le centre de Paris gère la FIR LFFF ;
- le centre de Marseille gère la FIR LFMM ;
- le centre de Brest gère la FIR LFRR.

[0028] Les FIR couvrent en France l'espace aérien jusqu'à 19500 pieds ; au-delà s'étend une UIR gérée par les 5 centres de contrôle. Ces régions sont à leur tour découpées en secteurs de contrôle, comme par exemple les secteurs dits Centre de Contrôle Régional (CCR), ou ACC en anglais. Chacun des secteurs est en permanence traversé par un certain nombre d'aéronefs. Comme expliqué ci-dessus, la complexité de traitement du trafic aérien sur un secteur est variable en fonction du

nombre d'aéronef dans ce secteur, mais aussi d'autres caractéristiques telles que la météo, ou la densité de trafic. Afin que les contrôleurs puissent effectuer leurs contrôles dans de bonnes conditions, le nombre de contrôleurs affectés à un secteur peut être modulé en fonction de la complexité de traitement de celui-ci. La forme et la taille des secteurs peuvent également être adaptées.

[0029] La figure 3 représente un système de calcul de la complexité de traitement d'une situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0030] Le système 300 peut être par exemple un système ATM, ATC ou ATFM, permettant aux contrôleurs aériens de contrôler la situation aérienne sur un secteur donné.

[0031] 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.

[0032] Le système 300 comprend ainsi au moins une unité de calcul 310. 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.

[0033] Le système 300 comprend au moins un port d'entrée 320 apte à recevoir un ensemble de paramètres relatifs à une situation aérienne courante sur un secteur. L'ensemble de paramètres d'entrée comprend les trajectoires 321 d'aéronefs traversant le secteur. Selon différents modes de réalisation, ces trajectoires peuvent comprendre des trajectoires instantanées et/ou des trajectoires prédites.

[0034] Selon divers mode de réalisation, d'autres types de paramètres d'entrée peuvent être reçus, tels que des informations météorologiques. Ces informations météorologiques peuvent par exemple consister en une indication qu'un événement donné (tempête, orage...) a lieu. Par exemple, un événement « tempête » peut être

défini lorsque les paramètres des messages météo liés à une tempête dépassent un seuil prédéfini.

[0035] Les paramètres d'entrée peuvent être reçus de différentes manières. Par exemple, les trajectoires d'aéronefs peuvent être reçues par communication radio avec les aéronefs, par le biais de mesures radars, etc. Les informations météo peuvent être reçues par exemple par le biais de mesures d'un radar météo, par abonnement à un service météorologique.

[0036] A cet effet, l'au moins un port 320 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, les trajectoires d'aéronefs 321 peuvent être reçues par liaison radio, et des informations météorologiques par une connexion internet.

[0037] Les trajectoires d'aéronefs 321 peuvent être exprimées 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).

[0038] Ces paramètres correspondent à des situations réelles se produisant dans des secteurs aux périodes de temps considérées. Ils définissent ainsi, pour une situation ATC définie par un couple (secteur, période de temps) donné, les paramètres d'entrée représentatifs de la complexité de traitement du secteur. Comme indiqué ci-dessus, ces paramètres comprennent les trajectoires d'aéronefs ayant traversé le secteur.

[0039] L'au moins une unité de calcul 310 est également configurée pour calculer, à partir des paramètres d'entrée, un indice de complexité ATC de la situation courante.

[0040] L'un des objectifs du système 300 est notamment de fournir un calcul fiable de complexité ATC, capable de s'exécuter dans un temps borné en sollicitant des capacités de calcul limitées. A cet effet, l'au moins une unité de calcul 310 est

configurée pour exécuter les étapes d'une méthode selon l'invention, telle que par exemple la méthode 400 décrite en référence à la figure 4.

[0041] Une fois l'indice de complexité ATC calculé, le système 300 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 330. Ceci permet à l'opérateur de vérifier que le nombre de contrôleur aérien affecté à une situation / un secteur donné est adéquat en fonction de la complexité de ceux-ci. Il peut également lever une alerte, soit si la complexité ATC d'une situation est trop importante par rapport au nombre de contrôleurs affectés à son traitement, soit elle est trop faible, auquel cas un trop grand nombre de contrôleurs aérien est mobilisé pour cette situation.

[0042] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, l'au moins une unité de calcul 310 est configurée pour redéfinir dynamiquement la forme et la taille des secteurs, afin de former un nombre de secteur aussi faible que possible, tout en s'assurant que la complexité ATC de chaque secteur est inférieure à un seuil prédéfini.

[0043] Ceci peut par exemple être réalisé si l'au moins une unité de calcul est configurée pour résoudre un problème d'optimisation sous contrainte, visant à minimiser le nombre de secteurs, avec la contrainte que la complexité ATC de chaque secteur soit inférieure ou égale à un seuil de complexité prédéfini. Ce seuil de complexité peut par exemple être un seuil au-dessus duquel le secteur devient trop complexe à traiter par un contrôleur aérien.

[0044] A chaque itération d'optimisation, la complexité ATC d'une situation représentée par un secteur peut être calculée. Ceci permet donc de résoudre un problème d'optimisation sous contrainte, recalculant à chaque itération la complexité pour chaque secteur et période de temps. Ceci permet ainsi une allocation dynamique des secteurs aériens. Par exemple, la sectorisation de l'espace aérien peut être redéfinie par périodes d'une heure.

[0045] Ceci permet de disposer d'un nombre de secteurs aussi faible que possible, et ainsi de limiter le nombre de contrôleurs nécessaire pour les traiter, tout en s'assurant qu'ils puissent être traités correctement par les contrôleurs. Ceci permet

également de prédire de manière dynamique le nombre de contrôleurs qui devra être affecté à un espace aérien pour chaque période de temps.

[0046] Les calculs de complexité peuvent également servir à entraîner un moteur d'apprentissage automatique apte à déterminer automatiquement la complexité d'une situation ATC. Par exemple, la demanderesse a déposé la demande de brevet français n° 1908722, décrivant l'entraînement d'un moteur d'apprentissage automatique supervisé pour prédire une complexité d'une situation ATC à partir des différents éléments de la situation. Le calcul de la complexité selon l'invention peut être utilisé comme complexité à prédire dans ce cadre.

[0047] La figure 4 représente une méthode mise en œuvre par ordinateur de calcul de la complexité de traitement d'une situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0048] La méthode 400 peut par exemple être mise en œuvre par le système 300, et tous les modes de réalisation discutés en référence à la figure 3 sont applicables à la méthode 400.

[0049] La méthode 400 comprend une première étape 410 d'obtention d'une situation ATC 340 définie par un secteur et une période de temps, et d'un ensemble de paramètres d'entrée comprenant, pour le secteur et la période de temps, les trajectoires d'aéronefs 321 traversant le secteur. Les trajectoires des aéronefs sont définies par un ensemble de paramètres de trajectoires comprenant au moins les positions des aéronefs. Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, ils peuvent également comprendre d'autres paramètres tels que les vitesses horizontale et verticale, la température, etc. Les paramètres d'entrée peuvent aussi comprendre d'autres éléments que les trajectoires d'aéronef, tels que des informations météo.

[0050] Cette étape 410 peut consister, selon différents modes de réalisation de l'invention, à recevoir, en temps réel, la description d'une situation ATC courante (secteur, période de temps, trajectoire d'aéronefs traversant le secteur) d'un système de contrôle aérien. Elle peut aussi consister à obtenir la description d'une situation passée, par exemple en extrayant ces informations d'une base de données de situations passées.

[0051] La méthode 400 comprend une deuxième étape 420 de calcul, pour chacune des trajectoires d'aéronefs, des paramètres de trajectoire à un ensemble de pas de temps identique pour toutes les trajectoires.

[0052] Cette étape consiste à déterminer, pour un ensemble de pas de temps donné, les paramètres de chaque aéronef au pas de temps. En effet, les trajectoires peuvent être initialement décrites par des paramètres à des temps variables pour chaque aéronef. Cette étape 420 permet donc d'obtenir les paramètres des aéronefs, aux mêmes pas de temps pour tous les aéronefs. Par exemple, ceci permet de comparer les positions des aéronefs à des pas de temps identiques, et donc de mieux identifier de potentiels conflits de trajectoires.

[0053] Les pas de temps peuvent être obtenus de différentes manières. Par exemple, la durée de la situation ATC peut être échantillonnée par pas de temps réguliers, soit en fonction d'une durée cible des pas de temps (la durée des pas de temps est alors prédéfinie, mais pas le nombre de pas de temps), soit en divisant la durée de la situation par un nombre de pas de temps donné (le nombre de pas de temps est alors prédéfini, mais pas la durée des pas de temps).

[0054] La figure 5 représente un exemple de calcul de positions des trajectoires d'aéronefs selon un ensemble de pas de temps commun, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0055] Le graphe 5000 représente trois trajectoires brutes 5010, 5020 et 5030. Pour faciliter la compréhension, les trajectoires sont représentées en deux dimensions, et le temps associé à chacune des positions définissant la trajectoire est représenté sur l'axe temporel 5040. Les positions définissant la trajectoire sont représentées par des ronds, et un trait fin partant du rond indique le temps associé sur l'axe temporel 5040. Bien entendu, l'invention est applicable à des trajectoires 3d associées à des informations temporelles (ou trajectoire 4D, les positions des aéronefs pouvant être définies par une latitude, une longitude, une altitude, et une information temporelle).

[0056] Par exemple, la trajectoire 5010 est définie par les points 5011, 5012 et 5013, respectivement associée aux temps t_{5011} , t_{5012} et t_{5013} . Le graphe 5000 montre que les temps associés aux positions sur les trajectoires 5020 et 5030 ne sont pas les mêmes. Par exemple, la position 5021 de la trajectoire 5020 est associée au temps t_{5021} qui est différent, bien que proche, du temps t_{5011} .

[0057] Cette différence entre les temps auxquels sont fournies les positions des aéronefs pour les différentes trajectoires rend plus difficile la caractérisation des conflits de positions entre aéronef.

[0058] L'étape 420 consiste donc à modifier la représentation des trajectoires, en un ensemble de position alignées temporellement sur les mêmes pas de temps.

[0059] Dans l'exemple de la figure 5, le graphe 5100 représente ces trajectoires 5110, 5120 et 5130 alignées temporellement, correspondant respectivement aux trajectoires 5010; 5020 et 5030. L'axe des temps 5140 est identique à l'axe des temps 5040. Les trajectoires 5110, 5120 et 5130 sont définies chacune par un même nombre de positions alignées sur les mêmes pas de temps, en l'occurrence les pas de temps t_{5101} , t_{5102} , t_{5103} , t_{5104} , t_{5105} et t_{5106} .

[0060] Par exemple, la trajectoire 5110 est maintenant définie par les positions 5111, 5112, 5113, 5114, 5115 et 5116 alignées sur les pas de temps t_{5101} , t_{5102} , t_{5103} , t_{5104} , t_{5105} et t_{5106} .

[0061] Les positions des trajectoires 5110, 5120 et 5130 peuvent être obtenues, à partir de celles des trajectoires 5010, 5020 et 5030, de différentes manières. Par exemple par interpolation de la trajectoire par rapport aux positions connues sur les trajectoires 5010, 5020 et 5030. Cette interpolation peut être effectuée de différentes manières, par exemple via une interpolation linéaire, ou des B-splines.

[0062] Cette représentation des trajectoires fournit des informations beaucoup plus pertinentes sur la proximité des trajectoires d'aéronef. Par exemple, les positions 5111 et 5121 fournissent directement une information sur la proximité relative des aéronefs sur les trajectoires 5110 et 5120, car elles sont alignées sur le même pas de temps t_{5101} , ce qui n'était pas le cas des positions 5011 et 5021.

[0063] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, d'autres paramètres des trajectoires sont connus, en plus des positions sur les trajectoires brutes 5010, 5020, et 5030, et déterminés (par exemple interpolés) aux temps t_{5101} , t_{5102} , t_{5103} , t_{5104} , t_{5105} et t_{5106} pour les trajectoires 5110, 5120 et 51030. Par exemple, cela peut être le cas des vitesses horizontales et verticales des aéronefs, de leur cap, ou encore la température extérieure. Ces paramètres peuvent par exemple contribuer à obtenir une meilleure estimation des trajectoires aux différents temps, et donc d'obtenir une meilleure estimation des conflits. D'autres paramètres peuvent être calculés

directement sur les positions des trajectoires alignées temporellement 5110, 5120 et 5130. Il s'agit par exemple du nombre de conflits, de la distance ou encore de la séparation minimale entre deux aéronefs.

[0064] Retournant à la figure 4, la méthode 400 comprend une troisième étape 430 de formation d'une matrice comprenant, pour chaque couple possible de trajectoires, les paramètres des trajectoires du couple auxdits pas de temps.

[0065] Cette étape consiste à insérer dans une matrice, pour chacun des couples, les paramètres aux mêmes pas de temps. Ainsi, si N trajectoires sont présentes dans le secteur, chaque trajectoire forme N-1 couples, avec les N-1 autres trajectoires respectivement, et le nombre total de couples est égal à $N * (N-1) / 2$. Pour chacun des couples, les paramètres des deux trajectoires du couple sont notés, pour chacun des pas de temps. Ainsi, à chaque pas de temps, chaque paramètre d'une trajectoire sera noté N-1 fois (pour chacun des N-1 couple que forme la trajectoire) dans la matrice.

[0066] La figure 6 représente un exemple de matrice de paramètres par couple de trajectoires, selon un ensemble de modes de réalisation de l'invention.

[0067] La matrice 600 représente les paramètres des trajectoires aux pas de temps, organisés par couples de trajectoires. Dans cet exemple, N trajectoires sont présentes sur le secteur, notées A1, A2, ... AN. Les paramètres des trajectoires comprennent uniquement des paramètres de positions : longitude, latitude, altitude (sous la forme d'un FL – Flight Level ou Niveau de vol), pour chacun des pas de temps. Le nombre de pas de temps est égal à p. Seules les positions étant prises en compte, ces différents pas de temps/positions sont notés Pos1, Pos2... Posp.

[0068] Chaque ligne correspond à un couple de trajectoire. Par exemple, les lignes 610, 611, 612 correspondent respectivement aux couples de trajectoires (A1, A2), (A1, A3), et (AN-1, AN).

[0069] Les colonnes sont groupées par pas de temps/positions successifs. Pour chacun des pas de temps/position successifs, les colonnes représentent successivement la latitude du point au pas de temps pour la première puis la deuxième trajectoire du couple, la longitude du point au pas de temps pour la première puis la deuxième trajectoire du couple puis le niveau de vol du point au pas de temps pour la première puis la deuxième trajectoire du couple.

[0070] Par mesure d'intelligibilité, seuls les première, deuxième et dernières lignes et colonnes de la matrice 600 sont représentées sur la figure 6.

[0071] Par exemple :

- la colonne 620 représente la latitude de la première trajectoire de chaque couple au premier pas de temps ;
- la colonne 621 représente la latitude de la deuxième trajectoire de chaque couple au premier pas de temps ;
- la colonne 622 représente la longitude de la première trajectoire de chaque couple au premier pas de temps ;
- la colonne 623 représente la longitude de la deuxième trajectoire de chaque couple au premier pas de temps ;
- la colonne 624 représente le niveau de vol de la première trajectoire de chaque couple au premier pas de temps ;
- la colonne 625 représente le niveau de vol de la deuxième trajectoire de chaque couple au premier pas de temps.

[0072] Puis les colonnes suivantes contiennent les paramètres aux pas de temps/positions suivants. Par exemple :

- la colonne 626 représente la latitude de la première trajectoire de chaque couple au deuxième pas de temps ;
- la colonne 627 représente la latitude de la première trajectoire de chaque couple au dernier pas de temps.

[0073] Ainsi, par exemple :

- la cellule 630, située sur la première colonne 620 et la première ligne 610, représente la valeur de la latitude de la première trajectoire A1 du premier couple (A1, A2) au premier pas de temps p1 ;
- la cellule 631, située sur la deuxième colonne 621 et la première ligne 610, représente la valeur de la latitude de la deuxième trajectoire A2 du premier couple (A1, A2) au premier pas de temps p1 ;
- la cellule, située sur la première colonne 620 et la deuxième ligne 611, représente la valeur de la latitude de la première trajectoire A1 du deuxième

couple (A1, A3) au premier pas de temps p1. Sa valeur est donc égale à celle de la cellule 630 ;

- la cellule 633, située sur la dernière colonne correspondant au deuxième pas de temps/position, et la dernière ligne 612, représente la valeur de niveau de vol de la deuxième trajectoire AN du deuxième couple (AN-1, AN) au deuxième pas de temps p2.

[0074] La figure 6 est fournie à titre d'exemple uniquement d'une matrice de paramètres selon l'invention. Cependant, d'autres représentations sont possibles.

[0075] Par exemple, de manière plus générale, l'ordre des paramètres ou couples de trajectoires peut être modifié (on pourrait par exemple avoir les colonnes représentant la longitude avant celles représentant la latitude, et les couples de trajectoires peuvent être interchangées). De manière plus générale, d'autres paramètres que la trajectoire (vitesse horizontale, vitesse verticale, cap...) peuvent être utilisés, et la matrice peut être définie de manière à ce que :

- chaque ligne de la matrice représente un couple de trajectoires ;
- les colonnes de la matrice représentent respectivement, par pas de temps successifs, les valeurs de chacun des paramètres des trajectoires, pour la première puis pour la deuxième trajectoire du couple.

[0076] Cette représentation matricielle permet de disposer côte à côte des valeurs représentatives d'un possible conflit de trajectoires. Par exemple, les cellules adjacentes 630 et 631 représentent les latitudes de positions de deux aéronefs dans le secteur, au même instant. De plus une matrice telle que la matrice 600 comprend en une seule matrice toute l'information concernant un secteur aérien.

[0077] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, les paramètres des aéronefs pour chaque couple de trajectoire et chaque pas de temps sont concaténés en un seul vecteur, de dimension 6 (lorsque 3 paramètres latitude, longitude altitude sont prise en compte, ou de manière plus générale 2 fois les nombre de paramètres). Dans ce cas, la matrice est un tenseur, de dimensions $N(N-1)/2$, p, et 6 (lorsque 3 paramètres latitude, longitude altitude sont prise en compte, ou de manière plus générale 2 fois les nombre de paramètres).

[0078] Enfin, la représentation de la matrice peut être adaptée. Par exemple, les lignes et colonnes pourraient être inversées – on aurait alors une colonne par couple

de trajectoire, et une ligne par paramètre d'une trajectoire d'un couple à un pas de temps.

[0079] De retour à la figure 4, la méthode 400 comprend une quatrième étape 440 d'application à la matrice d'une transformation ayant pour propriété de concentrer l'énergie par composante.

[0080] Cette transformation peut par exemple être une analyse par composante principale (ACP en français, ou PCA en anglais), ou une analyse par composante indépendante (ACI en français ou ICA en anglais).

[0081] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, une analyse dite « IVA » (Independent Vector Analysis en anglais, ou Analyse par Vecteur Indépendant (AVI) en français). Peut être utilisée. Une IVA est notamment décrite par D. Lahat, T. Adali and C. Jutten, "Multimodal data fusion: An overview of methods, challenges, and prospects." *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 9, pp. 1449-1477, Sep. 2015, et est particulièrement indiquée lorsque la matrice se présente sous la forme d'un tenseur.

[0082] De manière générale, une telle transformation permet de transformer l'information en composantes indépendantes, déterminées de manière à concentrer l'énergie sur les premières composantes.

[0083] La méthode 400 comprend ensuite une cinquième étape 450 de calcul de l'énergie par composante.

[0084] Cette étape consiste à calculer pour chacune des composantes de la matrice transformée, une valeur d'énergie.

[0085] L'énergie d'une composante peut par exemple être calculée comme la somme des carrés des éléments de la composante.

[0086] La méthode 460 comprend ensuite une sixième étape de calcul d'un indice de complexité de la situation ATC, en fonction d'un niveau de concentration de l'énergie par composante.

[0087] Cette étape consiste à déterminer à quel point l'énergie est concentrée sur les premières composantes, et en déduire la complexité de la situation. De manière générale, si l'énergie est très concentrée sur peu de composantes, cela signifie que toute l'information contenue dans les interactions entre les couples de trajectoires

peut être résumée sur un nombre de dimensions faible, ce qui indique une complexité faible de la situation. Par exemple, si de nombreuses trajectoires sont parallèles, l'information peut être résumée en peu de dimensions, et la complexité de traitement de la situation ATC est faible. Au contraire, si l'énergie est peu concentrée, et répartie sur beaucoup de composantes, cela signifie que les interactions entre les trajectoires nécessitent de nombreuses dimensions pour être correctement représentées, ce qui laisse supposer de nombreux conflits de trajectoires, et une complexité élevée de la situation ATC.

[0088] De manière générale, les composantes peuvent être triées par ordre d'énergie croissante.

[0089] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le niveau de concentration de l'énergie est défini par un nombre K de composantes principales, qui concentrent un ratio de l'énergie totale des composantes supérieur ou égal à un seuil prédéfini P_K . Par exemple, le niveau de concentration de l'énergie peut être défini par le nombre de composantes concentrant 99% de l'énergie totale des composantes.

[0090] Ceci permet un calcul à la fois simple et efficace de la concentration de l'énergie.

[0091] Une fois ce niveau de concentration d'énergie obtenu, l'indice peut être obtenu de différentes manières. Par exemple, il peut simplement s'agir du nombre de composantes nécessaires pour dépasser le seuil prédéfini d'énergie P_K .

[0092] Les figures 7a et 7b représentent deux exemples de calcul de la complexité, respectivement d'une première et d'une deuxième situation ATC, dans un ensemble de modes de mise en œuvre de l'invention.

[0093] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, le niveau d'énergie par composante est défini par l'indice de la dernière composante pour laquelle une dérivée du niveau d'énergie global des composantes est supérieure ou égale à un seuil prédéfini. Dit autrement, lorsque les composantes sont rangées par quantité d'énergie croissante, la contribution de chaque composante au niveau d'énergie global décroît au fur et à mesure que l'indice des composantes s'accroît. Ainsi, la dérivée du niveau d'énergie global (somme des niveaux d'énergie de la première composante à la composante courante) décroît avec l'augmentation des indices des

composantes. Ce critère consiste donc in fine à déterminer le nombre de composantes contribuant de manière significative à l'énergie globale.

[0094] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, la complexité de traitement de la situation ATC est ainsi définie par la formule suivante :

$$C = \frac{k}{k_{max}} * [1 - (E_{c_k} - E_{c_{(k-1)}})]$$

Où :

- les composantes sont rangées par énergie croissante, selon un indice $k = [1 \dots N]$;
- E_{c_k} représente la somme de l'énergie des composantes, de l'indice 1 à l'indice k ;
- k est l'indice de la dernière composante apportant beaucoup d'énergie, c'est-à-dire la composante avec k le plus grand tel que la dérivée de l'énergie totale des composantes, représentée par $E_{c_k} - E_{c_{(k-1)}}$ est supérieure ou égale à un seuil prédéfini ;
- k_{max} est l'indice de la composante pour laquelle la somme des énergies est supérieure ou égale à un seuil prédéfini de l'énergie totale.

[0095] Ce calcul permet donc de déterminer la complexité de la situation ATC, en fonction du nombre de composantes fournissant une contribution significative à l'énergie totale. Il permet donc une estimation très fiable de la complexité de traitement de la situation.

[0096] Dans un ensemble de modes de réalisation de l'invention, la dérivée peut être une dérivée centrale, et non une dérivée sur la droite, la formule devient alors :

$$C = \frac{k}{k_{max}} * \left[1 - \frac{(E_{c_{(k+1)}} - E_{c_{(k-1)}})}{2} \right]$$

[0097] La figure 7a représente une première application de ce calcul, à une première situation ATC.

[0098] La vignette 710a fournit une représentation synthétique de cette situation, dans laquelle les trajectoires des aéronefs sont représentées en 2D dans l'espace du secteur aérien. Cette première situation est relativement peu complexe, car de nombreuses trajectoires sont substantiellement parallèles.

[0099] Le graphique 720a représente le pourcentage cumulé d'énergie totale par indice de composantes principales. L'axe horizontal représente l'indice de la composante courante, et l'axe vertical représente l'énergie cumulée des composantes, de la première composante à la composante courante, en pourcentage du total. Par exemple, le point 721a signifie que la 1^{ère} composante concentre à elle seule 30% de l'énergie totale, le point 722a que les deux premières composantes concentrent à elles deux un peu moins de 50% de l'énergie totale, etc.

[0100] Dans cet exemple, le point d'inflexion auquel la dérivée de l'énergie totale est inférieure au seuil fixé correspond au point 723a, et donc à la 3^{ème} composante. Cela signifie que les composantes à partir de la 4^{ème} contribuent peu à l'énergie totale.

[0101] L'indice $k_{\max}$ à partir duquel la quasi-totalité de l'énergie est concentrée correspond à la 11^{ème} composante 724a.

[0102] On constate donc que, dans cette situation peu complexe, seules 3 composantes contribuent significativement à l'énergie totale. La valeur de l'indice de complexité est calculée à 0,63402.

[0103] La figure 7b représente une seconde application de ce calcul, à une deuxième situation ATC.

[0104] La vignette 710b représente les trajectoires 2D des aéronefs dans cette situation, sur le même principe que la vignette 710a.

[0105] Cette deuxième situation, bien que comprenant un nombre de trajectoires identiques à celui de la première situation, est plus complexe, parce que les trajectoires s'entrecroisent beaucoup plus fréquemment.

[0106] Ceci rend donc l'information des couples de trajectoires, telle qu'intégrée dans la matrice 600, plus complexe, et l'énergie est concentrée sur un nombre plus grand de composantes principales.

[0107] La vignette 720b représente l'évolution de l'énergie totale, par composante principale, sur le même modèle que la vignette 710b.

[0108] Dans ce cas, le point d'inflexion, pour lequel la dérivée de l'énergie totale est inférieure au seuil prédéfini est obtenu au point 721b correspondant à la 8^{ème} composante, et l'indice $k_{\max}$ à partir duquel la quasi-totalité de l'énergie est concentrée correspond à la 13^{ème} composante 722b.

[0109] Dans ce cas, 8 composantes contribuent donc beaucoup à l'énergie totale, et l'indice de complexité calculé est égale à 0,81686, et est donc supérieur à celui de la première situation.

[0110] Ces deux exemples démontrent la capacité de l'invention à calculer un indice de complexité de situation qui prenne bien en compte les situations de conflits possibles entre les trajectoires, et pas seulement le nombre de trajectoires sur le secteur.

[0111] La méthode 400 comprend de nombreux avantages.

[0112] Comme expliqué ci-dessus, elle fournit un indice de complexité fiable, prenant en compte les situations de conflits possibles entre les trajectoires, et pas seulement le nombre de trajectoires sur le secteur.

[0113] De plus, elle ne nécessite pas de phase d'entraînement, et se base sur un nombre limité de données d'entrée.

[0114] Enfin, chacun des étapes de la méthode 400 peut être effectuée par des calculs relativement simples, et de manière déterministe. La méthode 400 peut donc s'exécuter dans un temps borné, sur des capacités de calcul limitées. La complexité algorithmique globale de la méthode 400 est faible comparée aux méthodes connues de détermination de la complexité de traitement d'une situation ATC.

[0115] La méthode 400 permet ainsi une redéfinition en temps réel de secteurs ATC pour adapter la charge de travail des contrôleurs aériens.

[0116] Enfin, les résultats fournis par la méthode 400 sont explicables. La méthode 400 est donc susceptible d'être certifiée.

[0117] Les exemples ci-dessus démontrent la capacité de l'invention à calculer la complexité de traitement d'une situation ATC, en fournissant de manière fiable en un temps borné, tout en nécessitant des capacités de calcul limitées. 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.