



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**21.04.2010 Bulletin 2010/16**

(51) Int Cl.:  
**G08G 5/04<sup>(2006.01)</sup>**

(21) Numéro de dépôt: **09172684.4**

(22) Date de dépôt: **09.10.2009**

(84) Etats contractants désignés:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO SE SI SK SM TR**  
Etats d'extension désignés:  
**AL BA RS**

• **Gutierrez-Castaneda, Manuel**  
**31400 Toulouse (FR)**  
• **Marty, Nicolas**  
**31790 Saint Sauveur (FR)**

(30) Priorité: **17.10.2008 FR 0805767**

(71) Demandeur: **Thales**  
**92200 Neuilly Sur Seine (FR)**

(74) Mandataire: **Esselin, Sophie et al**  
**Marks & Clerk France**  
**Conseils en Propriété Industrielle**  
**Immeuble " Visium "**  
**22, avenue Aristide Briand**  
**94117 Arcueil Cedex (FR)**

(72) Inventeurs:  
• **Coulmeau, François**  
**31840 Seilh (FR)**

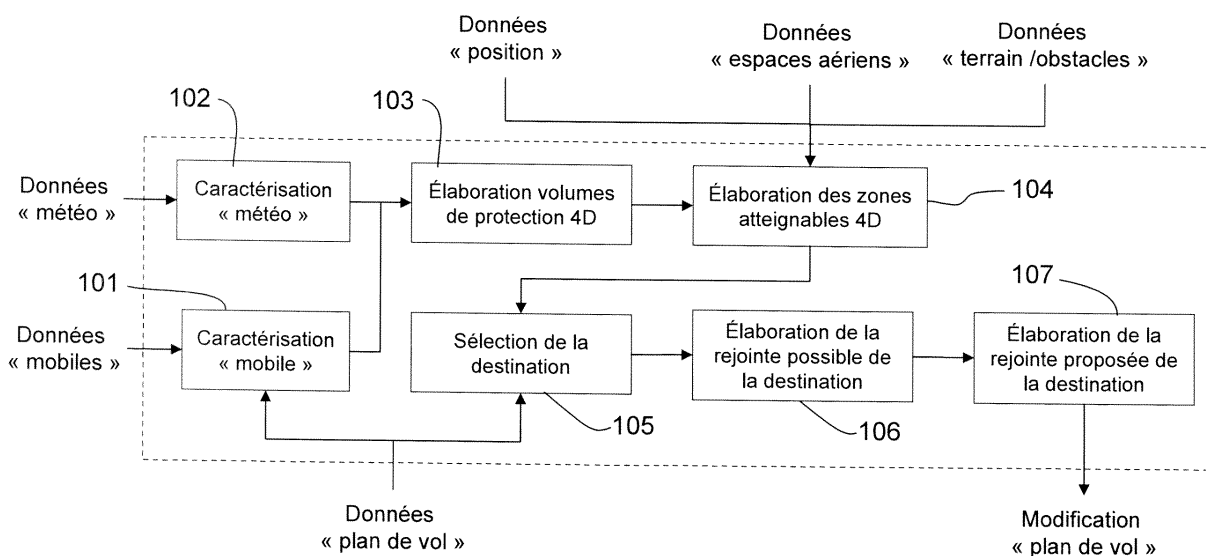
(54) **Dispositif pour le calcul d'un plan de vol d'un aéronef**

(57) L'invention concerne un dispositif pour l'élaboration d'un plan de vol assurant des marges de sécurité suffisantes pour une durée de quelques minutes vis à vis de l'ensemble des contraintes de vol pouvant survenir et comprenant des moyens pour :

■ la détection les mobiles environnants (aéronefs ou phénomènes météorologiques),

■ l'évaluation de leur type et le danger qu'ils représentent,

■ l'élaboration d'un plan de vol de reconfiguration assurant une séparation avec ces phénomènes et tentant au mieux compte des contraintes du plan de vol initialement suivi, évitant les espaces aériens interdits ou réglementés et évitant le relief environnant avec des marges opérationnelles ad hoc.



**FIG.1**

## Description

**[0001]** L'invention concerne la navigation d'un aéronef dont le plan de vol est soumis à des contraintes de vol et, plus particulièrement, le calcul d'un plan de vol respectant ces contraintes.

**[0002]** Un aéronef en vol est soumis à diverses contraintes influant sur sa navigation et plus particulièrement impactant son plan de vol. Ces contraintes sont, par exemple, des obstacles, des reliefs, des zones réglementées, d'autres aéronefs. Divers systèmes ont été développés pour aider un équipage à élaborer un plan de vol respectant certaines de ces contraintes de vol.

**[0003]** Parmi ces équipements, on connaît les systèmes de gestion de vol, dit FMS (acronyme de l'expression anglo-saxonne Flight Management System), comprenant les fonctions suivantes :

- Navigation LOCNV pour effectuer la localisation optimale de l'aéronef en fonction de moyens de géolocalisation (GPS, GALILEO, balises radios VHF, centrales inertielles) ;
- Plan de vol FPLN pour saisir des éléments géographiques constituant le squelette de la route à suivre (procédures de départ et d'arrivée, points de passages (waypoints), airways) ;
- Base de donnée de navigation NAVDB pour construire des routes géographiques et des procédures à partir de données incluses dans des bases (points, balises, legs d'interception ou d'altitude...) ;
- Base de données de performance, PRF DB contenant les paramètres aérodynamiques et moteurs de l'appareil.
- Trajectoire latérale TRAJ : pour construire une trajectoire continue à partir des points du plan de vol, respectant les performances avion et les contraintes de confinement (RNP) ;
- Prédiction PRED : pour construire un profil vertical optimisé sur la trajectoire latérale ;
- Guidage, GUID, pour guider dans les plans latéraux et verticaux l'aéronef sur sa trajectoire 3D, tout en optimisant la vitesse ;
- Liaison de donnée numérique DATALINK, pour communiquer avec les centres de contrôle et les autres aéronefs.

**[0004]** Les fonctions accessibles via un FMS, en particulier pour la création d'un plan de vol, sont insuffisantes pour s'assurer du respect de l'ensemble des contraintes de vol. En effet, la fonction de création d'un plan de vol ne vérifie pas l'intersection de la trajectoire proposée avec les éléments environnant l'aéronef (relief, zones, autres aéronefs, ...). De plus, le FMS ne dispose pas d'un modèle numérique de terrain permettant de réaliser les calculs d'interférence de la trajectoire prédite avec le relief. Un FMS ne dispose pas non plus de la capacité de détection des aéronefs environnants ou des phénomènes météorologiques proches.

**[0005]** On connaît aussi les systèmes ISS (acronyme de l'expression anglo-saxonne Integrated Surveillance System) où ses modules indépendants TAWS/TCAS/WXR remplissent une fonction primaire de surveillance d'anticollision (dit « Safety Net ») avec le terrain et ont pour but l'émission d'alertes sonores lors d'une approche exceptionnelle du relief permettant à l'équipage de réagir en engageant une ressource verticale avant qu'il ne soit trop tard.

**[0006]** Pour ce faire, les systèmes TAWS, découplés de systèmes de navigation, comparent périodiquement la trajectoire théorique que décrirait l'aéronef lors d'une ressource et la comparent à une coupe du terrain survolé obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain mondial embarqué à bord du calculateur.

**[0007]** La disponibilité d'un modèle du terrain autorise des fonctions secondaires permettant d'améliorer la perception de la situation de l'équipage (« Situation Awareness »). Parmi elles, le THD (« Terrain Hazard Display ») a pour objectif une représentation des marges verticales relatives à l'altitude de l'aéronef par des tranches de fausses couleurs présentées sur l'écran de navigation. Les TAWS de classe A, obligatoires pour les avions de transport commerciaux, disposent généralement d'un mode cartographique simplifié à quelques tranches hypsométriques, permettant de disposer d'une représentation du terrain lors de phases de vol en croisière.

**[0008]** Les représentations en fausses couleurs sont actuellement limitées par les standards d'affichage ARINC-453 (de type WXR) et par les contraintes de certification qui amènent à volontairement dégrader la résolution des représentations graphiques proposées afin de ne pas permettre leur utilisation pour la navigation, incompatible avec le niveau de certification défini pour un TAWS.

**[0009]** Les fonctions réalisées par un ISS sont insuffisantes pour s'assurer du respect de l'ensemble des contraintes de vol. En effet, la résolution des modèles numériques de terrain de l'ordre de 15 secondes d'arc (ou moins) est trop élevée en regard des marges opérationnelles requises pour les situations envisagées et de fait non certifiables pour des fonctions de navigation. De plus, les interfaces ne permettent pas d'accéder aux données de navigation, ni au modèle de performances pour réaliser des prédictions de profil vertical, temps de vol et consommation de carburant nécessaire. Enfin les interfaces ne permettent pas d'élaborer un plan de vol ni d'en assurer le suivi via le système de guidage.

**[0010]** On connaît enfin les systèmes WUS (acronyme de l'expression anglo-saxonne Weather Uplink System) qui sont des dispositifs permettant une communication de données entre un aéronef et un dispositif au sol afin de charger à bord de l'aéronef dynamiquement et en temps réel l'ensemble des informations météorologiques qui correspondent

à la zone d'évolution courante et à venir de l'aéronef.

**[0011]** Au sol, ce système est en charge de récupérer les données météorologiques issues de multiples sources (radars, relevés, prédictions, satellites, ...) et de fournir les moyens de communication permettant d'établir un lien de données avec un aéronef.

**[0012]** A bord de l'aéronef, ce système est en charge d'établir le lien avec le dispositif au sol, de récupérer les données et de les mettre à disposition de l'équipage (graphiquement) ou d'autres équipements afin de les exploiter à des fins de gestion du vol ou d'évitement de zones pouvant devenir dangereuses.

**[0013]** Les fonctions réalisées par un WUS sont insuffisantes pour atteindre les objectifs de l'innovation. En effet, le WUS ne dispose pas d'un modèle numérique de terrain permettant de réaliser les calculs d'interférence de la trajectoire prédite avec le relief ni de la capacité de détection des aéronefs environnants ou des phénomènes météorologiques proches. De plus, les interfaces ne permettent pas d'accéder aux données de navigation, ni au modèle de performances pour réaliser des prédictions de profil vertical, de temps de vol et de consommation de carburant nécessaire. Enfin, les interfaces ne permettent pas d'élaborer un plan de vol ni d'en assurer le suivi via le système de guidage.

**[0014]** Aucun de ces équipements ne permet de d'élaborer un plan de vol assurant des marges de sécurité suffisantes pour une durée de quelques minutes vis à vis de l'ensemble des contraintes de vol pouvant se présenter dans un périmètre donné : obstacles, reliefs, zones réglementées, aéronefs collaboratifs ou non.

**[0015]** L'invention vise notamment à pallier les problèmes cités précédemment en proposant un dispositif embarqué à bord d'un aéronef capable de proposer automatiquement une révision du plan de vol suivi afin d'éviter, avec des marges de sécurité suffisantes et sur un horizon temporel de quelques minutes, l'ensemble des obstructions fixes (relief, obstacles, zones réglementées) et mobiles (aéronefs, phénomènes météo) à proximité de l'aéronef.

**[0016]** A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif pour le calcul d'un plan de vol d'un aéronef, ledit plan de vol permettant la rejointe vers un plan de vol initial, ledit aéronef comportant des capteurs pour la détection de mobiles environnants et des capteurs météo pour la détection de phénomènes météorologiques, ledit dispositif étant caractérisé en ce qu'il comprend des moyens pour :

- la détermination de paramètres caractérisant les mobiles détectés à partir de données provenant des capteurs pour la détection d'aéronefs environnants,
- la détermination de paramètres caractérisant les phénomènes météorologiques détectés, à partir de données météorologiques provenant des capteurs météo,
- le calcul de zones interdites et de leur évolution dans le temps à partir des paramètres caractérisant les aéronefs et les phénomènes météorologiques détectés, lesdites zones définissant un espace où l'aéronef ne peut pas voler,
- le calcul de zones atteignables par l'aéronef et de leur évolution dans le temps à partir de la position de l'aéronef, de données décrivant des zones réglementées interdites à la navigation, d'un modèle numérique de terrain, d'une liste d'obstacles et des zones interdites calculées,
- la sélection d'un point de rejointe du plan de vol initial situé dans une zone atteignable,
- le calcul d'un plan de vol de rejointe vers le point de rejointe sélectionné.

**[0017]** Selon une caractéristique de l'invention, le calcul du plan de vol de rejointe est itéré à intervalles réguliers, un plan de vol étant évalué en fonction d'un critère de qualité; un plan de vol de rejointe calculé à une itération donnée, dit nouveau plan de vol, devient le plan de vol suivi par l'aéronef si un plan de vol de rejointe, calculé à une itération précédente et suivi par l'aéronef, dit plan de vol courant, présente une évaluation, au sens du critère de qualité, dont la différence avec l'évaluation du nouveau plan de vol calculé est supérieure à un seuil donné.

**[0018]** Selon une caractéristique de l'invention, le calcul de zones atteignables comprend une estimation des distances des points dans une carte obtenue par projection sur un plan horizontal d'une représentation 3D d'un espace d'évolution par un maillage de cubes élémentaires associés à des niveaux de danger et repérés par une altitude, une latitude, une longitude et une date, ladite estimation consistant à appliquer une transformée de distance, les cubes associés à des niveaux de danger supérieurs à une valeur admissible  $N_l$  repérant les zones interdites pour l'aéronef; ladite transformée de distance estimant les distances des différents points de l'image par rapport à un point source représentant la position de l'aéronef en appliquant, par balayage, un masque aux différents points de l'image ; une valeur de distance initiale déterminée étant affectée, en début de balayage, à tous les points de l'image sauf au point source, origine des mesures de distance, auquel est affectée une valeur de distance nulle.

**[0019]** Selon une caractéristique de l'invention, l'estimation de distance du point source à un point considéré  $P_{i,j}$ , dit point but, étant placé dans une case déterminée du masque, consiste pour chaque point voisin  $P_v$  entrant dans les cases du masque et dont la distance ayant déjà été estimée au cours du même balayage à :

- lire la distance estimée  $D_v$  du point voisin  $P_v$ ,
- lire un coefficient  $C_{xy}$  du masque correspondant à la case occupée par le point voisin  $P_v$ ,
- calculer une distance propagée  $D_p$  correspondant à la somme de la distance estimée  $D_v$  du point voisin  $P_v$  et

du coefficient  $C_{XY}$  affecté à la case du masque occupée par le point voisin  $P_V$ :

$$D_p = D_V + C_{XY} \quad ,$$

5

- calculer une altitude prévisible  $A_p$  de l'aéronef après franchissement de la distance  $D_p$ ,
- calculer une date propagée  $T_p$  à la position après franchissement de la distance  $D_p$ ,
- lire un niveau de danger  $N_{i,j,A_p,T_p}$  prévisible du point but  $P_{i,j}$  dans la représentation en cubes élémentaires de l'espace aérien à l'altitude prévisible  $A_p$  et à date propagée  $T_p$ ,
- comparer le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  à une valeur limite autorisée  $N_l$  pour le vol, augmentée d'une marge de sécurité  $\Delta$ ,
- éliminer la distance propagée  $D_p$  si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  est supérieur à celui admissible pour le vol majoré par la marge de sécurité  $\Delta$ ,
- si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  majoré par la marge de sécurité  $\Delta$ , est inférieur à la limite  $N_l$  fixée pour le vol, lire la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$  et la comparer à la distance propagée  $D_p$  (étape 99),
- éliminer la distance propagée  $D_p$  si elle est supérieure ou égale à la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$ , et
- remplacer la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$ , par la distance propagée  $D_p$  si cette dernière est inférieure.
- les cubes élémentaires présentant une distance inférieure à la plus grande distance mesurable sur l'image à la fin du balayage, étant désignés zone atteignables.

**[0020]** Selon une caractéristique de l'invention, la sélection du point de rejointe comprend le calcul d'une note  $C$  pour des points du plan de vol initial situés dans une zone atteignable, le point de rejointe du plan de vol initial sélectionné étant celui obtenant la meilleure note  $C$ , ladite note étant calculée selon la relation suivante :

30

$$C = \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 + C_i)^{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} - 1 \right]$$

où  $C_i$  est une note attribuée selon un critère d'évaluation  $i$ ,... et  $\alpha_i$  est une valeur associée au critère d'évaluation  $i$  et reflétant son importance,  $i$  étant une valeur comprise entre 1 et 5.

**[0021]** Selon une caractéristique de l'invention, les paramètres caractérisant les mobiles détectés comprennent une vitesse, une position et un plan de vol futur.

**[0022]** Selon une caractéristique de l'invention, la zone interdite associée à un mobile caractérisé uniquement par sa position est définie par une succession de cercles concentriques avec des rayons obéissant à une loi croissante en fonction du temps et dont le centre est la position dudit mobile.

**[0023]** Selon une caractéristique de l'invention, la zone interdite associée à un mobile caractérisé par sa position et par son vecteur vitesse est définie par une succession de cylindres, dont les centres correspondent à la position prédite dudit mobile à partir dudit vecteur vitesse, lesdits centres étant espacés d'un intervalle de temps  $p$  régulier, les rayons des cylindres successifs obéissant à une loi croissante en fonction du temps et respectant la relation suivante :

$$r_i + r_{i+1} > p$$

50

où  $p$  est l'intervalle de temps séparant les centres de deux cylindres successifs,  $r_i$  et  $r_{i+1}$  représentent les rayons de deux cylindres successifs.

**[0024]** Selon une caractéristique de l'invention, la zone interdite associée à un mobile caractérisé par sa position et par son plan de vol futur est définie par un tube enveloppant le plan de vol.

**[0025]** Selon une caractéristique de l'invention, la zone interdite associée à un mobile caractérisé par sa position et par son plan de vol futur est définie par un parallélépipède rectangle enveloppant le plan de vol.

**[0026]** L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée faite à titre d'exemple non limitatif et à l'aide des figures parmi lesquelles :

La figure 1 représente un exemple de réalisation du dispositif selon l'invention.

La figure 2 représente les interfaces du dispositif selon l'invention.

La figure 3 représente un exemple de phénomène météorologique caractérisé par des paramètres.

La figure 4 illustre une zone interdite associée à un aéronef de type planeur.

La figure 5 illustre une zone interdite associée à un mobile de type avion de transport caractérisé par un vecteur vitesse.

La figure 6 illustre une zone interdite associée à un aéronef caractérisé par une trajectoire.

La figure 7 représente un exemple de masque de chanfrein.

Les figures 8a et 8b montrent les cellules du masque de chanfrein illustré à la figure 7, qui sont utilisées dans une passe de balayage selon l'ordre lexicographique et dans une passe de balayage selon l'ordre lexicographique inverse.

La figure 9 illustre les principales étapes d'un traitement effectué pour déterminer les zones atteignables par l'aéronef en tenant compte de contraintes.

La figure 10 illustre une trajectoire initiale et une trajectoire de rejointe.

La figure 11a montre un exemple de notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction du nombre de points de passage conservés par rapport à un plan de vol initial.

La figure 11 b montre un exemple de notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction d'une quantité de virage totale par rapport au plan de vol initial.

La figure 11 c montre un exemple de notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction du ratio entre la longueur de la trajectoire initiale et sa longueur.

La figure 11d montre un exemple de notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction de l'angle de rejointe de plan de vol.

La figure 11 e montre un exemple de notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction de la surface d'écart par rapport au plan de vol initial.

Le dispositif selon l'invention peut être utilisé notamment pour:

- des aéronefs de transport civil afin de décharger le pilote d'une partie des actions ou de repenser — sous certaines conditions - la répartition des rôles avec le contrôle aérien,
- des aéronefs de transport d'affaire ou d'aviation générale opérés dans des espaces aériens non contrôlés,
- des aéronefs militaires opérés dans des espaces aériens civils non contrôlés ou des espaces aériens tactiques ségrégués, dans lesquels opère un ensemble d'aéronefs potentiellement discrets et/ou hostiles.

Le dispositif selon l'invention peut être utilisé pour calculer une trajectoire de rejointe d'un aéronef vers sa trajectoire initiale. Un tel dispositif peut aussi être utilisé pour modifier la trajectoire initiale de l'aéronef lorsqu'une nouvelle menace (un phénomène météorologique ou un mobile) est apparue. L'horizon temporel de détection et de reconfiguration de la route est de l'ordre de quelques minutes (2 par exemple), répondant aux besoins classiques de séparation pour des aéronefs évoluant dans des espaces aériens civils.

L'élaboration d'un plan de vol assurant des marges de sécurité suffisantes pour une durée de quelques minutes vis à vis de l'ensemble des contraintes de vol pouvant se présenter pose notamment les problèmes suivants :

- la détection des mobiles environnants (aéronefs ou phénomènes météo),
- l'évaluation de leur type et le danger qu'ils représentent
- l'élaboration d'un plan de vol de reconfiguration assurant une séparation avec ces phénomènes et :
  - o tenant au mieux compte des contraintes du plan de vol initialement suivi,
  - o évitant les espaces aériens interdits ou réglementés,
  - o évitant le relief environnant avec des marges opérationnelles adhoc,

**[0027]** Lorsque la séparation ne peut plus être respectée, le problème consiste alors à élaborer une manœuvre d'évitement. On connaît, par exemple, par le brevet français n° 2 893 146, un système embarqué à bord d'un aéronef, pour la prévention des collisions sol, de type TAWS, fournissant une assistance à l'équipage pour la détermination d'une trajectoire efficace d'évitement latéral du terrain en cas de risque avéré de collision avec le sol.

**[0028]** La figure 1 représente un exemple de réalisation du dispositif selon l'invention. La figure 2 représente les interfaces du dispositif selon l'invention. Ce dispositif 100 comporte un module de calcul et de traitement (CPU, mémoire, etc.). Il communique avec :

- des dispositifs de localisation 201 fournissant la position de l'aéronef,
- une base de données 202 de zones aériennes réglementées ou restreintes. Cette base peut être mise à jour

dynamiquement (activation de certaines zones réglementées ou restreintes, déplacement des phénomènes météorologiques, déplacement de zones interdites de survol pour les zones militaires tactiques, etc.),

- une base de données 203 d'élévations du terrain environnant et d'obstacles,
- un système de gestion de vol (ou flight management) 204 pour récupérer les données de plan de vol et lui communiquer le plan de vol de rejointe calculé,
- de capteurs de détection de mobiles environnants 205, et
- une liaison météorologique 206 ou weather uplink selon l'expression anglo-saxonne.

**[0029]** Le dispositif selon l'invention comprend des moyens de détermination de paramètres caractérisant les aéronefs détectés 101 à partir de données provenant des capteurs pour la détection d'aéronefs environnants. Les capteurs pouvant être utilisés pour la détection d'aéronefs environnants sont, par exemple : un TCAS, un radar, un capteur Optronique, un capteur Infra-rouge ou une liaison de données (par exemple ADS-B ou liaison 16). Ces données permettent de considérer des aéronefs détectés à proximité de l'aéronef, dans l'horizon temporel donné (par exemple deux minutes)

**[0030]** Ce module caractérise les paramètres dimensionnants des aéronefs détectés en consolidant les données reçues des divers capteurs.

**[0031]** Les paramètres caractérisant un aéronef détecté comprennent : (i) un type d'aéronef détecté, (ii) une position de référence 3D de l'aéronef, (iii) une prédiction de déplacement de l'aéronef sous la forme d'une trajectoire 4D prédite partant du point de référence et (iv) les moyens de détection consolidés pour élaborer la position de référence et la prédiction de déplacement de l'aéronef, par exemple, un radar, un TCAS, une collaboration ADS-B, une liaison de données reçue du sol ou d'un aéronef de contrôle (de type liaison 16 par exemple), optronique, infra-rouge.

**[0032]** La caractérisation permet d'estimer le type d'aéronef à proximité et sa trajectoire à venir afin de pouvoir définir les règles de l'air, les marges et les priorités applicables.

**[0033]** Parmi les règles applicables, on peut prendre en compte, par exemple :

- les priorités relatives des aéronefs, afin de déterminer quel aéronef doit effectuer une manoeuvre de séparation, du plus prioritaires (n'a pas à « bouger ») au moins prioritaire : ballon, planeur, avion,
- les manoeuvres à privilégier : par exemple, en situation d'approche :

une remise de gaz ; en croisière : un virage à droite pour doubler par la droite.

**[0034]** Les types d'aéronefs envisagés sont parmi :

- Les ballons à air chaud, par exemple caractérisés par leur signature thermique (IR) et leur volume (optro) ;
- Les planeurs, par exemple caractérisés par leur envergure et leur vitesse ;
- Les avions d'aviation générale et hélicoptères, par exemple caractérisés par leur signature métallique (radar) et leur vitesse (radar doppler). Un hélicoptère évoluant à plus 70 noeuds n'est pas différent d'un avion d'aviation générale. Les avions de transport, par exemple caractérisés par leur signature métallique (radar), leur vitesse (radar doppler) et leur altitude d'évolution, en général plus élevée sauf à proximité des aéroports ;
- Les aéronefs militaires véloces, par exemple essentiellement caractérisés par un couple vitesse d'évolution/altitude incompatible avec des opérations civiles (dans les zones tactiques/ségréguées) ou leur proximité avec une zone réglementée/réservée aux opérations militaires dans des missions de transport aérien civil ;

**[0035]** La connaissance du type d'aéronef est utilisée pour déterminer les marges de manoeuvre nécessaires et les règles de priorité à appliquer. Les types de trajectoires envisagées sont parmi :

■ Vecteur : la trajectoire de l'aéronef n'est connue que par le vecteur vitesse donnant un cap et une tendance verticale. Cette description issue de capteurs de type radar (ou optronique) aptes à élaborer une détection et une estimation de la vitesse de la « cible » mesurée est corrélée à la connaissance de l'évolution de l'aéronef embarquant le dispositif selon l'invention et permet d'estimer un vecteur vitesse 3D de chaque « cible ».

■ Plan de vol : la trajectoire de l'aéronef est connue par la description du chemin latéral prévu. Cette description est issue d'informations collaboratives, comme la transmission de quelques branches du plan de vol des aéronefs civils par ADS-B par exemple.

■ 3D : la trajectoire de l'aéronef est connue à la fois en latéral et en vertical. Cette description est issue d'informations collaboratives, par exemple via les transmissions de données de vol sur les aéronefs « amis » transmis par un centre de contrôle militaire.

**[0036]** Lorsque plusieurs sources d'informations sont disponibles, on peut utiliser des règles de sélections définissant quelles sources d'informations sont utilisées en priorité. Par exemple :

- Dans le cadre d'une mission civile, les informations issues de systèmes collaboratifs (comme l'ADS-B) sont utilisées en priorité ;
- Dans le cadre d'une mission militaire (discrète par exemple), les données transmises par un système de commandement sont privilégiées ;
- Dans le cadre d'un vol civil hors des espaces aériens contrôlés, les données collectées par des systèmes actifs à bord de l'aéronef, par exemple de type radar ou TCAS sont privilégiés.

**[0037]** Le dispositif selon l'invention comprend des moyens de détermination de paramètres caractérisant les phénomènes météorologiques détectés, 102 à partir de données météorologiques provenant des capteurs météo. En consolidant des diverses sources d'information de météorologie, par exemple, un radar WXR et un lien de données météo, on estime le type de phénomène à proximité de l'aéronef. Les types de phénomène détectés sont parmi : les zones de cisaillements de vent (windshear) prédictifs, les zones de turbulences, les zones d'orage, tempêtes et les zones d'éruptions volcaniques (ou de poussières issues d'éruptions).

**[0038]** Le type de phénomène permet de définir les règles de l'air et les marges applicables. Les phénomènes météorologiques sont aussi définis par les paramètres suivants illustrés à la figure 3 :

- Un volume 301 et un point de référence 302, par exemple, sous la forme d'un cylindre,
- Une trajectoire 4D — 3D et temps - prédite du point de référence, par exemple, la trajectoire 303 centre du disque de base du cylindre C(t), en trois dimensions, altitude, latitude et longitude et en fonction du temps,
- Des lois d'évolution temporelle du volume de référence, par exemple, l'évolution des dimensions du cylindre de base dans le temps avec R(t) pour le rayon 304 et H(t) pour la hauteur 305, où t est le temps.

**[0039]** Le paramètre de volume peut être n'importe quel volume en trois dimensions (polyèdre, sphère, ...). Les lois d'évolution temporelle du volume sont alors basées, par exemple, sur les sommets du polyèdre.

**[0040]** Le dispositif selon l'invention comprend des moyens pour le calcul de zones interdites et de leur évolution dans le temps 103 à partir des paramètres caractérisant les aéronefs et les phénomènes météorologiques détectés. En fonction du type d'aéronef ou de phénomène météo détecté, il est possible de calculer des marges latérales, des marges verticales, une estimation de la déviation, une augmentation des marges en fonction du temps et de la confiance sur la mesure et l'estimée de vitesse/direction.

**[0041]** La figure 4 illustre une zone interdite associée à un aéronef de type planeur. La zone interdite d'un mobile dont on connaît uniquement le vecteur vitesse et dont on ne connaît pas le vecteur vitesse est définie par une succession de cercles concentriques dont les rayons 402, 403 obéissent à une loi croissante en fonction du temps et dont le centre est la position 401 dudit mobile. La trajectoire associée à un planeur n'étant pas prédictible, la zone interdite calculée forme un cercle dont le rayon est croissant dans le temps. Ce volume sécurisé est défini par un échantillonnage. Des échantillons  $i$  sont effectués avec un pas de temps de  $p$  donné, par exemple  $p=10$  secondes. Le volume interdit est représenté par une zone de restriction de  $r_i$  secondes autour de la position initiale du planeur 401. Les  $r_i$  sont croissants, par exemple  $r_1 = 5$  secondes et  $r_2 = 10$  secondes et forment des cercles concentriques.

**[0042]** La figure 5 illustre une zone interdite associée à un aéronef de type avion de transport dont on connaît le vecteur vitesse. Ce volume interdit est défini par un échantillonnage. Des échantillons  $i$  sont effectués avec un pas de temps de  $p$  donné, par exemple  $p=10$  secondes. Le volume sécurisé est représenté par une zone de restriction de  $r_i$  secondes. Les rayons des zones de restriction respectent la formule suivante : avec  $r_i + r_{i+1} > p$ . Ainsi, les zones de restrictions se recouvrent partiellement, tout en simplifiant l'échantillonnage et en limitant les besoins en ressources de calcul.

**[0043]** La table ci-dessous représente la liste des échantillons et les dates auxquelles la zone correspondante est interdite à l'utilisation pour l'aéronef embarquant un dispositif selon l'invention.

Echantillon	Date échantillon	Date de début de restriction	Date de fin de restriction
1	10 s	6 s	14 s
2	20 s	15 s	25 s
3	30 s	24 s	36 s

**[0044]** La figure 5, correspondant au tableau précédent, illustre la zone de restriction à trois dates différentes. Les

trois échantillons sont effectués à 10 secondes d'intervalles. Le centre de cette zone est la position prédite d'un aéronef détecté calculée avec le vecteur vitesse dudit aéronef. Un premier point 501 représente la position de l'aéronef à une date de 10 secondes. Un deuxième 502 et un troisième point 503 représentent respectivement la position de l'aéronef à une date de 20 secondes et à une date de 30 secondes.

**[0045]** La figure 6 illustre une zone interdite associée à un aéronef dont on connaît la trajectoire. Pour un aéronef dont la trajectoire en 3D est connue, la zone interdite est définie, par exemple, par : un tube enveloppant un plan de vol prévu sur le plan horizontal 601 ayant un rayon correspondant à une mesure 602 de la variation des paramètres sur une période donnée, par exemple 15 secondes. Le principe est d'estimer la déviation maximale mesurée par rapport au plan de vol dans le passé proche, par exemple une minute. La déviation est mesurée latéralement et verticalement. On garde un certain pourcentage, par exemple 95%, du maximum mesuré.

**[0046]** La zone interdite peut aussi être définie par un parallélépipède rectangle, correspondant à un corridor autour de la trajectoire horizontale et une marge fixe de hauteur autour de la description verticale de la partie 3D. Un parallélépipède rectangle permet d'estimer les déviations latérales et verticales indépendamment, selon le même principe.

**[0047]** Le dispositif selon l'invention comprend des moyens pour le calcul de zones, en quatre dimensions, atteignables par l'aéronef 104 à partir de la position de l'aéronef, de données décrivant des zones réglementées interdites à la navigation, d'un modèle numérique de terrain, d'une liste d'obstacles et des zones interdites calculées. On connaît déjà dans la demande de brevet FR 2 910 640 un procédé d'estimation, pour un mobile soumis à des contraintes de profil vertical de trajectoire et de minoration des risques, des distances des points d'une carte obtenue par projection sur un plan horizontal d'une représentation 3D d'un espace d'évolution par un maillage de cubes élémentaires associés à des niveaux de danger et repérés par une altitude, une latitude et une longitude. Cependant ce procédé ne prend pas en compte les phénomènes météorologiques dynamiques et les mobiles dont la position évolue dans le temps.

**[0048]** Les moyens pour le calcul de zone atteignables en quatre dimensions selon l'invention vérifie, à chaque pas de propagation, en plus des critères décrits dans la demande précitée, si, pour une position 3D donnée et une date  $t$  considérée, l'aéronef est à plus d'une certaine distance (séparation horizontale et séparation verticale) d'un mobile ou d'un phénomène météorologique prédit à la date  $t$ . Le pas de temps sur l'échantillonnage des mobiles et des phénomènes météorologiques est élargi en fonction des marges de séparation. Par exemple, les mobiles et les phénomènes météorologiques sont prédits avec des pas de 15 secondes.

**[0049]** Le procédé décrit dans la demande de brevet FR 2 910 640 met en oeuvre une transformée de distance opérant par propagation sur une image 2D de la carte dont les pixels disposés en lignes et colonnes par ordres de valeurs de longitude et de latitude correspondent aux colonnes de cubes élémentaires du maillage de la représentation de l'espace d'évolution et repèrent, pour chaque colonne, des tranches d'altitude interdites correspondant aux cubes associés à des niveaux de danger supérieurs à une valeur admissible pour leur franchissement. Cette transformée de distance estime les distances des différents points de l'image par rapport à un point source placé à proximité du mobile en appliquant, par balayage, un masque de chanfrein aux différents points de l'image. L'estimation de distance d'un point, par application du masque de chanfrein à ce point dit point but s'effectue en répertoriant les différents trajets allant du point but au point source et passant par des points du voisinage du point but qui sont recouverts par le masque de chanfrein et dont les distances au point source ont été préalablement estimées au cours du même balayage, en déterminant les longueurs des différents trajets répertoriés par sommation de la distance affectée au point de passage du voisinage et de sa distance au point but extraite du masque de chanfrein, en recherchant le trajet le plus court parmi les trajets répertoriés et en adoptant sa longueur comme estimation de la distance du point but. Initialement, en début de balayage, une valeur de distance supérieure à la plus grande distance mesurable sur l'image est attribuée à tous les points de l'image sauf au point source, origine des mesures de distance, auquel est affectée une valeur de distance nulle. Les longueurs des trajets répertoriés, lors de l'application du masque de chanfrein à un point but, en vue de la recherche du trajet le plus court, sont traduites en temps de parcours pour le mobile et les trajets répertoriés, dont les temps de parcours pour le mobile sont tels qu'il atteindrait le point but dans un cube élémentaire de la représentation de l'espace d'évolution dont le niveau de danger est supérieur à une valeur admissible, sont exclus de la recherche du trajet le plus court.

**[0050]** On rappelle que la distance entre deux points d'une surface est la longueur minimale de tous les parcours possibles sur la surface, partant de l'un des points et aboutissant à l'autre. Dans une image formée de pixels répartis selon un maillage régulier de lignes, colonnes et diagonales, une transformée de distance par propagation estime la distance d'un pixel dit pixel "but" par rapport à un pixel dit pixel "source" en construisant progressivement, en partant du pixel source, le plus court trajet possible suivant le maillage des pixels et aboutissant au pixel but, en s'aidant des distances trouvées pour les pixels de l'image déjà analysés et d'un tableau dit masque de chanfrein répertoriant les valeurs des distances entre un pixel et ses proches voisins.

**[0051]** Comme montré à la figure 7, un masque de chanfrein se présente sous la forme d'un tableau avec une disposition de cases reproduisant le motif d'un pixel entouré de ses proches voisins. Au centre du motif, une case affectée de la valeur 0 repère le pixel pris pour origine des distances répertoriées dans le tableau. Autour de cette case centrale, s'agglomèrent des cases périphériques remplies de valeurs de distance non nulles et reprenant la disposition

des pixels du voisinage d'un pixel supposé occuper la case centrale. La valeur de distance figurant dans une case périphérique est celle de la distance séparant un pixel occupant la position de la case périphérique concernée, d'un pixel occupant la position de la case centrale. On remarque que les valeurs de distance se répartissent en cercles concentriques. Un premier cercle de quatre cases correspondant aux quatre pixels les plus proches du pixel de la case centrale, placés soit sur la ligne soit sur la colonne du pixel de la case centrale, sont affectées d'une valeur de distance D1. Un deuxième cercle de quatre cases correspondant aux quatre pixels les plus proches du pixel de la case centrale, placés en dehors de la ligne et de la colonne du pixel de la case centrale, sont affectées d'une valeur de distance D2. Un troisième cercle de huit cases correspondant aux huit pixels les plus proches du pixel de la case centrale, placés en dehors de la ligne, de la colonne et des diagonales du pixel de la case centrale, sont affectées d'une valeur D3.

**[0052]** Le masque de chanfrein peut couvrir un voisinage plus ou moins étendu du pixel de la case centrale en répertoriant les valeurs des distances d'un nombre plus ou moins important de cercles concentriques de pixels du voisinage. Il peut être réduit aux deux premiers cercles formés par les pixels du voisinage d'un pixel occupant la case centrale ou être étendu au-delà des trois premiers cercles formés par les pixels du voisinage du pixel de la case centrale mais il est habituel de s'arrêter à trois premiers cercles comme c'est le cas du masque de chanfrein représenté à la figure 7. Les valeurs des distances D1, D2, D3 qui correspondent à des distances euclidiennes sont exprimées dans une échelle autorisant l'emploi de nombres entiers au prix d'une certaine approximation. C'est ainsi que G. Borgefors donne à la distance D1 correspondant à un échelon en abscisse x ou en ordonnée y la valeur 5, à la distance D2

correspondant à la racine de la somme des carrés des échelons en abscisse et ordonnée  $\sqrt{x^2 + y^2}$  la valeur 7 qui

est une approximation de  $5\sqrt{2}$ , et à la distance D3 la valeur 11 qui est une approximation de  $5\sqrt{5}$ .

**[0053]** La construction progressive du plus court trajet possible allant à un pixel but, en partant d'un pixel source et en suivant le maillage des pixels se fait par un balayage régulier des pixels de l'image au moyen du masque de chanfrein. Initialement, les pixels de l'image se voient affecter une valeur de distance infinie, en fait un nombre suffisamment élevé pour dépasser toutes les valeurs des distances mesurables dans l'image, à l'exception du pixel source qui se voit affecter une valeur de distance nulle. Puis les valeurs initiales de distance affectées aux points but sont mises à jour au cours du balayage de l'image par le masque de chanfrein, une mise à jour consistant à remplacer une valeur de distance attribuée à un point but, par une nouvelle valeur moindre résultant d'une estimation de distance faite à l'occasion d'une nouvelle application du masque de chanfrein au point but considéré.

**[0054]** Une estimation de distance par application du masque de chanfrein à un pixel but consiste à répertorier tous les trajets allant de ce pixel but au pixel source et passant par un pixel du voisinage du pixel but dont la distance a déjà été estimée au cours du même balayage, à rechercher parmi les trajets répertoriés, le ou les trajets les plus courts et à adopter la longueur du ou des trajets les plus courts comme estimation de distance. Cela se fait en plaçant le pixel but dont on veut estimer la distance dans la case centrale du masque de chanfrein, en sélectionnant les cases périphériques du masque de chanfrein correspondant à des pixels du voisinage dont la distance vient d'être mise à jour, en calculant les longueurs des trajets les plus courts reliant le pixel à mettre à jour au pixel source en passant par un des pixels sélectionnés du voisinage, par addition de la valeur de distance affectée au pixel du voisinage concerné et de la valeur de distance donnée par le masque de chanfrein, et à adopter, comme estimation de distance, le minimum des valeurs de longueur de trajet obtenues et de l'ancienne valeur de distance affectée au pixel en cours d'analyse.

**[0055]** L'ordre de balayage des pixels de l'image influe sur la fiabilité des estimations de distance et de leurs mises à jour car les trajets pris en compte en dépendent. En fait, il est soumis à une contrainte de régularité qui fait que si les pixels de l'image sont repérés selon l'ordre lexicographique (pixels classés dans un ordre croissant ligne par ligne en partant du haut de l'image et en progressant vers le bas de l'image, et de gauche à droite au sein d'une ligne), et si un pixel p a été analysé avant un pixel q alors un pixel p+x doit être analysés avant le pixel q+x. Les ordres lexicographique, lexicographique inverse (balayage des pixels de l'image ligne par ligne de bas en haut et, au sein d'une ligne, de droite à gauche), lexicographique transposé (balayage des pixels de l'image colonne par colonne de gauche à droite et, au sein d'une colonne, de haut en bas), lexicographique transposé inverse (balayage des pixels par colonnes de droite à gauche et au sein d'une colonne de bas en haut) satisfont cette condition de régularité et plus généralement tous les balayages dans lesquels les lignes et colonnes sont balayées de droite à gauche ou de gauche à droite. G. Borgefors préconise un double balayage des pixels de l'image, une fois dans l'ordre lexicographique et une autre dans l'ordre lexicographique inverse.

**[0056]** La figure 8a montre, dans le cas d'une passe de balayage selon l'ordre lexicographique allant du coin supérieur gauche au coin inférieur droit de l'image, les cases du masque de chanfrein de la figure 1 utilisées pour répertorier les trajets allant d'un pixel but placé sous la case centrale (case indexée par 0) au pixel source en passant par un pixel du voisinage dont la distance a déjà fait l'objet d'une estimation au cours du même balayage. Ces cases sont au nombre de huit, disposées dans la partie supérieure gauche du masque de chanfrein. Il y a donc huit trajets répertoriés pour la recherche du plus court dont la longueur est prise pour estimation de la distance.

**[0057]** La figure 8b montre, dans le cas d'une passe de balayage selon l'ordre lexicographique inverse allant du coin

inférieur droit au coin supérieur gauche de l'image, les cases du masque de chanfrein de la figure 1 utilisées pour répertorier les trajets allant d'un pixel but placé sous la case centrale (case indexée par 0) au pixel source en passant par un pixel du voisinage dont la distance a déjà fait l'objet d'une estimation au cours du même balayage. Ces cases sont complémentaires de celles de la figure 8a. Elles sont également au nombre de huit mais disposées dans la partie inférieure droite du masque de chanfrein. Il y a donc encore huit trajets répertoriés pour la recherche du plus court dont la longueur est prise pour estimation de la distance.

**[0058]** La transformée de distance par propagation dont le principe vient d'être rappelé sommairement a été conçue à l'origine pour l'analyse du positionnement d'objets dans une image mais elle n'a pas tardé à être appliquée à l'estimation des distances sur une carte du relief extraite d'une base de données d'élévation du terrain à maillage régulier de la surface terrestre. En effet, une telle carte ne dispose pas explicitement d'une métrique puisqu'elle est tracée à partir des altitudes des points du maillage de la base de données d'élévation du terrain de la zone représentée. Dans ce cadre, la transformée de distance par propagation est appliquée à une image dont les pixels sont les éléments de la base de données d'élévation du terrain appartenant à la carte, c'est-à-dire, des valeurs d'altitude associées aux coordonnées géographiques latitude, longitude des noeuds du maillage où elles ont été mesurées, classés, comme sur la carte, par latitude et par longitude croissantes ou décroissantes selon un tableau à deux dimensions de coordonnées latitude et longitude.

**[0059]** Dans le cas d'un aéronef, l'évolution des zones infranchissables en fonction du profil vertical imposé à la trajectoire de l'aéronef est prise en compte au moyen de l'altitude prévisible de l'aéronef à chaque point but dont la distance est en cours d'estimation. Cette altitude prévisible, qui dépend bien évidemment du trajet emprunté, est celle de l'aéronef après suivi du trajet adopté pour la mesure de distance. L'estimation de cette altitude prévisible de l'aéronef en un point but, se fait par propagation au cours du balayage de l'image par le masque de chanfrein d'une manière analogue à l'estimation de distance. Pour chaque trajet répertorié allant d'un point but au point source en passant par un point du voisinage du point but dont la distance au point source et l'altitude prévisible de l'aéronef ont déjà été estimées au cours du même balayage, l'altitude prévisible de l'aéronef est déduite de la longueur du trajet et du profil vertical imposé à la trajectoire de l'aéronef. Cette altitude prévisible, estimée pour chaque trajet répertorié allant d'un point but dont la distance est en cours d'estimation à un point source placé à proximité de la position de l'aéronef, est utilisée comme un critère de sélection des trajets pris en compte dans l'estimation distance. Si elle correspond, compte tenu d'une marge de sécurité, à un cube élémentaire de représentation de l'espace aérien dont le niveau de danger est supérieur au seuil requis pour le vol, c'est-à-dire à une tranche d'altitude interdite parce que dans le relief ou dans une perturbation météorologique, le trajet répertorié auquel elle est associée est écarté et ne participe pas à la sélection du plus court trajet. Une fois la sélection du plus court trajet effectuée, sa longueur est prise pour distance du point but et l'altitude prévisible pour l'aéronef qui lui est associée est également retenue pour l'altitude de l'aéronef au point but.

**[0060]** On dispose : d'une part, d'un profil présentant l'altitude en fonction de la distance depuis l'origine. Il est utilisé pour estimer l'altitude que peut avoir l'aéronef en fonction de la distance propagée que l'on évalue sur la grille. D'autre part, on dispose d'un profil présentant la date en fonction de la distance depuis l'origine. Ce profil est obtenu, par exemple, en intégrant la vitesse prévue par le système de gestion de vol le long du plan de vol ou en faisant des hypothèses de vitesse (constante, par exemple). Donc, à partir de la distance propagée que l'on estime, on peut en déduire la date à laquelle on devrait être à cette distance.

**[0061]** La figure 9 illustre les principales étapes du traitement effectué lors de l'application du masque de chanfrein à un point but  $P_{i,j}$  pour estimer sa distance pour un aéronef ayant un profil vertical de trajectoire imposé. Le point but considéré  $P_{i,j}$  est placé dans la case centrale du masque de chanfrein. Pour chaque point voisin  $P_V$  qui entre dans les cases du masque de chanfrein et dont la distance a déjà été estimée au cours du même balayage, le traitement consiste à :

- lire la distance estimée  $D_V$  du point voisin  $P_V$  (étape 90),
- lire le coefficient  $C_{XY}$  du masque de chanfrein correspondant à la case occupée par le point voisin  $P_V$  (étape 91),
- calculer la distance propagée  $D_P$  correspondant à la somme de la distance estimée  $D_V$  du point voisin  $P_V$  et du coefficient  $C_{XY}$  affecté à la case du masque de chanfrein occupée par le point voisin  $P_V$ :

$$D_P = D_V + C_{XY} \quad (\text{étape 92}),$$

- calculer l'altitude prévisible  $A_P$  de l'aéronef après franchissement de la distance  $D_P$  directement à partir de la distance  $D_P$  si le profil vertical imposé à la trajectoire de l'aéronef est défini en fonction de la distance parcourue  $PV(D_P)$  et prend implicitement en compte le temps de parcours ou indirectement par l'intermédiaire du temps de parcours si le profil vertical imposé à la trajectoire de l'aéronef est défini par une vitesse de changement d'altitude (étape 93),

- calculer la date prévisible  $T_P$  à la position après franchissement de la distance  $D_P$  (étape 94)

■ lire le niveau de danger  $N_{i,j,A_p,T_p}$  prévisible du point but  $P_{i,j}$  dans la représentation en cubes élémentaires de l'espace aérien à l'altitude prévisible  $A_p$  et à date  $T_p$  (étape 95),

■ comparer le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  à une valeur limite autorisée  $N_l$  pour le vol, augmentée d'une marge de sécurité  $\Delta$  (étape 96),

■ éliminer la distance propagée  $D_p$  si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  est supérieur à celui admissible pour le vol majoré par la marge de sécurité  $\Delta$  (étape 97),

■ si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  majoré par la marge de sécurité  $\Delta$ , est inférieur à la limite  $N_l$  fixée pour le vol, lire la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$  (étape 98) et la comparer à la distance propagée  $D_p$  (étape 99),

■ éliminer la distance propagée  $D_p$  si elle est supérieure ou égale à la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$ , et

■ remplacer la distance  $D_{i,j}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{i,j}$ , par la distance propagée  $D_p$  si cette dernière est inférieure (étape 900).

■ les cubes élémentaires présentant une distance inférieure à la plus grande distance mesurable sur l'image à la fin du balayage, étant désignés zone atteignables.

**[0062]** Le balayage complet de l'image est similaire à celui décrit dans la demande de brevet précitée.

**[0063]** Un point de rejointe retenu est un point du plan de vol initial restant atteignable malgré les contraintes multiples des aéronefs et des phénomènes météorologiques environnants. De plus, il doit exister un plan de vol, permettant de rejoindre ce point, compatible avec les ressources en carburant disponibles.

**[0064]** Parmi les points de rejointe retenus, on choisit un point optimisant un critère de qualité. Pour illustrer ces critères de qualité, on prend l'exemple d'une trajectoire initiale représentée figure 10 et d'une trajectoire de rejointe. La trajectoire initiale est formée par les points A, B, C, D, E et F. La trajectoire de rejointe est formée par les points B', C', D' et E.

**[0065]** Un premier critère de qualité est la maximisation du nombre de points de passages du plan de vol initial conservés. La trajectoire de rejointe de l'exemple conserve trois points de la trajectoire initiale : A, E et F.

**[0066]** Un deuxième critère de qualité est la minimisation de la quantité de virage totale égale à la somme en valeur absolue de tous les changements de cap.

**[0067]** Un troisième critère de qualité concerne une mesure du ratio entre la trajectoire initiale et la nouvelle trajectoire évaluée. Un plan de vol de rejointe étant d'autant meilleur que sa longueur est proche de celle du plan de vol initial.

**[0068]** Un quatrième critère de qualité est la minimisation de l'angle de rejointe du plan de vol initial. Il s'agit de l'angle formé par la trajectoire de rejointe et la trajectoire initiale au niveau du point de rejointe. Dans l'exemple, il s'agit de l'angle  $\alpha$  entre le segment de vol D'E et le segment EF.

**[0069]** Un cinquième critère de qualité est la minimisation de la surface d'écart par rapport au plan de vol initial. La surface d'écart est définie par son périmètre composé de la trajectoire initiale et de la trajectoire de rejointe. Dans l'exemple, il s'agit de la surface du polygone B,C,D,E,D',C',B'.

**[0070]** On peut aussi choisir un point optimisant une combinaison pondérée de plusieurs des critères précédents. La combinaison des critères peut être effectuée selon la formule suivante :

$$C = \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 + C_i)^{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} - 1 \right]$$

où  $C_i$  est le score du critère  $i$  ( $i=1$  à 5) et  $\alpha_i$  est la « puissance » attribuée - par configuration - au critère  $i$ . En affectant une puissance plus élevée, on augmente l'influence du critère.

**[0071]** Selon l'application à laquelle on destine l'invention, on peut régler différemment les puissances. Par exemple, une application militaire essaiera de limiter le nombre de points supprimés et la surface entre les deux trajectoires. Par exemple, une application pour un hélicoptère médical essaiera de limiter l'écart de distance entre les trajectoires, même si les points de passage diffèrent.

**[0072]** Chacun des critères présentés précédemment doit être normalisé pour pouvoir être dans la formule précédente. Les figures 11a à 11e montrent des exemples de courbes permettant de normaliser les différents critères de qualité présentés. Ces courbes permettent d'associer à chaque valeur d'un critère une note, comprise entre 0 et 1, reflétant sa qualité, 0 étant la moins bonne note et 1 la meilleure.

**[0073]** La figure 11 a montre un exemple des notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction du nombre de points de passage conservés par rapport à un plan de vol initial. Entre 0 et 3 points conservés la note est nulle, pour 4 points conservés la note est de 0,5. Au-delà de 5 points conservés la note est de 1.

**[0074]** La figure 11 b montre un exemple des notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction de sa quantité

de virage totale. La note est de 1 à 0 degré. Entre 0 et 360 degrés la note décroît linéairement. La note est de 0 au-delà de 720 degrés. Entre 360 et 720 degrés, la note décroît linéairement.

**[0075]** La figure 11 c montre un exemple des notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction du ratio entre la longueur de la trajectoire initiale et sa longueur. Entre 0 et 0.8 la note est nulle. Entre 0.8 et 1 la note croît linéairement. Pour 1 la note est de 1. Au-delà de 1.5 la note est nulle. Entre 1 et 1.5 la note décroît linéairement.

**[0076]** La figure 11d montre un exemple des notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction de l'angle de rejointe de plan de vol. Entre 0 et 30 degrés la note est de 1. Au-delà de 120 degrés la note est de 0. Entre 30 et 120 degrés la note décroît linéairement.

**[0077]** La figure 11 e montre un exemple des notes attribuées à un plan de vol de rejointe en fonction de la surface d'écart par rapport au plan de vol initial. Parmi tous les candidats, on prend le plus petit comme référence. Les autres sont exprimés en pourcentage de cette surface de référence. A 100% la note est de 1. Au-delà de 200% la note est de 0. Entre 100% et 200% la note décroît linéairement.

**[0078]** Parmi les cinq critères cités précédemment, il y a deux critères dépendants uniquement du point de rejointe, et donc indépendants d'une trajectoire de référence, et trois critères dépendants d'une comparaison entre la trajectoire initiale et la trajectoire de rejointe.

**[0079]** Pour calculer une combinaison pondérée de plusieurs des critères précédents, il est possible d'évaluer en premier les critères ne nécessitant pas de trajectoire de référence. Ensuite, on conserve un certain nombre de points (par exemple trois) les mieux classés selon la formule déjà décrite appliquée aux critères évalués. Puis pour chacun des points retenus, on peut calculer la trajectoire de rejointe correspondante. Pour chacune des trajectoires de rejointe calculée, on évalue les critères utilisant la trajectoire initiale et la trajectoire évaluée. Au final, on conserve le point de rejointe le mieux évalué en fonction de la combinaison des cinq critères.

**[0080]** Le dispositif selon l'invention comprend des moyens pour le calcul d'un plan de vol de rejointe vers le point de rejointe sélectionné 106. Cette étape de calcul est basée sur un procédé décrit dans le brevet français 2 894 367 élaborant la carte de distance « retour » depuis la position de destination sélectionnée.

**[0081]** La détermination d'un plan de vol menant de la position courante de l'aéronef au point de rejointe sélectionné en respectant des contraintes de vol comporte les étapes suivantes :

- l'élaboration de deux cartes de distances couvrant une zone d'évolution contenant les points de départ et de destination et renfermant le même ensemble d'obstacles à contourner prenant en compte le relief, les zones à survol réglementé et les profils verticaux de vol et de vitesse imposés au départ et/ou à l'arrivée, la première ayant le point de départ pour origine des mesures de distance et la deuxième, le point de destination pour origine des mesures de distance,
- l'élaboration d'une troisième carte de distances par sommation, pour chacun de ses points, des distances qui leur sont affectées dans les première et deuxième cartes de distances,
- le repérage dans la troisième carte de distances, d'un ensemble connexe de points iso-distances formant un enchaînement de parallélogrammes et/ou de points reliant les points de départ et de destination,
- la sélection, dans l'ensemble connexe repéré de points iso-distances, d'une suite de points consécutifs allant du point de départ au point de destination en passant par des diagonales de ses parallélogrammes, suite dite trajet direct,
- l'approximation de la suite de points du trajet direct par une chaîne de segments droits respectant un seuil arbitraire d'écartement maximum par rapport aux points de la suite et un seuil arbitraire d'écartement latéral minimum par rapport à l'ensemble d'obstacles à contourner, et
- le choix des points des jonctions intermédiaires des segments droits en tant que points de passage ou tournants du plan de vol.

**[0082]** Le calcul d'un plan de vol de rejointe décrit ci-dessus peut être répété à intervalles réguliers. Le plan de vol courant de l'aéronef n'est pas pour autant mis à jour à chaque itération du calcul. Le plan de vol courant est conservé tant que, d'une part, il reste valable et, d'autre part, tant que gain sur le critère de qualité du nouveau plan de vol calculé par rapport au plan de vol courant est inférieur à un seuil donné.

## Revendications

1. Dispositif pour le calcul d'un plan de vol d'un aéronef, ledit plan de vol permettant la rejointe vers un plan de vol initial, ledit aéronef comportant des capteurs pour la détection de mobiles environnants et des capteurs météo pour la détection de phénomènes météorologiques, ledit dispositif étant **caractérisé en ce qu'il** comprend des moyens pour :

■ la détermination de paramètres caractérisant les mobiles détectés (101) à partir de données provenant des

capteurs pour la détection d'aéronefs environnants,

■ la détermination de paramètres caractérisant les phénomènes météorologiques détectés, (102) à partir de données météorologiques provenant des capteurs météo,

■ le calcul de zones interdites et de leur évolution dans le temps (103) à partir des paramètres caractérisant les aéronefs et les phénomènes météorologiques détectés, lesdites zones définissant un espace où l'aéronef ne peut pas voler,

■ le calcul de zones atteignables par l'aéronef et de leur évolution dans le temps (104) à partir de la position de l'aéronef, de données décrivant des zones réglementées interdites à la navigation, d'un modèle numérique de terrain, d'une liste d'obstacles et des zones interdites calculées,

■ la sélection d'un point de rejointe du plan de vol initial (105) situé dans une zone atteignable,

■ le calcul d'un plan de vol de rejointe vers le point de rejointe sélectionné (106).

2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le calcul du plan de vol de rejointe est itéré à intervalles réguliers, un plan de vol étant évalué en fonction d'un critère de qualité et **en ce qu'un** plan de vol de rejointe calculé à une itération donnée, dit nouveau plan de vol, devient le plan de vol suivi par l'aéronef si un plan de vol de rejointe, calculé à une itération précédente et suivi par l'aéronef, dit plan de vol courant, présente une évaluation, au sens du critère de qualité, dont la différence avec l'évaluation du nouveau plan de vol calculé est supérieure à un seuil donné.

3. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le calcul de zones atteignables comprend une estimation des distances des points dans une carte obtenue par projection sur un plan horizontal d'une représentation 3D d'un espace d'évolution par un maillage de cubes élémentaires associés à des niveaux de danger et repérés par une altitude, une latitude, une longitude et une date, ladite estimation consistant à appliquer une transformée de distance, les cubes associés à des niveaux de danger supérieurs à une valeur admissible  $N_l$  repérant les zones interdites pour l'aéronef; ladite transformée de distance estimant les distances des différents points de l'image par rapport à un point source représentant la position de l'aéronef en appliquant, par balayage, un masque aux différents points de l'image ; une valeur de distance initiale déterminée étant affectée, en début de balayage, à tous les points de l'image sauf au point source, origine des mesures de distance, auquel est affectée une valeur de distance nulle.

4. Dispositif selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** l'estimation de distance du point source à un point considéré  $P_{ij}$ , dit point but, étant placé dans une case déterminée du masque, consiste pour chaque point voisin  $P_v$  entrant dans les cases du masque et dont la distance ayant déjà été estimée au cours du même balayage à :

■ lire la distance estimée  $D_v$  du point voisin  $P_v$  (étape 90),

■ lire un coefficient  $C_{xy}$  du masque correspondant à la case occupée par le point voisin  $P_v$  (étape 91),

■ calculer une distance propagée  $D_p$  correspondant à la somme de la distance estimée  $D_v$  du point voisin  $P_v$  et du coefficient  $C_{xy}$  affecté à la case du masque occupée par le point voisin  $P_v$  :

$$D_p = D_v + C_{xy} \quad (\text{étape 92}),$$

■ calculer une altitude prévisible  $A_p$  de l'aéronef après franchissement de la distance  $D_p$  (étape 93),

■ calculer une date propagée  $T_p$  à la position après franchissement de la distance  $D_p$  (étape 94)

■ lire un niveau de danger  $N_{i,j,A_p,T_p}$  prévisible du point but  $P_{ij}$  dans la représentation en cubes élémentaires de l'espace aérien à l'altitude prévisible  $A_p$  et à date propagée  $T_p$  (étape 95),

■ comparer le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  à une valeur limite autorisée  $N_l$  pour le vol, augmentée d'une marge de sécurité  $\Delta$  (étape 96),

■ éliminer la distance propagée  $D_p$  si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  est supérieur à celui admissible pour le vol majoré par la marge de sécurité  $\Delta$  (étape 97),

■ si le niveau de danger prévisible  $N_{i,j,A_p,T_p}$  majoré par la marge de sécurité  $\Delta$ , est inférieur à la limite  $N_l$  fixée pour le vol, lire la distance  $D_{ij}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{ij}$  (étape 98) et la comparer à la distance propagée  $D_p$  (étape 99),

■ éliminer la distance propagée  $D_p$  si elle est supérieure ou égale à la distance  $D_{ij}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{ij}$ , et

■ remplacer la distance  $D_{ij}$  déjà affectée au point but considéré  $P_{ij}$ , par la distance propagée  $D_p$  si cette dernière est inférieure (étape 900).

■ les cubes élémentaires présentant une distance inférieure à la plus grande distance mesurable sur l'image à la fin du balayage, étant désignés zone atteignables.

5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la sélection du point de rejointe comprend le calcul d'une note C pour des points du plan de vol initial située dans une zone atteignable, le point de rejointe du plan de vol initial sélectionné étant celui obtenant la meilleure note C, ladite note étant calculée selon la relation suivante :

$$C = \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 + C_i)^{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} - 1 \right]$$

où  $C_i$  est une note attribuée selon un critère d'évaluation  $i$ , et  $\alpha_i$  est une valeur associée au critère d'évaluation  $i$  et reflétant son importance, étant une valeur comprise entre 1 et 5.

6. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les paramètres caractérisant les mobiles détectés comprennent une vitesse, une position et un plan de vol futur.

7. Dispositif selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** la zone interdite associée à un mobile **caractérisé** uniquement par sa position est définie par une succession de cercles concentriques avec des rayons (402), (403) obéissant à une loi croissante en fonction du temps et dont le centre est la position (401) dudit mobile.

8. Dispositif selon l'une des revendications 6 ou 7, **caractérisé en ce que** la zone interdite associée à un mobile **caractérisé par** sa position et par son vecteur vitesse est définie par une succession de cylindres, dont les centres correspondent à la position prédite dudit mobile à partir dudit vecteur vitesse, lesdits centres étant espacés d'un intervalle de temps  $p$  régulier, les rayons des cylindres successifs obéissant à une loi croissante en fonction du temps et respectant la relation suivante :

$$r_i + r_{i+1} > p$$

où  $p$  est l'intervalle de temps séparant les centres de deux cylindres successifs,  $r_i$  et  $r_{i+1}$  représentent les rayons de deux cylindres successifs.

9. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 8, **caractérisé en ce que** la zone interdite associée à un mobile **caractérisé par** sa position et par son plan de vol futur est définie par un tube enveloppant le plan de vol.

10. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 8, **caractérisé en ce que** la zone interdite associée à un mobile **caractérisé par** sa position et par son plan de vol futur est définie par un parallélépipède rectangle enveloppant le plan de vol.

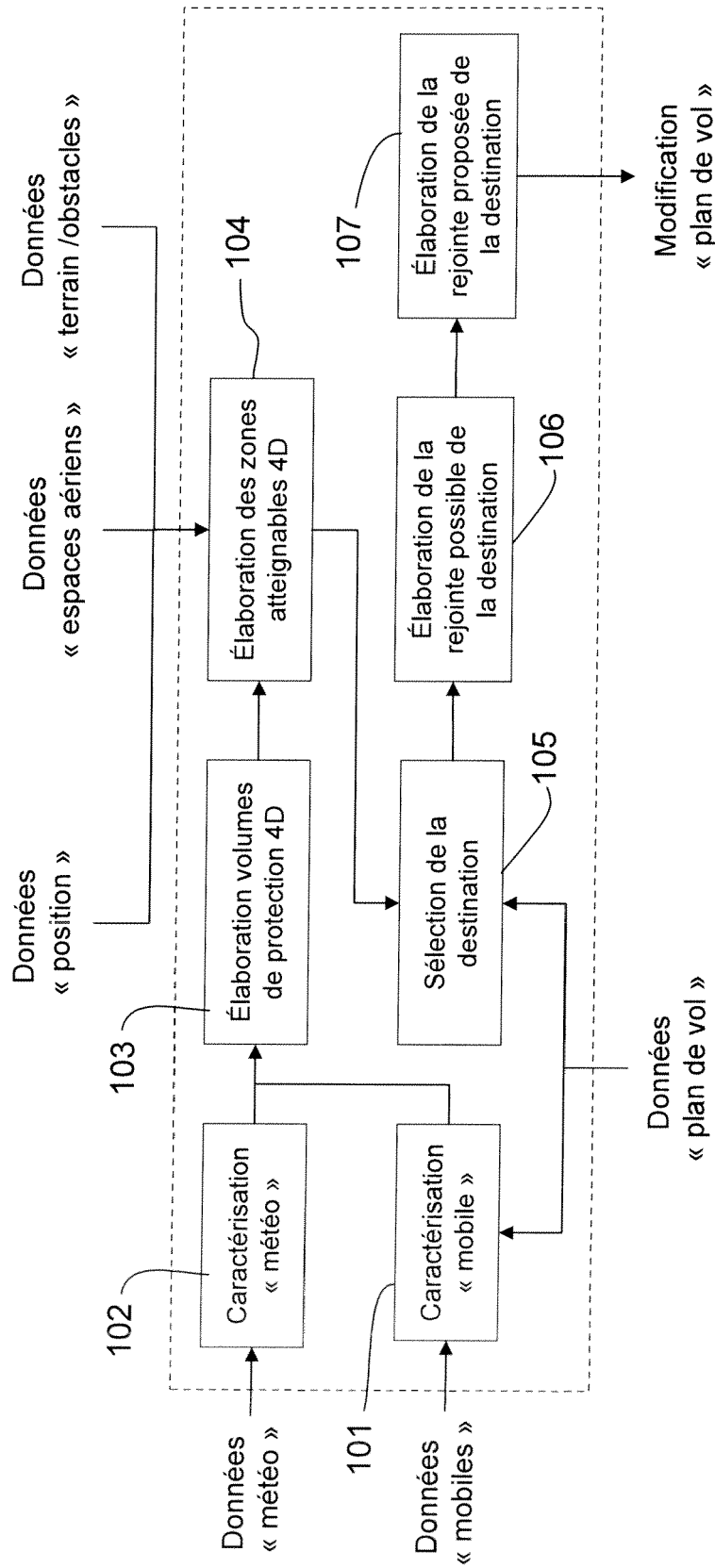


FIG.1

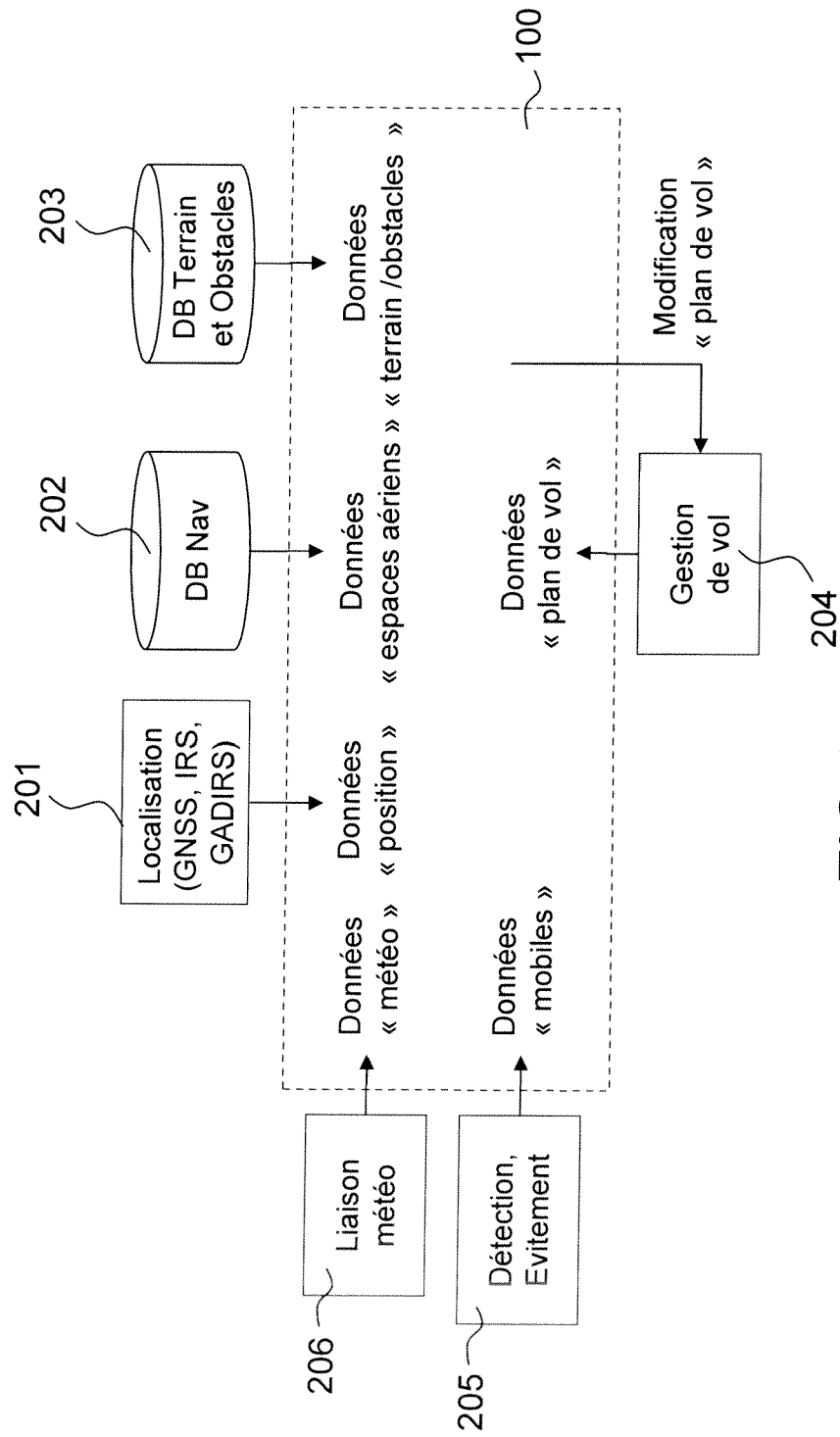


FIG.2

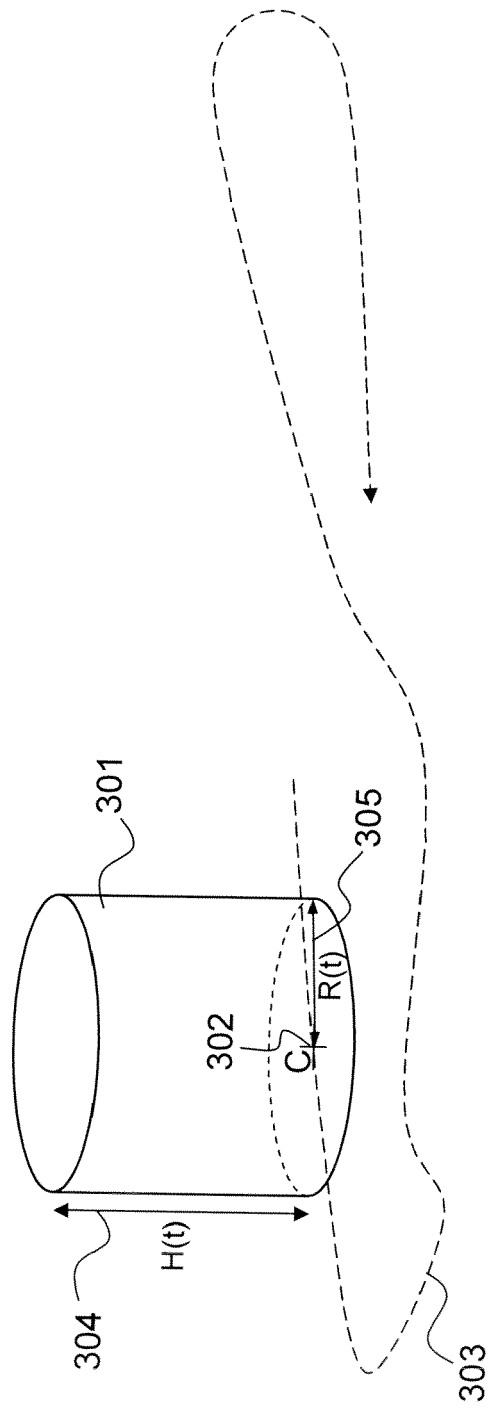


FIG.3

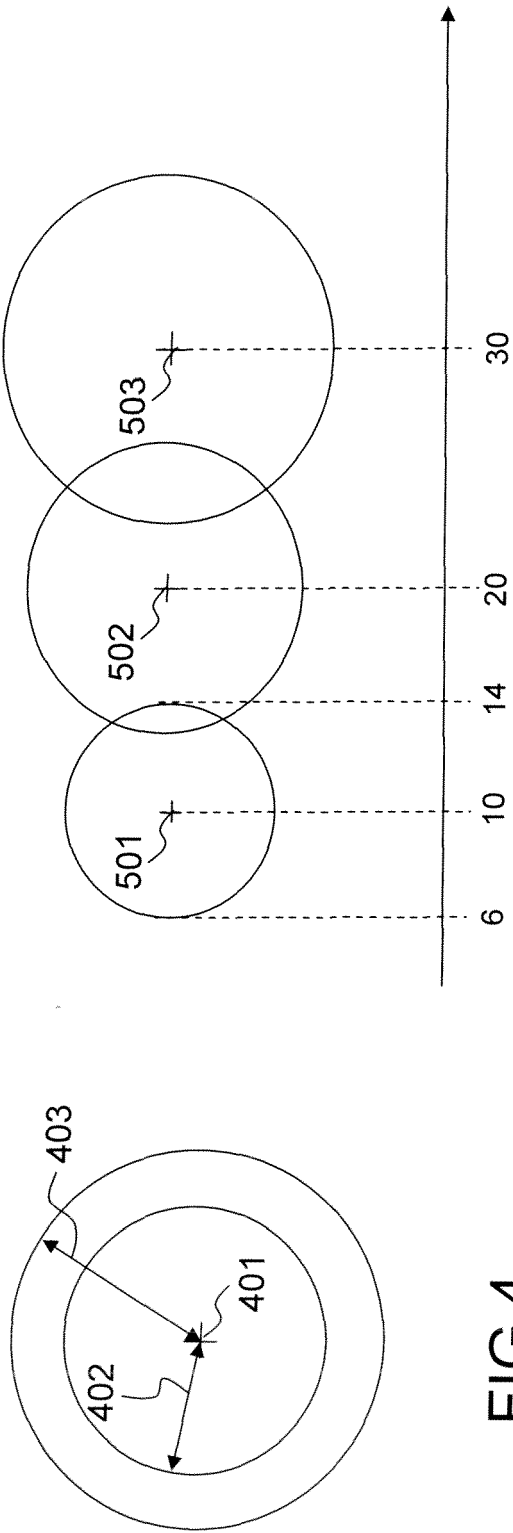


FIG.4

FIG.5

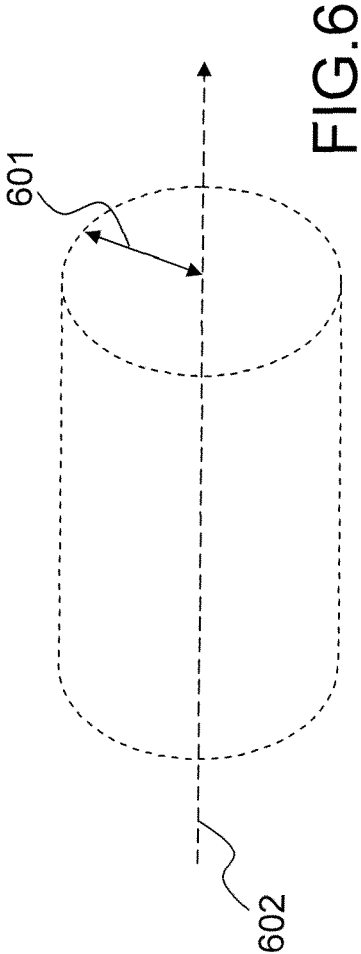


FIG.6

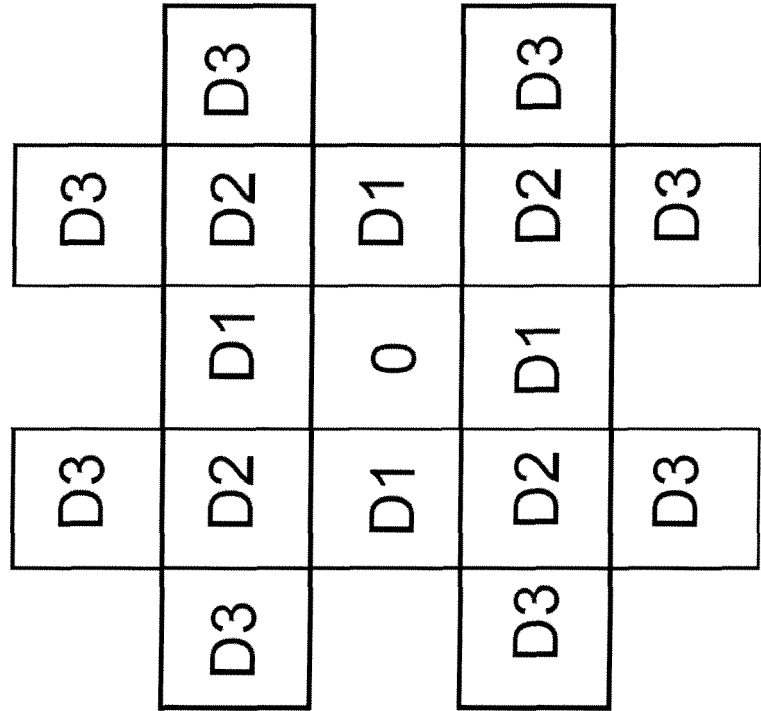


FIG.7

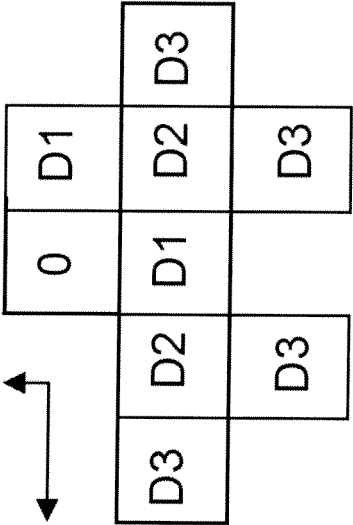


FIG.8b

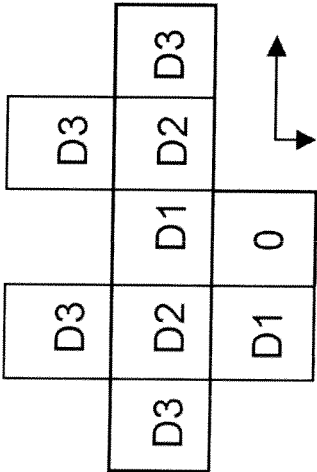


FIG.8a

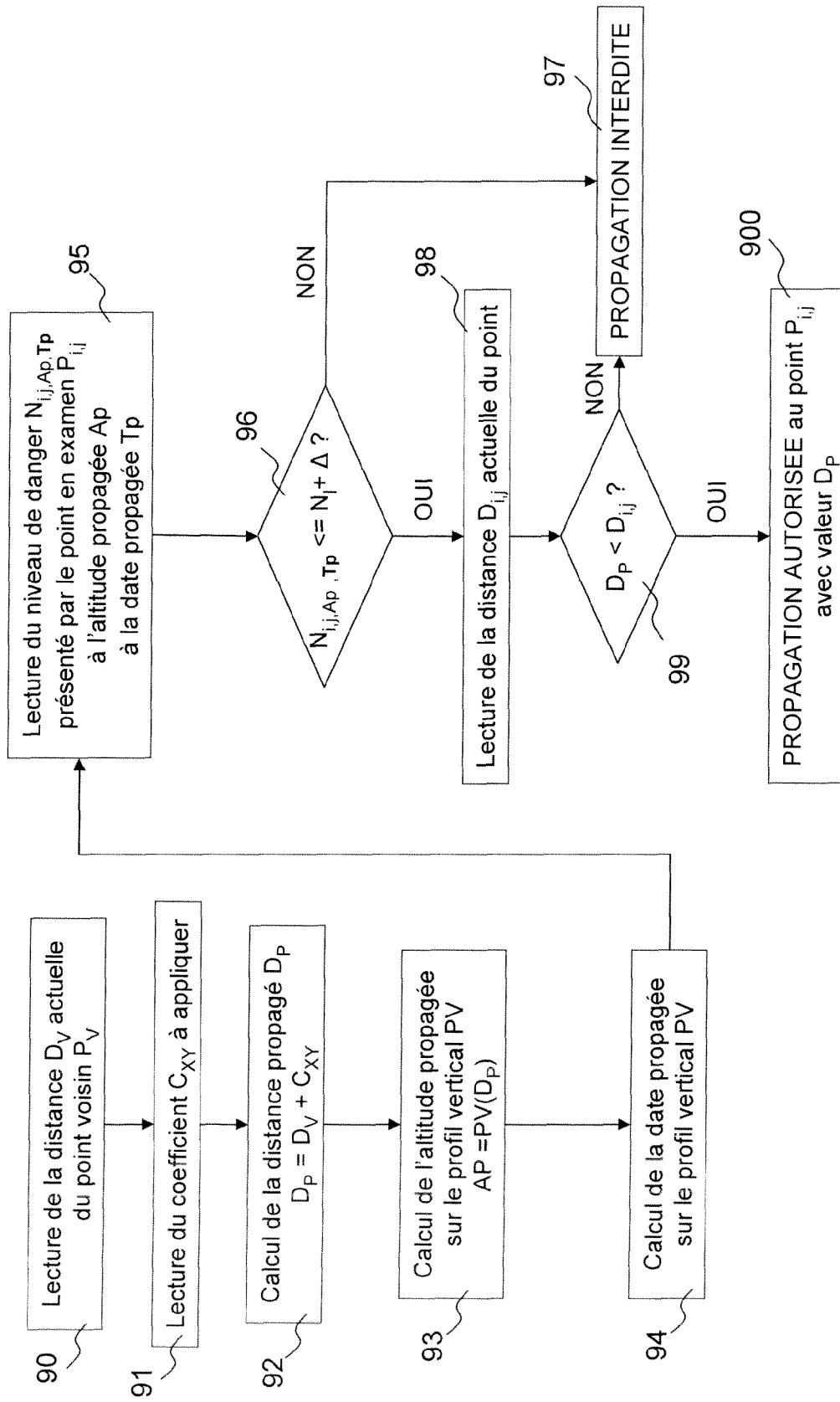


FIG.9

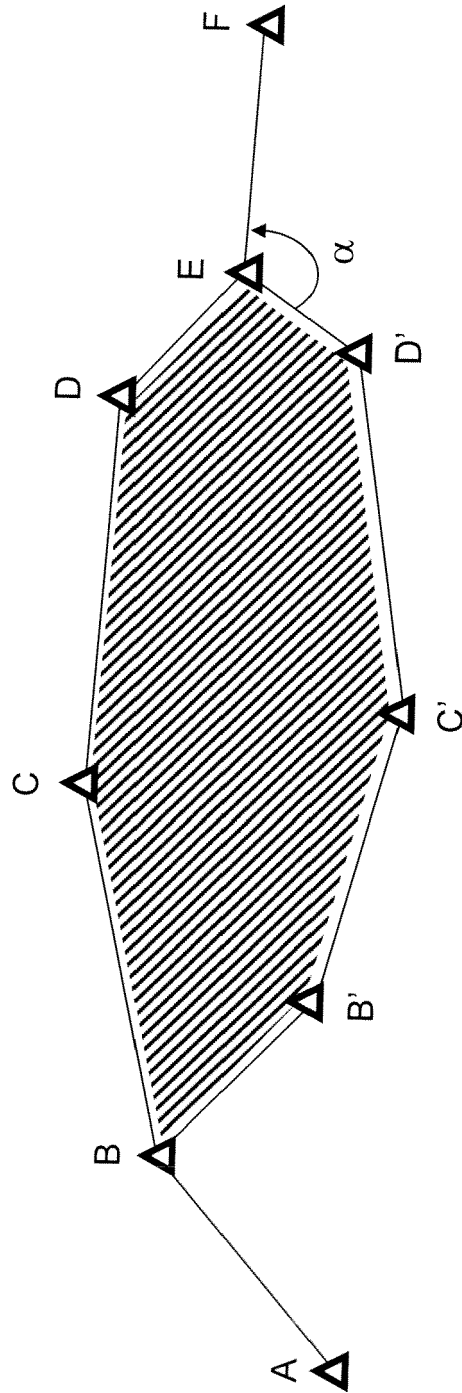


FIG.10

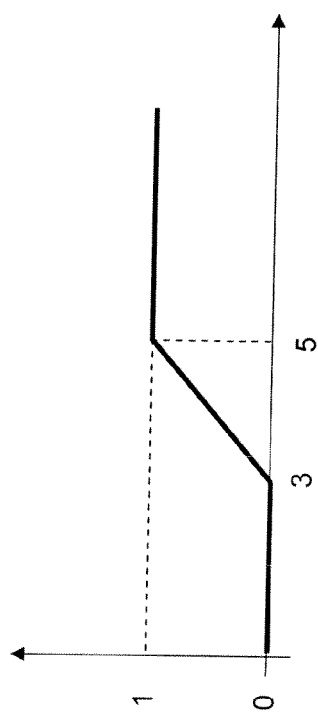


FIG. 11a

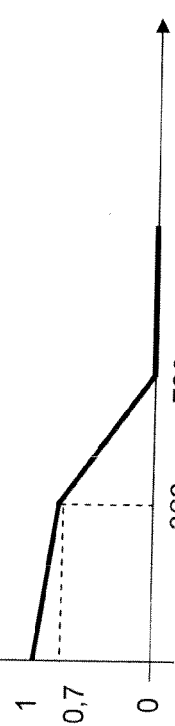


FIG. 11b

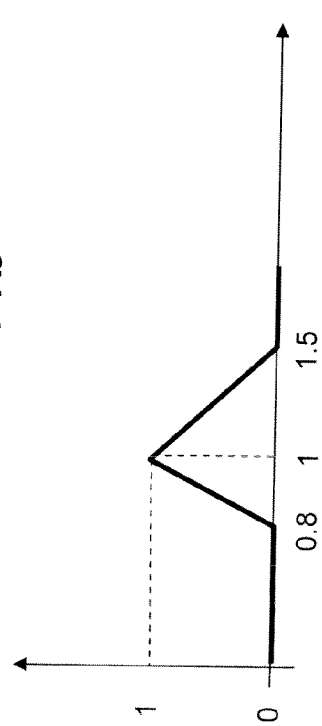


FIG. 11c

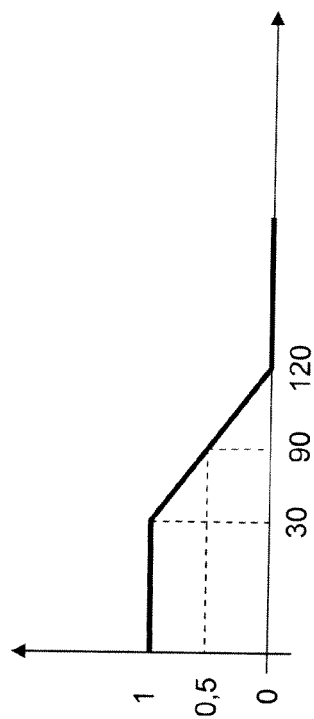


FIG. 11d

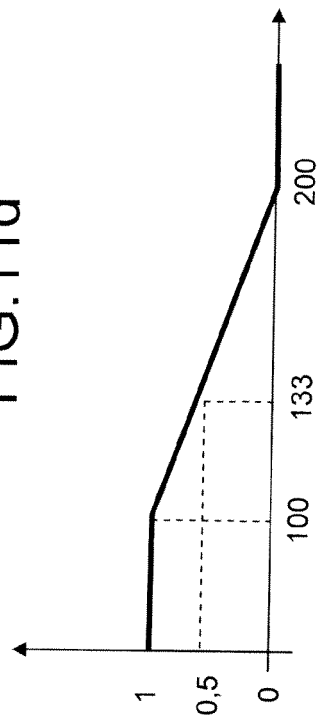


FIG. 11e



## RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 09 17 2684

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	DE 196 09 613 A1 (VDO LUFTFAHRTGERAETE WERK GMBH [DE]) 18 septembre 1997 (1997-09-18) * page 4, ligne 5 - page 5, ligne 48; figures 5,6 *	1-10	INV. G08G5/04
A	US 6 381 538 B1 (ROBINSON PAUL AARON [US] ET AL) 30 avril 2002 (2002-04-30) * colonne 5, ligne 58 - colonne 7, ligne 49; figures 1-3 *	1-3,6	
A	US 2008/218384 A1 (VARADARAJAN SRIVATSAN [US] ET AL) 11 septembre 2008 (2008-09-11) * alinéa [0024] - alinéa [0030]; figure 1 *	1-3,6	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G08G
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 11 novembre 2009	Examineur Wagner, Ulrich
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 09 17 2684

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.  
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

11-11-2009

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
DE 19609613 A1	18-09-1997	WO 9734276 A1	18-09-1997
		EP 0886847 A1	30-12-1998
		US 6201482 B1	13-03-2001
US 6381538 B1	30-04-2002	US 6650972 B1	18-11-2003
US 2008218384 A1	11-09-2008	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION**

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

**Documents brevets cités dans la description**

- FR 2893146 [0027]
- FR 2910640 [0047] [0049]
- FR 2894367 [0080]