Innovation, Sciences et Développement économique Canada
Office de la Propriété Intellectuelle du Canada

Innovation, Science and Economic Development Canada
Canadian Intellectual Property Office

CA 3021110 A1 2019/04/24

(21) 3 021 110

(12) DEMANDE DE BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT APPLICATION

(13) A1

(22) Date de dépôt/Filing Date: 2018/10/16

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2019/04/24

(30) Priorité/Priority: 2017/10/24 (FR17 01107)

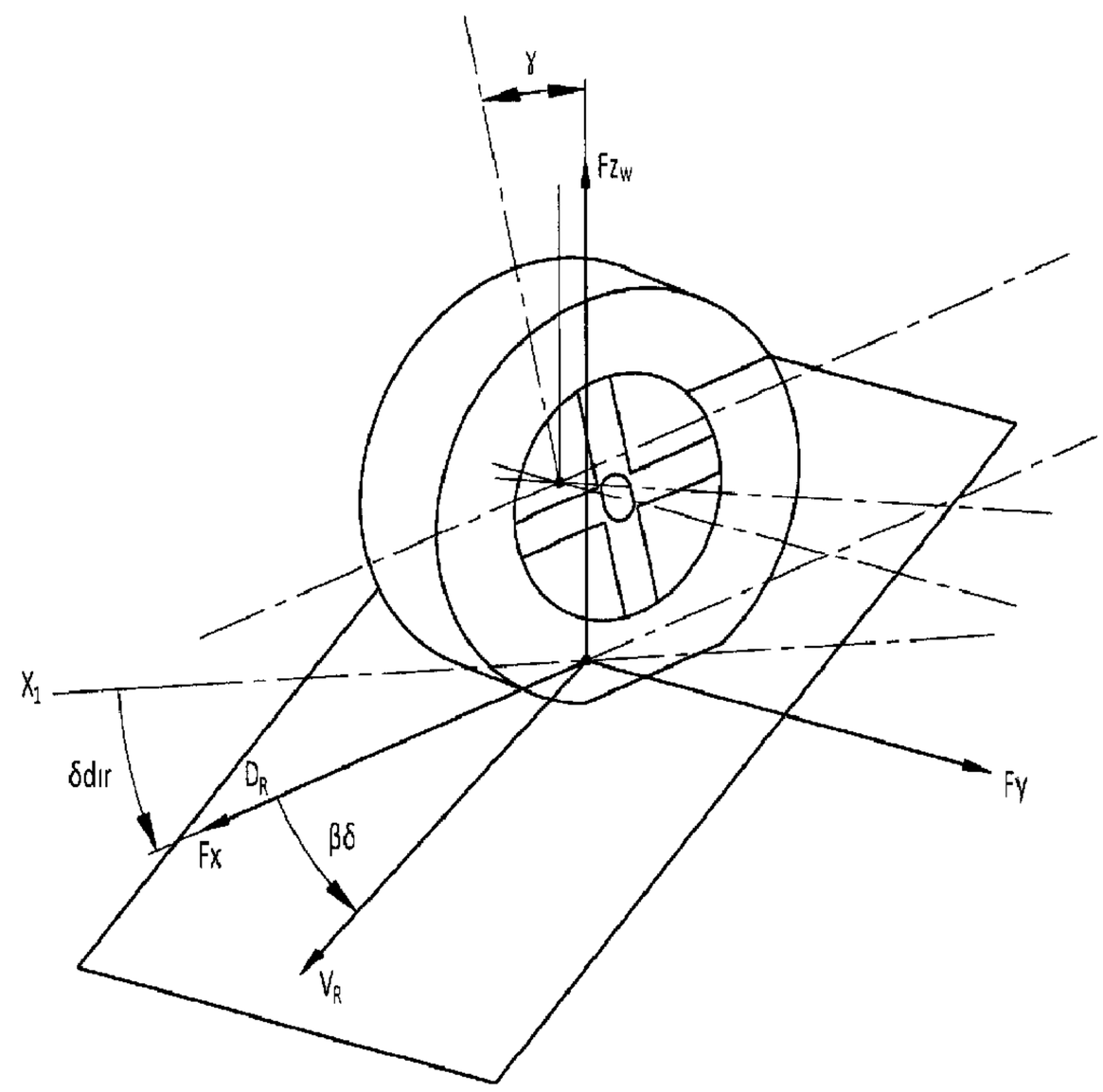
(51) Cl.Int./Int.Cl. *B64C 19/00* (2006.01),
B64C 25/48 (2006.01)

(71) Demandeur/Applicant:
DASSAULT AVIATION, FR

(72) Inventeurs/Inventors:
CANTINAUD, OLIVIER, FR;
GOERIG, LAURENT, FR;
PRODIGUE, JULIEN, FR...

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : SYSTEME DE CONTROLE D'UNE TRAJECTOIRE LATERALE D'UN AERONEF AU SOL
(54) Title: LATERAL TRAJECTORY CONTROL SYSTEM FOR AN AIRCRAFT ON THE GROUND



(57) Abrégé/Abstract:
Un système (40) comprenant un module (120) de commande configuré pour générer une commande d'une trajectoire latérale de consigne, un module de limitation (58) configuré pour déterminer, en fonction d'une vitesse et d'un angle de dérapage maximal

(21) 3 021 110

(13) A1

(57) Abrégé(suite)/Abstract(continued):
autorisé de la roulette (5) de l'aéronef, une plage d'angle de braquage de la roulette (5) telle que, l'angle de braquage de la roulette (5) étant dans cette plage, l'angle de dérapage de la roulette (5) est inférieur audit angle de dérapage maximal, et un module de contrôle (130) configuré pour, déterminer, en fonction de la commande, un angle de braquage de consigne compris dans ladite plage et propre à engendrer un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers la trajectoire de consigne, et pour transmettre une instruction de braquage à la roulette (5) afin de l'orienter selon l'angle de consigne.

ABRÉGÉ

Un système (40) comprenant un module (120) de commande configuré pour générer une commande d'une trajectoire latérale de consigne, un module de limitation (58) configuré pour déterminer, en fonction d'une vitesse et d'un angle de dérapage maximal autorisé de la roulette (5) de l'aéronef, une plage d'angle de braquage de la roulette (5) telle que, l'angle de braquage de la roulette (5) étant dans cette plage, l'angle de dérapage de la roulette (5) est inférieur audit angle de dérapage maximal, et un module de contrôle (130) configuré pour déterminer, en fonction de la commande, un angle de braquage de consigne compris dans ladite plage et propre à engendrer un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers la trajectoire de consigne, et pour transmettre une instruction de braquage à la roulette (5) afin de l'orienter selon l'angle de consigne.

Système de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef au sol

Domaine

La présente invention concerne un système de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, l'aéronef comprenant des dispositifs de déplacement latéral de l'aéronef autour d'un axe de lacet incluant une roulette de train avant orientable.

Contexte

La conduite au sol d'un aéronef, et plus particulièrement le contrôle de l'aéronef autour de son axe de lacet, est généralement assuré par le contrôle de l'angle de braquage de la roulette de train avant, par l'orientation de la gouverne de direction et, en complément par un ensemble de freinage différentiel propre à exercer une force de freinage distincte sur le train principal gauche et le train principal droit pour générer le mouvement de lacet. Le contrôle de l'aéronef autour de son axe de lacet peut en outre être effectué au moyens de moteurs électriques entraînant les roues du train principal, selon des vitesses distinctes et/ou par l'application d'un différentiel de poussée entre le moteur gauche et le moteur droit.

Pour commander ces différents dispositifs de déplacement latéral, divers moyens de commande sont connus.

En particulier, certains aéronefs comprennent trois moyens de commande distincts agissant chacun sur un des dispositifs de déplacement latéral mentionnés ci-dessus. Ces moyens de commande consistent par exemple en un tiller, un palonnier et des pédales de frein indépendantes.

Le tiller est un volant dont la rotation permet d'entrainer une modification correspondante de l'angle de braquage de la roulette.

Le palonnier est destiné à la commande de la gouverne de direction. En particulier, le palonnier comprend une pédale gauche, dont le déplacement est destiné à commander un virage à gauche, et une pédale droite, dont le déplacement est destiné à commander un virage à droite.

Les pédales de frein comprennent une pédale de frein gauche et une pédale de frein droite, dont l'actionnement est destiné à commander un freinage du train principal gauche ou droite respectivement, donc un virage vers la gauche ou vers la droite respectivement.

Les pédales de frein sont par exemple montées sur le palonnier. Ainsi, chaque pédale de palonnier est mobile selon un premier degré de liberté, par exemple en translation, associé à une commande de la gouverne de direction, et selon un deuxième degré de liberté, par

exemple en rotation autour d'un axe orthogonal à la direction de translation de la pédale, associé à une commande de l'ensemble de freinage différentiel.

En variante, il a été proposé d'inclure la commande de l'angle de braquage de la roulette de train avant au palonnier.

Ces solutions peuvent faire l'objet d'amélioration.

En particulier, la gestion simultanée des ordres de commande à émettre via le palonnier et de ceux à émettre via l'actionnement du tiller ou des pédales de frein engendre une forte charge de travail pour le pilote.

En effet, le pilote doit déterminer lui-même la répartition des ordres de commande sur les différents dispositifs de déplacement latéral pour suivre la trajectoire souhaitée.

En outre, un tel système de contrôle laisse toute latitude au pilote pour l'utilisation des différents dispositifs de déplacement latéral.

Or, dans certaines circonstances, un braquage trop important de la roulette de train avant peut conduire à une perte d'adhérence de l'aéronef sur la piste.

Un but de l'invention consiste donc à résoudre ces problèmes, en particulier à fournir un système de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef minimisant les risques de perte d'adhérence de l'aéronef.

Résumé

A cet effet, selon un aspect englobant, l'invention vise un système de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, l'aéronef comprenant des dispositifs de déplacement latéral de l'aéronef autour d'un axe de lacet incluant une roulette de train avant orientable, le système de contrôle comprenant :

- un module de commande configuré pour générer un ordre de commande d'une trajectoire latérale de consigne de l'aéronef, ladite trajectoire latérale de consigne comprenant un mouvement latéral de l'aéronef selon une direction donnée, ledit ordre de commande comprenant au moins un paramètre de consigne représentatif de ladite trajectoire de consigne,

- un module de limitation d'un angle de dérapage de l'aéronef, ledit module de limitation étant configuré pour déterminer, en fonction d'informations relatives à une vitesse courante de l'aéronef et d'un angle de dérapage maximal autorisé de la roulette de train avant et/ou de trains principaux de l'aéronef, une plage d'angle de braquage de la roulette de train avant telle que, lorsqu'un angle de braquage de la roulette de train avant est compris dans ladite plage d'angle de braquage, l'angle de dérapage de la roulette de train avant et/ou des trains principaux est inférieur, en valeur absolue, audit angle de dérapage maximal,

- un module de contrôle configuré pour :

• déterminer, en fonction de l'ordre de commande, un angle de braquage de consigne de la roulette de train avant, compris dans ladite plage d'angle de braquage, ledit angle de braquage de consigne étant déterminé de manière à engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,

• transmettre une instruction de braquage à la roulette de train avant afin d'orienter la roulette de train avant selon l'angle de braquage de consigne.

Le système de contrôle selon l'invention peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toute combinaison techniquement possible :

- ledit module de contrôle est configuré pour :

• déterminer, en fonction de l'ordre de commande, un angle de braquage initial de la roulette de train avant, ledit angle de braquage initial étant déterminé de manière à engendrer, s'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne, et

• appliquer une correction audit angle de braquage initial si ledit angle de braquage initial n'est pas compris dans ladite plage d'angle de braquage, pour déterminer ledit angle de braquage de consigne.

- lesdits dispositifs de déplacement de l'aéronef autour de l'axe de lacet incluent en outre une gouverne de direction orientable et un ensemble de freinage différentiel comprenant un dispositif de freinage d'un train principal gauche et un dispositif de freinage d'un train principal droit, ledit ensemble de freinage différentiel étant propre à appliquer un freinage dissymétrique audit train principal gauche et audit train principal droit,

et le module de contrôle est en outre configuré pour :

• déterminer une orientation de consigne de la gouverne de direction et/ou une consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel, l'orientation de consigne et/ou la consigne de freinage dissymétrique étant déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,

• transmettre une instruction d'orientation à la gouverne de direction afin d'orienter la gouverne de direction selon l'orientation de consigne, et/ou une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique audit ensemble de freinage différentiel.

- le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne et/ou la consigne de freinage dissymétrique à partir d'une différence entre l'angle de braquage initial et l'angle de braquage de consigne.

- le module de contrôle est configuré pour recevoir un état de fonctionnement de la roulette de train avant, et pour déterminer, en cas de dysfonctionnement de la roulette de train avant, l'orientation de consigne de la gouverne de direction et/ou la consigne de freinage dissymétrique, de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, la roulette de train avant étant libre de pivoter, un mouvement latéral de l'aéronef selon ladite trajectoire latérale de consigne.

- l'ordre de commande comprend un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel et:

• l'ordre de commande comprenant un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel, le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne de la gouverne de direction et la consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel, et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction et l'instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel ;

• l'ordre de commande comprenant un ordre de non activation de l'ensemble de freinage différentiel, le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne de la gouverne de direction, à l'exclusion de la consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel, et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction.

- ledit module de limitation de l'angle de dérapage est en outre configuré pour déterminer ledit angle de dérapage maximal autorisé en fonction d'un paramètre représentatif d'un état d'adhérence de la piste.

- le module de limitation comprend une base de données d'angles de dérapage maximaux, comprenant, pour chacun d'une pluralité d'états d'adhérence possible, une valeur d'angle de dérapage maximal correspondant à cet état d'adhérence, le module de l'imitation étant configuré pour déterminer l'angle de dérapage maximal autorisé à partir de ladite base de données.

- le système de contrôle comprend un dispositif de commande actionnable par un pilote pour générer un ordre de trajectoire latérale, et ledit module de commande est configuré pour générer ledit ordre de commande à partir de l'ordre de trajectoire latérale.

- le dispositif de commande comprend un palonnier, le palonnier comprenant une pédale gauche, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une première direction et une pédale droite, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une deuxième direction opposée à la première direction, et en ce que l'ordre de trajectoire latérale comprend un paramètre représentatif d'un déplacement de la pédale gauche et/ou de la pédale droite.

- chacune des pédales gauche et droite est déplaçable entre une position neutre et une position de fin de course selon une unique course prédéterminée,

un déplacement de la pédale gauche, respectivement de la pédale droite, selon ladite course prédéterminée, entre la position neutre et une position d'activation de freinage différentiel prédéterminée, étant destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet par actionnement d'au moins un dispositif de déplacement du premier ensemble, l'ensemble de freinage différentiel étant non-actif,

un déplacement de la pédale gauche, respectivement de la pédale droite, selon ladite course prédéterminée depuis la position d'activation de freinage différentiel vers la position de fin de course étant destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet par actionnement d'au moins un dispositif de déplacement du premier ensemble, et par actionnement de l'ensemble de freinage différentiel, l'ensemble de freinage différentiel étant actif.

- chacune des pédales gauche et droite est en outre mobile entre une position arrière et la position neutre, la position neutre étant comprise entre la position arrière et la position de fin de course, et le système comprend un mécanisme de couplage du déplacement des pédales gauche et droite, configuré pour, lorsque la pédale gauche, respectivement la pédale droite, est déplacée vers la position de fin de course, entraîner un déplacement de la pédale droite, respectivement de la pédale gauche, vers la position arrière.

- le module de commande est configuré pour, en chaque instant :

- générer un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel si la position courante de la pédale gauche ou de la pédale droite est comprise entre la position d'activation et la position de fin de course, ou

• générer un ordre de non-activation de l'ensemble de freinage différentiel si aucune des positions courantes de la pédale gauche et droite n'est comprise entre la position d'activation et la position de fin de course.

- le système de contrôle comprend un module de détermination de trajectoires au sol de l'aéronef, configuré pour déterminer, en au moins un instant :

• une trajectoire courante de l'aéronef au sol, comprenant une succession de points de passage prévus d'au moins un élément de l'aéronef, à conditions inchangées des dispositifs de déplacement latéral,

• au moins une trajectoire limite, comprenant une succession de points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral,

et le système de contrôle comprend un ensemble d'affichage comportant :

• un afficheur, configuré pour afficher une visualisation d'une portion de piste située au voisinage de l'aéronef ;

• un module de génération d'affichage, configuré pour afficher sur l'afficheur une courbe de trajectoire courante représentative de ladite trajectoire courante et au moins une courbe limite représentative de la trajectoire limite, lesdites courbes étant superposées à la visualisation de la portion de la piste.

- les dispositifs de déplacement latéral comprennent :

• un premier ensemble de dispositifs de déplacement latéral incluant la roulette de train avant, et

• un ensemble de freinage différentiel, configuré pour générer un mouvement de l'aéronef autour d'un axe de lacet dans un état actif, à l'exclusion d'un état non-actif,

- le module de détermination est configuré pour déterminer audit instant au moins une première trajectoire limite, comprenant une succession de premiers points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble, l'ensemble de freinage différentiel étant dans l'état non-actif, et/ou au moins une deuxième trajectoire limite, comprenant une succession de deuxièmes points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble et l'ensemble de freinage différentiel, l'ensemble de freinage différentiel étant actif,

- le module de génération d'affichage est configuré pour afficher sur l'afficheur :

- au moins une première courbe limite représentative de la première trajectoire limite, ladite première courbe limite étant superposée à la visualisation de la portion de la piste, et/ou
- au moins une deuxième courbe limite représentative de la deuxième trajectoire limite, ladite deuxième courbe limite étant superposée à la visualisation de la portion de la piste.

Selon un mode de réalisation, lorsque l'ordre de commande comprend un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel, l'orientation de consigne et la consigne de freinage dissymétrique sont déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ladite trajectoire latérale de consigne.

Dans ce mode de réalisation, lorsque l'ordre de commande comprend un ordre de non activation de l'ensemble de freinage différentiel, l'orientation de consigne est déterminée de manière à engendrer, lorsqu'elle est appliquée à la gouverne de direction, l'angle de braquage de la roulette de train avant étant égal à l'angle de braquage de consigne, et l'ensemble de freinage différentiel étant non-actif, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ladite trajectoire latérale de consigne.

De préférence, les informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol comprennent un module d'un vecteur vitesse courant de l'aéronef par rapport au sol et une vitesse de lacet courante de l'aéronef.

Selon un autre aspect englobant, l'invention vis un procédé de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, l'aéronef comprenant des dispositifs de déplacement latéral de l'aéronef autour d'un axe de lacet incluant une roulette de train avant orientable, le procédé comprenant les étapes suivantes:

- génération d'un ordre de commande d'une trajectoire latérale de consigne de l'aéronef, ladite trajectoire latérale de consigne comprenant un mouvement latéral de l'aéronef selon une direction donnée, ledit ordre de commande comprenant au moins un paramètre de consigne représentatif de ladite trajectoire de consigne,
- détermination en fonction d'informations relatives à une vitesse courante de l'aéronef et d'un angle de dérapage maximal autorisé, d'une plage d'angle de braquage de la roulette de train avant telle que, lorsqu'un angle de braquage de la roulette de train avant est compris dans ladite plage d'angle de braquage, l'angle de dérapage de la roulette de train

avant et/ou des trains principaux est inférieur, en valeur absolue, audit angle de dérapage maximal,

- contrôle des dispositifs de déplacement latéral, incluant les sous-étapes suivantes:
  - détermination, en fonction de l'ordre de commande, d'un angle de braquage de consigne de la roulette de train avant, compris dans ladite plage d'angle de braquage, ledit angle de braquage de consigne étant déterminé de manière à engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,
  - transmission d'une instruction de braquage à la roulette de train avant afin d'orienter la roulette de train avant selon l'angle de braquage de consigne.

Selon un mode de réalisation, la détermination de l'angle de braquage de consigne comprend la détermination, en fonction de l'ordre de commande, d'un angle de braquage initial de la roulette de train avant, cet angle de braquage initial étant déterminé de manière à engendrer, s'il est appliqué à la roulette de train avant , un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne, et l'application d'une correction à l'angle de braquage initial si cet angle de braquage initial n'est pas compris dans la plage d'angle de braquage, pour déterminer l'angle de braquage de consigne.

Selon un mode de réalisation, lesdits dispositifs de déplacement de l'aéronef autour de l'axe de lacet incluent en outre une gouverne de direction orientable et un ensemble de freinage différentiel comprenant un dispositif de freinage d'un train principal gauche et un dispositif de freinage d'un train principal droit, ledit ensemble de freinage différentiel étant propre à appliquer un freinage dissymétrique audit train principal gauche et audit train principal droit.

Le procédé comprend alors de préférence une sous-étape de détermination d'une orientation de consigne de la gouverne de direction et/ou une consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel, l'orientation de consigne et/ou la consigne de freinage dissymétrique étant déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne.

Le procédé comprend alors en outre une sous-étape de transmission d'une instruction d'orientation à la gouverne de direction afin d'orienter la gouverne de direction selon l'orientation de consigne, et/ou une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique audit ensemble de freinage différentiel.

Brève description des dessins

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

- La Figure 1 représente de manière schématique un aéronef comprenant un système de contrôle selon un mode de réalisation ;
- La Figure 2 illustre de manière schématique une roulette de train avant de l'aéronef de la Figure 1 ;
- La Figure 3 est un schéma illustrant les dispositifs de déplacement de l'aéronef de la Figure 1 et les moyens de contrôle de ces dispositifs ;
- La Figure 4 est un schéma d'un système de contrôle selon un mode de réalisation de l'invention ;
- La Figure 5 est un graphique illustrant de manière schématique la variation de rapport de l'effort latéral exercé sur une roulette de train avant en fonction de l'angle de dérapage pour différents états de piste et pour un effort vertical donné ;
- La Figure 6 est un schéma d'un dispositif de commande manuelle du système de contrôle de la Figure 4, selon un mode de réalisation particulier ;
- La Figure 7 illustre schématiquement un profil de force appliqué par un générateur de retour haptique du système de la Figure 4 ;
- La Figure 8 illustre de manière schématique un module de contrôle du système de contrôle de la Figure 4 selon un mode particulier de réalisation de l'invention ;
- La Figures 9 et 10 sont des schémas illustrant des conditions d'affichage de courbes de trajectoire courante et limite sur un afficheur ;
- Les Figures 11 à 16 illustrent différents modes de représentation de courbes de trajectoire sur un afficheur ;
- La Figure 17 illustre un procédé de contrôle d'une trajectoire selon un premier aspect ; et
- La Figure 18 illustre un procédé de contrôle selon un deuxième aspect.

Description détaillée des réalisations de l'invention

Des variantes, des exemples et des réalisations préférées de l'invention sont décrits ci-dessous. On a illustré sur la Figure 1 un aéronef 1 roulant au sol sur une piste 3. L'aéronef 1 est mobile selon une direction longitudinale et autour d'un axe de lacet Z_1-Z_1.

On a par ailleurs illustré sur la Figure 1 l'axe de roulis X_1-X_1 de l'aéronef 1 et l'axe de tangage Y_1-Y_1 de l'aéronef 1.

Dans ce qui suit, on désignera par « longitudinal » un axe ou une direction parallèle à la direction d'allongement de l'aéronef 1.

L'axe de lacet Z_1-Z_1 est un axe orthogonal à la direction longitudinale, contenu dans le plan de symétrie de l'aéronef 1 et passant par le centre de gravité de l'aéronef 1.

Par extension, on désignera par « vertical » un axe ou une direction parallèle à l'axe de lacet Z_1-Z_1.

On désignera par ailleurs par « latéral » un axe ou une direction orthogonal à l'axe de lacet Z_1-Z_1 et à la direction longitudinale.

On désignera en outre par « plan longitudinal » un plan orthogonal à l'axe de lacet Z_1-Z_1, et par « plan vertical » un plan orthogonal à un plan longitudinal.

L'aéronef 1 est propre à se déplacer, en chaque instant, selon un vecteur vitesse sol Vs. La projection de ce vecteur vitesse Vs sur un plan orthogonal à l'axe de lacet Z_1-Z_1 forme avec la direction longitudinale de l'aéronef un angle désigné ci-après par angle de lacet λ.

Dans ce qui suit, on désignera par « angle » un angle orienté, dans la direction antihoraire vu de dessus.

L'aéronef 1 comprend un train avant 5 désigné ci-après par roulette de train avant, et un train principal 7 comportant un train principal gauche 7a et un train principal droit 7b. Typiquement, le train avant 5, le train principal gauche 7a et le train principal droite 7b comprennent chacun deux roues.

La roulette de train avant 5 et le train principal 7 sont en contact avec la piste 3 lors d'un déplacement au sol de l'aéronef 1 sur la piste.

La roulette de train avant 5 est propre à rouler selon une direction avant de roulage D_R, et à se déplacer, dans un plan longitudinal, selon un vecteur vitesse roue V_R (Figure 2). La direction avant de roulage D_R forme avec la direction longitudinale de l'aéronef un angle δ_{dir} désigné ci-après par « angle de braquage ».

La direction avant de roulage D_R forme en outre avec le vecteur vitesse roue V_R un angle de dérapage de train avant noté $\beta\delta$ (Figure 2). L'angle de dérapage de train avant $\beta\delta$ est nul lorsque la direction avant de roulage est parallèle au vecteur vitesse roue V_R.

La roulette de train avant 5 est symétrique selon un plan vertical parallèle à la direction de roulage, appelé dans ce qui suit « plan de la roulette de train avant ».

La roulette de train avant 5 est mobile en rotation autour d'un axe vertical. La roulette de train avant 5 est en outre orientable. En particulier, la roulette de train avant 5 est munie d'un dispositif d'orientation 9 de la roulette 5, configuré pour modifier l'angle de braquage δ_{dir} de la roulette 5.

Les trains principaux gauche 7a et droit 7b sont chacun fixes par rapport à l'aéronef 1.

Les trains principaux gauche 7a et droit 7b sont propres à rouler selon une direction principale de roulage. La direction principale de roulage forme avec le vecteur vitesse sol Vs de l'aéronef un angle de dérapage de train principal βT.

L'aéronef 1 comprend des dispositifs de déplacement longitudinal 11 et des dispositifs de déplacement latéral 13.

Ces dispositifs de déplacement sont illustrés de manière schématique sur la Figure 3.

Les dispositifs de déplacement longitudinal 11 sont destinés à contrôler le mouvement de l'aéronef 1 au sol selon la direction longitudinale de l'aéronef. Les dispositifs de déplacement latéral 13 sont destinés à contrôler le mouvement de l'aéronef au sol selon une direction latérale, autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1.

Les dispositifs de déplacement longitudinal 11 sont propres à exercer une force longitudinale sur l'aéronef, orientée vers l'avant ou vers l'arrière de l'aéronef 1, pour entraîner un mouvement de l'aéronef selon la direction longitudinale de l'aéronef ou s'opposer à un tel mouvement.

De manière typique, les dispositifs de déplacement longitudinal comprennent un ensemble moteur 15 et des dispositifs 17 de freinage.

L'ensemble moteur 15 comprend par exemple des moteurs 19 aptes à exercer sur l'aéronef 5 une force de poussée, tels que des réacteurs, des turbopropulseurs ou des turbines, et un dispositif 21 de contrôle des moteurs 19. Par exemple, les moteurs 19 comprennent un moteur gauche et un moteur droit.

Selon un mode de réalisation, l'ensemble moteur 15 comprend en outre un ensemble de moteurs électriques 23 propres à entraîner en mouvement le train principal 7, muni d'un dispositif 25 de contrôle de ces moteurs électriques.

L'ensemble de moteurs électriques 23 comprend notamment un moteur électrique gauche 23a propre à entraîner en mouvement le train principal gauche 7a, et un moteur électrique droit 23b, propre à entraîner en mouvement le train principal droit 7b.

Le dispositif 25 de contrôle des moteurs électriques est configuré pour commander de manière symétrique le moteur électrique gauche 23a et le moteur électrique droit 23b, de manière à entraîner en mouvement le train principal gauche 7a selon une vitesse de train principal gauche VTa et à entraîner en mouvement le train principal droit 7b selon une vitesse de train principal droite VTb=VTa, et ainsi générer un mouvement longitudinal de l'aéronef.

Les dispositifs de freinage 17 comprennent un ensemble 27 de freinage du train principal, muni d'un dispositif 29 de contrôle.

L'ensemble 27 de freinage comprend un dispositif de freinage 27a du train principal gauche et un dispositif de freinage 27b du train principal droit.

Le dispositif 29 de contrôle est configuré pour commander de manière symétrique les dispositifs de freinage 27a, 27b de manière à exercer sur le train principal gauche 7a et sur le train principal droit 7b une même force FTa=FTb s'opposant au mouvement des trains principaux gauche 7a et droit 7b et ainsi générer une force longitudinale s'opposant au mouvement longitudinal de l'aéronef.

Les dispositifs de déplacement latéral 13 sont configurés pour mettre en mouvement l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1, selon un angle positif (i.e. vers la gauche) ou selon un angle négatif (i.e. vers la droite).

Les dispositifs de déplacement latéral 13 sont ainsi configurés pour modifier la trajectoire latérale de l'aéronef, c'est-à-dire la trajectoire de l'aéronef selon une direction orthogonale à l'axe de roulis X_1-X_1 de l'aéronef.

En particulier, les dispositifs de déplacement sont configurés pour modifier l'angle de lacet λ de l'aéronef.

Par la suite, on appellera « déplacement latéral » un mouvement autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1, combiné à un mouvement selon la direction longitudinale.

Les dispositifs de déplacement latéral 13 sont actionnables, i.e. présentent au moins un paramètre de fonctionnement modifiable pour générer un mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1.

Un actionnement d'un dispositif de déplacement latéral 13 comprend donc une modification d'un paramètre de fonctionnement de ce dispositif propre à modifier la trajectoire latérale de l'aéronef, par exemple propre à modifier le rayon de courbure de cette trajectoire et l'angle de lacet λ de l'aéronef.

Les dispositifs de déplacement latéral 13 comprennent un premier 13a et un deuxième 13b ensembles de dispositifs de déplacement latéral.

Le premier ensemble 13a comprend notamment le dispositif 9 d'orientation de la roulette 5, propre à modifier l'angle de braquage δdir de la roulette de train avant 5 pour modifier la trajectoire latérale de l'aéronef.

Le premier ensemble 13a comprend entre outre une gouverne de direction 31 orientable, munie d'un dispositif d'orientation 33. Le dispositif d'orientation 33 est propre à modifier l'orientation δn de la gouverne de direction 31 pour modifier la trajectoire latérale de l'aéronef.

Le deuxième ensemble 13b comprend l'ensemble de freinage 27, commandé par le dispositif 29 de contrôle de l'ensemble de freinage.

En effet, le dispositif 29 de contrôle de l'ensemble de freinage est configuré pour commander de manière dissymétrique le dispositif de freinage 27a du train principal gauche et le dispositif de freinage 27b du train principal droit, de manière à exercer un différentiel de force ΔF non nul entre les trains principaux gauche 7a et droit 7b, et ainsi entraîner une mise en mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet, pour modifier sa trajectoire latérale.

Notamment, le dispositif 29 de contrôle de l'ensemble de freinage est configuré pour commander le dispositif de freinage 27a du train principal gauche 7a et le dispositif de freinage 27b du train principal droit 7b de manière à exercer, en un instant donné, sur le train principal gauche 7a, une force de freinage gauche FTa', et à exercer sur le train principal droit 7b une force de freinage droite FTb'=FTa'+/-ΔF.

Un tel freinage dissymétrique est apte à entraîner un mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet selon une direction positive (lorsque FTa'> FTb') ou selon une direction négative (lorsque FTa'< FTb').

Par exemple, l'une des forces de freinage FTa' ou FTb' est nulle.

L'ensemble de freinage 27, lorsqu'il est mis en œuvre pour générer un mouvement latéral, sera appelé par la suite ensemble de freinage différentiel 27'.

L'ensemble de freinage différentiel 27' peut être actif ou non-actif.

Dans l'état actif, l'ensemble de freinage différentiel 27' est propre à générer un mouvement latéral de l'aéronef 1.

En effet, dans l'état actif, l'ensemble de freinage différentiel 27' est propre à exercer une force de freinage gauche et une force de freinage droite distinctes, i.e. un différentiel de force ΔF non nul entre les trains principaux gauche 7a et droit 7b, de manière à générer le mouvement latéral de l'aéronef 1.

Dans l'état non-actif, l'ensemble de freinage différentiel 27' est propre à exercer uniquement une force de freinage gauche et une force de freinage droite égales, éventuellement nulles, et ne génère donc aucun mouvement latéral de l'aéronef 1.

L'ensemble de freinage différentiel 27' est propre à être activé, i.e. configuré dans l'état actif, ou désactivé, i.e. configuré dans l'état non-actif.

Selon un mode particulier de réalisation, le deuxième ensemble 13b comprend en outre l'ensemble de moteurs électriques 23, contrôlé par le dispositif 25 de contrôle des moteurs électriques.

En effet, le dispositif 25 de contrôle des moteurs est configuré pour commander de manière dissymétrique le moteur électrique gauche 23a et le moteur électrique droit 23b de manière à appliquer un différentiel de vitesse ΔVT entre les trains principaux gauche 7a et droit 7b, et ainsi entraîner une mise en mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet.

Ainsi, le dispositif 25 de contrôle des moteurs est configuré pour commander, en un instant donné, le moteur électrique gauche 23a de manière à entraîner en mouvement le train principal gauche 7a selon une vitesse de train principal gauche VTa' et le moteur électrique droit 23b de manière à entraîner en mouvement le train principal droit 7b selon une vitesse de train principal droit $VTb'=VTa'+/-\Delta VT$.

L'ensemble de moteurs électriques 23, lorsque mis en œuvre pour générer un déplacement latéral, sera appelé par la suite ensemble moteur différentiel 23'.

L'ensemble moteur différentiel 23' peut être actif ou non-actif.

Dans l'état actif, l'ensemble moteur différentiel 23' entraîne en mouvement les trains principaux gauche 7a et droite 7b selon une vitesse de train principal gauche VTa et une vitesse de train principal gauche $VTb \neq VTa$ distinctes, de manière à générer un mouvement latéral de l'aéronef 1.

Dans l'état non-actif, l'ensemble moteur différentiel 23' entraîne en mouvement les trains principaux gauche 7a et droite 7b selon des vitesses égales, et ne génère donc aucun mouvement latéral de l'aéronef 1.

Selon une variante non représentée, le deuxième ensemble 13b comprend en outre l'ensemble moteur 15. En effet, le dispositif 21 de contrôle des moteurs 19 est configuré pour commander de manière dissymétrique le moteur gauche et le moteur droit de manière à appliquer un différentiel de poussée entre les moteurs gauche et droit, et ainsi entraîner une mise en mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet.

Par la suite, par actionnement d'un dispositif de déplacement latéral, on entendra une modification d'au moins un réglage de ce dispositif, par exemple une modification de l'angle de braquage de la roulette de train avant 5, de l'orientation de la gouverne de direction 31, l'application d'un différentiel de force donné entre le train principal gauche 7a et le train principal droit 7b, ou l'application d'un différentiel de vitesse entre le train principal gauche 7a et le train principal droit 7b.

L'aéronef 1 comprend en outre un ensemble de détermination 35 de paramètres relatifs au déplacement de l'aéronef au sol.

Ces paramètres comprennent une position courante de l'aéronef 1 sur la piste, ainsi que des paramètres relatifs au mouvement de l'aéronef 1, notamment :

- le vecteur vitesse V_S de l'aéronef par rapport au sol (ci-après vecteur vitesse sol), ainsi que les composantes Vx, Vy et Vz du vecteur vitesse V_S dans un repère terrestre local (X_0, Y_0, Z_0) ;

- le module $|V_S|$ de ce vecteur vitesse ;

- la vitesse de lacet r de l'aéronef, c'est-à-dire la vitesse angulaire de déplacement de l'aéronef autour de son axe de lacet Z ;

- l'orientation des axes de l'aéronef par rapport au repère terrestre local, notamment l'angle φ entre l'axe de tangage Y_1-Y_1 de l'aéronef 1 et le plan de référence horizontal X_0-Y_0 du repère terrestre, l'angle θ entre l'axe de roulis X_1-X_1 de l'aéronef 1 et le plan de référence horizontal X_0-Y_0, et l'angle ψ entre l'axe de roulis X_1-X_1 de l'aéronef 1 et le plan vertical de référence X_0-Z_0 du repère terrestre ;

- l'accélération latérale de l'aéronef ay ;

- un angle de dérapage βkp de l'aéronef 1 en au moins un point P de l'aéronef 1.

A cette fin, l'ensemble 35 de détermination inclut par exemple un capteur de position géographique, tel qu'un capteur de position par satellites, par exemple un capteur GPS et une centrale à inertie.

Ces paramètres comprennent en outre des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1.

En particulier, l'ensemble 35 de détermination est configuré pour déterminer un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5, et pour détecter une éventuelle panne ou dysfonctionnement de la roulette de train avant 5 susceptible d'empêcher le contrôle de l'angle de braquage de la roulette de train avant 5. En cas de panne, la roulette de train avant 5 est

généralement libre de rotation, mais son angle de braquage ne peut plus être commandé par le dispositif 9 d'orientation.

L'ensemble 35 de détermination est par ailleurs configuré pour déterminer la température courante des dispositifs de freinage 27a, 27b.

Selon un mode de réalisation, ces paramètres peuvent inclure des paramètres environnementaux estimés, notamment un état de piste (par exemple piste sèche, mouillée ou glacée). .

Ces paramètres incluent en outre un état courant des dispositifs de déplacement latéral, notamment :

- Un angle de braquage courant δdir de la roulette de train avant 5,
- Un angle d'orientation courant δn de la gouverne de direction 31,
- Un différentiel de commande de freinage entre les trains principaux gauche 7a et droite 7b,
- Un différentiel de commande de vitesse des moteurs électriques 23a, 23b entre les trains principaux gauche et droite,
- Un différentiel de commande de poussée entre les moteurs gauche et droite.

L'aéronef 1 est muni d'un système 40 de contrôle de la trajectoire latérale de l'aéronef 1 au sol, dont un mode de réalisation est illustré schématiquement sur la Figure 4.

Le système 40 de contrôle est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale, et pour contrôler les dispositifs de déplacement latéral 13 de telle sorte que l'aéronef 1 suive la trajectoire latérale acquise.

Par trajectoire latérale, on entend une trajectoire décrite par au moins un point ou élément de l'aéronef 1, combinant un déplacement longitudinal et un déplacement latéral.

Le point ou élément de l'aéronef 1 considéré est par exemple le centre de gravité de l'aéronef 1, le nez de l'aéronef 1, la roulette de train avant 5, l'extrémité des ailes ou la queue de l'aéronef 1.

Une trajectoire latérale est caractérisée, en chaque point de cette trajectoire, par une direction de déplacement latéral (i.e. vers la gauche ou vers la droite), et par au moins un paramètre de trajectoire latérale, par exemple :

- un rayon de courbure ρ, de préférence associé à une information de vitesse en ce point, notamment le module $|V_S|$ du vecteur vitesse en ce point, et/ou
- une vitesse de lacet r en ce point.

Le système 40 de contrôle est par ailleurs configuré pour déterminer une trajectoire courante de l'aéronef et des trajectoires limites atteignables par l'aéronef, et pour commander l'affichage de ces trajectoires sur un afficheur, à destination du pilote.

Le système 40 de contrôle comprend à cette fin plusieurs modules, regroupés dans ce qui suit en ensembles fonctionnels.

En particulier, le système 40 de contrôle comprend un ensemble de régulation 48, un ensemble de commande 50 de la trajectoire latérale, un ensemble de contrôle 52 de la trajectoire latérale, et un ensemble d'affichage 54.

L'ensemble de régulation 48 est configuré pour déterminer des paramètres de régulation des dispositifs de déplacement latéral 13.

En particulier, l'ensemble de régulation 48 est configuré pour déterminer une plage d'angle de braquage de la roulette de train, notée $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$, en-dehors de laquelle un risque de perte d'adhérence de la roulette de train avant 5 est significativement accru.

L'ensemble de régulation 48 est par ailleurs destiné à réguler l'utilisation de l'ensemble de freinage différentiel 27', en particulier à déterminer un seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', notamment une première trajectoire limite à partir de laquelle l'ensemble de freinage différentiel 27' doit être activé.

L'ensemble de régulation 48 est par ailleurs configuré pour déterminer une deuxième trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 par utilisation des dispositifs de déplacement latéral 13, en particulier de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

L'ensemble de régulation 48 est en outre propre à déterminer une trajectoire courante de l'aéronef 1.

L'ensemble de commande 50 est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale.

Dans l'exemple illustré, l'ensemble de commande 50 est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale, ou trajectoire latérale de consigne, saisi par un pilote.

En variante, l'ensemble de commande 50 est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale généré par un pilote automatique.

L'ensemble de contrôle 52 de la trajectoire latérale est configuré pour contrôler les dispositifs de déplacement latéral 13 de telle sorte que l'aéronef 1 suive une trajectoire latérale de consigne selon l'ordre de trajectoire latérale acquis par l'ensemble de commande 50.

En particulier, l'ensemble de contrôle 52 est configuré pour déterminer, à partir de l'ordre de trajectoire, des ordres de consigne à appliquer à un ou plusieurs des dispositifs de

déplacement latéral 13 pour que l'aéronef 1 suive la trajectoire latérale de consigne, et pour transmettre ces ordres de consigne aux dispositifs de déplacement latéral 13.

Notamment, l'ensemble de contrôle 52 est configuré pour déterminer les ordres de consigne tels que l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 reste dans la plage d'angle de braquage de la roulette de train [δdir_{min} ; δdir_{max}], au-delà duquel un risque de perte d'adhérence de la roulette de train avant 5 est significativement accru.

L'ensemble d'affichage 54 est configuré pour afficher, à destination du pilote, une visualisation d'au moins une portion de piste sur laquelle se déplace l'aéronef, ainsi qu'une courbe représentative de la trajectoire courante de l'aéronef 1, et au moins une courbe limite représentative d'une trajectoire limite pouvant être atteinte par au moins un élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral, lesdites courbes étant superposées à la visualisation de la portion de piste.

Comme décrit ci-après, l'ensemble d'affichage est par exemple configuré pour afficher une première courbe limite représentative de la première trajectoire limite et une deuxième courbe limite représentative de la deuxième trajectoire limite, superposées à la visualisation de la portion de piste.

Dans le mode de réalisation illustré, l'ensemble de régulation 48 comprend un module de limitation 58 de l'angle de braquage de la roulette de train avant 5.

L'ensemble de régulation 48 comprend en outre un module de régulation 60 de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

L'ensemble de régulation 48 comprend également un module de détermination 62 de trajectoires.

Le module de limitation 58 est configuré pour déterminer la plage d'angle de braquage de la roulette de train, notée [δdir_{min} ; δdir_{max}], en dehors de laquelle un risque de perte d'adhérence de la roulette de train avant 5 est significativement accru.

Le module de limitation 58 est configuré pour déterminer ou recevoir des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol et au moins un angle de dérapage maximal autorisé de la roulette de train avant 5, noté $\beta\delta max$ et/ou un angle de dérapage maximal autorisé des trains principaux gauche et droite 7a, 7b, noté $\beta Tmax$.

Les informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol comprennent par exemple le module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant de l'aéronef 1, et la vitesse de lacet r courante de l'aéronef 1.

Le module de limitation 58 est en particulier configuré pour recevoir ces informations de vitesse de l'ensemble de détermination 35.

De préférence, le module de limitation 58 est également configuré pour estimer ou recevoir un paramètre représentatif d'un état d'adhérence courant de la piste. Cet état d'adhérence est par exemple un état sec, correspondant à une adhérence maximale, un état mouillé, correspondant à une adhérence moyenne, ou un état glacé, correspondant à une adhérence faible. Par exemple, le module de limitation 58 est configuré pour recevoir ce paramètre d'état d'adhérence de la tour de contrôle au sol.

De préférence, le module de limitation 58 est configuré pour extraire l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5 et, le cas échéant, l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta Tmax$ des trains principaux gauche et droite 7a, 7b, depuis une base de données.

Le module de limitation 58 comprend ainsi une base de données d'angles de dérapage maximaux. Cette base de données comprend des valeurs prédéterminées d'angles de dérapage maximaux autorisé de la roulette de train avant 5 et/ou des trains principaux gauche 7a et droite 7b.

L'angle de dérapage maximal $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5 est l'angle de dérapage $\beta\delta$ de cette roulette 5 au-delà duquel un risque de perte d'adhérence du pneu de la roulette 5 est significativement accru.

De préférence, la base de données comprend des valeurs prédéterminées d'angles de dérapage maximaux autorisé de la roulette de train avant 5 et/ou des trains principaux gauche 7a et droite 7b en fonction de l'état courant de piste.

Dès lors, l'angle de dérapage maximal $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5 est de préférence l'angle de dérapage $\beta\delta$ de cette roulette 5 au-delà duquel un risque de perte d'adhérence du pneu de la roulette 5 est significativement accru compte tenu de l'état de piste.

On a ainsi illustré sur la Figure 5, de manière schématique, la variation du coefficient d'effort latéral Ky exercé sur la roulette de train avant 5 en fonction de l'angle de dérapage $\beta\delta$, pour différents états de piste (piste sèche, mouillée ou glacée) pour un effort vertical Fz donné.

L'effort latéral Fy exercé sur la roulette de train avant 5 peut être exprimé par :

$$F_y = F_Z * K_y(\beta\delta),$$

où F_Z est l'effort vertical et Ky le coefficient d'effort latéral, qui est fonction de l'angle de dérapage $\beta\delta$.

On définit par ailleurs l'efficacité à la pente ou coefficient d'adhérence μ_y, correspondant à la dérivée de l'effort latéral par rapport à l'angle de dérapage:

$$\mu_y(\beta\delta) = \frac{dK_y}{d\beta\delta}(\beta\delta)$$

On distingue sur la Figure 5 deux régimes successifs :

- un régime linéaire, obtenu tant que l'angle de dérapage $\beta\delta$ reste inférieur à une valeur seuil $\beta\delta_0$, dans lequel le coefficient d'effort latéral Ky est une fonction sensiblement linéaire de l'angle de dérapage $\beta\delta$. Dans le régime linéaire, le coefficient d'adhérence μ_y est sensiblement constant ou croissant.
- un régime dégradé, obtenu lorsque l'angle de dérapage dépasse la valeur seuil $\beta\delta_0$, dans lequel le coefficient d'effort latéral Ky n'est plus une fonction linéaire de l'angle de dérapage. Dans l'exemple illustré, le coefficient d'effort latéral Ky est saturé au-delà de la valeur seuil d'angle de dérapage, mais il peut également décroître. Dans le régime dégradé, le coefficient d'adhérence μ_y est ainsi une fonction nulle ou décroissante de l'angle de dérapage $\beta\delta$. Quand le régime dégradé est atteint, un risque de perte d'adhérence et de décrochage de la roulette de train avant 5 existe.

De préférence, l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5 est égal à la valeur seuil $\beta\delta_0$ d'angle de dérapage.

En variante, l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta max$ est inférieur à la valeur seuil, par exemple compris entre la valeur seuil $\beta\delta_0$ et 90% * $\beta\delta_0$.

De même, l'angle de dérapage maximal βTmax des trains principaux gauche 7a et droite 7b est l'angle de dérapage βT de ces trains principaux au-delà duquel un risque de de perte d'adhérence du pneu de la roulette 5 est significativement accru. De préférence, l'angle de dérapage maximal autorisé βTmax des trains principaux gauche et droite est égal à la valeur seuil βT_0 d'angle de dérapage au-delà duquel un régime dégradé est atteint.

En variante, l'angle de dérapage maximal autorisé βTmax est inférieur à la valeur seuil, par exemple compris entre la valeur seuil βT_0 et 90% * βT_0.

La base de donnée d'angles de dérapage maximaux comprend ainsi, pour chaque état de piste, au moins une valeur d'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5 et au moins une valeur d'angle de dérapage maximal autorisé βTmax des trains principaux gauche 7a et droite 7b.

De préférence, comme décrit ci-dessus, le module de limitation 58 est configuré pour estimer ou recevoir un paramètre représentatif d'un état d'adhérence courant de la piste et pour extraire de la base de données le ou les angle(s) de dérapage maximal/aux autorisé $\beta\delta max$ et/ou $\beta Tmax$ en fonction de ce paramètre.

Selon une variante, le module de limitation 58 est configuré pour estimer un ou des angle(s) de dérapage maximal/aux autorisé(s) $\beta\delta max$ et/ou $\beta Tmax$ indépendamment de l'état d'adhérence de piste.

Le module de limitation 58 est par ailleurs configuré pour déterminer, en fonction des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef, de l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta max$ de la roulette de train avant 5, et de l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta Tmax$ des trains principaux gauche 7a et droite 7b, la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5.

La plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5 est déterminée de telle sorte que, lorsque l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 est compris dans cette plage d'angle de braquage, l'angle de dérapage $\beta\delta$ de la roulette de train avant 5 est inférieur, en valeur absolue, à l'angle de dérapage maximal $\beta\delta max$.

La plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5 est par exemple déterminée à partir d'un modèle simplifié, dit « modèle bicyclette », dans lequel les trains principaux gauche 7a et droite 7b sont assimilés à un train virtuel situé dans le plan de symétrie longitudinal de l'aéronef 1, la roulette de train avant 5 conservant son rôle de roulette orientable.

Selon ce modèle, l'angle de braquage δdir de la roulette 5, l'angle de dérapage courant $\beta\delta$ de la roulette 5 et l'angle de dérapage courant βT du train principal 7 sont reliés par la relation suivante :

$$\tan(\delta dir + \beta\delta) = \tan(\beta T) + \frac{d}{|V_S| \cdot \cos(\beta T)} \cdot r ,$$

Où d est la distance selon un axe longitudinal entre la roulette de train avant 5 et le train principal 7.

Dès lors, l'angle de braquage δdir peut être exprimé comme :

$$\delta dir = a\tan\left(\tan(\beta T) + \frac{d}{|V_S| \cdot \cos(\beta T)} \cdot r\right) - \beta\delta$$

En supposant βδ et βT petits, l'angle de braquage δdir peut être exprimé de manière approximative comme :

$$\delta dir \approx a\tan\left(\beta T + \frac{d}{|V_S|}\cdot r\right) - \beta\delta$$

Les bornes inférieure δdir_{min} et supérieure δdir_{max} de la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5 sont ainsi déterminés selon les expressions suivantes :

$$\delta dir_{min} = a\tan\left(\frac{d}{|V_S|}\cdot r - \beta T_{max}\right) - \beta\delta_{max}$$

$$\delta dir_{max} = a\tan\left(\frac{d}{|V_S|}\cdot r + \beta T_{max}\right) + \beta\delta_{max}$$

De préférence, la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5 est en outre déterminée de telle sorte que, lorsque l'angle de braquage δdir de la roulette de train avant 5 est compris dans cette plage d'angle de braquage, l'angle de dérapage βT des trains principaux gauche 7a et droite 7b est inférieur, en valeur absolue, à l'angle de dérapage maximal βTmax.

Le module de régulation 60 est configuré pour déterminer un seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Ce seuil d'activation correspond à une valeur seuil d'un paramètre de trajectoire latérale, notamment une valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} ou une valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

Ce seuil d'activation correspond en particulier à une valeur seuil d'un paramètre de trajectoire latérale au-delà de laquelle l'ensemble de freinage différentiel 27' est activé.

Par exemple, cette valeur seuil correspond à une valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} en-dessous de laquelle l'ensemble de freinage différentiel 27' est activé, ou une valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil} au-dessus de laquelle l'ensemble de freinage différentiel 27' est activé.

Par la suite, on désignera par « seuil d'activation» cette valeur seuil, et on considèrera qu'un abaissement de ce seuil correspond à un relâchement des critères nécessaires à l'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'. Un abaissement du seuil correspond donc par exemple à une augmentation de la valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} ou à une diminution de la valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

Le module de régulation 60 est de préférence configuré pour déterminer le seuil d'activation en fonction de paramètres relatifs au déplacement de l'aéronef au sol, en particulier:

- d'informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef 1, notamment du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant de l'aéronef, et/ou
- des paramètres environnementaux, en particulier l'état estimé ou supposé de piste courant (piste sèche, mouillée ou glacée), et/ou
- des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1, notamment un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5 et la température des dispositifs de freinage 27a, 27b.

Le module de régulation 60 est propre à recevoir ces paramètres de l'ensemble de détermination 35.

Notamment, le module de régulation 60 est configuré pour déterminer le seuil d'activation en fonction des informations de vitesse courante de l'aéronef.

Le module de régulation 60 est également configuré pour déterminer le seuil d'activation en fonction de la température des dispositifs de freinage 27a, 27b. En effet, une température élevée conduit à rehausser le seuil d'activation, pour éviter autant que possible une élévation de la température de ces dispositifs de freinage 27a, 27b, qui pourrait entrainer une dégradation de ceux-ci.

Le module de régulation 60 est en outre configuré pour déterminer le seuil d'activation en fonction de l'état de fonctionnement de la roulette de train avant 5.

En particulier, en cas de panne ou dysfonctionnement de la roulette de train avant 5, celle-ci étant non orientable, et libre en rotation, le seuil d'activation est abaissé de manière à permettre de suivre la trajectoire souhaitée malgré le dysfonctionnement de la roulette de train avant 5.

De préférence, le module de régulation 60 est également configuré pour déterminer le seuil d'activation en fonction de la plage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ d'angle de braquage de la roulette de train avant 5.

En particulier, le module de régulation 60 est configuré pour recevoir cette plage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ d'angle de braquage du module de limitation 58.

Une réduction de cette plage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ conduit généralement à abaisser le seuil d'activation.

En particulier, le seuil d'activation est déterminé de telle sorte que toute valeur du paramètre de trajectoire considéré, en deçà de la valeur seuil de ce paramètre (i.e. tout rayon de courbure supérieur à la valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil}, et/ou toute vitesse de lacet inférieure la valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}), puisse être atteinte par l'aéronef sans utilisation de l'ensemble de freinage différentiel 27', et tout en conservant un angle de braquage de la roulette de train avant 5 compris dans la plage [δ_{dirmin} ; δ_{dirmax}] d'angle de braquage.

Ainsi, une diminution, en valeur absolue de la borne inférieure δdir_{min} ou supérieure δdir_{max} de la plage d'angle de braquage conduit à abaisser la valeur seuil du paramètre de trajectoire au-delà de laquelle l'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' est nécessaire.

Le module de détermination 62 de trajectoires de l'aéronef 1 est configuré pour déterminer, en chaque instant ou de manière séquentielle, i.e. en une pluralité d'instants successifs lors du déplacement de l'aéronef 1 au sol, une trajectoire courante de l'aéronef, et au moins une trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral.

Chacune des trajectoires courante et limite(s)est caractérisée par une direction de déplacement latéral et au moins un paramètre de trajectoire latérale, notamment un rayon de courbure et/ou une vitesse de lacet.

A ces effets, le module de détermination 62 est apte à recevoir de l'ensemble de détermination 35 des paramètres relatifs au déplacement de l'aéronef au sol, notamment :

- une information de vitesse courante de l'aéronef 1,

- des paramètres environnementaux, en particulier l'état de piste courant estimé ou supposé (piste sèche, mouillée ou glacée), - des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1, notamment un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5,

- un réglage courant des dispositifs de déplacement latéral 13.

Le module de détermination 62 est de préférence également configuré pour recevoir du module de limitation 58, en chaque instant ou à une fréquence donnée, les bornes inférieure δdir_{min} et supérieure δdir_{max} de la plage d'angle de braquage [δdir_{min}; δdir_{max}] de la roulette de train avant 5.

Le module de détermination 62 est également configuré pour recevoir du module de régulation 60 un seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27a, notamment une valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} ou une valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

La trajectoire courante comprend une succession de points de passage prévus d'au moins un élément de l'aéronef 1, à conditions inchangées des dispositifs de déplacement latéral, mais également en l'absence d'actionnement des dispositifs de déplacement longitudinal 11.

Par « conditions inchangées des dispositifs de déplacement latéral 13 », on entend que les réglages de ces dispositifs restent inchangés par rapport à leur réglage courant.

En d'autres termes, la trajectoire courante correspond à la trajectoire qui serait ou sera suivie par l'aéronef 1 au sol si les dispositifs de déplacement latéral 13a et 13b conservaient leur réglage courant, notamment avec un angle de braquage de la roulette de train avant 5 fixe, une orientation fixe de la gouverne de direction 31 et un freinage constant par l'ensemble de freinage différentiel 27', et en l'absence de modification des conditions extérieures, notamment du vent.

La trajectoire courante est une trajectoire d'au moins un élément de l'aéronef 1, tel que la roulette de train avant 5, le nez de l'aéronef, ou l'extrémité d'une aile de l'aéronef, ou de la queue de l'aéronef.

De préférence, le module de détermination 62 est configuré pour déterminer une trajectoire courante de plusieurs éléments de l'aéronef 1, par exemple choisis parmi la roulette de train avant 5, le nez de l'aéronef, l'extrémité de l'aile gauche, l'extrémité de l'aile droite et la queue de l'aéronef

Le module de détermination 62 est configuré pour déterminer la trajectoire courante de l'aéronef, caractérisée notamment par la direction de déplacement, le rayon de courbure et/ou la vitesse de lacet associé, à partir de l'information de vitesse courante de l'aéronef et du réglage courant des dispositifs de déplacement latéral 13, et de préférence de l'état de piste et/ou des paramètres de fonctionnement de l'aéronef.

Le module de détermination 62 est par exemple configuré pour déterminer la trajectoire courante prévue sur une distance prédéterminée ou sur un intervalle de temps prédéterminé, compris entre l'instant courant de détermination et une limite de temps, par exemple égale à 10 s.

Le module de détermination 62 est par ailleurs configuré pour déterminer, en chaque instant ou de manière séquentielle, au moins une trajectoire limite atteignable en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral 13.

Chaque trajectoire limite comprend, pour chaque élément de l'aéronef considéré, une succession de points de passage limites pouvant être atteints par cet élément de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral 13.

Chaque trajectoire limite est par exemple une trajectoire limite atteignable en actionnant:

- uniquement la roulette de train avant 5, ou
- uniquement la gouverne de direction 31, ou
- uniquement l'ensemble de freinage différentiel 27', ou
- uniquement l'ensemble moteur différentiel 23', ou
- au moins deux dispositifs de déplacement latéral 13.

De préférence, le module de détermination 62 est configuré pour déterminer au moins une première trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 et au moins une deuxième trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1.

Par « trajectoire limite », on entend que tout point situé au-delà de cette trajectoire limite, i.e. non compris entre une trajectoire longitudinale et cette trajectoire limite, ne peut être atteint en actionnant le ou les dispositif(s) de déplacement latéral 13 considéré(s) dans les limites d'actionnement autorisées de ces dispositifs, notamment en restant dans la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min}; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5.

Par exemple, le module de détermination 62 est configuré pour déterminer une première trajectoire limite atteignable en actionnant un premier groupe de dispositifs de déplacement latéral, et une deuxième trajectoire limite atteignable en actionnant un deuxième groupe de dispositifs de déplacement latéral, distinct du premier groupe. Chaque groupe comporte un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13.

Selon un mode de réalisation préféré, la première trajectoire limite est la trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 par l'utilisation des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif, i.e. ne générant aucun déplacement latéral. Par ailleurs, la deuxième trajectoire est la trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 en utilisant à la fois les dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et l'ensemble de freinage différentiel 27', ce dernier étant donc actif.

Le module de détermination 62 est ainsi configuré pour déterminer, en chaque instant ou de manière séquentielle, au moins une première trajectoire limite atteignable en actionnant les dispositifs du premier ensemble 13a de dispositifs de déplacement latéral, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif.

De préférence, le module de détermination 62 est configuré pour déterminer deux premières trajectoires limites, correspondant chacune à une direction de déplacement latéral respective.

Le module de détermination 62 est ainsi propre à déterminer une première trajectoire limite orientée dans une première direction, notamment vers la gauche, et une première trajectoire limite orientée dans une deuxième direction, notamment vers la droite, opposée à la première direction.

Chaque première trajectoire limite comprend, pour chaque élément de l'aéronef considéré, une succession de premiers points de passage limites pouvant être atteints par cet élément de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a, de préférence tous les dispositifs du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif.

Par « trajectoire limite », on entend que tout point situé au-delà de cette trajectoire limite, i.e. non compris entre une trajectoire longitudinale et cette trajectoire limite, ne peut être atteint lorsque l'ensemble de freinage différentiel 27' est non-actif.

Notamment, si dans l'état courant, l'ensemble de freinage différentiel 27' est actif, la première trajectoire limite est une trajectoire qui serait obtenue si l'ensemble de freinage différentiel 27' était inactivé.

Chaque première trajectoire limite est par exemple une trajectoire circulaire, définie notamment par une direction de déplacement et par une première valeur limite d'un paramètre de trajectoire.

Cette première valeur limite est par exemple un premier rayon de courbure minimal ρ_{min1} ou une première vitesse de lacet maximale r_{max1}.

Le module 62 de détermination est configuré pour déterminer la première trajectoire limite, en particulier la première valeur limite, à partir de l'information de vitesse courante de l'aéronef, du réglage courant des dispositifs de déplacement latéral 13, des réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et, de préférence, de l'état de piste et/ou des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1.

Les réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a comprennent notamment un angle d'orientation limite de la gouverne de direction 31.

Cet angle d'orientation limite a par exemple une valeur d'angle absolue, qui ne peut être dépassée par la gouverne de direction 31.

De préférence, cet angle d'orientation limite a une valeur prédéterminée, inférieure à cette valeur absolue.

Les réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a comprennent également un angle de braquage limite δdir_{lim} de la roulette de train avant 5 dans la direction de déplacement latéral considérée.

Cet angle de braquage limite est de préférence égal à la borne inférieur δdir_{min}, ou supérieure δdir_{max}, selon la direction de déplacement considérée, de la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min}; \delta dir_{max}]$.

La première trajectoire limite correspond alors à la trajectoire qu'il est possible d'atteindre en modifiant le réglage de la roulette de train avant 5 et éventuellement des autres dispositifs de déplacement latéral 13a du premier ensemble, tout en restant dans la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min}; \delta dir_{max}]$.

La première valeur limite du paramètre de trajectoire est alors de préférence égale au seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', tel que déterminé puis transmis par le module de régulation 60.

En particulier, la première valeur limite d'un paramètre de trajectoire comprend par exemple un premier rayon de courbure minimal ρ_{min1} égal à la valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil}.

En variante ou en complément, la première valeur limite d'un paramètre de trajectoire comprend une première vitesse de lacet maximale r_{max1} égale à la valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

De préférence, le module de détermination 62 est ainsi configuré pour déterminer la première trajectoire limite en fonction de la direction de déplacement latéral considéré, du seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', et d'au moins une information de vitesse courante de l'aéronef, notamment le module du vecteur vitesse sol courant.

Le module de détermination 62 de trajectoires au sol de l'aéronef 1 est par ailleurs configuré pour déterminer, en chaque instant ou en une pluralité d'instants successifs, au moins une deuxième trajectoire limite atteignable en actionnant à la fois les dispositifs du premier ensemble 13a de dispositifs de déplacement latéral et l'ensemble de freinage différentiel 27'.

De préférence, le module de détermination 62 est configuré pour déterminer deux deuxièmes trajectoires limites, correspondant chacune à une direction de déplacement latéral respective.

Le module de détermination 62 est ainsi propre à déterminer une deuxième trajectoire limite orientée dans une première direction, notamment vers la gauche, et une deuxième

trajectoire limite orientée dans une deuxième direction, notamment vers la droite, opposé à la première direction.

Chaque deuxième trajectoire limite comprend, pour chaque élément de l'aéronef considéré, une succession de deuxièmes points de passage pouvant être atteints par cet élément de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a, de préférence de tous les dispositifs du premier ensemble 13a, et l'ensemble de freinage différentiel 27', celui-ci étant actif.

Chaque deuxième trajectoire limite est par exemple une trajectoire circulaire, définie par une direction de déplacement et par une deuxième valeur limite d'un paramètre de trajectoire.

Cette deuxième valeur limite correspond à une valeur minimale ou maximale, selon le paramètre considéré, de ce paramètre qu'il est possible d'atteindre en utilisant à la fois les dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et ceux du deuxième ensemble 13b.

Cette deuxième valeur limite est par exemple un deuxième rayon de courbure minimal ρ_{min2} ou une deuxième vitesse de lacet maximale r_{max2}.

Le module 62 de détermination est configuré pour déterminer chaque deuxième trajectoire limite à partir de :

- l'information de vitesse courante de l'aéronef,
- du réglage courant des dispositifs de déplacement latéral 13,
- des réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a,
- de réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du deuxième ensemble 13b,
- et de préférence, de l'état de piste et/ou des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1.

Comme décrit ci-dessus, les réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a comprennent un angle de braquage limite δdir_{lim} de la roulette de train avant 5 dans la direction de déplacement latéral considérée, cet angle de braquage limite étant de préférence égal à la borne inférieur δdir_{min}, ou supérieure δdir_{max}, selon la direction de déplacement considérée, de la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min}; \delta dir_{max}]$.

La deuxième trajectoire limite correspond alors à la trajectoire qu'il est possible d'atteindre en modifiant le réglage de la roulette de train avant 5 et des autres dispositifs de déplacement latéral 13, tout en restant dans la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min}; \delta dir_{max}]$.

Les réglages limites des dispositifs de déplacement latéral du deuxième ensemble 13b comprennent par exemple un différentiel de commande de force de freinage maximal ΔFmax.

De préférence, les paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1 comprenant une température courante des dispositifs de freinage 27a, 27b, le module 62 de détermination est configuré pour déterminer le différentiel de commande de force de freinage maximal ΔFmax à partir de cette température.

De manière générale, le différentiel de commande de force de freinage maximal ΔFmax est une fonction décroissante de la température, au moins lorsque la température est supérieure à une température seuil prédéterminée.

La deuxième trajectoire limite correspond alors à la trajectoire qu'il est possible d'atteindre en actionnant l'ensemble de freinage différentiel 27' et les autres dispositifs de déplacement latéral 13, sans risque d'endommagement des dispositifs de freinage.

L'ensemble de commande 50 est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale, notamment une trajectoire latérale de consigne, saisi par un pilote.

En variante, l'ensemble de commande 50 est configuré pour acquérir un ordre de trajectoire latérale généré par un pilote automatique.

Dans l'exemple illustré, l'ensemble de commande 50 comprend ainsi un dispositif de commande manuelle 72, actionnable par le pilote pour saisir l'ordre de trajectoire latérale.

De préférence, le dispositif de commande manuelle 72 comprend au moins un organe de commande déplaçable par un opérateur entre une première position et une deuxième position, un déplacement dudit organe de commande entre la première et la deuxième position étant destiné à générer un ordre de trajectoire latérale.

L'ordre de trajectoire latérale acquis par l'ensemble 50 de commande comprend alors un signal représentatif d'une valeur de position ou de déplacement de cet organe de commande.

De préférence, le dispositif de commande manuelle 72 comprend un palonnier actionnable par un pilote, depuis le cockpit.

Le palonnier comprend une pédale gauche, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une première direction (notamment vers la gauche) et une pédale droite, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une deuxième direction (notamment vers la droite) opposée à la première direction.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de commande manuelle 72 comprend en outre un organe d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Cet organe d'activation de l'ensemble de freinage différentiel est actionnable par le pilote, depuis le cockpit, entre une position activée, autorisant la mise en œuvre de l'ensemble de freinage différentiel pour générer un déplacement latéral de l'aéronef 1, et une position non activée, interdisant la mise en œuvre de l'ensemble de freinage différentiel pour générer un tel déplacement latéral.

Dans la position non activée, l'ensemble de freinage 27 peut être commandé uniquement pour exercer sur le train principal gauche 7a et sur le train principal droit 7b une même force FTa=FTb s'opposant au mouvement des trains principaux gauche 7a et droit 7b selon la direction principale de roulage et ainsi générer une force longitudinale s'opposant au mouvement longitudinal de l'aéronef.

L'organe d'activation est par ailleurs configuré pour générer un signal d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

De préférence, l'organe d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' est intégré au palonnier, comme décrit plus en détails ci-après.

On a ainsi illustré sur la Figure 6 un dispositif de commande manuelle 72 selon un mode de réalisation particulier.

Ce dispositif de commande manuelle 72 comprend un palonnier 80 actionnable par un pilote, depuis le cockpit de l'aéronef.

Le palonnier 80 comprend une pédale gauche 82a et une pédale droite 82b.

Chacune des pédales gauche 82a et droite 82b est actionnable par déplacement par le pilote depuis le cockpit.

En particulier, un actionnement de la pédale gauche 82a par appui sur cette pédale 82a est destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une première direction, notamment vers la gauche, et un actionnement de la pédale droite 82b par appui sur cette pédale 82b est destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de de lacet selon une deuxième direction opposée à la première direction, notamment vers la droite.

Chacune des pédales gauche 82a et droite 82b est déplaçable entre une position neutre p_n et une position de fin de course p_f.

De préférence, la position de fin de course est une position de butée, au-delà de laquelle les pédales gauche 82a et droite 82b ne peuvent être positionnées.

La position neutre p_n de la pédale gauche 82a, respectivement de la pédale droite 82b, correspond à une absence de commande de déplacement latéral vers la gauche, respectivement vers la droite.

De préférence, un jeu de commande est prévu autour de la position neutre p_n, de telle sorte qu'un déplacement des pédales gauche et droite au voisinage proche de la position neutre p_n soit également associé à une absence de commande de déplacement latéral vers la gauche ou vers la droite. Ce voisinage proche est par exemple défini entre la position neutre et une position donnée entre la position neutre et la position de fin de course, par exemple une position localisée à Xj% de la course totale entre la position neutre et la position de fin de course. La valeur Xj% est par exemple comprise entre 1% et 5%, notamment environ 3%.

La position de fin de course p_f de la pédale gauche 82a, respectivement de la pédale droite 82b, correspond à une commande de déplacement latéral maximal vers la gauche, respectivement vers la droite.

Notamment, la position de fin de course p_f de la pédale gauche 82a, respectivement de la pédale droite 82b, correspond à une commande de déplacement latéral selon la deuxième valeur limite d'un paramètre de trajectoire tel que déterminé par le module de détermination 62, par exemple le deuxième rayon de courbure minimal ρ_{min2} ou la deuxième vitesse de lacet maximale r_{max2}.

Chacune des pédales gauche 82a et 82b est déplaçable selon une unique course prédéterminée entre la position neutre p_n et la position de fin de course p_f.

Par unique course prédéterminée, on entend que chaque point de la pédale est configuré pour décrire un unique trajet lorsque la pédale est déplacée de la position neutre jusqu'à la position intermédiaire, à l'exclusion de tout autre trajet.

Ainsi, chaque point de la pédale, et de manière générale la pédale 82a ou 82b, est libre de se déplacer selon un unique degré de liberté le long de la course.

Par « unique degré de liberté », on entend que la position de la pédale en toute position sur la course prédéterminée est décrite par une unique variable p_c, sans que le mouvement de la pédale le long de la course ne soit limité à un mouvement de translation rectiligne.

La course prédéterminée de chaque pédale est par exemple un mouvement choisi parmi : un mouvement de translation, notamment un mouvement de translation rectiligne ou circulaire, un mouvement de rotation, ou une combinaison prédéterminée de ces mouvements.

Par exemple, comme illustré sur la Figure 6, chaque pédale 82a, 82b est montée sur une barre de palonnier 86a, 86b respective.

Par exemple, chaque pédale 82a, 82b est montée fixe sur la barre de palonnier 86a, 86b, et la barre de palonnier 86a, 86b est montée mobile en rotation autour d'un axe de rotation A, qui est dans l'exemple représenté un axe vertical.

En variante, cet axe de rotation est un axe latéral ou un axe longitudinal.

En variante, chaque pédale 82a, 82b est montée mobile par rapport à la barre de palonnier 86a, 86b, le mouvement de chaque pédale 82a, 82b par rapport à la barre de palonnier 86a, 86b étant couplé à la rotation de la barre de palonnier 86a, 86b de telle sorte qu'un mouvement de la pédale 82a, 82b entraîne un mouvement de rotation de la barre de palonnier 86a, 86b autour de son axe de rotation.

Dans un mode de réalisation préféré, chacune des pédales gauche 82a et droite 82b est entre outre mobile entre une position arrière p_a et la position neutre p_n, la position neutre p_n étant comprise entre la position arrière p_a et la position de fin de course, notamment à mi-course entre la position arrière p_a et la position de fin de course p_f.

Dans ce mode de réalisation, le palonnier 82 comprend un mécanisme de couplage du déplacement des pédales gauche 82a et droite 82b.

Ce mécanisme de couplage est configuré pour, lorsque la pédale gauche 82a ou droite 82b est déplacée vers la position de fin de course p_f, entraîner un déplacement de la pédale droite 82b ou gauche 82a respectivement vers la position arrière p_a.

Par exemple, le mécanisme de couplage est configuré pour, lorsque la pédale gauche 82a ou droite 82b est déplacée vers la position de fin de course p_f, entraîner un déplacement correspondant de la pédale droite 82b ou gauche 82a respectivement vers la position arrière p_a.

En particulier, le mécanisme de couplage est configuré pour entraîner un déplacement de la pédale droite 82b, respectivement de la pédale gauche 82a, jusqu'à la position arrière p_a, lorsque la pédale gauche 82a, respectivement la pédale droite 82b, est déplacée jusqu'à la position de fin de course p_f. Chaque pédale 82a, 82b est de préférence mobile selon une unique course prédéterminée entre la position arrière p_a et la position neutre p_n.

Par déplacement d'une pédale « vers » une position, on entend un déplacement de la pédale en direction de cette position, sans pour autant qu'il soit nécessaire que ce déplacement ait pour effet de déplacer la pédale « jusqu'à » cette position.

Ainsi, en un instant donné, seule une des configurations suivantes des pédales gauches et droite est possible :

- les pédales gauche 82a et droite 82b sont toutes deux situées à leur position neutre p_n respective, une telle configuration étant associée à une absence de commande de déplacement latéral, ou
- la pédale gauche 82a est positionnée entre la position neutre p_n (strictement) et la position de fin de course p_f et de ce fait, la pédale droite 82b est positionnée entre la position neutre p_n et la position arrière p_a, une telle configuration étant associée à une commande de déplacement latéral vers la gauche,
- la pédale droite 82b est positionnée entre la position neutre p_n (strictement) et la position de fin de course p_f et de ce fait, la pédale gauche 82a est positionnée entre la position neutre p_n et la position arrière p_a, une telle configuration étant associée à une commande de déplacement latéral vers la droite.

Dans l'exemple illustré, le mécanisme de couplage comprend les barres de palonnier 86a et 86b, qui sont solidaires l'une de l'autre, ou réalisées d'une pièce.

Les barres de palonnier 86a, 86b sont disposées de telle sorte qu'une rotation de l'une des barres 86a ou 86b autour de l'axe de rotation entraine une rotation identique de l'autre barre 86b, 86a. Ainsi, un déplacement d'une pédale vers la position de fin de course p_f est propre à entrainer un déplacement correspondant de l'autre pédale vers la position arrière p_a.

De préférence, chaque pédale 82a, 82b comprend un mécanisme de rappel, destiné à exercer une force de rappel sur la pédale 82a, 82b vers la position neutre p_n.

Le mécanisme de rappel est configuré pour ramener la pédale 82a, 82b vers la position neutre p_n en l'absence de force exercée par le pilote sur la pédale 82a, 82b.

Le déplacement de la pédale gauche 82a ou droite 82b est destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet par actionnement d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif, ou par actionnement d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et de l'ensemble de freinage différentiel 27', et ce en fonction de la position courante p_c de la pédale gauche 82a ou droite 82b le long de la course.

L'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' dépend de la position courante de la pédale gauche 82a ou droite 82b, par rapport à une position intermédiaire correspondant à une position d'activation p_{act} de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

En particulier, un déplacement de la pédale gauche 82a ou droite 82b entre la position neutre p_n et la position d'activation p_{act} selon la course prédéterminée est destiné à commander un mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1 par actionnement d'un

ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif.

Un tel actionnement est par exemple destiné à commander un mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1 par actionnement de la roulette de train avant 5 et/ou de la gouverne de direction 31.

Par ailleurs, un déplacement de la pédale gauche 82a ou droite 82b selon la course prédéterminée depuis la position d'activation p_{act} vers la position de fin de course p_f est destiné à commander un mouvement de l'aéronef 1 autour de l'axe de lacet Z_1-Z_1 par actionnement d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a, ainsi que de l'ensemble 27' de freinage différentiel, ce dernier étant actif.

Le palonnier 80 comprend par ailleurs un dispositif d'acquisition 90, configuré pour déterminer les positions instantanées ou courantes p_c de la pédale gauche 82a et de la pédale droite 82b.

Le dispositif d'acquisition 90 comprend par exemple un capteur gauche, propre à déterminer la position courante de la pédale gauche 82a, et un capteur droit, propre à déterminer la position courante de la pédale droite 82b.

Le dispositif d'acquisition 90 est par ailleurs configuré pour transmettre ces positions courantes p_c à l'ensemble de contrôle 52. Par exemple, le dispositif d'acquisition 90 est propre à transmettre à l'ensemble de contrôle 52 un signal représentatif de la position courante p_c.

La position courante p_c de la pédale gauche 82a ou droite 82b le long de la course prédéterminée constitue un ordre de trajectoire latérale donné.

En particulier, cette position courante p_c est représentative d'un paramètre de consigne de trajectoire latérale, notamment un rayon de courbure de consigne ou une vitesse de lacet de consigne.

Comme décrit plus en détails ci-après, l'ensemble de contrôle 52 est configuré pour déterminer, à partir de cet ordre de trajectoire latérale, un ordre de commande comprenant un ou plusieurs paramètres de consigne représentatif(s) de la trajectoire latérale de consigne.

La position de la pédale gauche 82a ou droite 82b, en deçà ou au-delà de la position d'activation, est par ailleurs associée à un ordre de non-activation ou d'activation respectivement, de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Par ailleurs, le palonnier 80 comprend un générateur de retour haptique 92, configuré pour générer un profil haptique sur chacune des pédales 82a, 82b de manière à faire ressentir au pilote actionnant ces pédales un franchissement de seuil correspondant au franchissement

de la position d'activation p_{act} par l'une des pédales, en direction de la position de fin de course p_f.

Le générateur de retour haptique 92 est en particulier configuré pour appliquer à chacune des pédales gauche 82a et droite 82b :

- un premier profil haptique lorsque la pédale gauche 82a, respectivement droite 82b, est déplacée de la position neutre p_n jusqu'à la position d'activation p_{act}, et
- un deuxième profil haptique, distinct du premier profil haptique, lorsque la pédale gauche 82a, respectivement droite 82b est déplacée de la position d'activation p_{act} vers la position de fin de course p_f.

Par exemple, le générateur de retour haptique 92 est configuré pour appliquer à chaque pédale 82a, 82b une force s'opposant au déplacement de la pédale 82a, 82b de la position neutre p_n vers la position de fin de course p_f. Le générateur de retour haptique 92 est notamment configuré pour appliquer à chaque pédale 82a, 82b une force variable Fh(p), en fonction de la position courante p_c de la pédale 82a, 82b le long de la course.

En particulier, le générateur de retour haptique 92 est configuré pour appliquer à la pédale gauche 82a, respectivement droite 82b, une force selon un premier profil de force lorsque la pédale gauche 82a, respectivement droite 82b, est déplacée de la position neutre p_n jusqu'à la position d'activation p_{act}, et selon un deuxième profil de force, distinct du premier profil de force, lorsque la pédale gauche 82a, respectivement droite 82b, est déplacée de la position d'activation p_{act} vers la position de fin de course p_f.

De préférence, la dérivée première de la force s'opposant à l'actionnement de la pédale de la position d'activation p_{act} de freinage différentiel vers la position de fin de course p_f est strictement supérieure à la dérivée première de la force s'opposant à l'actionnement de la pédale jusqu'à la position d'activation p_{act}.

En d'autres termes, le profil de force appliqué par le générateur de retour haptique 92 comprend un cran à la position d'activation p_{act}.

Dans le cas présent, on entend par dérivée première de la force Fh(p) par rapport à la position p au point d'activation p_{act} la dérivée première à droite.

En particulier, le générateur de retour haptique 92 est configuré pour appliquer une force s'opposant à l'actionnement de la pédale 82a, 82b au-delà de la position d'activation p_{act} qui est supérieure à toute force exercée par le générateur de retour haptique 92 pour s'opposer à l'actionnement de la pédale 82a, 82b entre la position neutre et la position d'activation.

L'application d'une telle force, générant un point dur pour le déplacement de la pédale 82a, 82b au-delà de la position d'activation, permet de faire ressentir au pilote la position d'activation, et ainsi d'avertir le pilote qu'un déplacement supplémentaire de la pédale aura pour effet d'activer l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Le palonnier 80 permet ainsi de minimiser la charge de travail du pilote, le déplacement de chaque pédale selon un unique degré de liberté permettant la commande des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et de l'ensemble de freinage différentiel 27', tout en conservant l'information relative à l'activation ou à la non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Le premier profil de force, appliqué entre la position neutre p_n et la position d'activation p_{act}, est par exemple tel que la force Fh(p) est une fonction croissante, en particulier linéaire, de la position de la pédale 82a, 82b la position neutre p_n et la position d'activation p_{act}. Le premier profil est de préférence tel que la dérivée première de la force Fh(p) par rapport à la position p est inférieure à une valeur maximale notée dFh_{max1}.

Le deuxième profil de force, appliqué entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f, comprend par exemple une première portion, appliquée entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f, ou entre la position d'activation p_{act} et une première position intermédiaire p_{i1}. Sur cette première portion, la force Fh(p) est une fonction croissante de la position de la pédale entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f.

La dérivée première de la force Fh(p) par rapport à la position p au point d'activation p_{act} est supérieure à la valeur maximale dF_{max1}.

Le cas échéant, le deuxième profil de force comprend une deuxième portion, appliquée entre la première position intermédiaire p_{i1} et la position de fin de course p_f.

Sur cette deuxième portion, la force Fh(p) est par exemple une fonction décroissante, ou une fonction décroissante jusqu'à une deuxième position intermédiaire p_{i2} puis croissante jusqu'à la position de fin de course p_f.

On a illustré à titre d'exemple sur la Figure 7 un profil de force appliqué par générateur de retour haptique 92, correspondant à la superposition d'un premier profil de force et d'un deuxième profil de force.

Le premier profil de force, appliqué de la position neutre p_n jusqu'à la position d'activation p_{act}, est tel que la force Fh(p) est une fonction linéaire croissante de la position, la dérivée de la force Fh(p) étant constante, donc égale à la valeur maximale dFh_{max1}.

Le deuxième profil de force comprend une première et une deuxième portions. Sur la première portion, de la position d'activation p_{act} jusqu'à la première position intermédiaire p_{i1}, la force Fh(p) est une fonction croissante de la position, la dérivée première de la force Fh(p) au point d'activation p_{act} étant supérieure à la valeur maximale dF_{max1}.

Sur la deuxième portion, de la première position intermédiaire p_{i1} jusqu'à la position de fin de course p_f, la force Fh(p) est d'abord décroissante jusqu'à une deuxième position intermédiaire p_{i2}, puis croissante jusqu'à la position de fin de course p_f.

A noter que sur la Figure 7, la valeur de la force Fh appliquée à la position neutre p_n n'est pas nécessairement nulle.

En outre, bien que la force appliquée entre la position arrière p_a et la position neutre p_n ne soit pas illustrée, une force non nulle est de préférence appliquée entre la position arrière p_a et la position neutre p_n, cette force étant par exemple constante.

De préférence, les premier et deuxième profils de force sont des profils variables, en fonction notamment du seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' tel que déterminé par le module de régulation 60.

En variante, les premier et deuxième profils de force sont des profils fixes prédéterminés.

Selon un mode de réalisation préféré, la position d'activation p_{act} est associée à une valeur variable d'un paramètre de consigne de trajectoire latérale, notamment un rayon de courbure de consigne ou une vitesse de lacet de consigne variable.

Dans ce mode de réalisation, la position d'activation p_{act} est en particulier associée au seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' tel que déterminé par le module de régulation 60.

Ce seuil d'activation correspond à une valeur seuil d'un paramètre de trajectoire latérale, notamment une valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} ou une valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

Dans ce mode de réalisation, la position d'activation p_{act} est par exemple variable le long de la course.

En variante, la position d'activation p_{act} est située en une position fixe le long de la course. Selon cette variante, chaque position des pédales 82a, 82b entre la position neutre p_n et la position de fin de course p_f est associée à un paramètre de consigne de trajectoire latérale variable, notamment un rayon de courbure de consigne variable ou une vitesse de lacet de consigne variable.

Selon un autre mode de réalisation, la position d'activation p_{act} est associée à une valeur fixe d'un paramètre de consigne, notamment une valeur fixe de rayon de courbure de consigne ou de vitesse de lacet de consigne. Selon cette variante, la position d'activation p_{act} est située en une position fixe le long de la course.

Le générateur de retour haptique 92 comprend par exemple un générateur de profils de force 94 et un générateur de force 96.

Le générateur de profils de force 94 est configuré pour déterminer les premier et deuxième profils de force devant être appliqués par le générateur de force 96.

En particulier, le générateur de profils de force 94 est configuré pour déterminer les profils de force en fonction du seuil d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' tel que déterminé par le module de régulation 60.

Notamment, à partir de ce seuil d'activation, le générateur de profils 94 est propre à déterminer la position d'activation p_{act} le long de la course, et à déterminer les profils de force à partir de cette position d'activation p_{act}.

Le générateur de force 96 est propre à exercer sur chaque pédale 82a, 82b une force s'opposant au déplacement de la pédale 82a, 82b de la position neutre vers la position de fin de course.

En particulier, le générateur de force 96 est propre à exercer sur chaque pédale 82a, 82b une force selon les profils de force déterminés par le générateur de profils 94.

En variante, le générateur de force 96 est propre à exercer sur chaque pédale 82a, 82b une force selon des profils de force fixes.

Le générateur de force 96 comprend au moins un actionneur, par exemple un actionneur gauche 98a, propre à exercer une force sur la pédale gauche 82a, et un actionneur droit 98b, propre à exercer une force sur la pédale droite 82b.

L'actionneur 98a, 98b comprend par exemple un moteur.

Le générateur de force 96 comprend de préférence un capteur propre à déterminer la position instantanée de la pédale 82a, 82b.

Le capteur est par exemple un capteur du dispositif d'acquisition 90.

Le générateur de force 96 comprend en outre une unité de commande 102, configurée pour commander à l'actionneur 98a, 98b l'application d'une force selon les profils de force déterminés par le générateur de profils 94.

L'unité de commande 102 est ainsi configurée pour commander à l'actionneur 98a, 98b l'application d'une force en fonction de la position courante de cette pédale telle que déterminée par le capteur.

En particulier, l'unité de commande 102 comprend une mémoire de stockage de profils de force déterminés par le générateur de profils 94.

L'unité de commande 102 est configurée pour recevoir du capteur, en chaque instant, la position courante des pédales 82a, 82b.

L'unité de commande 102 est par ailleurs configurée pour déterminer, d'après les profils de force, la force associée à cette position courante, et pour commander à l'actionneur 98a, 98b l'application de cette force.

De préférence, le dispositif de commande manuelle 72 comprend deux palonniers 80. En particulier, le cockpit de l'aéronef 1 comprend deux postes de pilotage, chacun comportant un palonnier 80. De préférence, le dispositif de commande manuelle 72 comprend en outre un dispositif de couplage des déplacements des pédales des palonniers, propre à, lorsque la pédale gauche 82a ou droite 82b d'un premier palonnier est déplacée par un pilote, entraîner un déplacement correspondant de la pédale gauche 82a ou droite 28b du deuxième palonnier.

Un tel couplage permet de simplifier la coordination des actions des pilotes.

L'ensemble de contrôle 52 de la trajectoire latérale est configuré pour contrôler les dispositifs de déplacement latéral 13 de telle sorte que l'aéronef 1 suive la trajectoire latérale de consigne.

En particulier, l'ensemble de contrôle 52 est configuré pour recevoir l'ordre de trajectoire latérale acquis par l'ensemble de commande 50.

L'ensemble de contrôle 52 est en outre configuré pour convertir cet ordre de trajectoire latérale en un ordre de commande, comprenant un ou plusieurs paramètres de consigne représentatif(s) de la trajectoire latérale de consigne.

L'ensemble de contrôle 52 est par ailleurs configuré pour déterminer, à partir des paramètres de consigne, des ordres de consigne à appliquer à un ou plusieurs des dispositifs de déplacement latéral 13 pour que l'aéronef suive la trajectoire latérale de consigne, et pour transmettre ces ordres de consigne aux dispositifs de déplacement latéral.

Notamment, l'ensemble de contrôle 52 est configuré pour déterminer les ordres de commande tels que l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 reste dans la plage d'angle de braquage de la roulette de train $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$, telle que déterminée par le module de limitation 58.

L'ensemble de contrôle 52 est en outre en configuré, si l'angle de braquage de consigne ne permet pas de suivre la trajectoire latérale de consigne, pour déterminer des ordres de consigne d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13 autres que la

roulette de train avant 5, notamment la gouverne de direction 31, l'ensemble de freinage 27 du train principal et/ou les moteurs électriques 23.

L'ensemble de contrôle 52 est par ailleurs apte à recevoir de l'ensemble de détermination 35 des paramètres relatifs au déplacement de l'aéronef au sol, notamment :

- des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef 1,
- des paramètres environnementaux, en particulier l'état de piste courant estimé ou supposé (piste sèche, mouillée ou glacée),
- des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1, notamment un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5,
- un réglage courant des dispositifs de déplacement latéral 13.

L'ensemble 52 de contrôle de la trajectoire comprend un module de commande 120 et un module de contrôle 130.

Le module de commande 120 est configuré pour recevoir l'ordre de trajectoire latérale, et pour convertir cet ordre de trajectoire latérale en un ordre de commande, comprenant un ou plusieurs paramètres de consigne représentatif(s) de la trajectoire latérale de consigne.

Ce ou ces paramètres de consigne sont notamment représentatif(s) de la direction de la trajectoire latérale et du rayon de courbure et/ou de la vitesse de lacet commandés.

Ces paramètres de consigne comprennent par exemple un rayon de courbure de consigne ρ_{cons} et/ou une vitesse de lacet de consigne r_{cons}, associé(s) à une direction de mouvement de consigne autour de l'axe de lacet.

Ces paramètres de consigne comprennent par exemple également un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

En particulier, le module de commande 120 est configuré pour recevoir du dispositif de commande 72 un signal représentatif d'une position courante ou d'un déplacement de l'organe de commande.

Par exemple, le dispositif de commande 72 comprenant un palonnier 80 selon le mode de réalisation décrit ci-dessus, le module de commande 120 est configuré pour recevoir du dispositif de commande 72, notamment du dispositif d'acquisition 90, les positions courantes p_c de la pédale gauche 82a et de la pédale droite 82b.

De préférence, le module de commande 120 est configuré pour recevoir du générateur de profil de force 94, notamment du générateur de profil de force 94, la position d'activation p_{act} courante.

Le module de commande 120 est configuré pour déterminer les paramètres de consigne en fonction de l'ordre de trajectoire latérale, d'informations relatives à la vitesse

courante de l'aéronef par rapport au sol, notamment le module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol, et de l'état de piste.

De préférence, le module de commande 120 est également configuré pour déterminer l'ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

En particulier, le module de commande 120 est configuré pour déterminer cet ordre d'activation ou de non activation à partir du signal d'activation ou de non activation transmis par l'organe d'activation, et/ou en fonction de l'ordre de trajectoire latérale.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de commande manuelle comprenant un palonnier 80 tel que décrit ci-dessus, le module de commande 120 est configuré pour déterminer l'ordre d'activation ou de non activation à partir d'une comparaison entre la position courante p_c de la pédale gauche 82a et/ou droite 82b et la position d'activation p_{act}.

Le module de commande 120 est ainsi configuré pour :

- générer un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si la position courante p_c de la pédale gauche 82a ou de la pédale droite 82b est au-delà de la position d'activation p_{act}, i.e. comprise entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f,
- générer un ordre de non-activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si aucune des positions courantes p_c de la pédale gauche 82a et droite 82b n'est au-delà de la position d'activation p_{act}

En variante, le module de commande 120 est configuré pour déterminer cet ordre d'activation ou de non activation en fonction du ou des paramètre(s) de trajectoire de consigne déterminés.

Notamment, le module de commande 120 est configuré pour déterminer l'ordre d'activation ou de non activation à partir d'une comparaison entre le(s) paramètre(s) de consigne et le(s) seuil(s) d'activation correspondant(s), tel(s) que déterminé(s) puis transmis par le module de régulation 60.

Le module de commande 120 est ainsi configuré pour :

- générer un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si le paramètre de consigne dépasse la valeur seuil de ce paramètre, notamment si le rayon de courbure de consigne ρ_{cons} est inférieur à la valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} et/ou si la vitesse de lacet de consigne r_{cons} est supérieure à la valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil},
- générer un ordre de non-activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si le paramètre de consigne ne dépasse pas la valeur seuil de ce paramètre, notamment si le

rayon de courbure de consigne ρ_{cons} est supérieur à la valeur seuil de rayon de courbure ρ_{seuil} et si la vitesse de lacet de consigne r_{cons} est inférieure à la valeur seuil de vitesse de lacet r_{seuil}.

Le module de commande 120 est propre à transmettre au module de contrôle 130 le ou les paramètre(s) de consigne de trajectoire.

Le module de contrôle 130 est configuré pour déterminer, à partir de l'ordre de trajectoire latérale, en particulier des paramètres de consigne, des ordres de consigne à appliquer à un ou plusieurs des dispositifs de déplacement latéral 13 pour que l'aéronef suive la trajectoire latérale de consigne.

Le module de contrôle 130 est en outre configuré pour transmettre ces ordres de consigne aux dispositifs de déplacement latéral 13.

Le module de contrôle 130 est en particulier pour déterminer un angle de braquage de consigne δdir_{cons}, compris dans la plage d'angle de braquage [δdir_{min} ; δdir_{max}], l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} étant déterminé de telle sorte que, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant 5, l'aéronef 1 suive ou tende vers la trajectoire latérale de consigne.

En d'autres termes, l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} est déterminé de manière à engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant 5, une trajectoire effective de l'aéronef comprenant un mouvement latéral de l'aéronef 1 selon la direction donnée et tel que le rayon de courbure de cette trajectoire effective soit supérieur ou égal au rayon de courbure de consigne.

A cette fin, le module de contrôle 130 est de préférence configuré pour déterminer, en fonction de l'ordre de commande de trajectoire latérale, un angle de braquage initial δdir_{ini} de la roulette de train avant.

Cet angle de braquage initial δdir_{ini} est par exemple déterminé de manière à engendrer, s'il était appliqué à la roulette de train avant 5, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

Le module de contrôle 130 est par ailleurs configuré pour comparer l'angle de braquage initial δdir_{ini} à la plage d'angle de braquage [δdir_{min} ; δdir_{max}], et pour appliquer une correction à l'angle de braquage initial δdir_{ini} s'il n'est pas compris dans la plage d'angle de braquage, pour déterminer l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Lorsque l'angle de braquage initial δdir_{ini} n'est pas compris dans la plage d'angle de braquage, l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} est par exemple égal à la borne inférieure ou supérieure respectivement, de la plage d'angle de braquage [δdir_{min} ; δdir_{max}].

Le module de contrôle 130 est par ailleurs configuré pour transmettre une instruction de braquage à la roulette de train avant 5, en particulier au dispositif d'orientation 9 de la roulette de train avant 5, afin d'orienter la roulette de train avant 5 selon l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Le module de contrôle 130 est en outre en configuré pour déterminer, si l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} ne permet pas de suivre la trajectoire latérale de consigne, des ordres de consigne d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13 autres que la roulette de train avant 5, notamment la gouverne de direction 31, l'ensemble de freinage 27 du train principal, l'ensemble de moteurs électriques 23 et/ou les moteurs 19.

En particulier, le module de contrôle 130 est configuré pour déterminer une orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 et/ou une consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} de l'ensemble de freinage différentiel 27', et optionnellement une consigne de fonctionnement des moteurs électriques 23a, 23b et/ou des moteurs 19, utilisés en mode différentiel.

Cette orientation de consigne δn_{cons}, cette consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} et/ou cette consigne de fonctionnement des moteurs 23a, 23b et 19 sont déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction 31, à l'ensemble de freinage différentiel 27', aux moteurs électriques 23a, 23b et aux moteurs 19 respectivement, l'angle de braquage de la roulette avant étant égal à l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

Par exemple, l'orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31, la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} et la consigne de fonctionnement des moteurs sont déterminées de manière à compenser la différence entre un angle de braquage initial qui aurait été nécessaire pour suivre la trajectoire latérale de consigne, et l'angle de braquage de consigne, lorsque celui-ci ne permet pas de suivre cette trajectoire.

Le module de contrôle 130 est ainsi de préférence configuré pour déterminer l'orientation de consigne δn_{cons} et/ou la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons}à partir de la différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Le module de contrôle 130 est par ailleurs configuré pour transmettre une instruction d'orientation à la gouverne de direction 31, en particulier au dispositif d'orientation 31 de la gouverne, afin d'orienter la gouverne de direction 31 selon l'orientation de consigne δn_{cons}.

Le cas échéant, le module de contrôle 130 est également configuré pour transmettre une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27', en

particulier au dispositif de contrôle 29 de l'ensemble de freinage différentiel, afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

De préférence, le module de contrôle 130 est en outre configuré pour transmettre à l'ensemble 23 de moteurs électriques, en particulier au dispositif de contrôle 25 des moteurs électriques, une instruction de fonctionnement afin d'appliquer aux moteurs électriques 23a, 23b la consigne de fonctionnement déterminée.

De préférence, lorsque l'ordre de commande comprend un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', le module de contrôle 130 est configuré pour déterminer l'orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 et la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} de l'ensemble de freinage différentiel 27', et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction 31 et l'instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

L'orientation de consigne δn_{cons} et la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} sont alors de préférence déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction 31 et à l'ensemble de freinage différentiel 27' respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

En revanche, lorsque l'ordre de commande comprend un ordre de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', le module de contrôle 130 est configuré pour déterminer l'orientation de consigne de la gouverne de direction 31, à l'exclusion de la consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel 27', et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction 31, sans transmettre de consigne de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

De préférence, l'orientation de consigne est alors déterminée de manière à engendrer, lorsqu'elle est appliquée à la gouverne de direction 31, l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne et l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

De préférence, le module de contrôle 130 est en outre configuré pour déterminer l'orientation de consigne de la gouverne de direction 31 en fonction des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol.

En effet, dans certaines conditions, notamment lorsque l'aéronef 1 roule à basse vitesse, l'orientation de la gouverne de direction n'a que peu d'effet sur la trajectoire latérale de l'aéronef.

Dans un tel cas, le module de contrôle 130 est par exemple configuré pour déterminer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} de l'ensemble de freinage différentiel 37', à l'exclusion de l'orientation de consigne de la gouverne de direction 31, et pour transmettre l'instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

La consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} est alors de préférence déterminée de manière à engendrer, lorsqu'elle est appliquée à l'ensemble de freinage différentiel 27', l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

De préférence, le module de contrôle 130 est par ailleurs configuré pour déterminer les ordres de commande en fonction d'un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5, tel qu'acquis par l'ensemble 35 de détermination.

En particulier, en cas de dysfonctionnement du système d'orientation de la roulette de train avant 5, la roulette de train avant 5 peut être non orientable, tout en restant libre de rotation.

Dans un tel cas, le module de contrôle 130 est configuré pour déterminer une orientation de consigne de la gouverne de direction 31 et/ou une consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel 27', et optionnellement une consigne de fonctionnement des moteurs électriques 23a, 23b, et/ou des moteurs 19, utilisés en mode différentiel. Ces consignes sont déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction 31, à l'ensemble de freinage différentiel 27' aux moteurs électriques 23a, 23b et/ou aux moteurs 19, respectivement, un mouvement latéral de l'aéronef selon la trajectoire latérale de consigne.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de commande manuelle comprenant un palonnier 80 tel que décrit ci-dessus, le module de contrôle 130 est configuré pour, sélectivement :

- si aucune des positions courantes p_c des pédales gauche et droite n'est comprise entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f, transmettre au moins une instruction de consigne aux dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a, à l'exclusion de l'ensemble de freinage différentiel 27', cette instruction de consigne étant configurée pour engendrer, lorsqu'elle est appliquée aux dispositifs de déplacement latéral du

premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ou tendant vers la trajectoire latérale de consigne,

- si la position courante p_c de la pédale gauche ou droite est comprise entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f, transmettre des instructions de consigne aux dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et à l'ensemble de freinage différentiel 27', ces instructions de consigne étant configurées pour engendrer, lorsqu'elles sont appliquées aux dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et à l'ensemble de freinage différentiel 27', un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ou tendant vers la trajectoire latérale de consigne.

On a illustré sur la Figure 8 un module de contrôle 130 selon un mode particulier de réalisation de l'invention.

Dans ce mode de réalisation, le module de contrôle 130 comprend un sous-module 132 de détermination de l'angle de braquage initial δdir_{ini}.

Le sous-module 132 est configuré pour déterminer l'angle de braquage initial δdir_{ini} de la roulette de train avant 5 en fonction de l'ordre de commande de trajectoire latérale transmis par le module de commande 120, notamment un rayon de courbure de consigne ρ_{cons} et/ou une vitesse de lacet de consigne r_{cons}, associé(s) à une direction de mouvement de consigne autour de l'axe de lacet.

De préférence, le sous-module 132 est configuré pour déterminer l'angle de braquage initial δdir_{ini} en outre en fonction d'au moins une information relative à la vitesse courante de l'aéronef, notamment en fonction du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant et de la vitesse de lacet courante r.

Le module de contrôle 130 comprend par ailleurs un sous-module 134 de détermination de l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Le sous-module 134 est configuré pour recevoir du module de limitation 58 la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5.

Le sous-module 134 est par ailleurs configuré pour recevoir du sous-module 132 l'angle de braquage initial δdir_{ini}.

Le sous-module 134 est configuré pour comparer l'angle de braquage initial δdir_{ini} à la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$, et pour appliquer une correction à l'angle de braquage initial δdir_{ini} s'il n'est pas compris dans la plage d'angle de braquage, pour déterminer l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Lorsque l'angle de braquage initial δdir_{ini} n'est pas compris dans la plage d'angle de braquage, l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} est par exemple égal à la borne supérieure ou inférieure respectivement, de la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$.

Le module de contrôle 130 comprend en outre un sous-module 136 de répartition d'ordres de consigne complémentaires.

Le sous-module de répartition 136 est configuré pour recevoir du sous-module 132 l'angle de braquage initial δdir_{ini}.

Le sous-module de répartition 136 est par ailleurs configuré pour recevoir du sous-module 134 l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Le sous-module de répartition 136 est en outre configuré pour recevoir de l'ensemble de détermination 35 des informations relatives au déplacement de l'aéronef 1, notamment :

- au moins une information de vitesse courante, en particulier le module $|V_S|$ du vecteur vitesse courant de l'aéronef 1 ;

- des paramètres de fonctionnement de l'aéronef 1, en particulier un état E_{dir} de fonctionnement de la roulette de train avant 5.

Le sous-module de répartition 136 est par ailleurs configuré pour recevoir du module de commande 120 un ordre d'activation ou de non activation, noté Act_{diff} sur la figure 8, de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Le sous-module de répartition 136 est configuré pour comparer l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} à l'angle de braquage initial δdir_{ini}.

Si l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} est inférieur, en valeur absolue, à l'angle de braquage initial δdir_{ini}, le sous-module 136 est configuré pour déterminer des ordres de consigne d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13 autres que la roulette de train avant 5 de telle sorte que, lorsque ces ordres de consigne sont appliqués, l'angle de braquage de la roulette 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}, l'aéronef 1 suive une trajectoire conforme à la trajectoire latérale de consigne.

Le sous-module de répartition 136 est configuré pour déterminer l'orientation de consigne δn_{cons} et/ou la consigne de freinage dissymétrique à partir de la différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons} ou un angle de braquage subi, lorsque la roulette de train avant 5 n'est pas orientable, le cas échéant.

En particulier, le sous-module de répartition 136 est configuré pour déterminer l'orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 en fonction de la différence

entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}, et en fonction d'une information de vitesse courante de l'aéronef, notamment du module $|V_S|$ du vecteur vitesse courant.

En effet, l'effet de l'orientation de la gouverne de direction sur la trajectoire latéral est d'autant plus élevé que le module $|V_S|$ du vecteur vitesse courant est élevé.

Dans ce mode de réalisation, l'orientation de la gouverne de direction 31 est destinée à compenser, au moins partiellement, la différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Le sous-module de répartition 136 est par ailleurs configuré pour transmettre une instruction d'orientation à la gouverne de direction 31, en particulier au dispositif d'orientation 31 de la gouverne, afin d'orienter la gouverne de direction 31 selon l'orientation de consigne δn_{cons}.

Le sous-module de répartition 136 est par ailleurs configuré pour déterminer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} en fonction :

- d'un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27',
- de la différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons},
- d'une information de vitesse courante de l'aéronef, notamment du module $|V_S|$ du vecteur vitesse courant, et
- d'un état de fonctionnement du dispositif d'orientation de la roulette de train avant 5.

En particulier, si l'ordre reçu du module de commande 120 par le sous-module de répartition 136 est un ordre de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', le sous-module 136 est configuré pour générer une consigne de non activation à destination de l'ensemble de freinage différentiel 27'. Cette consigne de non activation est destinée à assurer un différentiel de force nul entre les dispositifs de freinage gauche 27a et droite 27b.

Le sous-module de répartition 136 est configuré pour transmettre cette consigne de non activation à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Si l'ordre reçu du module de commande 120 par le sous-module de répartition 136 est un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', et en l'absence de dysfonctionnement du dispositif d'orientation de la roulette de train avant 5, le sous-module 136 est configuré pour déterminer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} en fonction de la différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons},

de l'information de vitesse courante de l'aéronef, et de préférence de l'orientation de consigne δn_{cons}.

Le sous-module de répartition 136 est également configuré pour transmettre une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27', en particulier au dispositif de contrôle 29 de l'ensemble de freinage différentiel, afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Par ailleurs, en cas de dysfonctionnement du système d'orientation de la roulette de train avant 5, la roulette de train avant 5 étant non orientable mais libre de pivoter, le sous-module 136 est configuré pour déterminer des ordres de consigne d'un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13 autres que la roulette de train avant 5 de telle sorte que, lorsque ces ordres de consigne sont appliqués, l'aéronef 1 suive une trajectoire conforme à la trajectoire latérale de consigne.

Ainsi, le sous-module de répartition 136 est configuré pour déterminer une orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 et/ou une consigne de freinage dissymétrique de l'ensemble de freinage différentiel 27', et optionnellement une consigne de fonctionnement des moteurs électriques 23a, 23b, utilisés en mode différentiel.

En particulier, le sous-module de répartition 136 est configuré pour déterminer une orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 en fonction du ou des paramètre(s) de consigne de trajectoire ou de l'angle de braquage initial δdir_{ini}, et d'une information de vitesse courante de l'aéronef, notamment du module $|V_S|$ du vecteur vitesse courant.

En outre, si l'ordre reçu du module de commande 120 par le sous-module de répartition 136 est un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27', et en cas de dysfonctionnement du dispositif d'orientation de la roulette de train avant 5, le sous-module 136 est configuré pour déterminer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} en fonction du ou des paramètre(s) de consigne de trajectoire ou de l'angle de braquage initial δdir_{ini}, de l'information de vitesse courante de l'aéronef, et de préférence, de l'orientation de consigne δn_{cons}.

L'ensemble d'affichage 54 comprend un afficheur 140 et un module de génération 142 d'affichage sur l'afficheur.

L'afficheur 140 est par exemple un afficheur au moins partiellement transparent, tel qu'un écran semi-transparent destiné à être placé devant un pare-brise du cockpit, un système

de projection d'images sur le pare-brise du cockpit, un pare-soleil semi-transparent, un viseur de casque, une lunette semi-transparente proche de l'œil.

En variante, l'afficheur est un écran tête basse intégré dans le tableau de bord du cockpit de l'aéronef 1.

Le module de génération 142 comprend des moyens de traitement de l'information graphique, par exemple un processeur graphique et une mémoire graphique associée. Le processeur graphique est adapté pour traiter l'information graphique stockée dans la mémoire graphique et réaliser l'affichage sur l'afficheur 140 de cette information ou d'une représentation de celle-ci.

Le module de génération 142 est configuré pour afficher sur l'afficheur 140 une visualisation d'au moins une portion de la piste sur laquelle roule l'aéronef 1.

Cette visualisation de la portion de piste est par exemple une visualisation égocentrée de la portion de piste, c'est-à-dire vue d'un point de vue correspondant à la position courante de l'aéronef 1, par exemple un point de vue situé dans le cockpit de l'aéronef 1.

En variante, cette visualisation est une représentation exocentrée de la portion de piste, c'est-à-dire vue d'une caméra virtuelle située en un point autre que la position courante de l'aéronef. Notamment, une image exocentrée peut correspondre à une image qui serait vue par une caméra virtuelle située à l'extérieur de l'aéronef et visualisant l'aéronef vu de derrière, de dessus et/ou de côté.

La portion de piste est par exemple représentative du terrain situé devant l'aéronef, à proximité d'une aile de l'aéronef, ou autour de l'aéronef.

La visualisation de la portion de piste est par exemple une visualisation réelle de la portion de piste. Une telle visualisation réelle peut être égocentrée ou exocentrée.

Par exemple, l'ensemble d'affichage 54 comprend une caméra embarquée dans l'aéronef, en particulier dans le nez ou à l'extrémité d'une aile de l'aéronef.

Sur la base des données des images acquises par la caméra, le module de génération 142 est propre à afficher sur l'afficheur 140 une image réelle de l'environnement présent à l'avant ou autour de l'aéronef. Cette visualisation réelle est alors une représentation égocentrée.

En variante, l'ensemble d'affichage 54 est configuré pour recevoir d'une caméra extérieure à l'aéronef, par exemple une caméra située sur la piste, des images représentatives de la portion de piste, et pour générer l'affichage d'une image réelle de l'environnement présent à l'avant ou autour de l'aéronef à partir des images reçues de cette caméra. Cette visualisation réelle est alors généralement exocentrée.

En variante, l'afficheur 140 étant un afficheur tête haute, cette visualisation réelle est par exemple vue à travers le pare-brise du cockpit.

Selon un autre exemple, la visualisation de la portion de piste est une représentation synthétique de la portion de piste.

Notamment, le module de génération 142 est configuré pour générer cette représentation synthétique à partir d'une position courante de l'aéronef 1 sur la piste et d'une base de données topographiques enregistrée sur une mémoire.

Le module de génération 142 est par exemple configuré pour recevoir de l'ensemble de détermination 35 la position courante de l'aéronef.

La représentation synthétique est par exemple égocentrée. En variante, elle est exocentrée. Une telle représentation exocentrée correspond par exemple à une image qui serait vue par une caméra virtuelle située à l'extérieur de l'aéronef et visualisant l'aéronef.

Le module de génération 142 est en outre configuré pour afficher sur l'afficheur 140 un ensemble de courbes comprenant:

- une courbe de trajectoire courante, représentative de la trajectoire courante de l'aéronef,

- au moins une courbe limite représentative d'une trajectoire limite de l'aéronef 1.

La trajectoire courante comprend une succession de points de passage prévus d'au moins un élément de l'aéronef 1, à conditions inchangées des dispositifs de déplacement latéral du premier et du deuxième ensembles 13a, 13b, c'est-à-dire en l'absence de toute modification du réglage de ces dispositifs.

Ce ou ces élément(s) est par exemple choisi parmi la roulette de train avant 5, le nez de l'aéronef, ou l'extrémité d'une aile de l'aéronef ou la queue de l'aéronef 1.

La trajectoire limite comprend une succession de points de passage limites pouvant être atteints par ce(s) élément(s) de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral 13.

Chaque trajectoire limite est par exemple une trajectoire limite atteignable en actionnant:

- uniquement la roulette de train avant 5, ou
- uniquement la gouverne de direction 31, ou
- uniquement l'ensemble de freinage différentiel 27', ou
- uniquement l'ensemble moteur différentiel 23', ou
- au moins deux dispositifs de déplacement latéral.

Par « trajectoire limite », on entend que tout point situé au-delà de cette trajectoire limite, i.e. non compris entre une trajectoire longitudinale et cette trajectoire limite, ne peut être atteint en actionnant le ou les dispositif(s) de déplacement latéral 13 considéré(s).

Le module de génération 142 est de préférence configuré pour acquérir ces trajectoires du module de détermination 62 de trajectoires.

Ainsi, la courbe limites est de préférence représentative de la trajectoire limite telles que déterminée par le module de détermination 62.

Le module de génération 142 est configuré pour afficher ces courbes sur l'afficheur 140 en superposition de la visualisation de la piste.

Ainsi, l'affichage de ces courbes permet au pilote de visualiser directement sur l'afficheur la trajectoire courante, et la trajectoire limite.

De préférence, le module de génération 142 est configuré pour afficher au moins une première trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1 et au moins une deuxième trajectoire limite atteignable par l'aéronef 1.

Par exemple, le module de génération 142 est configuré pour afficher au moins une première courbe limite représentative d'une première trajectoire limite atteignable en actionnant un premier groupe de dispositifs de déplacement latéral, et une deuxième courbe limite représentative d'une deuxième trajectoire limite atteignable en actionnant un deuxième groupe de dispositifs de déplacement latéral, distinct du premier groupe. Chaque groupe comporte un ou plusieurs dispositifs de déplacement latéral 13.

Le module de génération 142 est ainsi configuré pour afficher sur l'afficheur 140 un ensemble de courbes comprenant:

- une courbe de trajectoire courante, représentative de la trajectoire courante de l'aéronef,
- une première courbe limite représentative d'une première trajectoire limite de l'aéronef 1, et
- une deuxième courbe limite représentative d'une deuxième trajectoire limite.

La première et la deuxième courbes limites sont de préférence représentatives des première et deuxième trajectoires limites telles que déterminées par le module de détermination 62.

Ainsi, l'affichage de ces courbes permet au pilote de visualiser directement sur l'afficheur la trajectoire courante, la première trajectoire limite et la deuxième trajectoire limite.

De préférence, comme décrit ci-dessus, la première trajectoire limite comprend une succession de premiers points de passage limites pouvant être atteints par le(s) élément(s)

considéré(s) de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant non-actif.

La deuxième trajectoire limite comprend une succession de deuxièmes points de passage limites pouvant être atteints par ce(s) élément(s) de l'aéronef 1, en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a et l'ensemble de freinage différentiel 27', celui-ci étant actif.

La courbe de trajectoire courante est représentative de la trajectoire courante sur une distance Dc d'affichage de trajectoire courante prédéterminée.

Chaque courbe limite est représentative de la trajectoire limite sur une distance Dl d'affichage de trajectoire limite prédéterminée.

Par exemple, la première courbe limite est représentative de la première trajectoire limite sur une distance Dl1 d'affichage de première trajectoire limite prédéterminée, et la deuxième courbe limite est représentative de la deuxième trajectoire limite sur une distance Dl2 d'affichage de deuxième trajectoire limite prédéterminée.

La distance Dc d'affichage de courbe de trajectoire courante est par exemple distincte des distances Dl d'affichage de trajectoire limite.

Les distances Dl1 et Dl2 d'affichage des première et deuxième trajectoires limites sont par exemple identiques.

En variante, les distances Dl1 et Dl2 d'affichage sont distinctes.

De préférence, les distances Dc, Dl1 et Dl2 d'affichage sont variables.

De préférence, chaque distance Dc, Dl1 et Dl2 d'affichage est fonction de la vitesse courante de l'aéronef, en particulier du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant de l'aéronef.

La Figure 9 illustre à titre d'exemple la distance d'affichage Dc, Dl1 ou Dl2 (notée D en ordonnée sur la Figure 9), en fonction du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant. Dans cet exemple, chaque distance Dc, Dl1 et Dl2 d'affichage est une fonction croissante, notamment linéaire, du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant lorsque le module $|V_S|$ est comprise dans une plage de vitesse prédéterminée [V1 ; V2]. Dans cette plage de vitesse, chaque courbe courante ou limite est de préférence représentative de la trajectoire courante ou limite sur une durée constante, indépendamment de la vitesse.

Lorsque le module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant est inférieur au seuil V1 ou supérieur au seuil V2, la distance Dc, DI1, DI2 d'affichage est constante, i.e. indépendante de la vitesse.

Notamment, lorsque le module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant est inférieur au seuil V1, respectivement supérieur au seuil V2, la distance Dc, DI1, DI2 d'affichage est égale à une distance constante Dmin, respectivement Dmax.

L'ensemble de génération d'affichage 142 est configuré pour déterminer chaque distance d'affichage Dc, DI1, DI2 en fonction du module $|V_S|$ du vecteur vitesse sol courant de l'aéronef 1.

De préférence, comme illustré sur la Figure 9, l'ensemble de génération d'affichage 142 est configuré pour afficher sur l'afficheur 140 la courbe de trajectoire courante, la première courbe limite et/ou la deuxième courbe limite lorsqu'une vitesse de l'aéronef 1 est comprise entre une borne minimale V_{min} et une borne maximale V_{max} prédéterminées, et pour supprimer de l'afficheur 140 la courbe de trajectoire courante, la première courbe limite et/ou la deuxième courbe limite lorsque la vitesse de l'aéronef 1 est inférieure à la borne minimale V_{min} ou supérieure à la borne maximale V_{max}.

La suppression des courbes de l'afficheur 140 permet d'éviter de surcharger l'afficheur en informations qui sont peu utiles dans certaines circonstances, par exemple lorsque l'aéronef roule à très basse vitesse ou à haute vitesse lors d'une phase de décollage, l'aéronef ayant alors généralement une trajectoire longitudinale.

De préférence, le module de génération 142 est configuré pour afficher sur l'afficheur 140 :

- une première courbe limite gauche représentative d'une première trajectoire limite gauche comprenant un mouvement de lacet dans la première direction (vers la gauche) et/ou une première courbe limite droite, représentative d'une première trajectoire limite droite comprenant un mouvement de lacet dans la deuxième direction (vers la droite),
- une deuxième courbe limite gauche représentative d'une deuxième trajectoire limite gauche comprenant un mouvement de lacet dans la première direction et/ou une deuxième courbe limite droite, représentative d'une deuxième trajectoire limite droite comprenant un mouvement de lacet dans la deuxième direction.

De préférence, le module de génération 142 est configuré pour afficher sélectivement sur l'afficheur 140 la première et/ou la deuxième courbe limite correspondant à une trajectoire orientée dans la même direction que la trajectoire courante de l'aéronef 1, à

l'exclusion de la première et/ou de la deuxième courbe limite correspondant à une trajectoire orientée dans la direction opposée à la direction courante de la trajectoire.

Par « direction » d'une trajectoire, on entend la direction du déplacement latéral de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon cette trajectoire (i.e. selon un angle positif ou négatif).

Ainsi, le module de génération 142 est configuré pour afficher sélectivement sur l'afficheur 140 :

- au moins l'une des première courbe limite gauche et deuxième courbe limite gauche si la trajectoire courante est orientée dans la première direction, ou

- au moins l'une des première courbe limite droite et deuxième courbe limite droite si la trajectoire courante est orientée dans la deuxième direction.

On comprendra que l'affichage sélectif d'au moins l'une des première et deuxième courbes limites gauches implique que les première et deuxième courbes limites droites ne sont pas affichées.

De même, l'affichage sélectif d'au moins l'une des première et deuxième courbes limites droites implique que les première et deuxième courbes limites gauches ne sont pas affichées.

Un tel affichage permet d'éviter de surcharger l'afficheur 140 d'informations peu utiles au pilote.

Selon un mode de réalisation préféré, le module de génération 142 est configuré pour afficher sélectivement sur l'afficheur 140 au moins l'une des première et deuxième courbes limites gauches si et seulement si la trajectoire courante est orientée dans la première direction et une des conditions suivantes est remplie :

- l'angle de lacet λ de l'aéronef 1 étant croissant, la trajectoire courante est telle que l'angle de lacet λ est supérieur à un angle de lacet seuil d'affichage gauche λ_a, ou

- l'angle de lacet de l'aéronef 1 étant décroissant, la trajectoire courante est telle que l'angle de lacet est supérieur à un angle de lacet seuil d'effacement gauche λ_e (inférieur à l'angle de lacet seuil d'affichage gauche λ_a).

De même, le module de génération 142 est configuré pour afficher sélectivement sur l'afficheur 140 au moins l'une des première et deuxième courbes limites droite si et seulement si la trajectoire courante est orientée dans la deuxième direction et une des conditions suivantes est remplie :

- l'angle de lacet de l'aéronef 1 étant décroissant (donc croissant en valeur absolue), la trajectoire courante est telle que l'angle de lacet λ est inférieur à un angle de lacet seuil d'affichage droit $\lambda_{a'}$, ou

- l'angle de lacet de l'aéronef 1 étant croissant (donc décroissant en valeur absolue), la trajectoire courante est telle que l'angle de lacet est inférieur à un angle de lacet seuil d'effacement droit $\lambda_{e'}$ (supérieur à l'angle de lacet seuil d'affichage droit $\lambda_{a'}$).

De préférence, les angles de lacet seuils d'affichage gauche λ_a et droit $\lambda_{a'}$ sont égaux en valeur absolue, et les angles de lacet seuils d'effacement gauche λ_e et droit $\lambda_{e'}$ sont égaux en valeur absolue.

On a ainsi illustré sur la Figure 10 un profil d'affichage selon de mode de réalisation. Sur cette figure, les valeurs '1' et '-1' en ordonnée correspondent à un affichage par le module de génération 142 des première et/ou deuxième courbes limites gauches ou droites respectivement. La valeur '0' correspond à une absence d'affichage des courbes limites.

Un tel affichage avec hystérésis permet d'éviter un effet de clignotement par affichages et disparitions répétées des courbes lorsque l'angle de lacet de l'aéronef est au voisinage de l'angle de lacet seuil d'affichage.

Par ailleurs, la courbe de trajectoire courante est de préférence affichée selon un format graphique distinct du format graphique des première et deuxième courbes limites.

Un format graphique est défini par un ensemble de paramètres d'affichage, notamment une couleur, un type de trait (continu, pointillé...) et/ou une épaisseur de trait.

Notamment, au moins l'un des paramètres d'affichage du format graphique de la courbe de trajectoire courante diffère du paramètre correspondant du format graphique de la première courbe limite.

De même, au moins l'un des paramètres d'affichage du format graphique de la courbe de trajectoire courante diffère du paramètre correspondant du format graphique de la deuxième courbe limite.

De préférence, au moins l'un des paramètres d'affichage du format graphique de la courbe de trajectoire courante diffère du paramètre correspondant du format graphique de la première courbe limite et du paramètre correspondant du format graphique de la deuxième courbe limite.

De préférence, le format d'affichage de la première courbe limite diffère également du format d'affichage de la deuxième courbe limite.

Un tel affichage permet un repérage plus efficace des trajectoires, en particulier une identification plus rapide des types de trajectoire associés aux courbes affichées.

De préférence, des indications textuelles sont en outre affichées sous la courbe de trajectoire courante, la première courbe limite et/ou la deuxième courbe limite. Ces indications textuelles sont indicatives du type de courbe associé, notamment courbe de trajectoire courante, première ou deuxième courbe limite, et permettent une identification encore plus rapide des types de trajectoire associés aux courbes affichées.

De préférence, le module de génération 142 est configuré pour afficher sur l'afficheur 140 plusieurs courbes représentatives de trajectoires courantes de plusieurs éléments de l'aéronef, plusieurs premières courbes limites représentatives de premières trajectoires limites de ces éléments, et plusieurs deuxièmes courbes limites représentatives de deuxièmes trajectoires limites de ces éléments.

Par exemple, ces éléments sont les extrémités des deux ailes de l'aéronef 1.

Notamment, le module de génération 142 est configuré pour afficher deux courbes de trajectoire courantes, chacune représentative de la trajectoire courante d'une extrémité d'une aile respective.

Ces deux courbes courantes définissent une surface sur la piste qui sera balayée par l'aéronef s'il suit la trajectoire courante.

Le module de génération 142 est également configuré pour afficher deux premières courbes limites, chacune représentative d'une première trajectoire limite d'une extrémité d'une aile respective, et deux deuxièmes courbes limites, chacune représentative d'une deuxième trajectoire limite d'une extrémité d'une aile respective.

Une telle représentation permet ainsi au pilote de visualiser et d'éviter d'éventuels obstacles qui pourraient être situés sur la piste, selon la trajectoire courante ou une trajectoire visée.

De préférence, dans ce mode de réalisation, le module de génération 142 est configuré pour afficher uniquement la première et/ou la deuxième courbe limite d'une aile si ces courbes limites sont orientées dans la direction associée au côté de l'aile.

En particulier, le module de génération 142 est configuré pour afficher uniquement la première et/ou la deuxième courbe limite gauche de l'aile gauche et la première et/ou la deuxième courbe limite droite de l'aile droite.

De préférence, le module de génération 142 est configuré pour afficher uniquement la première et/ou la deuxième courbe limite de chaque aile correspondant aux trajectoires limites qui sont à la fois :

- orientées dans la même direction que la trajectoire courante de l'aile et
- orientées dans la direction associée au côté de l'aile.

Ainsi, le module de génération 142 est configuré pour afficher sélectivement sur l'afficheur 140 :

- la première et/ou la deuxième courbe limite gauche de l'extrémité de l'aile gauche si la trajectoire courante est orientée vers la gauche, ou
- la première et/ou la deuxième courbe limite droite de l'extrémité de l'aile droite si la trajectoire courante est orientée vers la droite.

On a représenté sur les Figures 11 à 16 des exemples d'affichage sur un afficheur.

Les Figures 11 à 16 illustrent en particulier un affichage sur un afficheur tête haute.

Sur la Figure 11, la visualisation 200 de la portion de piste 3 située au voisinage de l'aéronef 1 est une visualisation réelle, égocentrique, telle que vue depuis le nez de l'aéronef.

Sur la visualisation 200 est superposée une courbe de trajectoire courante 202, représentative de la trajectoire courante de l'aéronef 1, en particulier du nez de l'aéronef.

Dans cet exemple, la trajectoire courante est une trajectoire sensiblement longitudinale.

Ainsi, sur la visualisation 200 sont également superposées :

- une première courbe limite gauche 204a et une première courbe limite droite 204b,
- une deuxième courbe limite gauche 206a et une deuxième courbe limite droite 206b.

Dans cet exemple, la courbe de trajectoire courante 202, les premières courbes limites 204a, 204b et les deuxièmes courbes limites 206a, 206b, sont affichées selon trois formats graphiques distincts.

En particulier, le courbe de trajectoire courante 202 est affichée sous la forme d'un trait continu, les premières courbes limites 204a, 204b sont affichées sous la forme d'une ligne en pointillés d'un premier type, et les deuxièmes courbes limites 206a, 206b sont affichées sous la forme d'une ligne en pointillés d'un deuxième type.

L'exemple d'affichage de la Figure 12 diffère de l'exemple d'affichage de la Figure 11 en ce que la trajectoire courante n'est pas une trajectoire longitudinale, mais une trajectoire comprenant un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet vers la droite, à faible vitesse.

Dans cette situation, les première et deuxième courbes limites gauches 204a et 206a ne sont donc pas affichées. Ainsi, seules les première et deuxième courbes limites droites 204b et 206b sont affichées.

La Figure 13 illustre un exemple d'affichage similaire à la Figure 12, mais à plus grande vitesse.

Dans cette situation, la trajectoire courante comprend un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet vers la droite.

Néanmoins, en raison de la plus grande vitesse de l'aéronef, le rayon de courbure est plus important que dans la situation de la Figure 12. Dès lors, les première et deuxième courbes limites gauches 204a et 206a sont affichées, ainsi que les première et deuxième courbes limites droites 204b et 206b.

Les Figures 14 à 16 illustrent un mode de représentation sur un afficheur tête basse.

Le mode de représentation illustré sur la Figure 14 diffère de la représentation illustrée sur la Figure 12 en ce que la visualisation 210 est une image synthétique de la portion de piste située devant l'aéronef.

En outre, les première et deuxième courbes limites droites 204b, 206b sont affichées sous le même format graphique, en particulier sous la forme d'un trait en pointillés d'un même type.

Le mode de représentation illustré sur la Figure 15 diffère de la représentation illustrée sur la Figure 14 en ce que la visualisation 212 est une représentation exocentrique, vue d'une caméra virtuelle qui serait localisée au-dessus et derrière l'aéronef.

En outre, sur la Figure 15 comme sur la Figure 13, la trajectoire courante n'est pas une trajectoire longitudinale, mais une trajectoire comprenant un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet vers la droite, et les première et deuxième courbes limites gauches 204a et 206a, ainsi que les première et deuxième courbes limites droites 204b, 206b, sont affichées.

Dans le mode de représentation illustré sur la Figure 16, la visualisation 214 affichée sur l'afficheur est une représentation exocentrée, vue depuis au moins une caméra réelle située au-dessus de l'aéronef 1.

Dans cet exemple, deux courbes de trajectoire courantes 202a et 202b, chacune représentative de la trajectoire courante d'une extrémité d'une aile respective, sont affichées.

Les extrémités de ces courbes sont reliées l'une à l'autre par deux segments 202c, 202d.

Les deux trajectoires courantes 202a et 202b, ainsi que les segments 202c, 202d définissent donc une surface sur la piste qui serait balayée par l'aéronef s'il suivait la trajectoire courante.

Dans le mode de représentation illustré sur la Figure 16, la trajectoire courante comprend un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet vers la droite. Ainsi, seules les première et deuxième courbes limites droites 204b, 206b, de l'aile droite sont affichées.

Selon un mode de réalisation, le système 40 de contrôle comprend une unité de traitement d'informations, formée par exemple d'un processeur et d'une mémoire associée au processeur. Les modules de limitation 58, de régulation 60, de détermination de trajectoires 62, de commande 120, de contrôle 130, et de génération 142, et les sous-modules 132, 134 et 136 sont alors par exemple réalisés chacun sous forme d'un logiciel exécutable par le processeur et stockée dans la mémoire.

En variante, les modules de limitation 58, de régulation 60, de détermination de trajectoires 62, de commande 120, de contrôle 130, et de génération 142, et les sous-modules 132, 134 et 136 sont réalisés chacun sous forme d'un composant logique programmable, tel qu'un FPGA (de l'anglais *Field Programmable Gate Array*), ou encore sous forme d'un circuit intégré dédié, tel qu'un ASIC (de l'anglais *Applications Specific Integrated Circuit*).

Un schéma synoptique d'un procédé de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, selon un premier aspect, est illustré sur la Figure 17.

Ce procédé est mis en œuvre dans un aéronef 1 tel que décrit en référence aux Figures 1 à 3, et de préférence au moyen d'un système de contrôle 40.

Ce procédé comprend une étape 300 de détermination d'une trajectoire courante de l'aéronef 1 au sol. Cette trajectoire courante comprend une succession de points de passage prévus d'au moins un élément de l'aéronef 1, en l'absence d'actionnement des dispositifs de déplacement latéral du premier ensemble 13a et de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Le ou chaque élément de l'aéronef 1 est par exemple choisi parmi la roulette de train avant 5, un nez de l'aéronef, une extrémité d'une aile gauche de l'aéronef, une extrémité d'une aile droite de l'aéronef et la queue de l'aéronef 1.

Le procédé comprend en outre une étape de détermination 302 d'au moins une trajectoire limite, comprenant une succession de points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef 1 en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral 13.

Dans un mode de réalisation préféré, l'étape 302 comprend une phase 304 de détermination d'au moins une première trajectoire limite, comprenant une succession de premiers points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef 1 en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a, l'ensemble de freinage différentiel 27' étant dans l'état non-actif.

De préférence, la phase 304 comprend la détermination de deux premières trajectoires limites, comprenant une première trajectoire limite gauche associée à un mouvement de lacet

dans une première direction, et une première trajectoire limite droite, associée à un mouvement de lacet dans une deuxième direction, opposé à la première direction.

De préférence, chaque première trajectoire limite est déterminée en fonction d'un seuil d'activation prédéterminé de l'ensemble de freinage différentiel 27' et d'au moins une information de vitesse courante de l'aéronef.

Le seuil d'activation est par exemple déterminé en fonction d'au moins un paramètre choisi parmi l'information relative à la vitesse courante de l'aéronef 1, un état de piste courant, un état de fonctionnement de la roulette de train avant 5 et une température de dispositifs de freinage 27a, 27b de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Ce seuil d'activation est par exemple déterminé par un module de régulation 60 tel que décrit ci-dessus.

De préférence, comme décrit ci-dessus, chaque première trajectoire limite correspond à une trajectoire qu'il est possible d'atteindre en modifiant le réglage de la roulette de train avant 5 et éventuellement des autres dispositifs de déplacement latéral 13a du premier ensemble, tout en restant dans la plage d'angle de braquage.

Cette plage d'angle de braquage est par exemple déterminée en fonction des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef et de l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta_{max}$, βT_{max}, lors d'une étape 330 décrite ci-après.

L'étape 302 comprend en outre de préférence une phase 308 de détermination d'au moins une deuxième trajectoire limite, comprenant une succession de deuxièmes points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef 1 en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble 13a et l'ensemble de freinage différentiel 27', l'ensemble de freinage différentiel 27' étant actif.

De préférence, la phase 308 comprend la détermination de deux deuxièmes trajectoires limites, comprenant une deuxième trajectoire limite gauche associée à un mouvement de lacet dans la première direction, et une deuxième trajectoire limite droite, associée à un mouvement de lacet dans la deuxième direction.

Les étapes de détermination 300 et 302 sont par exemple mises en œuvre par un module de détermination de trajectoires 62 tel que décrit ci-dessus.

Le procédé comprend par ailleurs une étape d'affichage 310 sur un afficheur, par exemple l'afficheur 140:

- d'une visualisation d'une portion de piste 3 située au voisinage de l'aéronef 1 ;
- d'une courbe de trajectoire courante représentative de la trajectoire courante ; et

- d'au moins une courbe limite représentative de la trajectoire limite,

ces courbes étant superposées à la visualisation de la portion de la piste.

Cette étape d'affichage 310 est par exemple mise en œuvre par le module de génération 142 décrit ci-dessus.

La visualisation de la portion de piste est par exemple une visualisation égocentrée de la portion de piste, vue d'un point de vue situé dans le cockpit de l'aéronef, ou une visualisation exocentrée de la portion de piste, vue d'un point de vue situé à l'extérieur de l'aéronef.

La visualisation de la portion de piste est par exemple une visualisation réelle de la portion de piste, ou une représentation synthétique de la portion de piste, générée à partir d'une position courante de l'aéronef 1 sur la piste et d'une base de données topographiques.

Selon un mode de réalisation préféré, l'étape 310 comprend l'affichage sur un afficheur, par exemple l'afficheur 140:

- de la visualisation d'une portion de piste 3 située au voisinage de l'aéronef 1 ;
- d'au moins une première courbe limite représentative de la première trajectoire limite, et
- d'au moins une deuxième courbe limite représentative de la deuxième trajectoire limite, ces courbes étant superposées à la visualisation de la portion de la piste.

De préférence, l'étape 310 comprend l'affichage d'une première courbe limite gauche représentative de la première trajectoire limite gauche et/ou d'une première courbe limite droite représentative de la première trajectoire limite droite.

En outre, l'étape 310 comprend par exemple l'affichage d'une deuxième courbe limite gauche représentative de la deuxième trajectoire limite gauche et/ou d'une deuxième courbe limite droite représentative de la deuxième trajectoire limite droite.

De préférence, si la trajectoire courante est orientée dans la première direction, l'étape 310 comprend l'affichage d'au moins l'une des première et deuxième courbes limites gauches, les courbes limites droites étant non affichées.

Au contraire, si la trajectoire courante est orientée dans la deuxième direction, l'étape 310 comprend l'affichage d'au moins l'une des première et deuxième courbes limites droites, les courbes limites gauches étant non affichées.

La courbe de trajectoire courante, la ou les première(s) courbe(s) limite(s) et/ou la ou les deuxième(s) courbe(s) limite(s) sont représentatives de la trajectoire courante, de la

première trajectoire limite et/ou de la deuxième trajectoire limite respectivement sur des distances prédéterminées, comme décrit ci-dessus.

Un procédé de contrôle selon un deuxième aspect est illustré sur la Figure 18.

Ce procédé est par exemple mis en œuvre à la suite des étapes 300 à 310 du procédé selon le premier aspect, ou concomitamment à ces étapes.

Ce procédé comprend une étape de génération 320 d'un ordre de commande d'une trajectoire latérale de consigne de l'aéronef 1. Cette trajectoire latérale de consigne comprend un mouvement latéral de l'aéronef 1 selon une direction donnée. Cet ordre de commande comprend au moins un paramètre de consigne représentatif de la trajectoire de consigne.

Cette étape de génération 320 comprend par exemple une sous-étape 322 d'actionnement par un pilote du dispositif de commande 72, par exemple le palonnier 80 tel que décrit ci-dessus, pour générer un ordre de trajectoire latérale.

L'étape de génération 320 comprend en outre une sous-étape 324 de génération, notamment par le module de commande 120, de l'ordre de commande à partir de l'ordre de trajectoire latérale.

De préférence, l'ordre de commande comprend un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Par exemple, le dispositif de commande comprenant le palonnier 80, la sous-étape comprend par exemple la génération d'un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si la position courante p_c de la pédale gauche 82a ou de la pédale droite 82b est comprise entre la position d'activation p_{act} et la position de fin de course p_f, ou la génération d'un ordre de non-activation de l'ensemble de freinage différentiel 27' si la position courante p_c de la pédale gauche 82a et la position courante de la pédale droite 82b sont comprises entre la position neutre p_n et la d'activation p_{act}.

Le procédé comprend par ailleurs une étape 330 de détermination d'une plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5, en dehors de laquelle un risque de perte d'adhérence de la roulette de train avant 5 est significativement accru.

Cette étape 330 est par exemple mise en œuvre par le module de limitation 58 tel que décrit ci-dessus.

Cette étape de détermination 330 inclue une sous-étape 332 d'évaluation d'informations relatives à une vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol et d'au moins un angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta_{max}$, βT_{max} de la roulette de train avant 5 et/ou des trains principaux 7a, 7b de l'aéronef 1.

Les informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef par rapport au sol comprennent par exemple le module du vecteur vitesse courant de l'aéronef par rapport au sol, et la vitesse de lacet courante de l'aéronef.

La sous-étape 332 comprend de préférence la réception ou l'estimation d'un paramètre représentatif d'un état d'adhérence de la piste (piste sèche, mouillée ou glacée par exemple), et la détermination de l'angle de dérapage maximal $\beta\delta_{max}$, βT_{max} autorisé en fonction de ce paramètre représentatif de l'état d'adhérence de la piste.

L'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta_{max}$, βT_{max} est par exemple évalué à partir de la base de données.

L'étape de détermination 330 inclue en outre une sous-étape 334 de détermination, en fonction des informations relatives à la vitesse courante de l'aéronef et de l'angle de dérapage maximal autorisé $\beta\delta_{max}$, βT_{max}, de la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$ de la roulette de train avant 5 telle que, lorsqu'un angle de braquage δdir de la roulette de train avant 5 est compris dans cette plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$, l'angle de dérapage $\beta\delta$, βT de la roulette de train avant 5 et/ou des trains principaux 7a, 7b est inférieur, en valeur absolue, à l'angle de dérapage maximal $\beta\delta_{max}$, βT_{max}.

Le procédé comprend par ailleurs une étape 340 de contrôle des dispositifs de déplacement latéral. L'étape 340 est par exemple mise en œuvre par le module de contrôle 130 tel que décrit ci-dessus.

Cette étape 340 inclue une sous-étape 342 de détermination, en fonction de l'ordre de commande, d'un angle de braquage de consigne δdir_{cons} de la roulette de train avant 5, compris dans la plage d'angle de braquage $[\delta dir_{min} ; \delta dir_{max}]$. Cet angle de braquage de consigne δdir_{cons} est déterminé de manière à engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant 5, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne.

La sous-étape 342 comprend par exemple une phase 344 de détermination, en fonction de l'ordre de commande, d'un angle de braquage initial δdir_{ini} de la roulette de train avant 5, cet angle de braquage initial δdir_{ini} étant déterminé de manière à engendrer, s'il est appliqué à la roulette de train avant 5, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne.

La sous-étape 342 comprend alors en outre une phase 346 d'application d'une correction à l'angle de braquage initial si cet angle de braquage initial n'est pas compris dans

la plage d'angle de braquage [δdir_{min} ; δdir_{max}], pour déterminer l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

L'étape 340 inclue en outre une sous-étape 348 de transmission d'une instruction de braquage à la roulette de train avant 5 afin d'orienter la roulette de train avant 5 selon l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

Selon un mode de réalisation, l'étape 340 inclue en outre une sous-étape 350 de détermination d'une orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction 31 et/ou d'une consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

L'orientation de consigne δn_{cons} et/ou la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} sont déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction 31 et à l'ensemble de freinage différentiel 27' respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne.

En particulier, lors de la sous-étape 350, l'orientation de consigne δn_{cons} et/ou la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} sont déterminées à partir d'une différence entre l'angle de braquage initial δdir_{ini} et l'angle de braquage de consigne δdir_{cons}.

De préférence, l'ordre de commande généré lors de l'étape 340 comprend un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Si cet ordre de commande comprend un ordre d'activation, la sous-étape 350 comprend la détermination de l'orientation de consigne de la gouverne de direction δn_{cons} et de la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons}.

De préférence, l'orientation de consigne δn_{cons} et la consigne de freinage dissymétrique ΔFc_{ons} sont déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel 27' respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à la trajectoire latérale de consigne.

Si cet ordre de commande comprend un ordre de non activation, la sous-étape 350 comprend uniquement la détermination de l'orientation de consigne δn_{cons} de la gouverne de direction, à l'exclusion de la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons}.

De préférence, l'orientation de consigne δn_{cons} est alors déterminée de manière à engendrer, lorsqu'elle est appliquée à la gouverne de direction, l'angle de braquage de la roulette de train avant 5 étant égal à l'angle de braquage de consigne et l'ensemble de

freinage différentiel 27' étant non-actif, un mouvement latéral de l'aéronef 1 conforme à ladite trajectoire latérale de consigne.

L'étape 340 inclue par ailleurs une sous-étape 352 de transmission de l'instruction d'orientation à la gouverne de direction 31 afin d'orienter la gouverne de direction 31 selon l'orientation de consigne δn_{cons}, et, le cas échéant, de transmission d'une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel 27' afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique ΔF_{cons} à l'ensemble de freinage différentiel 27'.

Le système de contrôle selon l'invention permet ainsi de minimiser les risques de perte d'adhérence de l'aéronef, tout en assistant le pilote dans le contrôle des divers dispositifs de déplacement latéral.

Le système de contrôle peut être mis en œuvre avec un dispositif de commande autre que le palonnier 80 selon le mode de réalisation préféré, par exemple avec des organes de commandes classiques tels qu'un tiller et un palonnier mobile selon deux degrés de liberté.

En outre, le système de commande selon l'invention peut être dépourvu de l'ensemble d'affichage 54.

Les modes de réalisation et variantes décrites ci-dessus peuvent en outre être combinés.

REVENDICATIONS

1.- Système de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, l'aéronef comprenant des dispositifs de déplacement latéral de l'aéronef autour d'un axe de lacet (Z_1-Z_1) incluant une roulette de train avant orientable, le système de contrôle comprenant :

- un module de commande configuré pour générer un ordre de commande d'une trajectoire latérale de consigne de l'aéronef, ladite trajectoire latérale de consigne comprenant un mouvement latéral de l'aéronef selon une direction donnée, ledit ordre de commande comprenant au moins un paramètre de consigne représentatif de ladite trajectoire de consigne,

- un module de limitation d'un angle de dérapage ($\beta\delta$, βT) de l'aéronef, ledit module de limitation étant configuré pour déterminer, en fonction d'informations relatives à une vitesse courante de l'aéronef et d'un angle de dérapage maximal ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}) de la roulette de train avant et/ou de trains principaux de l'aéronef, une plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]) de la roulette de train avant telle que, lorsqu'un angle de braquage (δdir) de la roulette de train avant est compris dans ladite plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]), l'angle de dérapage ($\beta\delta$, βT) de la roulette de train avant et/ou des trains principaux est inférieur, en valeur absolue, audit angle de dérapage maximal ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}),

- un module de contrôle configuré pour :

  - déterminer, en fonction de l'ordre de commande, un angle de braquage de consigne (δdir_{cons}) de la roulette de train avant, compris dans ladite plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]), ledit angle de braquage de consigne (δdir_{cons}) étant déterminé de manière à engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,

  - transmettre une instruction de braquage à la roulette de train avant afin d'orienter la roulette de train avant selon l'angle de braquage de consigne (δdir_{cons}).

2.- Système de contrôle selon la revendication 1, où ledit module de contrôle est configuré pour :

- déterminer, en fonction de l'ordre de commande, un angle de braquage initial (δdir_{ini}) de la roulette de train avant, ledit angle de braquage initial (δdir_{ini}) étant déterminé de

manière à engendrer, s'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne, et

- appliquer une correction audit angle de braquage initial (δdir_{ini}) si ledit angle de braquage initial (δdir_{ini}) n'est pas compris dans ladite plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]), pour déterminer ledit angle de braquage de consigne (δdir_{cons}).

3.- Système de contrôle selon la revendication 1 ou 2, où lesdits dispositifs de déplacement de l'aéronef autour de l'axe de lacet (Z_1) incluent une gouverne de direction orientable et un ensemble de freinage différentiel comprenant un dispositif de freinage d'un train principal gauche et un dispositif de freinage d'un train principal droit, ledit ensemble de freinage différentiel étant propre à appliquer un freinage dissymétrique audit train principal gauche et audit train principal droit,

et où le module de contrôle est configuré pour :

- déterminer une orientation de consigne (δn_{cons}) de la gouverne de direction et/ou une consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) de l'ensemble de freinage différentiel, l'orientation de consigne (δn_{cons}) et/ou la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) étant déterminées de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, l'angle de braquage de la roulette de train avant étant égal à l'angle de braquage de consigne (δdir_{cons}), un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,

- transmettre une instruction d'orientation à la gouverne de direction afin d'orienter la gouverne de direction selon l'orientation de consigne (δn_{cons}), et/ou une instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel afin d'appliquer la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) audit ensemble de freinage différentiel.

4.- Système de contrôle selon les revendications 2 et 3, où le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne (δn_{cons}) et/ou la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) à partir d'une différence entre l'angle de braquage initial (δdir_{ini}) et l'angle de braquage de consigne (δdir_{cons}).

5.- Système de contrôle selon la revendication 3 ou 4, où le module de contrôle est configuré pour recevoir un état de fonctionnement de la roulette de train avant, et pour déterminer, en cas de dysfonctionnement de la roulette de train avant, l'orientation de

consigne (δn_{cons}) de la gouverne de direction et/ou la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}), de manière à engendrer, lorsqu'elles sont appliquées à la gouverne de direction et à l'ensemble de freinage différentiel respectivement, la roulette de train avant étant libre de pivoter, un mouvement latéral de l'aéronef selon ladite trajectoire latérale de consigne.

6.- Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications 3 à 5, où l'ordre de commande comprend un ordre d'activation ou de non activation de l'ensemble de freinage différentiel, et où :

- l'ordre de commande comprenant un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel, le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne de la gouverne de direction (δn_{cons}) et la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) de l'ensemble de freinage différentiel, et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction et l'instruction de freinage dissymétrique à l'ensemble de freinage différentiel ;

- l'ordre de commande comprenant un ordre de non activation de l'ensemble de freinage différentiel, le module de contrôle est configuré pour déterminer l'orientation de consigne (δn_{cons}) de la gouverne de direction, à l'exclusion de la consigne de freinage dissymétrique (ΔF_{cons}) de l'ensemble de freinage différentiel, et pour transmettre l'instruction d'orientation à la gouverne de direction.

7.- Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, où ledit module de limitation de l'angle de dérapage est en outre configuré pour déterminer ledit angle de dérapage maximal ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}) autorisé en fonction d'un paramètre représentatif d'un état d'adhérence de la piste.

8.- Système de contrôle selon la revendication 7, où le module de limitation comprend une base de données d'angles de dérapage maximaux, comprenant, pour chacun d'une pluralité d'états d'adhérence possible, une valeur d'angle de dérapage maximal ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}) correspondant à cet état d'adhérence, le module de l'imitation étant configuré pour déterminer l'angle de dérapage maximal autorisé ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}) à partir de ladite base de données.

9.- Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, comprenant un dispositif de commande actionnable par un pilote pour générer un ordre de trajectoire

latérale, et où ledit module de commande est configuré pour générer ledit ordre de commande à partir de l'ordre de trajectoire latérale.

10.- Système de contrôle selon la revendication 9, où le dispositif de commande comprend un palonnier, le palonnier comprenant une pédale gauche, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une première direction et une pédale droite, destinée à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet selon une deuxième direction opposée à la première direction, et où l'ordre de trajectoire latérale comprend un paramètre représentatif d'un déplacement de la pédale gauche et/ou de la pédale droite.

11.- Système de contrôle selon la revendication 10, où les dispositifs de déplacement latéral comprennent :

- un premier ensemble de dispositifs de déplacement latéral incluant la roulette de train avant, et

- un ensemble de freinage différentiel, configuré pour générer un mouvement de l'aéronef autour d'un axe de lacet (Z_1) dans un état actif, à l'exclusion d'un état non-actif,

chacune des pédales gauche et droite est déplaçable entre une position neutre (p_n) et une position de fin de course (p_f) selon une unique course prédéterminée,

un déplacement de la pédale gauche, respectivement de la pédale droite, selon ladite course prédéterminée, entre la position neutre (p_n) et une position d'activation (p_{act}) de freinage différentiel prédéterminée, étant destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet par actionnement d'au moins un dispositif de déplacement du premier ensemble, l'ensemble de freinage différentiel étant non-actif,

un déplacement de la pédale gauche, respectivement de la pédale droite, selon ladite course prédéterminée depuis la position d'activation (p_{act}) de freinage différentiel vers la position de fin de course (p_f) étant destiné à commander un mouvement de l'aéronef autour de l'axe de lacet par actionnement d'au moins un dispositif de déplacement du premier ensemble, et par actionnement de l'ensemble de freinage différentiel, l'ensemble de freinage différentiel étant actif.

12.- Système de contrôle selon la revendication11 lorsqu'elle dépend de la revendication 6, où le module de commande est configuré pour, en chaque instant :

- générer un ordre d'activation de l'ensemble de freinage différentiel si la position courante (p_c) de la pédale gauche ou de la pédale droite est comprise entre la position d'activation (p_{act}) et la position de fin de course (p_f), ou

- générer un ordre de non-activation de l'ensemble de freinage différentiel si aucune des positions courantes (p_c) de la pédale gauche et droite n'est comprise entre la position d'activation (p_{act}) et la position de fin de course (p_f).

13.- Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, où le système de contrôle comprend un module de détermination de trajectoires au sol de l'aéronef, configuré pour déterminer, en au moins un instant :

- une trajectoire courante de l'aéronef au sol, comprenant une succession de points de passage prévus d'au moins un élément de l'aéronef, à conditions inchangées des dispositifs de déplacement latéral,
- au moins une trajectoire limite, comprenant une succession de points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral,

et où le système de contrôle comprend un ensemble d'affichage comportant :

- un afficheur, configuré pour afficher une visualisation d'une portion de piste située au voisinage de l'aéronef;
- un module de génération d'affichage, configuré pour afficher sur l'afficheur une courbe de trajectoire courante représentative de ladite trajectoire courante et au moins une courbe limite représentative de la trajectoire limite, lesdites courbes étant superposées à la visualisation de la portion de la piste.

14.- Système de contrôle selon la revendication 13, où les dispositifs de déplacement latéral comprennent :

- un premier ensemble de dispositifs de déplacement latéral incluant la roulette de train avant, et

- un ensemble de freinage différentiel, configuré pour générer un mouvement de l'aéronef autour d'un axe de lacet (Z_1) dans un état actif, à l'exclusion d'un état non-actif,

- le module de détermination est configuré pour déterminer audit instant au moins une première trajectoire limite, comprenant une succession de premiers points de passage limites

pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble, l'ensemble de freinage différentiel étant dans l'état non-actif, et/ou au moins une deuxième trajectoire limite, comprenant une succession de deuxièmes points de passage limites pouvant être atteints par l'élément de l'aéronef en actionnant au moins un dispositif de déplacement latéral du premier ensemble et l'ensemble de freinage différentiel, l'ensemble de freinage différentiel étant actif,

- et où le module de génération d'affichage est configuré pour afficher sur l'afficheur :

- au moins une première courbe limite représentative de la première trajectoire limite, ladite première courbe limite étant superposée à la visualisation de la portion de la piste, *et/ou*

- au moins une deuxième courbe limite représentative de la deuxième trajectoire limite, ladite deuxième courbe limite étant superposée à la visualisation de la portion de la piste.

15.- Procédé de contrôle d'une trajectoire latérale d'un aéronef roulant sur une piste au sol, l'aéronef comprenant des dispositifs de déplacement latéral de l'aéronef autour d'un axe de lacet (Z_1-Z_1) incluant une roulette de train avant orientable, le procédé comprenant les étapes suivantes:

- génération d'un ordre de commande d'une trajectoire latérale de consigne de l'aéronef, ladite trajectoire latérale de consigne comprenant un mouvement latéral de l'aéronef selon une direction donnée, ledit ordre de commande comprenant au moins un paramètre de consigne représentatif de ladite trajectoire de consigne,

- détermination en fonction d'informations relatives à une vitesse courante de l'aéronef et d'un angle de dérapage maximal autorisé ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}), d'une plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]) de la roulette de train avant telle que, lorsqu'un angle de braquage (δdir) de la roulette de train avant est compris dans ladite plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]), l'angle de dérapage ($\beta\delta$, βT) de la roulette de train avant et/ou des trains principaux est inférieur, en valeur absolue, audit angle de dérapage maximal ($\beta\delta_{max}$, βT_{max}),

- contrôle des dispositifs de déplacement latéral, incluant les sous-étapes suivantes:

- détermination, en fonction de l'ordre de commande, d'un angle de braquage de consigne (δdir_{cons}) de la roulette de train avant, compris dans ladite plage d'angle de braquage ([δdir_{min} ; δdir_{max}]), ledit angle de braquage de consigne (δdir_{cons}) étant déterminé de manière à

engendrer, lorsqu'il est appliqué à la roulette de train avant, un mouvement latéral de l'aéronef conforme à ou tendant vers ladite trajectoire latérale de consigne,

- *transmission d'une instruction de braquage à la roulette de train avant afin* d'orienter la roulette de train avant selon l'angle de braquage de consigne (δdir_{cons}).

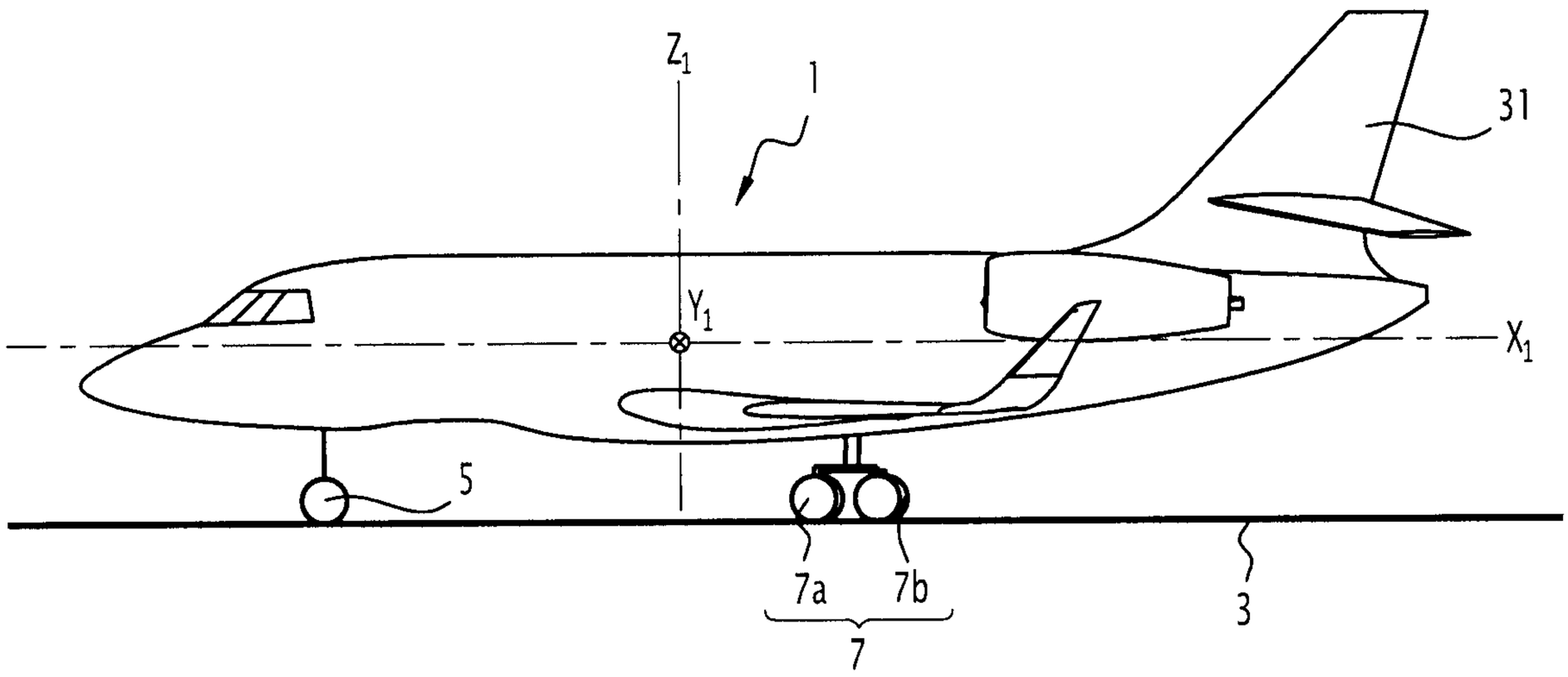


FIG.1

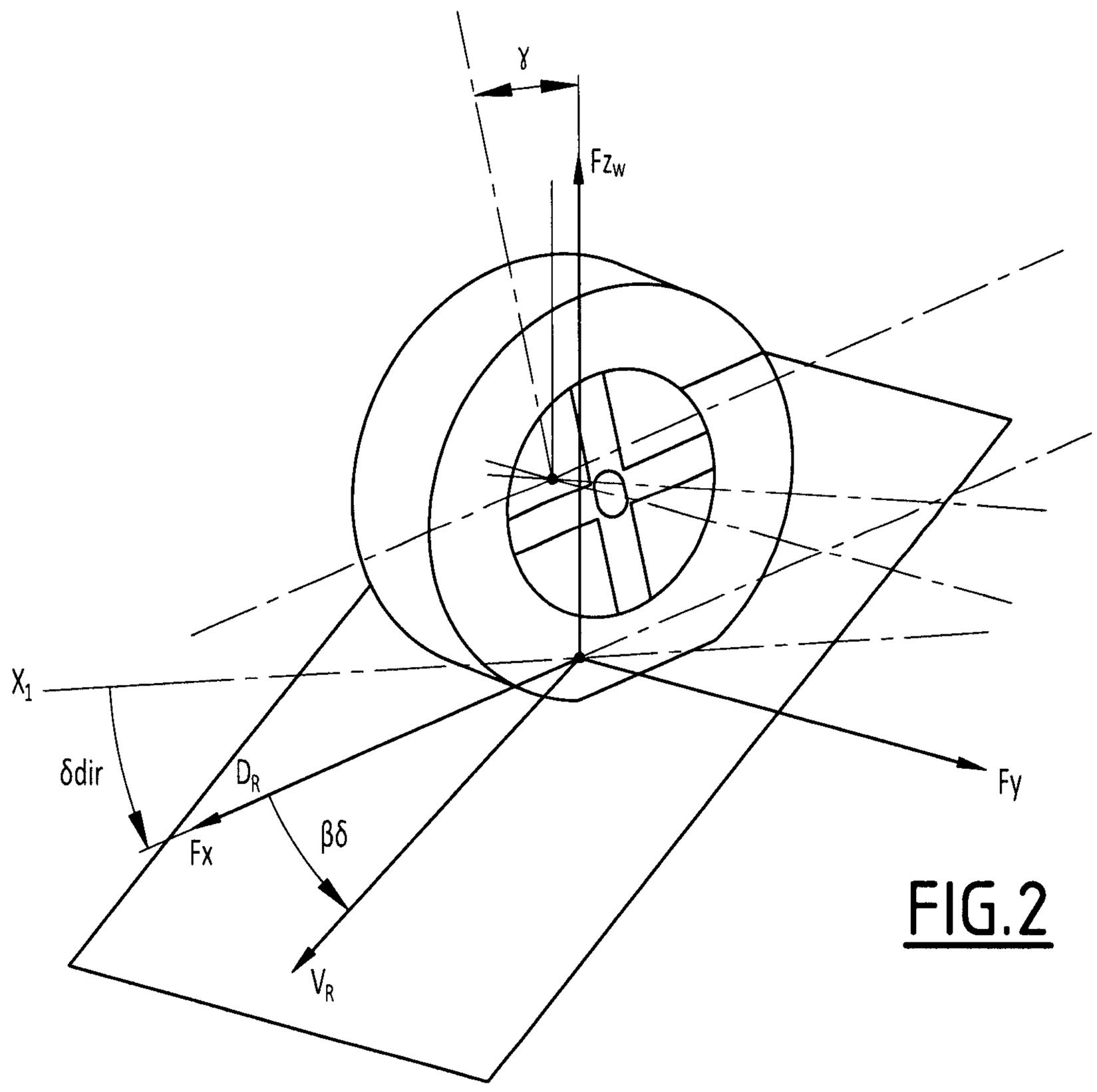
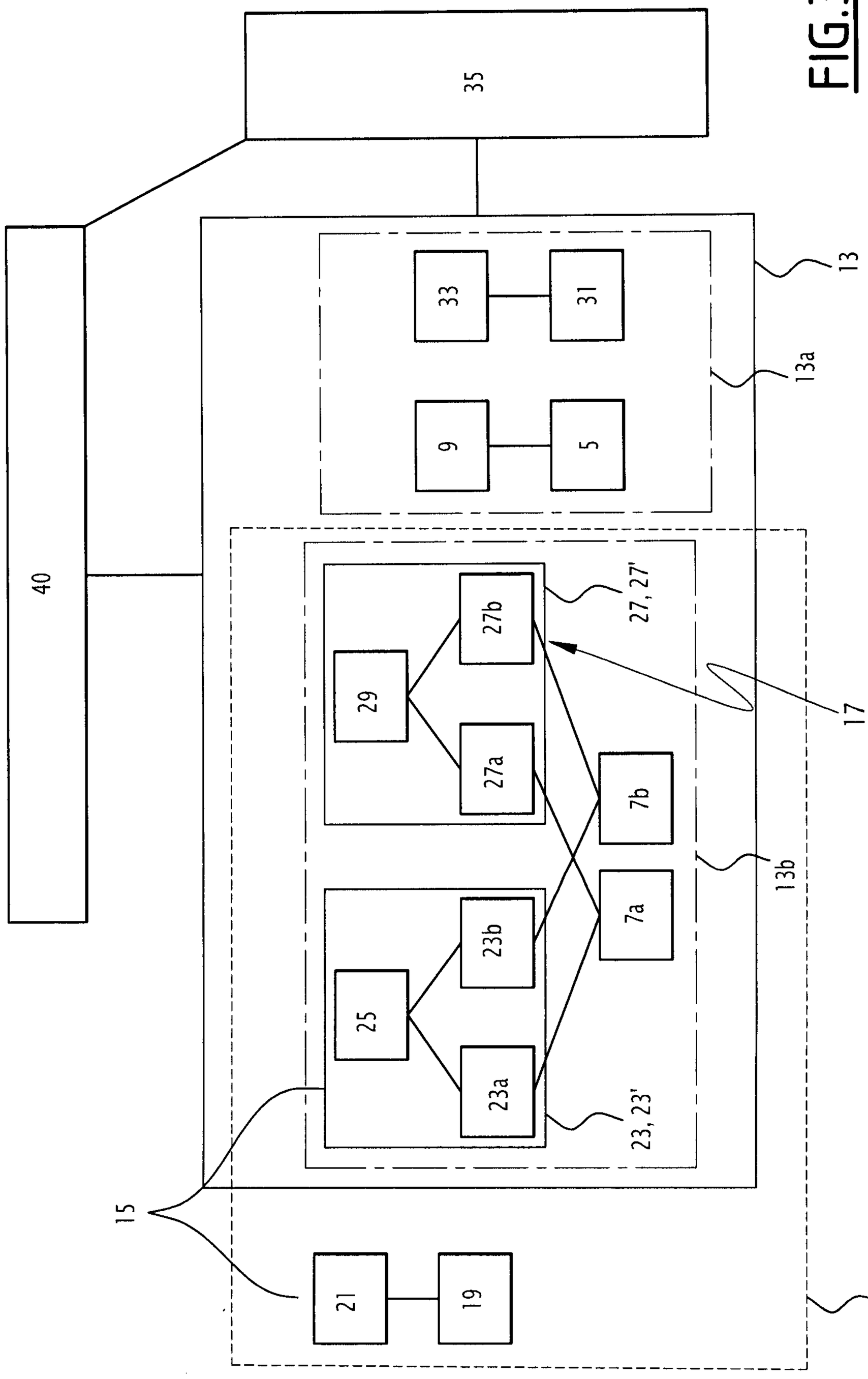


FIG.2

FIG.3


35
33
31
13
13a
9
5
40
27, 27'
27b
29
27a
17
7b
7a
13b
23b
25
23a
23, 23'
15
21
19
11

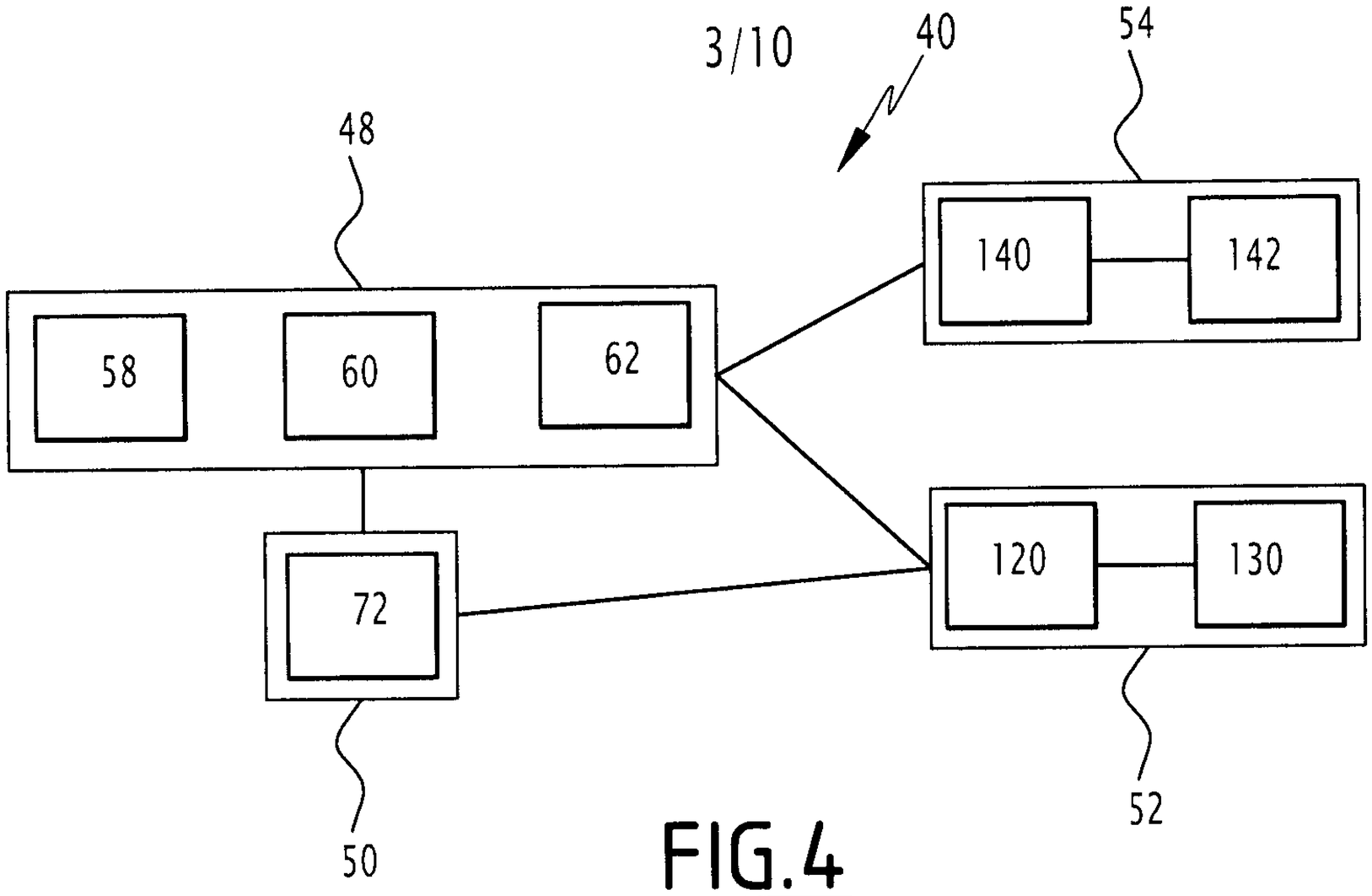

40
48
54
58
60
62
140
142
72
120
130
50
52

FIG.4

Ky

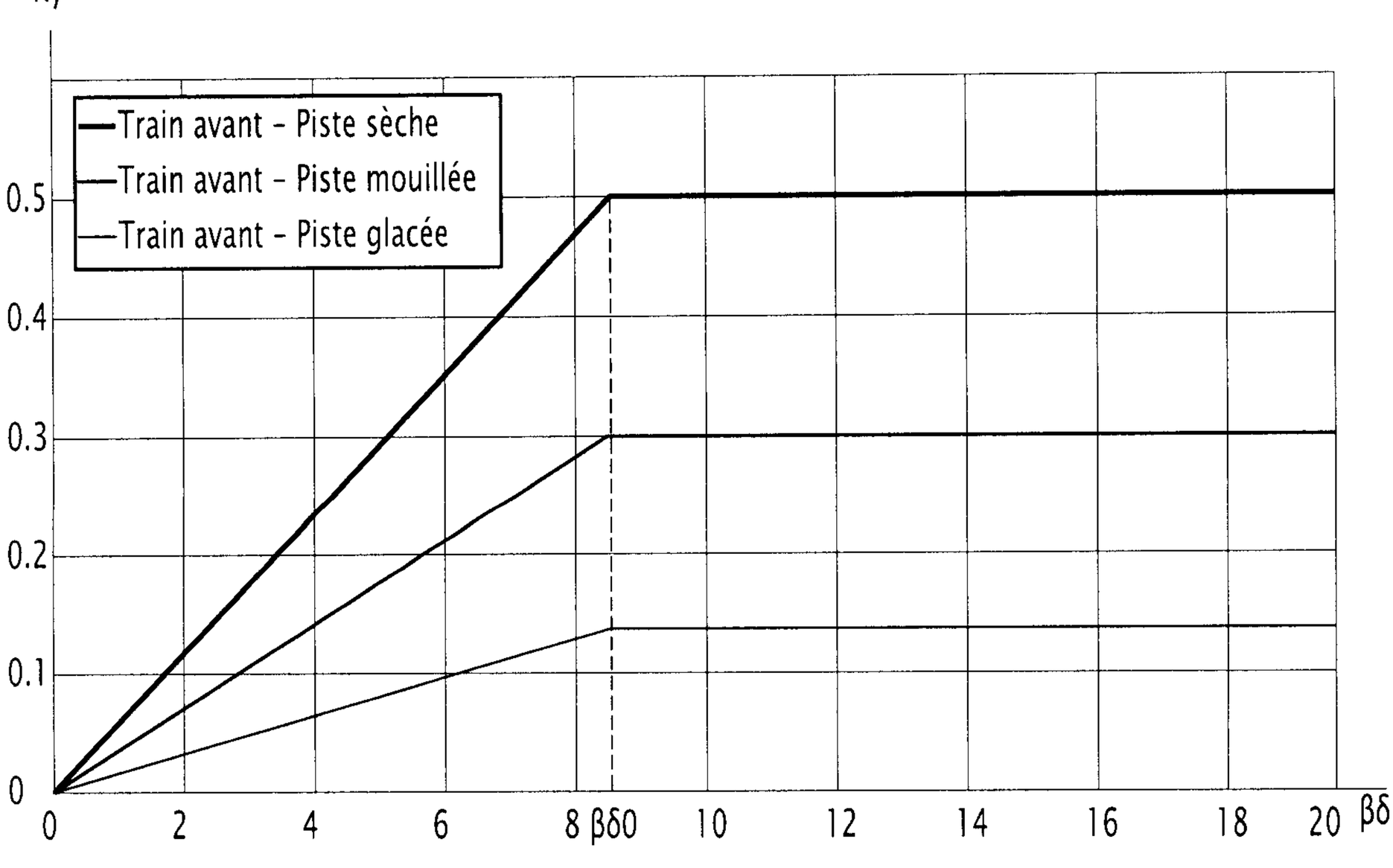

Train avant - Piste sèche
Train avant - Piste mouillée
Train avant - Piste glacée
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
2
4
6
8 βδ0
10
12
14
16
18
20
βδ

FIG.5

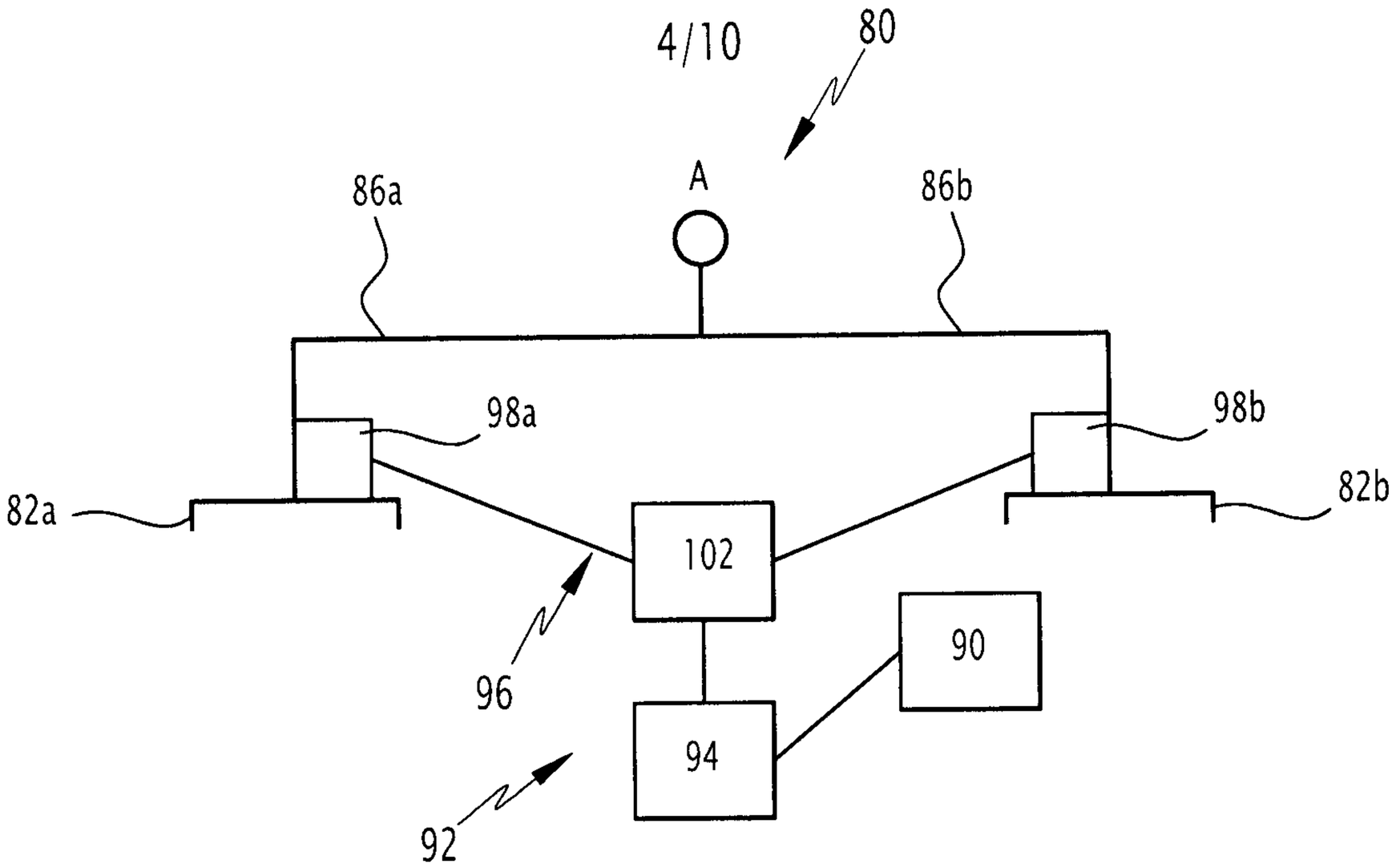


FIG.6

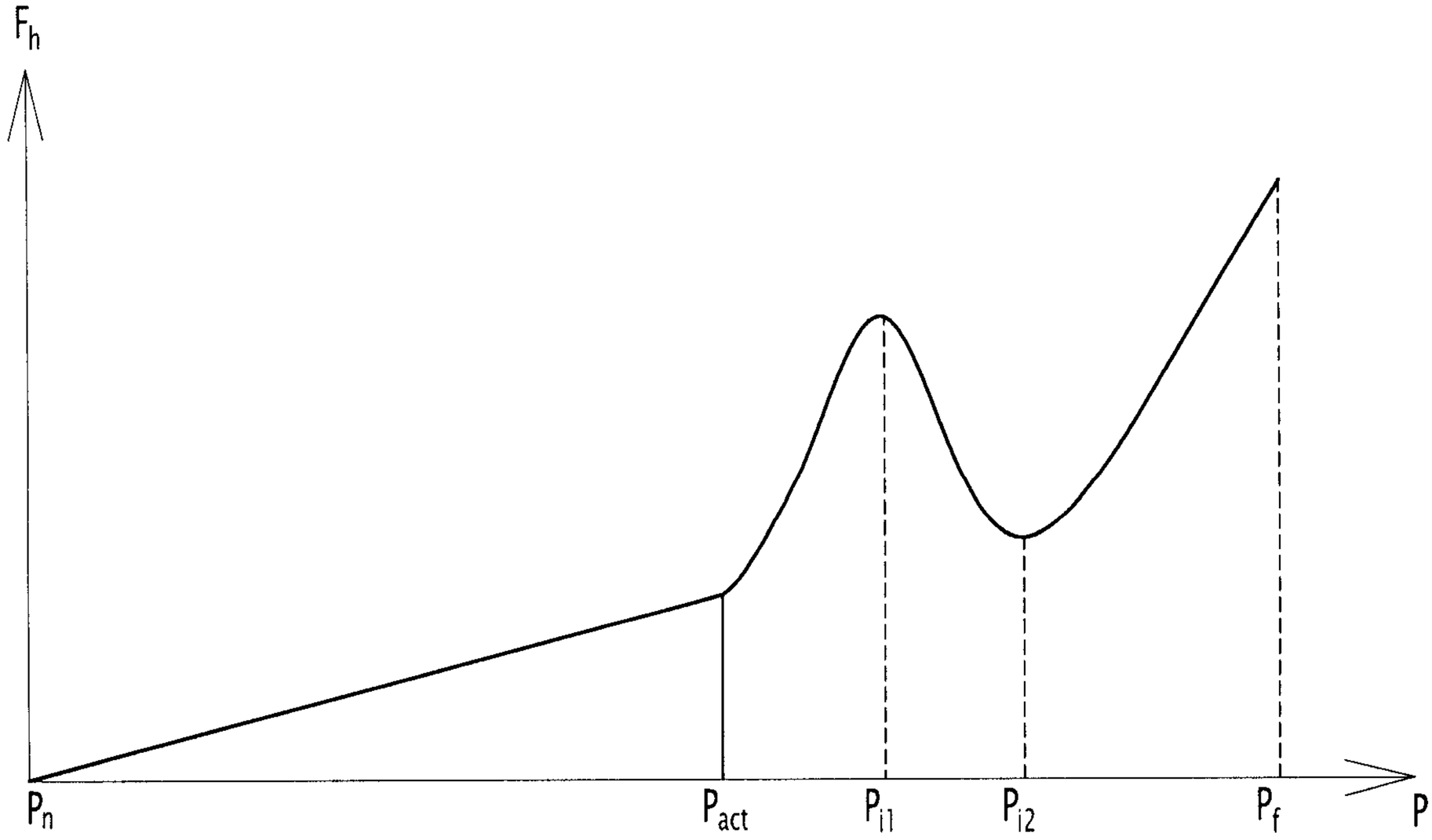


FIG.7

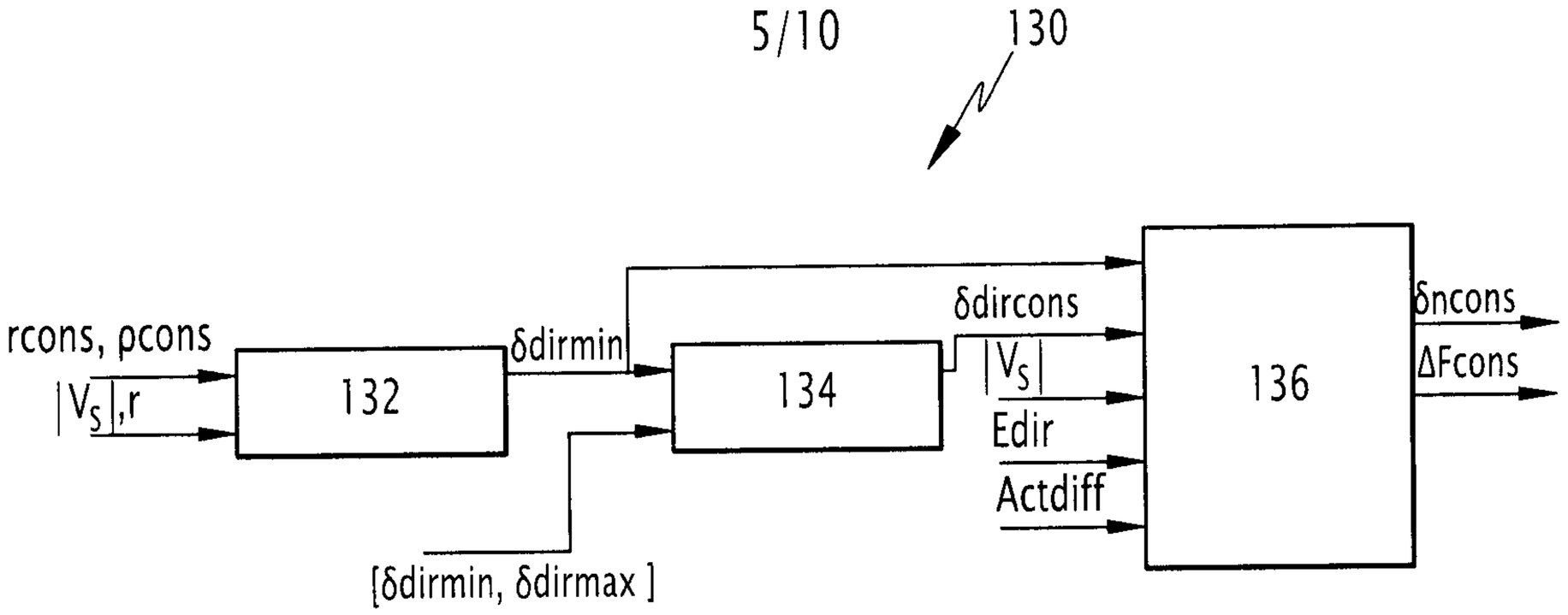


FIG.8

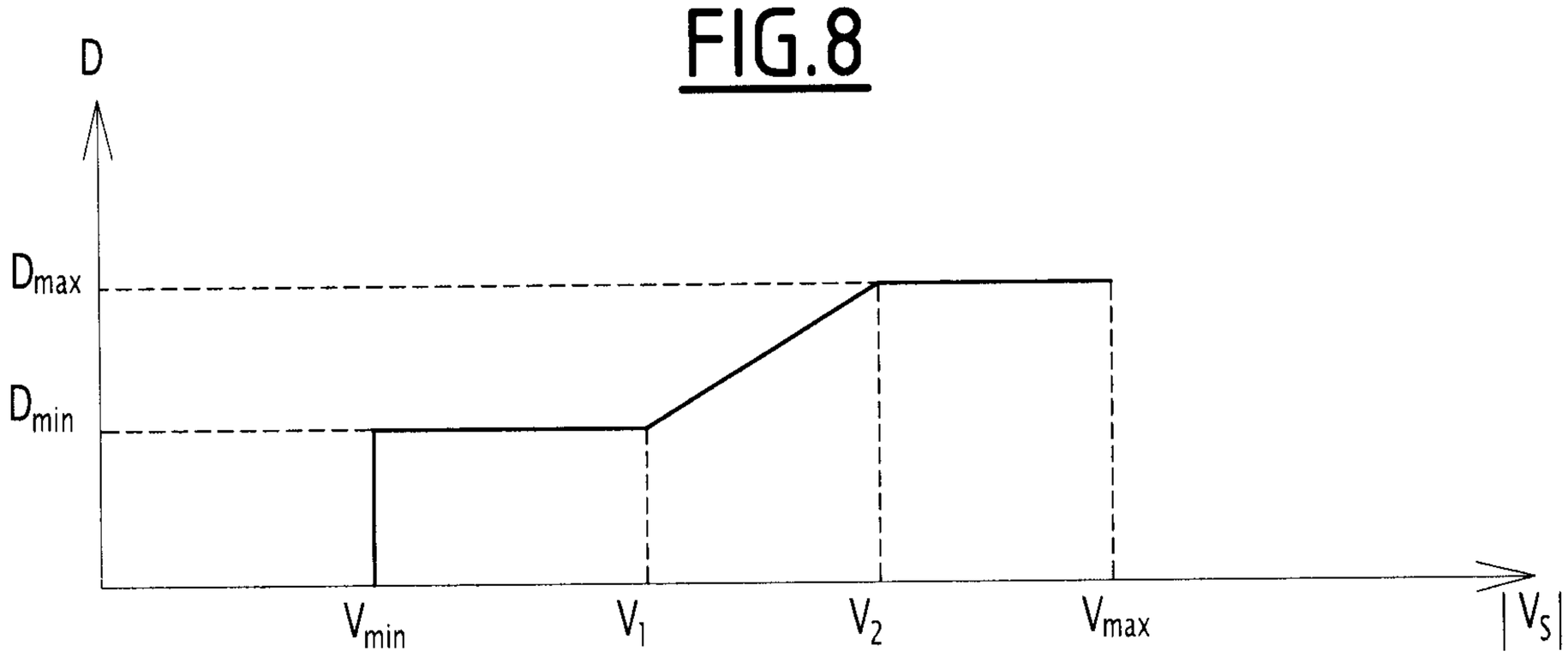


FIG.9

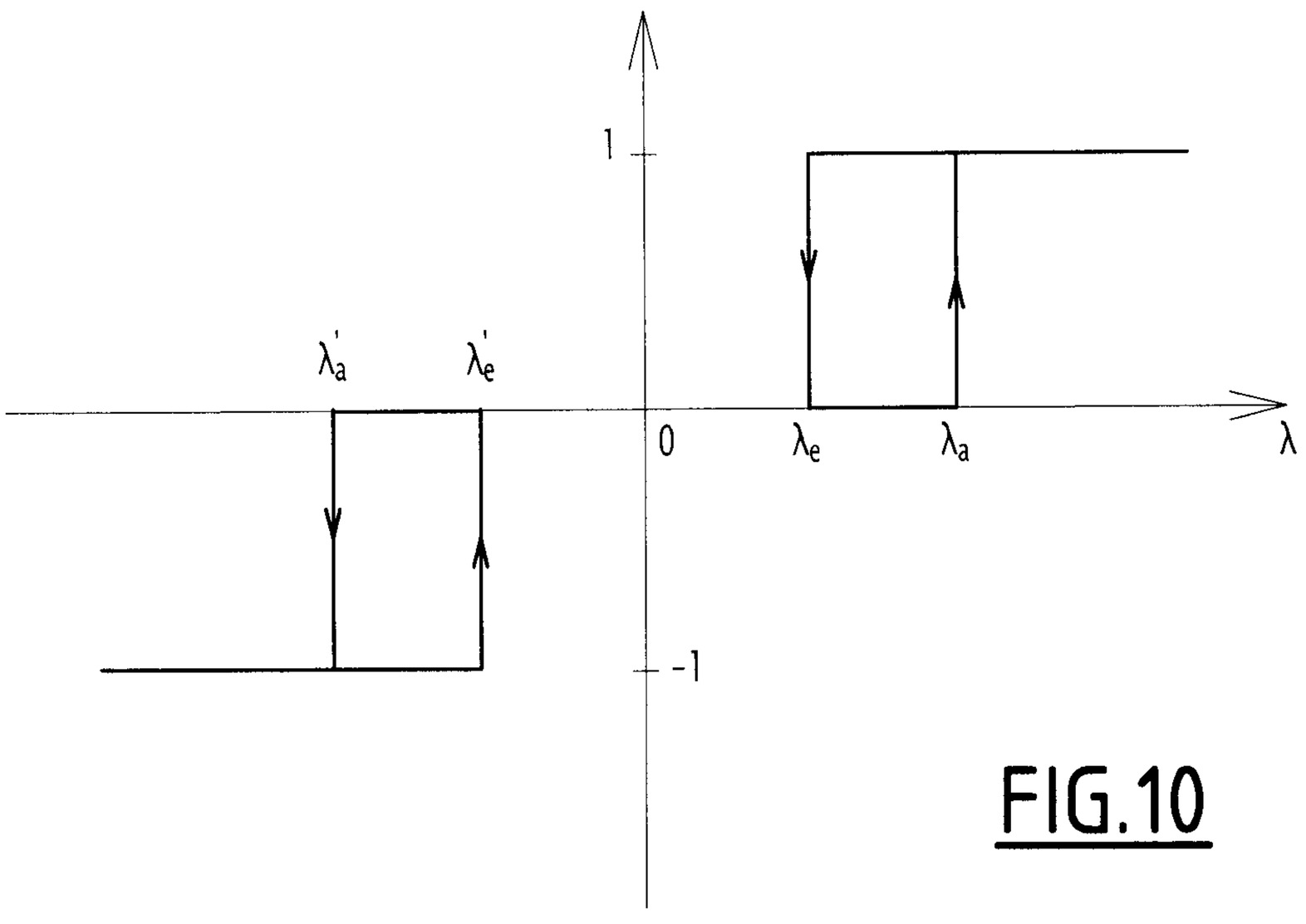


FIG.10

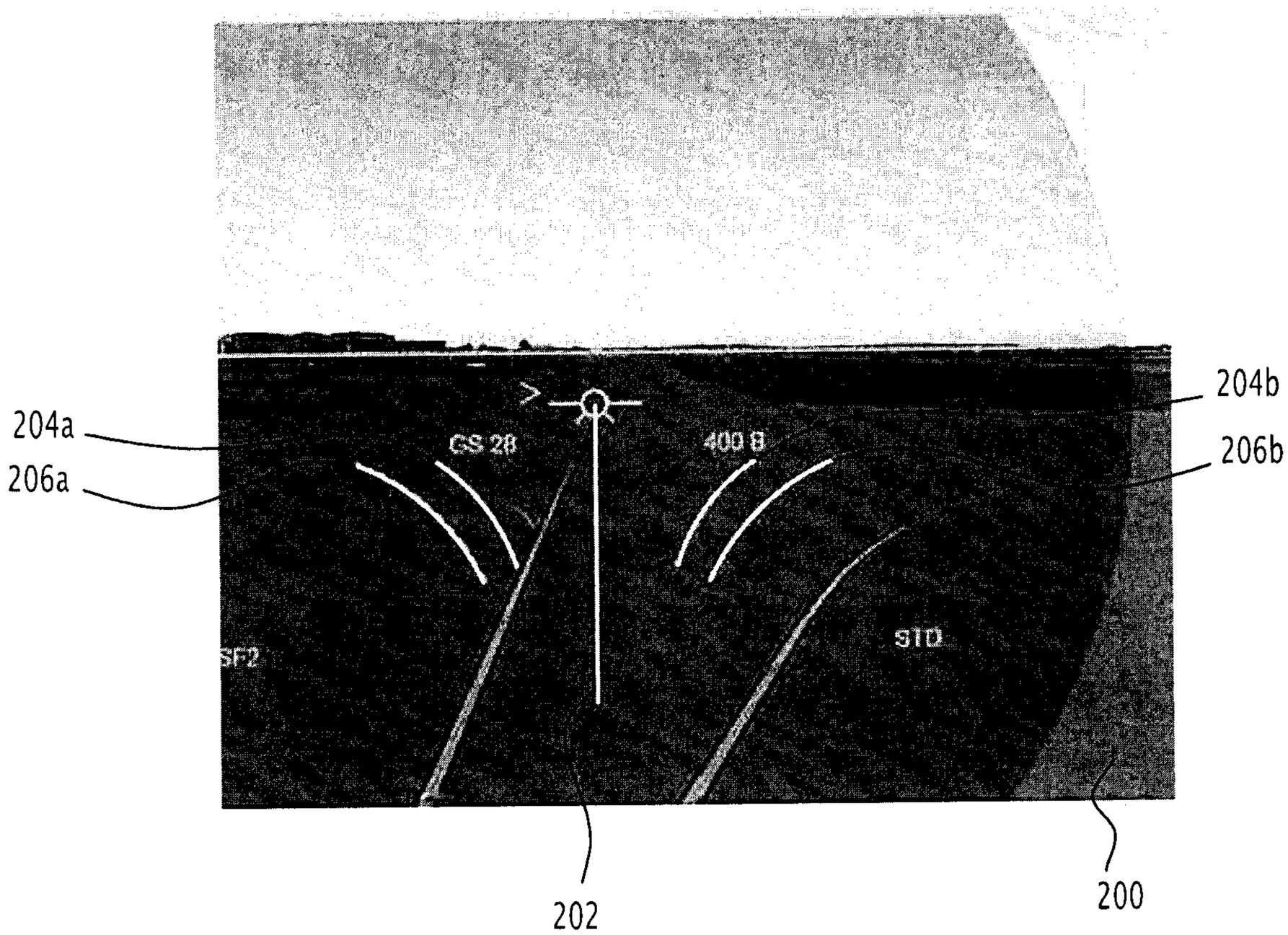

204a
206a
GS 2B
400 B
STD
SF2
204b
206b
202
200

FIG.11

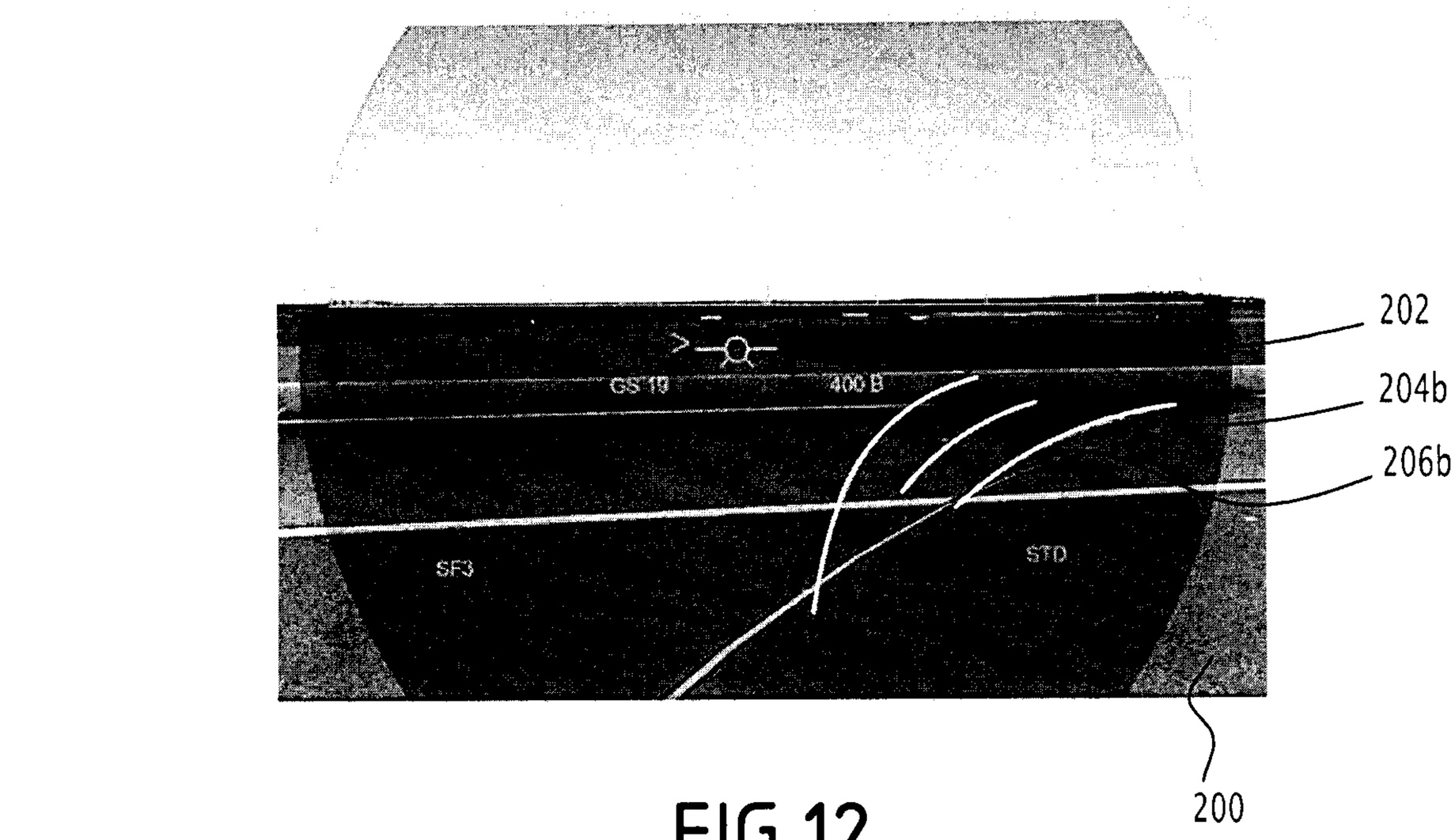

GS 1B
400 B
SF3
STD
202
204b
206b
200

FIG.12

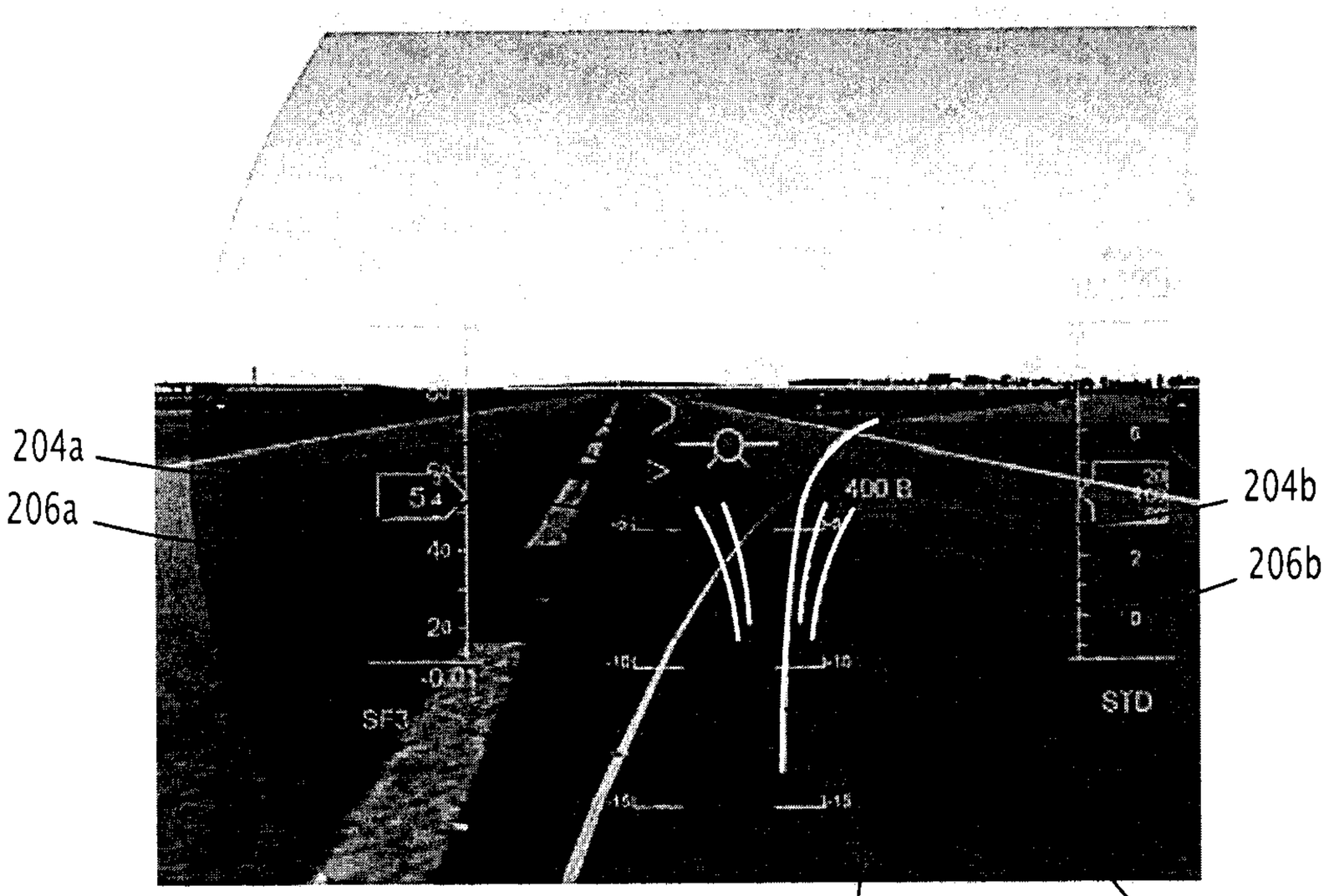

204a
206a
204b
206b
400 B
SF3
STD
202
200

FIG.13

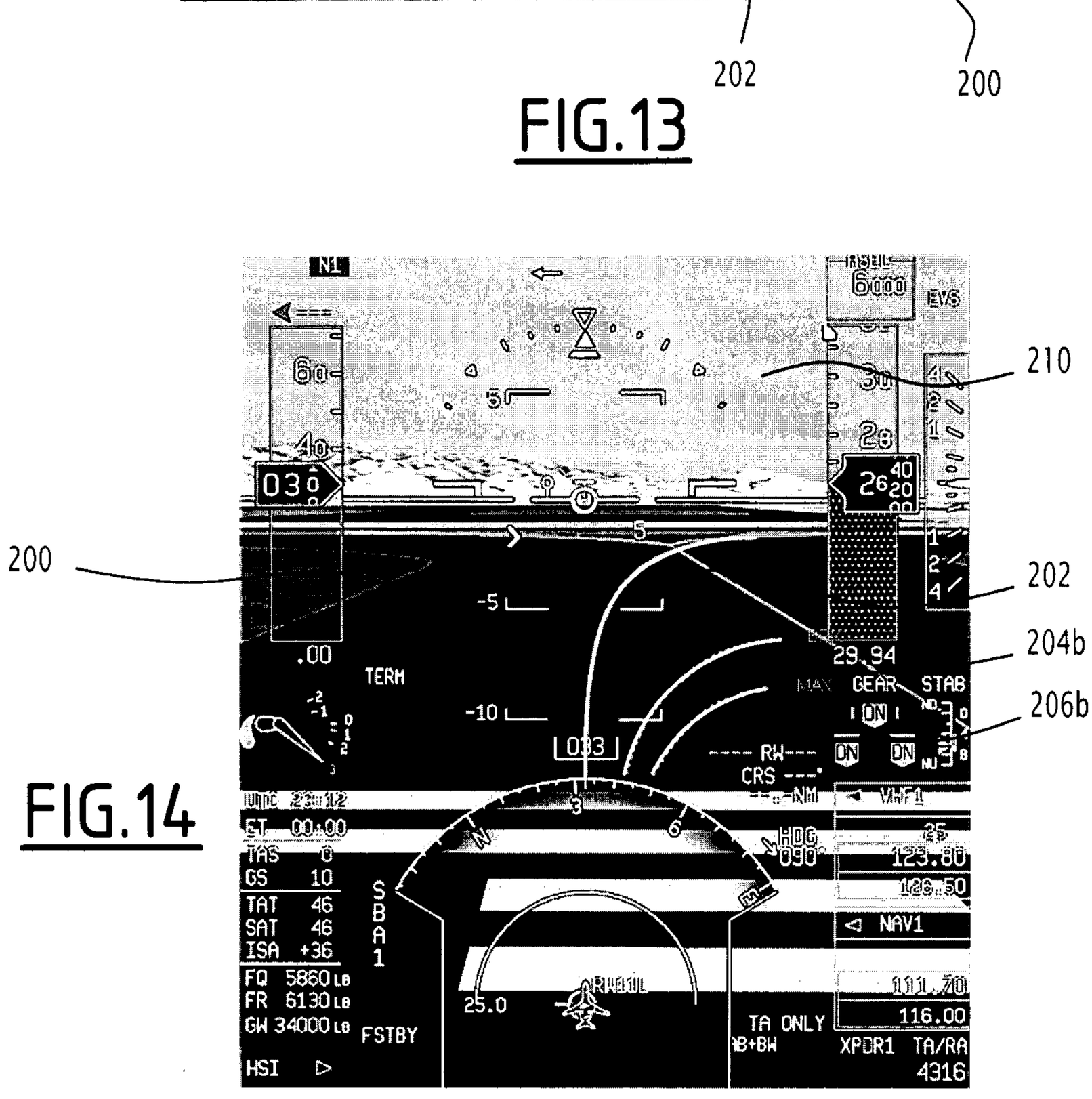

200
210
202
204b
206b
TERM
MAX
GEAR
STAB
RW
CRS
HDG
090
VHF1
123.80
NAV1
116.00
TA ONLY
XPDR1
TA/RA
4316
FSTBY
HSI
25.0

FIG.14

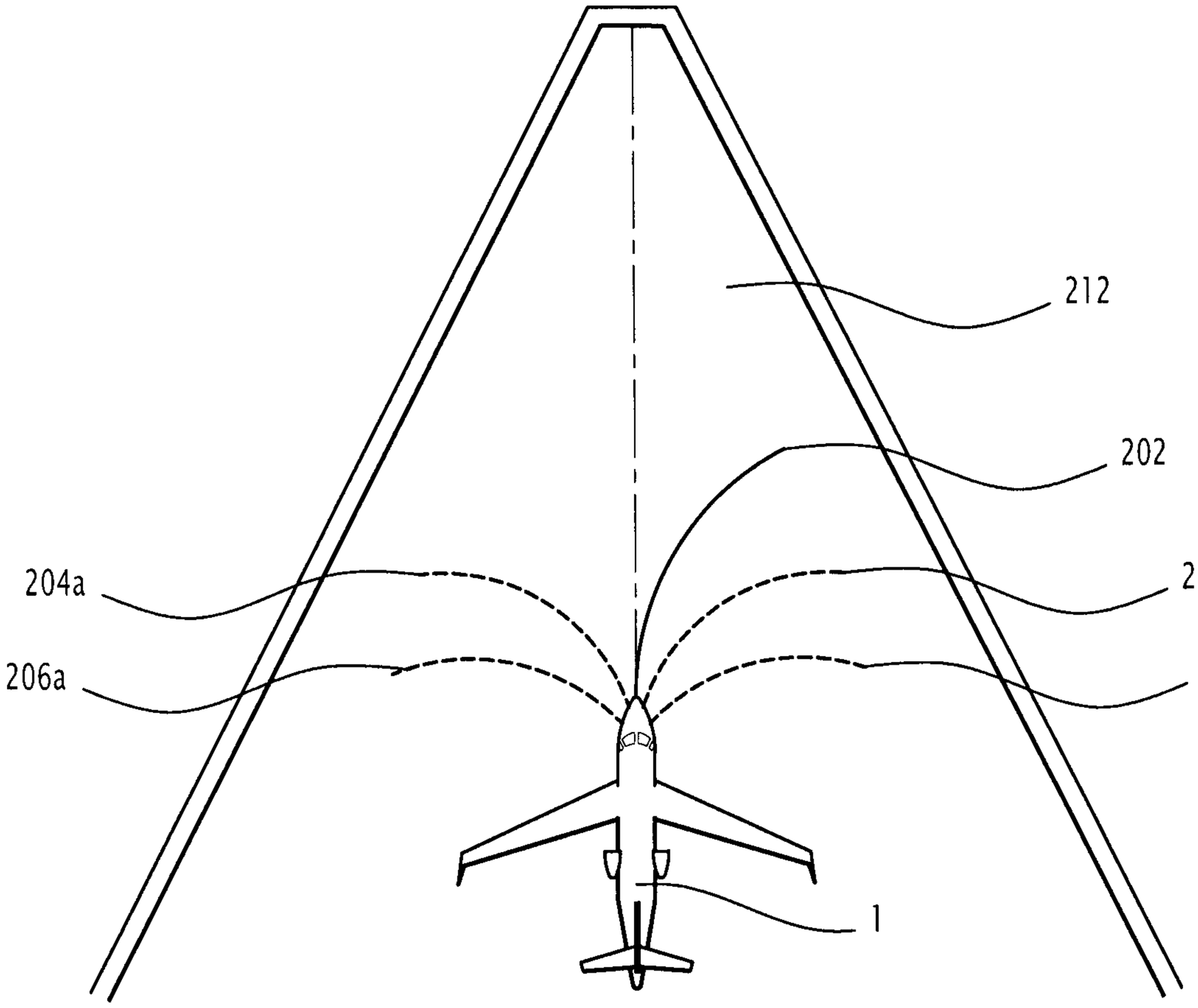


FIG.15

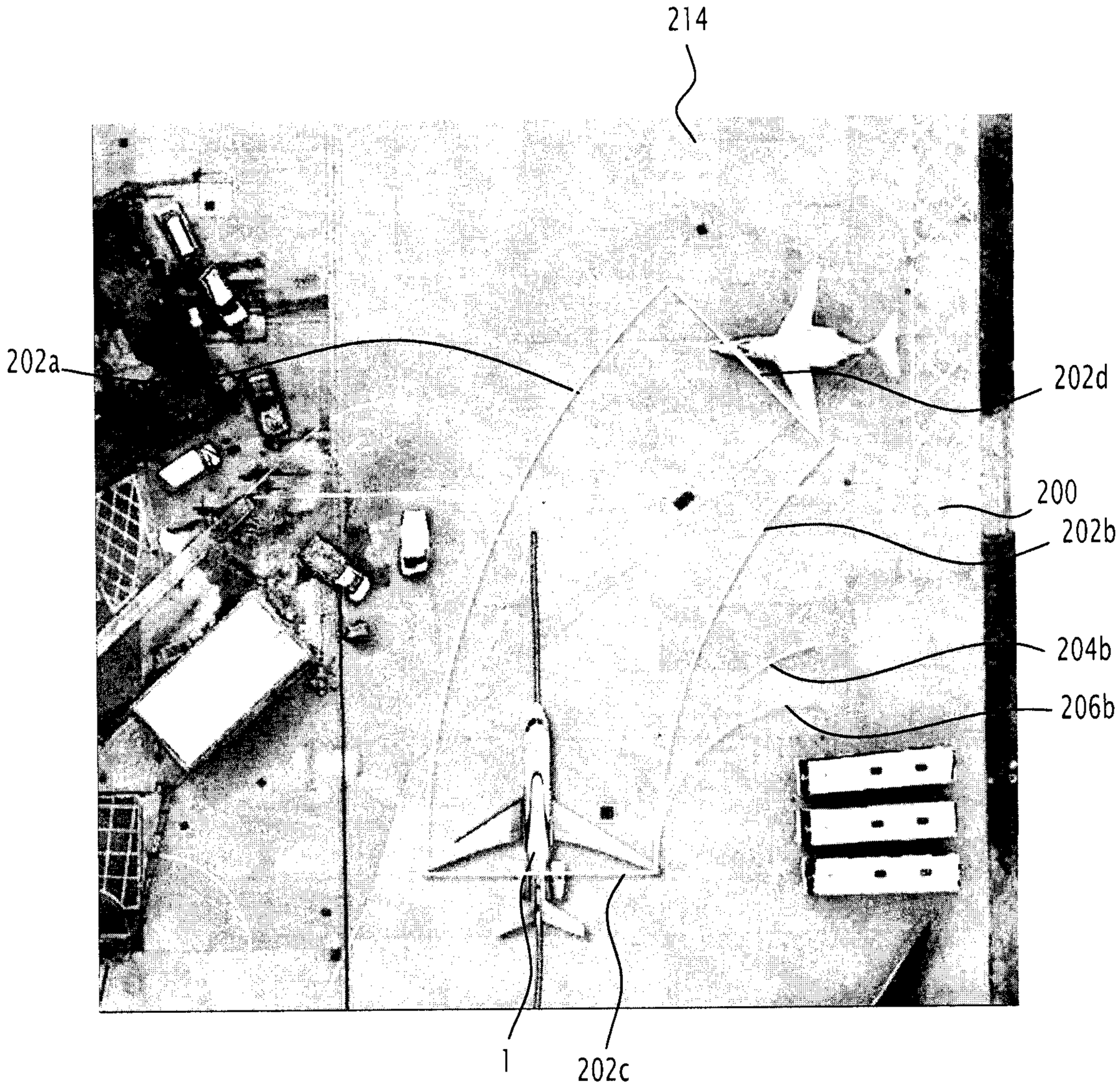


FIG.16

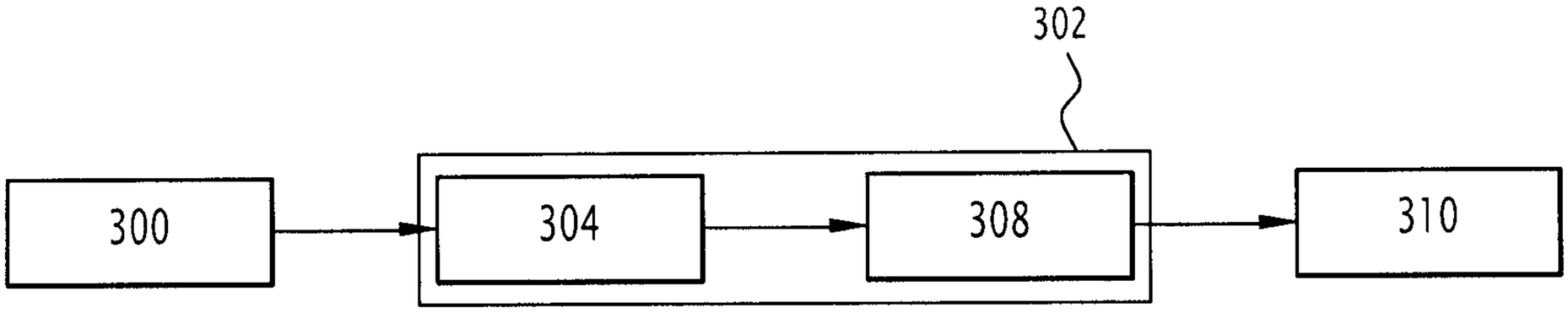


FIG.17

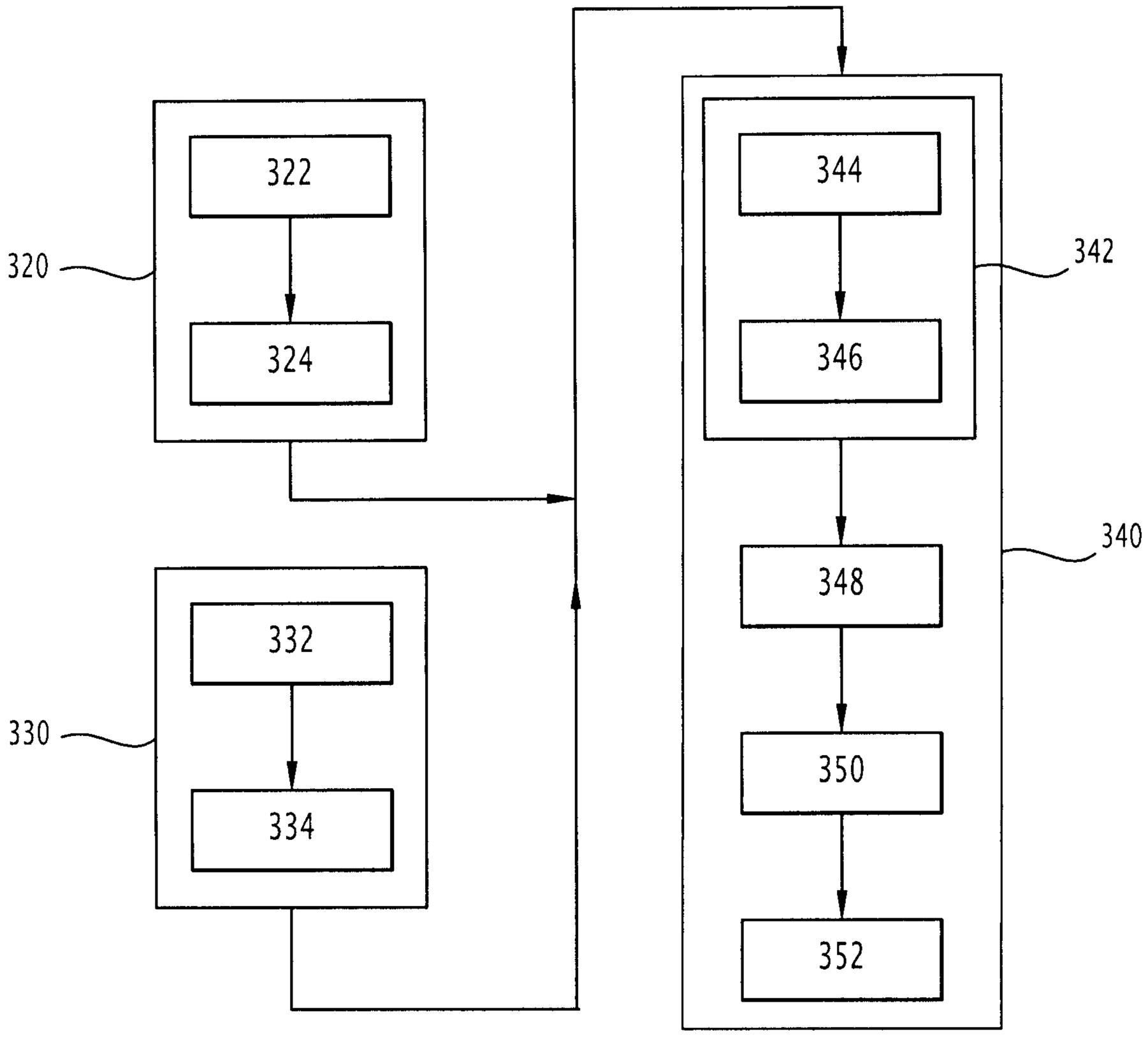
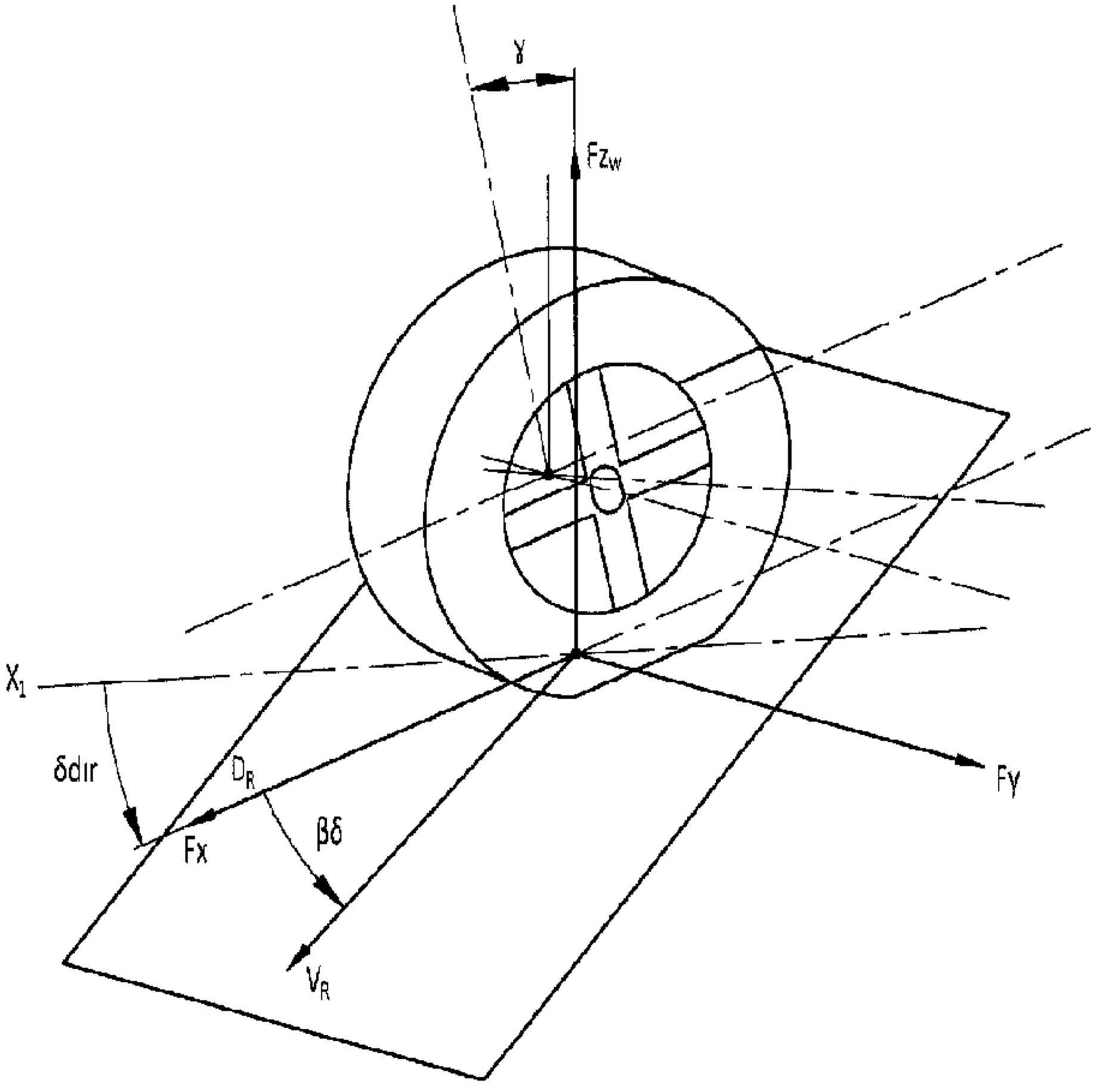


FIG.18


γ
Fz_w
X_1
δdir
D_R
Fx
βδ
V_R
Fy