

# La navigation par satellite et les opérations critiques pour la vie humaine dans les transports

Olivier Carel (55),  
*Institut français de navigation,*  
 et Raymond Rosso (67),  
*Direction de la navigation aérienne*

La navigation par satellite facilite considérablement de nombreuses opérations de transport. Actuellement, cependant, elle ne se prête pas bien aux opérations qui ne souffrent ni erreurs, ni interruptions de service comme les approches et les atterrissages des avions de transport public. Aux limitations techniques s'ajoutent le risque de brouillages et des difficultés économiques et juridiques. Ces difficultés seront peu à peu levées, en particulier avec l'introduction d'EGNOS et de Galileo.

**L**A NAVIGATION par satellite a été utilisée pour la navigation maritime dès le début de l'ère spatiale avec le système TRANSIT, mais les positionnements n'étaient possibles que quelques fois par jour. La navigation par satellite telle qu'elle se présente actuellement a été définie par les militaires américains au cours de la guerre du Viêtnam. Son utilisation par l'aviation civile a été offerte par le président Reagan à la suite de la destruction en vol par l'aviation militaire soviétique du Boeing 747 sud-coréen en 1983.

Aujourd'hui, l'utilisation de la navigation par satellite pour guider les navires, même les plus petits, est devenue universelle, mais ce posi-

tionnement en mer ne joue, en général, pas de rôle critique pour la vie humaine, d'autres sources d'information étant disponibles et le temps disponible pour les interpréter étant relativement confortable.

Les applications aéronautiques sont autrement exigeantes, les erreurs de guidage et même l'interruption du guidage pouvant devenir critiques pour la sécurité de la vie humaine. Les applications de la navigation par satellite aux avions civils commencent à se développer, compte tenu des avantages nombreux qu'elle apporte par rapport aux moyens de navigation classiques basés au sol. Ce sont ces applications aéronautiques qui seront principalement évoquées ici. On reviendra en fin d'article sur le cas des autres moyens de transport.

## Les bénéfices attendus de la navigation par satellite pour le transport aérien

Les bénéfices attendus de la navigation par satellite pour le transport aérien international sont très nombreux.

Depuis déjà une dizaine d'années, l'utilisation de la navigation par satellite par le transport aérien est autorisée pour certaines opérations. C'est la Dixième conférence de navigation aérienne, organisée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) en 1991, à Montréal, qui a lancé le mouvement de mise en service de la navigation par satellite dans le transport aérien mondial pour toutes les phases du vol.

Celles-ci comprennent le déplacement de l'avion entre la porte de départ et la piste de décollage, la trajectoire de départ, la croisière dans les espaces aériens à haute densité de trafic, la croisière éventuelle au-dessus des océans ou des régions inhabitées, la trajectoire d'arrivée, l'approche et l'atterrissage, le roulage au sol pour rejoindre la porte d'arrivée.

Les États-Unis et la Russie ont mis officiellement à la disposition du transport aérien mondial les signaux de navigation émis par les satellites militaires GPS et GLONASS.

Aujourd'hui c'est essentiellement la constellation GPS qui est utilisée, car c'est la seule dont le nombre de satellites permet d'assurer un service de qualité suffisante.

La première utilisation mise en œuvre a été le guidage des avions civils au-dessus des régions terrestres sans infrastructure de radionavigation au sol : survol des océans, des régions inhabitées.

L'OACI a baptisé ce nouveau mode de navigation : la navigation de surface. Elle est mise en œuvre en Europe depuis 1998. La navigation par satellite est un des moyens de guidage qui satisfait aux exigences de performances de la navigation de surface.

Un des objectifs poursuivis est d'arriver au "free flight", qui devrait permettre d'économiser des sommes importantes avec des vols en ligne droite entre départ et arrivée. Les recherches continuent aux États-Unis et en Europe, pour le mettre en œuvre

même en présence de trafic dense, en toute sécurité, en y adjoignant notamment un système de contrôle automatique des séparations entre avions en vol, basé sur l'émission par chaque avion de sa position déterminée à l'aide des satellites de navigation.

La troisième utilisation envisagée de la navigation par satellite consiste à étendre la navigation de surface aux trajectoires d'arrivée et de départ des aéroports. Il est difficile de moderniser ces trajectoires car leur dessin doit tenir compte des nuisances sonores ressenties par les populations survolées. L'utilisation de la navigation de surface y constitue un grand progrès. Elle est en œuvre en Europe, pour les plus grands aéroports, comme Charles de Gaulle, Heathrow, Francfort, Amsterdam.

La prochaine utilisation envisagée de la navigation par satellite est le guidage, délicat, de l'approche des avions jusqu'à un point près du seuil de la piste d'atterrissage, à partir duquel le pilote pourra poser l'avion à vue.

Le guidage doit être très précis à la fois horizontalement et dans le plan vertical, afin d'éviter tout risque de collision avec le relief et les obstacles. Les temps de réaction que l'on peut accorder au pilote et aux automatismes dans les dernières secondes du vol sont très brefs.

Plusieurs pays ont autorisé l'utilisation de la navigation par satellite pour guider les approches sur certains aéroports, en utilisant uniquement les informations de positionnement dans le plan horizontal, la position verticale restant barométrique. Ce sont des "Approches de non-précision GPS". Elles remplacent avantageusement des approches du même type guidées par des moyens de radionavigation au sol. Ces procédures d'approche de non-précision guidées par satellite peuvent être déployées sur des aéroports ou des pistes qui ne disposaient pas de procédures convenables, en particulier dans des pays où l'infrastructure au sol est très limitée.

Pour poursuivre ce progrès, l'OACI préconise des approches dont le guidage serait entièrement assuré par satellite. Avec de telles approches, les avions pourront bénéficier d'un guidage à trois dimensions presque aussi précis que celui fourni par le système traditionnel de précision ILS, du moins de catégorie I, la plus limitée, en usage sur tous les aéroports importants. Une recommandation dans ce sens a été prise lors de la Onzième conférence de navigation aérienne qui s'est tenue à Montréal, en septembre 2003, et à laquelle ont participé 700 représentants de 122 pays et 24 organisations internationales dont, en particulier, l'Association internationale des transporteurs aériens (IATA).

Aux États-Unis, de telles approches sont mises en œuvre progressivement depuis juillet 2003 par suite de l'entrée en service du WAAS, système de renforcement qui émet des informations complémentaires à GPS depuis des satellites géostationnaires. En Europe, cela sera aussi possible dès que le système équivalent, EGNOS, entrera en service. Le déploiement de ces possibilités pourra progressivement s'étendre à l'Afrique.

Si une interruption de service d'un ILS se produit sur un aéroport très important comme Roissy sur lequel sont effectuées des approches simultanées en parallèle, EGNOS permettra de maintenir sensiblement la cadence des atterrissages.

À plus long terme, les transporteurs aériens espèrent bien pouvoir utiliser la navigation par satellite pour effectuer des atterrissages automatiques. Dans ce cas, il s'agit de guider les avions jusqu'au sol, et d'assurer l'arrêt de l'avion sur la piste. Les systèmes actuels de navigation par satellite et leurs renforcements prévus n'offrent pas des performances de guidage suffisantes. Pour cela, il faudra attendre la mise en service de Galileo et des nouvelles générations des systèmes GPS et GLONASS et mettre en œuvre des systèmes de renforcement différentiel au sol. Des travaux de recherche sont en cours dans le monde et semblent très prometteurs.



© DGAC-VÉRONIQUE PAUL

Atterrissage d'avion.

La dernière application envisagée de la navigation par satellite est le guidage des déplacements des avions au sol. Aujourd'hui, les avions commerciaux sont capables d'atterrir de manière automatique, en présence d'un brouillard épais ; par contre, les déplacements au sol pour rejoindre le parking sont dirigés à vue et posent de sérieux problèmes aux pilotes. L'accident récent de Milan a fait prendre conscience des risques importants pour la sécurité liés à ces déplacements au sol en cas de brouillard : un pilote perdu risque de pénétrer sur une piste par erreur et provoquer une collision avec un avion qui décolle ou atterrit.

La **précision horizontale** requise est grande, car il s'agit de maintenir les roues des avions sur des voies de circulation qui sont de moitié moins larges que la piste. Cette précision devrait être disponible avec la mise en service des systèmes comme EGNOS, ou la mise en place de systèmes de renforcement différentiel au sol.

À terme, d'ici quelques années, il devrait être possible de supprimer la plupart des coûteux équipements classiques de radionavigation de bord et des systèmes correspondants au sol. C'est le principal bénéfice attendu par le transport aérien : disposer d'un système de navigation unique pour toutes les phases du vol.

### Les freins à la mise en œuvre pour le transport aérien

Les freins à l'utilisation de la navigation par satellite sont d'abord techniques.

Le premier concerne la **précision**. Le système américain GPS a été longtemps limité en précision par une dégradation volontaire des performances accessibles aux civils afin d'en interdire l'emploi pour des applications hostiles aux États-Unis. Cette dégradation volontaire a été interrompue en juin 2000, mais rien n'interdit aux États-Unis de la remettre en service en cas de crise internationale.

La précision de positionnement du GPS, même sans la dégradation volontaire, reste insuffisante, surtout dans le plan vertical. On a vu plus haut que, pour pouvoir assurer le guidage des **approches dans le plan vertical**, il faudra améliorer la précision en utilisant des systèmes de renforcement, soit EGNOS, soit des stations de renforcement différentiel d'aérodrome. La mise en service de Galileo et des nouvelles générations des constellations GPS et GLONASS, avec leurs signaux à large bande émis sur plusieurs fréquences, améliorera fondamentalement le service.

Le deuxième frein à l'utilisation de la navigation par satellite est la **disponibilité des signaux de navigation** : il existe des moments où un récepteur ne reçoit pas assez de satellites.

Pour le système américain GPS, le nombre de satellites actuellement en service est important, de l'ordre de 27, mais la constellation comprend

de nombreux satellites dont la durée de vie spécifiée a été dépassée, et susceptibles de tomber en panne. Avec une constellation GPS minimale, 21 satellites, les pertes locales de service pourraient durer plusieurs dizaines de minutes. Une panne soudaine d'un satellite peut mettre en danger un atterrissage. Une solution consiste à augmenter le nombre de satellites en orbite. Les satellites géostationnaires du système EGNOS garantiront, partout en Europe, la réception d'au moins deux signaux de navigation en plus. Galileo avec ses 27 satellites garantira une continuité totale.

Le troisième obstacle à l'utilisation de la navigation par satellite est le plus critique car il concerne la sécurité : c'est l'intégrité insuffisante, c'est-à-dire la **possibilité d'erreurs** hors tolérances **non détectables** par l'utilisateur. Comme les satellites actuels ne sont pas surveillés en permanence depuis le sol, ce dysfonctionnement pourrait n'être signalé que plusieurs heures après son occurrence. Un tel délai d'alarme est inacceptable pour les avions qui effectuent des opérations critiques comme les approches.

L'intégrité du positionnement peut être améliorée de plusieurs manières. La première solution consiste à traiter dans le mobile les signaux d'au moins cinq satellites, ce qui permet de détecter rapidement la défaillance éventuelle d'un satellite, et même de l'identifier : les récepteurs de navigation aéronautique autorisés doivent tous effectuer cette surveillance de l'intégrité. Faute d'assez de satellites, des trous de service de ce contrôle d'intégrité pour le guidage latéral en approche peuvent durer quelques minutes aujourd'hui. Un remède sera l'utilisation du système EGNOS, qui va assurer la surveillance continue des satellites GPS et GLONASS au-dessus de l'Europe, et qui transmettra une alarme aux avions dès qu'un satellite subira un dysfonctionnement.

Le quatrième frein à l'utilisation de la navigation GPS a été mis en évidence dans deux rapports récents

dont le deuxième, plus alarmant, celui du Volpe Center, date de la veille des attentats de septembre 2001. Il s'agit de la grande **vulnérabilité des signaux**, très faibles, de la navigation par satellite **aux brouillages**, que ceux-ci soient ou non intentionnels, ou dans le pire des cas hostiles. Il suffit d'une puissance de brouillage faible sur la fréquence unique de fonctionnement des récepteurs GPS pour rendre les récepteurs sourds, et le calcul de position impossible, dans tout l'espace aérien en vue de la source de brouillage.

Le rapport cité a analysé les sources possibles de brouillages non intentionnels et a conclu qu'il était nécessaire de prendre des précautions pour s'en prémunir. La Onzième conférence de navigation aérienne, en septembre 2003, a recommandé que les États qui décident d'autoriser l'utilisation de la navigation par satellite dans leur espace aérien effectuent une analyse du risque et mettent en place des mesures de réduction de ce risque. La mesure la plus simple consiste à conserver un réseau minimal de moyens de radionavigation classiques et d'obliger les avions à conserver les équipements de radionavigation correspondants.

Les systèmes comme EGNOS ne permettront pas de combattre les brouillages car leurs satellites émettent sur la fréquence commune à tous les satellites GPS. Il faudra attendre les satellites Galileo et la nouvelle génération des satellites GPS et GLONASS, pour disposer de deux fréquences par satellite. Le brouillage non intentionnel d'une fréquence ne bloquera plus le fonctionnement de la navigation par satellite.

Un autre frein important à la mise en œuvre de la navigation par satellite est lié au **financement** de la réalisation et du fonctionnement des systèmes. Pour les constellations militaires GPS et GLONASS, la source de financement est le budget de la défense des États-Unis et de la Russie. Pour les systèmes civils comme EGNOS et Galileo, il est nécessaire de

trouver des sources civiles. Il existe un mécanisme paneuropéen de collecte des redevances aéronautiques qui permet de couvrir les coûts de fonctionnement des services de la navigation aérienne. Les compagnies aériennes accepteraient de contribuer aux coûts de fonctionnement des systèmes européens à condition d'être certaines que la part des coûts imputée au transport aérien soit proportionnelle au poids de l'aviation par rapport à l'ensemble des utilisateurs.

Le dernier obstacle est de nature juridique : actuellement, le transport aérien mondial s'effectue dans le cadre d'une convention internationale, la convention de Chicago, datant de 1944. Cette convention prévoit que les moyens de guidage des avions civils sont installés et entretenus par les États signataires. Cela implique qu'en cas d'accident dû au dysfonctionnement d'un moyen de radionavigation, l'État qui en a la responsabilité pourra être mis en cause, par les ayants droit des victimes. Les satellites de navigation militaires GPS et GLONASS ne s'intègrent pas dans cette règle puisque les États qui autorisent leur utilisation dans leur espace aérien n'ont aucun contrôle sur le fonctionnement des satellites. Les **responsabilités en cas d'accident** dû à une défaillance non spécifiée des satellites GPS et GLONASS ne sont pas aujourd'hui clairement identifiées. Les États utilisateurs de la navigation par satellite exigent un traité international qui définisse clairement les responsabilités des États opérateurs des satellites. Les États-Unis et la Russie s'y opposent.

Avec le déploiement de la constellation Galileo, la situation devrait changer significativement. L'opérateur de Galileo sera une entreprise privée. Les États qui décideront d'autoriser l'utilisation de Galileo dans leur espace aérien signeront un contrat avec cet opérateur, lequel leur garantira, en contrepartie d'une redevance d'usage, un niveau de qualité du service et surtout engagera sa responsabilité en cas d'accident dû à un dysfonctionnement du système.



## Les autres modes de transport

L'application de la navigation par satellite aux autres modes de transport pose moins de difficultés qu'à l'aviation, sauf pour le rail.

Les transports de surface sont plus lents, le pilote fait plus souvent usage de la vue de l'extérieur, il peut avoir plus de temps pour comparer des sources diverses d'information. La réglementation est souvent moins détaillée que dans l'aviation. Bref, les applications ne sont, pour le moment, pas critiques pour la vie humaine.

C'est en particulier le cas des **activités maritimes**. Jamais le navire ne se trouve dans le cas critique des dernières secondes d'un atterrissage. Les sources de positionnement du navire comprennent, entre autres moyens, dès qu'on approche d'une côte, les sondes acoustiques qui permettent de déterminer sur quelle ligne d'égalité profondeur le navire se trouve et cette information est interprétée par le personnel de la passerelle grâce, maintenant, à des cartes électroniques. D'autre part, les contacts du navire avec les fonds et les rivages ne sont pas forcément catastrophiques.

Les erreurs de navigation restent possibles, elles peuvent amener les navires à frôler Ouessant, par exemple, mais des moyens de surveillance depuis la terre ferme sont mis en œuvre pour cela. La source des dysfonctionnements réside surtout dans une mauvaise gestion des moyens humains. Il est évident que le **monde maritime doit progresser et accéder à des réglementations plus précises et plus complètes**. Cet effort se fait. La navigation par satellite est devenue un outil précieux pour la marine, les officiers savent qu'ils ne peuvent pas lui faire confiance aveuglément.

Le domaine des **chemins de fer** ressemble par certains côtés au cas de l'aéronautique avec des exigences de sécurité extrêmes, un contrôle très strict du transport par les centres de gestion, un réseau de voies bien défini, et, fait nouveau, des trains apparte-

nant à des organismes privés étrangers. Le positionnement des trains se fait sur une seule dimension, la connaissance de cette position et de la vitesse est à la portée de la navigation par satellite. Il est fondamental de se prémunir contre les erreurs de voie, mais il ne s'agit pas là d'un problème que l'on puisse résoudre avec des satellites, les voies sont trop proches et l'erreur trop grave.

Les possibilités de la navigation par satellite sont explorées dans la plus grande prudence, des essais sont en cours. Reste que les chemins de fer se sont développés isolément dans chaque pays d'Europe, avec, aujourd'hui, des opérations complexes pour certains voyages internationaux. Cette situation est en complète évolution. On n'en est certes pas à exiger de la part des compagnies ferroviaires des redevances pour l'usage de la navigation par satellite.

Le positionnement par satellite des **véhicules routiers** est d'usage courant pour la gestion de flottes de taxis et de camions et comme aide aux conducteurs pour leur proposer un itinéraire et pour s'y maintenir, etc. Il ne s'agit pas de guider des opérations aveugles, les erreurs, les pertes de signal n'entraînent que des pertes de temps.

La mise en œuvre de transports "intelligents", c'est-à-dire informatisés, peut exiger des moyens électroniques et informatiques complexes, et certaines applications seront certainement critiques pour la vie humaine. Des recherches visent à confier à des automatismes la séparation entre les véhicules sur autoroutes. Ces améliorations de la fluidité du trafic sont apparemment envisageables. Après tout, nous acceptons bien de monter dans des métros sans conducteur.

On retrouve dans ces diverses applications de la navigation par satellite au transport de surface la nécessité d'une réglementation plus complète et plus précise élaborée avec les professions intéressées, le contrôle permanent de la façon dont les diverses parties prenantes suivent les règle-

ments, des moyens de financement des services assurés si possible par les usagers eux-mêmes. Beaucoup de travail en perspective pour les responsables du trafic de surface.

## Conclusion

Les bénéfices attendus de la mise en œuvre généralisée de la navigation par satellite pour le transport aérien international comme pour les autres modes de transport sont immenses.

Les obstacles à cette mise en œuvre sont encore très nombreux. Des solutions existent ou vont bientôt exister. La mise en œuvre devrait donc se faire de manière progressive, au cours de la décennie qui vient, en utilisant d'abord les satellites militaires GPS et GLONASS, et leurs renforcements satellitaires, comme EGNOS, ou basés au sol.

Le déploiement de la constellation Galileo par l'Europe devrait permettre de résoudre complètement les problèmes soulevés, et d'autoriser enfin l'utilisation de la navigation par satellite pour les applications critiques pour la sécurité comme le guidage des avions civils pendant toutes les phases du vol.

Les applications potentielles de la navigation par satellite dans les domaines maritime et terrestre sont aujourd'hui considérables et devraient se développer rapidement. Les enjeux économiques pour la France sont très importants et il est urgent de préparer ces applications, sinon ce seront les autres pays participant au programme Galileo qui les concevront et en tireront des bénéfices. ■