

Etude

sur les événements GPS

BEA

MINISTÈRE DES TRANSPORTS, DE L'ÉQUIPEMENT, DU TOURISME ET DE LA MER

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

Table des matières

GLOSSAIRE	5
CONTEXTE DE L'ETUDE	7
1 - PRESENTATION DES EVENEMENTS GPS	7
1.1 Caractéristiques d'un événement GPS	9
1.2 Limitations de la démarche	10
1.3 Limitations techniques	10
1.4 Etat des lieux succinct de la formation	11
1.5 Aspects réglementaires	11
1.6 Quelques chiffres	11
1.6.1 Répartition des occurrences par type d'aéronef	12
1.6.2 Répartition des occurrences selon l'expérience et l'âge des pilotes	12
1.6.3 Classification des occurrences	13
2 - ANALYSE	15
2.1 Préparation du vol	15
2.1.1 Préparation à long terme	15
2.1.2 Préparation à court terme	16
2.2 Réalisation du vol	16
2.2.1 Suivi de la navigation et prise en compte de l'environnement	16
2.2.2 Prévention des abordages	17
2.2.3 Précision et dépendance	17
2.2.4 Objectif destination	17
2.2.5 Décision de déroutement	18
2.2.6 Contrôle de la trajectoire et des paramètres de vol	18
3 - CONCLUSIONS	19
4 - AMELIORATIONS ENVISAGEABLES	20
LISTE DES ANNEXES	21

Glossaire

ATC	Contrôle de la circulation aérienne
CFIT	Collision avec le sol en vol contrôlé
CTR	Zone de contrôle
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile (France)
GDOP	Dilution géométrique de la précision
GPS	Système de positionnement mondial
GUND	Ondulation du géoïde
IFR	Règles de vol aux instruments
PPS	Système de positionnement de précision
RAIM	Surveillance autonome de l'intégrité par le récepteur GPS
REC	Recueil d'Événements Confidentiel
RTCA	Commission technique chargée des systèmes radio pour l'aéronautique
SA	Fonction de dégradation du signal GPS
SPS	Système standard de positionnement
TMA	Région de contrôle terminal
TSO	Instruction technique normalisée
ULM	Ultra Léger Motorisé
VSV	Vol Sans Visibilité
VOR	Radiophare omnidirectionnel VHF
WGS84	Système géodésique mondial 1984

CONTEXTE DE L'ETUDE

En décembre 2001, un Mooney 20 décolle de Lognes (77) pour un vol VFR à destination de Nogaro (32). La croisière se déroule au niveau de vol 105. Les dernières informations météorologiques concernant la région de Mont-de-Marsan, Aire sur l'Adour et Nogaro font état de brouillards givrants et de faibles visibilités à l'arrivée. Le pilote indique que, sans amélioration du temps, il se déroutera vers Pau. Alors qu'il est en descente et en contact radio avec Mont-de-Marsan, il demande au contrôleur de Pau les observations météorologiques : la visibilité est de cinq kilomètres et le plafond de 2 100 pieds. Il indique poursuivre vers sa destination et quitte la fréquence de Mont-de-Marsan pour contacter Nogaro, aérodrome non contrôlé. L'épave est retrouvée contre un hangar agricole au sommet d'une colline proche de l'aérodrome de destination.

L'enquête a établi les faits suivants :

- ❑ trois GPS étaient à bord ; depuis Lognes, l'avion a suivi une route directe vers sa destination, alors que Nogaro ne dispose pas de moyens de radionavigation et qu'une partie du vol s'est déroulée au-dessus de la couche nuageuse ;
- ❑ le pilote a conservé le contrôle de son avion pendant la traversée de la couche nuageuse ;
- ❑ la visibilité sur le site était faible avec quelques trouées à travers la couche de stratus laissant entrevoir le sol.

Cet accident, qui présente des points communs avec de nombreux autres, a conduit le BEA à étudier l'influence du GPS sur la réalisation de certains vols. En effet, les récepteurs GPS sont financièrement abordables, maintenant très répandus et de plus en plus souvent intégrés aux planches de bord.

D'autres organismes s'intéressent également à l'interaction entre l'homme et ce nouvel outil de navigation. Outre des études américaines ⁽¹⁾, une étude néozélandaise, fondée sur l'expérience d'un nombre important de pilotes privés, a évalué les changements de comportements induits par l'utilisation du GPS (rapport présenté à l'AAP (Association of Aviation Psychologists), Global Positioning System : Human factors aspects for General Aviation pilots, 5 octobre 1995, disponible sur le site Internet <http://svt.ntnu.no/psy/Bjarne.Fjeldsenden/Manmachine/flytryggingseminar98.html>).

⁽¹⁾ Catherine A. Adams, Peter V. Hwoschinsky, Richard J. Adams. Analysis of adverse events in identifying GPS human factors issues. Report number: NASA/TM-2001-211413, March 2001.

Wayne et al, 2005. The effects of a scenario - based GPS training program on pilot proficiency in the general aviation pilot. Proceedings ISAP (International Symposium on Aviation Psychology) April 2005, Oklahoma City, pp 151 154.

1 - PRESENTATION DES EVENEMENTS GPS

Le système GPS, s'il est utilisé à bon escient, peut permettre au pilote d'améliorer la précision d'une navigation ou de se dérouter efficacement. De nombreux accidents et incidents ont cependant montré que ce n'était pas toujours le cas. La présente étude analyse différentes situations où une utilisation inadéquate du GPS en aviation générale a affecté la sécurité du vol. Elle s'appuie sur des accidents et incidents répertoriés par le BEA entre 1995 et 2004 (voir annexe A), ainsi que sur les données du REC ⁽²⁾ (voir annexe B).

1.1 Caractéristiques d'un événement GPS

L'utilisation du GPS ne constitue généralement pas le facteur déclenchant d'un accident ou d'un incident. Cependant la présence ou l'emploi inapproprié de cet instrument peuvent intervenir comme facteur contributif, lors de la préparation ou au cours de l'exécution du vol. L'exemple ci-après illustre un événement GPS.

Un Piper J3 décolle d'Angleterre pour un voyage vers l'Espagne. L'avion est équipé d'un compas et de deux GPS portables dont l'un est fixé sur le tableau de bord. Les informations météorologiques, transmises par la station de Calais avant le départ, permettent d'envisager la traversée. Cependant les conditions se dégradent rapidement pendant le vol. Le pilote tente d'abord de passer sous la couche nuageuse. Il indique « s'être fait peur au ras de l'eau » et décide de voler entre deux couches nuageuses. A partir de ce moment, il tourne en rond et commence à douter des indications fournies par ses récepteurs : il a l'impression que « les deux GPS sont devenus fous ». Après environ une heure dans ces conditions, il aperçoit un champ et atterrit en urgence. L'avion est fortement endommagé. Il lui reste dix litres d'essence.

Le pilote a vraisemblablement volé avec des références visuelles dégradées entre les deux couches nuageuses. Or, si les calculateurs portables peuvent indiquer une route à suivre ou un vecteur de déplacement instantané, ils ne donnent souvent pas d'informations sur le cap à prendre ou sur l'attitude de l'avion. Comme dans d'autres événements similaires, le pilote confondait le cap magnétique, indication donnée par le compas (ou le conservateur de cap), avec la route magnétique mesurée sur une carte et confirmée par les moyens de radionavigation. Une installation improvisée du GPS à bord peut aussi perturber le fonctionnement d'équipements, notamment le compas, ou bien cacher des instruments.

⁽²⁾ Le Recueil d'Evénements Confidentiel (REC) est un système de retour d'expérience mis en place en 2000 au bénéfice de l'aviation générale. Il prend en compte des situations inhabituelles relatives volontairement par les différents acteurs aéronautiques. Site Internet : http://www.bea.aero/rec/le_rec.htm

Cette occurrence est considérée dans le cadre de cette étude comme un événement GPS, car le pilote, comme il l'a indiqué, n'aurait pas pris la décision de poursuivre son vol s'il n'avait pas disposé de GPS et s'il n'avait pas fait confiance à cet équipement.

1.2 Limitations de la démarche

La liste des événements considérés comme « événements GPS » dans cette étude n'est pas exhaustive, notamment pour les raisons suivantes :

- ❑ l'influence réelle de l'outil GPS sur le déroulement du vol est parfois difficile à identifier ;
- ❑ dans la base de données accidents/incidents du BEA, la présence du GPS ou ses caractéristiques techniques n'ont pas toujours été consignées ;
- ❑ les pilotes ne font pas tous un compte rendu lorsqu'ils « frôlent » l'accident.

1.3 Limitations techniques

Une présentation du fonctionnement du GPS se trouve en annexe C. Il peut être intéressant de noter les points généraux suivants :

- ❑ L'imprécision verticale associée au système GPS peut être de l'ordre de cent quarante mètres (soit environ cinq cents pieds).
- ❑ Un récepteur qui ne dispose pas de la fonction RAIM ou qui n'est pas couplé aux autres moyens de navigation n'assure pas l'intégrité ⁽³⁾ de l'information de positionnement.
- ❑ Les récepteurs sont particulièrement sensibles aux interférences, aux obstacles et au masquage de l'antenne (le positionnement nécessite une vue directe de plusieurs satellites).
- ❑ De nombreuses erreurs ont été observées dans les bases de données constructeurs et utilisateurs. Ces erreurs peuvent provenir de l'utilisation de données erronées, d'une programmation inappropriée ou encore d'une base de données non à jour.
- ❑ Le positionnement s'effectuant dans le système géodésique WGS84, la référence verticale diffère souvent des références cartographiques conventionnelles utilisées pour la plupart des documents VFR.

⁽³⁾ L'intégrité est la capacité d'un système à fournir une alerte dans un temps maximum spécifié à l'utilisateur si l'information fournie ne respecte pas les performances d'utilisation prévue. Par exemple, un ILS catégorie I déclenche une alerte dans les six secondes.

1.4 Etat des lieux succinct de la formation

Le manuel de l'instructeur du pilote d'avion, dans sa septième version, aborde la formation à l'emploi de récepteurs GPS. Ce document conseille une organisation en deux leçons, la première traitant d'une utilisation basique autour de la fonction GOTO, la seconde d'une utilisation avancée abordant le suivi d'un plan de vol. En outre une section « commentaires » mentionne certains problèmes spécifiques à l'utilisation d'un récepteur GPS, tels que l'entrée de points de report erronés, la consommation excessive de ressources du pilote ou encore la perte de la notion de temps. Le manuel du pilote privé d'avion, dans sa neuvième édition, aborde également l'utilisation du GPS en VFR.

La réglementation n'imposant pas l'installation de récepteurs GPS, la teneur de la formation dispensée par les organismes (aéro-clubs, écoles) est laissée à leur discrétion. Par exemple, il est intéressant de remarquer qu'environ 80 % des pilotes néo-zélandais, interrogés dans le cadre de l'étude déjà mentionnée, indiquent avoir appris via le manuel de leur récepteur et que 49 % estiment que cette source n'était pas satisfaisante.

En France, peu d'organismes de formation dispensent réellement une formation théorique et pratique structurée sur l'utilisation du GPS. De nombreux avions utilisés pour la formation ne sont pas équipés de récepteur GPS.

1.5 Aspects réglementaires

Le récepteur GPS intégré au tableau de bord peut être utilisé comme moyen de navigation conformément aux dispositions de l'arrêté du 2 décembre 2002 fixant les conditions d'utilisation des aéronefs civils en aviation générale. Les GPS portables ne répondent pas à ce règlement. Par ailleurs, il est exigé dans le cas où le pilote doit voler sans contact visuel de l'eau ou du sol en VFR de jour : un récepteur VOR ou un radiocompas automatique en fonction de la route prévue ou un GPS homologué en classe A, B ou C (voir limites d'utilisation en annexe C).

1.6 Quelques chiffres

Les trente-cinq occurrences de cette étude ont concerné des avions, des hélicoptères, des ULM ou des planeurs. Elles ont fait trente-quatre morts et treize blessés. Seuls trois aéronefs ont été retrouvés intacts. Deux occurrences du REC ont également été prises en compte.

1.6.1 Répartition des occurrences par type d'aéronef

Le tableau suivant donne la répartition des occurrences selon le type d'aéronef.

Catégorie d'aéronef	Nombre d'occurrences	Nombre de morts et de blessés
Planeurs	4	2 morts, 3 blessés
Avions de plus de 120 ch (avions de voyage)	16	22 morts, 8 blessés
Avions de 120 ch ou moins	6	2 morts, 2 blessés
Hélicoptères	3	4 morts
ULM et construction amateur	6	4 morts

Les occurrences survenues aux avions de plus de 120 ch représentent près de la moitié des événements GPS et quasiment les deux tiers des morts et des blessés. L'utilisation d'un récepteur GPS dans des aéronefs offrant un habitacle de volume restreint (de type ULM par exemple) peut pallier le manque de moyens de radionavigation et amener certains pilotes à envisager de longs trajets, qu'ils n'effectueraient peut-être pas s'ils ne disposaient que des méthodes de navigation basiques.

1.6.2 Répartition des occurrences selon l'expérience et l'âge des pilotes

Dans vingt-deux occurrences étudiées (soit 67 % des cas), le pilote avait une expérience supérieure à trois cents heures de vol (deux dossiers ne comportent pas ce renseignement). Les heures de vol totalisées par un pilote ne constituent toutefois que l'un des paramètres à prendre en compte pour évaluer ses compétences. De nombreux autres facteurs ont de l'importance, tels que le contexte dans lequel ont été effectuées ces heures ou l'échelle de temps sur laquelle se situe cette expérience.

Parmi les accidents recensés, vingt-huit commandants de bord (soit 85 %) avaient quarante ans ou plus (deux dossiers ne comportent pas ce renseignement). Selon les chiffres de la DGAC, 60 % des pilotes privés en activité appartiennent à cette classe d'âge.

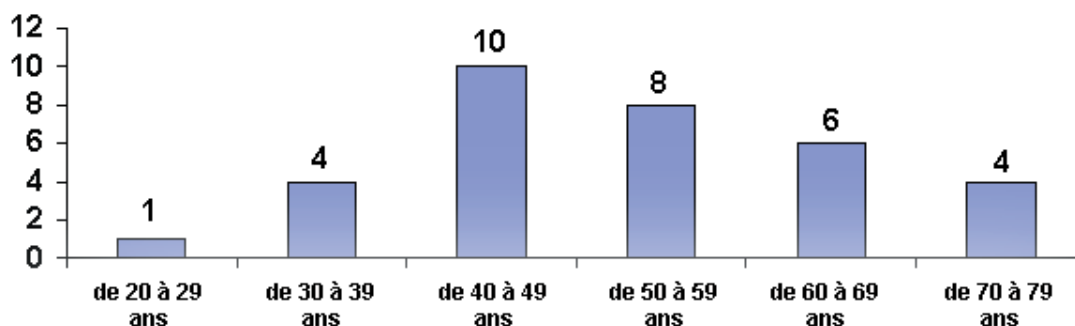


Figure 1 : répartition des accidents par tranche d'âge entre 1995 et 2004

1.6.3 Classification des occurrences

Les occurrences peuvent être regroupées en catégories établies en fonction des premières constatations et des conséquences. Les événements GPS de cette étude se retrouvent essentiellement dans cinq groupes :

- ❑ les collisions avec le sol en vol contrôlé,
- ❑ les pertes de contrôle par conditions météorologiques défavorables,
- ❑ les pannes d'essence,
- ❑ les interruptions volontaires du vol,
- ❑ un groupe « divers ».

Les collisions avec le sol en vol contrôlé sont des occurrences au cours desquelles les pilotes contrôlent l'attitude de leur aéronef mais ont une conscience erronée du relief et des obstacles environnants ; la collision a lieu alors qu'ils sont dans des conditions de visibilité défavorables. L'énergie lors du choc est élevée et les dommages sont importants. Seize CFIT ayant fait vingt-cinq morts et sept blessés graves ont été recensés. Dans la majorité des cas, les pilotes utilisaient des avions de voyage ; une population particulière peut être identifiée au sein de ce groupe : celle des hommes d'affaires utilisant des avions légers pour des déplacements professionnels.

Les pertes de contrôle par conditions météorologiques défavorables sont des occurrences au cours desquelles les pilotes pénètrent dans une couche nuageuse, perdent les références visuelles extérieures et le contrôle de l'aéronef. Quatre accidents ayant fait huit morts ont été recensés (à noter qu'il n'y a eu que des morts, sans blessés ni survivants).

Les pannes d'essence se terminent souvent par des atterrissages en campagne non préparés et réalisés dans la précipitation, donnant lieu à des dommages importants. Quatre pannes d'essence liées à l'utilisation d'un GPS ont été recensées.

Les interruptions volontaires du vol en campagne sont des atterrissages décidés par le pilote alors qu'il contrôle son aéronef et que l'autonomie est encore suffisante pour mener à bien cette opération. Il est important de souligner qu'aucune victime n'est à déplorer à la suite de ces occurrences. Ce résultat est déjà mis en évidence dans l'étude du BEA « Objectif destination ».

Enfin, dans la catégorie « divers », ont été regroupées les abordages, les sorties de piste, etc. Il convient de souligner que la contribution possible du GPS lors d'un abordage est difficile à établir. Le quasi abordage extrait du REC permet d'illustrer une baisse de vigilance extérieure liée à la présence d'un GPS à bord.

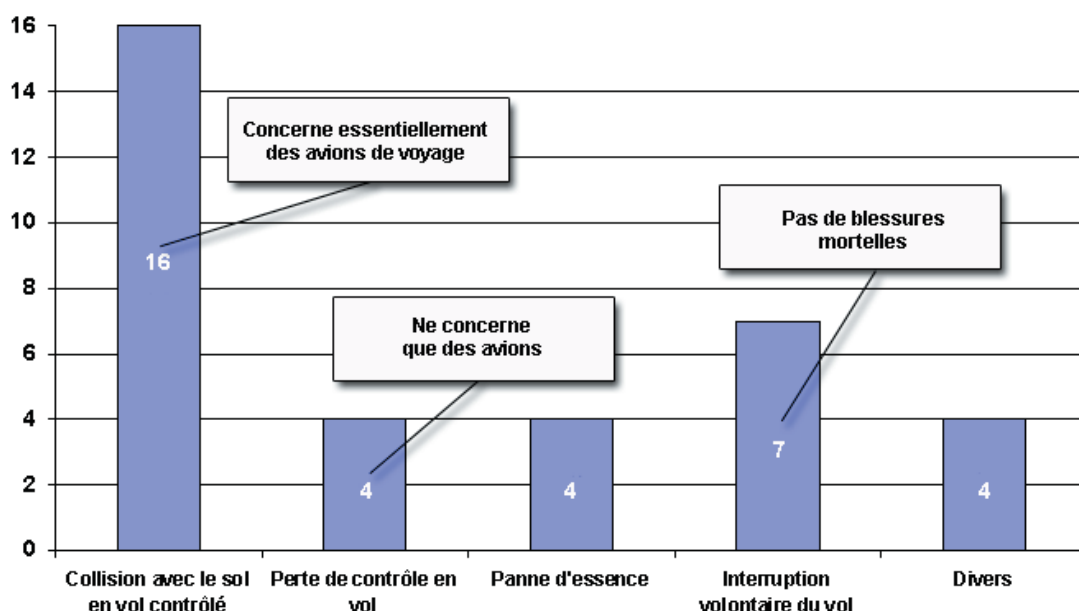


Figure 2 : répartition des événements GPS entre 1995 et 2004

2 - ANALYSE

L'analyse des occurrences retenues dans cette étude montre que certains pilotes disposant d'un récepteur GPS font excessivement confiance :

- ❑ à leurs propres capacités à réaliser un vol,
- ❑ aux multiples fonctionnalités offertes par ces récepteurs,
- ❑ à leurs bases de données.

L'obstination à poursuivre le vol par conditions météorologiques défavorables est un facteur fréquemment mis en évidence dans les accidents de type CFIT ou perte de contrôle. Ces vingt accidents ont fait trente-trois morts (97 % des morts recensés dans cette étude).

L'analyse qui suit s'articule autour des différentes étapes constitutives d'un vol :

- ❑ la préparation, qui peut être à long et court terme ;
- ❑ les différentes phases du vol, chacune nécessitant des prises de décision, voire des replanifications, en temps réel.

2.1 Préparation du vol

Naviguer à vue suppose une représentation mentale continue, cohérente et correcte de la situation de l'aéronef dans son environnement. A partir de là, l'analyse avant le vol des conditions météorologiques ou du relief est naturelle puisque liée à l'évaluation de la visibilité sur la route prévue, de la charge de travail, etc. Par opposition, le GPS permet une représentation mentale en deux dimensions masquant ces contraintes.

2.1.1 Préparation à long terme

Durant la préparation à long terme, le pilote envisage la faisabilité du vol : il réalise une première étude de la route et mesure les difficultés que pourrait présenter la navigation, évalue les aides de radionavigation disponibles, son autonomie, etc.

Si le pilote se repose sur son GPS pour éluder les difficultés de navigation et négliger la préparation soignée de celle-ci, il crée progressivement les conditions de sa dépendance vis-à-vis de son récepteur GPS. La présence de plus d'un GPS a été relevée dans de nombreux accidents. Dans ces cas, le pilote a probablement préféré s'assurer qu'il pouvait pallier une éventuelle défaillance d'un équipement.

2.1.2 Préparation à court terme

Avant le départ, le pilote étudie notamment les conditions météorologiques et les conséquences qu'elles pourraient avoir sur le déroulement du vol. Par exemple, dans le cas où un vol à faible hauteur est envisagé, le pilote doit prendre en compte, entre autres, la portée optique des moyens de radionavigation ou de radiocommunication, ou la visibilité des repères au sol. Néanmoins, il apparaît que certains s'affranchissent de ces vérifications lorsqu'ils disposent d'un récepteur GPS. Dès lors, l'étude de la situation météorologique peut leur apparaître secondaire, voire inutile. Considérant être déchargés des tâches de navigation, ils estiment pouvoir être plus disponibles pour gérer un vol réalisé dans des conditions météorologiques marginales. L'étude néo-zélandaise précédemment citée confirme que les pilotes se sentent plus à même d'affronter des conditions atmosphériques défavorables lorsqu'ils disposent d'un récepteur GPS. Ceci peut conduire à une gestion opportuniste du vol, le pilote subissant l'évolution de la situation atmosphérique, du relief ou des obstacles.

La majorité des accidents étudiés mettent en évidence une préparation incomplète du vol : le pilote décide de partir sans la documentation nécessaire alors que les conditions météorologiques sont dégradées. Il est difficile de dire a posteriori s'il décide dès la préparation à court terme de s'affranchir des conditions de vol à vue ou si cette décision intervient en cours de vol.

2.2 Réalisation du vol

2.2.1 Suivi de la navigation et prise en compte de l'environnement

Pour se localiser en vol à vue, le pilote se réfère essentiellement aux repères au sol. En plus, il peut s'aider des moyens de radionavigation, ce qui requiert un travail à partir des cartes : localisation des moyens, relevé des fréquences, matérialisation de routes magnétiques, évaluation de distances, etc. Cette démarche contribue à lui faire prendre conscience de sa situation.

La localisation et la prise en compte de l'environnement, la réactualisation des données du vol, ainsi que l'anticipation, sont des éléments importants du pilotage, dont la gestion nécessite la participation active du pilote. Muni d'un récepteur GPS, il peut avoir tendance à sortir de cette boucle de tâches, déléguant certaines d'entre elles au calculateur. L'utilisation du GPS induit la nécessité d'un effort supplémentaire et peu spontané pour maintenir une conscience de la situation.

Il faut noter que certains GPS ne fournissent que des informations liées à la position dans l'espace. Afin d'assurer son vol en sécurité, il convient de confronter cette position et les routes possibles avec d'autres informations (météorologiques, espaces aériens, relief, etc.). Le GPS ne présente en fait qu'une partie des éléments devant intervenir dans le processus de prise de décision.

2.2.2 Prévention des abordages

L'utilisation du GPS peut entraîner une focalisation du pilote sur son écran au détriment de la surveillance extérieure. En recherchant dans l'environnement de l'avion ce qui est attendu d'après la carte, le pilote surveille l'espace. Ceci favorise la prévention des abordages. Cette remarque est d'autant plus importante que la précision du système GPS conduit les aéronefs à avoir des trajectoires très proches entre deux points de repère.

2.2.3 Précision et dépendance

Les calculateurs GPS fournissent une heure estimée d'arrivée avec une grande précision en route directe, mais ne prennent pas en compte les diverses altérations de cap, les retardements, etc. (occurrence du 13 novembre 2002). De plus, lorsque le GPS est utilisé en mode « plan de vol », le contrôle des différents points tournants programmés en mémoire devient essentiel. Une saisie erronée peut s'avérer très dangereuse. Enfin, lorsque le pilote est contraint de revenir à une navigation classique, il se trouve soudainement confronté à une surcharge de travail importante. Ce retour à la navigation classique en cours de vol exige de la part du pilote une maîtrise du déroutement et une bonne préparation du vol (occurrence du 12 mars 1995).

2.2.4 Objectif destination

Parmi les pilotes concernés par les événements GPS, une catégorie particulière se distingue : ceux qui possèdent une expérience du vol sans visibilité, renforçant leur confiance à l'abord de conditions météorologiques dégradées. De plus, ils utilisent souvent l'aviation générale à des fins professionnelles, ce qui les rend plus sensibles à la pression temporelle. Cet excès de confiance se rajoute à la focalisation sur l'objectif et les conduit à dégrader le processus de prise de décision à chaque étape du vol (occurrence du 3 juin 1996).

Par ailleurs, certains pilotes confrontés à des conditions météorologiques défavorables semblent redouter l'appel aux services de la Circulation Aérienne pour déclarer une situation de détresse, se privant ainsi d'une aide précieuse.

2.2.5 Décision de déroutement

La confrontation à une situation inattendue peut amener le pilote à prendre la décision de se dérouter. Le GPS peut alors devenir un outil d'aide puissant s'il est bien utilisé. Cependant, la confiance apportée par le récepteur peut contribuer à retarder cette décision. Par exemple (occurrence du 3 août 2002), lorsque le pilote décide de faire demi-tour, il est déjà en fond de vallée, gêné par la couche nuageuse qui affleure le relief. Un déroutement n'est réussi que s'il est suffisamment anticipé.

2.2.6 Contrôle de la trajectoire et des paramètres de vol

Durant les phases de vol où la charge de travail est importante, le pilote doit optimiser la gestion de ses ressources afin de prendre à temps les décisions les plus pertinentes. Or, lors de ces phases de vol chargées, le GPS peut devenir un pôle d'attraction qui paradoxalement consomme les ressources du pilote (occurrence du 22 juin 1997) jusqu'à lui faire perdre la notion de temps.

Ce pouvoir d'attraction est amplifié par la somme et la précision des multiples informations présentées sur des écrans dont la lecture requiert beaucoup d'attention. Les récepteurs permettent souvent de n'afficher que les informations importantes dans une phase de vol donnée, mais pour profiter de ces fonctionnalités le pilote doit parfaitement connaître l'utilisation de son récepteur et le paramétrer au sol. Il doit aussi prévoir des marges de sécurité qui tiennent compte de l'imprécision verticale associée au système GPS et ne pas se fier uniquement à la valeur de l'altitude indiquée sur son récepteur.

Au cours d'un compte-rendu traité par le REC, les pilotes, n'ayant pas préparé leur vol, dépendaient du bon fonctionnement de leur récepteur GPS. En situation critique, cela les a conduits à concentrer toute leur attention sur son utilisation au détriment du contrôle de la trajectoire et des paramètres de vol.

3 - CONCLUSIONS

- ❑ Le GPS peut être une aide précieuse à la navigation à condition de savoir s'en servir et de connaître les limites de son utilisation.
- ❑ Des erreurs latentes peuvent être présentes dans les bases de données des récepteurs GPS.
- ❑ L'imprécision verticale associée au système GPS peut être de l'ordre de cent quarante mètres (soit environ cinq cents pieds).
- ❑ L'utilisation du GPS renforce la confiance du pilote qui est tenté de réduire ses marges de sécurité.
- ❑ Certains pilotes ont tendance à se concentrer sur leur récepteur GPS au détriment d'autres tâches. Ils se retrouvent progressivement dans une situation de dépendance, qui peut être dangereuse s'ils utilisent le GPS comme moyen primaire de navigation.
- ❑ Trente-cinq occurrences ayant un lien avec l'utilisation des récepteurs GPS ont été recensées entre 1995 et 2004. Elles ont fait trente-quatre morts et treize blessés.
- ❑ Les aéronefs accidentés étaient en général performants et bien équipés. La présence d'au moins deux GPS a été relevée dans de nombreuses occurrences.
- ❑ Dans la quasi-totalité des accidents corporels, on constate la poursuite du vol par conditions météorologiques défavorables, souvent pour motifs professionnels.
- ❑ Plus de la moitié des accidents correspondent à des collisions avec le relief sans perte de contrôle.

4 - AMELIORATIONS ENVISAGEABLES

Certaines actions, articulées autour des points suivants, peuvent être menées afin de réduire les risques :

- ❑ formation des utilisateurs au système GPS,
- ❑ sensibilisation aux dangers liés à l'excès de confiance et à la focalisation d'attention,
- ❑ réflexion sur l'intégration du système dans l'apprentissage du pilotage,
- ❑ amélioration de la lecture sur les récepteurs (reflets, gêne pour d'autres instruments, etc.).

Il est ainsi important que les pilotes connaissent bien le système complet et ses limites. Une familiarisation avec les spécificités du récepteur utilisé et ses possibilités doit être entreprise au sol. Le pilote peut ainsi apprendre à manipuler son instrument sans subir la pression du vol. Il doit être guidé afin d'identifier les fonctionnalités réellement utiles pour les vols projetés. L'utilisation de simulateurs informatiques peut s'avérer bénéfique pour cette phase d'apprentissage ⁽⁴⁾.

Par ailleurs, chaque pilote devrait être en mesure de percevoir le moment où le GPS n'est plus une aide mais apporte une surcharge de travail difficile à maîtriser et pouvant devenir dangereuse. L'intégration du système dans la réalisation du vol doit donc intervenir dès la formation de base et doit être enseignée aux pilotes déjà brevetés.

Au sein de certains organismes (associations, aéroclubs), il peut aussi être utile d'identifier les pilotes susceptibles de se reposer uniquement sur ce système afin de les sensibiliser plus particulièrement aux messages précédents.

Remarque : l'intégration du système GPS n'a pas eu lieu de manière cohérente, notamment en ce qui concerne son enseignement. Cela perturbe une partie des pilotes. Une réflexion plus globale, élargie à l'introduction de nouvelles technologies en aviation générale pourrait être envisagée, afin notamment d'anticiper les risques associés à l'introduction de nouveaux systèmes.

⁽⁴⁾ L'étude américaine intitulée « The effects of a scenario based GPS training program on pilot proficiency in the general aviation pilot » met en avant les avantages pour la sécurité d'une telle formation au sol dispensée à l'aide de logiciels spécifiques.

Liste des annexes

annexe A

Liste des événements GPS de 1995 à 2004

annexe B

Comptes rendus REC

annexe C

Principes de fonctionnement et limites d'utilisation du GPS

Liste des événements GPS de 1995 à 2004

Date	Aéronef	Description succincte de l'occurrence	M	B	I
12.03.95	Robin DR400-160	A la suite d'une panne de la batterie du GPS, celui-ci s'éteint et le pilote s'égare. Le contrôleur le dirige vers une autoroute pour cheminer. Le pilote se perd de nouveau et décide d'atterrir en campagne.			2
29.04.95	Piper PA-31	Le pilote décolle en VFR spécial dans la brume, entame un virage à droite vers le sommet d'une colline situé sur la route directe. Il percute le relief avec une inclinaison nulle. Le pilote volait à l'aide d'un GPS.	2		
22.05.95	Robin ATL	Le pilote navigue à l'aide du GPS et se perd. A court de carburant, il décide d'atterrir en campagne.			2
25.05.95	Mooney M20J	Le pilote effectue un vol entre l'Allemagne et l'Espagne. Les conditions météorologiques sont défavorables à proximité des Pyrénées. Il est informé à la radio du demi-tour d'autres avions. Il poursuit son vol à l'aide de son récepteur GPS et débute une descente à partir d'un point de report erroné. L'avion percute le relief en vol contrôlé.	2		
26.05.95	Planeur Rolladen-Schneider LS6	Lors d'une compétition, le pilote saisit des coordonnées erronées. A l'arrivée, à 150 mètres du sol, alors qu'il ne voit toujours pas la piste, il décide d'atterrir en campagne. Il effectue plusieurs manœuvres à grande inclinaison et faible hauteur pour s'aligner avec les sillons d'un champ. Le planeur décroche et heurte le sol.		1	
22.07.95	Jodel D18	Après un rassemblement, le pilote décolle rapidement avant un orage. Il navigue à l'aide du GPS. L'épave est retrouvée sur sa route directe. Au moment de l'accident, l'endroit était affecté par un orage.	1		
23.03.96	Piper PA-23 Aztec	A l'arrivée d'un vol de navigation entre le Maroc et la France, le pilote rencontre des conditions météorologiques défavorables (brouillard, rentrées maritimes). Il heurte un éperon rocheux large de cent mètres. Un GPS est retrouvé dans l'épave.	3		
03.06.96	Robin DR 400-160	Les deux occupants de l'avion se rendent à une réunion de travail. Le pilote navigue à l'aide de son récepteur GPS sans référence visuelle extérieure. Probablement à la suite d'une erreur de positionnement, il anticipe sa descente et percute le relief.	2		

Date	Aéronef	Description succincte de l'occurrence	M	B	I
17.09.96	Rutan Long-Ez	En provenance d'Ibiza et à destination des Pays-Bas, le pilote navigue à l'aide de ses trois GPS entre deux couches nuageuses lorsqu'il rencontre une ligne d'orages après un trou de foehn. Il poursuit le vol et indique au contrôleur qu'il maintient les conditions VMC, avant d'être foudroyé.	1		
02.03.97	Pulsar (kit)	Les conditions météorologiques obligent le pilote à des variations de trajectoire. Il est confronté à un fort vent. Le pilote est contraint d'atterrir en campagne à la suite d'une panne d'essence. La jauge était masquée par le récepteur GPS.			2
01.06.97	Cessna 172	Quarante-cinq minutes après le décollage pour un vol entre Lyon et l'Allemagne, le pilote se dérouté lorsqu'il rencontre des conditions météorologiques défavorables. L'avion, équipé d'un GPS, rentre dans une couche de stratus et heurte une colline se trouvant à une dizaine de kilomètres au nord-est de l'aérodrome de déroutement.		4	
22.06.97	Rutan Cozy	Le pilote focalise son attention sur l'écran de son nouveau récepteur GPS alors qu'il est en finale. L'avion heurte le sol quatre mètres avant le seuil de piste.			2
22.07.97	Planeur Glasflugel H201	Le pilote effectue son premier vol avec un nouveau récepteur GPS qui vient d'être installé sur son planeur et qui est couplé à un détecteur d'ascendances thermiques. Au cours d'un virage face à une crête, son planeur heurte le relief.	1		
28.09.97	Hélicoptère Robinson R22	Le pilote se perd en vol de navigation. A court d'essence, il atterrit en campagne. Le GPS ne disposait pas de base de données d'aérodromes.			2
04.06.98	Planeur Schempp-Hirth Ventus 2B	Le pilote effectue son premier vol à bord d'un nouveau planeur équipé d'un GPS. Un autre planeur évolue à proximité. Les deux planeurs se heurtent. La vigilance des pilotes a pu être diminuée pour le pilote du Ventus par sa faible expérience sur la machine et pour l'autre pilote par l'attention qu'il portait aux planeurs qu'il avait aperçus et à l'évolution des conditions météorologiques.	1		1
13.08.98	Robin ATL	Au cours d'un voyage, ne pouvant passer au-dessus de la couche de nuages, le pilote décide de descendre. Il perd les références extérieures et heurte avec une inclinaison nulle un plateau rocheux accroché par les nuages. La trajectoire suivie par l'appareil était conforme à la route programmée sur le GPS.		2	

Date	Aéronef	Description succincte de l'occurrence	M	B	I
15.08.98	Piper J3 Cub	Muni de deux récepteurs GPS, le pilote vole au-dessus de la Manche entre deux couches nuageuses et s'égare. Lorsqu'il aperçoit un trou dans la couche, il descend et atterrit durement dans un champ. Il lui reste dix litres d'essence.			2
29.05.99	Piper PA-28 Arrow	Après une journée de vol, un groupe d'avions arrive sur l'île d'Oléron qui est recouverte par des stratus. L'un des pilotes perd le contrôle de son avion dans la couche de nuages. Un GPS est retrouvé dans l'épave. Le pilote utilisait régulièrement un GPS personnel.	4		
05.03.00	ULM Kiebiz B9	Le pilote navigue uniquement à l'aide de son récepteur GPS pour un voyage entre l'Allemagne et l'Espagne. Il ne trouve pas l'aérodrome qu'il avait sélectionné pour un ravitaillement et se perd. Il décide alors de faire route vers un autre aérodrome. Il atterrit avant le seuil de piste, en panne d'essence. Les coordonnées programmées pour le premier aérodrome étaient erronées.			1
11.07.00	Planeur Schempp-Hirth Discus	Deux pilotes débutent un circuit dans des conditions météorologiques défavorables. L'un d'eux effectue la navigation à l'aide d'un GPS qu'il a acheté le matin même. Les pilotes perdent conscience de la situation en ne tenant pas compte du relief intercalé entre eux et un champ répertorié. A la suite d'un manque d'ascendance, ils sont contraints d'atterrir sur la pente du relief.		2	
05.08.00	Hélicoptère Robinson R44	Le pilote conduit un passager au cours d'un voyage dans les Alpes. Bien que les conditions météorologiques soient défavorables, il choisit une route directe vers un héliport qu'il a programmé dans son GPS. Alors qu'il monte pour passer le relief, il heurte une ligne à haute tension.	2		
13.02.01	Mooney M20 Scotsman	Après une journée de travail, le pilote décolle tardivement pour rentrer chez lui. Il navigue à l'aide d'un GPS. À l'approche du massif du Morvan, il descend pour probablement maintenir des conditions de vol à vue. Il pénètre cependant dans la couche et heurte un sommet accroché par les nuages.	1		
28.10.01	ULM Savannah MXP 740	L'ULM heurte le relief en vol rectiligne alors que le pilote suit avec précision le plan de vol qu'il a programmé dans son récepteur GPS.	1		
28.11.01	Yakovlev YAK-50	Lors d'un vol entre la France et la Suisse, le pilote décide de décoller malgré les conditions météorologiques défavorables et « d'aller voir ». Rencontrant du givrage sévère, il se déroute à l'aide de son GPS vers un aérodrome qui s'avère recouvert par les nuages. Lorsqu'il aperçoit une trouée, il descend et atterrit dans un champ.			1

Date	Aéronef	Description succincte de l'occurrence	M	B	I
13.12.01	Mooney M20J	Vers la fin de son voyage, le pilote décide, malgré des conditions météorologiques annoncées défavorables, de poursuivre son vol vers sa destination. Il navigue à l'aide de plusieurs GPS. Il débute sa descente et prépare son avion à l'atterrissage. Il heurte un hangar, alors que la visibilité horizontale est réduite.	1		
28.02.02	Socata TB20	Après plusieurs circuits d'aérodrome, l'avion atterrit train rentré. L'instructeur indique avoir confondu l'alarme du train à l'arrondi avec celle du GPS avertissant de l'arrivée sur un point tournant.			2
09.05.02	Cessna C150	Le pilote vole à destination d'un aérodrome où il doit retrouver un ami. Malgré le brouillard annoncé par l'agent AFIS, il tente d'atterrir. Il interrompt son approche et heurte des arbres à huit cents mètres de l'aérodrome. Un GPS est retrouvé dans l'épave.	1		
03.08.02	Dyn'Aéro MCR-01	Le pilote réalise un voyage selon une route directe en région montagneuse par conditions météorologiques défavorables. Il s'engage dans une vallée étroite. Lorsqu'il tente un demi-tour, il perd le contrôle de son avion. Il disposait d'un GPS portable.	2		
31.10.02	Hélicoptère Agusta A 109	De nuit et par conditions de faible visibilité, l'hélicoptère heurte la surface de la mer à grande vitesse à proximité de sa destination. L'hélicoptère était équipé d'un GPS que le pilote utilisait fréquemment.	2		
13.11.02	Robin DR 400-180	Trois pilotes partent en voyage pour la journée. Ils utilisent chacun un récepteur GPS. En finale le moteur s'arrête en panne d'essence, à la nuit aéronautique.		3	
01.03.03	Wassmer WA 54	Le pilote prépare un voyage à l'aide d'un logiciel de navigation. Pendant le vol, il gère sa navigation en temps réel à l'aide d'un système GPS adapté à un ordinateur portable. L'avion heurte la cime d'arbres dans une région de collines par conditions météorologiques défavorables.		1	
21.06.03	ULM Randkar X Air	Le pilote et son passager sont confrontés en vol à des problèmes avec leur GPS. Ils tentent de naviguer à l'aide d'une carte routière mais se perdent. Le pilote décide d'atterrir en campagne.			2

Date	Aéronef	Description succincte de l'occurrence	M	B	I
28.09.03	Robin DR 400-180	Lors d'un voyage de douze avions de l'Italie vers la France, sept parviennent à destination, quatre font demi-tour en raison de conditions météorologiques défavorables. Le douzième heurte le relief des Alpes. Un GPS est retrouvé dans l'épave.	3		
28.10.03	Piper PA-28	Le pilote suit une route directe vers un point programmé dans son GPS. L'avion subit une panne électrique totale qui entraîne une perte des moyens de navigation. Le pilote, confronté à des conditions météorologiques défavorables et ne connaissant plus sa position, décide d'atterrir en campagne.			1
09.10.04	Piper PA-46	L'avion percute le relief suivant une trajectoire rectiligne stabilisée. Un GPS est retrouvé à bord.	4		

Comptes rendus REC

Quasi-abordage

Le but du vol est de familiariser le pilote à une nouvelle ergonomie de l'avion, après l'installation d'un nouvel équipement permettant d'assurer les radiocommunications et la navigation VOR GPS. Un passager se trouve en place arrière. A plusieurs reprises, il signale d'autres avions en vol, alors que l'attention du pilote et de son instructeur est focalisée sur le tableau de bord. Au bout d'un moment, le passager signale au pilote un avion convergeant. Le pilote perd quelques secondes pour l'apercevoir et analyser la situation, avant d'effectuer une manœuvre d'évitement.

Au cours de cet événement, la surveillance de l'environnement a été délaissée au profit de la découverte du GPS.

Quasi-panne d'essence

A l'issue d'une compétition de voltige, on propose au pilote X de convoyer un avion jusqu'à son aérodrome de rattachement, situé à une heure et trente minutes de vol environ. Il part en compagnie d'un autre pilote Y, d'une expérience comparable, avec des cartes de navigation à jour mais sans préparation. Après une heure de vol, X suggère à Y de sélectionner le réservoir avant. Y indique qu'il serait plus judicieux de vider le réservoir de convoyage car ce dernier doit être vidangé en prévision de vols de voltige futurs. Ils décident donc d'attendre les premiers ratés du moteur avant de changer de réservoir. Au même moment, ils réalisent qu'ils sont à proximité immédiate d'un grand aéroport, mais n'arrivent pas exactement à se situer à l'aide de leur récepteur GPS. En effet, ce dernier ne permet pas de se positionner par rapport à une carte. Ils obtiennent simplement une route qui pourrait les amener à leur aérodrome de destination, sans savoir si cette route traverse la CTR. Ils réalisent alors que chacun d'eux se repose sur la connaissance supposée de l'autre en ce qui concerne l'exploitation du récepteur. Ils essaient de faire le point avec le GPS et toute leur attention est désormais focalisée sur le maniement du récepteur. A ce moment, des variations de régime moteur surviennent, mais ce n'est qu'après quelques secondes qu'ils pensent à sélectionner le réservoir avant.

Au cours de cet événement, le manque de préparation a rendu les pilotes dépendants du bon fonctionnement de leur récepteur GPS. Leur maîtrise insuffisante de cet équipement les a conduits à affecter beaucoup de ressources pour l'exploiter au détriment du suivi de leur consommation.

Principes de fonctionnement et limites d'utilisation du GPS

C.1 Généralités

Le système de positionnement mondial GPS comprend trois segments :

- le sol, soit cinq stations qui contrôlent l'ensemble des satellites formant la constellation ;
- le spatial, composé de vingt-quatre satellites (en configuration nominale) ;
- l'utilisateur, ne se limitant pas aux usagers aéronautiques.

Chaque satellite émet deux informations : un code pseudo aléatoire permettant le positionnement et un message de navigation donnant, entre autres, l'orbite prévue du satellite ainsi qu'une prévision de la qualité de la propagation.

C.2 Principe de la mesure

Le récepteur mesure le temps de propagation des signaux émis par les satellites dont les horloges sont toutes synchrones, et en déduit la distance le séparant de ces derniers. Avec trois satellites, un positionnement tridimensionnel est obtenu, à l'intersection de sphères centrées sur les satellites.

La fiabilité de ces calculs implique que l'horloge du récepteur est parfaitement synchronisée avec celles des satellites, ce qui n'est pas le cas ⁽⁵⁾. Un quatrième satellite en vue est donc nécessaire pour déterminer le biais de l'horloge du récepteur utilisateur.

En réalité, étant donné les erreurs de mesure sur chaque distance utile, le calculateur du récepteur approche la valeur de la position à partir de ces distances élémentaires grâce à un algorithme itératif complexe. En particulier, au delà de quatre satellites en vue, la précision du positionnement ne dépend plus directement du nombre de satellites.

C.3 Le système de référence WGS84

Pour se ramener à un positionnement géodésique (latitude, longitude, altitude), il faut projeter sur un modèle de notre planète le positionnement tridimensionnel obtenu précédemment. Le modèle retenu s'appelle WGS84 et consiste en un ellipsoïde centré sur le centre de la Terre, approchant « au mieux » le niveau moyen des mers observé. La valeur du GUND figure désormais sur certaines cartes aéronautiques (GUND : hauteur comprise entre l'ellipsoïde WGS84 et le niveau moyen des mers). Cette approximation de la surface terrestre effectuée à grande échelle peut présenter des différences

⁽⁵⁾ Les satellites sont équipés d'horloges atomiques remises à jour par le segment au sol alors que le récepteur est équipé d'une horloge à quartz.

⁽⁶⁾ Par exemple le système géodésique australien AGD84 n'est pas centré sur le centre de la Terre, et des différences de l'ordre de deux cents mètres peuvent apparaître.

locales avec certains systèmes géodésiques nationaux ⁽⁶⁾. De même, le positionnement vertical ne s'effectue pas par rapport aux références généralement utilisées en aéronautique (surface 1013,25 ou QNH).

C.4 Performances

L'US Air Force, possesseur du système, annonce les performances suivantes avec une probabilité de 95 % lorsque la fonction SA de détérioration volontaire du signal est activée :

- ❑ précision latérale : cent mètres ;
- ❑ précision verticale : cent quarante mètres (soit presque cinq cents pieds).

Note : l'activation de la fonction SA introduit un décalage aléatoire dans la date d'émission du signal par le satellite, détériorant d'autant la précision du système de positionnement.

En l'absence de détérioration volontaire, les autorités américaines avancent les performances suivantes dans 95 % des cas :

- ❑ précision latérale : douze mètres ;
- ❑ précision verticale : vingt mètres.

Depuis le 1^{er} mai 2000, ces performances sont applicables. Il est important de noter que le département de la défense américain est seul maître de l'activation ou non de la fonction de détérioration SA.

C.5 Quelques limites d'utilisation

Le système GPS ne fournit pas d'information d'intégrité. Aussi les récepteurs certifiés pour le régime de vol aux instruments doivent comporter une fonction supplémentaire, appelée RAIM, qui vérifie la cohérence de la solution de position avec les mesures de distances élémentaires. Les récepteurs VFR n'en sont pas obligatoirement équipés et subissent de fortes limitations d'usage. Le tableau suivant reprend la classification des récepteurs par classe d'homologation qui est établie par la norme TSO129.

Note : le RTCA, organisme de coordination au sein de l'industrie américaine, a défini dans son document 208, les objectifs à remplir par les récepteurs GPS en terme de performances minimums. La norme TSO129 s'y réfère pour préciser les aspects techniques des équipements. La réglementation française reprend ces textes.

Ces aspects opérationnels exigent une installation particulière du récepteur, qui doit être conforme à la norme TSO129.

Classe \ Sous-classe	A (autonome)	B ou C (multi-senseurs)
1	RAIM En route, terminal, approche de non précision	RAIM En route, terminal, approche de non précision
2	RAIM En route, terminal	RAIM En route, terminal
3	Sans objet	Intégrité par comparaison à d'autres senseurs En route, terminal, approche de non précision
4	Sans objet	Intégrité par comparaison à d'autres senseurs En route, terminal, approche

Erreurs inhérentes au système GPS

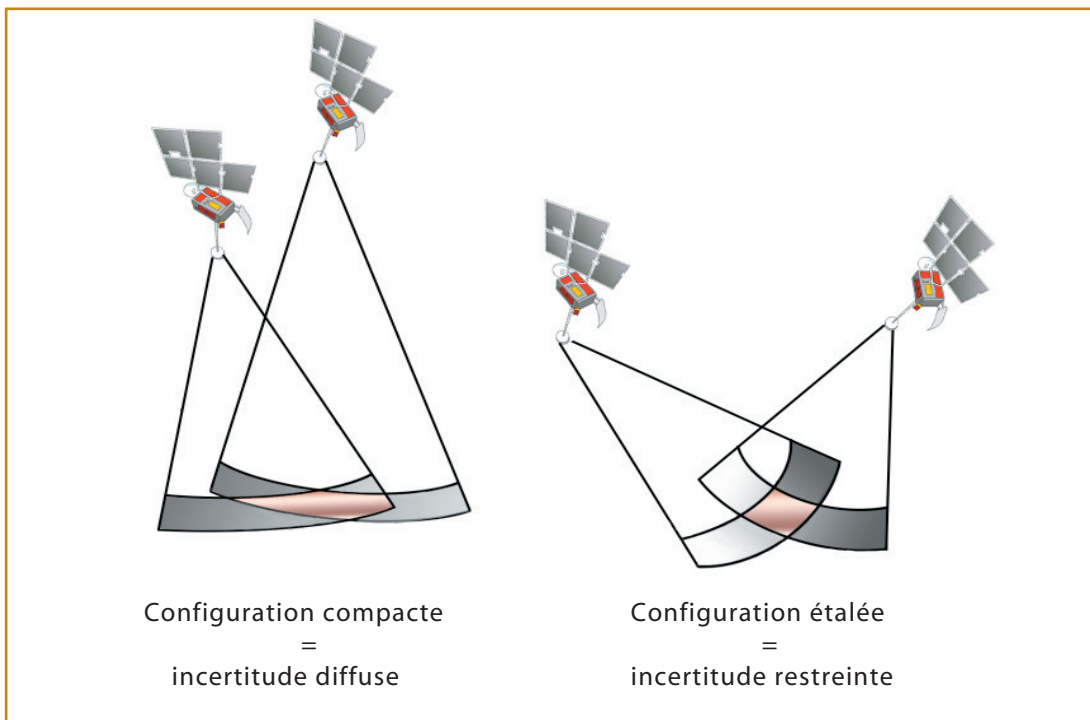


Figure 3 : précision liée à la configuration des satellites

La qualité de la réception peut être altérée par une occultation de l'antenne ou un niveau de bruit trop important ne permettant pas au récepteur d'acquérir les signaux (par interférences notamment). Le signal émis par un satellite est en effet de très faible intensité.

La précision de positionnement peut être affectée par les imperfections du modèle WGS84, les erreurs dans les bases de données, les incertitudes sur les distances élémentaires dues aux retards de propagation dans l'ionosphère ou la troposphère, les effets multi-trajets, les instabilités de l'horloge du récepteur ou encore la géométrie de la constellation dont la qualité s'exprime par la Dilution Géométrique de Précision (GDOP). Ce dernier point est illustré par la figure 3.

L'erreur totale s'obtient en multipliant les retards de propagation par la GDOP.

Par ailleurs des défaillances majeures ont déjà été observées, telles la diffusion par un satellite d'un signal erroné ou non identifiable, le dépassement des capacités mémoire de certains récepteurs, voire des bases de données erronées (certaines bases contenant jusqu'à sept cents points de report IFR non à jour).

BEA

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

Aéroport du Bourget - Bâtiment 153
93352 Le Bourget Cedex - France
T : +33 1 49 92 72 00 - F : +33 1 49 92 72 03
www.bea.aero