

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRETIT



Boeing

GPS-Global Positioning System

© Département d'avionique Document à des fins de formation

1

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRETIT

Avant de débiter le cours ...



Merci !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

2

Présentation du cours



Boeing

- Introduction.
- Constitution du système.
- Principe de fonctionnement.
- Signaux des satellites NAVSTAR.
- Les données de navigation.
- Précision et limitations.
- Relevé de la position.
- Les récepteurs GPS.
- Installation des récepteurs GPS.
- Antennes de réception.
- Tests et maintenance des systèmes GPS.
- Conclusions.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

3

Introduction



Images : Garmin, iMorrow, Trimble

• Définition :

Système de navigation basé sur la transmission de signaux à partir de satellites fournis et entretenus par les États-Unis d'Amérique et mis à la disposition de l'aviation civile.

REF : TERMINAV - NAVCANADA

- Le GPS (*Global Positioning System*) est un système GNSS.
- Il est géré par le Département de la Défense des États-Unis.
- Il a été développé dans les années 1970 pour répondre initialement à des besoins militaires.
- Depuis le début des années 1990, le GPS est abondamment utilisé dans le secteur civil.

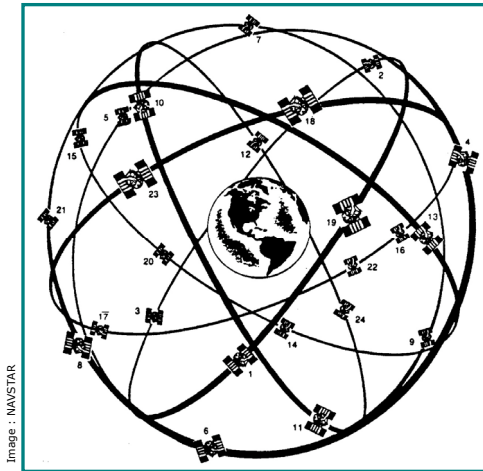
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

4

Constitution du système

Le segment spatial



- Une constellation complète de satellites GPS est constituée de :

24 satellites
6 plans orbitaux

Constellation actuelle

- Chaque satellite effectue un tour complet de la terre en exactement 11 heures 57 minutes et 58,3 secondes soit deux tours à chaque jour sidéral.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

5

Constitution du système

Le segment spatial



GPS CONSTELLATION STATUS FOR Wed Oct 15 2025

Plane	Slot	SVN	PRN	Block-Type	Clock	Outage Start	NANU Type	NANU Subject
B	1	56	16	IIR	RB			
C	1	57	29	IIR-M	RB			
D	1	61	2	IIR	RB			

- Chaque satellite est identifié par :
 - Un code **PRN** (*Pseudo-Random Noise*).
 - Un code **SVN** (*Satellite Vehicle Number*).

- Lorsqu'un satellite est retiré du service, il est remplacé par un autre qui prendra le code PRN laissé vacant.
- « Plane » et « Slot » représentent le plan orbital et la position du satellite dans celui-ci

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

6

Constitution du système

Le segment spatial



- Il existe plusieurs générations de satellites :

- Block I.
- Block II/IIA.
- Block IIR.
- Block IIR-M.
- Block IIF.
- Block III.
- Block IIIF.

Préparation d'un satellite GPS en vue de son lancement.

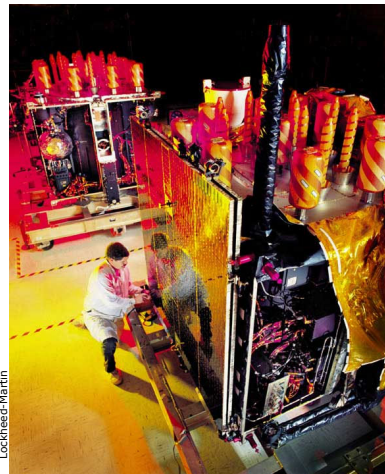
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

7

Constitution du système

Le segment spatial



- La position des satellites dans la constellation est donnée par un code comprenant une lettre de A à F (correspondant au plan orbital) et un chiffre de 1 à 5 (correspondant à la position du satellite dans le plan orbital).

- Exemple :

PRN 23 SVN 76 plan E5

Fabrication des satellites GPS par Lockheed Martin en Pennsylvanie.

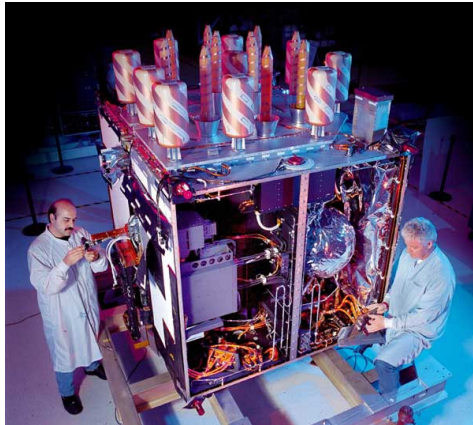
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

8

Constitution du système

Le segment spatial



Lockheed Martin

- Chaque satellite possède quatre horloges atomiques de très haute précision.
- Deux sont au césium, deux autres au rubidium.

Plane	Slot	SVN	PRN	Block-Type	Clock
B	1	56	16	IIR	RB
C	1	57	29	IIR-M	RB
D	1	61	2	IIR	RB
A	1	65	24	IIF	RB
E	1	69	3	IIF	RB

© Département d'avionique

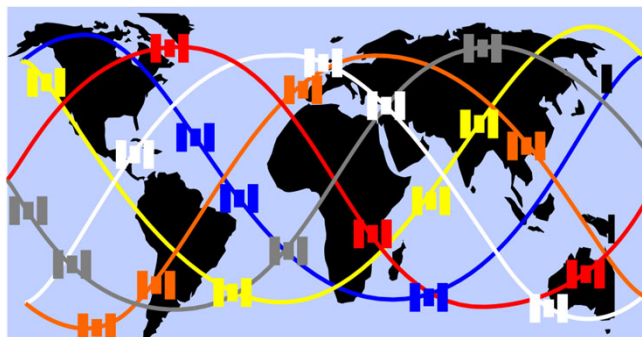
Document à des fins de formation

9

Constitution du système

Le segment spatial

- La couverture mondiale est assurée avec au minimum 4 satellites présents sur chacune des 6 orbites.
- Chaque orbite est espacée de la suivante par environ 60° de longitude.



Département d'avionique

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

10

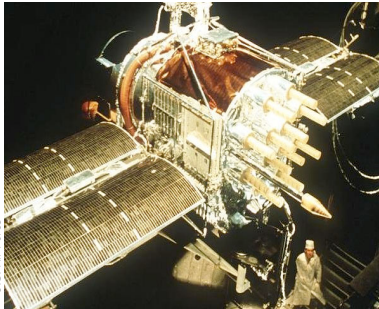


ÉNA ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block I :



Constructeur : Rockwell.

8 satellites commandés en 1974.

3 satellites supplémentaires commandés en 1978.

Lancés au départ de Vandenberg AFB entre 1978 et 1985. Un exemplaire fut toutefois perdu lors d'un lancement raté du lanceur Atlas Centaur.

Durée de vie initialement prévue : 5 ans (SVN # 6 a toutefois fonctionné de manière fiable durant plus de 10 ans !)

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

11



ÉNA ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block II/IIA :



Constructeur : Rockwell

Un satellite de qualification commandé en 1981.

28 satellites commandés en 1983.

Premier lancement le 14 février 1989 (PRN # 14).

Les deux premiers satellites furent baptisés « Elvis Presley » et « Janis Joplin » !

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

12

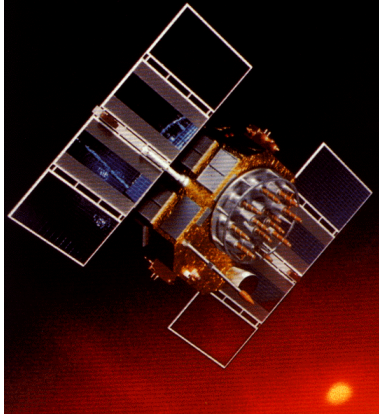


ÉNA ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

- Satellites Block II/IIA :



Quelques caractéristiques :

- Constructeur : Rockwell.
- Poids en orbite : 1.800/2.175 livres.
- Orbite : 10.988 MN.
- Puissance générée par les panneaux solaires : 700 W.
- Largeur : 17,5 pieds avec panneaux solaires déployés.
- Largeur : 5 pieds.
- Durée de vie prévue : 7,5 ans.

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

13

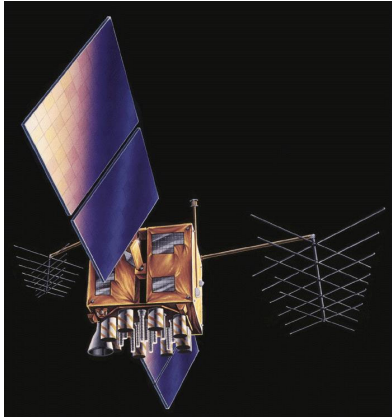


ÉNA ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

- Satellites Block IIR/IIR-M :



Constructeur : Lockheed Martin.

21 satellites commandés en 1989.

Premier lancement : 17 janvier 1997, mais le lanceur a dû être détruit (ainsi que le satellite) suite à un mauvais fonctionnement.

Premier satellite en orbite : 22 juillet 1997.

8 satellites ont été modernisés au standard **IIR-M** avec l'incorporation de **deux signaux militaires** et une **nouvelle fréquence civile (L2C)**.

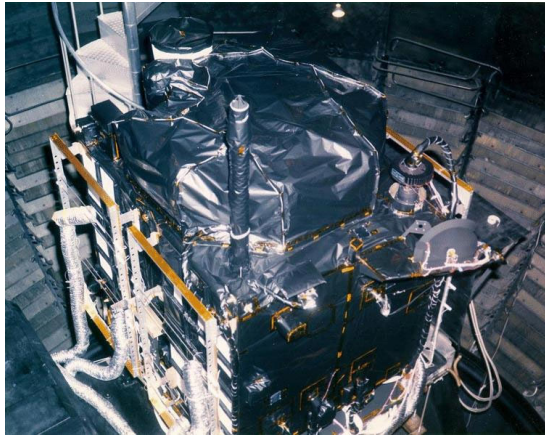
© Département d'avionique
Document à des fins de formation

14

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block IIR/IIR-M :



Les satellites Block IIR peuvent calculer leur position par eux-mêmes grâce à des liaisons entre satellites.

Bien que nettement plus performants que les générations antérieures, les Block IIR coûtent 33% de moins que les Block II/IIA.

© Département d'avionique

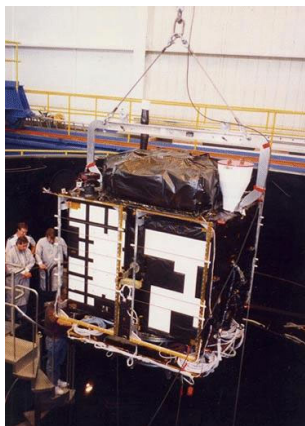
Document à des fins de formation

15

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block IIR/IIR-M :



Quelques caractéristiques :

- Poids en orbite : 2.370 livres.
- Orbite : 10.988 MN.
- Puissance générée par les panneaux solaires : 1.136 W.
- Largeur : 38,025 pieds avec panneaux solaires déployés.
- Diamètre : 6,33 pieds.
- Hauteur : 6,25 pieds.
- Durée de vie prévue : 10 ans.

© Département d'avionique

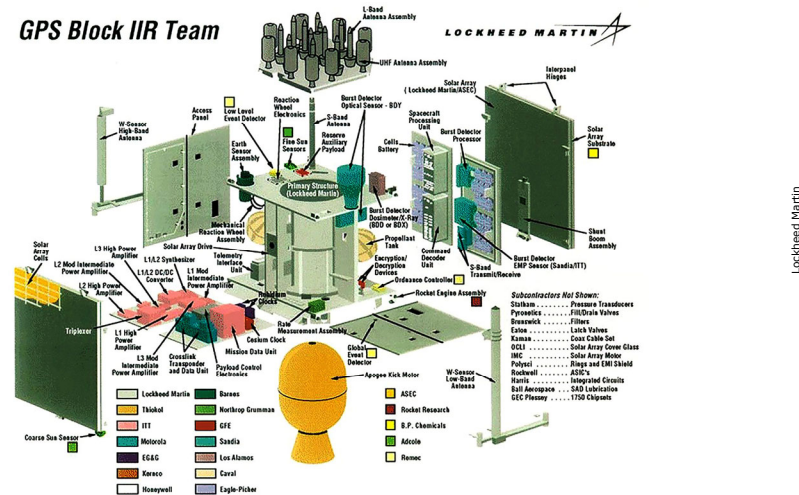
Document à des fins de formation

16

Constitution du système

Le segment spatial

GPS Block IIR Team



© Département d'avionique

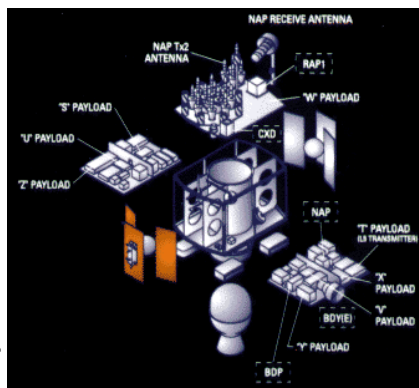
Document à des fins de formation

17

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block IIF :



Constructeur : Boeing.

33 exemplaires commandés par la U.S.A.F. à partir de 1996.

Produits à Seal Beach en Californie.

Première livraison en avril 2001.

Durée de vie prévue : 15 ans.

Fréquence civile L5 prévue.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

18



ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

- Satellites Block IIF :



Quelques caractéristiques :

- Poids en orbite : 3.758 livres.
- Orbite : 10.988 MN.
- Puissance générée par les panneaux solaires : 2.900 W.
- Largeur : 70,42 pieds avec panneaux solaires déployés.
- Dimensions replié : 8 x 6,47 pieds.

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

19



ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment spatial

- Satellites Block III :



Constructeur : Lockheed Martin.

10 exemplaires (Block III).

Étaient prévus pour être construits en **trois phases** : 8 Block IIIA, 8 Block IIIB et 16 Block IIIC.

Première mise en orbite en 2018.

Dernière mise en orbite prévue en 2026.

Durée de vie prévue : 30 ans.

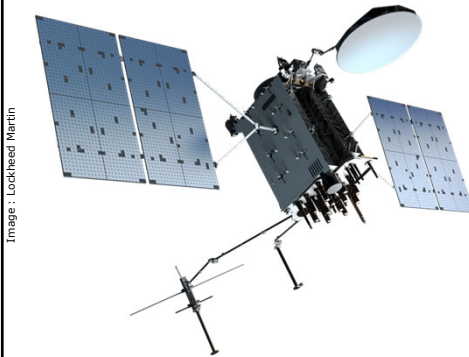
© Département d'avionique
Document à des fins de formation

20

Constitution du système

Le segment spatial

• Satellites Block IIIF :



Constructeur : Lockheed Martin.

22 exemplaires prévus (Block IIIF – Block III « Follow-on »).

Commandés en 2018.

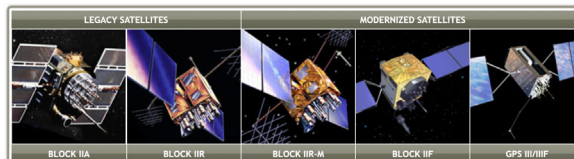
Première mise en orbite prévue en 2027.

Dernière mise en orbite prévue au plus tôt en 2037.

Constitution du système

Le segment spatial

• En résumé :



IIA	IIR	IIR-M	IIF	III/IIIF
- Code C/A sur bande L1 pour le civil. - Code P(Y) sur L1 et L2 pour militaires. - Durée de vie de 7,5 années. - Lancés entre 1990 et 1997. - Dernier retiré en 2019.	- Code C/A sur L1. - Code P(Y) sur L1/L2. - Contrôle interne de l'horloge. - Durée de vie de 10 années. - Lancés entre 1997 et 2004.	- Tous les signaux originaux (C/A, P(Y)). 2^e code civil L2C. - Code (M) militaire. - Puissance variable pour (M). - Durée de vie de 10 années. - Lancés entre 2005-2009.	- Tous les signaux du block IIR-M. 3^e code civil L5. - Nouveau type d'horloge interne. - Meilleures caractéristiques générales. - Durée de vie de 15 années. - Lancés entre 2010-2016.	- Tous les signaux du block IIF. 4^e code civil L1C. - Plus de coupure de disponibilité (SA). - Meilleures caractéristiques de précision et d'intégrité. - Durée de vie de 30 années. - Lancés à partir de 2018.

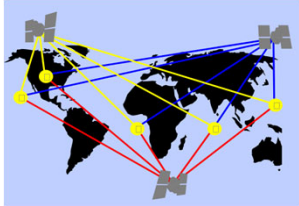
ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

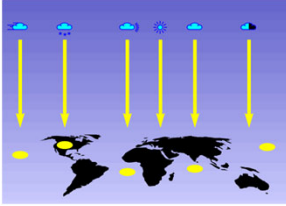
Le segment de contrôle

- Les trois fonctions du segment de contrôle :

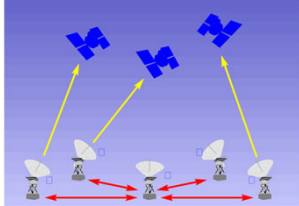
Poursuite



Stations météo



Transmission



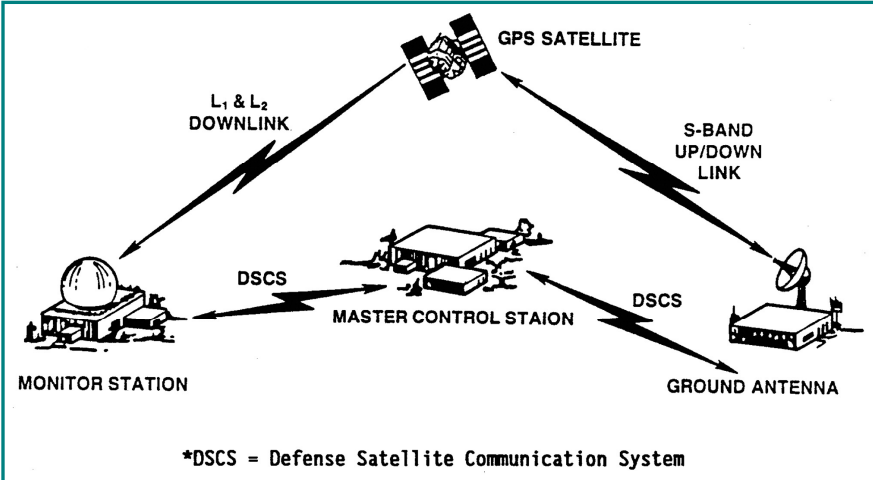
© Département d'avionique Document à des fins de formation

23

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment de contrôle



*DSCS = Defense Satellite Communication System

Image : NAVSTAR

© Département d'avionique Document à des fins de formation

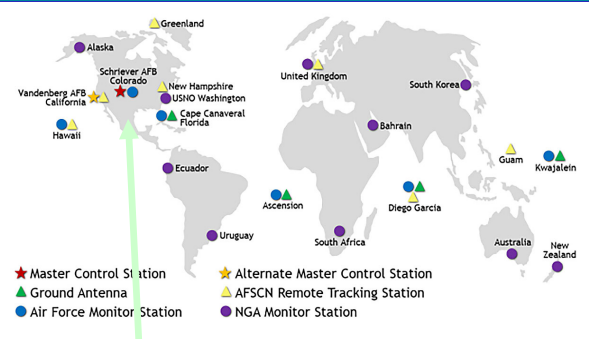
24



**ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE**
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment de contrôle



Master Control Station -MCS

Située à Schriever SFB (ex-Falcon AFB) et opérée par la Mission Delta 31 de la U.S. Space Force.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

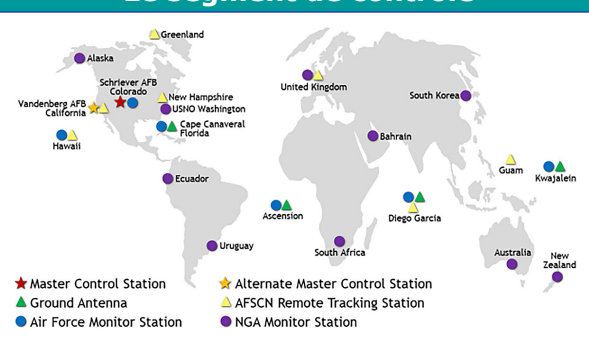
25



**ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE**
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment de contrôle



Monitor Stations

Assurent la poursuite des signaux.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

26

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment de contrôle

Image : gps.gov

Ground Antennas

Assurent la transmission des signaux vers les satellites.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

27

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Constitution du système

Le segment de contrôle

- Liaisons UHF entre satellites des familles Block II et Block III :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

28



ÉNA
ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD MONTFRETIT

Constitution du système

Le segment utilisateurs

- Aviation civile :

- Aviation militaire :



Pierre GILLARD/2008-17627



Pierre GILLARD/2008-17214

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

29



ÉNA
ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD MONTFRETIT

Constitution du système

Le segment utilisateurs

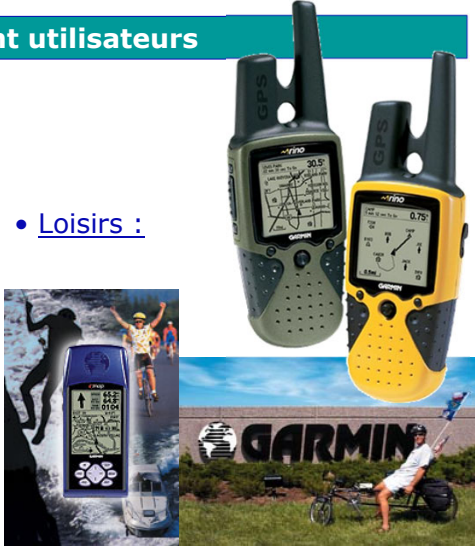
- Forces armées :

- Arpentage :





- Loisirs :



© Département d'avionique
Document à des fins de formation

30

Constitution du système

Le segment utilisateurs

- Et bien d'autres applications encore :



Mercedes-Benz



Pierre GILLARD/2008-21.366



Pierre GILLARD/T-06168

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

31

Constitution du système

Le segment utilisateurs

- Il existe deux catégories d'utilisateurs du système GPS :
 - **Le secteur civil :** précision moindre (SPS)



- **Le secteur militaire :** précision maximale (PPS)



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

32

Constitution du système

Le segment utilisateurs



Photo : ArabiaWeather

- Précision garantie à 95 % pour le service SPS-Standard Positioning Service :

Une différence de temps de $4 \mu s$ correspond à une erreur de **1 Km** !

- Horizontalement : Plus petite que 13 mètres.
- Verticalement : Plus petite que 22 mètres.
- Temps UTC : Inférieure à 10 nanosecondes.

Principe de fonctionnement

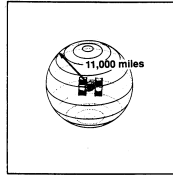


Image : auteur inconnu + Département d'avionique

- Les satellites GPS orbitent autour de la Terre et sont donc en mouvement.
- Le récepteur connaît précisément la position (coordonnées) de chaque satellite à chaque instant grâce à des données téléchargées (éphémérides et almanachs).
- Un satellite émet un code au temps T_{si} qui est reçu par le récepteur au temps T_r .
- En effectuant la différence entre T_r et T_{si} , le récepteur peut donc calculer la distance R_i le séparant du satellite.
- En prenant plusieurs mesures par rapport à quelques satellites « visibles », le récepteur peut déterminer sa position.

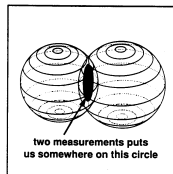
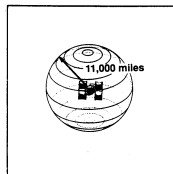
La clé du succès :
Une mesure précise
du temps !

Principe de fonctionnement



- Le principe de fonctionnement du GPS est basé sur la mesure de distances entre des satellites en mouvement et le récepteur fixe ou mobile.
- Tous les satellites émettent un signal synchrone.
- Une mesure de distance par rapport à un satellite nous place sur une sphère.

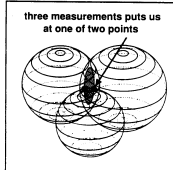
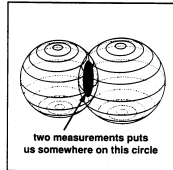
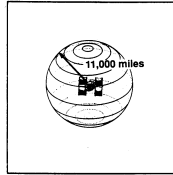
Principe de fonctionnement



- Le principe de fonctionnement du GPS est basé sur la mesure de distances entre des satellites en mouvement et le récepteur fixe ou mobile.
- Tous les satellites émettent un signal synchrone.
- Une mesure de distance par rapport à un satellite nous place sur une sphère.
- Une seconde mesure par rapport à un deuxième satellite nous place sur le cercle intersection des deux sphères.

Principe de fonctionnement

Images : Trimble



- Le principe de fonctionnement du GPS est basé sur la mesure de distances entre des satellites en mouvement et le récepteur fixe ou mobile.
- Tous les satellites émettent un signal synchrone.
- Une mesure de distance par rapport à un satellite nous place sur une sphère.
- Une seconde mesure par rapport à un deuxième satellite nous place sur le cercle intersection des deux sphères.
- Une troisième mesure par rapport à un troisième satellite nous place sur deux points intersection des trois sphères.
- Un des deux points peut être rejeté car l'altitude est supérieure à celle des satellites.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

37

Principe de fonctionnement

En résumé ...

Image : auteur inconnu (ebay)



- Théoriquement, de manière intuitive, trois satellites suffiraient pour donner une position en trois dimensions.
- Ces trois dimensions sont : la **latitude**, la **longitude** et l'**altitude** (réelle par rapport au centre de la Terre).
- Toutefois, afin d'obtenir un résultat précis, il faudra évaluer les différentes sortes d'erreurs intervenant dans les mesures de distances.
- On tiendra compte de celles-ci dans le processus de calcul de la position.

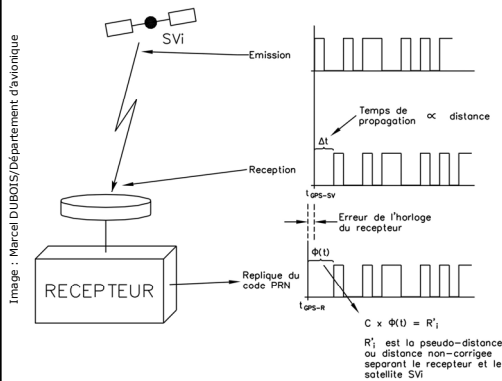
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

38

Principe de fonctionnement

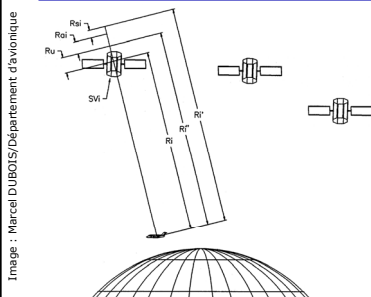
L'erreur d'horloge du récepteur



- Les horloges des récepteurs étant moins précises que celles des satellites, une erreur est induite.
- Les récepteurs mesurent dès lors une pseudo-distance entachée d'une erreur due à cette imprécision.
- Mais d'autres erreurs liées au système GPS lui-même et à la propagation existent également.

Principe de fonctionnement

Évaluation des erreurs



- ✓ R_i est la distance vraie séparant le récepteur du satellite SV_i (« i » est le numéro du satellite).
- ✓ R'_i est la distance mesurée ou pseudo-distance.
- ✓ R_{si} est l'erreur en distance due à l'horloge du satellite.
- ✓ R_{ai} est l'erreur en distance due aux effets atmosphériques sur la propagation des ondes entre le satellite et le récepteur.
- ✓ R_u est l'erreur en distance due à l'horloge du récepteur.

- Si on définit la distance R_i'' comme étant la pseudo-distance entachée seulement des erreurs dues au système GPS et à la propagation des ondes :

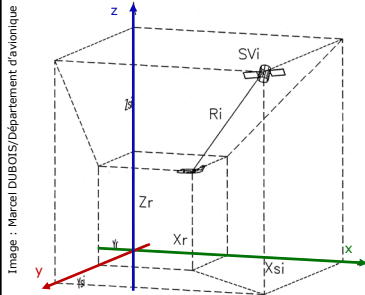
$$R_i'' = R'_i - R_{si} - R_{ai}$$

- La distance vraie R_i peut donc s'écrire :

$$R_i = R_i'' - R_u$$

Principe de fonctionnement

Calcul de la position du récepteur



- X_{si} , Y_{si} et Z_{si} représentent les coordonnées de la position du satellite.
- X_r , Y_r et Z_r représentent les coordonnées de la position du récepteur (aéronef) et sont les inconnues.
- Nous pouvons donc appliquer le théorème de Pythagore pour déterminer la distance R_i :

$$R_i^2 = (X_{si} - X_r)^2 + (Y_{si} - Y_r)^2 + (Z_{si} - Z_r)^2$$

$$R_1^2 = (X_{s1} - X_r)^2 + (Y_{s1} - Y_r)^2 + (Z_{s1} - Z_r)^2$$

$$R_2^2 = (X_{s2} - X_r)^2 + (Y_{s2} - Y_r)^2 + (Z_{s2} - Z_r)^2$$

$$R_3^2 = (X_{s3} - X_r)^2 + (Y_{s3} - Y_r)^2 + (Z_{s3} - Z_r)^2$$

- Un système de trois équations est donc nécessaire afin de déterminer les trois inconnues X_r , Y_r et Z_r :

Principe de fonctionnement

Calcul de la position du récepteur

$$R_1^2 = (X_{s1} - X_r)^2 + (Y_{s1} - Y_r)^2 + (Z_{s1} - Z_r)^2$$

$$R_2^2 = (X_{s2} - X_r)^2 + (Y_{s2} - Y_r)^2 + (Z_{s2} - Z_r)^2$$

$$R_3^2 = (X_{s3} - X_r)^2 + (Y_{s3} - Y_r)^2 + (Z_{s3} - Z_r)^2$$

- Trois mesures de distances doivent donc être prises entre le récepteur et trois satellites afin de, théoriquement, déterminer la position du récepteur : R_1 , R_2 et R_3 .
- Suite à ces trois mesures, le calculateur détermine les valeurs de X_r , Y_r et Z_r .
- Or, R_1 , R_2 et R_3 ne sont, en fait, que des pseudo-distances car entachées des erreurs d'horloge du récepteur (R_u), d'horloge du système GPS (R_{si}) et de la propagation de l'onde électromagnétique (R_{ai}).

Principe de fonctionnement

Calcul de la position du récepteur

- Les trois types d'erreurs peuvent être prises en compte de la manière suivante :

R_{si} (erreur d'horloge du satellite) : Il s'agit d'une information mesurée par les MCS qui est envoyée au récepteur dans le champ des données provenant des satellites. R_{si} est donc connue.

R_{ai} (erreur de propagation de l'onde électromagnétique) : Elle est plus difficile à déterminer, mais peut être estimée à partir de données transmises par les satellites ou de façon empirique. L'usage d'une seconde fréquence porteuse (L2) permet de la réduire considérablement.

- À ce stade, on peut donc déduire les pseudo-distances R_i' :

$$R_i'' = R_i' - R_{si} - R_{ai}$$

Principe de fonctionnement

Calcul de la position du récepteur

- Il nous faut maintenant tenir compte de l'erreur d'horloge du récepteur (R_u).
- En effet, l'horloge à quartz des récepteurs est beaucoup moins précise que les horloges atomiques (Cs et Rb) embarquées à bord des satellites.
- Sachant que la distance R_i' est partiellement corrigée, la vraie distance R_i se détermine donc par :

$$R_i = R_i'' - R_u$$

Principe de fonctionnement

Calcul de la position du récepteur

- Nous pouvons dès lors réécrire nos trois équations comme suit :

$$\begin{aligned}(R_1'' - R_U)^2 &= (X_{S1} - X_R)^2 + (Y_{S1} - Y_R)^2 + (Z_{S1} - Z_R)^2 \\(R_2'' - R_U)^2 &= (X_{S2} - X_R)^2 + (Y_{S2} - Y_R)^2 + (Z_{S2} - Z_R)^2 \\(R_3'' - R_U)^2 &= (X_{S3} - X_R)^2 + (Y_{S3} - Y_R)^2 + (Z_{S3} - Z_R)^2\end{aligned}$$

- Mais, en plus de nos trois inconnues de départ X_R , Y_R , et Z_R , on vient d'en ajouter une quatrième : R_U !
- Il faudra donc rajouter une quatrième équation afin de résoudre le système à quatre inconnues :

$$(R_4'' - R_U)^2 = (X_{S4} - X_R)^2 + (Y_{S4} - Y_R)^2 + (Z_{S4} - Z_R)^2$$

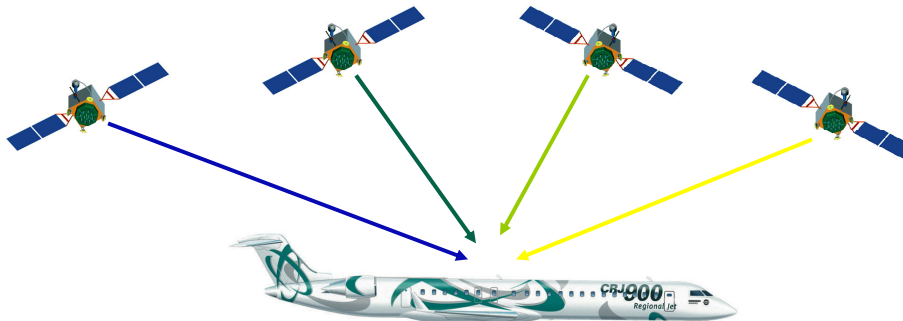
- Ceci signifie qu'il faut capter le signal d'un quatrième satellite pour éliminer l'erreur d'horloge du récepteur (R_U).

Principe de fonctionnement

- Dès lors :

3 satellites $\Rightarrow$ position en 2 dimensions

4 satellites $\Rightarrow$ position en 3 dimensions



Signaux des satellites NAVSTAR

- Initialement, le système GPS émettait sur deux fréquences L1 et L2.
- Les satellites Block IIR-M émettent déjà les codes L2C et M.
- À partir des satellites Block III, une troisième fréquence L5 a été ajoutée de même qu'un code L1C sur L1.
- Chaque fréquence porteuse est modulée par plusieurs signaux :

Fréquence :	Phase :	Codes actuels :	Codes modernisés :
L1 (1575,42 MHz)	En phase (I)	P(Y)	P(Y)
	En quadrature (Q)	C/A	C/A + L1C + M
L2 (1227,60 MHz)	En phase (I)	P(Y)	P(Y)
	En quadrature (Q)		L2C + M
L5 (1176,45 MHz)	En phase (I)		SoL Data
	En quadrature (Q)		SoL Pilot

© Département d'avionique

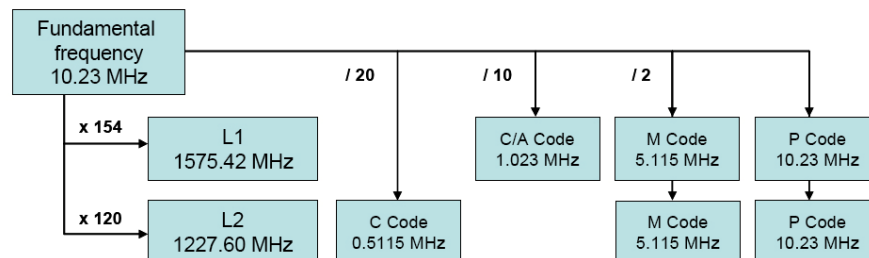
Document à des fins de formation

47

Signaux des satellites NAVSTAR

Oscillateur

- Il existe un oscillateur de référence qui servira à la génération de tous les signaux qui seront émis par le satellite NAVSTAR :



- Il existe aussi un signal à 50 Hz pour les données.
- La fréquence L5 est réalisée en multipliant la fréquence de l'oscillateur à 10,23 MHz par 115.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

48

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Les codes pseudo-aléatoires ou PRN :
 - PRN signifie *Pseudo Random Noise*.
 - Le niveau du signal GPS est très faible et noyé dans le bruit.
 - Exemples de niveaux reçus pour les fréquences L1 et L2 :

Fréquence porteuse :	L1	L2
Codage :	C/A + P	P
Puissance du signal reçu :	C/A = -160 dBW (-130 dBm) P = -163 dBW (-133 dBm)	P = -166 dBW (-136 dBm)

Signaux des satellites NAVSTAR

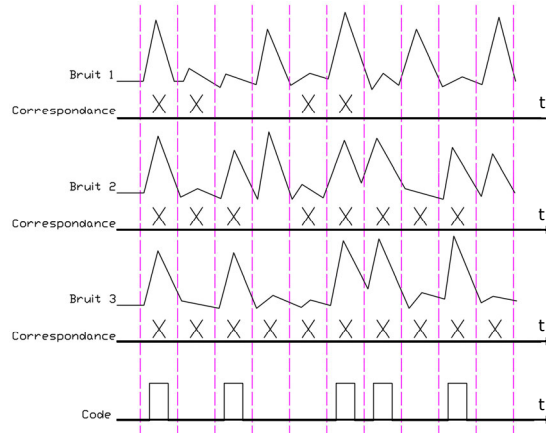
Les codes

- Les codes pseudo-aléatoires ou PRN :
 - Tous les satellites émettent sur les mêmes fréquences L1 et L2; il faut donc pouvoir discerner le signal d'un satellite en particulier parmi l'ensemble des signaux et du bruit reçus.
 - Chaque satellite a un code PRN qui lui est propre.
 - Les récepteurs GPS connaissent les codes PRN de chaque satellite.
 - Les récepteurs vont dès lors appliquer une technique de synchronisation par corrélation pour déterminer les messages envoyés par chaque satellite.
 - Les codes C/A et P(Y) sont des codes pseudo-aléatoires.
 - Les filtres de Kalman éliminent les données hors paramètres et sont primordiaux dans l'obtention d'une position stable.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Les codes pseudo-aléatoires ou PRN :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

51

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code C/A Coarse Acquisition:
 - Le code C/A a deux fonctions :
 - **Identification des satellites** par comparaison des codes reçus.
 - **Évaluation du temps de propagation** du signal du satellite.
 - Code PRN de 1.023 bits transmis au taux de 1.023 Mb/s se répétant toutes les millisecondes.
 - On détectera le code PRN par corrélation car tous les satellites émettent sur la même fréquence.
 - Cette détection de code PRN par corrélation s'appelle CDMA-Code Division Multiple Access.
 - Des données de navigation sont envoyées avec le code C/A.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

52

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **P(Y)** *Precision* :
 - Le code P(Y) a deux fonctions :
 - **Identification des satellites** par comparaison des codes reçus.
 - **Évaluation du temps de propagation** du signal du satellite.
 - Le code P est également une séquence pseudo-aléatoire PRN durant 267 jours se transmettant au taux de 10,23 Mb/s.
 - Ce code est divisé en 38 éléments de 7 jours.
 - Chaque code est unique et différent pour chaque satellite.
 - Le code de chaque satellite est initialisé chaque samedi à minuit UTC.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **P(Y)** *Precision* :
 - Le code P(Y) a deux fonctions :
 - **Identification des satellites** par comparaison des codes reçus.
 - **Évaluation du temps de propagation** du signal du satellite.
 - Sa longueur permet d'augmenter son gain de corrélation et d'éliminer les ambiguïtés de distances partout dans le système solaire.
 - Toutefois, pour se synchroniser sur le code P, un récepteur doit d'abord se synchroniser sur le code C/A afin de déterminer une estimation approximative de la position ainsi que le temps GPS.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **P(Y)** *Precision* :
 - Le code P se métamorphose en code Y crypté lorsque la fonction *Anti Spoofing (AS)* est activée par les militaires américains.
 - La fonction de cryptage du code P en code Y est la modulation par le code W.
 - Le code W est secret, mais on sait qu'il est appliqué au code P à une fréquence approximative de 500 kHz (soit 20 fois moins que la génération du code P).
 - Des données de navigation sont envoyées avec le code P.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **L1C** *Civilian* :
 - Le code L1C contient deux codes distincts :
 - Le code **L1C_P** *Pilot Component*.
 - Le code **L1C_D** *Data Component*.
 - Le code L1C est interopérable avec le signal Galileo E1.
 - Les codes L1C_P et L1C_D sont modulés en phase.
 - Le signal est modulé en TMBOC-Time Multiplexed Binary Offset Carrier.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **L2C Civilian** :
 - Le code L2C contient deux codes PRN distincts :
 - Le code **CM**-*Civilian Moderate Length Code*.
 - Le code **CL**-*Civilian Long Length Code*.
 - Le code CM est constitué de 10.230 bits et se répète toutes les 20 ms.
 - Le code CL est constitué de 767.250 bits se répétant toutes les 1.500 ms.
 - Chaque signal est transmis au taux de 511.500 b/s (1/20e de la fréquence de l'oscillateur), mais ils sont multiplexés ensemble pour former un signal au taux de 1,023 Mb/s.

Signaux des satellites NAVSTAR

Les codes

- Le code **L2C Civilian** :
 - Le code L2C contient deux codes PRN distincts :
 - Le code **CM**-*Civilian Moderate Length Code*.
 - Le code **CL**-*Civilian Long Length Code*.
 - Un message de navigation CNAV est modulé avec le code CM.
 - Le code CL ne contient aucun autre message (*Dataless Sequence*).
 - Le code CL permet d'obtenir une corrélacion supérieure de 24 dB (environ 250 fois supérieure) par rapport au code C/A de L1.
 - Le code L2C est modulé en TDMA.

Signaux des satellites NAVSTAR

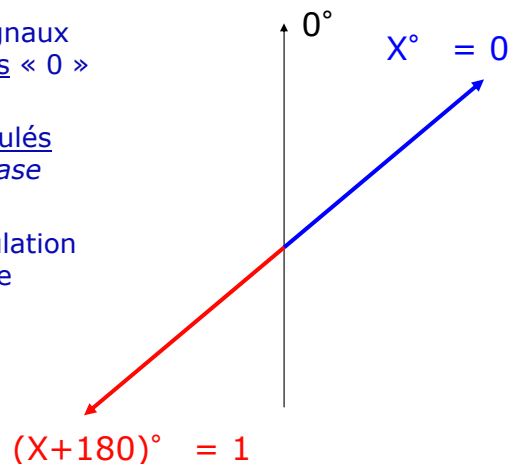
Les codes

- Le code **M** *Military* :
 - Le code **M** a été implanté pour améliorer la protection du signal GPS militaire.
 - On sait très peu de choses à son sujet.
 - Il est constitué d'un code PRN de longueur inconnue transmis à 5,115 Mbps (1/2 de la fréquence de l'oscillateur).
 - À la différence du code P(Y) original, le code M est autonome, c'est-à-dire que son seul décryptage permet de déterminer la position.
 - Un message de navigation **MNAV** est modulé avec le code M.
 - Le code M est modulé avec la modulation BOC (*Binary Offset Carrier*).

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BPSK

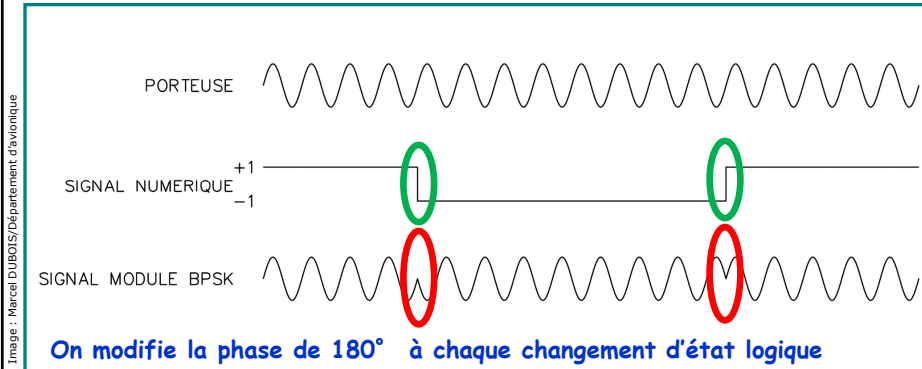
- Tous les codes sont des signaux sous forme d'états logiques « 0 » ou « 1 ».
- Les signaux GPS sont modulés en phase (*BPSK-Binary Phase Shift Keying*).
- Il s'agit d'un type de modulation adapté à la transmission de signaux logiques.



Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BPSK

- Le principe de la BPSK consiste à effectuer un changement de phase de 180° à la porteuse à chaque changement d'état logique de la modulation.



© Département d'avionique

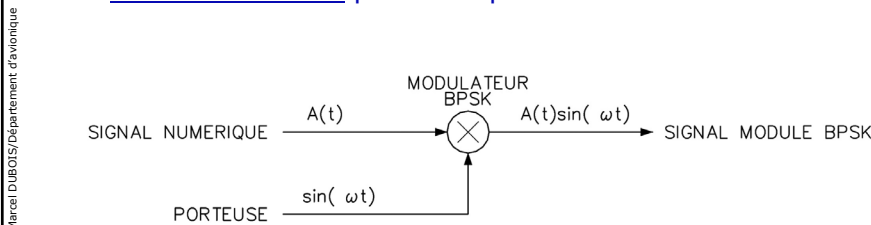
Document à des fins de formation

61

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BPSK

- Le principe de la BPSK consiste à effectuer un changement de phase de 180° à la porteuse à chaque changement d'état logique de la modulation.
- Le modulateur BPSK peut se représenter comme suit :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

62

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BOC

- La modulation BOC (*Binary Offset Carrier*) est une technique utilisée dans les systèmes de navigation par satellite modernes comme Galileo et GPS.
- Elle améliore la compatibilité spectrale et la performance de suivi en utilisant une sous-porteuse carrée qui déplace l'énergie du signal loin de la fréquence porteuse, créant deux lobes de spectre principaux au lieu d'un seul.
- La modulation BOC réduit les interférences entre différents signaux, facilitant leur coexistence.
- L'inconvenient est une acquisition plus complexe du signal.
- Une modulation BOC se définit comme suit :

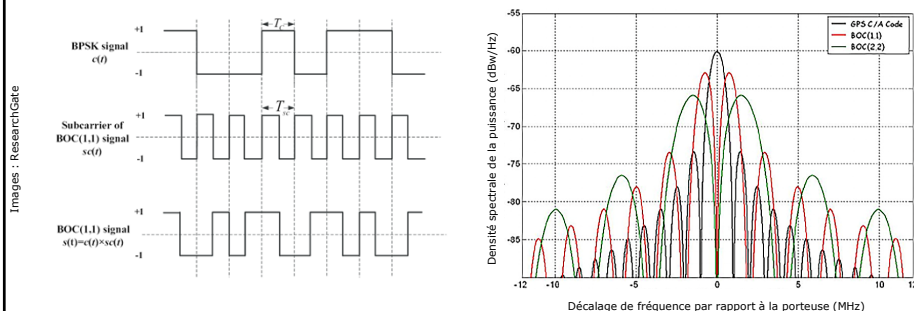
BOC (n, m)

n : fréquence de la sous-porteuse (MHz).
 m : taux d'étalement du code (Mbps).

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BOC

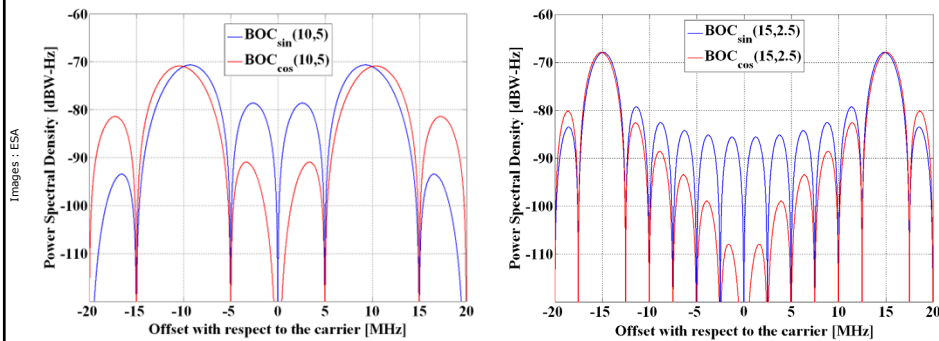
- Exemples : BOC (1,1) et (2,2) :



Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BOC

- Exemples : BOC (10,5) et (15,2.5) :



© Département d'avionique

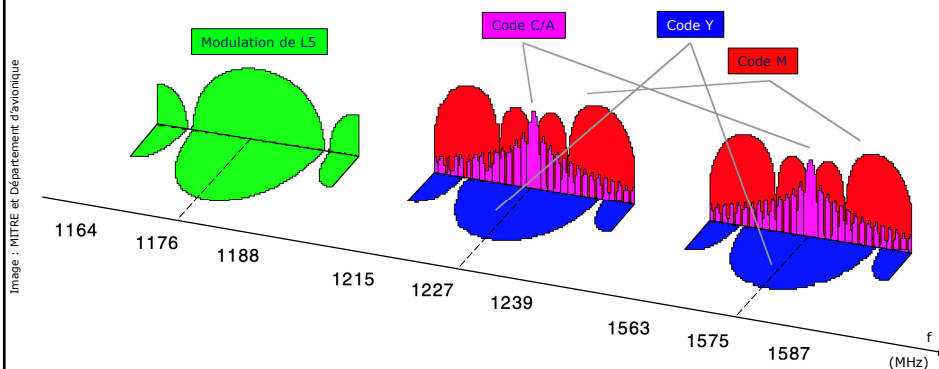
Document à des fins de formation

65

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation BOC

- Le code M est modulé avec une modulation BOC (10,5) où la sous-porteuse est à 10,23 MHz et le taux du code d'étalement est à 5,115 Mbs :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

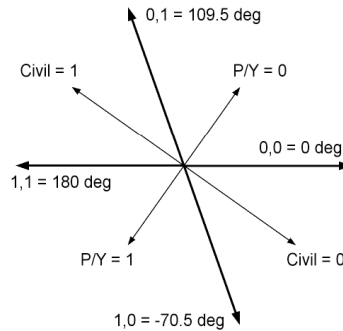
66

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation du signal L1



L1 Signal Component Vector Relationships



L1 Phase Relationships
(Civil is 3 dB stronger than P/Y)

U.S. Coast Guard

© Département d'avionique

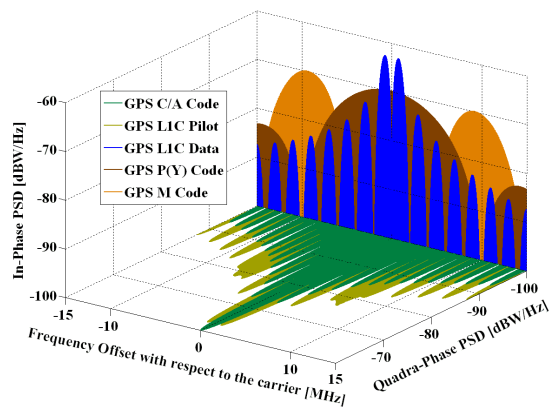
Document à des fins de formation

67

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation du signal L1

- Visualisons le spectre de la fréquence porteuse L1 codée par C/A (BPSK), L1C (TBOC), par P(Y) (BPSK) et par M (BOC) :



Images : ESA-navipedia

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

68

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation du signal L2

L2 Signal Component Vector Relationships

0,1 = 84.7 deg
Civil = 1
P/Y = 0
0,0 = 0 deg
1,1 = 180 deg
P/Y = 1
Civil = 0
1,0 = -95.3 deg
L2 Phase Relationships
(Civil is 0.4 dB weaker than P/Y)

L2 Civil is ~2.3 dB weaker than L1 Civil on IIR-M and IIF Satellites

U.S. Coast Guard

© Département d'avionique Document à des fins de formation

69

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation du signal L2

- Visualisons le spectre de la fréquence porteuse L2 codée par **L2C** (TDMA), par **P(Y)** (BPSK) et par **M** (BOC) :

In-Phase PSD [dBW/Hz]
Frequency Offset with respect to the carrier [MHz]
Quadra-Phase PSD [dBW/Hz]

GPS L2C
GPS P(Y) Code
GPS M Code

Images : ESA-NaviMedia

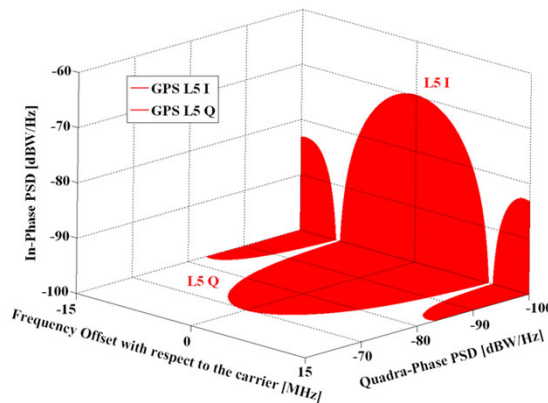
© Département d'avionique Document à des fins de formation

70

Signaux des satellites NAVSTAR

La modulation du signal L5

- Visualisons le spectre de la fréquence porteuse L5 modulée en BPSK et codée par L5 I (SoL Data) et par L5 Q (SoL Pilot) :



Images : ESA-Navipedia

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

71

Signaux des satellites NAVSTAR

Conditions d'accès

- La fonction SA-Selective Availability :
 - Il s'agit d'une dégradation volontaire du signal GPS destiné aux utilisateurs civils.
 - Lorsque la fonction SA est activée, la précision destinée aux utilisateurs du service SPS est réduite.
 - Depuis mai 2000, sur ordre présidentiel, la fonction SA a été désactivée.



U.S. Federal Government

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

72

Signaux des satellites NAVSTAR

Conditions d'accès

- La fonction **AS-Anti Spoofing** :
 - Cette fonction permet de passer du code P au code Y.
 - Lorsque la fonction **AS** (anti effraction) est active, le code W crypte le code P pour donner le code Y non accessible aux utilisateurs civils.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

73

Les données de navigation

- On a vu qu'il existait plusieurs catégories de données transmises avec les codes PRN :

- ✓ **Données de navigation** avec C/A et P(Y) sur L1 et L2.
- ✓ **Message CNAV** avec CM sur L2C.
- ✓ **Message MNAV** avec M sur L1 et L2.

- Ces messages sont transmis à un taux de transmission très faible (50 bps sur C/A et P(Y)) afin d'être en mesure de les différencier des codes PRN avec qui ils sont modulés.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

74

Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Les données de navigation contiennent les paramètres dont le récepteur a besoin pour ses calculs de navigation :
 - Informations sur l'état du satellite.
 - Informations de synchronisation des horloges.
 - Informations de synchronisation pour passer du code C/A au code P.
 - Éphémérides du satellite.
 - Corrections pour les délais de propagation des ondes dans l'atmosphère.
 - Almanach, c'est-à-dire les données concernant tous les autres satellites.

Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Exemples d'almanach (en général valide durant 90 jours environ) et d'éphémérides (données à court terme de 4 heures environ) :

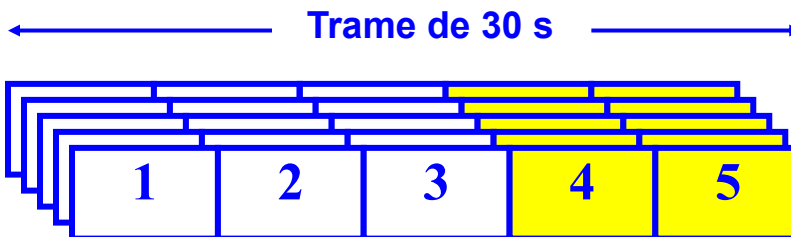
```
***** Week 512 almanac for PRN-24 *****
ID: 24
Health: 000
Eccentricity: 0.6661891937E-002
Time of Applicability(s): 319488.0000
Orbital Inclination(rad): 0.9505615234
Rate of Right Ascen(r/s): -0.7850758266E-008
SQRT(A) (m 1/2): 5153.627930
Right Ascen at Week(rad): -0.7220151424E+000
Argument of Perigee(rad): -0.651554227
Mean Anom(rad): -0.5415329933E+000
Af0(s): 0.1974105835E-003
Af1(s/s): 0.3637978807E-011 week: 512
```

```
EPHEMERIS FOR SATELLITE 24 :
PRN number for data ..... 24
Issue of ephemeris data ..... 179
Semi-Major Axis (meters) ..... 2.65599E+07
C(1c) (rad) ..... -1.024445E-07
C(1s) (rad) ..... -1.22935E-07
C(1rc) (meters) ..... 168.656
C(1rs) (meters) ..... -63.3125
C(1uc) (rad) ..... -3.48687E-06
C(1us) (rad) ..... 1.1526E-05
Mean motion difference (rad/sec) ..... 3.94802E-09
Eccentricity (dimensionless) ..... 0.00623617
Rate of inclination angle (rad/sec) .. 1.05004E-10
Inclination angle @ ref. time (rad) .. 0.976756
Mean Anomaly at reference time (rad) .. 1.79689
Corrected Mean Motion (rad/sec) ..... 0.000149861
Computed Mean Motion (rad/sec) ..... 0.000149858
Argument of perigee (rad) ..... -2.06498
Rate of right ascension (rad/sec) .... -7.67032E-09
Right ascension @ ref time (rad) ..... -2.4059
Sqrt (1 - e^2) ..... 0.999981
Sqr root semi-major axis, (m^1/2) .... 5153.63
Reference time ephemeris (sec) ..... 252000
```

Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

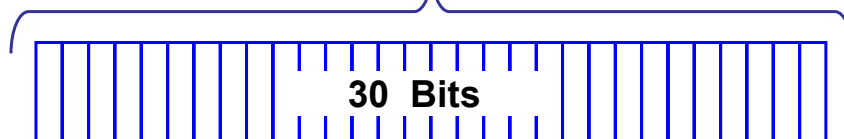
- Les données de navigation comprennent un total de 37.500 bits.
- Elles sont transmises à un taux de 50 bps en 25 trames de 1.500 bits (30 s) divisées en cinq sous-trames de 300 bits (6 s).



Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Chaque sous-trame est subdivisée en 10 mots de 30 bits.



ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTPETIT

Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

Image: Marcel DUBOIS/Département d'avionique

© Département d'avionique Document à des fins de formation

79

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTPETIT

Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Chaque sous-trame commence par deux mots de contrôle : le mot de télémétrie (TLM-Telemetry Word) et le mot de transfert (HOW-Handover Word) :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

80



Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Le mot de télémétrie TLM-Telemetry Word :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PREAMBULE								MESSAGE TLM												R		R		PARITE					
1	0	0	0	1	0	1	1																						

- Le mot de transfert HOW-Handover Word :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
TOW																		A	AS	No Sous TRAME		P	P	PARITE					
																								X X X X 0 0					

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

Images : Marcel DUBOIS/Département d'avionique

81



Les données de navigation

Données de navigation avec C/A et P(Y)

- Les mots 3 à 10 des sous-trames :
 - La sous-trame No.1 contiennent principalement les paramètres de correction de l'horloge du satellite, ainsi qu'un facteur permettant la correction de l'erreur de propagation.
 - Les deux sous-trames No. 2 et No. 3 contiennent les éphémérides du satellite, c'est-à-dire les facteurs orbitaux permettant de calculer la position du satellite.
 - Les sous-trames No.4 et No. 5 ont 25 pages contenant l'almanach; elles sont différentes à chaque trame.

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

82

Les données de navigation

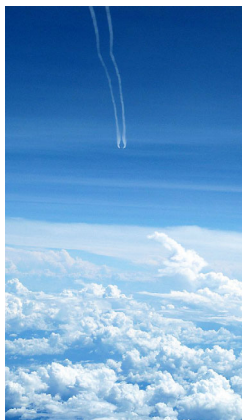
Message de navigation CNAV avec L2C

- Le message de navigation CNAV est une version améliorée des données de navigation.
- Le message CNAV contient des informations sur le temps, l'état du système, les éphémérides et l'almanach.
- Les informations contenues dans le message CNAV sont plus précises que dans les données de navigation.
- Au lieu d'un format constitué de trames et de sous-trames, le message CNAV est pseudo-packetisé pour donner des paquets de messages de 12 secondes et 300 bits (25 bps).
- Avec une constellation de 32 satellites, à peu près 75 % de la bande passante prévue pour le message CNAV est occupée, ce qui laisse la possibilité d'ajouter de l'information dans le futur.

Les données de navigation

Message de navigation CNAV avec L2C

- Parmi les changements importants du message CNAV :



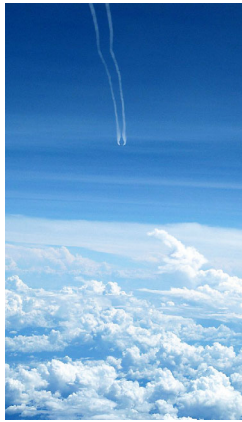
Jens KRUGER

- Il utilise un Forward Error Correction (FEC) avec un taux de code de convolution de 1/2; ainsi, si le message de navigation est envoyé à un taux de 25 bps, un signal à 50 bps est effectivement transmis.
- Le numéro de semaine GPS représente un mot de 13 bits, ce qui veut dire que sa mise à zéro n'intervient que tous les 157 ans (prochaine mise à zéro en 2137 !)
- Une information différentielle de temps avec les autres systèmes GNSS : GLONASS et Galileo.

Les données de navigation

Message de navigation CNAV avec L2C

- Parmi les changements importants du message CNAV :



Jens KRÜGER

- La bande passante libre permet d'inclure un paquet pour des corrections différentielles permettant de corriger les données de l'horloge des données de navigation sur L1.
- Chaque paquet contient un drapeau d'alerte (*Alert Flag*) qui est actif lorsque des informations au sujet des satellites ne sont pas fiables; ainsi, un utilisateur est informé dans les 6 secondes au cas où un satellite ne peut plus être utilisé.
- Le système est conçu pour supporter 63 satellites, au lieu de 32 avec les données de navigation sur L1.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

85

Les données de navigation

Message de navigation MNAV avec M



Pierre GILLARD/2005-4477

- Le message de navigation MNAV est packetisé comme le message CNAV permettant une plus grande souplesse quant aux signaux envoyés.
- Tout comme le CNAV, le message MNAV peut utiliser le Forward Correction Error et l'Advanced Error Detection.
- Le reste est secret

TOP SECRET

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

86

Précision et limitations

Erreur d'horloge du récepteur - Pseudo-distance



- Si les horloges atomiques des satellites sont extrêmement précises, les horloges des récepteurs le sont beaucoup moins.
- Ceci induit une erreur qui se traduira par une incertitude dans le calcul de la distance : c'est la pseudo-distance.

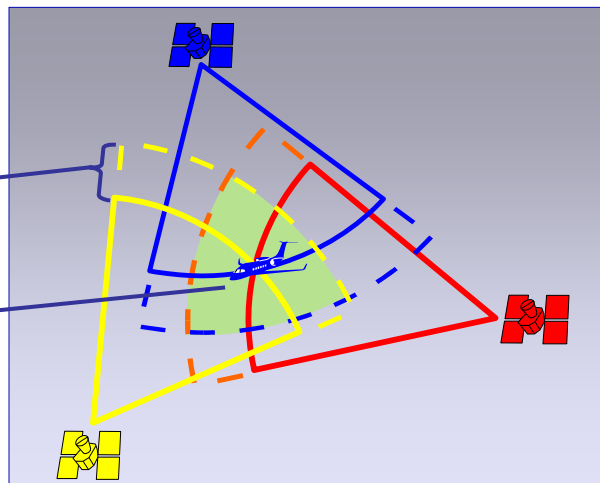
Précision et limitations

Erreur d'horloge du récepteur - Pseudo-distance

- Si nous prenons référence sur trois satellites :

Erreur d'horloge du récepteur

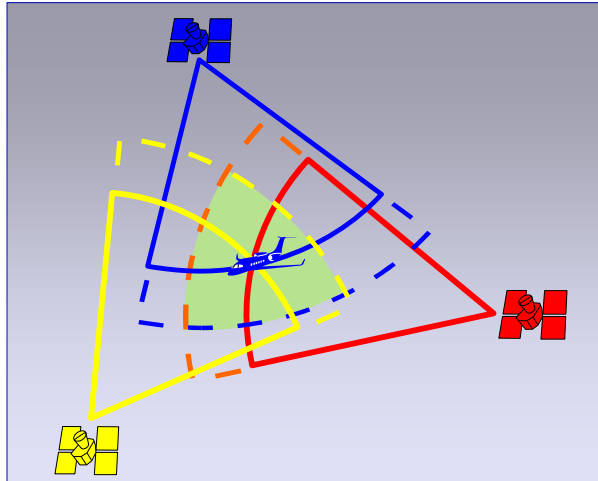
Zone d'incertitude



Précision et limitations

Erreur d'horloge du récepteur - Pseudo-distance

- Si nous prenons référence sur trois satellites :
- Cette erreur est éliminée avec une mesure par rapport à un quatrième satellite.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

89

Précision et limitations

Erreur UERE-User Equivalent Range Error

- C'est la moyenne des erreurs de distance sur une période de 24 heures.
- L'erreur UERE moyenne est estimée à un peu plus de 10 mètres.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

90

Précision et limitations

Erreur DOP-Dilution of Precision

- C'est l'erreur due à la position relative des satellites entre eux et le récepteur.
- Comme dans les autres systèmes de navigation, l'angle formé par les droites reliant les satellites au récepteur affecte la précision de la position calculée.
- Dans le cas du GPS, cinq facteurs sont considérés :

- ✓ **HDOP** (erreur horizontale).
- ✓ **VDOP** (erreur verticale).
- ✓ **PDOP** (erreur de position 3D).
- ✓ **TDOP** (erreur de temps).
- ✓ **GDOP** (erreur géométrique ou globale).

Précision et limitations

Erreur DOP-Dilution of Precision

- Afin de réduire les erreurs dues à la position relative des satellites, il faudra veiller à prendre référence sur des satellites les plus espacés possible :

Cas défavorable :

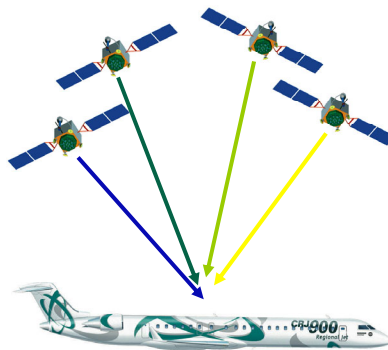


Image : Département d'avionique

Précision et limitations

Erreur DOP-Dilution of Precision

- Afin de réduire les erreurs dues à la position relative des satellites, il faudra veiller à prendre référence sur des satellites les plus espacés possible :

Cas favorable :

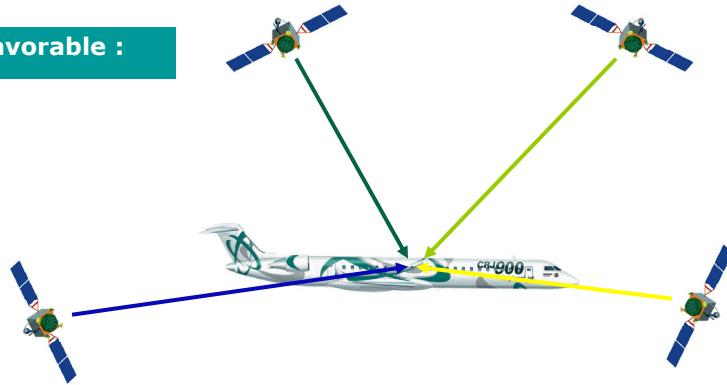


Image : Département d'avionique

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

93

Précision et limitations

Erreur DOP-Dilution of Precision

- Sur les récepteurs GPS ou les systèmes FMS (CDU), il est possible de voir la visibilité des satellites à chaque instant :

SV#	AZ	EL	SNR	STAT
05GPS	069T	48°	40	5
07GPS	029T	06°	41	5
21GPS	306T	36°	37	5
29GPS	229T	44°	39	5
30GPS	000T	00°	40	5
15GPS	000T	00°	44	5
20GPS	000T	00°	37	5
02GPS	000T	00°	41	5

RETURN→

Photo : Frédéric MORIN

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

94

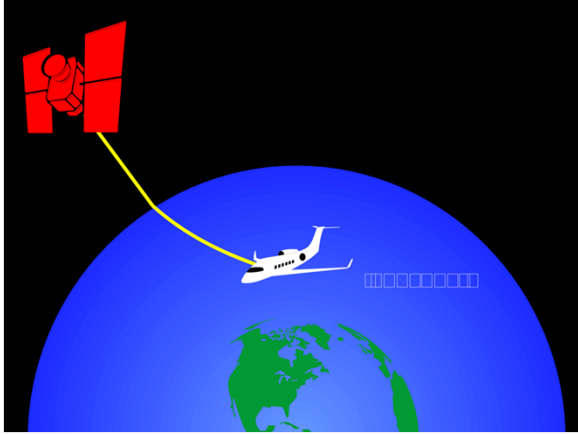


ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTPETIT

Précision et limitations

Erreurs dues à la propagation des ondes

- Distorsion de la propagation dans la couche ionosphérique :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

95

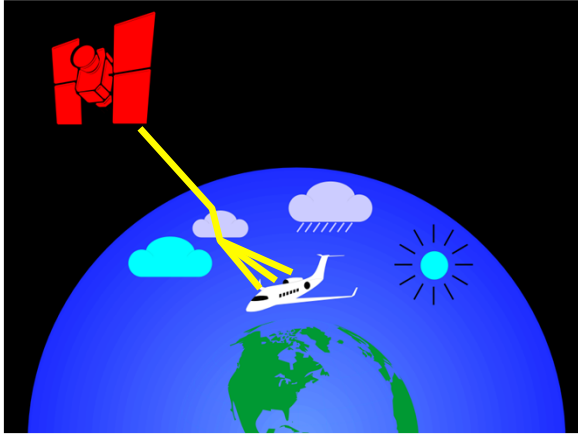


ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTPETIT

Précision et limitations

Erreurs dues à la propagation des ondes

- Diffractions des ondes dues aux conditions météorologiques :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

96

Précision et limitations

Erreurs dues à la propagation des ondes

- Le signal envoyé est de faible puissance et peut être altéré ou parfois bloqué par certains obstacles météorologiques qu'il rencontre (couches thermiques, nuages, etc.)
- Puisque l'atmosphère (ionosphère et troposphère) peut modifier la vitesse de propagation, l'industrie cherche à améliorer la fiabilité et la précision.
- En comparant les temps des signaux transmis simultanément dans les bandes L1 et L2, le délai de propagation atmosphérique peut être évalué et compensé.

Précision et limitations

Erreurs dues à la vitesse des satellites et des mobiles

- Il existe un effet Doppler à cause du mouvement des satellites et du récepteur :

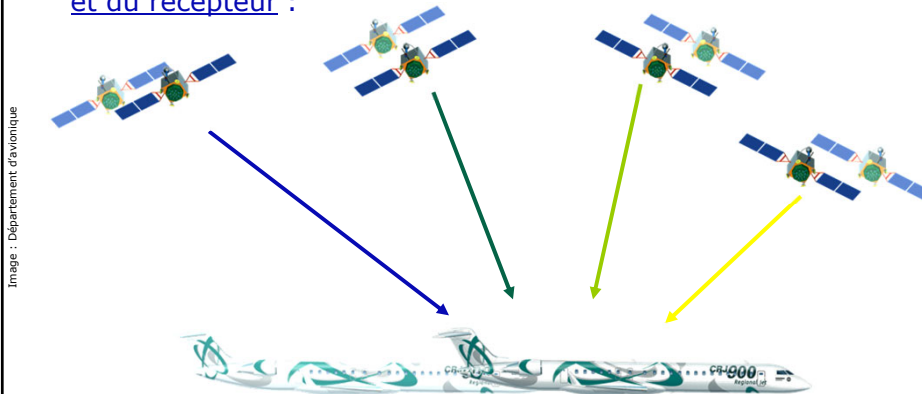
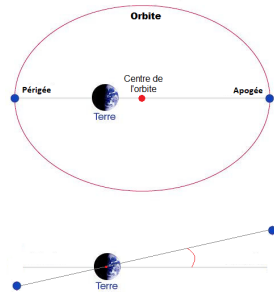


Image : Département d'avionique

Précision et limitations

Les erreurs satellitaires

- L'orbite des satellites n'est pas un cercle, mais une ellipse.
- Il est donc nécessaire de déterminer les éléments orbitaux de Kepler :



- L'excentricité (pour la forme de l'ellipse, 0 étant circulaire).
- Le demi-axe (pour la taille de l'ellipse).
- L'angle d'inclinaison selon l'équateur.
- Le point d'ascension à l'équateur.
- L'apogée et le périgée.
- La variation de vitesse.
- Etc.

Précision et limitations

Autres erreurs à corriger

- La vitesse du satellite est connue, mais pas celle du récepteur qui devra, dès lors, effectuer une compensation dynamique.
- La Terre n'est pas une sphère parfaite : elle est légèrement aplatie aux pôles (géoïde), ce qui modifie la distance entre l'orbite et la surface.
- L'horloge atomique à bord des satellites est soumise à une gravité inférieure et aussi à sa vitesse orbitale ce qui modifie la valeur du temps en orbite; une compensation existe dans le calcul interne.

Précision et limitations

Facteurs causant l'élimination d'un SV du calcul de position

- Le signal reçu est trop faible ou intermittent.
- Le signal reçu provient de rebonds multiples et a donc parcouru une trajectoire plus longue.
- La position du satellite est trop proche de l'horizon (l'élévation est trop faible).
- Le signal décodé s'avère non-conforme.
- Une défectuosité ou un dysfonctionnement est constaté au niveau de l'émission (fréquence de la porteuse, puissance, etc.)
- Le satellite est en maintenance ou hors d'usage.

Précision et limitations

Les risques

- Se fier à un seul et unique système de navigation présente un risque important en cas de dysfonctionnement.
- C'est pourquoi, jusqu'en 2010, le système LORAN-C avait été maintenu en fonction.
- Certains récepteurs GPS, à l'époque, disposaient aussi d'un récepteur LORAN-C interne en cas de problème avec le GPS.

Image : Département d'avionique



Précision et limitations

Les risques

- Ensuite, suite à l'entente entre les États-Unis et l'Europe au fait que GPS et Galileo sont interopérables, le LORAN-C a été abandonné car onéreux à maintenir et très énergivore.
- Toutefois, il faut malgré tout garder en tête que plusieurs causes de perturbation des signaux GNSS existent :



- Les vents et tempêtes solaires affectent les signaux par interférences radios.
- La météo et ses conséquences peuvent affecter la transmission des signaux (*ionospheric scintillation*).
- Le brouillage intentionnel (*GNSS jammers*).

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

103

Précision et limitations

Les risques

- La multiplication des approches RNAV GPS au détriment des installations ILS font en sorte que beaucoup d'aéroports souffriraient grandement en cas de panne des systèmes GNSS.
- Une nouvelle menace sur les signaux GPS est apparue dernièrement avec de faux signaux générés dans une zone géographique complexe.
- Plusieurs aéronefs se sont retrouvés avec une position erronée jusqu'à 60 MN de leur route aérienne initialement prévue.
- Ce phénomène (*Spoofing*), est un danger réel pour tout avion ne se fiant qu'à la position GPS et n'ayant peu ou pas de niveaux d'alerte.
- Les aéronefs militaires ne semblent pas avoir été perturbés puisque leur codes L1M et L2M sont cryptés.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

104

Précision et limitations

Les risques

- Ce phénomène est causé par le fait que le signal GPS provenant des satellites est très faible, noyé dans le bruit.
- Donc un simple émetteur au sol ou à bord d'un avion émettant un faux signal d'une puissance de l'ordre de 10 watts peut facilement « écraser » le signal reçu par un récepteur GPS non-protégé jusqu'à une distance de 30 Km.
- Les militaires possèdent leurs propres systèmes de détection et de protection contre ce genre de menaces.
- L'aviation civile commence à se protéger aussi à l'aide de nouveaux comparateurs et de signaux supplémentaires (L5).
- Les équipes sont aussi formés afin de réagir lorsqu'une telle situation se déclare, en déconnectant (désactivant) les systèmes qui pourraient être affectés (EGPWS, AFCS, IRS et ADIRS, etc.) et en prenant le contrôle de la navigation.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

105

Précision et limitations

Perturbations des signaux volontaires ou non

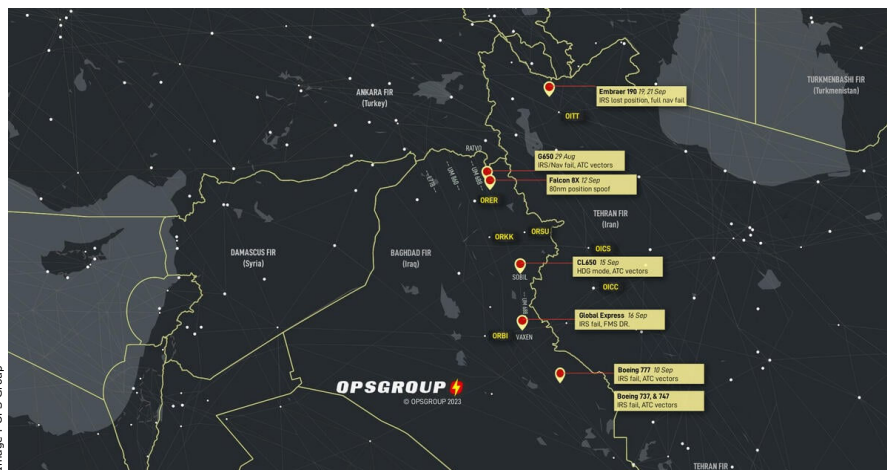


Image : OPS Group

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

106

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD MONTFRET

Précision et limitations

Perturbations des signaux volontaires ou non

Images : Flightradar24

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

107

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD MONTFRET

Précision et limitations

Perturbations des signaux volontaires ou non

rfi

Brouillage de l'avion d'Ursula von der Leyen: pourquoi la Russie est-elle suspectée?

L'avion à bord duquel voyageait la présidente de la Commission européenne Ursula von der Leyen, dimanche 31 août, a fait l'objet d'un brouillage GPS en Bulgarie, un phénomène fréquent dans cette partie d'Europe de l'Est. Mais pourquoi soupçonne-t-on la Russie d'être à l'origine de cette opération ?

Publié le : 04/09/2025 - 13:17 Modifié le : 04/09/2025 - 14:32 2 min

Un porte-parole de l'Union européenne a déclaré que le système GPS de l'avion transportant la présidente de la Commission européenne, Ursula von der Leyen, avait été brouillé lors d'un déplacement en Bulgarie. © George Calin / Reuters

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

108

Précision et limitations

Perturbations des signaux volontaires ou non

FlightGlobal

Safety

North Korea vexed at ICAO rebuke over satellite interference and missile launches

By David Kaminski-Morrow | 3 September 2023

ICAO's Council is to condemn North Korean interference to satellite-based navigation systems, as well as its continuing unannounced missile launches, at the upcoming ICAO Assembly – although the finger-wagging is unlikely to sway the renegade nation from its activities.

While the Council lists records of interference dating back to 2011, it highlights "ongoing" issues since early October last year within South Korea's Incheon flight information region.

Analysis of a four-month period to mid-February this year found more than 6,400 aircraft from 100 airlines had reported unreliable navigation signals to South Korean air traffic control.

The analysis, conducted by the South Korean ministry of science and information and communication technology, determined that the interference affected the L1 and L2 navigation signals from the GPS constellation.

While the Council sent a letter about the situation to the North Korean civil aviation minister in May, querying the government's plans to comply with the Chicago Convention, a 30-day response deadline passed with no reply.

The Council subsequently "reiterated its grave concern" about the situation in mid-June, and is reporting the matter to the Assembly as an infraction of the Chicago Convention.

Its draft resolution says the Assembly "deplores" and "condemns" the North Korean interference which, it adds, is "jeopardising the safety and security of international civil aviation".

The Council is also set to update the Assembly over North Korea's persistence in carrying out unannounced missile launches – a matter which was the subject of a formal resolution, at the previous Assembly in 2022, demanding that such potentially hazardous activity cease.

It points out that, despite the resolution, "several launches" had taken place in the three years since.

North Korean representatives are adopting a tough stance in response to the satellite interference and missile concerns. In a statement submitted to the Assembly, they express indignation over a perceived "politicisation and double standard emerging within ICAO".

The statement accuses "some" ICAO member countries of being "hostile" to North Korea, and forming a "front...under the pretext of implementing the Convention and ensuring aviation safety".

North Korea points out that South Korean authorities infiltrated its airspace with military drones in October last year, in order to drop leaflets near Pyongyang airport – but that this has been treated within ICAO as a military issue, outside of the Chicago Convention.

It argues that, if the "same logic is to be applied", its missile test launches are also "military scope".

"Such inconsistent acts of double standards are openly committed by several member states of the ICAO Council where the present and future of international civil aviation is decided," it says.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

109

Précision et limitations

Des orbites de plus en plus encombrées ...



Image : ESA

- La quantité de débris en orbite représente un risque de plus en plus élevé de collisions avec des satellites (syndrome de Kessler, NASA, 1978).

- Il ne s'agit pas d'un problème pour la transmission des ondes puisque la densité de débris n'est pas encore suffisante pour être un obstacle.
- Mais chaque mise en orbite vers des orbites supérieures nécessite de franchir cette couche de plus en plus dense.

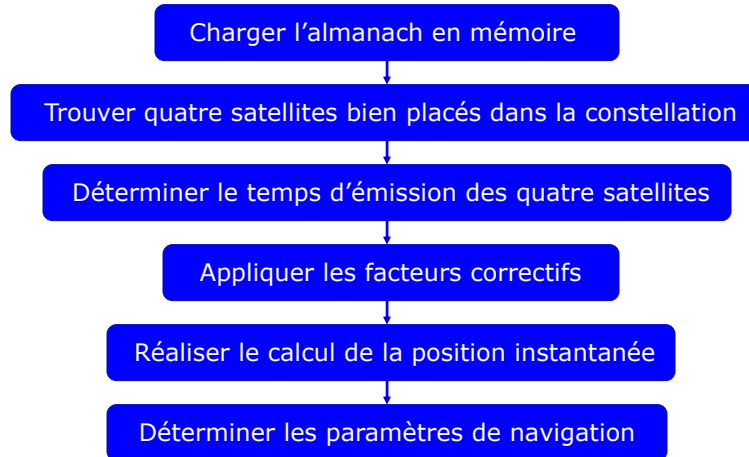
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

110

Relevé de la position

- Les étapes pour le calcul de la position, de la vitesse et des autres paramètres nécessaires à la navigation pourraient être établies comme suit :



Relevé de la position

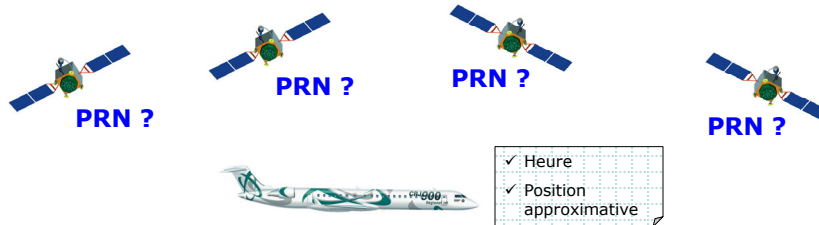
Almanach

- Si le récepteur n'a pas encore chargé d'almanach, il n'est pas en mesure déterminer la position des satellites à chaque instant et ne peut donc donner une position.
- C'est pour cela qu'un délai supplémentaire est encore parfois requis par le récepteur lors de la toute première utilisation avant de donner une position.
- L'almanach est chargé dans la mémoire du récepteur avec les autres données de navigation présentes dans les signaux C/A et P(Y) sur L1.
- Une fois en mémoire, l'almanach est sauvegardé et régulièrement mis à jour si nécessaire.

Relevé de la position

Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation

- En ayant l'heure actuelle et la position approximative (position du moment où il a été éteint), le récepteur fouille dans l'almanach pour prédire la visibilité des satellites.
- Il en sélectionne au minimum quatre les mieux placés (DOP).



- Il commence séquentiellement le processus d'acquisition des signaux des satellites par mesure de corrélation avec le code PRN des satellites sélectionnés.

Relevé de la position

Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation

- Le processus d'acquisition des signaux des satellites se déroule comme suit :

1. Le récepteur capte le signal d'un premier satellite (SV) et l'identifie grâce à son code PRN;
2. Le temps d'émission du premier signal est décrypté avec son déphasage;
3. Le message de navigation est décodé afin de connaître la position du SV ainsi que les identifiants (codes PRN ou CHIPS) des autres SV possibles;
4. Les trois autres SV sont acquis individuellement, tout en continuant le suivi du premier;
5. La compensation de l'horloge interne du récepteur est établie dès qu'e le signal d'un quatrième satellite est décodé;
6. L'estimation de la première position est calculée à l'aide des différents temps de trajet et de la position connue des SV lors de la transmission;
7. L'ajout des satellites supplémentaires permet l'amélioration du calcul de la position.

Relevé de la position

Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation

- Afin de diminuer le temps d'acquisition (TTFF-*Time To First Fix*), la dernière position connue est gardée en mémoire afin d'estimer rapidement l'identification des satellites visibles et pour calibrer l'horloge interne.

Tableau : Orbits

	Almanac	Ephemeris	Position/Time	TTFF
Cold	No	No	No	>45s
Warm	Yes	No	Yes	>35s
Hot	Yes	Yes	Yes	1-5s

Relevé de la position

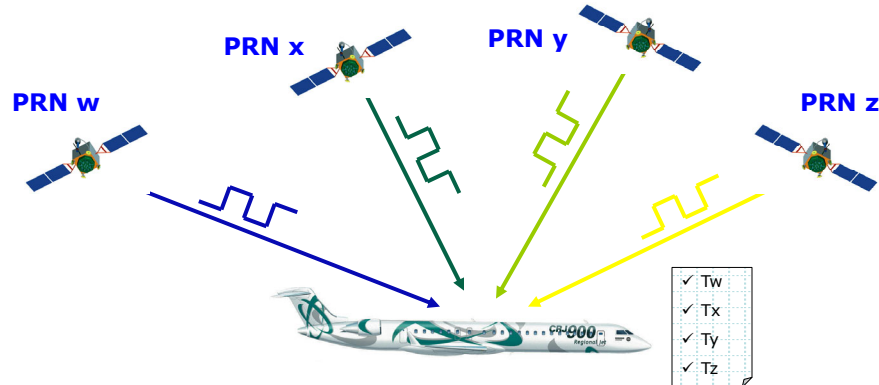
Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation

- Une autre méthode est d'utiliser la position IRS en continu, en particulier lors d'une perte de signal GPS.
- Lorsque le récepteur capte un premier satellite par la répétition de son signal et en extrait le code C/A, l'identification est faite et un suivi de ce signal peut ensuite être maintenu (*lock-on*).
- L'identification des autres satellites réputés visibles se fait par la base de données captée et mémorisée.
- Au plus un récepteur GPS disposera de canaux, au plus vite il pourra acquérir les signaux des différents satellites visibles.

Relevé de la position

Déterminer le temps d'émission des quatre satellites

- Une fois les signaux C/A des quatre satellites synchronisés, le récepteur relève le temps de l'émission des quatre signaux par rapport au temps de réception.



© Département d'avionique

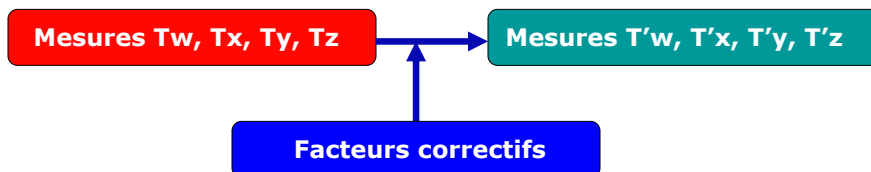
Document à des fins de formation

117

Relevé de la position

Appliquer les facteurs correctifs

- Compte tenu des satellites suivis et des conditions de propagation estimées pour l'endroit de la mesure, le récepteur applique les facteurs correctifs appropriés aux mesures effectuées.
- Ces informations de correction proviennent notamment des données de navigation.



© Département d'avionique

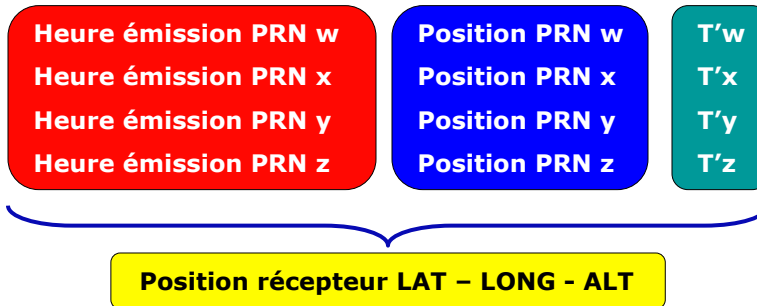
Document à des fins de formation

118

Relevé de la position

Réaliser le calcul de la position instantanée

- En connaissant le moment précis de l'émission de chaque signal provenant de chacun des satellites et en connaissant par l'almanach leur position respective à l'instant de l'émission, à l'aide des mesures relevées et corrigées, le récepteur détermine la position instantanée en longitude et latitude.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

119

Relevé de la position

Déterminer les paramètres de navigation

- En effectuant continuellement des mesures de position instantanées et en tenant compte de l'évolution de celles-ci, le calculateur du récepteur ou le gestionnaire de la navigation (FMS ou autre) extrapole les paramètres de navigation comme la vitesse sol, le cap, la dérive, l'écart de route.
- Les résultats sont affichés au pilote.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

120

Relevé de la position

Prédiction et détection des erreurs

- Un calcul de position ne pourra être exact que si l'intégrité du signal et de son contenu sont garantis.
- Plusieurs moyens existent afin garantir l'intégrité des signaux :
 - Informations de corrections par les données transmises.
 - « Safety of Life » (SoL) sur L5.
 - Fonction « RAIM-Receiver Autonomous Integrity Monitoring ».
 - Fonction « FDE-Fault Detection & Exclusion ».



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

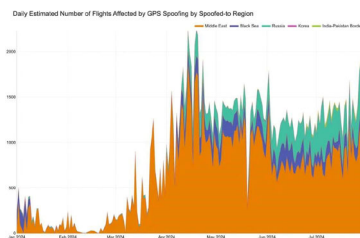
121

Relevé de la position

Prédiction et détection des erreurs



- Toutefois, il sera très difficile de contrer un brouillage (*jamming*) qui « noie » le signal GPS dans un niveau de bruit supérieur.
- Quant à la génération de faux signaux GPS (*spoofing*), une certain temps peut s'écouler avant qu'ils ne soient détectés et que l'information ne soit diffusée.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

122

Les récepteurs GPS

- Suivant le type d'activité, il y existera un système GPS adapté.
- En aviation, les récepteurs GPS peuvent disposer de systèmes connexes :



- Bases de données.
- Générateur de cartes (Moving Map Display).
- Calculateur de navigation.
- Interface ADS-B.
- Etc.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

123

Les récepteurs GPS

- De plus en plus, le récepteur GPS fait partie d'un ensemble intégré de radiocommunication et radionavigation :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

124

Les récepteurs GPS

Les récepteurs GPS en aviation générale

- En aviation générale, le récepteur GPS est le plus souvent utilisé comme RNAV (Area Navigation) autonome.
- Dans ce cas, le récepteur GPS :



- Dispose d'une **base de données** (aéroports, balises, fréquences, zones, etc.)
- Permet de créer des **points de passage** (WPT-Waypoints) ainsi que des routes.
- Permet le dialogue avec le pilote par un **écran**, incluant éventuellement une représentation de cartes (*Moving Map Display*), ainsi que par des **boutons**.
- Peut être interfacé avec d'**autres systèmes** ainsi qu'avec un **CDI** ou un **HSI** afin d'indiquer l'écart de route (TKE-Track Error).
- Peut être associé à un **VHF-COM** ainsi qu'à un récepteur **VOR-ILS**.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

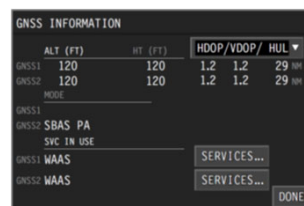
125

Les récepteurs GPS

Les récepteurs GPS en aviation d'affaires et commerciale



- En aviation d'affaires ou commerciale, le récepteur GPS est le plus souvent utilisé comme une des sources de radionavigation du système FMS.
- Plusieurs fonctions du GPS sont, dès lors, accessibles par le CDU du FMS.



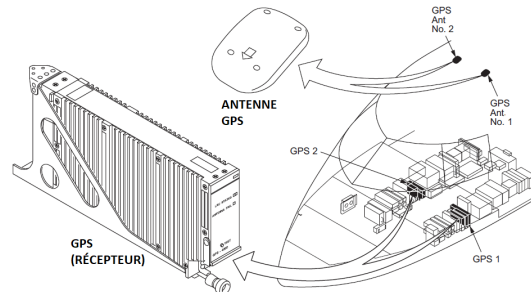
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

126

Installation des récepteurs GPS

Image : Bombardier



- L'installation d'un système GPS à bord d'un aéronef comprendra toujours :

- Une antenne.
- Un récepteur.
- Un système de contrôle et de gestion.
- Un affichage et/ou des systèmes « utilisateurs ».

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

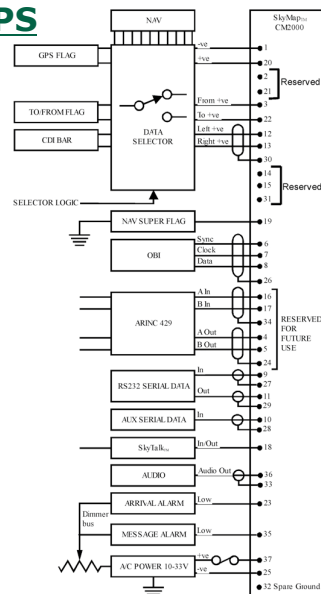
127

Installation des récepteurs GPS

- Actuellement, il existe une telle variété de systèmes GPS différents qu'il est impossible de définir une installation standard.
- Voici un exemple avec un GPS Skyforce CM2000 (devenu King KMD150) :



Image : King



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

128

Installation des récepteurs GPS

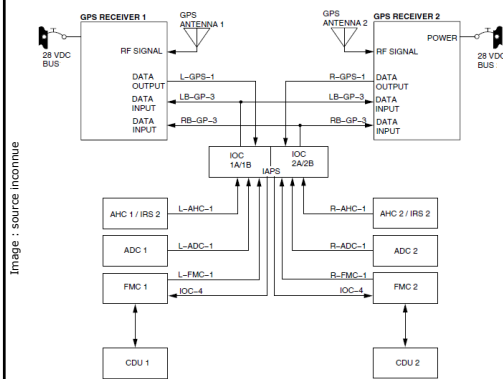


Image : source inconnue

- Il peut y avoir plus d'un récepteur GPS pour une redondance.
- Chaque récepteur dispose de son antenne qui lui est dédiée.
- La communication avec les autres systèmes s'effectue toujours par bus de données (ARINC 429, RS232, ASCB, Ethernet, etc.)

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

129

Installation des récepteurs GPS

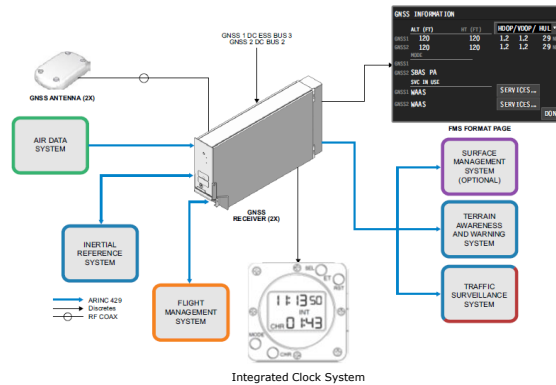


Image : source inconnue

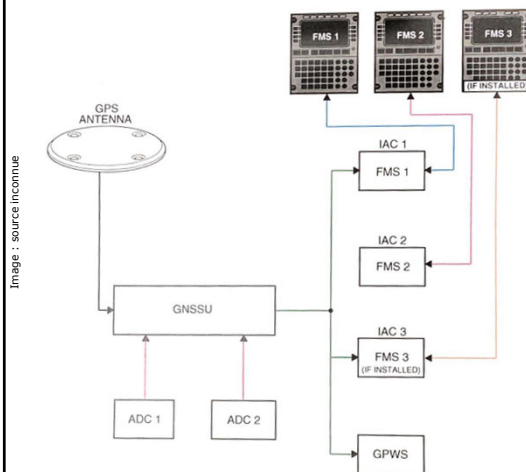
- Sur certains aéronefs, le message d'horloge des satellites GPS sert de référence temporelle à d'autres systèmes et ajuste automatiquement les chronomètres et horloges de l'appareil (GPS SYNC).

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

130

Installation des récepteurs GPS



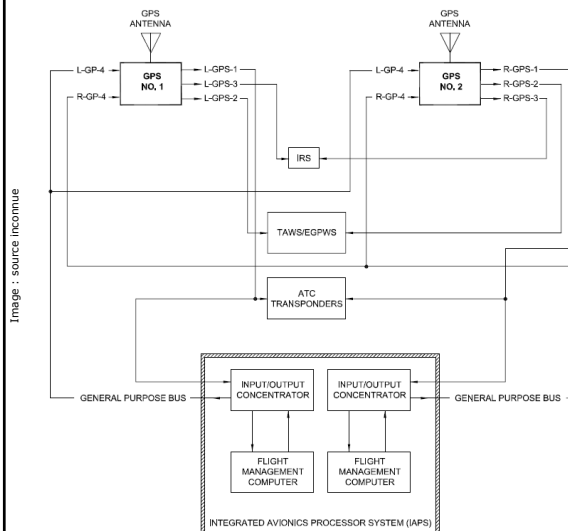
- Parfois, une entrée ADC (Air Data Computer) est utilisée afin d'intégrer les données d'altitude barométrique de l'aéronef.
- Ces informations sont traitées de façon logicielle, sans aucune intervention de l'équipage, mais permettent d'effectuer certaines approches LNAV/VNAV.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

131

Installation des récepteurs GPS



- Dans les aéronefs modernes, les données issues du récepteur GPS sont partagées avec de nombreux autres systèmes « utilisateurs ».
- Les réseaux de bus de données peuvent donc devenir assez vite complexes.

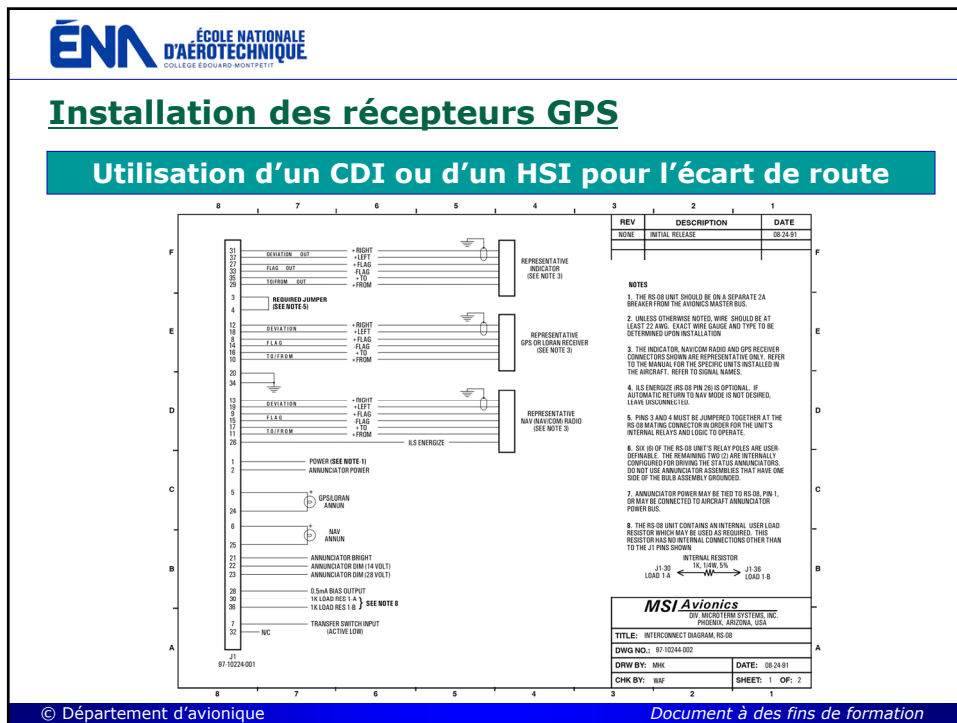
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

132



133



134

[illegible]

135

Image : AFunCan

ÉNA ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT

Installation des récepteurs GPS

Les sorties RS232

- Le RS232 est une norme de communication par bus de données série qui définit les caractéristiques électriques et les protocoles pour l'échange de données entre deux appareils.
- Complètement désuet dans le monde de l'informatique depuis le début des années 2000, le RS232 est encore utilisé régulièrement en avionique.

RS232 Pinout

Pin 1: Data Carrier Detect (DCD)
Pin 2: Received Data (RXD)
Pin 3: Transmit Data (TXD)
Pin 4: Data Terminal Ready (DTR)
Pin 5: Ground (GND)
Pin 6: Data Set Ready (DSR)
Pin 7: Request To Send (RTS)
Pin 8: Clear To Send (CTS)
Pin 9: Ring Indicator (RI)

- Dans le monde de l'informatique, le RS232 se présente sous la forme d'un connecteur DB9.
- Souvent, seulement RXD, TXD et GND sont utilisés.

© Département d'avionique

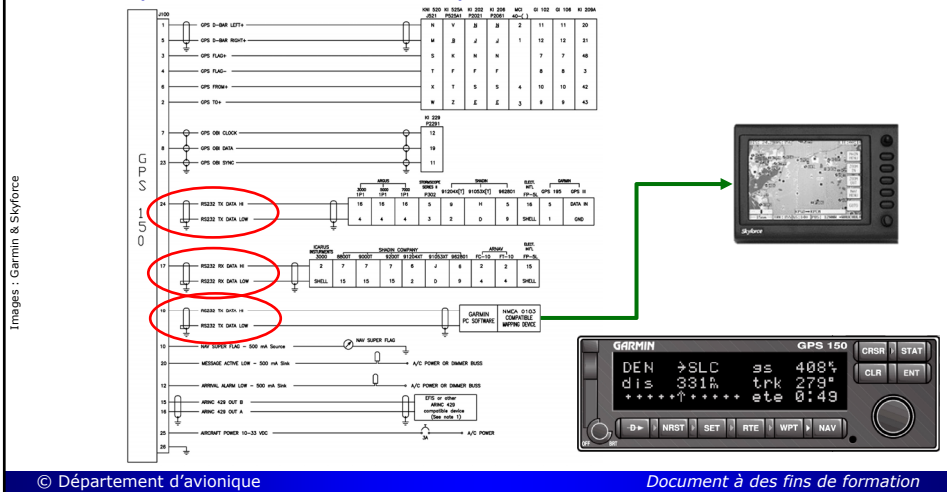
Document à des fins de formation

136

Installation des récepteurs GPS

Les sorties RS232

- Exemple d'installation avionique avec un Garmin GPS 150 :



137

Installation des récepteurs GPS

Le protocole NMEA 0183

- La norme NMEA 0183 est initialement un protocole pour la communication entre équipements destinés à la marine, dont les récepteurs GPS.
- Elle est définie et contrôlée par la National Marine Electronics Association.
- Elle a été « exportée » sur les systèmes GPS aéronautiques.
- En avionique, le protocole NMEA 0183 transite par les bus de données RS232.
- Les trames NMEA 0183 sont au format ASCII et peuvent avoir une longueur maximale de 82 octets.

138

Installation des récepteurs GPS

Le protocole NMEA 0183

- Le [protocole NMEA 0183](#) est [structuré](#) comme suit :

Tableau : Wikipedia

Champs	Longueur	Signification
\$	1	Marqueur de début de trame
Talker ID	2	Équipement ayant généré la trame NMEA
Trame type	3	Code identifiant le contenu de la trame
Données	variable	Charge utile dont le contenu est défini par le "Trame type". Chaque valeur est séparée par le caractère ','
*	1	Séparateur de checksum
Checksum	2	Somme de contrôle générée par un ou exclusif de tous les caractères situés entre '\$' et '*' (exclus)
Fin de ligne	2	Caractères "carriage return" + "line feed" marquant un retour à la ligne (<CR><LF> soit <0x0D><0x0A>)

Tracker ID	Système GNSS
BD ou GB	BeiDou
GA	Galileo
GP	GPS
GS	GLONASS

Installation des récepteurs GPS

Le protocole NMEA 0183

- [Exemple de trame GPGGA \(GPS Fix Data\) relative à un transfert de coordonnées GPS :](#)

Tableau : Wikipedia

```
$GPGGA,064036.289,4836.5375,N,00740.9373,E,1,04,3.2,200.2,M,,,0000*0E

$GPGGA      : Type de trame
064036.289  : Trame envoyée à 06 h 40 min 36 s 289 (heure UTC)
4836.5375,N : Latitude 48,608958° Nord = 48° 36' 32.25" Nord
00740.9373,E : Longitude 7,682288° Est = 7° 40' 56.238" Est
1           : Type de positionnement (le 1 est un positionnement GPS)
04          : Nombre de satellites utilisés pour calculer les coordonnées
3.2         : Précision horizontale ou HDOP (Horizontal dilution of precision)
200.2,M     : Altitude 200,2, en mètres
,,,,,0000   : D'autres informations peuvent être inscrites dans ces champs
*           : séparateur de checksum
0E          : Somme de contrôle de parité, un simple XOR sur les caractères entre $ et *
```

Installation des récepteurs GPS

Interface avec d'autres systèmes



Photo Frédéric MORIN



Image : Universal

- L'ELT pour envoyer les coordonnées FMS ou GPS en plus de l'identification de l'aéronef.
- L'ADS-B va utiliser la position GPS dans ses transmissions « out ».
- Le SATCOM pour établir les liaisons avec les satellites visibles.
- L'IRS pour son alignement et son maintien.
- Le TAWS et l'EGPWS pour leur mode 7 (*Forward Looking Terrain Avoidance Function*).
- Etc.

Antennes de réception

- Le signal GPS étant extrêmement faible (niveau du bruit), il est nécessaire de l'amplifier dès sa réception à l'antenne.
- Les antennes GPS sont donc dite « actives » car elles disposent d'un amplificateur intégré qui est alimenté par une tension DC (souvent 5 VDC, parfois 12VDC) via le câble coaxial :

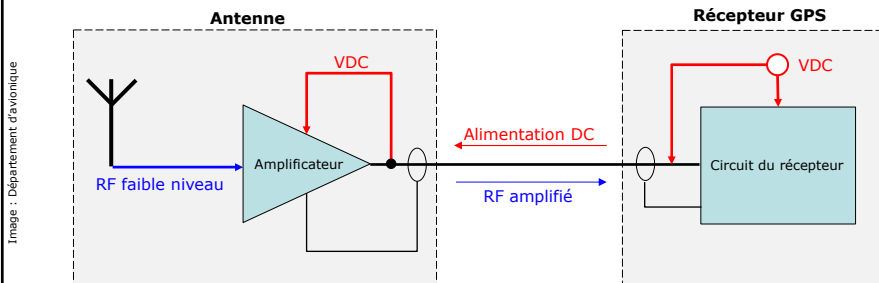


Image : Département d'avionique

Antennes de réception

- Les antennes GPS sont à polarisation circulaire.
- Le mode de propagation étant par ondes d'espace, les satellites ne peuvent être cachés des antennes.



AircraftSpruce.com
P/N 11-17990

Antenne GPS

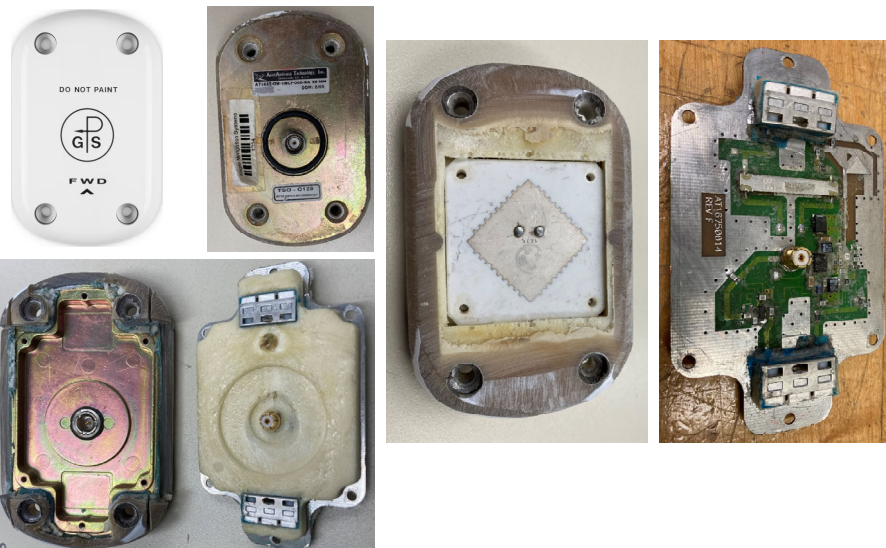


AircraftSpruce.com
PN 11-05849

Antenne combinée
GPS/COM

Aircraft Spruce

Antennes de réception



Photos : Frédéric Morin & Garmin

Antennes de réception

Electrical Specification

Valid over range -55°C to +90°C

Frequency Ranges L1: 1575.42 MHz $\pm$ 10.23 MHz
L2: 1227.60 MHz $\pm$ 10.23 MHz

Primary Power 4.5 V to 12.5 V $\leq$ 30 mA (AE Gains 6 dB to 12 dB)
 $\leq$ 60 mA (AE Gains 13 dB to 35 dB)

Polarisation Predominantly RHCP (Axial Ratio $\leq$ 3 dB on boresight.)

Impedance 50 ohm (nominal)

Power Consumption $\leq$ 375 mW (AE Gains 6 dB to 12 dB)
 $\leq$ 750 mW (AE Gains 13 dB to 35 dB)

- L'antenne doit être isotrope afin de capter les signaux GPS d'une façon circulaire et constante.
- Ses capacités en azimut et en élévation doivent être idéalement égales sur 360°.

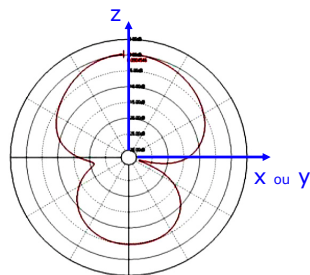
- Son rapport d'ondes stationnaires (VSWR) doit être réduit au minimum (généralement autour de 1,5).
- Sa polarisation circulaire droite (dextrogyre ou RHCP-*Right Hand Circular Polarization*) permet d'atténuer une réception circulaire gauche qui proviendrait d'une réflexion (*multipath*).
- L'amplificateur interne (LNA-Low Noise Amplifier) donne généralement un gain variant entre 15 dB et 50 dB.
- L'antenne peut contenir un seul élément à large bande (*wideband*) ou plusieurs éléments à bandes étroites (*narrowbands*) pour capter chacune des fréquences L1, L2 et L5.

© Département d'avionique

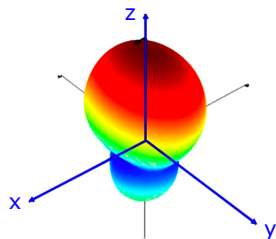
Document à des fins de formation

145

Antennes de réception



Images : auteur inconnu & Département d'avionique



- Le diagramme polaire en cardioïde de l'antenne GPS permet de recevoir un signal principalement vers le haut.
- Les zones latérales sont donc moins susceptibles d'avoir un gain.
- Les antennes pour de l'équipement au sol peuvent adopter un style conique.
- Certains avions militaires sont équipés d'antennes à réseau de phase afin d'améliorer la sensibilité de la réception.



Image : Amazon

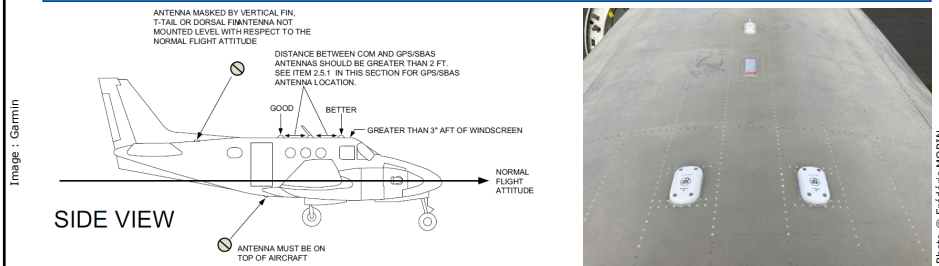
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

146

Antennes de réception

Généralités au sujet de l'installation des antennes



- Les antennes GPS sont installées à proximité les unes des autres.
- Sur un gros porteur, des emplacements éloignés pourraient être détectés comme une erreur lors de la comparaison de positions !
- De préférence, elles seront installées dans la section avant pour ajouter de la précision lors des approches (angle d'erreur de la pente en GS en comparaison avec les informations GPS/RNAV).

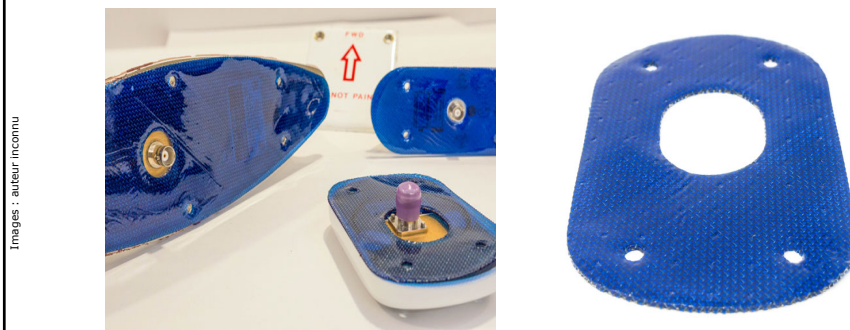
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

147

Antennes de réception

Généralités au sujet de l'installation des antennes



- Un joint d'étanchéité conducteur (*Conductive Silicon Gasket*) est souvent installé entre l'antenne et le fuselage afin d'éviter la condensation et donc la corrosion qui pourrait en résulter.

© Département d'avionique

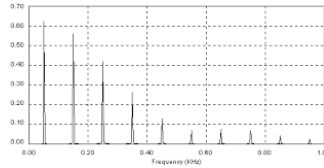
Document à des fins de formation

148

Antennes de réception

Généralités au sujet de l'installation des antennes

Images : auteur inconnu



- La contamination du signal GPS induite par les harmoniques d'une transmission VHF-COM peut être limitée ou atténuée par l'utilisation d'un filtre (*Notch Filter*) qui ajuste l'impédance du câble dans le circuit.
- Ce type de filtre peut être installé, par exemple, sur de petits aéronefs du fait de la proximité de chacune des antennes les unes par rapport aux autres.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

149

Antennes de réception

Installation sur les avions



Pierre GILLARD/2008-15230

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

150

Antennes de réception

Installation sur les avions



Pierre GILLARD/002885

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

151

Antennes de réception

Installation sur les avions



Pierre GILLARD/2008-19255

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

152

Antennes de réception



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

153

Antennes de réception

Installation sur les hélicoptères

- L'installation des antennes GPS sur les hélicoptères doit tenir compte de l'opacité aux ondes produites par le rotor principal, surtout si les pales sont métalliques.
- En règle générale, on éloignera l'antenne le plus possible du mât du rotor principal :

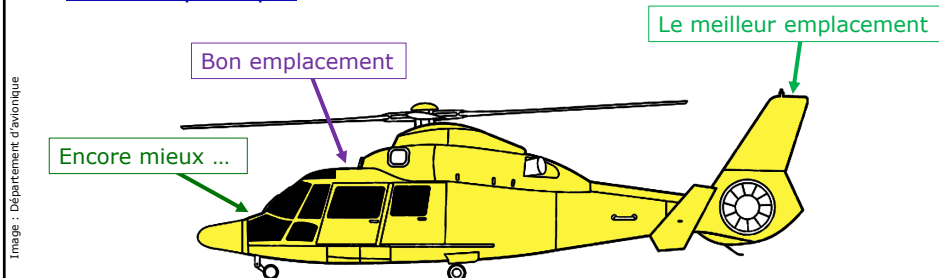


Image : Département d'avionique

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

154

Antennes de réception

Installation sur les hélicoptères



Pierre GILLARD/2008-20301

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

155

Antennes de réception

Installation sur les hélicoptères



Pierre GILLARD/2005-3370

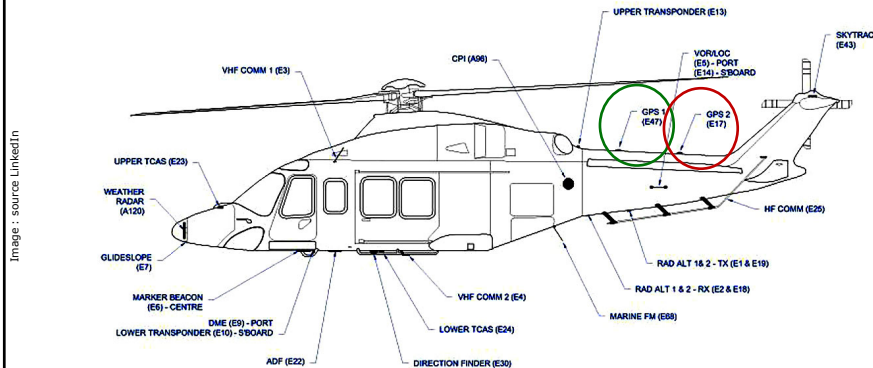
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

156

Antennes de réception

Installation sur les hélicoptères



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

157

Tests et maintenance des systèmes GPS



- La majorité des systèmes GNSS ont des fonctions de tests internes.
- Dans certains cas, on utilisera un simulateur de satellites.
- Les ondes GNSS ne pénétrant pas dans les bâtiments, on installera des répéteurs GNSS dans les hangars afin de pouvoir effectuer des tests lorsque les aéronefs sont à l'intérieur de ceux-ci.

© Département d'avionique

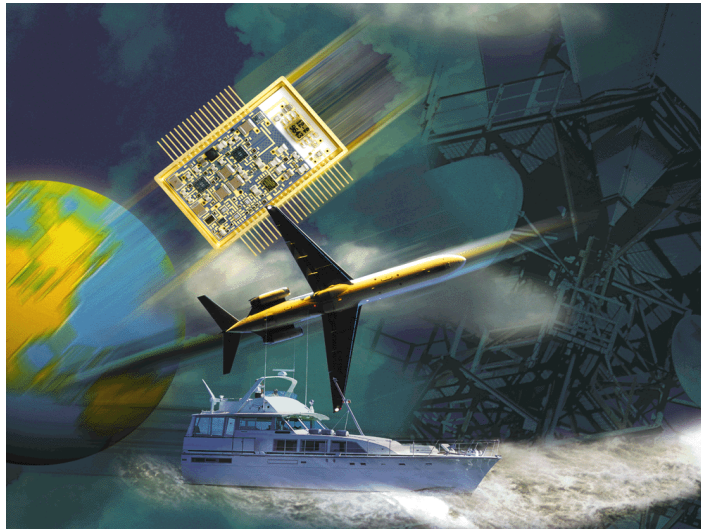
Document à des fins de formation

158

Conclusions



- Le système GPS a révolutionné la navigation terrestre, maritime, aérienne et spatiale tant civile que militaire.
- Il demeure, toutefois, la propriété du Département de la Défense des États-Unis d'Amérique.
- Depuis sa conception initiale, le système a évolué et continue à évoluer.
- Il appartient au technicien en avionique de se tenir informé de l'évolution du système GPS et des autres systèmes connexes, tels les GBAS et SBAS.



Merci de votre attention