

**GPS-Global Positioning System**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

1

**Introduction**



**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.

- 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**

- 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

**Avant de débiter le cours ...**



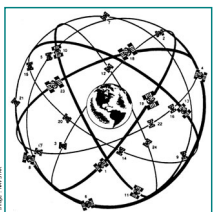
**Merci !**

© Département d'avionique Document à des fins de formation

2

**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 tour sidéral**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

5

**Constitution du système**

**Le segment spatial**



- La position des satellites dans la constellation est donnée par un code comprenant une lettre de A à E (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 ES**

Fabrication des satellites GPS par Lockheed Martin en Pennsylvanie.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

8

**Présentation du cours**



- 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

**Constitution du système**

**Le segment spatial**

GPS CONSTELLATION STATUS FOR Week Oct 16 2025

| Plane | SVN | PRN | Type | Class | Status | Altitude | Health | Subject |
|-------|-----|-----|------|-------|--------|----------|--------|---------|
| B     | 1   | 55  | 16   | 16    | OK     |          |        |         |
| C     | 1   | 57  | 29   | 16    | OK     |          |        |         |
| D     | 1   | 61  | 2    | 16    | OK     |          |        |         |

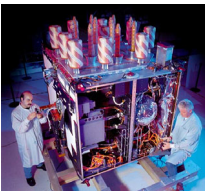
- Chaque satellite est identifié par :
  - Un code **PRN** (*Pseudo-Random Noise*).
  - Un code **SVN** (*Satellite Vehicle Number*).
- Lorsqu'un satellite est retiré du service, il est remplacé par un autre qui prendra le code PRN laissé vacant.
- « Plane » et « Slot » représentent le plan orbital et la position du satellite dans celui-ci

© Département d'avionique Document à des fins de formation

6

**Constitution du système**

**Le segment spatial**



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

| Plane | SVN | PRN | Type | Class |
|-------|-----|-----|------|-------|
| B     | 1   | 55  | 16   | 16    |
| C     | 1   | 57  | 29   | 16    |
| D     | 1   | 61  | 2    | 16    |
| A     | 1   | 65  | 24   | 16    |
| E     | 1   | 69  | 3    | 16    |

© Département d'avionique Document à des fins de formation

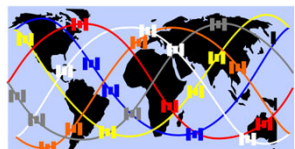
9

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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 Document à des fins de formation

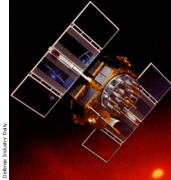
10

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

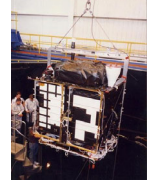
13

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

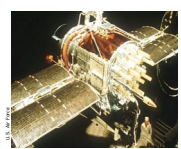
16

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

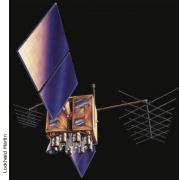
11

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

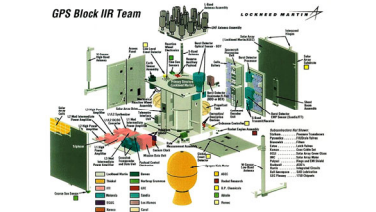
14

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### Constitution du système

#### Le segment spatial

**GPS Block IIR Team**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

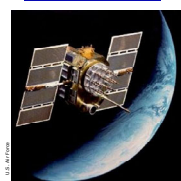
17

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

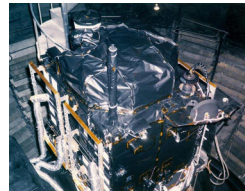
12

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

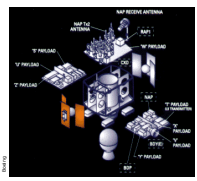
15

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment spatial

• **En résumé :**



| Block I                                                                                                                                                                                                                                                     | Block II                                                                                                                                                                                                                    | Block II-M                                                                                                                                                                                                                                                                   | Block II-R                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Block III                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Code CIA sur bande L1 pour le civil.</li> <li>• Code P(Y) sur L1 et L2 pour militaires.</li> <li>• Durée de vie de 7,5 années.</li> <li>• Lancés entre 1980 et 1997.</li> <li>• Dernier retiré en 2019.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Code CIA sur L1.</li> <li>• Code P(Y) sur L1, L2.</li> <li>• Contrôle interne de l'horloge.</li> <li>• Durée de vie de 10 années.</li> <li>• Lancés entre 1997 et 2004.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous les signaux originaux CIA.</li> <li>• 2<sup>e</sup> code civil L2C.</li> <li>• Code (M) militaire.</li> <li>• Puissance variable pour (M).</li> <li>• Durée de vie de 10 années.</li> <li>• Lancés entre 2005-2009.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous les signaux de blocs IIIA, IIIB.</li> <li>• 3<sup>e</sup> code civil L5.</li> <li>• Nouveau type d'horloge interne.</li> <li>• Meilleures caractéristiques globales.</li> <li>• Durée de vie de 15 années.</li> <li>• Lancés entre 2010-2016.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous les signaux du bloc III.</li> <li>• 4<sup>e</sup> code civil L1C.</li> <li>• Plus de coupure de disponibilité (SA).</li> <li>• Meilleures caractéristiques de précision et d'intégrité.</li> <li>• Durée de vie de 30 années.</li> <li>• Lancés à partir de 2018.</li> </ul> |

© Département d'avionique Document à des fins de formation

22

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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

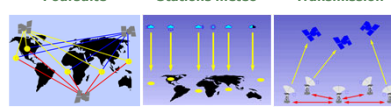
20

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment de contrôle

• **Les trois fonctions du segment de contrôle :**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

23

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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**

### Constitution du système

#### Le segment spatial

• **Satellites Block IIIIF :**



Constructeur : Lockheed Martin.

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

Commandés en 2018.

Première mise en orbite prévue en 2027.

Dernière mise en orbite prévue au plus tôt en 2037.

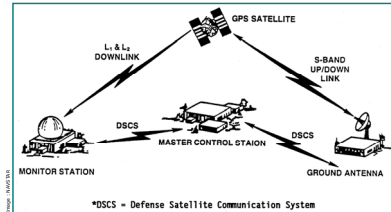
© Département d'avionique Document à des fins de formation

21

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment de contrôle



**\*DSCS = Defense Satellite Communication System**

© Département d'avionique Document à des fins de formation

24

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment de contrôle



**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**

### 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**

### Constitution du système

#### Le segment utilisateurs

- Et bien d'autres applications encore :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

31

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Principe de fonctionnement

- 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  $T_{s1}$  qui est reçu par le récepteur au temps  $T_r$ .
- En effectuant la différence entre  $T_r$  et  $T_{s1}$ , 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.

Le ciel du récepteur : une sphère associée au temps  $T$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

34

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment utilisateurs

- Aviation civile :

- Aviation militaire :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

29

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

35

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment utilisateurs

- Forces armées :

- Loisirs :

- Arpentage :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

30

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Constitution du système

#### Le segment utilisateurs

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

Une différence de temps de 4 ns correspond à une erreur de 1,4m

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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

33

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

36

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**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.
- 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**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).
- $R_i^t$  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.
- $R_{ei}$  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 :

$$R_i'' = R_i^t - R_{si} - R_{ai}$$

La distance vraie  $R_i$  peut donc s'écrire :

$$R_i = R_i'' - R_{ei}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

40

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**Principe de fonctionnement**

**Calcul de la position du récepteur**

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

**$R_{ai}$  (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.  $R_{ai}$  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  $R_i''$  :

$$R_i'' = R_i^t - R_{si} - R_{ai}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

43

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**Principe de fonctionnement**

**En résumé ...**



- 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

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**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  $R_i$  :

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

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

$$\begin{aligned} R_1^2 &= (X_{s1} - X_r)^2 + (Y_{s1} - Y_r)^2 + (Z_{s1} - Z_r)^2 \\ R_2^2 &= (X_{s2} - X_r)^2 + (Y_{s2} - Y_r)^2 + (Z_{s2} - Z_r)^2 \\ R_3^2 &= (X_{s3} - X_r)^2 + (Y_{s3} - Y_r)^2 + (Z_{s3} - Z_r)^2 \end{aligned}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

41

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**Principe de fonctionnement**

**Calcul de la position du récepteur**

- Il nous faut maintenant tenir compte de l'erreur d'horloge du récepteur ( $R_{ei}$ ).
- 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 :

$$R_i = R_i'' - R_{ei}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

44

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

39

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**Principe de fonctionnement**

**Calcul de la position du récepteur**

$$\begin{aligned} R_1^2 &= (X_{s1} - X_r)^2 + (Y_{s1} - Y_r)^2 + (Z_{s1} - Z_r)^2 \\ R_2^2 &= (X_{s2} - X_r)^2 + (Y_{s2} - Y_r)^2 + (Z_{s2} - Z_r)^2 \\ R_3^2 &= (X_{s3} - X_r)^2 + (Y_{s3} - Y_r)^2 + (Z_{s3} - Z_r)^2 \end{aligned}$$

- 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 ( $R_{ei}$ ), d'horloge du système GPS ( $R_{si}$ ) et de la propagation de l'onde électromagnétique ( $R_{ai}$ ).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

42

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

**Principe de fonctionnement**

**Calcul de la position du récepteur**

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

$$\begin{aligned} (R_1'' - R_{ei})^2 &= (X_{s1} - X_r)^2 + (Y_{s1} - Y_r)^2 + (Z_{s1} - Z_r)^2 \\ (R_2'' - R_{ei})^2 &= (X_{s2} - X_r)^2 + (Y_{s2} - Y_r)^2 + (Z_{s2} - Z_r)^2 \\ (R_3'' - R_{ei})^2 &= (X_{s3} - X_r)^2 + (Y_{s3} - Y_r)^2 + (Z_{s3} - Z_r)^2 \end{aligned}$$

- Mais, en plus de nos trois inconnues de départ  $X_r$ ,  $Y_r$  et  $Z_r$ , on vient d'en ajouter une quatrième :  $R_{ei}$  !
- Il faudra donc rajouter une quatrième équation afin de résoudre le système à quatre inconnues :

$$(R_4'' - R_{ei})^2 = (X_{s4} - X_r)^2 + (Y_{s4} - Y_r)^2 + (Z_{s4} - Z_r)^2$$

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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

45

**Principe de fonctionnement**

- Dès lors : **3 satellites  $\Rightarrow$  position en 2 dimensions**  
**4 satellites  $\Rightarrow$  position en 3 dimensions**

© Département d'avionique Document à des fins de formation

46

**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                                |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Code :                     | C/A + P                                                                  | P                                 |
| Puissance du signal reçu : | C/A $\sim -160$ dBW ( $\pm 10$ dBm)<br>P $\sim -163$ dBW ( $\pm 10$ dBm) | P $\sim -166$ dBW ( $\pm 10$ dBm) |

© Département d'avionique Document à des fins de formation

49

**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**

- 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)<br>En quadrature (Q) | P(Y)<br>C/A     | P(Y)<br>C/A + L1C + M |
| L2 (1227,60 MHz) | En phase (I)<br>En quadrature (Q) | P(Y)<br>L2C + M | P(Y)<br>L2C + M       |
| L5 (1176,45 MHz) | En phase (I)<br>En quadrature (Q) |                 | SoL Data<br>SoL Pilot |

© Département d'avionique Document à des fins de formation

47

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

50

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

53

**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 :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

51

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

54

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

55

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 corrélation supérieure de 24 dB (environ 250 fois supérieure) par rapport au code C/A de L1.
  - Le code L2C est modulé en TDMA.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

58

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Signaux des satellites NAVSTAR**

**La modulation BPSK**

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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

61

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Signaux des satellites NAVSTAR**

**Les codes**

- Le code **L1C Civilian** :
  - Le code L1C contient deux codes distincts :
    - Le code **L1Cp**-Pilot Component.
    - Le code **L1Cd**-Data Component.
  - Le code L1C est interopérable avec le signal Galileo E1.
  - Les codes L1Cp et L1Cd sont modulés en phase.
  - Le signal est modulé en TMBOC: *Time Multiplexed Binary Offset Carrier*.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

56

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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*).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

59

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Signaux des satellites NAVSTAR**

**La modulation BPSK**

- Le principe de la BPSK consiste à effectuer un changement de phase de  $180^\circ$  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

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

57

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

60

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Signaux des satellites NAVSTAR**

**La modulation BOC**

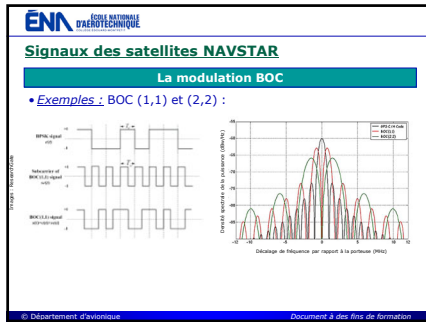
- La modulation BOC (*Binary Offset Carrier*) est une technique utilisée dans les systèmes de navigation par satellite modernes comme Galileo et GPS.
- Elle améliore la compatibilité spectrale et la performance de suivi en utilisant une sous-porteuse carrée qui déplace l'énergie du signal loin de la 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'inconvénient est une acquisition plus complexe du signal.
- Une modulation BOC se définit comme suit :

**BOC (n,m)**

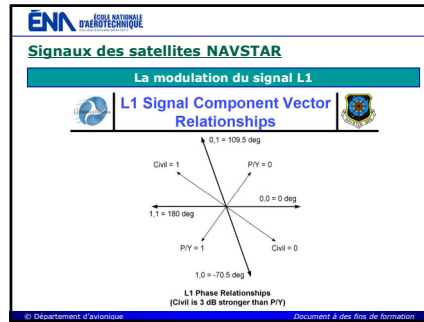
$n$  : fréquence de la sous-porteuse (MHz);  
 $m$  : taux d'étalement du code (Mbps);...

© Département d'avionique Document à des fins de formation

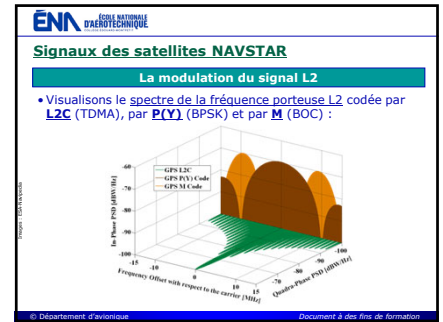
63



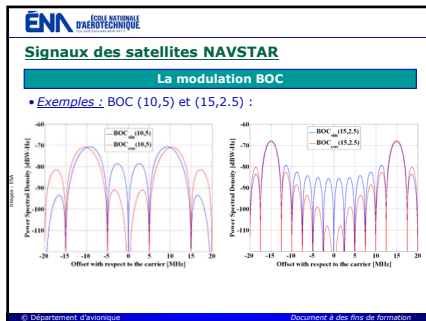
64



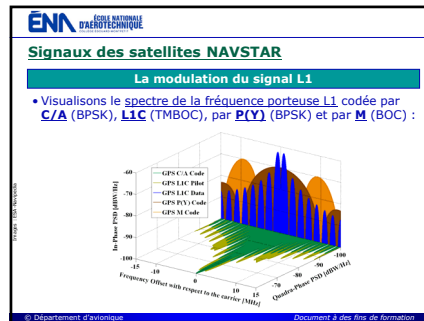
67



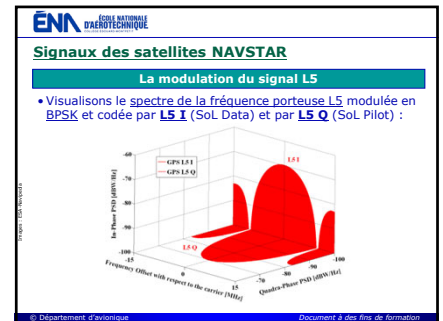
70



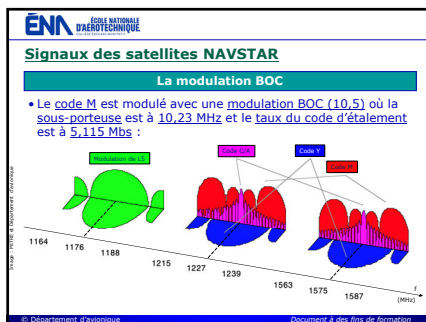
65



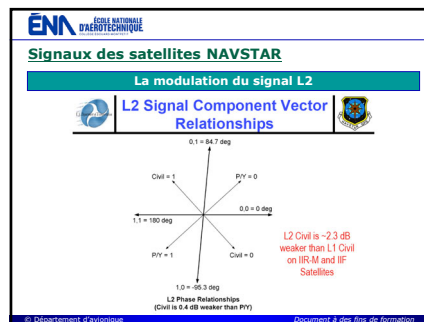
68



71



66



69



72



**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### Les données de navigation

#### Message de navigation CNAV avec L2C

- Parmi les changements importants du message CNAV :
  - 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

88

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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-packété 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

83

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### Les données de navigation

#### Message de navigation MNAV avec M

- Le message de navigation MNAV est packété 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

86

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### Les données de navigation

#### Message de navigation CNAV avec L2C

- Parmi les changements importants du message CNAV :
  - 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

84

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

87

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

91

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

94

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

97

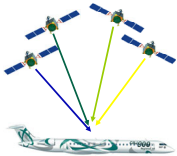
**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 :**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

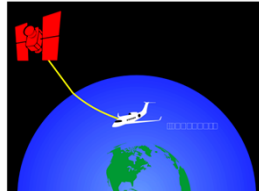
92

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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

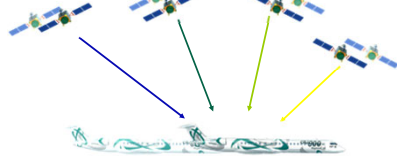
95

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

98

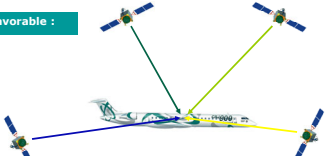
**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 :**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

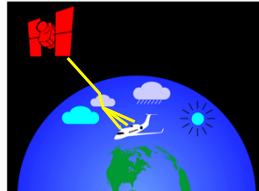
93

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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

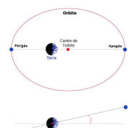
96

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

99

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

100

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Précision et limitations**

**Perturbations des signaux volontaires ou non**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

106

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

101

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 avions 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 avions militaires ne semblent pas avoir été perturbés puisque leur codes L1M et L2M sont cryptés.

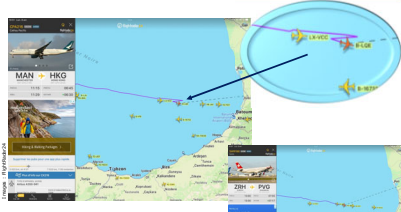
© Département d'avionique Document à des fins de formation

104

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Précision et limitations**

**Perturbations des signaux volontaires ou non**



© Département d'avionique Document à des fins de formation

107

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

102

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**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 équipages 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

**Précision et limitations**

**Perturbations des signaux volontaires ou non**

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

Un avion de transport militaire russe a été observé émettre des signaux de brouillage à l'égard d'un avion civil allemand. Les autorités allemandes ont déclaré que l'avion de la Russie était à l'origine du brouillage.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

108

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Précision et limitations

#### Perturbations des signaux volontaires ou non

#### FlightGlobal

Many

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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

109

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Relevé de la position

#### Almanach

- Si le récepteur n'a pas encore chargé d'almanach, il n'est pas en mesure de 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

112

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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.

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

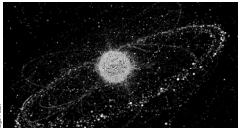
© Département d'avionique Document à des fins de formation

115

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Précision et limitations

#### Des orbites de plus en plus encombrées ...



- 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

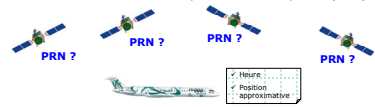
110

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

113

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

116

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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 :

```

graph TD
    A[Charger l'almanach en mémoire] --> B[Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation]
    B --> C[Déterminer le temps d'émission des quatre satellites]
    C --> D[Appliquer les facteurs correctifs]
    D --> E[Réaliser le calcul de la position instantanée]
    E --> F[Déterminer les paramètres de navigation]
  
```

© Département d'avionique Document à des fins de formation

111

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### Relevé de la position

#### Trouver quatre satellites bien placés dans la constellation

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

- Le récepteur capte le signal d'un premier satellite (SV) et l'identifie grâce à son code PRN.
- Le temps d'émission du premier signal est décrypté avec son déphasage.
- 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.
- Les trois autres SV sont acquis individuellement, tout en continuant le suivi du premier.
- La compensation de l'horloge interne du récepteur est établie dès qu'il y a un quatrième satellite est décodé.
- 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.
- L'ajout des satellites supplémentaires permet l'amélioration du calcul de la position.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

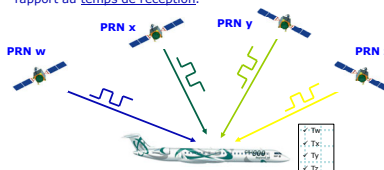
114

**ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE**

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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 de garantir l'intégrité des signaux :
  - Informations de corrections par les données transmises.
  - « Safety of Life » (SoL) sur LS.
  - Fonction « RAIM-Receiver Autonomous Integrity Monitoring ».
  - Fonction « FDE-Fault Detection & Exclusion ».

© Département d'avionique Document à des fins de formation

121

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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

**ÉNA** ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

### 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**

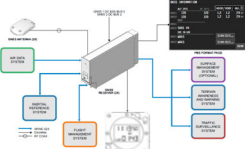


- L'installation d'un système GPS à bord d'un aéronef comprendra toujours :
  - Une antenne.
  - Un récepteur.
  - Un système de contrôle et de gestion.
  - Un affichage et/ou des systèmes « utilisateurs ».

© Département d'avionique Document à des fins de formation

127

**Installation des récepteurs GPS**



- 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**

Utilisation d'un CDI ou d'un HSI pour l'écart de route

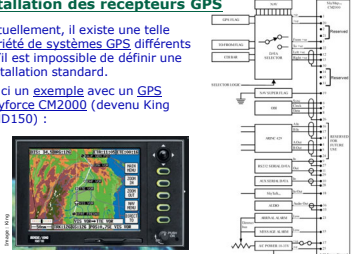


© Département d'avionique Document à des fins de formation

133

**Installation des récepteurs GPS**

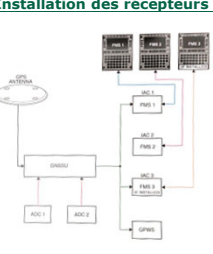
- Actuellement, il existe une telle variété de systèmes GPS différents qu'il est impossible de définir une installation standard.
- Voici un exemple avec un GPS Skyforce CM2000 (devenu King KMD150) :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

128

**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**

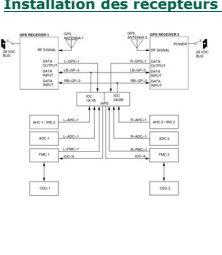
Utilisation d'un CDI ou d'un HSI pour l'écart de route



© Département d'avionique Document à des fins de formation

134

**Installation des récepteurs GPS**

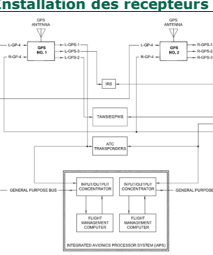


- Il peut y avoir plus d'un récepteur GPS pour une redondance.
- Chaque récepteur dispose de son antenne qui lui est dédiée.
- La communication avec les autres systèmes s'effectue toujours par bus de données (ARINC 429, RS232, ASCB, Ethernet, etc.)

© Département d'avionique Document à des fins de formation

129

**Installation des récepteurs GPS**



- 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

**Installation des récepteurs GPS**

Utilisation d'un CDI ou d'un HSI pour l'écart de route



© Département d'avionique Document à des fins de formation

135

### 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.
- 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

#### Le protocole NMEA 0183

- Le protocole NMEA 0183 est structuré comme suit :

| Change | Longueur | Signification                                                                                               |
|--------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 1        | Messageur de début de trame                                                                                 |
| 2      | 2        | Équipement ayant généré la trame NMEA                                                                       |
| 3      | 3        | Code identifiant le contenu de la trame                                                                     |
| 4      | Variable | Charge utile dont le contenu est défini par le "Trame type". Chaque valeur est séparée par le caractère "." |
| 5      | 1        | Séparateur de checksum                                                                                      |
| 6      | 2        | Checksum                                                                                                    |
| 7      | 1        | Fin de ligne                                                                                                |

Fin de ligne : Somme de contrôle générée par un ou exclusif de tous les caractères situés entre "4" et "6" (inclus).

Fin de ligne : Caractères "lignage retour" + "line feed" marquant un retour à la ligne (rétour chariot + retour à la ligne).

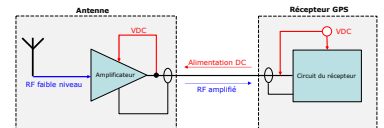
| Tracker ID | Système GNSS |
|------------|--------------|
| BD ou GB   | BeiDou       |
| GA         | Galileo      |
| GP         | GPS          |
| GS         | GLONASS      |

© Département d'avionique Document à des fins de formation

139

### 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 dites « actives » car elles disposent d'un amplificateur intégré qui est alimenté par une tension DC (souvent 5 VDC, parfois 12VDC) via le câble coaxial.



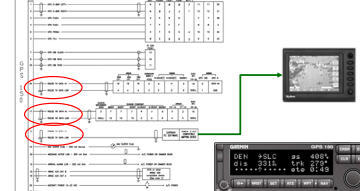
© Département d'avionique Document à des fins de formation

142

### Installation des récepteurs GPS

#### Les sorties RS232

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



© Département d'avionique Document à des fins de formation

137

### Installation des récepteurs GPS

#### Le protocole NMEA 0183

- Exemple de trame GPWGA (GPS Fix Data) relative à un transfert de coordonnées GPS :

```

GPWGA,044836.289,4836.5375,N,08748.9373,E,1,04,3,2,289.2,M,0.0,0000,E
  
```

Détails de la trame :

- GPWGA : Type de trame
- 044836.289 : Trame envoyée à 04 h 48 min 36 s 289 (heure UTC)
- 4836.5375,N : Latitude 48,68958° Nord = 48° 36' 32.25" Nord
- 08748.9373,E : Longitude 7,68228° Est = 7° 40' 56.23" Est
- 1 : Type de positionnement (le 1 est un positionnement GPS)
- 04 : Nombre de satellites utilisés pour calculer les coordonnées
- 3.2 : Précision horizontale en MOP (Horizontal dilution of precision)
- 289.2,M : Altitude 289.2, en mètres
- 0.0,0000 : D'autres informations peuvent être inscrites dans ces champs
- E : Séparateur de checksum
- 0000 : Somme de contrôle de parité, un simple XOR sur les caractères entre 4 et 8

© Département d'avionique Document à des fins de formation

140

### 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.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

143

### 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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

138

### Installation des récepteurs GPS

#### Interface avec d'autres systèmes

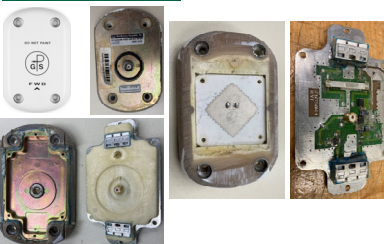


- L'ELT pour envoyer les coordonnées FMS ou GPS en plus de l'identification de l'aéronef.
- L'ADS-B va utiliser la position GPS dans ses transmissions « out ».
- Le SATCOM pour établir les liaisons avec les satellites visibles.
- L'IRS pour son alignement et son maintien.
- Le TAWS et l'EGPWS pour leur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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

141

### Antennes de réception



© Département d'avionique Document à des fins de formation

144

**Antennes de réception**

**Généralités au sujet de l'installation des antennes**

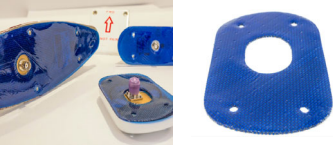
- L'antenne doit être isotrope afin de capter les signaux GPS d'une façon circulaire et constante.
- Ses capacités en azimut et en élévation doivent être idéalement égales sur 360°.
- Son rapport d'ondes stationnaires (VSWR) doit être réduit au minimum (généralement autour de 1,5).
- Sa polarisation 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.

Document à des fins de formation

145

**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.

Document à des fins de formation

148

**Antennes de réception**

**Installation sur les avions**

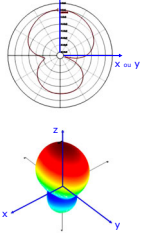


Document à des fins de formation

151

**Antennes de réception**

**Généralités au sujet de l'installation des antennes**



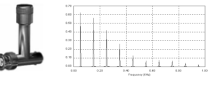
- Le diagramme polaire en cardioïde de l'antenne GPS permet de recevoir un signal principalement vers le haut.
- Les zones latérales sont donc moins susceptibles d'avoir un gain.
- Les antennes pour de l'équipement au sol peuvent adopter un style conique.
- Certains avions militaires sont équipés d'antennes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

Document à des fins de formation

146

**Antennes de réception**

**Généralités au sujet de l'installation des antennes**



- 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.

Document à des fins de formation

149

**Antennes de réception**

**Installation sur les avions**



Document à des fins de formation

152

**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).

Document à des fins de formation

147

**Antennes de réception**

**Installation sur les avions**



Document à des fins de formation

150

**Antennes de réception**

**Installation sur les avions**



Document à des fins de formation

153

# ENNA

ÉCOLE NATIONALE  
D'AÉROTECHNIQUE

## 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 :

© Département d'aéronautique

Document à des fins de formation

154

157

*Merci de votre attention*

Document à des fins de formation

160

155



ÉCOLE NATIONALE  
D'ADMINISTRATION  
DES FINANCES

## Tests et validation 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.



© Ministère de l'Économie et des Finances

Document à usage éducatif

158

**École nationale d'administration de l'aéronautique**

## Antennes de réception

### Installation sur les hélicoptères

Source : [www.marine-nationale.fr](http://www.marine-nationale.fr)

© Département d'aéronautique

Document 4 des fiches de formation

156



**ENNA** ÉCOLE NATIONALE  
D'INGÉNIEURIE ET DE  
TECHNOLOGIE

## 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.

© Département d'Avionique

Document à des fins d'information

159