



GNSS-Global Navigation Satellite System

© Département d'aviation Document à des fins de formation

1



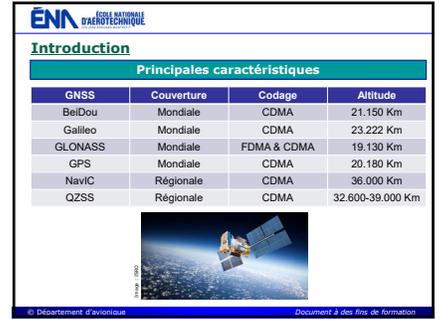
Introduction

- GNSS signifie : *Global Navigation Satellite System*.
- On peut définir un **système GNSS** de la manière suivante :
 - Tout système de navigation qui, grâce à la technologie des satellites, peut satisfaire aux exigences internationales reconnues de navigation.
 - Un système mondial de navigation par satellite peut comprendre les satellites fournis par divers états ou par des groupes commerciaux et être complété par des systèmes terrestres appelés à rehausser et surveiller les satellites.

REF : TERMINAV - NAVCANADA

© Département d'aviation Document à des fins de formation

4



Introduction

Principales caractéristiques

GNSS	Couverture	Codage	Altitude
BeiDou	Mondiale	CDMA	21.150 Km
Galileo	Mondiale	CDMA	23.222 Km
GLONASS	Mondiale	FDMA & CDMA	19.130 Km
GPS	Mondiale	CDMA	20.180 Km
NavIC	Régionale	CDMA	36.000 Km
QZSS	Régionale	CDMA	32.600-39.000 Km

© Département d'aviation Document à des fins de formation

7



Avant de débiter le cours ...

Images of a smartphone, a mobile phone, and a laptop with red X marks over them. A 'no smoking' sign and a 'merci' sign are also present.

Merci !

© Département d'aviation Document à des fins de formation

2



Introduction

- Par l'acronyme **GNSS**, on sous-entend les **systèmes** suivants :
 - ✓ **BeiDou** (Chine).
 - ✓ **Galileo** (Europe).
 - ✓ **GLONASS** - GLObal Navigation Satellite System (Russie).
 - ✓ **GPS** - Global Positioning System (USA).
 - ✓ **IRNSS** - Indian Regional Navigation System (**NavIC** - Navigation with Indian Constellation).
 - ✓ **QZSS** - Quazi-Zenith Satellite System (Japon).
- En cours de développement : le **KPS** (Korea Positioning System) prévu pour être opérationnel en 2035.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

5



Origine

- L'origine de la navigation basée sur des **satellites** remonte au **17^{ème} Siècle** !
- À cette époque, les **satellites** étaient naturels : il s'agissait des **astres**.
- Pour déterminer la **latitude**, les navigateurs utilisaient le **soleil** comme référence et déterminaient celle-ci à l'aide du **sextant**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

8



Présentation du cours

- Introduction.
- Origine.
- Définitions.
- Codages.
- Orbites.
- Lanceurs de satellites.
- Mise en orbite de satellites.
- Historique des GNSS.
- Conclusions.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

3

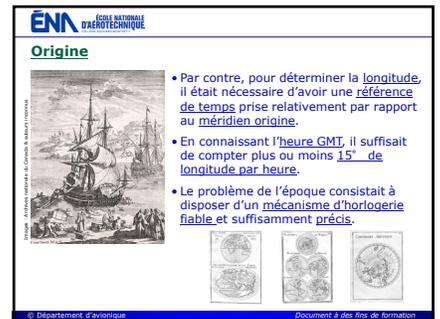


Introduction

- D'un point de vue **technique**, on peut classer les systèmes GNSS en **deux grandes familles** :
 - Systèmes à **fréquences uniques** mais à **codes différents** : BeiDou - GALILEO - GPS.
 - Systèmes à **codes uniques** mais à **fréquences différentes** : GLONASS.
- En ce qui concerne la **gestion des systèmes**, on peut les classer aussi en **deux groupes** :
 - Les systèmes **BeiDou**, **GPS** et **GLONASS** sont contrôlés par les **autorités militaires et gouvernementales** des pays concernés.
 - Le système **GALILEO** est contrôlé par des **organismes civils publics et privés**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

6



Origine

- Par contre, pour déterminer la **longitude**, il était nécessaire d'avoir une **référence de temps** prise relativement par rapport au **méridien origine**.
- En connaissant l'**heure GMT**, il suffisait de compter plus ou moins **15" de longitude par heure**.
- Le problème de l'époque consistait à disposer d'un **mécanisme d'horlogerie** **faible et suffisamment précis**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

9

Origine



- Ce problème fut résolu avec les développements de **mécanismes** réalisés par l'Anglais **John Harrison**.
- Ils étaient capables d'avoir une **erreur** de l'ordre d'une **seconde par jour**, soit **500 mètres** !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

10

Définitions

Liaisons



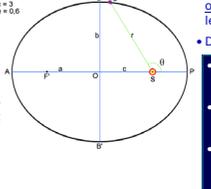
- Latence** : Exprime le temps nécessaire à un paquet de données pour passer de la source à la destination à travers un réseau.
- Valeurs typiques** en matière de liaison par satellites en comparaison avec l'accès à un disque dur d'ordinateur :
 - **GEO** : env. 600 ms.
 - **LEO** : env. 20-50 ms.
 - **Disque dur** : env. 2-5 ms.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

13

Définitions

Première loi de Kepler (1609) : loi des orbites



- « Les planètes décrivent des orbites en forme d'**ellipses** dont le **Soleil** occupe un des **foyers** ».
- Dans le cas de la **Terre** :
 - Distance minimale (périhélie) : **147 094 300 km**
 - Distance maximale (aphélie) : **152 095 300 km**
 - Distance moyenne : **149 597 871 km**

© Département d'avionique Document à des fins de formation

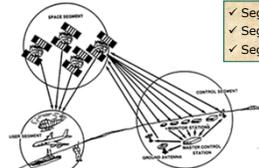
16

Définitions

Les segments d'un système de satellites

- On a l'habitude de parler de **trois segments** qu'il s'agit d'un système de **radiocommunication** ou de **radionavigation** par satellites :

- ✓ Segment **spatial**.
- ✓ Segment de **contrôle**.
- ✓ Segment **utilisateur**.

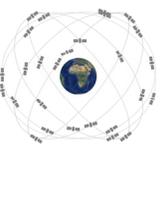


© Département d'avionique Document à des fins de formation

11

Définitions

Constellations de satellites



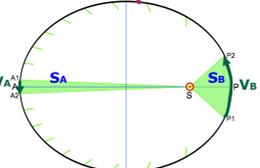
- Une **constellation de satellites** est un ensemble de satellites de la même famille ayant des **fonctions semblables**.
- Ainsi, la **constellation** de satellites GPS comporte au minimum **24 satellites**, GLONASS **24 satellites**, etc.
- Selon la **position** des satellites au-dessus de la **Terre**, ceux-ci assurent une **couverture** permettant la réception d'un signal de navigation.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

14

Définitions

Seconde loi de Kepler (1609) : loi des aires



- « Le **rayon-vecteur** reliant une planète au Soleil balaie des **aires égales** en des **temps égaux** » :

S_A = S_B
V_A < V_B

© Département d'avionique Document à des fins de formation

17

Définitions

Liaisons



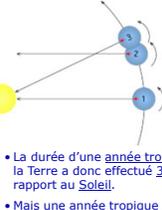
- Liaison montante (Uplink)** : Direction de la propagation de l'onde électromagnétique depuis une station au sol ou d'un aéronef vers le satellite.
- Liaison descendante (Downlink)** : Direction de la propagation de l'onde électromagnétique depuis le satellite vers une station au sol ou vers un aéronef.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

12

Définitions

Jour solaire et jour sidéral



- Jour solaire (1-3)** : la Terre effectue une rotation telle que le même méridien se retrouve dans le même axe par rapport au Soleil, ce qui correspond à 24 heures et à une rotation de **360,9856°**.
- Jour sidéral (1-2)** : la Terre effectue **360°** par rapport aux étoiles fixes, ce qui correspond à 23h 56' 04".

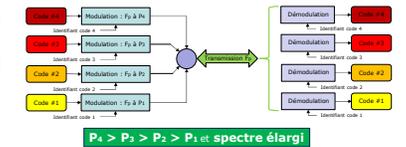
- La durée d'une **année tropique** est de **365,2422 jours solaires**; la Terre a donc effectué **365,2422 tours** sur elle-même par rapport au Soleil.
- Mais une **année tropique** dure **366,2422 jours sidéraux** !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

15

Codages

CDMA - Code-division Multiple Access



- Le CDMA ou accès multiple par répartition en code (AMRC) permet à plusieurs liaisons numériques d'utiliser la même fréquence porteuse modulée à des puissances différentes.
- Le CDMA utilise la technique d'**étalement du spectre**.

P₄ > P₃ > P₂ > P₁ et spectre élargi

© Département d'avionique Document à des fins de formation

18

Codages

FDMA - Frequency-division Multiple Access

- Chaque source numérique se voit attribuer un canal distinct disponible ayant chacun une fréquence porteuse différente.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

19

Orbites

- Du fait de l'attraction de la Terre, un satellite envoyé dans l'espace gravite autour de celle-ci au même titre, par exemple, que la Lune qui est considérée comme un satellite naturel de la Terre.
- Le parcours d'un satellite, naturel ou non, autour d'un astre est appelé « orbite ».
- De manière générale, une orbite est elliptique et un des deux foyers est l'astre.
- Selon la distance séparant le centre de l'astre et le satellite, celui-ci évolue à une vitesse variable.
- Dans le cas de la très grande majorité des satellites artificiels, l'orbite est circulaire et centrée autour de la Terre; de ce fait la vitesse du satellite est constante.
- Au plus un satellite est proche de la Terre, au plus sa vitesse est élevée.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

22

Orbites

Orbites des principaux systèmes satellites

- GPS : MEO.
- GLONASS : MEO.
- Galileo : MEO.
- BeiDou : MEO.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

25

Codages

TDMA - Time-division Multiple Access

- Chaque source numérique se voit attribuer un espace temporel en séquence sur un seul canal de transmission.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

20

Orbites

HEO et GEO

- Trois types d'orbites ont été définis pour les satellites évoluant autour de la Terre :

Orbite :	Distance (*) :
LEO	180 Km à 2.000 Km
MEO	2.000 Km à 35.780 Km
HEO	> 35.780 Km

(*) distance depuis la surface de la Terre

- ✓ LEO - Low Earth Orbit - orbite basse.
- ✓ MEO - Mid Earth Orbit - orbite moyenne.
- ✓ HEO - High Earth Orbit - orbite haute.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

23

Orbites

- Lorsque l'on utilise des liaisons avec des satellites MEO ou GEO, il est nécessaire de se souvenir qu'il existe un délai pouvant être considéré comme non négligeable entre le moment de l'émission et celui de la réception.
- Sachant que l'onde électromagnétique voyage à la vitesse de la lumière, voici le temps mis par une onde pour effectuer le trajet depuis un satellite vers la surface de la Terre :

Orbite :	Distance :	Temps :
LEO	780 Km	0,0026 s
MEO	20.000 Km	0,067 s
GEO	36.000 Km	0,12 s

© Département d'avionique Document à des fins de formation

26

Codages

Comparaison entre CDMA, FDMA et TDMA

p = puissance.
 f = fréquence.
 t = temps

© Département d'avionique Document à des fins de formation

21

Orbites

- On peut aussi définir l'inclinaison d'un plan orbital comme étant l'angle entre le plan orbital des satellites et le plan équatorial de la Terre.
- Un cas particulier d'une orbite haute est l'orbite géostationnaire (GEO-Geosynchronous Earth Orbit).
- À une distance de 42.164 Km du centre de la Terre (environ 36.000 Km d'altitude), un satellite évoluera avec la même vitesse angulaire que celle de la Terre, ce qui donnera l'impression que le satellite demeure au-dessus du même point de la surface terrestre.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

24

Orbites

Problème des débris de l'espace

Les débris spatiaux en chiffres

- 22 000 - nombre de débris spatiaux plus grands que 10 cm
- 1 million - nombre de débris spatiaux plus grands que 1 cm
- 11 m - distance minimale entre le second étage d'une fusée soviétique Kosmos et l'un des satellites abandonnés Chang Zheng en orbite quand ils se sont séparés, laissant derrière eux un collimateur qui avait créé des milliers de débris spatiaux supplémentaires
- 80 % des 50 débris spatiaux les plus dangereux ont été lancés avant 2000
- 2700 - nombre de satellites opérationnels en orbite
- 5300 - nombre de satellites abandonnés en orbite
- 50 000 - nombre de lancements de satellites d'ici 2030

Sources : UCS, NASA, ESA

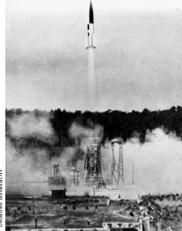
- Danger de collisions lors du lancement et en orbite.
- Syndrome de Kessler (NASA 1978).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

27

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites



- Les premières fusées ont été mises au point par les **Chinois** qui utilisaient pour propulser des lances et des flèches.
- Durant la Seconde guerre mondiale, les **Allemands** mirent au point le **V2**.
- Par la suite, ce fut la **course à l'espace** entre les **États-Unis** et l'**U.R.S.S.**
- Parallèlement à l'exploration spatiale, les **fusées** sont utilisées comme **lanceurs de satellites**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

28

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites

Choix d'un site de lancement



- On a vu que l'**effet de fronde** permettait un gain en vitesse; ceci est vrai si l'orbite visée est orientée vers l'**est**.
- Si l'orbite est **incliné**, le gain sera moindre; dans ce cas, il est démontré que la **latitude du site de lancement** devrait être voisine de l'**inclinaison de l'orbite** (exemples : orbites de MIR et de l'ISS inclinées à 50° ; latitude de Baïkonour : 45,6°).
- En cas d'**orbite polaire** (exemple : satellites espions), la **latitude du site de lancement** sera à peu près **indifférente**.

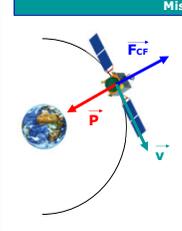
© Département d'aviation Document à des fins de formation

31

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

Mise sur orbite



- Un **satellite en orbite** tourne à une certaine **vitesse** telle que son **poids** dû à l'attraction de l'astre est compensé par la **force centrifuge**.
- L'**atmosphère** empêche de placer un satellite sur une orbite **inférieure à 200 Km**.
- Le problème consiste à donner la **bonne vitesse** au satellite lors de sa **mise en orbite**; la moindre **erreur** placera le satellite sur une **orbite elliptique** au lieu de circulaire.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

34

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites

Choix d'un site de lancement



- Compte-tenu de la **vitesse tangentielle** due à la rotation de la Terre, il est préférable de trouver un site le **plus proche de l'équateur** afin de pouvoir bénéficier de cette vitesse en effectuant un lancement en **direction de l'est**.
- C'est ce que l'on appelle « **l'effet de fronde** ».
- Ainsi, en **étant au sol**, la fusée a déjà atteint **environ 5,7 % de la vitesse nécessaire** à un placement sur une **orbite basse**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

29

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites

Le lanceur



- Le lanceur est constitué de **plusieurs étages** se **séparant séquentiellement** au cours du vol.
- Le **satellite** est placé dans la **coiffe** du lanceur.



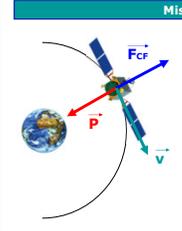
© Département d'aviation Document à des fins de formation

32

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

Mise sur orbite



- Il est également important que la mise en orbite s'effectue dans une **direction perpendiculaire** à l'axe liant la **position du satellite au centre de la Terre**.
- De nos jours, il n'y a pratiquement plus de problème pour placer des **satellites** sur des orbites **très éloignées**.
- Il faudra régulièrement **corriger la direction** du satellite car celui-ci est également **attiré** par d'autres astres, comme la Lune et le Soleil.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

35

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites

Choix d'un site de lancement



- Un autre aspect à considérer est la **possibilité** chute de la fusée sur des **zones habitées** en cas d'**échec**.
- Dans le cas de tirs vers l'**est**, il faut que l'est de la zone de tir soit **inhabité** : **océans** (Cape Canaveral, Kourou ou Sea-Launch) ou **déserts** (Baïkonour, Vandenberg ou Woomera).
- Dans certains cas, on effectue aussi des **lancements polaires**; la même règle s'applique alors vers le **nord** et le **sud**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

30

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Lanceurs de satellites

Le tir et le vol



- Nous connaissons l'exigence de la **latitude du site de lancement** par rapport à l'**inclinaison de l'orbite**.
- Toutefois, la **trajectoire des lanceurs** peut être **corrigée** au cours du vol permettant d'atteindre le **meilleur compromis**.

© Département d'aviation Document à des fins de formation

33

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

L'orbite GEO - géosynchrone



- L'orbite **géosynchrone** a une **période de révolution** de 23h56'04", soit d'un **jour sidéral**.
- Les **satellites** présents sur une orbite géosynchrone sont dits « **géostationnaires** », car ils demeurent **verticalement** en vis-à-vis d'un **point immobile** situé sur la Terre.
- L'orbite est située à **35.786 Km** de la surface de la Terre et la **vitesse de révolution** des satellites est de **3,074 Km/s** ou 11.066,4 Km/h.
- Les **satellites météo** ou de **télécommunication** sont souvent de type **géostationnaire**.

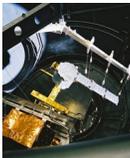
© Département d'aviation Document à des fins de formation

36

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

L'orbite SSO - héliosynchrone



- On utilise l'effet de précession nodale du fait que la Terre n'est pas sphérique et que sa masse n'est pas distribuée uniformément pour créer une rotation du plan de l'orbite.
- Si on s'arrange pour que cette rotation du plan de l'orbite du satellite corresponde à 0,9856° par jour, le satellite pourra demeurer exposé au Soleil en permanence s'il a été placé ainsi.
- Certains satellites d'observation de la planète sont placés sur des SSO (Solar Synchron Orbit), tel le satellite SMOS du CNES.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

37

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Historique des GNSS

- Années 1960** : Système de navigation militaire Transit (USA) fonctionnant par effet Doppler.
- Années 1970** : Début du développement du système GPS.
- 1978** : Premier lancement d'un satellite GPS.
- 1982** : Premier lancement d'un satellite GLONASS.
- 1994** : Couverture complète par la constellation GPS.
- 1995** : Couverture complète par la constellation GLONASS.
- 2000** : Premier lancement d'un satellite BeiDou.
- 2005** : Lancement d'un premier satellite expérimental Galileo.
- 2011** : Premier lancement d'un satellite Galileo.
- 2014** : Premiers satellites Galileo opérationnels.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

40

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

Le transfert d'orbite



- En jouant sur la vitesse des satellites, il est possible de les faire changer d'orbite et même de les amener sur des orbites situées autour d'autres planètes :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

38

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Conclusions



- Actuellement, la précision des horloges utilisées dans les systèmes GNSS atteint le centième de milliardième de seconde par jour.
- Mais les mesures s'effectuent toujours par rapport à des satellites dont la position est connue comme au 17^{ème} Siècle !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

41

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Mise en orbite de satellites

Vitesses et durées de révolution

Distance au sol	Vitesse circulaire	Durée de révolution
0 Km	7,89 Km/s	28.404 Km/h
280 Km	7,75 Km/s	27.900 Km/h
1 688 Km	7,04 Km/s	25.344 Km/h
6 426 Km	5,59 Km/s	20.124 Km/h
20 255 Km	3,87 Km/s	13.932 Km/h
25 900 Km	3,07 Km/s	11.052 Km/h

- Exemples** : l'orbite des satellites GPS est située à 20.180 Km, celle des satellites GLONASS à 19.130 Km, celle des satellites Galileo à 23.222 Km et celle de l'ISS à 408 Km.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

39

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE



Merci de votre attention

© Département d'avionique Document à des fins de formation

42