

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET



Image : ITU

GNSS-Global Navigation Satellite System

© Département d'avionique Document à des fins de formation

1

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Avant de débiter le cours ...



Merci !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

2

Présentation du cours



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

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

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.

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.

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



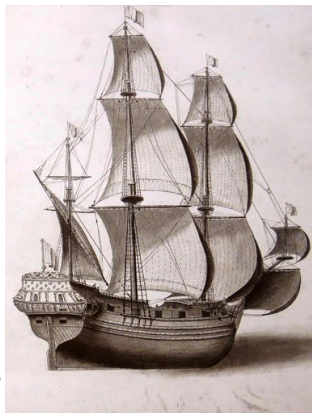
Image : ISRO

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

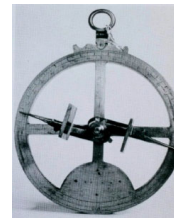
7

Origine



Images : auteurs inconnus

- 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'avionique

Document à des fins de formation

8

Origine



Images : Archives nationale du Canada & auteurs inconnus

- 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 fiable et suffisamment précis.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

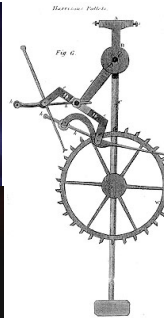
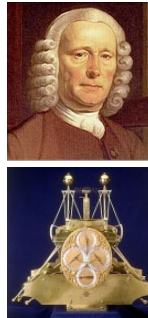
9

Origine



Images : Bibliothèque nationale de France & auteurs inconnus

- 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

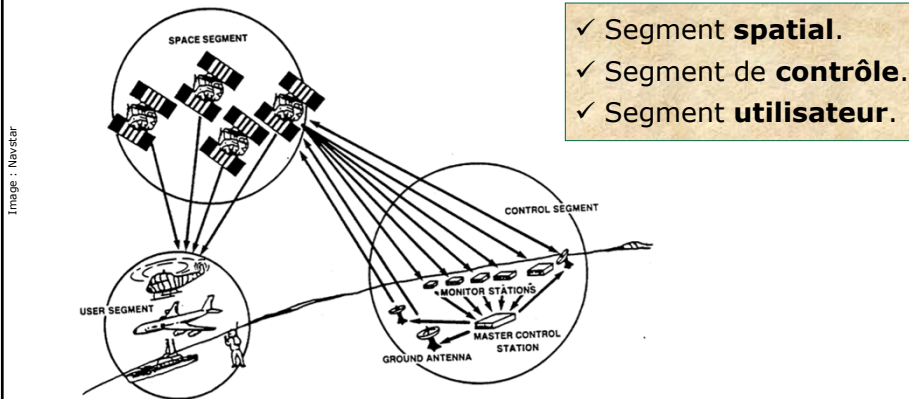
Document à des fins de formation

10

Définitions

Les segments d'un système de satellites

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



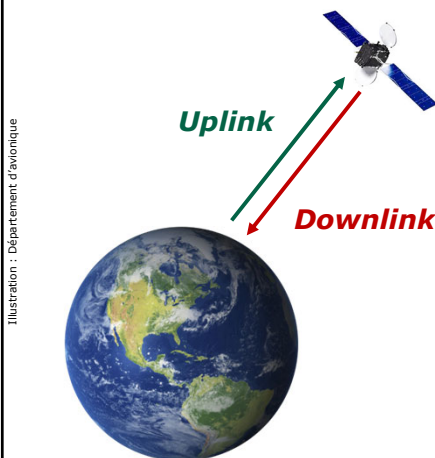
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

11

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Définitions

Liaisons

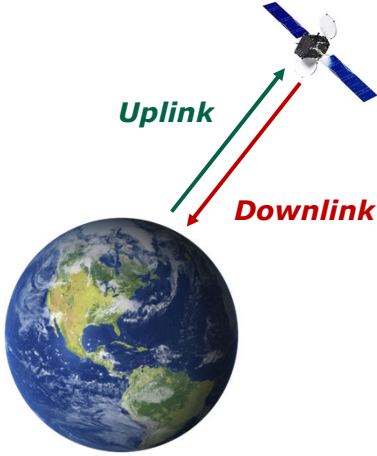


Illustration : Département d'avionique

- 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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRET

Définitions

Constellations de satellites

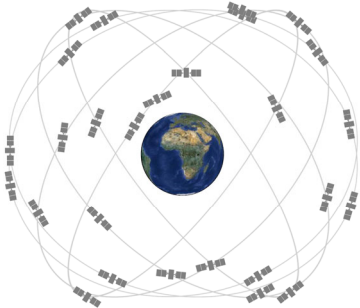


Image : www.gps.gov

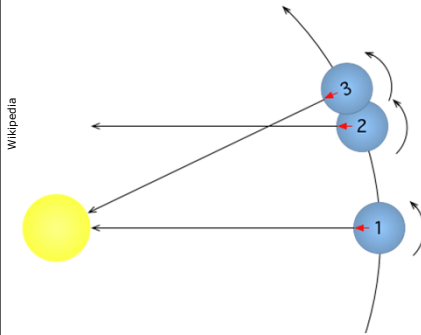
- Une constellation de satellites est un ensemble de satellites de la même famille ayant des fonctions semblables.
- Ainsi, la constellation de satellites GPS comporte au minimum 24 satellites, GLONASS 24 satellites, etc.
- Selon la position des satellites au-dessus de la Terre, ceux-ci assurent une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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

14

Définitions

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 $360,9856^\circ$.
- **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

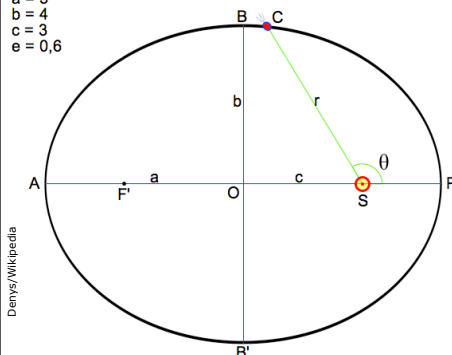
Document à des fins de formation

15

Définitions

Première loi de Kepler (1609) : loi des orbites

$a = 5$
 $b = 4$
 $c = 3$
 $e = 0,6$



- « 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

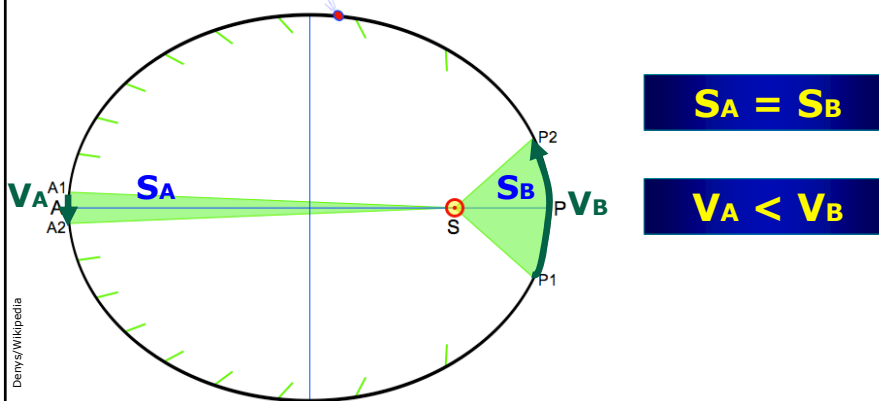
Document à des fins de formation

16

Définitions

Seconde loi de Kepler (1609) : loi des aires

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



© Département d'avionique

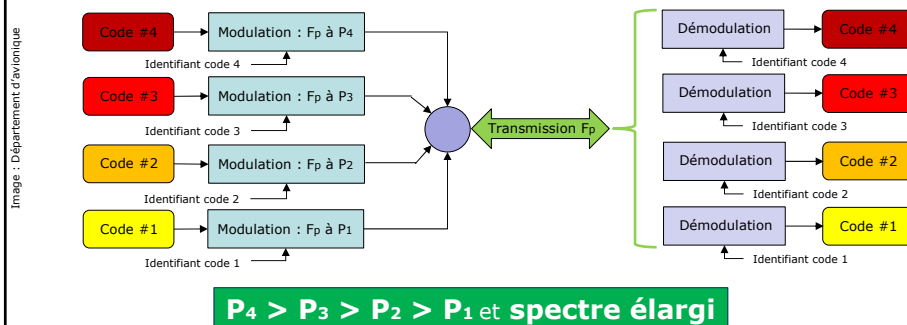
Document à des fins de formation

17

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.



© Département d'avionique

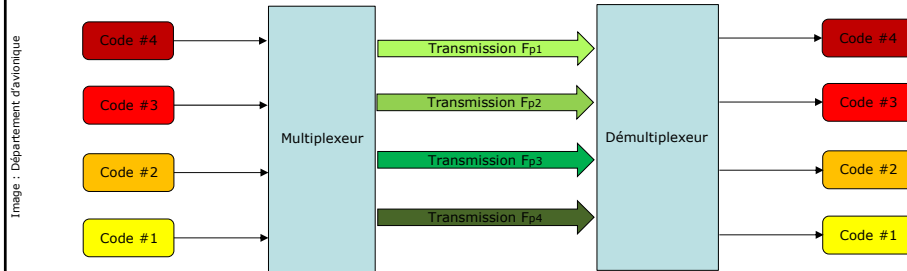
Document à des fins de formation

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

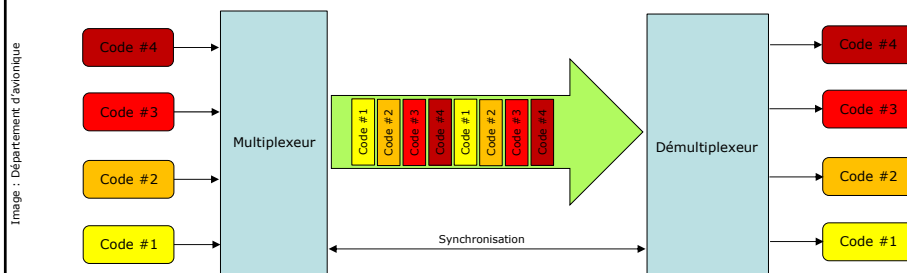
Document à des fins de formation

19

Codages

TDMA – Time-division Multiple Access

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



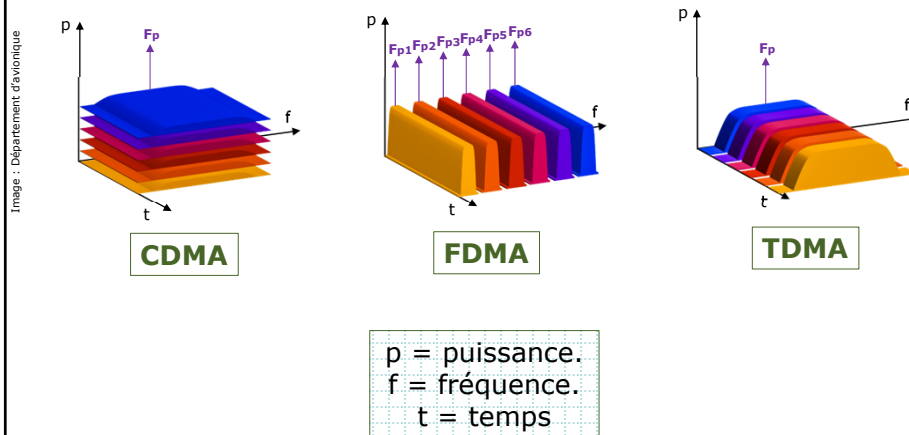
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

20

Codages

Comparaison entre CDMA, FDMA et TDMA



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

21

Orbites

- Du fait de l'attraction de la Terre, un satellite envoyé dans l'espace gravité 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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRETIT

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRETIT

Orbites

Image : NASA

• 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.

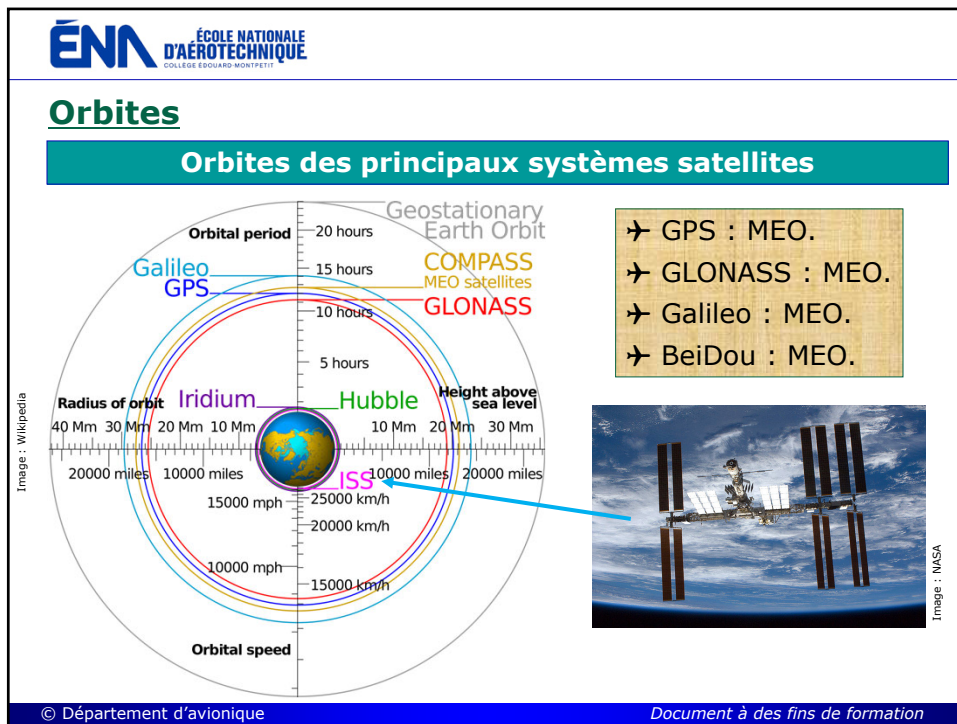
• Un cas particulier d'une orbite haute est l'orbite géostationnaire (GEO- *Geosynchronous Earth Orbit*).

• 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.

Illustration : Département d'avionique

© Département d'avionique Document à des fins de formation

24



25

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLEGE EDOUARD MONTFRETIT

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

Orbites

Problème des débris de l'espace



Image : source Internet

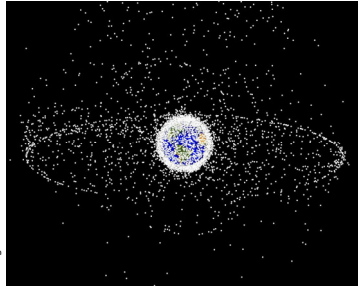


Image : NASA

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 d'un satellite chinois abandonné Change Zheng, en octobre quand ils se sont frôlés, laissant craindre une collision qui aurait 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

3300 : nombre de satellites abandonnés en orbite

50 000 : nombre de lancements de satellite d'ici 2030

Sources : UCS, NASA, ESA

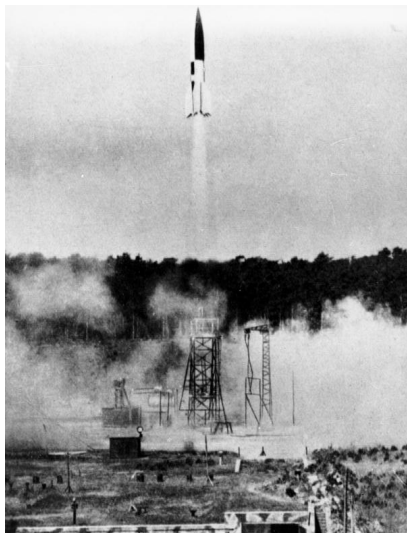
- Danger de collisions lors du lancement et en orbite.
- Syndrome de Kessler (NASA 1978).

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

27

Lanceurs de satellites



Deutsches Bundesarchiv

- Les premières fusées ont été mises au point par les Chinois qui les 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'avionique

Document à des fins de formation

28

Lanceurs de satellites

Choix d'un site de lancement



Sea-Launch

- 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'avionique

Document à des fins de formation

29

Lanceurs de satellites

Choix d'un site de lancement



WallpaperStock.net

- Un autre aspect à considérer est la possible 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 inhabitée : 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'avionique

Document à des fins de formation

30

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 inclinée, 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 : $45,6^\circ$).
- En cas d'orbite polaire (exemple : satellites espions), la latitude du site de lancement sera à peu près indifférente.

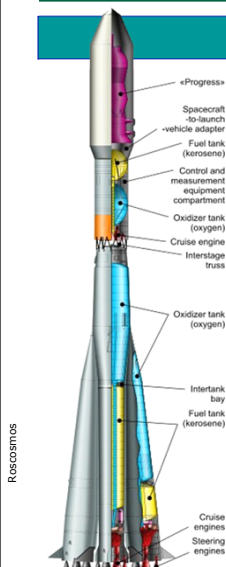
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

31

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'avionique

Document à des fins de formation

32

Lanceurs de satellites

Le tir et le vol



Michael TREZZI



NASA

- 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.

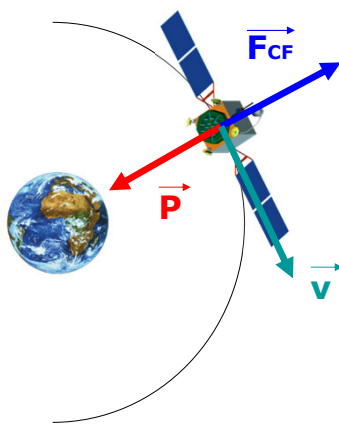
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

33

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.

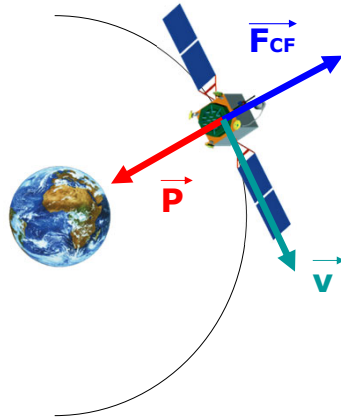
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

34

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.

Mise en orbite de satellites

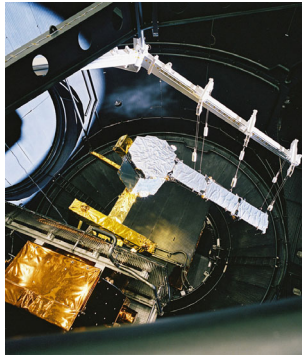
L'orbite GEO - géosynchrone



- 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.

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

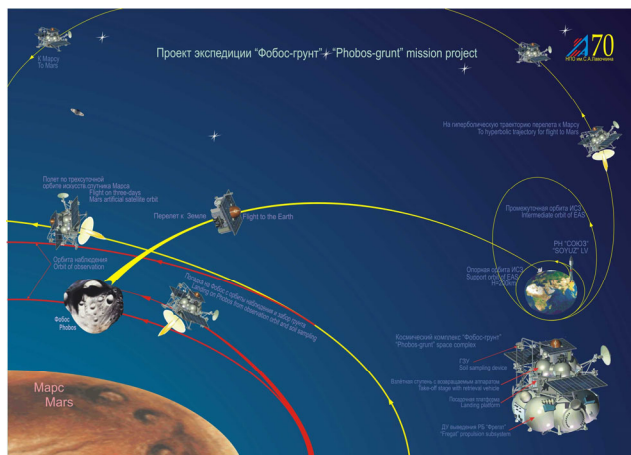
Document à des fins de formation

37

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

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	1h30'
1 688 Km	7,04 Km/s	25.344 Km/h	2h
6 426 Km	5,59 Km/s	20.124 Km/h	4h
20 255 Km	3,87 Km/s	13.932 Km/h	12h
25 900 Km	3,07 Km/s	11.052 Km/h	24h

- 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.

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.

Conclusions



Images : auteurs inconnus



- 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 !



NASA

Merci de votre attention