

# Communication Satellite

Eitan Altman, Jerome Galtier

INRIA Sophia-Antipolis  
2004 route des Lucioles, BP 93  
06902 Sophia-Antipolis Cedex

URL:

<http://www-sop.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/moi.html>

E-mail: `{altman,Jerome.Galtier}@sophia.inria.fr`

# OUTLINE

- I.** Introduction
- II.** Orbites terrestres
- III.** Couverture par satellite

## Détails pratiques

### Responsables:

- Eitan ALTMAN

tel: 04 92 38 77 86. email: altman@sophia.inria.fr URL:

<http://www.inria.fr/mistral/personnel>

[/Eitan.Altman/moi.html](http://www.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/moi.html)

- Jerome GALTIER

tel: 04 92 38 79 88. email: Jerome.Galtier@sophia.inria.fr URL:

<http://www.prism.uvsq.fr/~galtier/>

### Intervenants:

- E. Altman, J. Galtier, C. Barakat

■ Bibliographie du cours:

[AFJ99] E. Altman, A. Ferreira, J. Galtier, *Réseaux satellitaires de télécommunications*, Dunod, Nov., 1999.

[Elb] Bruce R. Elbert, *The Satellite Communication Applications Handbook*, B. R. Elbert, Artech House, Boston, London, 1997.

[Puj] Guy Pujolle, *Les Réseaux*, Ch. 23. Ed. Eyrolles, 1995.

[LWJ00] Lutz, Wener, Jahn, *Satellite Systems for Personal and Broadband Communications*, Springer, 2000.

*IEEE Selected areas in communications*, special issue on *Mobile Satellite communications for seamless PCS*, Feb. 1995.

*IEEE Communications Magazine* special issue on *Broadband via Satellite* Vol. 35 No. 7, July 1997.

[Hub] Y. C. Hubbel, “A comparison of the Iridium and AMPS systems”, *IEEE Network* March/April Vol. 11 No. 2., pp. 52-59, 1997.

Proceedings of the 1st *International Workshop on Satellite-based Information Services (WOSBIS)*, Rye, NY, USA, Nov. 13, 1996.

[PS] C. Patridge and T. J. Shepard, “TCP/IP performance over satellite links”, *IEEE Network*, pp. 44-49, Sept-Oct 1997.

Voir aussi:

[http://itri.loyola.edu/satcom/af\\_bibli.htm](http://itri.loyola.edu/satcom/af_bibli.htm)

## Les premiers satellites

Quelques exemples:

- Premier satellite avec capacité de multicast de l'espace (SCORE) - 1958.
- Premier satellite permettant du courrier (teletype) par satellite (Courrier 1B) - 1958.
- Premier satellite de communications qui transmet de la télévision au monde entier (Relay) -1962
- Premier satellite GEO de communications (Syncon II) - 1963
- Premier satellite de communications militaires (IDSCS)- 1965
- Premier satellite de communications commerciales (INTELSAT "Early Bird") - 1965
- Premier satellite avec services UHF de communications mobiles (TACSAT) - 1968
- Premier satellite avec services communications mobiles commerciales (MARISAT) - 1976

D'autres pages de l'histoire: voir Tableau 1.1 dans  
[http://itri.loyola.edu/satcom/c1\\_s1.htm](http://itri.loyola.edu/satcom/c1_s1.htm)

## Les Services

Les services offerts par les communications par satellite sont dans une période de changement.

- D'une part, **des nouvelles possibilités** se créent pour les services personnels, multicast, et mobiles.
- D'autre part, il y a des **menaces sur les services traditionnels** par satellites fixes dues au déploiement de fibres optiques qui permettent de transmettre à 155 Mb/s ou plus.

Ex.: on s'attend à la migration de téléphonie par satellite vers les câbles de fibres optiques.

### Avantages des satellites par rapport aux câbles:

- Couverture de grandes zones géographiques,
- Accès multiples, multi destinations,
- Robustes aux distances

### Avantages des câbles:

- Couche physique: meilleure qualité du signal, moins d'erreurs.
- Pas de problème de bande passante.



### D'autres atouts des satellites:

- Permettent un déploiement rapide des services.
- Bien adaptés à des régions sans infrastructure de télécom, ou même de téléphone

## Services entre points fixes (FSS)

La plus grande part du marché présent et futur (an 2002).

**Premiers services:** communications téléphoniques point-à-point.

**Services aujourd'hui:**

- Transmission directe de télévision;
- Le VSAT (Very Small Aperture Terminal Networks): Les communications téléphoniques et de données, Internet. Transmissions monodirectionnelles et avec voie de retour.
- Multi-conférence point-à-point et point-à-multipoint

### Services futurs:

- Communications large bande pour connecter des réseaux locaux, connecter de ATM
- Satellites OBP (On Board Processing) avec des capacités de routage et de contrôle, commutateurs ATM

Plus d'info:

[http://itri.loyola.edu/satcom/c3\\_s4.htm](http://itri.loyola.edu/satcom/c3_s4.htm)

## Exemples:

**1. Hughs.** Services DTH - Direct to Home TV, services Internet direct.

**2. Gilat.** existe depuis les années 80.

Propose des services téléphoniques directs et autres depuis 10 ans.  
Le 2ème plus grand constructeur de VSAT interactif,  
30,000 unités installées.

Gilat utilise des grands paquets: 150-200 Bytes.

Obtient des délais de 1.5 sec.

Satellites FSS en Europe:

Le développement a été poussé par l'ESA (Agence Spatiale Européenne).

EUTELSAT a mis 7 satellites GEO pour les FSS en orbite.

## Services de Télévision et Vidéo

Il y a quatre types de services:

- Diffusion point-multipoint de programmes de TV d'un studio aux unités locales de transmission,
- Transmission point-à-point d'un événement télévisé au studio central et transmissions entre deux studios,
- TV par câble:  
diffusion point-à-multipoint du studio au centre local de TV par câble

- Transmission directe point-à-multipoint de TV du studio à l'abonné (DTH).

Une antenne de réception peut être utilisée par plusieurs usagers.

Une antenne peut capter plusieurs satellites.

Chaque satellite peut transmettre plusieurs chaînes en même temps.

En tout, on peut capter plus de 100 chaînes.

Services de vidéo sur demande (demande par téléphone).

Les premières distributions par satellite pour tout un pays: Indonésie et Inde, avant 1985 (et avant les USA!).

## Transmission de voix

Les satellites sont utiles surtout là où il n'y a pas d'infrastructure de réseau terrestre:

- Russie: pour une population de 250 millions, il n'y a que 10 millions de téléphones
- En Inde, des dizaines de milliers de villages sont sans services téléphoniques.
- Des pays avec des systèmes archaïques sensibles aux orages.
- La technologie VSAT est la plus économique pour atteindre des endroits éloignés. Le coût d'un VSAT est \$10K; on s'attend que cela tende vers \$1.5K.



## Communication de données

Ex:

- L'infrastructure de télécom en Allemagne de l'Est en 1990, qui fut la meilleure dans le bloc Soviétique, était arriérée par rapport à l'Europe de l'Ouest.

Deutsche Bank, la plus grande en Allemagne, a donc installé dans les nouvelles banques en Allemagne de l'Est des stations terrestres identiques à celles de l'Allemagne de l'Ouest, communiquant par satellite.

- Mal-Mart: la plus grande chaîne de grandes-surfaces américaines (USA), a adopté les communications satellites VSAT pour gérer les autorisations de crédit et les inventaires.

Des chaînes concurrentes ont suivi.

- Chevron Oil: réseau de distribution d'essence, a installé des VSAT dans toutes les stations service pour améliorer le service et pour obtenir une information rapide des tendances du marché.

## Services Satellites Mobiles (MSS)

Fin des années 70, début 80: services de **communications mobiles de première génération**. MMSS (Maritime mobile satellite service) sont les premiers introduits (COSMAT).

En Europe: Maritime European Community Satellite-A (MARECS-A) en 1981 et MARECS-B2 en 1984 (INMARSAT) applications maritimes mobiles.

Plus tard, applications mobiles terrestres.

1992: les MSS ont une part de moins de 10%. 2002: prévisions d'environ 30%.

1994: OPTUS Communications est le premier à donner des services mobiles terrestres (LMSS) à grande échelle: toute l'Australie, avec la **deuxième génération des mobiles**. GEO.

1996: AMST (American Mobile Satellite Corp.) et Telesat Mobile Inc. implémentent ce concept en Amérique du Nord. GEO.

Couverture globale: utilisation de constellations de satellites LEOs. 3<sup>ème</sup> génération des mobiles.

Iridium (Motorola): 66 satellites LEO.

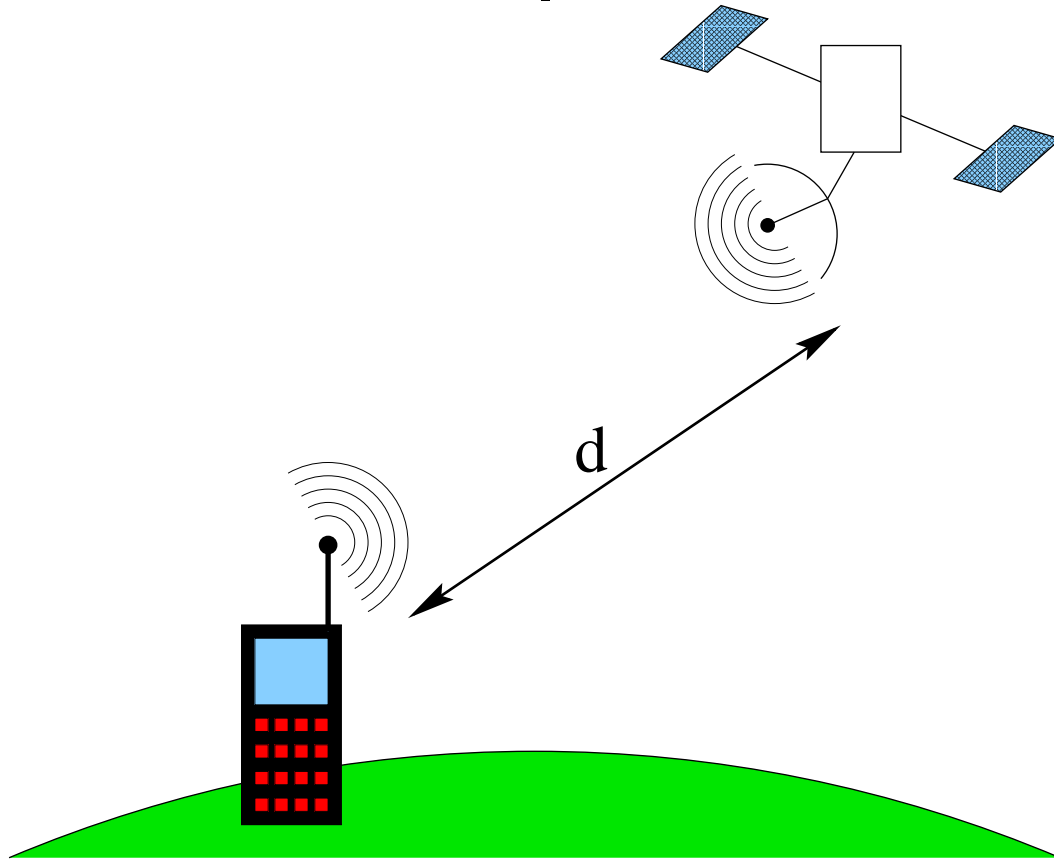
Globalstar: 48 satellites LEO.

ICO (Inmarsat): 10 sat. MEO.

Autres services (offerts par les mêmes satellites): localisation et navigation.

## Pourquoi les constellations de satellites ?

La première motivation est une question de **distance**.



En réduisant la distance, de nouvelles applications deviennent possibles par satellite:

- la téléphonie mobile,
- le multimédia haut-débit.

## Gains en puissance

La puissance du signal est en  $1/d^2$ . La distance des satellites à la Terre est de

- 35000 km environ pour les systèmes géostationnaires,
  - entre 700 et 1400 km pour les systèmes à orbite basse.
- ⇒ soit un facteur de gain en puissance entre 400 et 2000.

Le gain peut être utilisé pour rendre les terminaux mobiles, ou pour transmettre plus de débit.

## Gains en délai

Le temps d'aller-retour au satellite est, dans ces conditions de

- 240 ms pour un satellite géostationnaire,
- entre 10 ms et 20 ms pour un satellite à orbite basse.

⇒ on contourne les problèmes d'**écho** et de **buffer** des systèmes traditionnels par satellite.

## Gains en précision de couverture

Les satellites géostationnaires voient la Terre de “très loin”.

⇒ leur acuité est faible.

⇒ la réutilisation des **fréquences** est faible.

## Prévisions et Directions possibles de développements futurs

- Satellites LEOs:
  - des LEOs géostationnaires très légers (20kg-25kg), en utilisant de propulsion
- Constellations sat. denses: jusqu'au 1000 sats pour les larges bandes et les mobiles.
- Des satellites utilisant des ondes millimétriques (30GHz - 120GHz).
- Plateformes de satellites où un ensemble de satellites se comporte comme un seul énorme satellite GEO.
- Station spatiale de télécom avec un parc d'antennes, permettant une réutilisation spatiale plus grande, de 50-100.

Références:

<http://itri.loyola.edu/satcom2>

[http://itri.loyola.edu/satcom/c2\\_s9.htm](http://itri.loyola.edu/satcom/c2_s9.htm)



- Une forte croissance de nombre de systèmes satellites:
  - 200 satellite opérationnels (fin 1997),
  - plus de 1000 en 2003,
  - plus de 2000 en 2008.
  
- Croissance de services par satellites:
  - \$75 billion de revenue en 2005 et 5.5% des revenus des télécom.

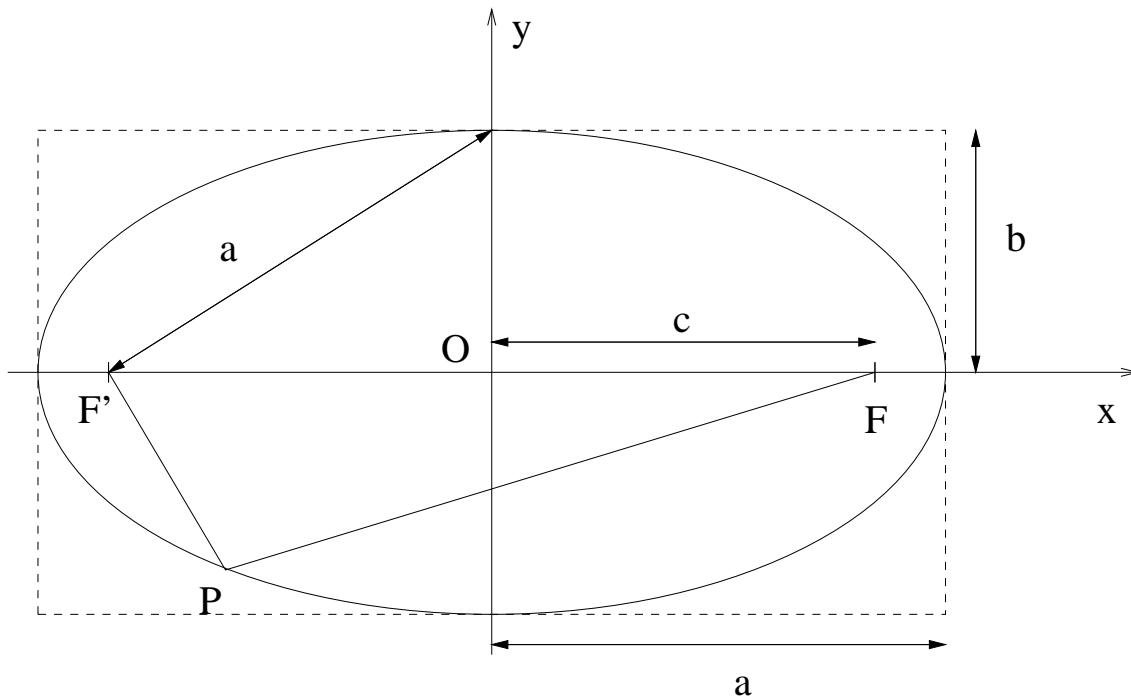
## Les lois de Kepler

Les Lois de Kepler déterminent:

- **l'orbite des planètes**, c'est à dire la trajectoire qu'elles suivent au cours du temps,
- **la vitesse instantanée de parcours** de chaque orbite par la planète associée,
- **la période orbitale** d'une planète, qui est le temps total qu'elle met à décrire son orbite.

## Première loi de Kepler

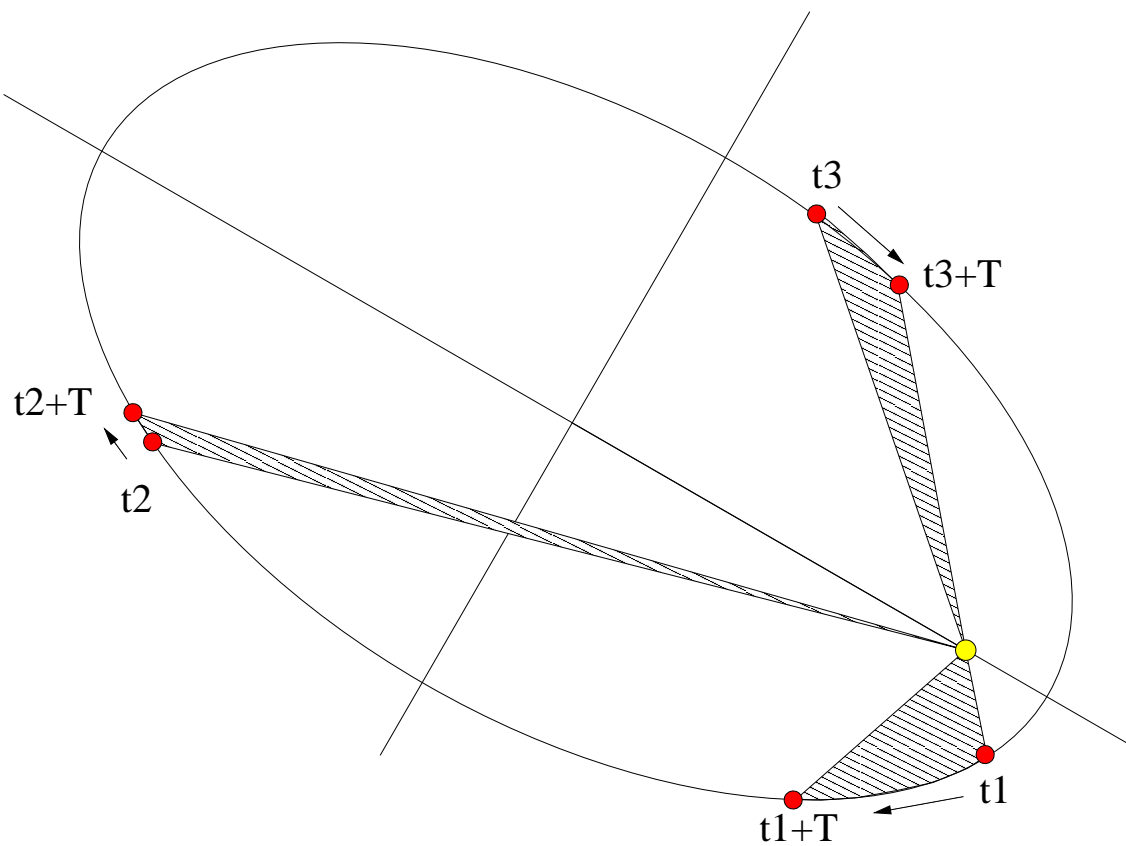
*L'orbite de chaque planète est une ellipse dont le soleil est un des foyers.*



- Equation de l'ellipse  $\mathcal{E} = \left\{ P(x, y) \text{ avec } \begin{cases} x = a \cos(t) \\ y = b \sin(t) \end{cases} \right\}$
- Foyers  $F(c, 0)$  et  $F'(-c, 0)$  avec  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ .
- Excentricité définie par  $e = c/a$ .
- Loi de la corde:  $PF + PF' = 2a$

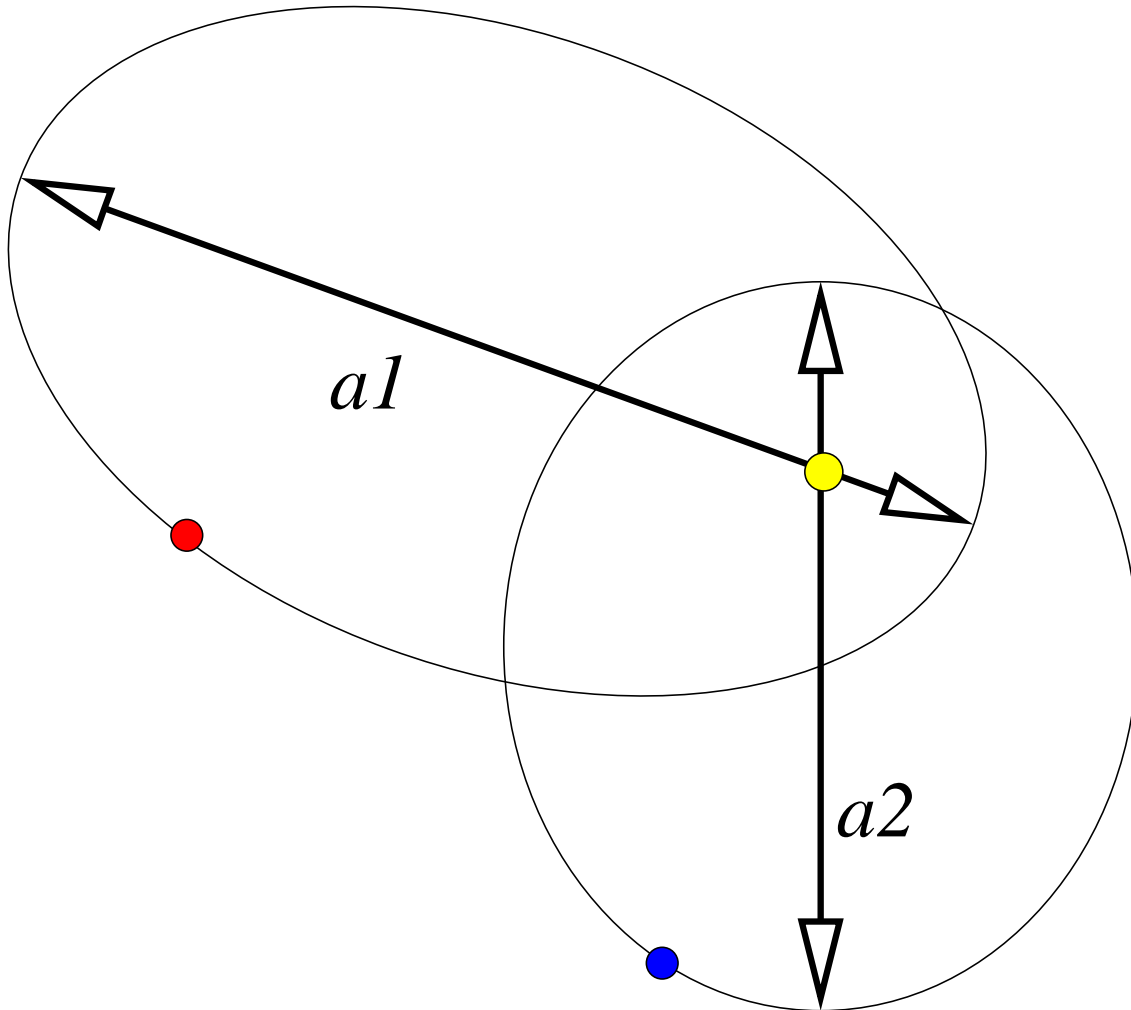
## Seconde loi de Kepler

*L'aire balayée par un rayon Soleil-Planète au cours d'une unité de temps est constante.*



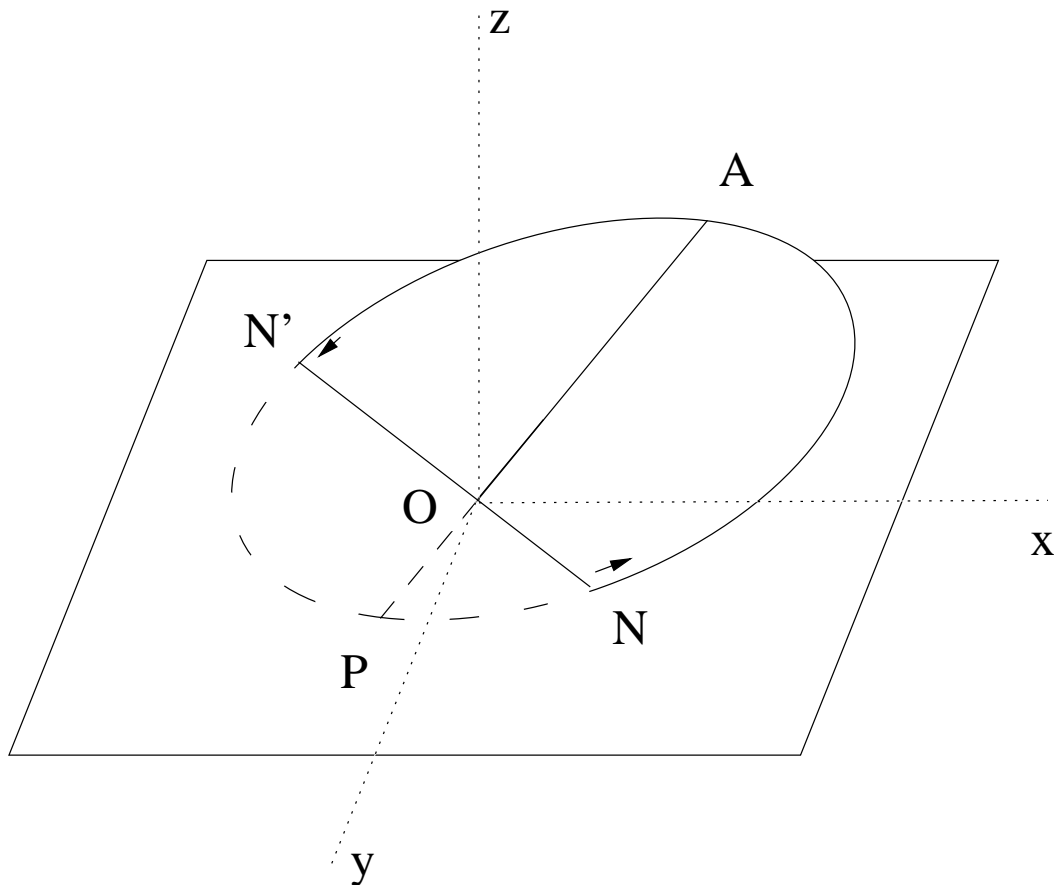
## Troisième loi de Kepler

*Le carré de la période orbitale d'une planète est proportionnel au cube de l'axe principal de son orbite.*



$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$$

## Les éléments orbitaux (ou Képlériens)



- Ox: axe équinoxial de printemps - équinoxial d'automne (intersection de plans)
- Oxy repère orthonormé du plan équatorial terrestre
- Oxyz repère orthonormé de l'espace
- Apogée, Périgée, Noeuds ascendant et descendant

## Description de la forme de l'orbite

- (1) le demi-grand axe  $a$ ,
- (2) l'excentricité  $e$ .

## Description de la position de l'orbite

- (3) l'**inclinaison**  $i$  angle entre le plan de l'orbite et le plan équatorial.  
Entre  $0$  et  $90^\circ$ : sens de rotation identique à celui de la Terre.  
Entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$ : orbite rétrograde.
- (4) l'**argument du périhélie**  $\omega := (\widehat{\overrightarrow{ON}}, \overrightarrow{OP})$
- (5) l'**ascension droite du nœud ascendant**  $\Omega := (Ox, \widehat{\overrightarrow{ON}})$ .

## Position du satellite sur son orbite

- (6) **Date d'observation**  $t$ , moment précis où le satellite est observé,
- (7) **Anomalie moyenne**  $M :=$  angle du satellite fait avec le périhélie.  
“ $M = 0^\circ$ ”: le satellite est au périhélie à la date  $t$   
“ $M = 180^\circ$ ”: le satellite est à l'apogée à la date  $t$

## Ceinture de radiation de Van Allen: ("radiation belt")

Des protons très énergétiques dus aux rayons cosmiques.

Van Allen: le nom d'un satellite envoyé sur la lune, qui a échoué et est retombé. En tombant, il est repassé par cette zone et a transmis beaucoup de données.

Les radiations détériorent fortement les équipements des satellites.  
On évite de les mettre dans cette zone.

2 zones:

1500km-5000km,

13000km - 20000km.



Ces zones définissent trois domaines d'altitude pour la mise en orbite:

**LEO** (*Low earth orbit*) en dessous de 2000 km

**MEO** (*Medium earth orbit*) entre 5000 km et 15 000 km

**HEO** (*High earth orbit*) au delà de 20 000 km (contient les GEOs).

Les orbites elliptiques MOLNYIA traversent les 2 zones (c.f. Archimedes, Ellipso).

Durée de vie de ces satellites est réduite.

## Coût de repositionnement d'un satellite

Des perturbations diverses peuvent aussi *dévier un satellite de sa trajectoire*.

Les techniques de repositionnement utilisées reposent sur l'utilisation de carburant (l'ergol) qui est une *ressource finie* du satellite.

Quand il n'y a plus de carburant, le satellite meurt.

Coûts de repositionnement:

pour l'altitude	pour l'inclinaison	pour l'ascension droite
$\frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta h}{R_T + h}$	$\frac{\Delta q}{q} = 2 \sin\left(\frac{\Delta i}{2}\right)$	$\frac{\Delta q}{q} = \sin(i) \Delta \Omega$

où  $a = h + R_T$ ,  $R_T = 6378km$ ,  $q$  est la quantité de mouvement.

## Frottement atmosphérique

Dans les limites de la technologie actuelle,

- Les altitudes inférieures à 200 km sont vues comme non viables pour le maintien d'un satellite.
- Juste au dessus, la durée de vie du satellite est de l'ordre de l'année.
- Autour des 1000 kms, les satellites peuvent durer dans les sept ans.
- Pour les orbites plus élevées, style GEO, cela va jusqu'à quinze ans.

## Durée de vie des batteries

Un autre facteur fortement limitant pour les LEOs est dû aux batteries.

Cycles de charge / décharge.

## Les effets de la non-rotondité de la Terre

### Dérive de $\Omega$

vers l'est pour les orbites directes

vers l'ouest pour les orbites indirectes (ou rétrogrades)

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{9,964}{(1-e^2)^2} \left(\frac{R_T}{a}\right)^{7/2} \cos(i), \text{ en degrés par jour.}$$

Rappel: coût de la correction  $\frac{\Delta q}{q} = \sin(i)\Delta\Omega$

Autre possibilité: laisser "dériver le satellite".

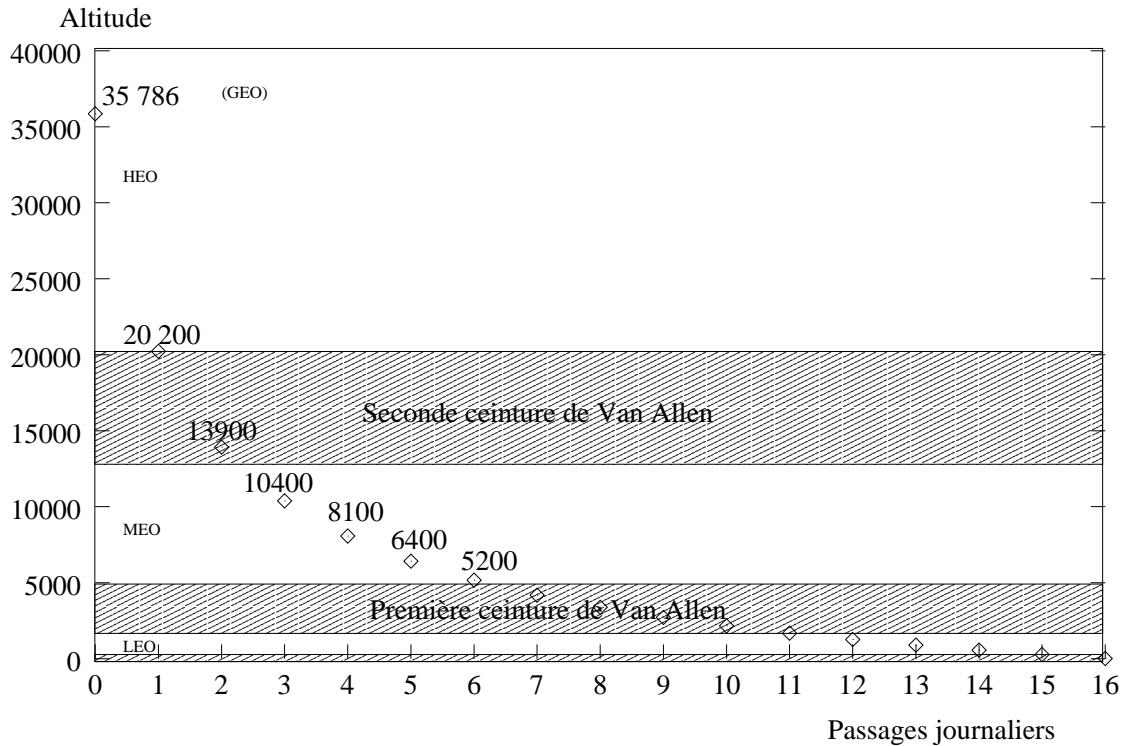
### Dérive de $\omega$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{4,982}{(1-e^2)^2} \left(\frac{R_T}{a}\right)^{7/2} (5 \cos^2(i) - 1), \text{ en degrés par jour.}$$

Peu ou pas d'influence pour les orbites circulaires.

Dérive nulle pour  $i = 63,4^\circ$  et  $i = 116,6^\circ$ .

## Résumé des positions possibles pour un satellite



et les orbites elliptiques ont des inclinaisons stables de  $i = 63,4^\circ$  et  $i = 116,6^\circ$ .

Tous les satellites non-géostationnaires sont *à défilement*.

→ besoin d'une *constellation* pour couvrir la Terre.

## Notion de couverture

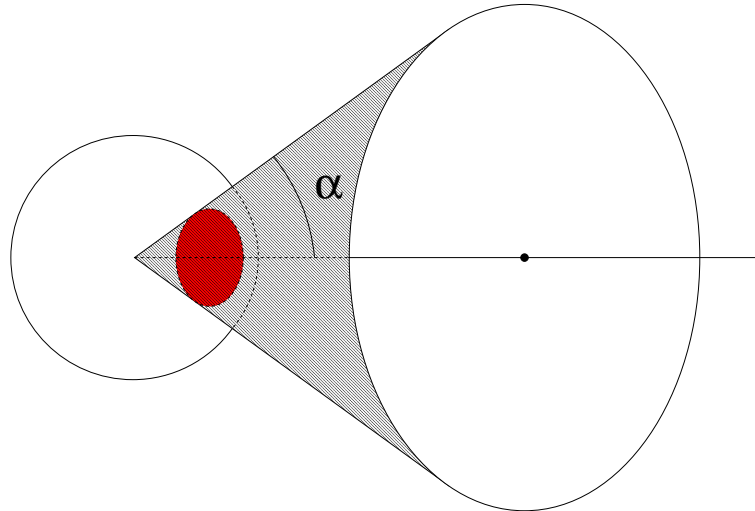
Les LEOs c'est bien, mais:

- Vitesse de déplacement au delà des 20.000 km/h
- Temps de couverture par un satellite  $\approx$  10 minutes

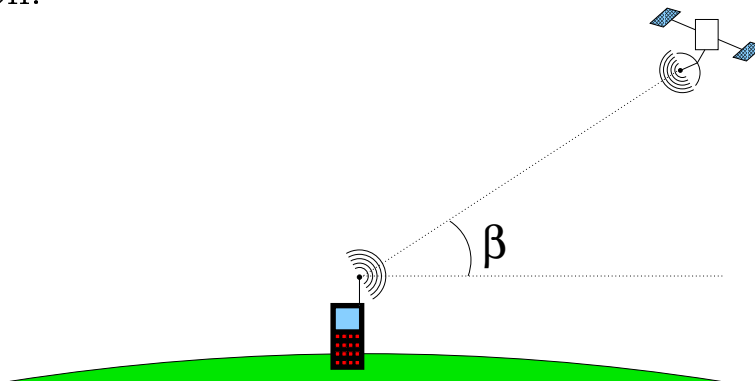
Comment s'en sortir ???

## Angle de couverture et angle d'incidence

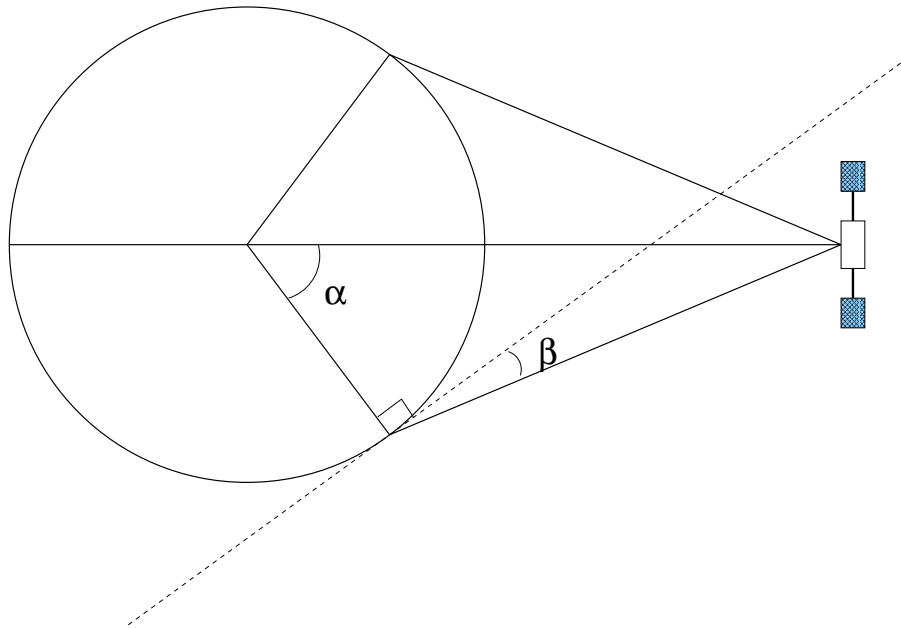
L'angle solide  $\alpha$  détermine la zone de couverture du satellite.



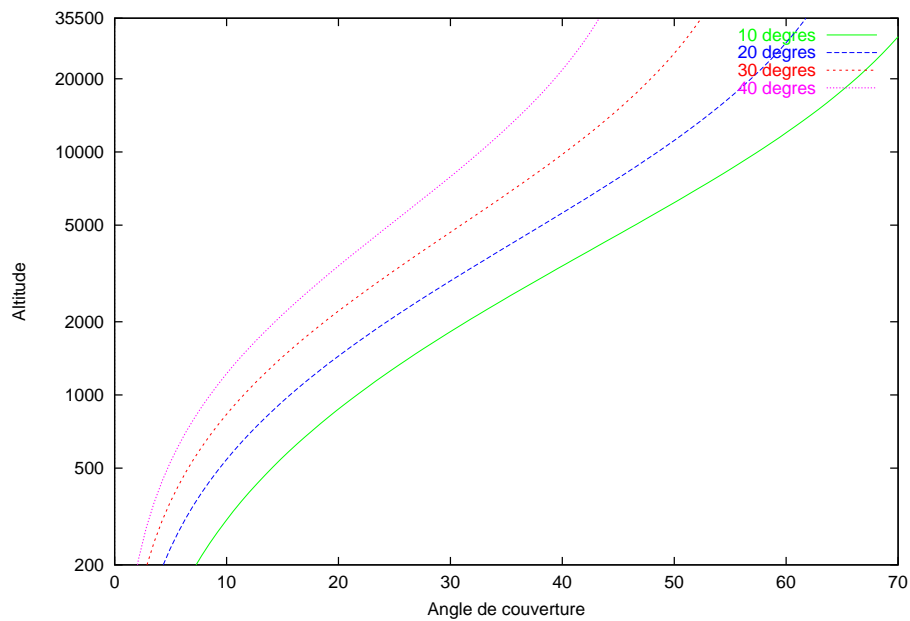
L'angle d'élévation  $\beta$  est l'angle (minimal) que doit faire le satellite avec l'horizon.



## Lien entre altitude et couverture



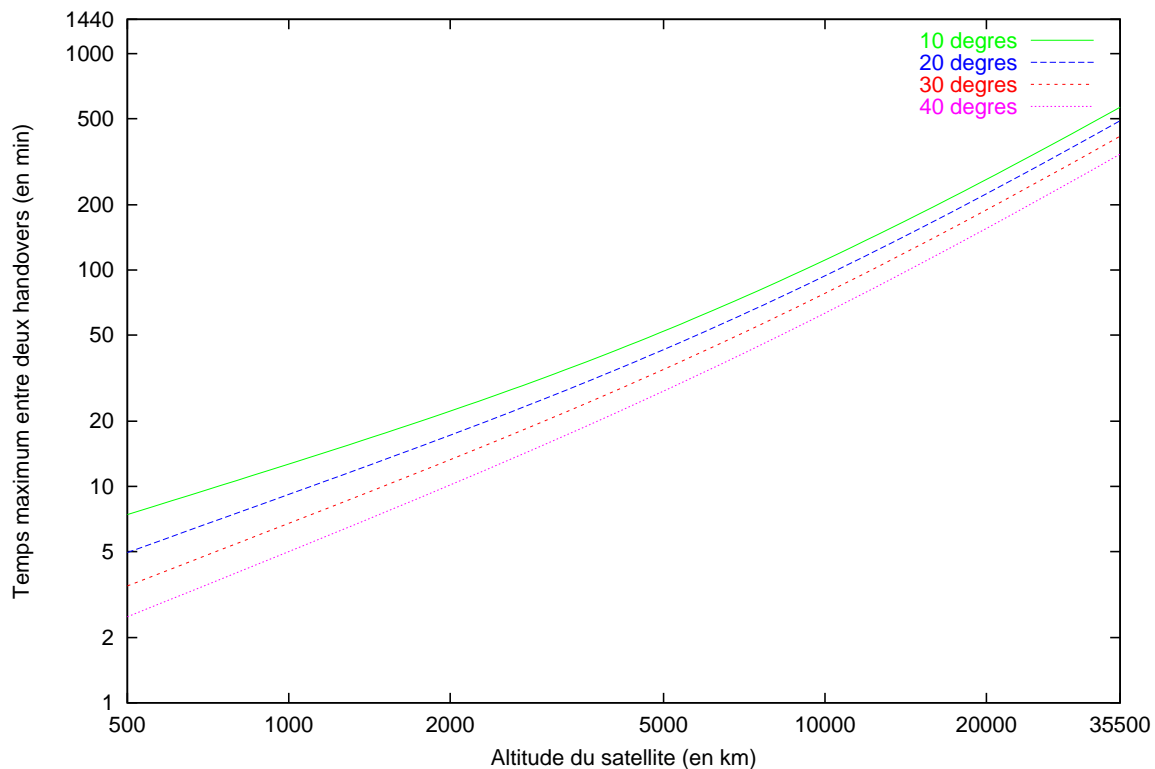
$$h = R_T(\cos(\alpha)(1 + \tan(\alpha) \tan(\alpha + \beta)) - 1)$$





## Temps maximum entre deux handovers

- On ne tient pas compte ici de la rotation de la Terre sur elle-même
- Le temps de handover est maximum, i.e. on parcourt un diamètre de la zone de couverture



→ L'angle d'élévation a un fort impact sur les LEOs

## Couverture de la Terre par des GEOs

Suivant l'angle d'élévation souhaité, au minimum entre 3 et 5 GEOs pour couvrir la Terre.

Couverture difficile au delà des  $75^\circ$ .

Angle d'élévation petit pour les altitudes entre  $45^\circ$  et  $75^\circ$ .

## Couverture de la Terre par des MEOs

Une dizaine de satellites pour assurer la couverture mondiale

Certaines constellations n'utilisent que des orbites équatoriales

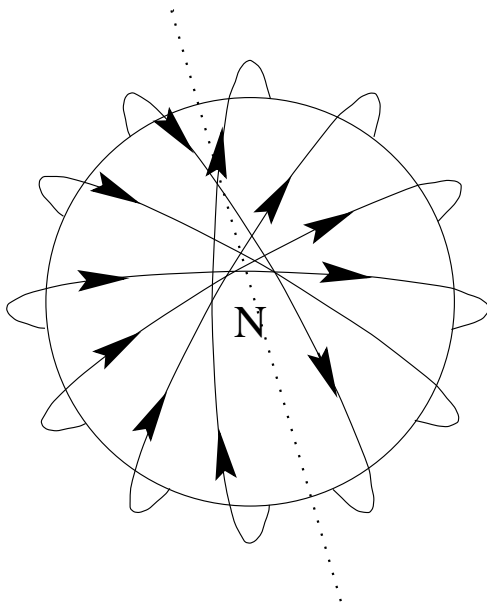
→ la couverture, très bonne sur l'équateur, se détériore rapidement

Autres solutions proches des LEOs.

## Couverture de la Terre par des LEOs

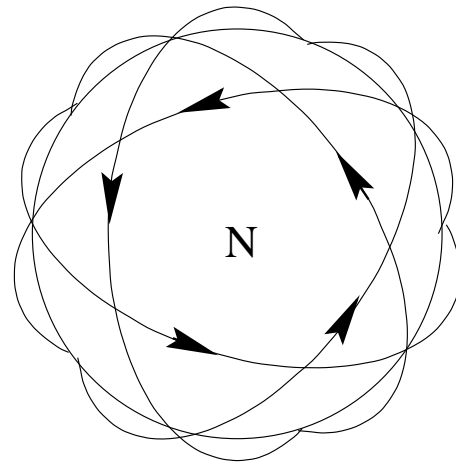
Utilisation des trains de satellites sur une même orbite.

Deux façons de disposer les satellites:



couture

*Constellation polaire*



*Constellation inclinée*

## Complément sur les constellations en rosette (Ballard, 1980)

Font partie des delta-constellation de Walker (ou  $2\pi$ -constellations, ou constellations inclinées)

Une constellation en Rosette est donnée par:

- son altitude  $h$ ,
- un angle d'inclinaison  $i$ ,
- le nombre d'orbites  $P$ ,
- le nombre de satellites par orbite  $Q$ ,
- un facteur harmonique  $m$  avec  $0 \leq m \leq PQ - 1$ .

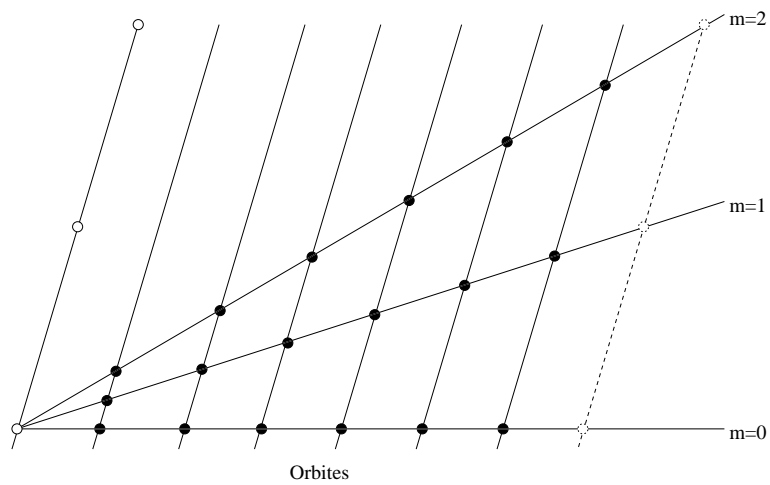
Constellation répertoriée  $PQ/P/m$ .

### Propriétés des constellations en rosette (1/2)

Un satellite indexé par  $j$ ,  $0 \leq j \leq PQ - 1$  vérifie:

$$\theta_j = \frac{2\pi j}{P} \text{ et}$$
$$M_j = \frac{m\theta_j}{Q}.$$

## Propriétés des constellations en rosette (2/2)



### Exemples de constellations en Rosette

<i>Nom</i>	<i>Atitude</i>	<i>Incl.</i>	<i>Type</i>
Globalstar	1400 km	52 (?)	48/8/6
Skybridge	2000 km	53	80/20/15
RNRT constellation 1	20 000 km	51	12/3/1
RNRT constellation 2	1600 km	20	72/9/1

### Nombre satellites nécessaires pour la couverture globale

Superficie de couverture par un satellite:

$$2\pi(1 - \cos \alpha)R_T^2.$$

Superficie de la Terre:  $4\pi R_T^2$ .

**Borne:** Il faut au moins  $\frac{2}{1 - \cos \alpha}$  satellites.

**Approximation:** cellules hexagonales.

L'aire d'un hexagone = 0.827 de l'aire contenue dans son cercle circonscrit.

Il faut donc ajouter 21% de satellites.

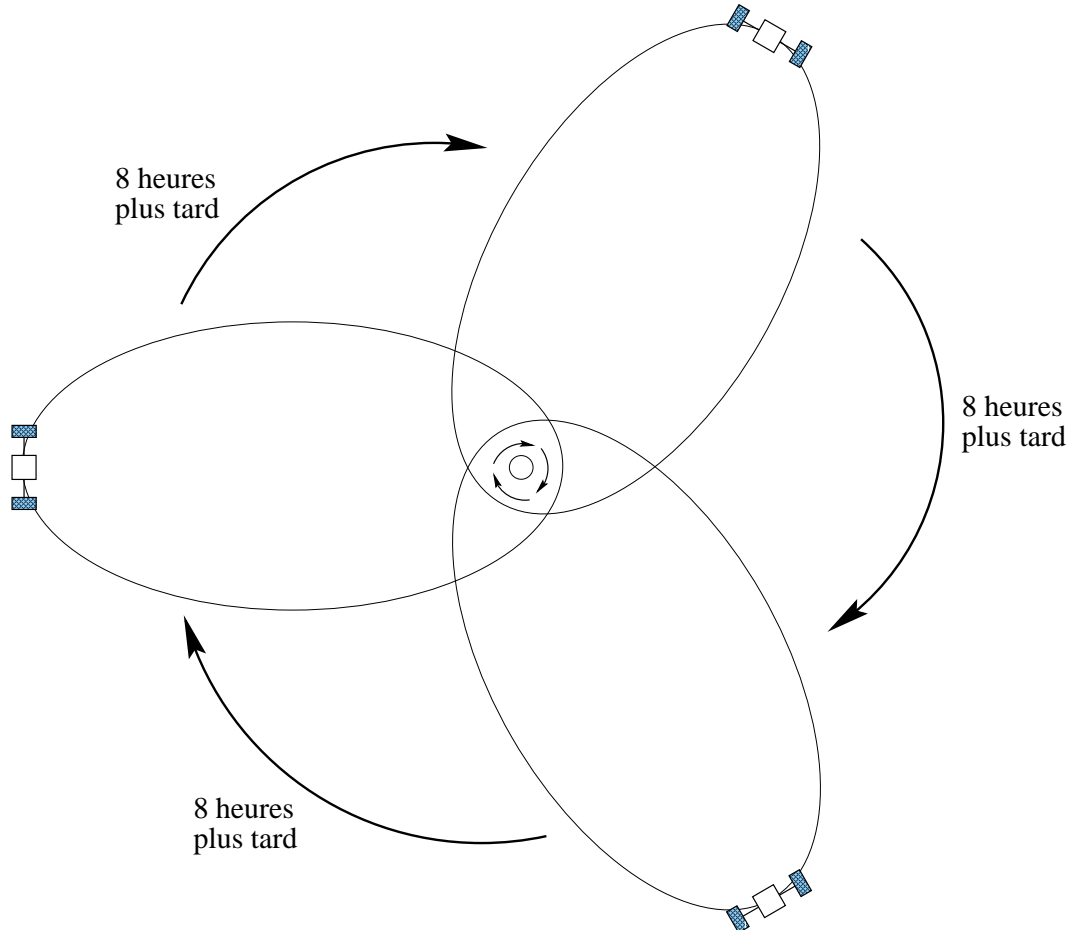
En pratique il faut encore plus de satellites pour les transferts.



## Couverture de la Terre par des orbites elliptiques

### Avantages:

- Synchronisation
- Inclinaison (i.e. angle d'élevation pour les pays occidentaux)



Les satellites sont opérationnels dans le “haut” de leur orbite (là où ils sont les plus lents).

Grâce à leur synchronisme, un mécanisme de relais est assuré

→ “GEO” pour les pays à latitude élevée

Ex: **Archimedes** - quatre satellites HEO (High Earth Orbit), chacun recouvre l'Europe pendant 6 heures/j.

voir: [http://itri.loyola.edu/satcom/c5\\_s7.htm](http://itri.loyola.edu/satcom/c5_s7.htm)

Spécialité des russes: les satellites sont lancés par des fusées MOLNYIA (ou Vostock).

On appelle ces orbites: orbites MOLNYIA.

Un orbite MOLNYIA typique:

point le plus proche de la terre: 1006km,

point le plus éloigné de la terre: 39362km.

Passe 11h à l'hémisphère nord, 1h à l'hémisphère sud.

## Résumé des Avantages / Inconvénients

	LEO	MEO	GEO
Délai aller-retour	10ms-20ms	50ms-100ms	240ms
Puissance requise % GEO	1/400 - 1/2000	1/10 - 1/20	1
Nombre de satellites	≈50	10	3-5
Finesse des cellules	excellente	moyenne	médiocre
Qualité de la couverture	excellente	médiocre	médiocre
Fréquence des handover (inv)	10 min	heure	jamais