

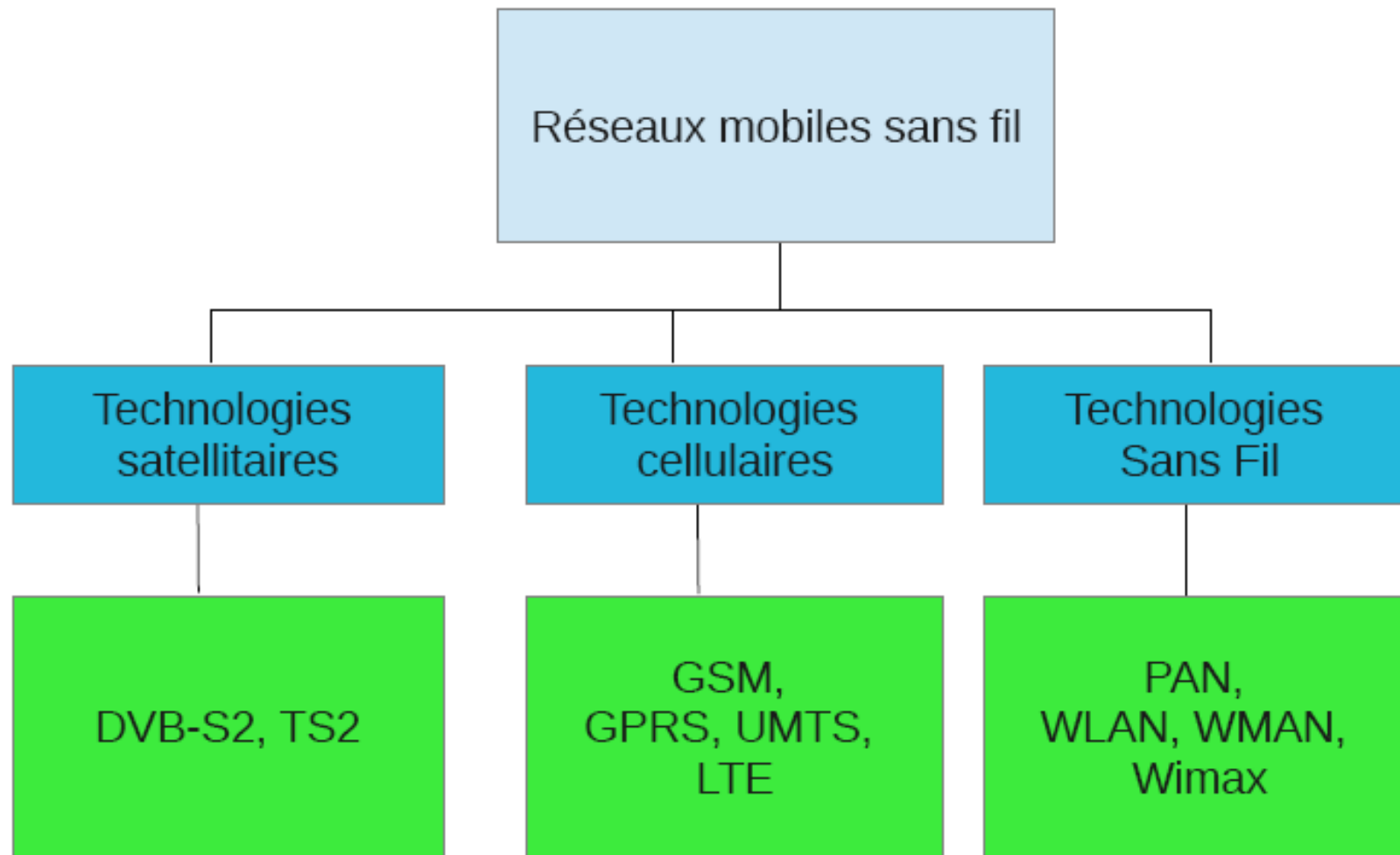


Les Communications Satellites

Tarek Bejaoui

<http://sites.google.com/site/tarekbejaoui>

Classifications des réseaux mobiles et sans fil



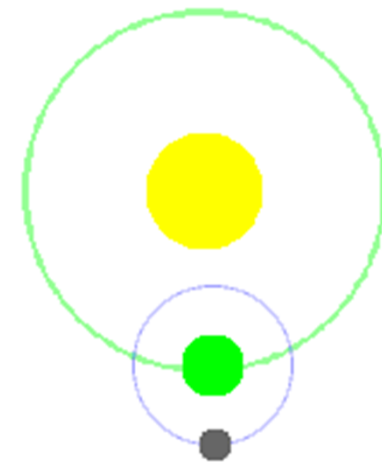


Généralités

- Historique
- Les services offerts
- Comment fonctionnent les satellites
- Les bandes de fréquence satellite et antennes
- Distance orbitales Pros & Cons, Applications
- Types: Low-Earth-Orbit (LEOs)
 Medium-Earth-Orbit (MEOs)
 Global Positioning System (GPS)
 Geostationary (GEOs)
- Satellite Tracking System (J-Tracker, J-Pass)



Un satellite : C'est quoi



Un satellite est un corps tournant autour d'une planète ou d'une lune.



Historique des Satellites

➤ Les premiers Satellites

Le principe des satellites était simple – envoyer quelque chose dans l'espace à la bonne vitesse et dans la bonne trajectoire, et elle y restera autour de la terre pour des années, si ce n'est pas pour l'éternité.

Si l'orbite est à la bonne distance dans l'espace, le satellite gardera le rythme de la rotation de la Terre.

➤ Les premiers Satellites (1957)

En octobre 1957, les stations terriennes commencent à recevoir les premiers signaux venant de l'espace.

Les signaux provenaient du satellite Russe Sputnik 1, le premier satellite artificiel au monde.

En janvier 1958, les américains ont lancé leur premier satellite baptisé Explorer 1.



Historique des Satellites

- Le programme GEO Syncom de la NASA (1963)
- En Juillet 1963, la « Hughes Aircraft Corporation » a lancé le satellite expérimental Syncom 2 pour la NASA, le premier satellite de communications géostationnaires du monde. Sa première version Syncom 1, avait explosé lors de son lancement.
- Elle a effectué le premier appel téléphonique en direct par satellite bidirectionnelle entre le chef de l'Etat américain et le Premier ministre Nigérien en Afrique.
- Le troisième satellite Syncom avait transmis en direct les Jeux olympiques 1964 de Tokyo.



Historique des Satellites

➤ Early Bird (1965)

Le premier satellite de communications commerciales dans le monde était Early Bird, construit par Hughes pour la Société de communications par satellite (COMSAT).

Le satellite a été lancé le 6 Avril 1965, et mis en orbite géostationnaire à environ 36000 km au-dessus de l'équateur. Il assurait les communications entre l'Europe et l'Amérique du Nord.

Early Bird n'avait pas de batteries - et a fonctionné uniquement lorsque ses panneaux solaires ont été exposés au soleil.



Historique des Satellites

➤ Satellites de communications ultérieures

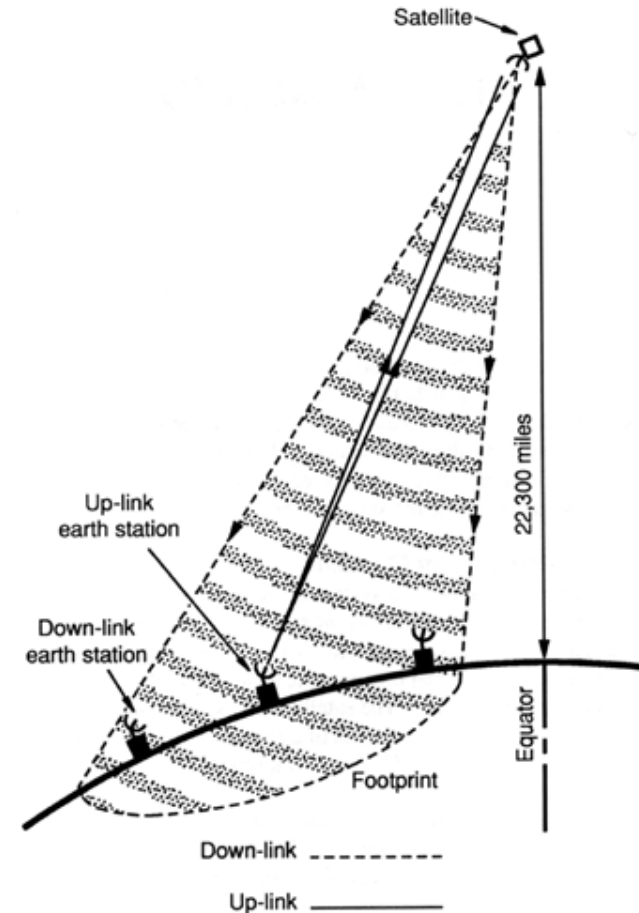
Le lancement des trois satellites Intelsat en 1969 a créé un réseau mondial de télévision et de communications vocales qui a couvert l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien.

L'introduction d'antennes à faisceaux multiples dans les années 1980 a apporté de nouvelles améliorations d'efficacité, du fait que la puissance d'un satellite pourrait être concentrée sur des petites zones de la Terre, rendant possible de plus petites couvertures et la mise en place des stations au sol à faible coût.

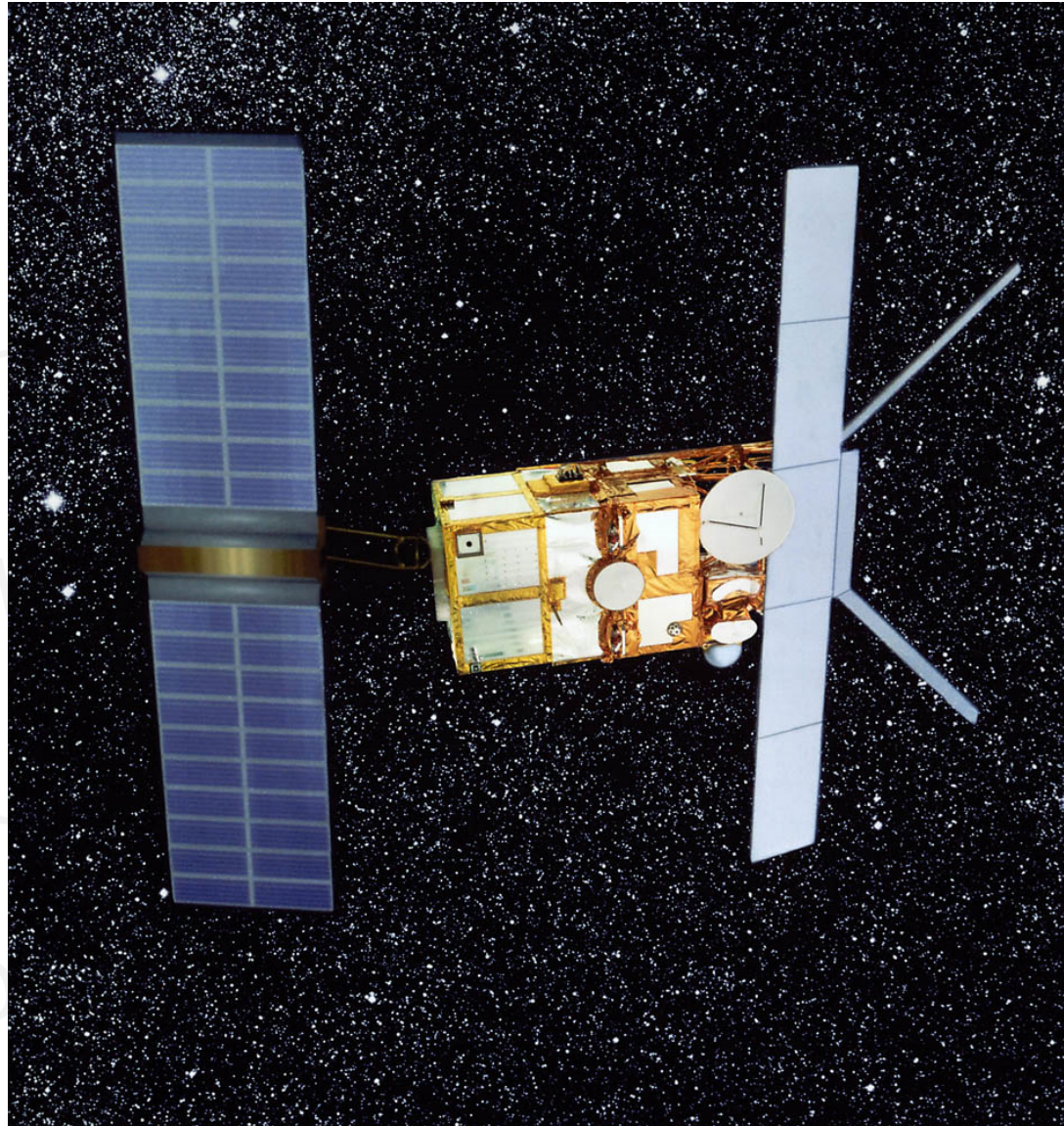
La capacité (le nombre de canaux utilisés simultanément de télévision et de la parole) a ainsi augmentée.

Comment fonctionnent les Satellites

1. Une station terrestre envoie un message dans la bande GHz. (Uplink)
2. Le satellite reçoit et retransmet les signaux. (Downlink)
3. D'autres stations terrestres dans la zone couverte par le satellite (empreinte) reçoivent le même message.



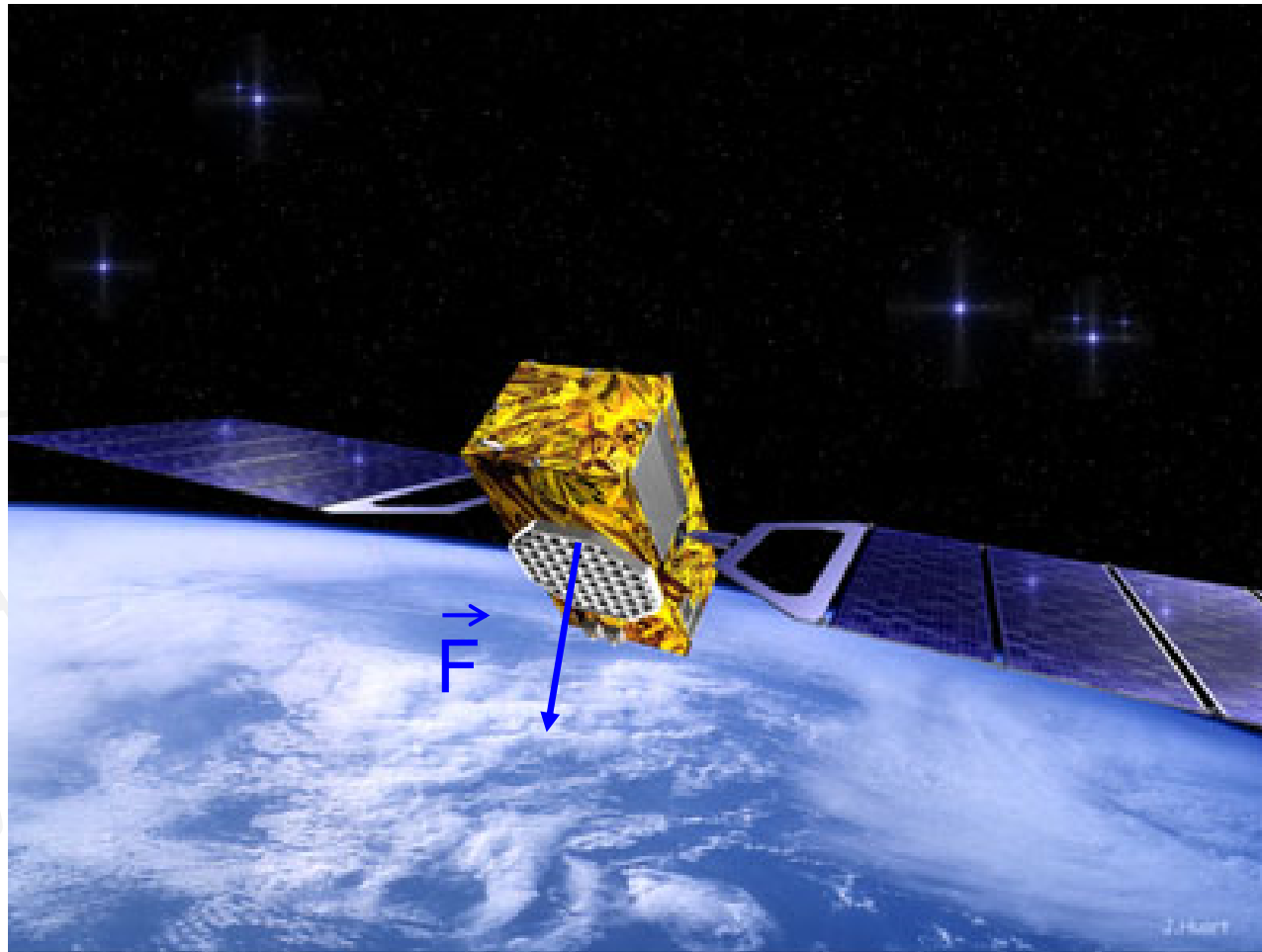
Comment fonctionnent les Satellites



Quelles sont les forces s'exerçant sur le satellite?

Tarek Bejaoui

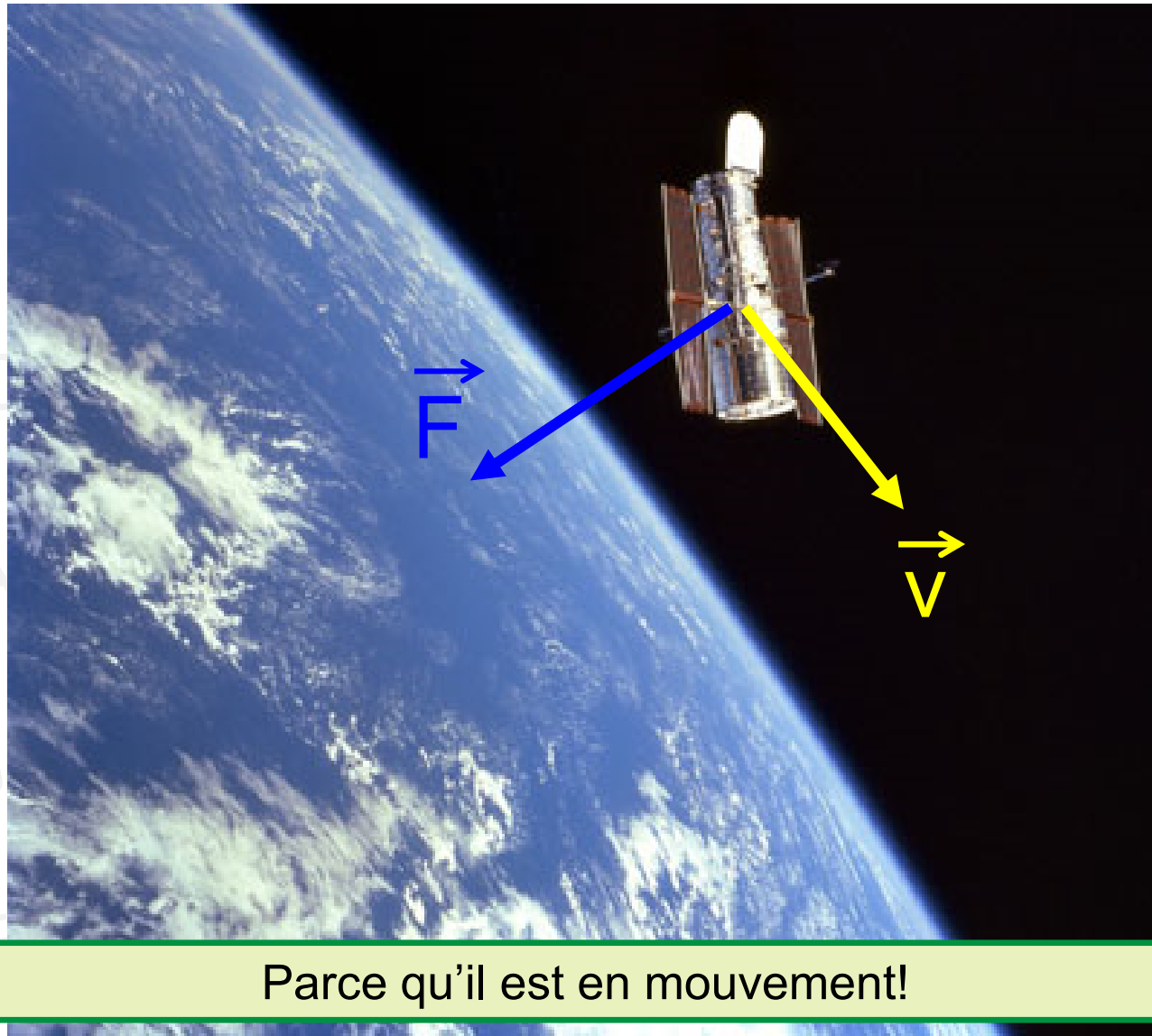
Comment fonctionnent les Satellites



Le satellite n'est soumis qu'à la force de gravitation!

Pourquoi ne tombent-ils pas sur la Terre?

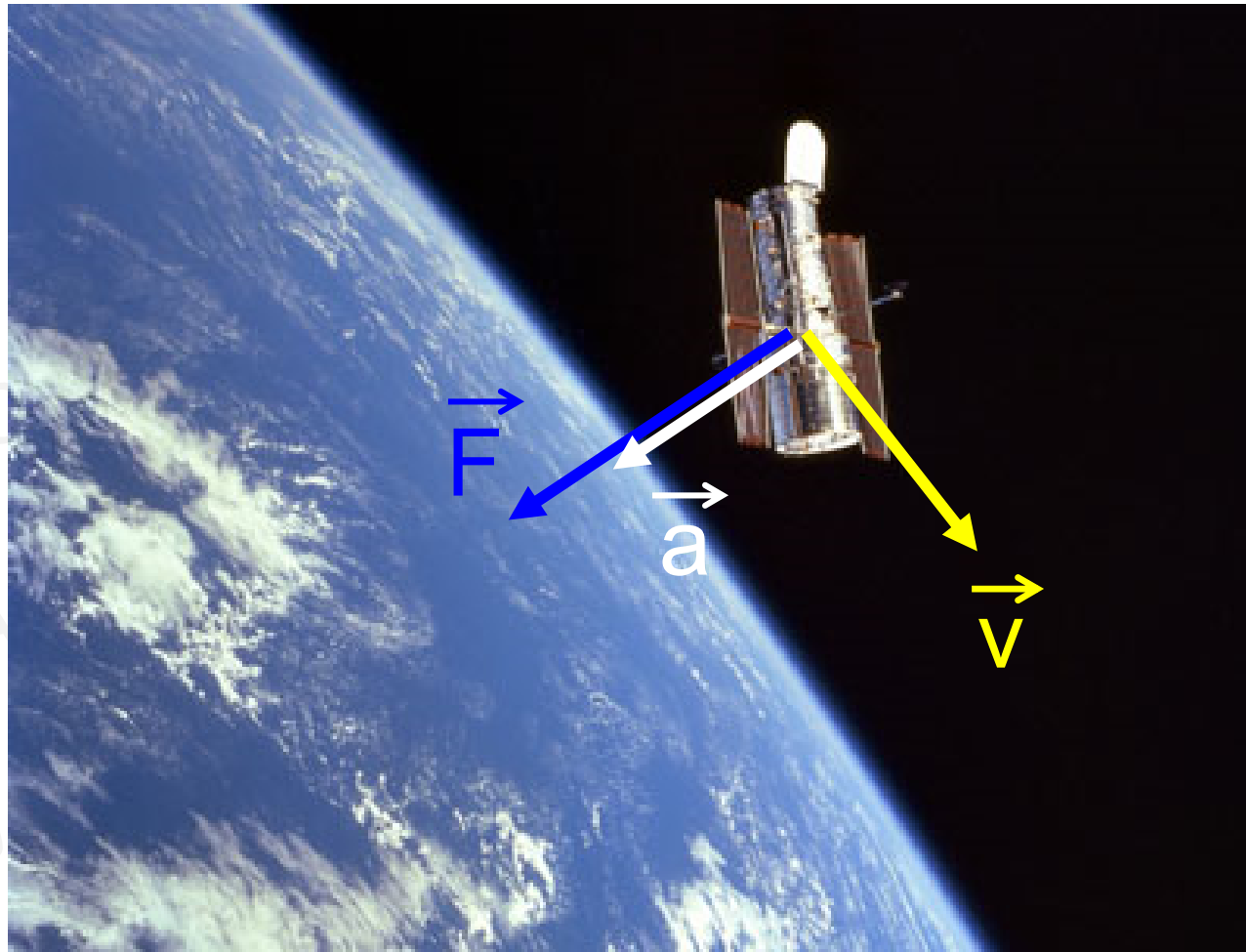
Comment fonctionnent les Satellites



Parce qu'il est en mouvement!

Quelle est l'accélération du satellite?

Comment fonctionnent les Satellites

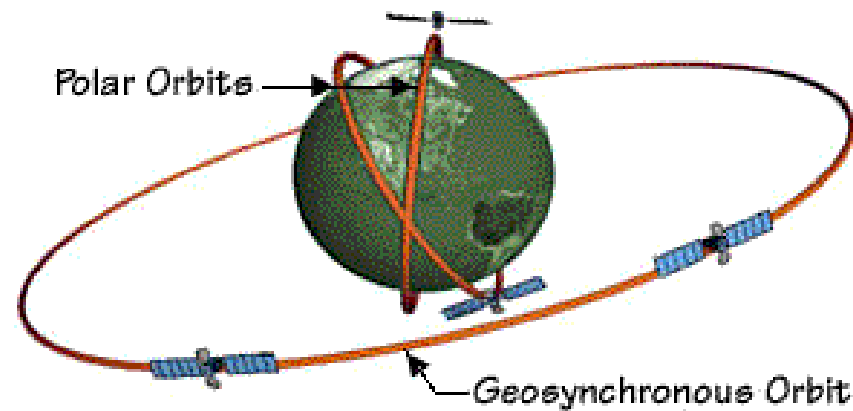


L'accélération a même direction et même sens que la force!
(Principe fondamental)

Quel est le mouvement du satellite si $\vec{a} \perp \vec{v}$?

Tarek Bejaoui

Comment fonctionnent les Satellites



Si à tout instant $\vec{a} \perp \vec{v}$, le mouvement est circulaire et uniforme!
(Résultat établi en cinématique du point).

Quel est le centre des orbites circulaires?

Comment fonctionnent les Satellites



Orbite équatoriale: le satellite est tout le temps au-dessus de l'équateur

Le centre de la trajectoire circulaire est le centre de la Terre.
En effet, la force de gravitation étant à l'origine de ce mouvement et constituant la force centripète, est dirigée vers le centre de la Terre.

Est-ce que d'autres orbites circulaires sont possibles?

Comment fonctionnent les Satellites

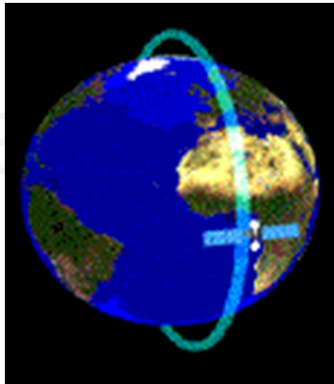


Orbite inclinée: le satellite passe au-dessus de l'hémisphère Nord et au-dessus de l'hémisphère Sud

Le centre de la trajectoire circulaire est le centre de la Terre.
En effet, la force de gravitation étant à l'origine de ce mouvement et constituant la force centripète, est dirigée vers le centre de la Terre.

La rotation terrestre affecte-t-elle le mouvement du satellite?

Les satellites

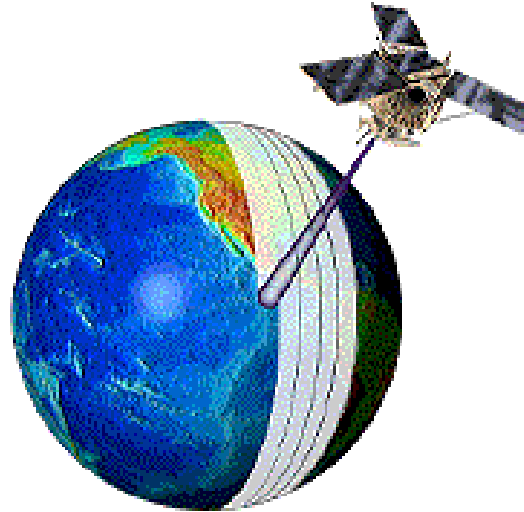
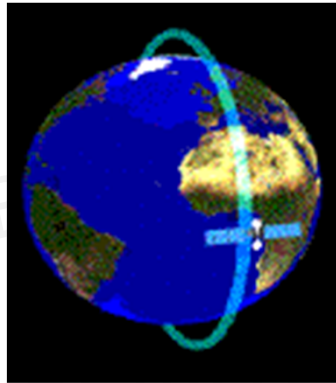


Orbite polaire:
le satellite
passe
pratiquement
au-dessus du
Pôle Nord et au-
dessus du Pôle
Sud



Non, puisque le mouvement du satellite est déterminé par la force de gravitation s'exerçant sur lui.
Cette force dépend du champ de gravitation de la Terre, qui lui ne dépend pas du mouvement de la Terre.

Comment fonctionnent les Satellites



Orbite polaire:
le satellite
passe
pratiquement
au-dessus du
Pôle Nord et au-
dessus du Pôle
Sud

Au cours de ses révolutions successives, le satellite passe au-dessus de régions situées de plus en plus à l'ouest.

Les satellites américains NOAA par exemple, à 800 km d'altitude en orbite polaire, fournissent des images d'une résolution de 2 km, qui servent à l'élaboration des prévisions météorologiques.

Comment fonctionnent les Satellites

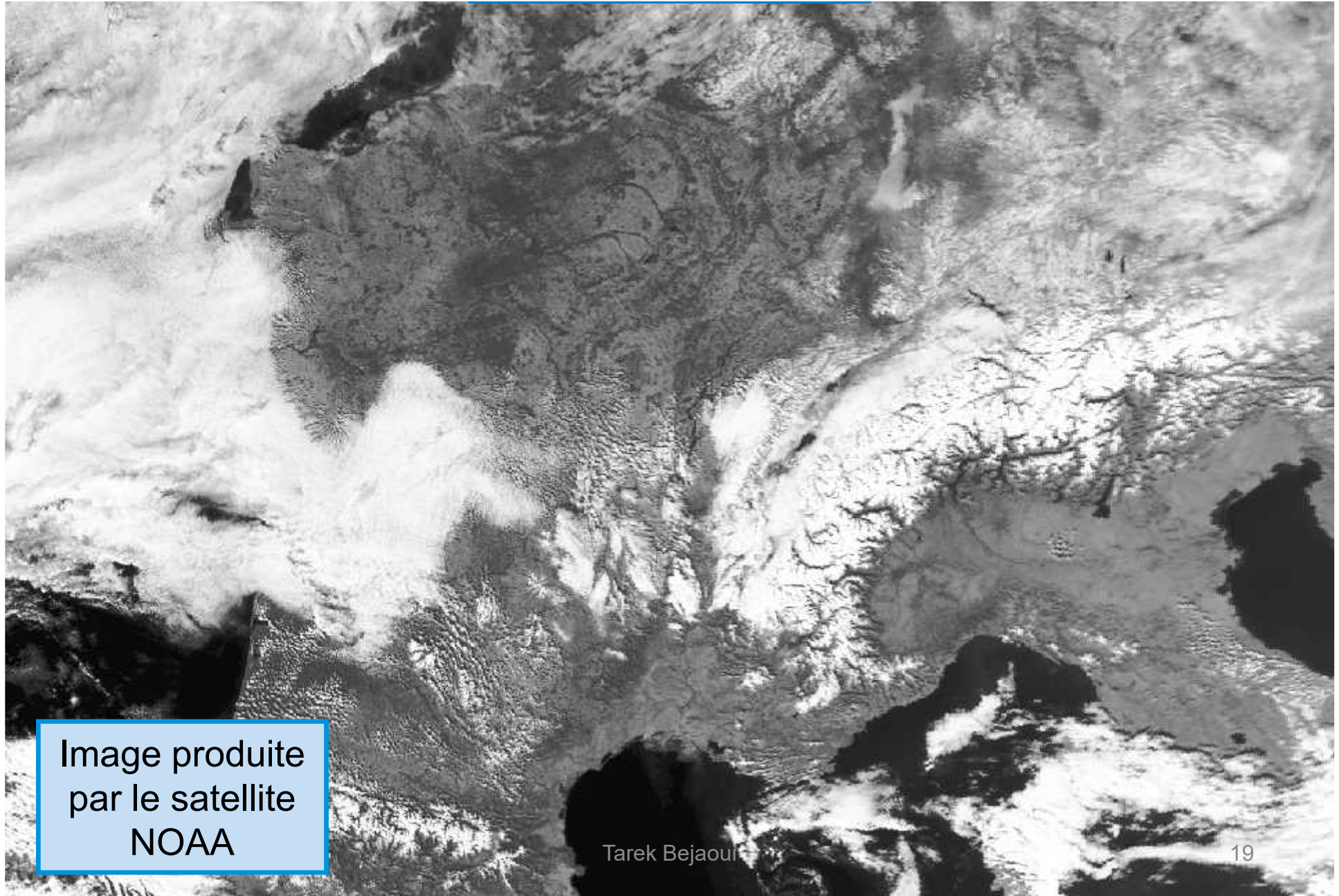


Image produite
par le satellite
NOAA

Comment fonctionnent les Satellites

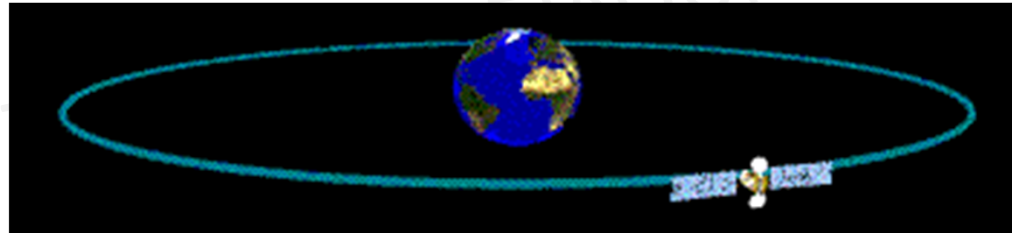


Si $\vec{a}$ n'est pas $\perp \vec{v}$, le mouvement sera elliptique et non uniforme
(**première loi de Képler**).

Le cercle n'est qu'un cas particulier d'une ellipse.

Qu'est-ce qu'un **satellite géostationnaire** et comment est son orbite?

Comment fonctionnent les Satellites



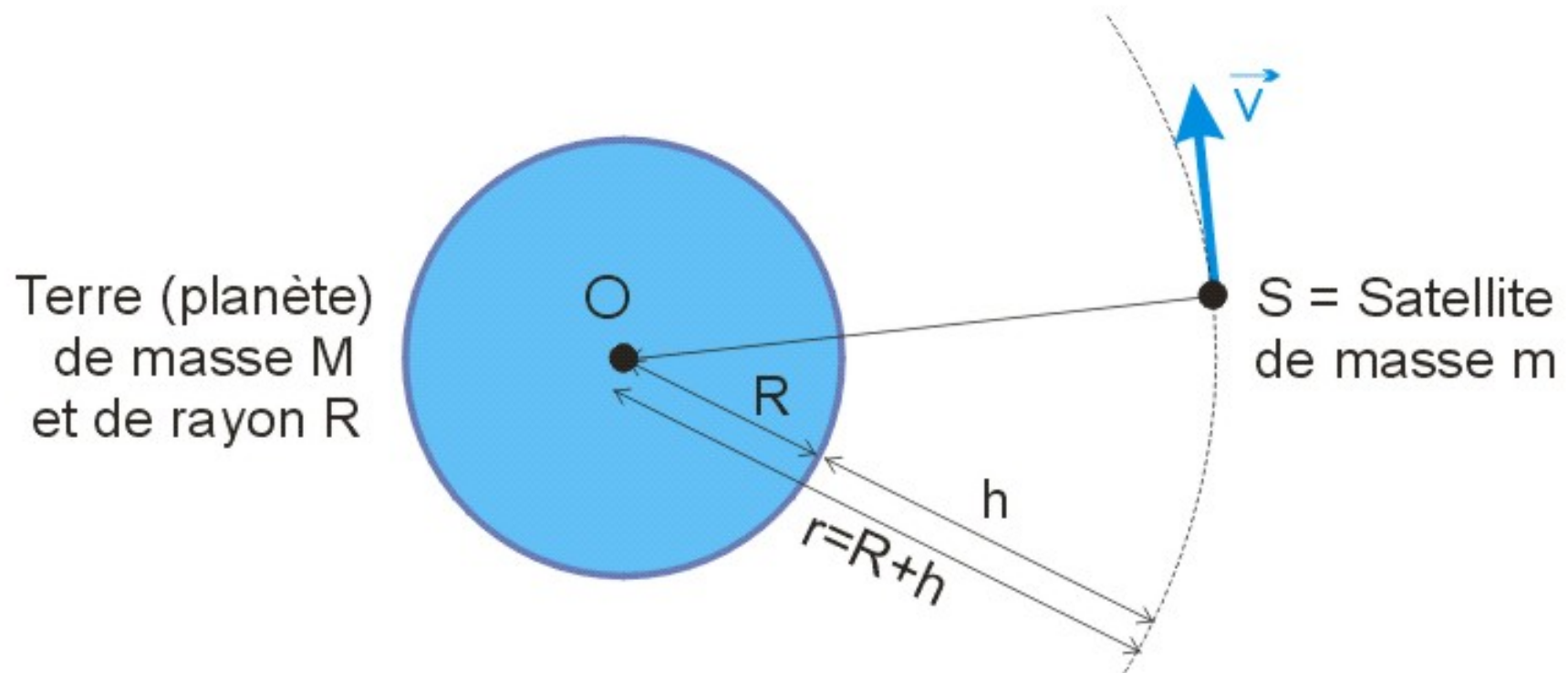
Satellite géostationnaire

Un satellite est géostationnaire s'il est immobile dans le ciel pour tout observateur terrestre.

Son orbite est nécessairement équatoriale!

Faisons l'étude détaillée du mouvement d'un satellite en orbite circulaire autour d'une planète!

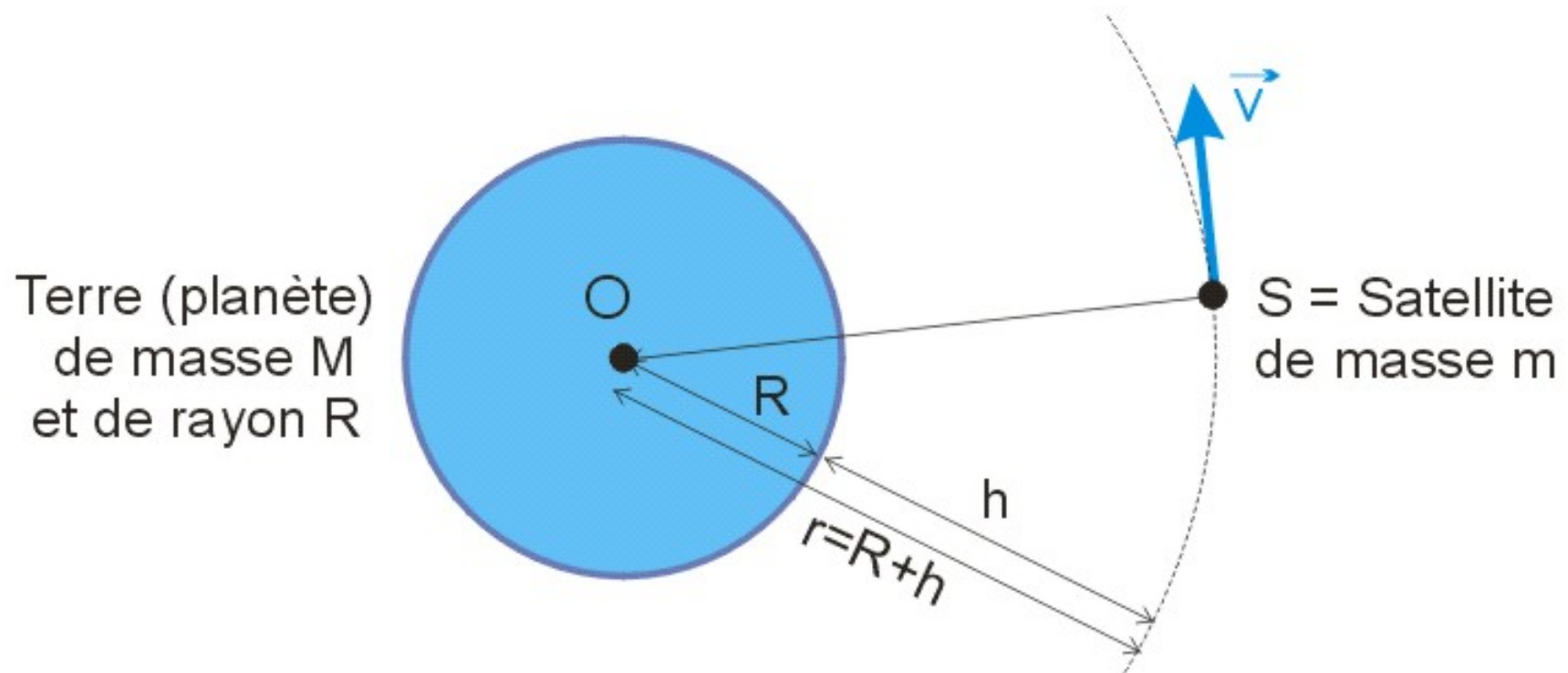
Comment fonctionnent les Satellites



- 1) **Système:** satellite de masse m , évoluant à la vitesse v à la distance r du centre de la Terre (planète)
($r = R + h$, avec R = rayon de la planète et h = altitude du satellite)

Dans quel référentiel faisons-nous l'étude du mouvement de S?

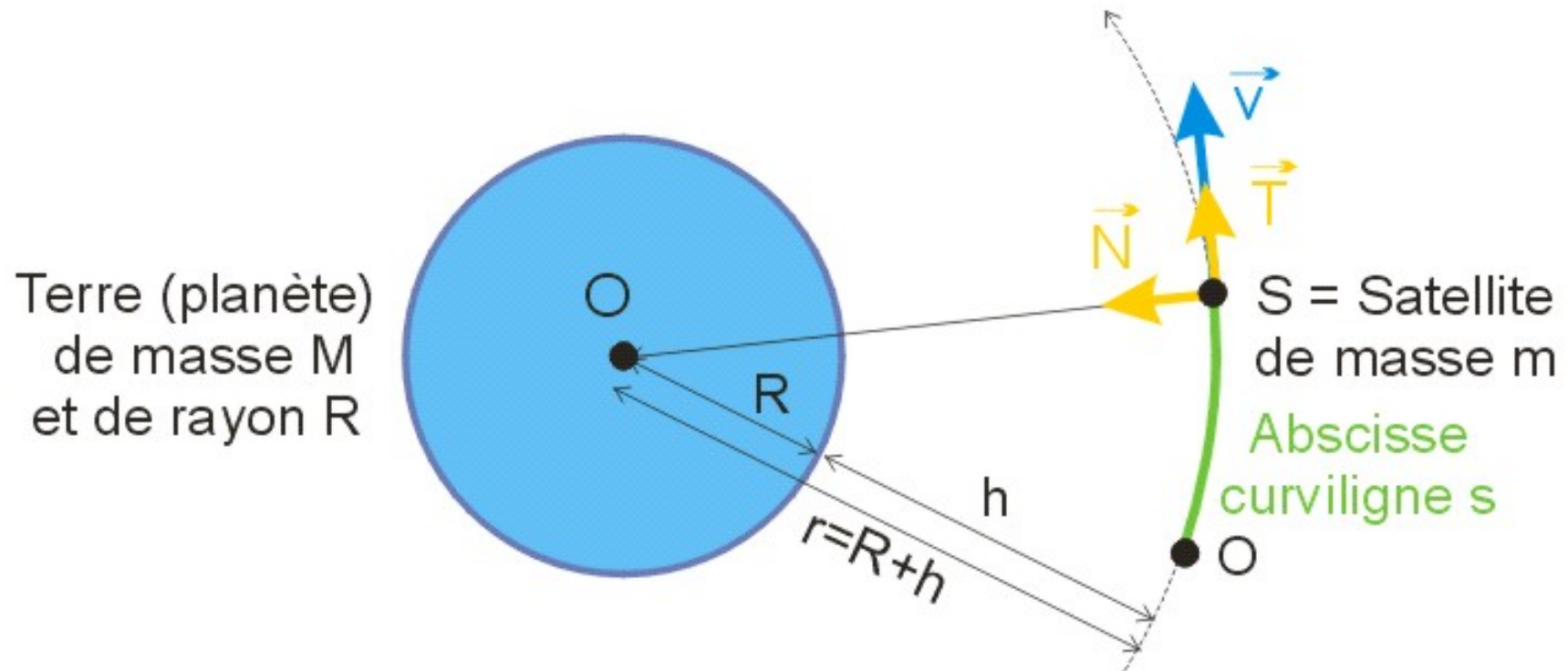
Comment fonctionnent les Satellites



2) Référentiel: Référentiel géocentrique formé par la Terre (la planète) et trois étoiles fixes.
Dans ce référentiel la Terre (la planète) effectue un mouvement de rotation autour de son axe.

Dans quel repère faisons-nous l'étude du mouvement de S ?

Comment fonctionnent les Satellites

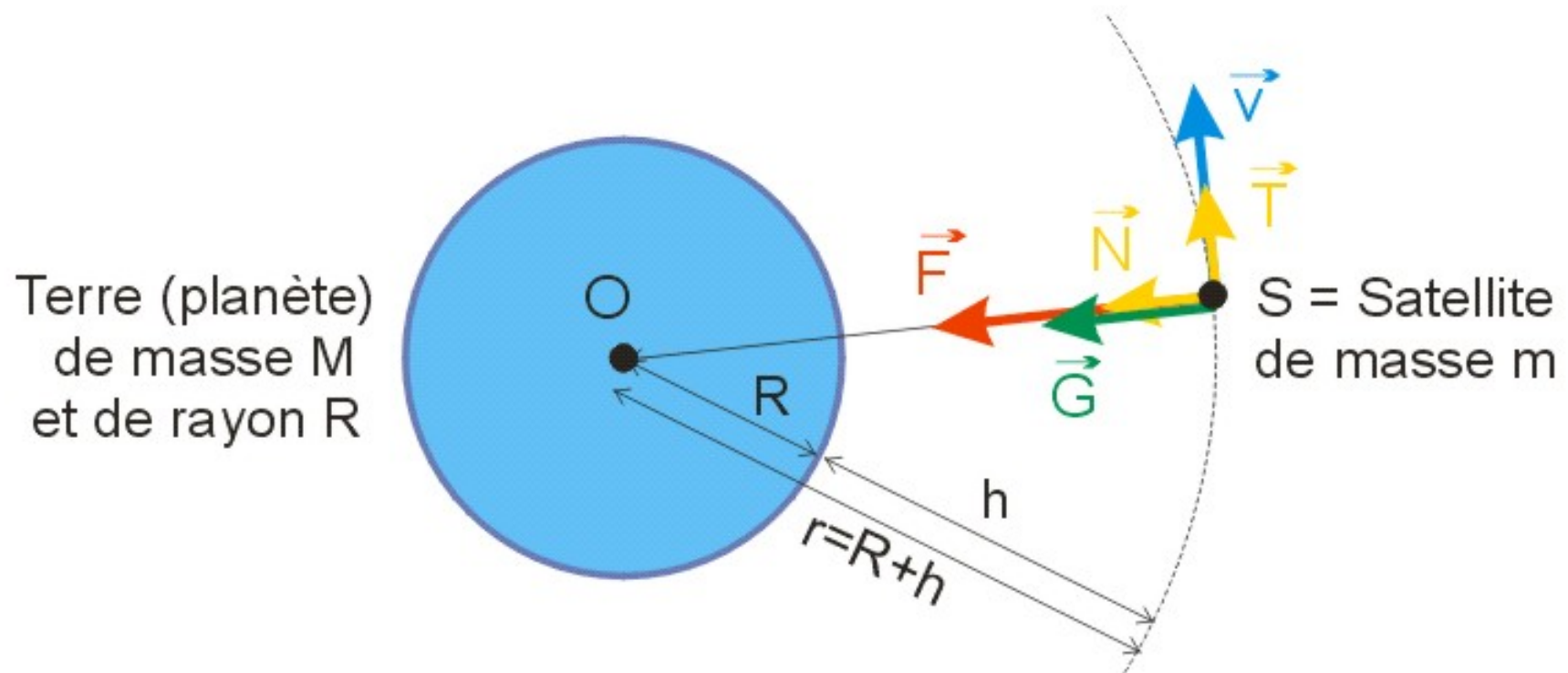


3) Repère: Repère de Frenet

Ce repère est toujours utilisé dans le cas du mouvement circulaire.

Quelles sont les forces extérieures s'exerçant sur S ?

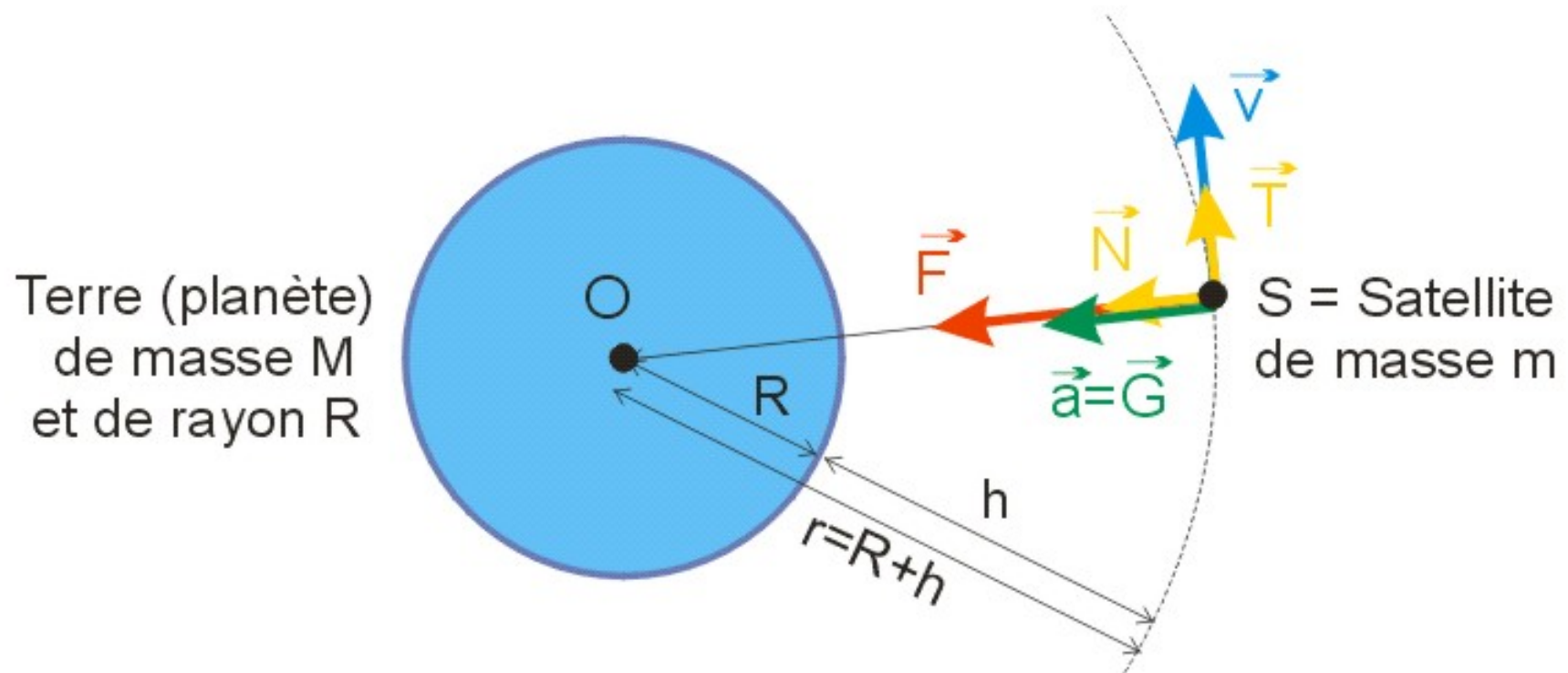
Comment fonctionnent les Satellites



4) Forces extérieures: Force de gravitation $\vec{F} = m\vec{G}$ exercée par la Terre (la planète).
Il n'y a pas d'autre force extérieure sur S !

Quelle est l'accélération de S ?

Comment fonctionnent les Satellites



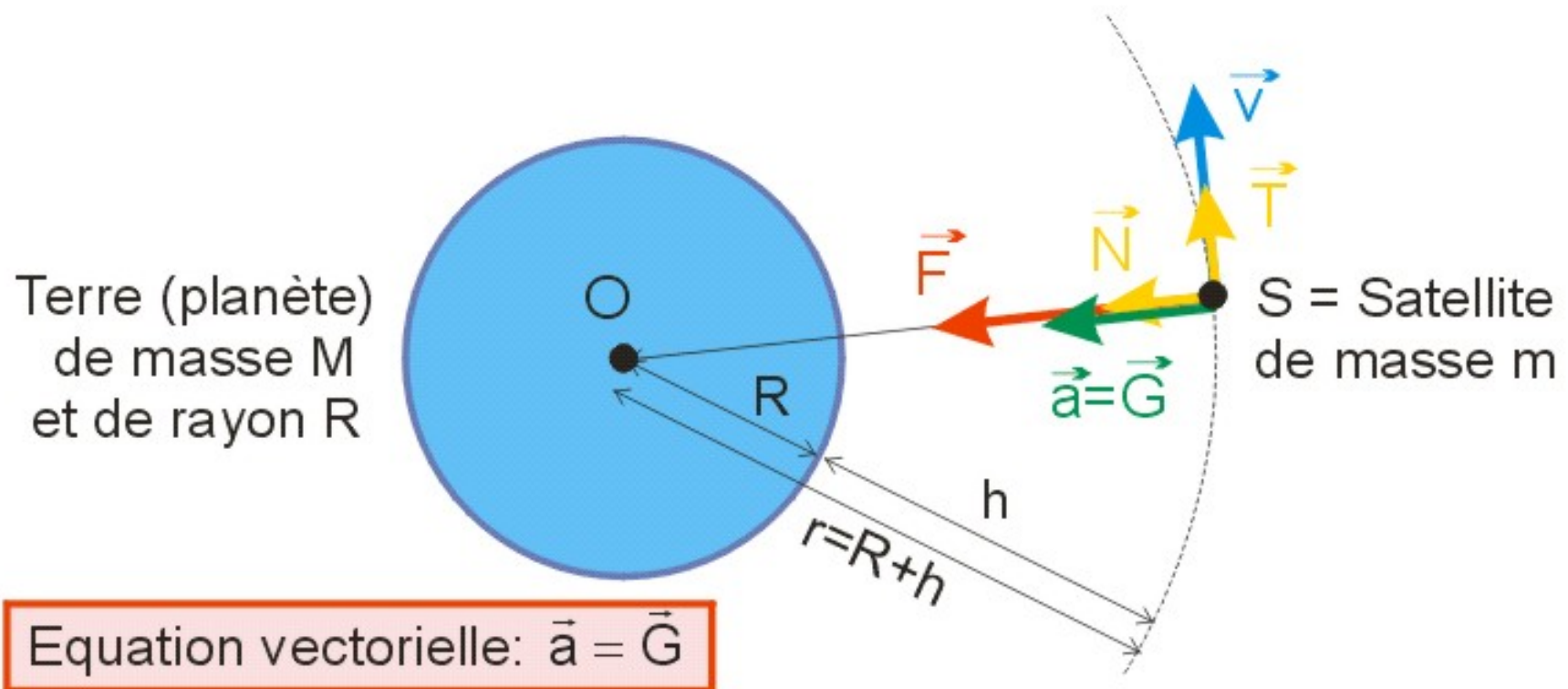
5) Accélération de S:

Appliquons le principe fondamental de Newton: $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{Or: } \vec{F} = m\vec{G} \quad \text{Donc: } \boxed{\vec{a} = \vec{G}}$$

Projetons l'expression vectorielle de $\vec{a}$ sur les directions de $\vec{T}$ et $\vec{N}$!

Comment fonctionnent les Satellites



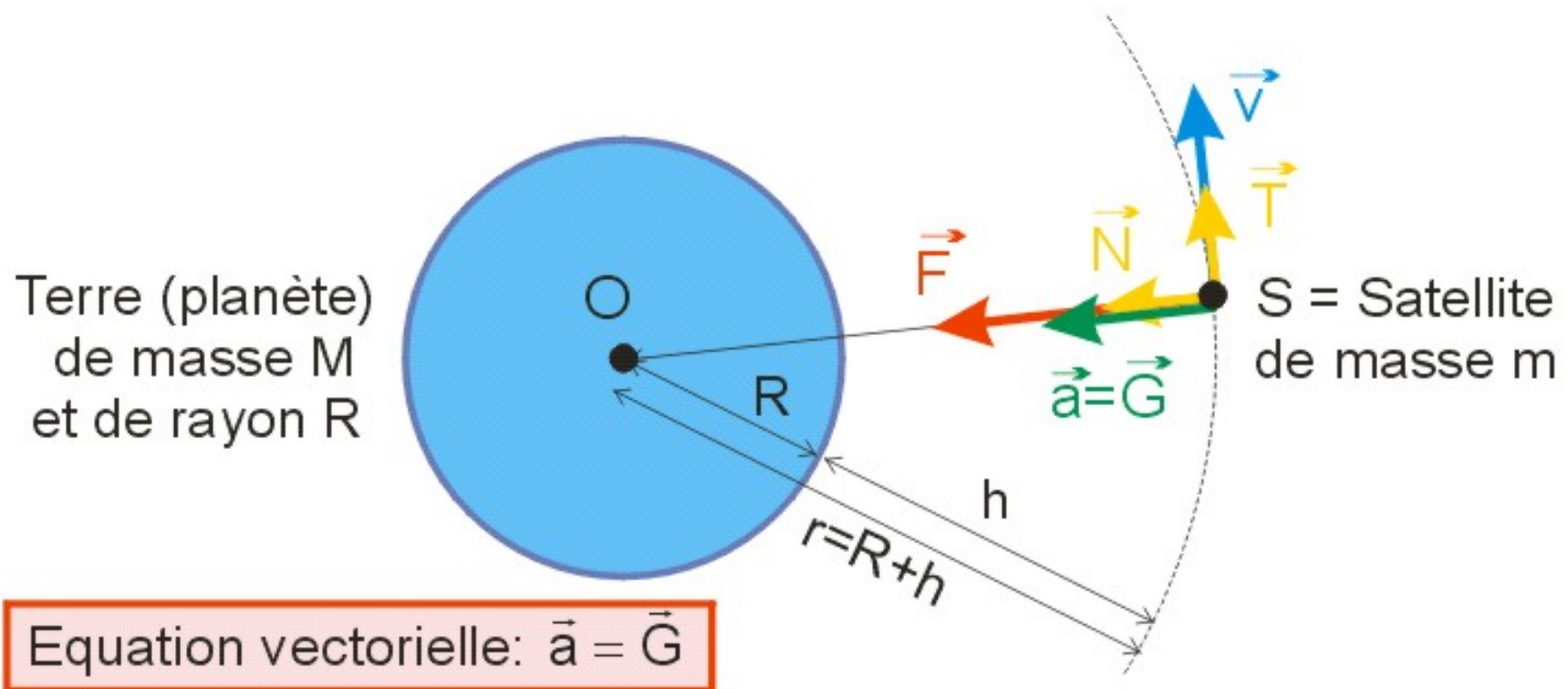
6) Projections de l'équation vectorielle sur les directions de $\vec{T}$ et $\vec{N}$

Suivant $\vec{T}$: $a_T = 0$ (1)

Suivant $\vec{N}$: $a_N = G$ (2)

Que peut-on conclure à partir de l'équation (1)?

Comment fonctionnent les Satellites



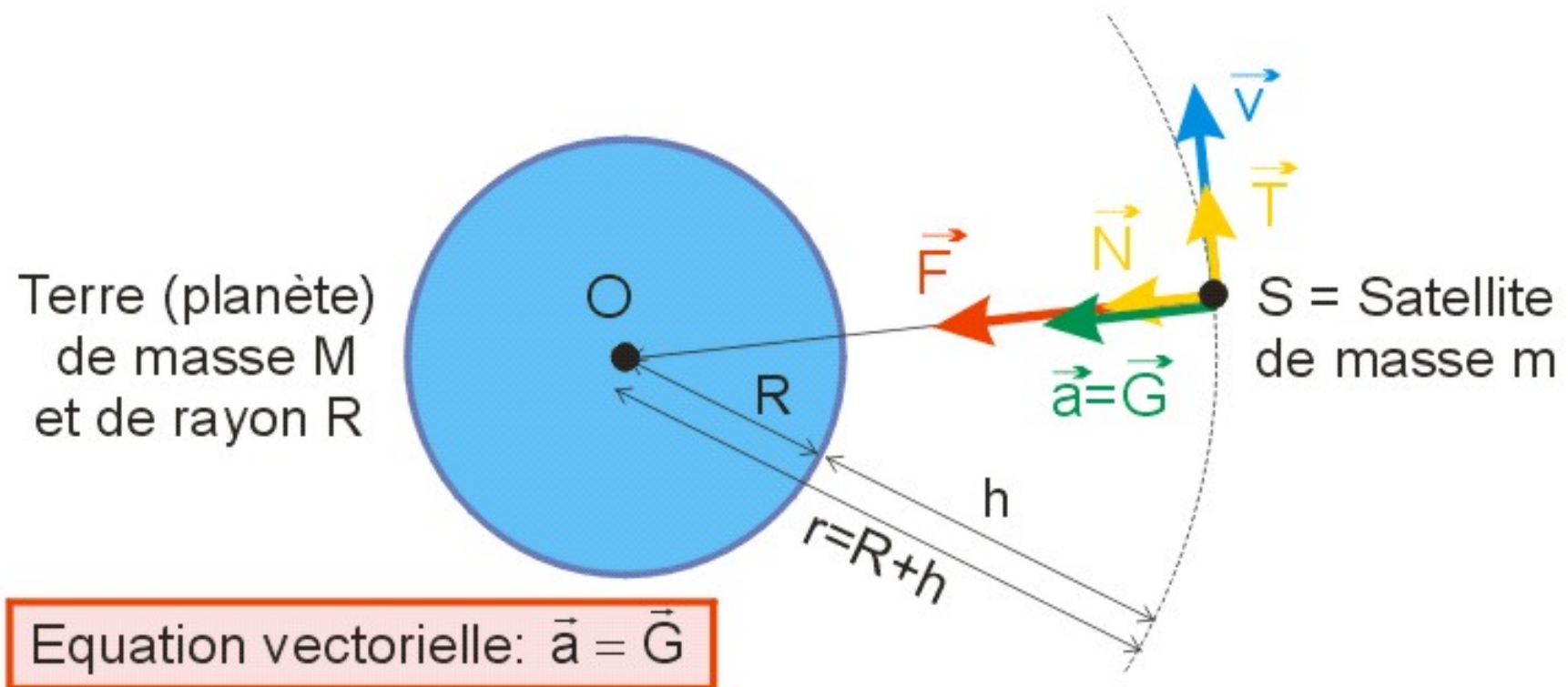
6) Projections de l'équation vectorielle sur les directions de $\vec{T}$ et $\vec{N}$

Suivant $\vec{T}$: $a_T = 0$ (1) $\Rightarrow$ $v_T = \text{constant}$ (mouvement uniforme)

Suivant $\vec{N}$: $a_N = G$ (2)

Que peut-on conclure à partir de l'équation (2)?

Comment fonctionnent les Satellites

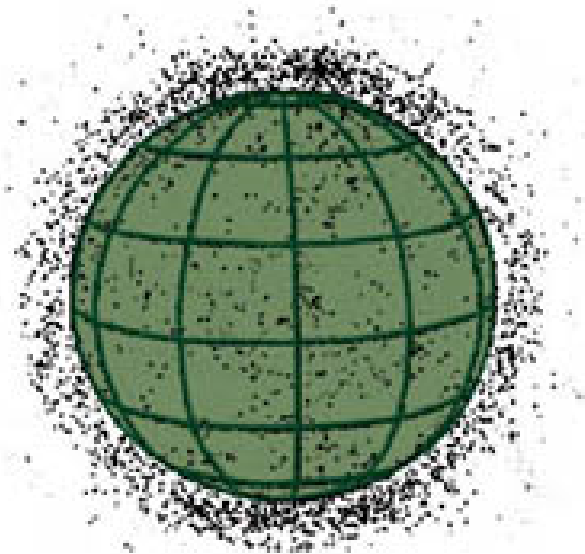


6) Projections de l'équation vectorielle sur les directions de $\vec{T}$ et $\vec{N}$

Suivant $\vec{T}$: $a_T = 0$ (1) $\Rightarrow v_T = \text{constant}$ (mouvement uniforme)

Suivant $\vec{N}$: $a_N = G$ (2) $\Rightarrow \frac{v^2}{r} = K \frac{M}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{KM}{r}} = \sqrt{\frac{KM}{R+h}}$ (relation entre v et h)

Les satellites



D'innombrables satellites tournent autour du globe terrestre.

Tarek Bejaoui



Les services

- Les services offerts par les communications ont subis des changements:
- D'une part, des nouvelles possibilités se créent pour les services personnels, multicast et mobiles
- D'autre part, certains services traditionnels par satellites fixes n'ont plus de place dues au déploiement de fibres optiques qui permettent de transmettre à plusieurs centaines de Mbps

Avantages des satellites par rapport aux câbles



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



Avantages des câbles

- Couches 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 cde Télécom, ou même de téléphone

Services entre points fixes (FSS)



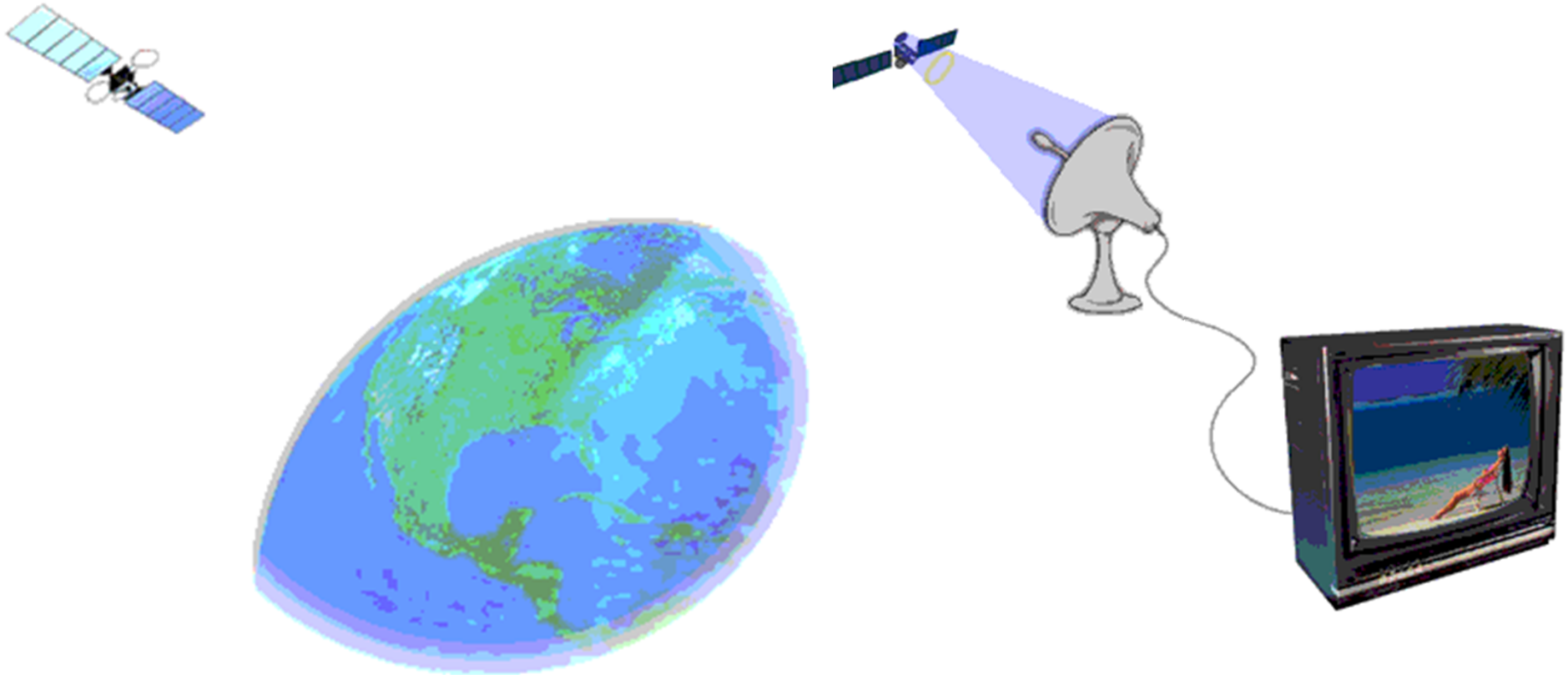
- Premiers services: Communications téléphoniques point-à-point
- Services aujourd'hui:
 - Transmission directe de télévision
 - Le VSAT (Very Small Aperture Terminal Networks): Les communications téléphoniques et de données, Internet.
- Multi-conférence point-à-point et point-à-multipoint

Services entre points fixes (FSS)



- Communications large bande pour connecter des réseaux locaux, et connecter des réseaux haut débit
- Satellites OBP (On Board Processing) avec des capacités de routage et de contrôle, Commutateurs HD

Services de Télévision et Vidéo



Les satellites permettent de transmettre des émissions télévisées et des communications téléphoniques.

Services de Télévision et Vidéo



Il y a 4 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 transmission 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- Direct to The Home)

Services de Télévision et Vidéo



- 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
- 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 et communication de données



- Les satellites sont utiles surtout là où il n'y a pas d'infrastructure de réseau terrestre:
- → La technologie VSAT est la plus économique pour atteindre des endroits éloignés.
- 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
- 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 1^{ère} 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

Services Satellites Mobiles (MSS)

- Plus tard, applications mobiles terrestres
- 1994: OPTUS Communications est le premier à donner des services mobiles terrestres (LMSS) à grande échelle: toute l'Australie, avec la 2^{ème} génération de mobiles, GEO.
- 1996: AMST (American Mobile Satellite Corp.) et Telesat Mobile Inc. Implémentent ce concept en Amérique du nord. GEO.

Services Satellites Mobiles (MSS)



- Couverture globale: utilisation de constellations de satellites LEO 3^{ème} génération des mobiles
 - Iridium (Motorola): 66 satellites LEO
 - Globalstar: 48 satellites LEO
 - ICO (Inmarsat): 10 satellites MEO
- Autres services (offerts par les mêmes satellites): localisation et navigation.



Domaine d'altitude

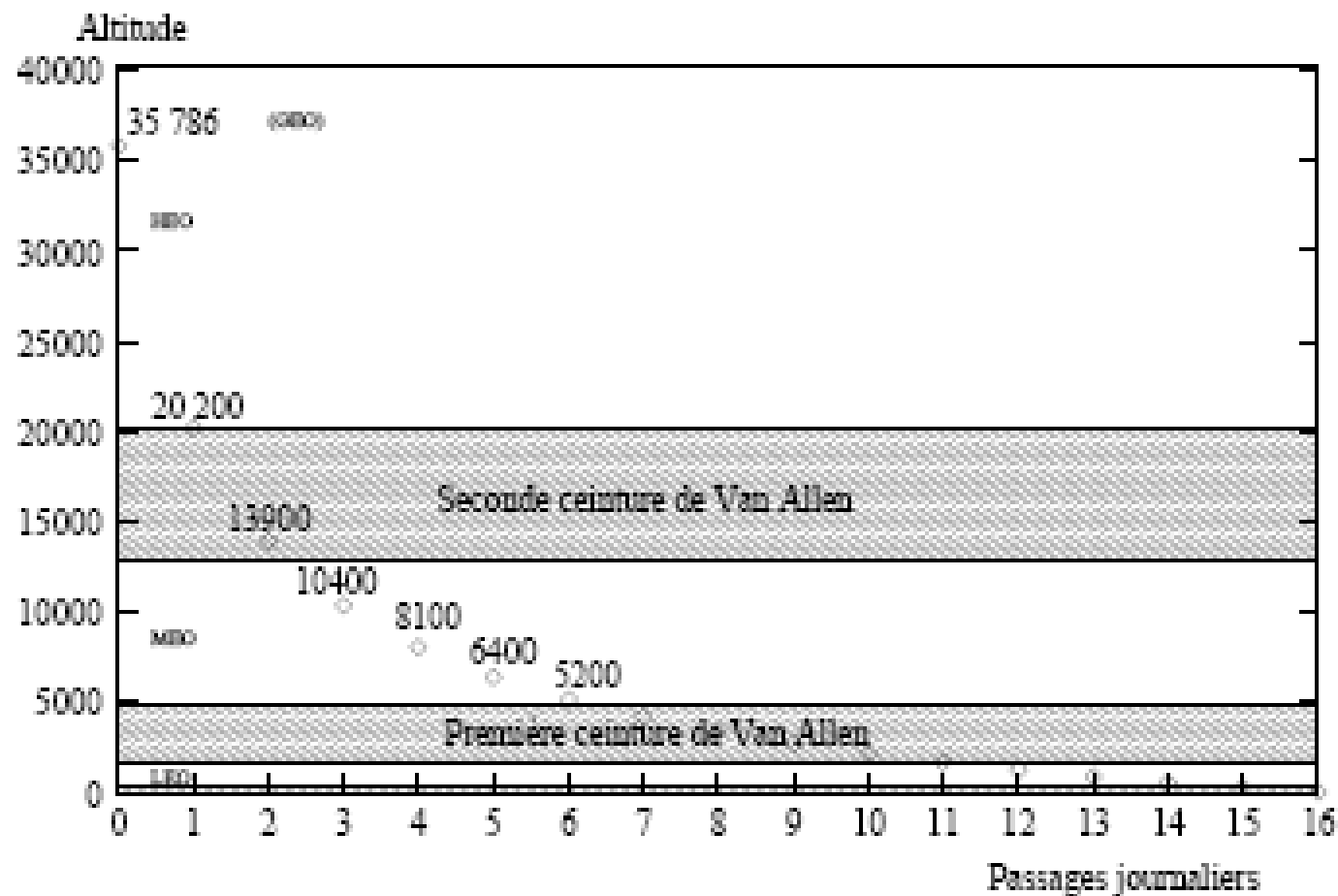
- Ces zones définissent 3 domaines d'altitude pour la mise en orbite:
- LEO (Low Earth Orbit) en dessous de 2000 km
- MEO (Medium Earth Orbit) entre 5000 km et 15 000 km
- HEO (High Earth Orbit) au-delà de 20 000 km (contient les GEO)
- Les orbites elliptiques MOLNYIA traversent les 2 zones (Archimedes, Ellipso).
- Durée de vie de ces satellites est réduite

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 à éviter : 1500 km – 5000 km
13000km – 20 000 km

Ceinture de radiation de Van Allen (« Radiation Belt »)



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 1000km, les satellites peuvent durer dans les 7 ans
- Pour les orbites plus élevés, style GEO, cela va jusqu'à 15 ans

Durée de vie des batteries



- Un autre facteur fortement limitant pour les LEO est dû aux batteries (cycles de charge/décharge)



Notion de couverture

- LEO:
 - Vitesse de déplacement $> 20000 \text{ km/h}$
 - temps de couvert. par un satellite $\sim 10 \text{ min}$
- MEO:

Une dizaine de satellites pour assurer la couverture mondiale.

Certaines constellations n'utilisent que des orbites équatoriales $\rightarrow$ la couverture, très bonne sur l'équateur, se détériore rapidement



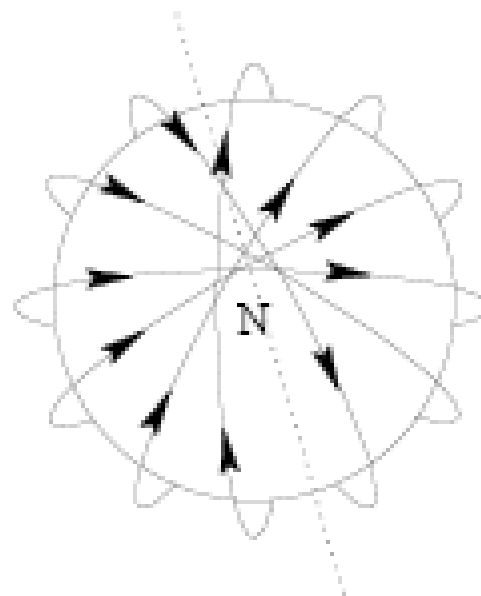
Notion de couverture

- Suivant l'angle d'élévation souhaité, au minimum entre 3 et 5 GEO pour couvrir la terre.
- Couverture difficile au delà des 75°
- Angle d'élévation petit pour les altitudes entre 45° et 75°

Couverture de la terre par des LEO

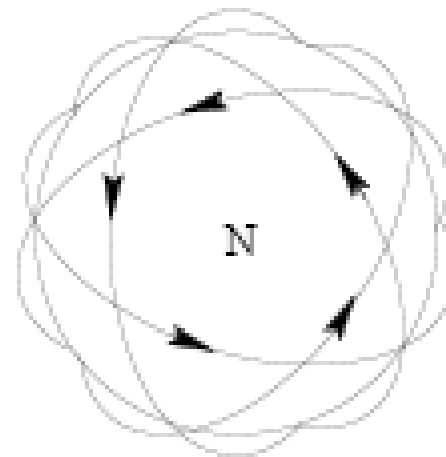


- Utilisation des trains de satellites sur une même orbite.
- 2 façons de disposer des satellites:



couture

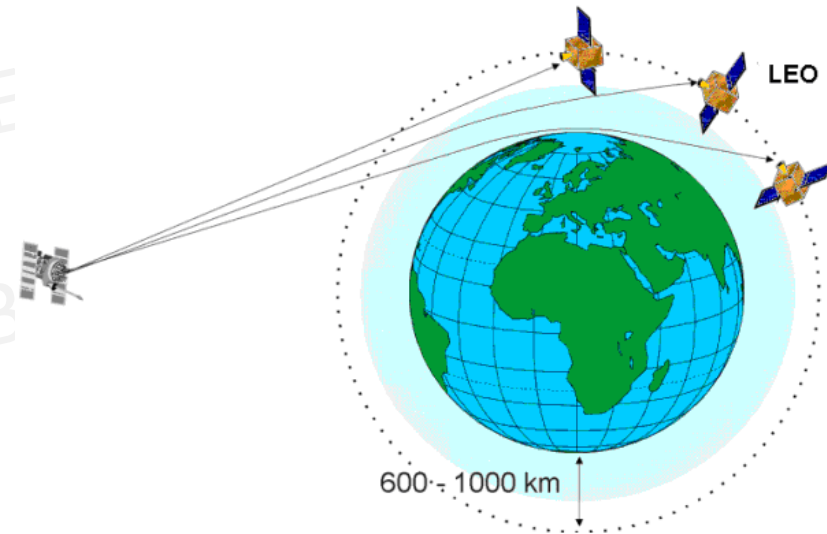
Constellation polaire



Constellation inclinée

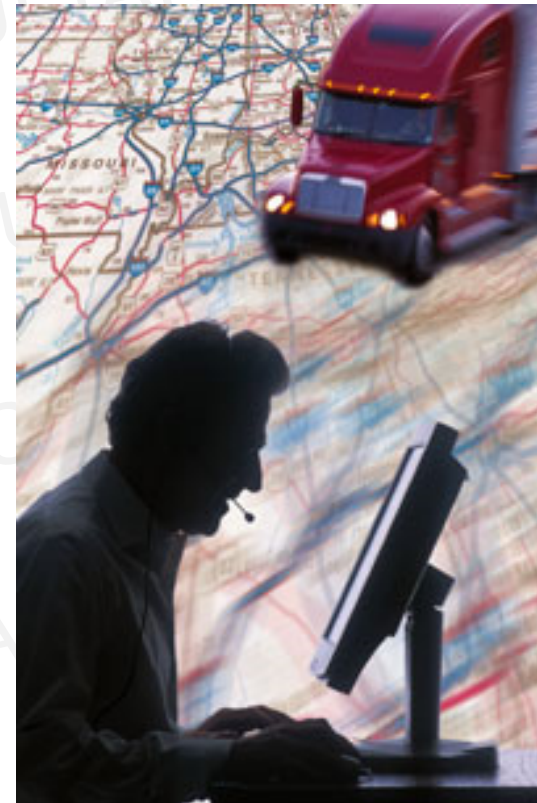
Low-Earth-Orbit (LEO)

- Altitude (600-1600 km)
- Temps de révolution: 90 min – 3 h
- Avantages:
 - Réduit le délai de transmission
 - Élimine la nécessité d'un équipement de réception encombrant.
- Inconvénients:
 - Zone de couverture plus petite
 - Durée de vie plus courte (5-8 ans) que GEOs (10 ans).
- Subdivisions: Little, Big, and Mega (Super) LEOs.



Petites Applications LEOs

- Bande de 0.8 GHz
- Petit équipement , faible coût
- Tracking des véhicules, Surveillance de l'environnement et communications data dans les 2 sens
- Utilisé pour des communications bandes courtes.



Satellites météorologiques LEOs

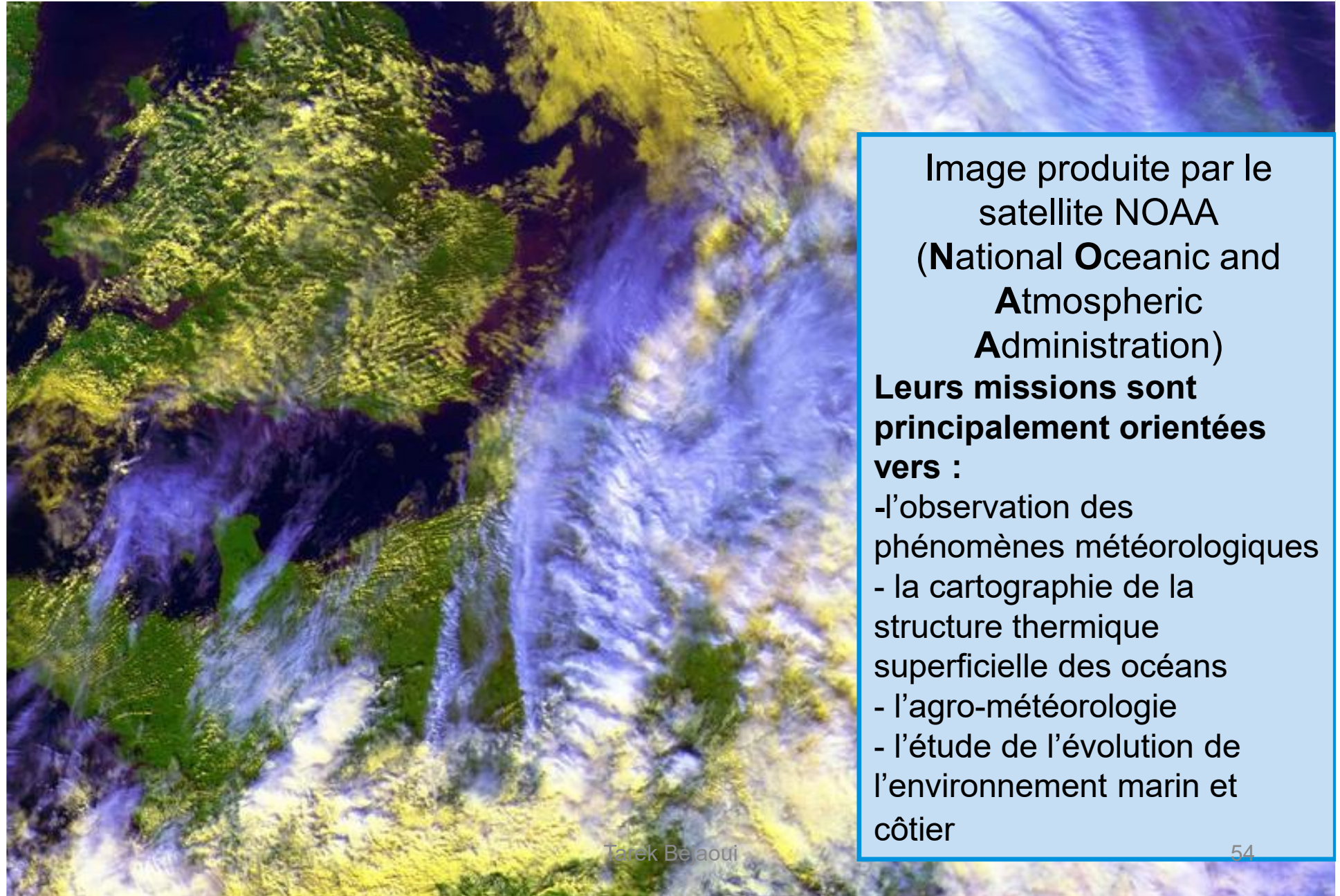
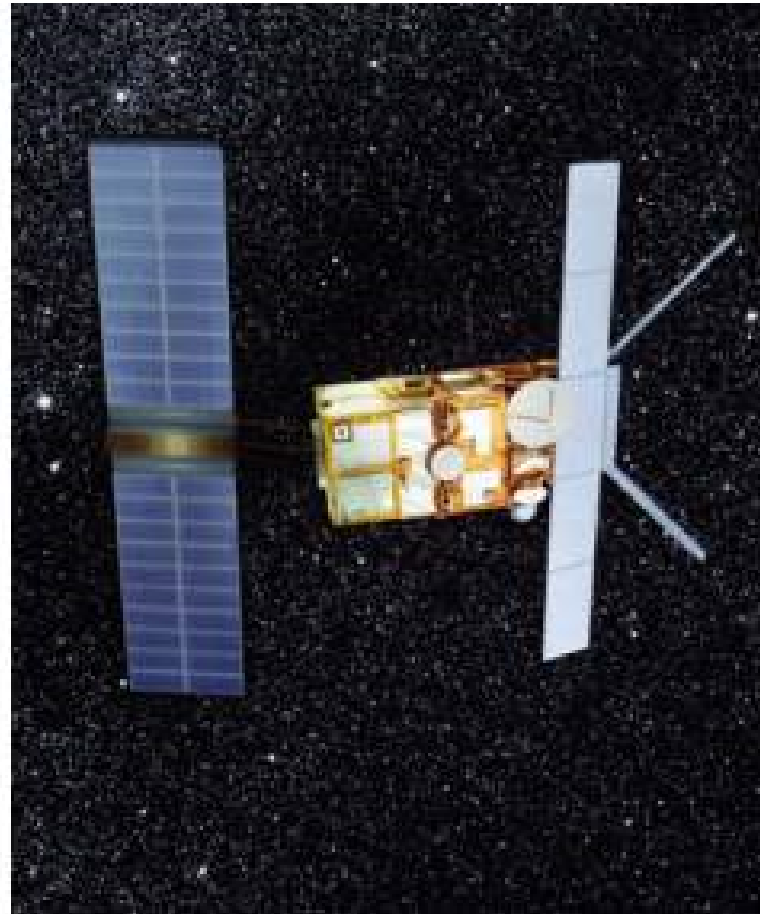


Image produite par le
satellite NOAA
(**N**ational **O**ceanic and
Atmospheric
Administration)

**Leurs missions sont
principalement orientées
vers :**

- l'observation des
phénomènes météorologiques
- la cartographie de la
structure thermique
superficielle des océans
- l'agro-météorologie
- l'étude de l'évolution de
l'environnement marin et
côtier

Petites Applications LEOs



Les satellites ERS (Earth Remote Sensing) évoluent à une altitude de 480 km, et sont destinés à observer et étudier la superficie terrestre.

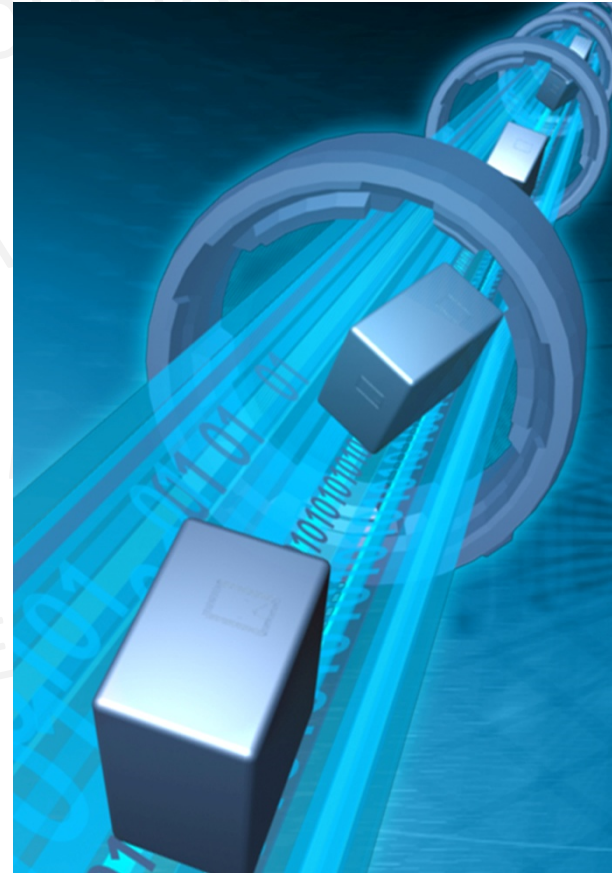
Grosses Applications LEOs

- Bande 2 GHz ou plus
- Utilisé pour des appareils à haut-débit, les communications de données à large bande passante, et la vidéoconférence. Ils supportent des services voix et données à débit élevé.



Applications Mega (Super) LEOs

- Bande 20-30 GHz
- Supporte principalement des données à haut débit. Ces systèmes sont optimisés pour les données à commutation de paquets plutôt que de la voix. Ils partagent les mêmes avantages et inconvénients d'autres LEOs et sont destinés à fonctionner avec des liens inter-satellites afin de minimiser les temps de transmission et éviter les coupures de communications.



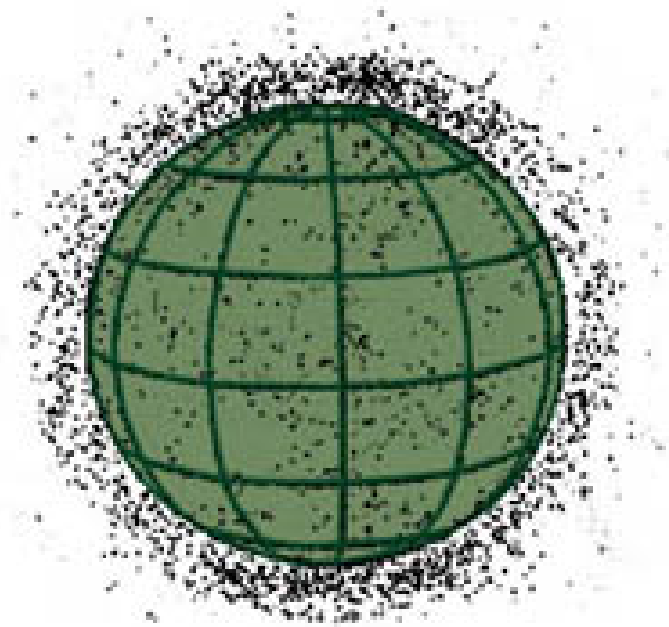
Telescope Hubble

- Classification: LEO
- Orbit: 375 miles, 600 km.
- Temps de révolution: 100 min.
- Vitesse: 27000 km/hr

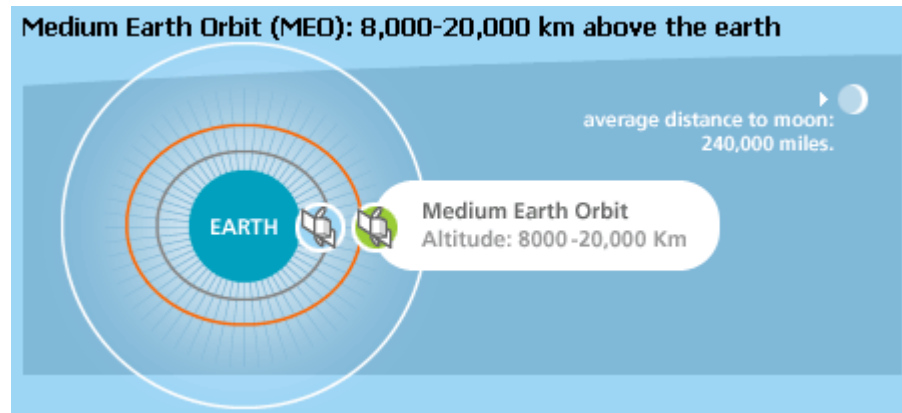


Des débris dans l'espace

- Selon le U.S. Space Command (USSC), il y a plus de 8000 objets plus grand qu'un ballon de foot, circulant autour du globe.
- Parmi eux, plus de 2000 sont des satellites (fonctionnels ou pas).



Middle-Earth-Orbiting (MEO)



➤ Les orbits MEOs sont situés à des altitudes entre 9000 km et 15000 km

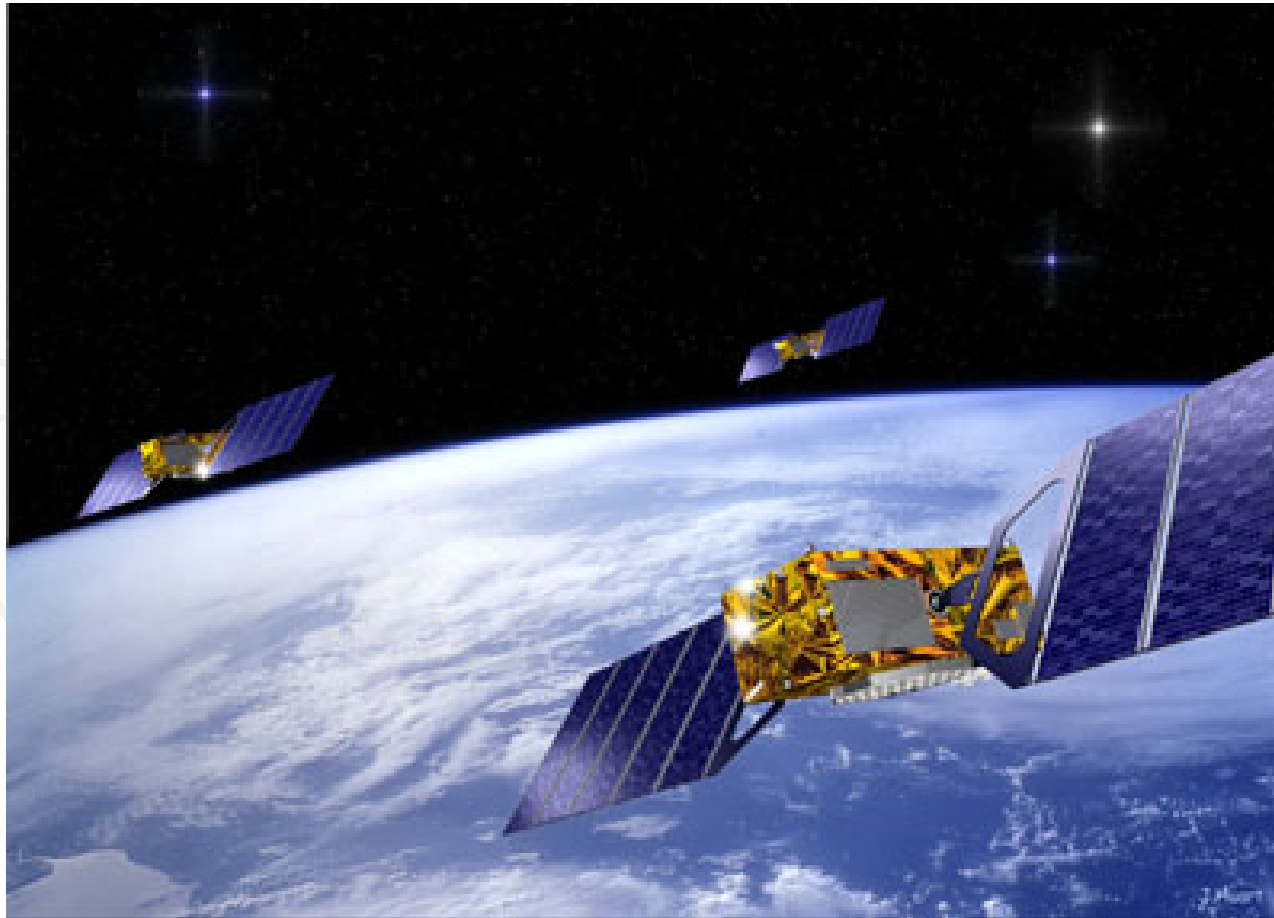
➤ Ces orbites sont principalement réservés aux communications satellites qui couvrent les poles nord et sud.

➤ A la différence de l'orbite circulaire des satellites géostationnaires les MEOs sont placés dans des orbites elliptiques (forme ovale).

➤ Environ une douzaine de satellites en orbite autour de la Terre sont nécessaires pour assurer une couverture continue mondiale, 24 heures par jour.



GPS: C'est quoi?



Le système GPS (Global Positioning System) nécessite un grand nombre de satellites évoluant à basse altitude autour de la Terre (400 km).



GPS: C'est quoi?

Une constellation de 24 satellites

➤ Le Global Positioning System (GPS) est un système de radio-navigation formé d'une constellation de 24 satellites et leurs stations terrestres.

➤ Ils sont constamment en mouvement, faisant 2 tours complètes d'orbites dans moins de 24 heures.

➤ Ces satellites se déplacent à la vitesse approximative 11200 km/h



Satellites GPS

Nom:	NAVSTAR
Fabricant:	Rockwell International
Altitude:	10,900 miles nautiques
poids:	1900 lbs (en orbit)
Taille:	5.6 m avec panneaux solaires étendus
Période Orbitale:	12 heures
Plan Orbital:	55 degrés au plan équatorial
Durée de vie:	7.5 ans
Constellation courante :	24 Block II

Les satellites sont placés de sorte qu'un minimum de cinq satellites sont en vue à tous les points du globe.



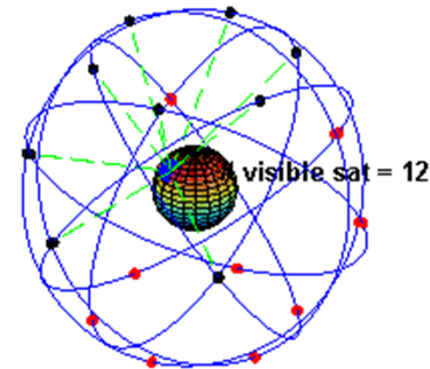
GPS: Comment ça fonctionne

Satellites sont des points de référence pour la localisation sur terre

➤ L'idée derrière le GPS est d'utiliser les satellites dans l'espace comme des points de référence pour la localisation sur terre.

➤ Les satellites GPS utilisent la "triangulation," un système où le récepteur GPS mesure la distance en utilisant le temps de transmission des signaux radio.

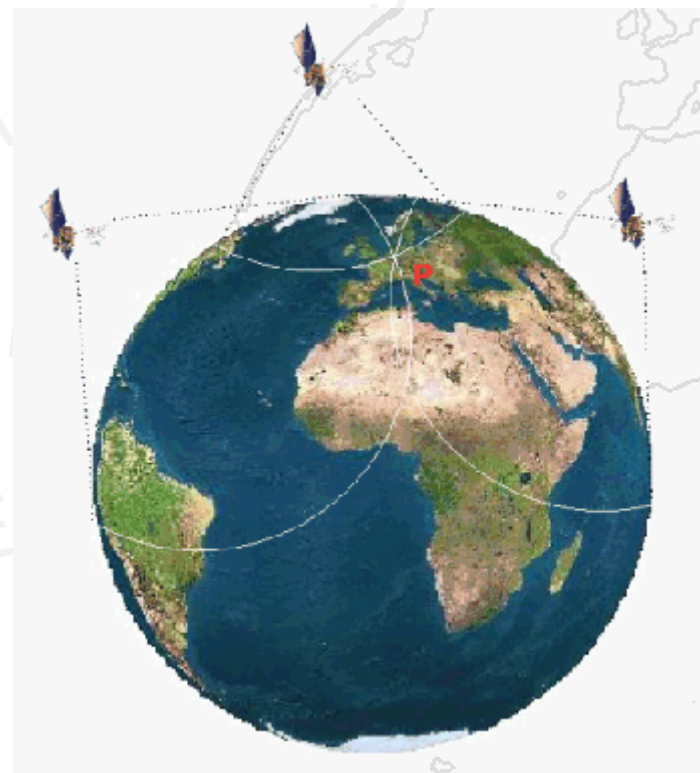
➤ En utilisant la triangulation, on peut mesurer notre distance et trouver la position sur terre à travers 3 satellites.



GPS: Les contraintes

Les satellites sont précis mais non parfait.

- Bien que les positions des satellites sont constamment surveillées, ils ne peuvent pas être suivis toutes les secondes.
- Les horloges atomiques qu'ils utilisent sont très très précises mais elles ne sont pas parfaites. Des écarts en minutes peuvent se produire, et ceux-ci se traduisent par des erreurs de mesure du temps de déplacement.
- Problème du multi-trajets





GPS: Qui utilise GPS ?

GPS a une variété d'applications

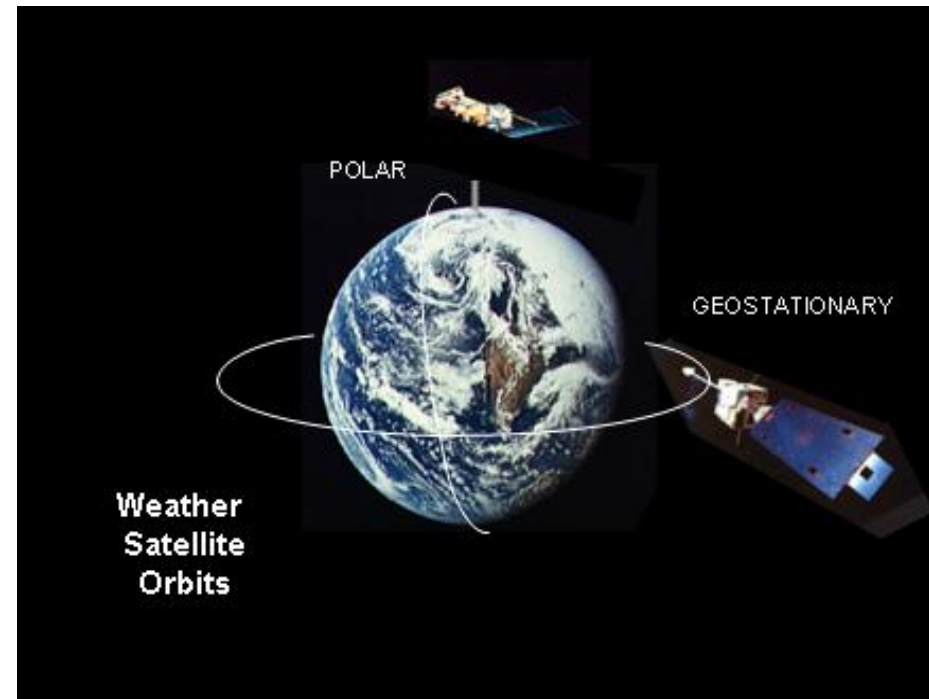
- **Terre:** diverses utilisations
- **Mer:** navigation
- **Air:** navigation



Tarek Bejaoui

Geosynchronous-Earth-Orbit (GEO)

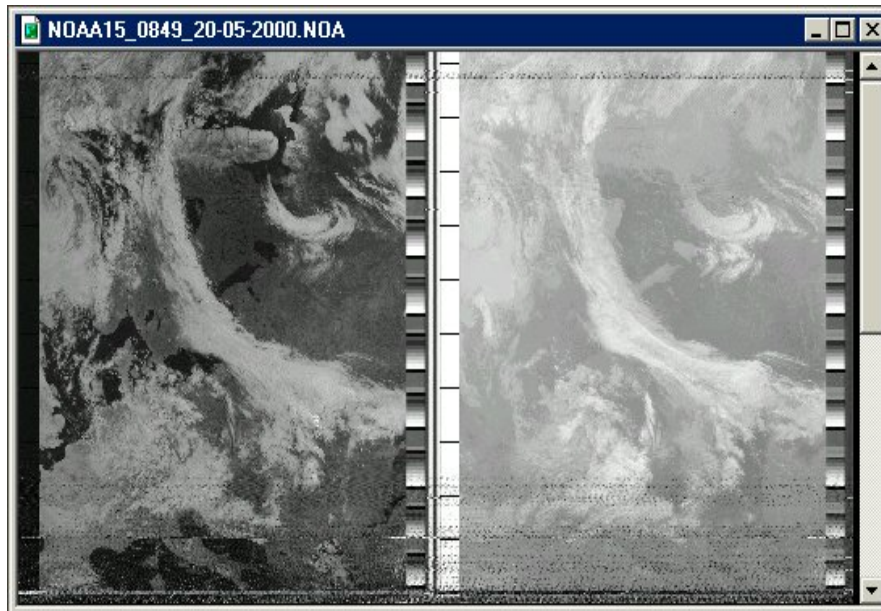
- L'orbit est synchrone avec la rotation de la terre.
- De la terre, le satellite paraît fixe.
- L'altitude est d'environ 36000 km
- Couverture jusqu'à 40% de la planète par satellite.



Les principes de base des GEOs

- Les satellites géostationnaires sont couramment utilisés pour les communications, les observations météo.
- La durée de service typique prévue d'un satellite géostationnaire est 10-15 ans.
- Parce que les satellites géostationnaires tournent autour de l'équateur, ils ne sont pas capables de couvrir les latitudes les plus au nord et les plus au sud.

GEOs et météorologie



- L'altitude est choisie de façon à faire un tour toutes les 24 heures, qui représentent aussi la durée de rotation de la terre.
- Ceci produit l'animation des nuages que vous voyez à la télé.
- Peut prendre des images approximativement toutes les demi-heures.

GEOs et météorologie



Le satellite géostationnaire METEOSAT produit toutes les demi-heures des images, en rayonnement visible et infrarouge, du globe terrestre.

Les satellites météorologiques

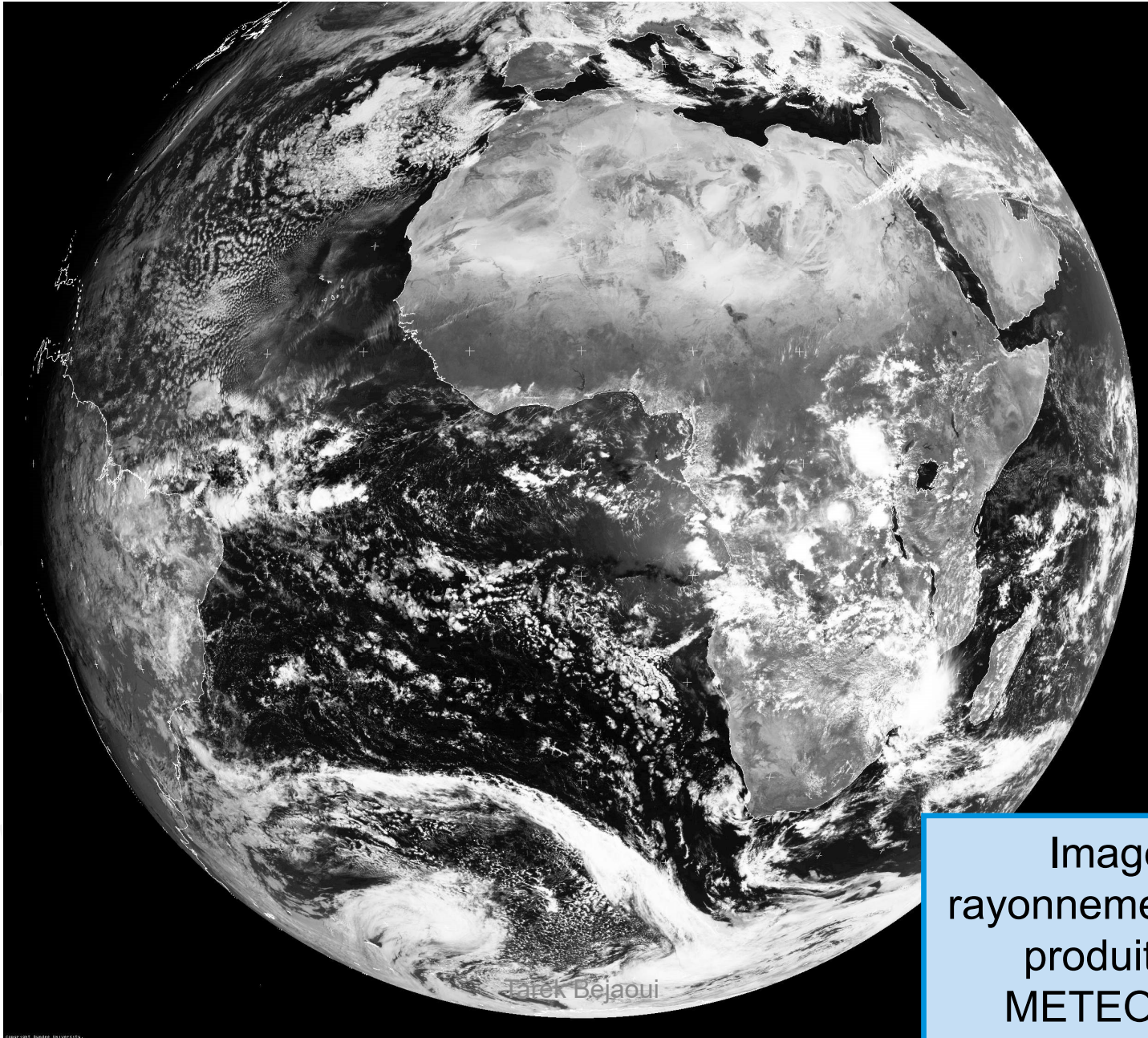
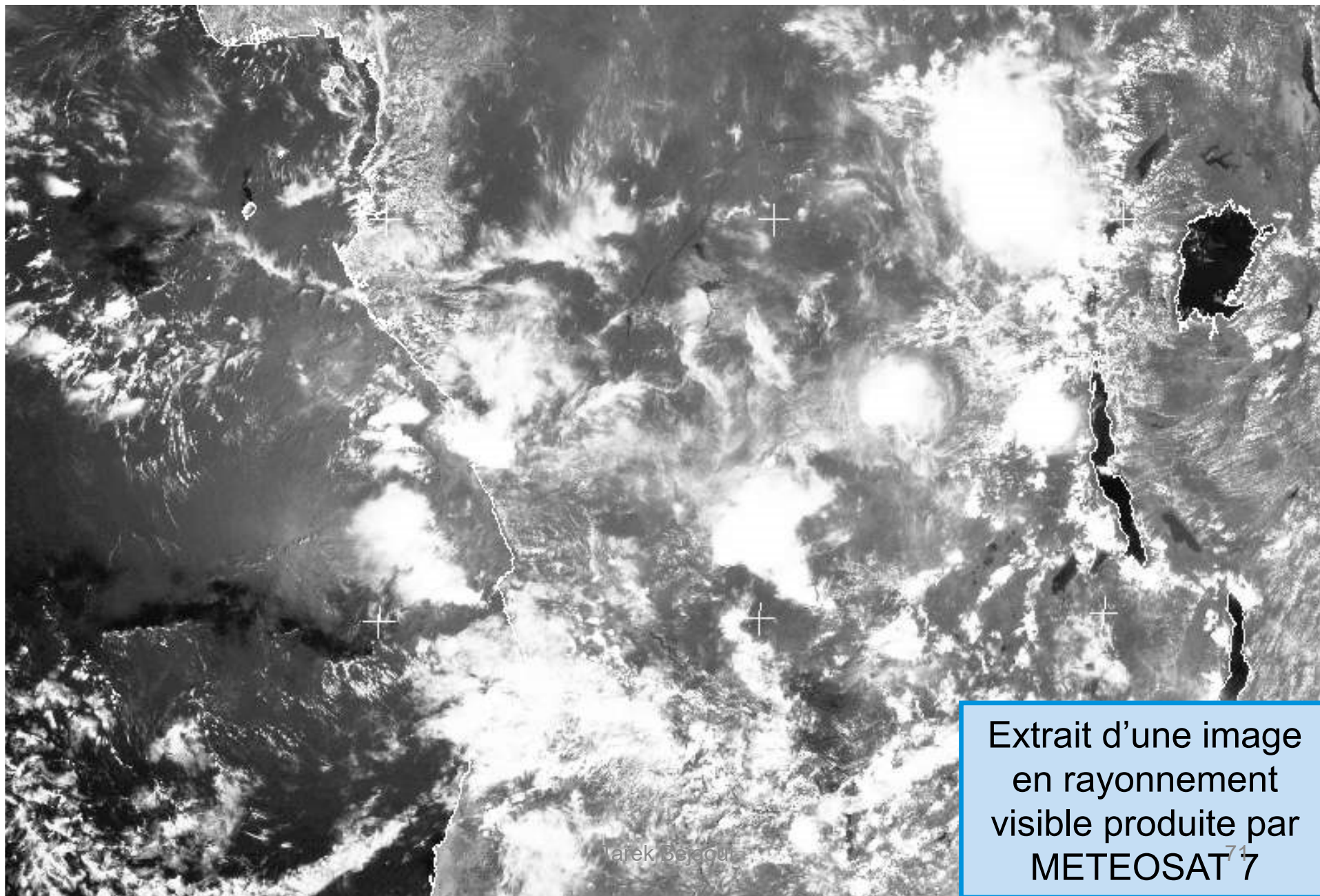


Image en
rayonnement visible
produite par
METEOSAT 7

Les satellites météorologiques



Extrait d'une image
en rayonnement
visible produite par
METEOSAT 7

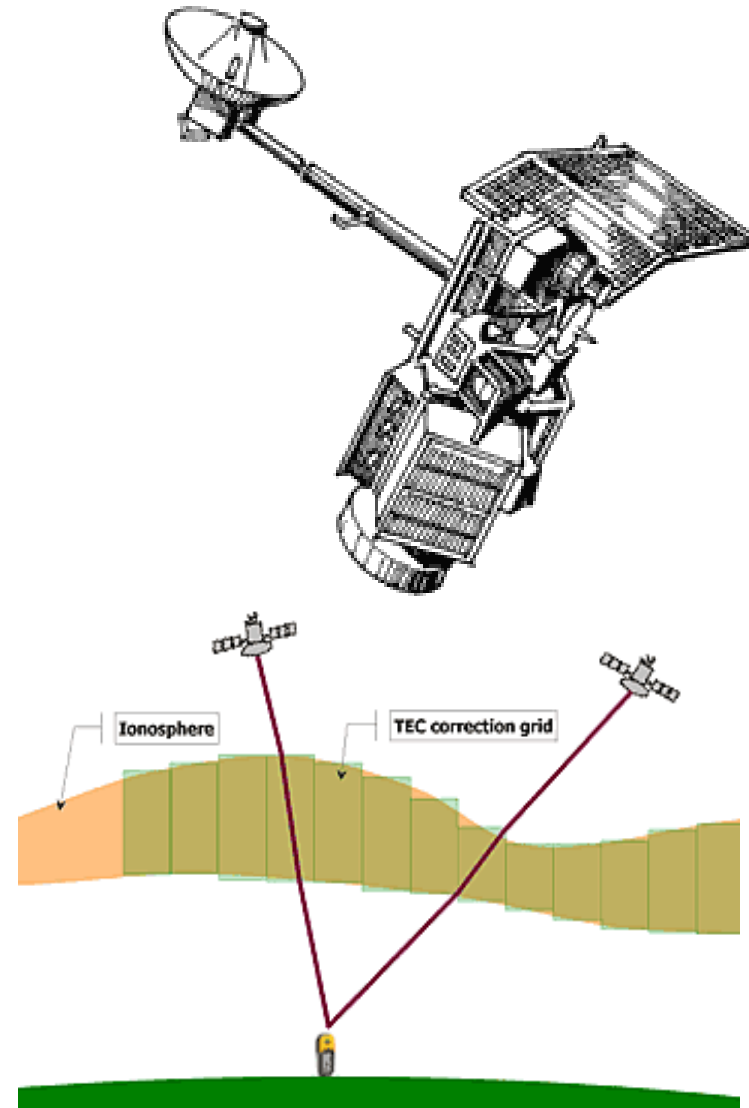


Caractéristiques des GEOs

- Les mesures qui sont prises sont sous la forme de signaux électriques qui sont numérisés et transmis aux stations terrestres.
- Les instruments ont habituellement:
 - de petits télescope et antenne
 - Un mécanisme de balayage
 - Un ou plusieurs détecteurs qui détectent les rayonnements visible, infrarouge ou à micro-ondes.

Caractéristiques des GEOs

- Les satellites sont positionnés tous les 4-8 degrés.
- A peu près 300 satellites GEO satellites sont en orbite.
- Fournissent des images du tiers de la surface de la terre toutes les 23 minutes avec une résolution de 4 Km.



Avantages et inconvénients des GEOs

➤ Advantages:

- Images météo
- Diffusion de la TV non interrompue
- Utilisés pour suivre en continu l'évolution des phénomènes naturels

➤ Inconvénients:

- Le temps d'aller-retour satellite-terre est important
- Augmente la difficulté des conversations téléphoniques
- Les GEOs ne sont pas positionnés aux points les plus éloignés du pôle nord et du pôle sud.



Le lien satellite (1)

Ionosphère - gaz ionisé et électrons libres à cause des rayons UV et X du soleil.

A partir de 100km d'altitude.

Densité max: environ 10^6 elect/cm³. (Plus le jour, moins la nuit).

Le max est atteint à 250km la nuit, 350km le jour.

Durant la nuit: recombinaison du gaz ionisé et des électrons libres.

Mais plus on monte, moins le gaz est dense, donc moins il y a de collisions et de recombinaisons.



Le lien satellite (2)

La ionosphère a une très grande influence sur les ondes radios.

Des réflexions des ondes moyennes MW (500KHz) déjà à 100km (couche E),

et des ondes courtes SW (2-8MHz) plus haut (couche F).

Des fréquences plus élevées ne sont pas réfléchies: VHF (30MHz), UHF(300MHz, longueur d'onde 1m - antenne dipôle optimale: 2m).

Puissance Electromagnétique



$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c^2}{(4\pi)^2 D^2 F^2}$$

BE où

P_r est la puissance qui atteint l'antenne du récepteur,

P_t est la puissance du signal transmis,

B G_t est le gain de l'antenne du transmetteur,

G_r est le gain de l'antenne du récepteur,

c est la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 m/sec$)

D est la distance en mètres,

F est la fréquence en Hz.

Puissance Electromagnétique



Les calculs se font en dB:

$$X[dB] = 10 \log_{10} X$$

BE Ex: 10W s'écrit 10 dBW, 100W s'écrit 20 dBW.

$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_0,$$

B où

$$A_0 \stackrel{\text{def}}{=} 10 \log_{10}(F^2 D^2) - 147.6 \quad (1)$$

représente l'atténuation due au lien dans le vide - "free space attenuation".

Exemple de calcul de puissance (1)



Ex. de transmission de vidéo numérique de débit de 40 Mbps, 3.95 GHz, bande C.

Satellite Galaxy VI, localisée à la longitude de 74° à l'est, GEO. Mesures par rapport à Los-Angeles, où l'angle d'élévation est 30° .

Exemple de calcul de puissance (2)



Transmission du satellite

- 1. Puissance de transmission (10W): 10dBW

- B ■ 2. Pertes dans le guide d'onde du transmetteur: 1.5 dB
(environs 40% de pertes).

- 3. Gain de l'antenne: 27.0 dBi

Plus la surface couverte par l'antenne est grande, plus le gain est petit. Le “i” dans l'unité dBi est pour “isotrope”: le gain par rapport à une antenne qui transmet uniformément. 27 dBi correspond à un gain de 500.

- 4. EIRP (Effective isotropique radiated power) $\stackrel{\text{def}}{=} 1-2+3 = 35.5\text{dB}$. (En pratique, seule une partie peut être utilisée selon le mode d'accès)

Exemple de calcul de puissance (3)



- 5. Perte A_0 : 196 dB.

Pour GEO, et pour des fréquences de 1 GHz à 30 GHz, on a A_0 entre 183 dB et 213 dB.

A cela s'ajoute la correction due à l'angle (correction max à 0° est 1.6 dB).

- 6. Absorption atmosphérique: 0.1 dB

Augmente quand l'angle décroît, car l'onde traverse une couche plus large d'atmosphère.

Augmente avec l'humidité et la pluie.

- 7. Gain de l'antenne de réception (diam. 3.2 m) 40.2 dBi

$G = 10 \log(108\eta f^2 d^2)$, où f est en GHz, d (diamètre) en m, η l'efficacité de l'antenne ≤ 1 .

Dans notre cas $\eta = 0.6$.

- 8. Pertes dans le guide d'onde du récepteur: 0.5 dB

- 9. Puissance reçue: -121.7 dBW (4-5-6+7-8)

Exemple de calcul de puissance (4)



Ce chiffre ne suffit pas pour déterminer la qualité de la réception.

Il faut calculer aussi les bruits, et le rapport de puissance signal/bruit.

Le bruit est proportionnel à la bande passante.

Les bandes de fréquences :

Les bandes satellites



- L: 1-2 GHz
- S: 2-4 GHz
- C: 4-8 GHz
- X: 8-12.5 GHz
- Ku: 12.5-18 GHz
- K: 18-26.5 GHz
- Ka 26.5 - 40 GHz

Les bandes de fréquences :

Les bandes radio et télé



- AM - autour de 1 MHz,
- HF - autour de 10 MHz,
- VHF - autour de 100 MHz,
- UHF - à partir de 300 MHz, jusqu'à 900 MHz.

Les bandes de fréquences : Comparaisons



- Plus la fréquence est élevée, plus l'antenne est petite .
D'où l'avantage de fréquences élevées.
- Plus la fréquence est élevée, plus les bandes passantes disponibles pour les applications sont grandes.
- La propagation se détériore en augmentant les fréquences.
- Les meilleures propriétés de propagation: entre 1 et 2.5 GHz (bandes L et S), utilisées pour les MSS (Mobile satellite service: communications entre avions, communication pour les voitures, navigation) et autres applications.
- Des services large-bande (DTH - Direct to Home TV, et B-ISDN) utilisent de bandes plus élevées, traditionnellement C, et de plus en plus - Ku et Ka.



Bande L

Service:

MSS (terminaux mobiles etc)

TV UHF

Téléphones cellulaires (c.f. Iridium)

Liens de télévision pour les studios.

B 1 GHz à 2 GHz. Utilisée depuis début 1970.

Initialement, seuls 30MHz de “uplink” et “downlink” ont été alloués pour les applications mobiles.

Les premiers MSS avaient des paraboles (antenne en forme d’assiette) qui devaient pointer directement sur le satellite, et demandaient des équipements larges, ou bien des antennes d’une longueur de 1m.

Aujourd’hui: équipements de la taille d’un cartable, et téléphones portables. L’antenne n’a pas besoin de pointer dans la direction du satellite.

Pas d’atténuation due à la pluie. Mais dégradation du lien à cause du ionosphère.



Bande S

2-4 GHz. Utilisée pour des activités de recherches gouvernementales autour du globe, surtout NASA. En particulier, des activités de recherche dans l'espace profond.

Réglement adoptée par le ITU pour des applications de MSS et de mobiles.

Plus de pertes atmosphériques que la bande L.



Bande C

4-8 GHz. La première bande à être utilisée pour des applications commerciales.

Applications: Fixed Satellite Service (FSS) ex: DTH, services micro-ondes terrestres.

B

La bande passante totale:

Multiplions par 2 en utilisant les 2 polarisations,

Multiplions par 180 en supposons 2° d'écart entre des satellites adjacents.

Facteur de 2-5 de réutilisation spatiale

On obtient 568 GHz à 1.44 THz, comparable aux bandes passantes dans les réseaux terrestres.

Les pays asiatiques préfèrent la bande C car elle est moins sensible à la pluie.

Des bonnes propriétés de propagation (scintillation, pluie).

Problème: grandes antennes: au moins 1m de diam., typiquement 3m.

Des transmetteurs terrestres vidéos puissants utilisent souvent des antennes de 7m à 13m de diam.



Bande X

8-12.5 GHz.

- [-] Surtout des applications FSS militaires, ainsi que météorologiques.
- [-] Les équipements sont plus chers que ceux de la bande C.



Bande Ku

12.5-18GHz.

Applications: FSS (surtout DTH) et BSS (Broadcast Satellite Service)

services micro-ondes terrestres

applications interactives de communications de voix et de donnés.

Antène de 45cm de diamètre. VSAT (Very Small Aperture Terminal).

En tenant compte la polarisation, des satellites espacés par 2° et la réutilisation spatial (facteur de 10), on obtient une bande passante de 4 THz.

Plus vulnérable à la pluie.



Bande Ka

Beaucoup de bande passante disponible.

On peut utiliser des antennes plus petites, ce qui permettrait une densité plus grande (que 1 sur 2°) de satellites.

Meilleure utilisation spatiale, car il est plus facile de créer des faisceaux concentrés.

Très vulnérable à la pluie.

Des antennes très petites: USAT (Ultrasmall aperture terminals) permettent la transmission bidirectionnelle de débit de 384 Kbps - 2 Mbps.



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

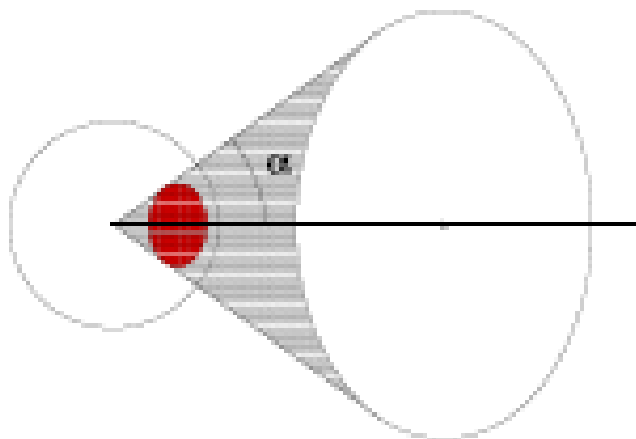
Comment s'en sortir ???



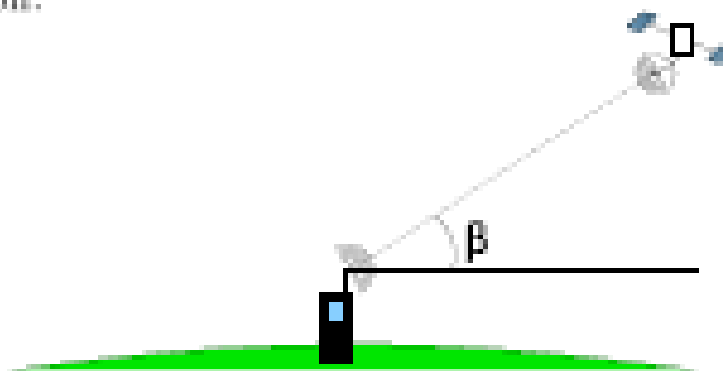
Notion de couverture :

Angle de couverture et angle d'incidence

L'angle solide α détermine la zone de couverture du satellite.



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



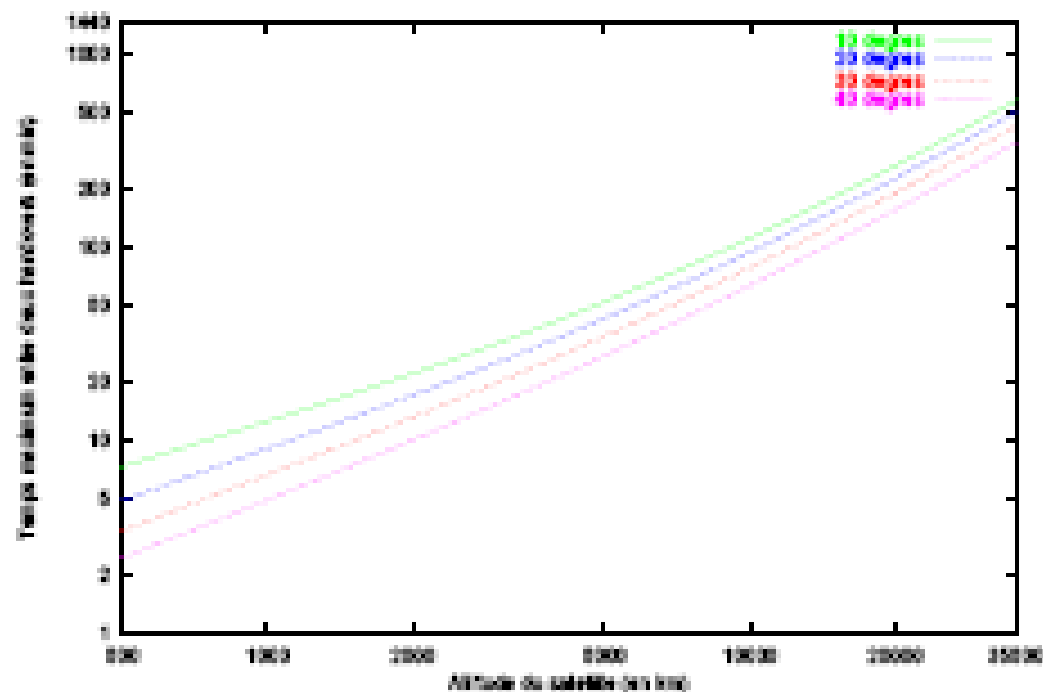




Notion de couverture :

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



Notion de couverture :

Couverture de la terre par des GEO

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

Couverture difficile au delà des 75°.

Angle d'élévation petit pour les altitudes entre 45° et 75°.

Notion de couverture :

Couverture de la terre par des MEO



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.

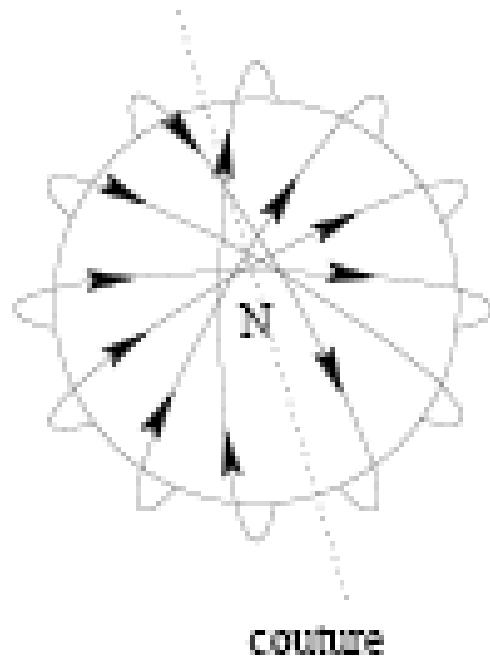


Notion de couverture :

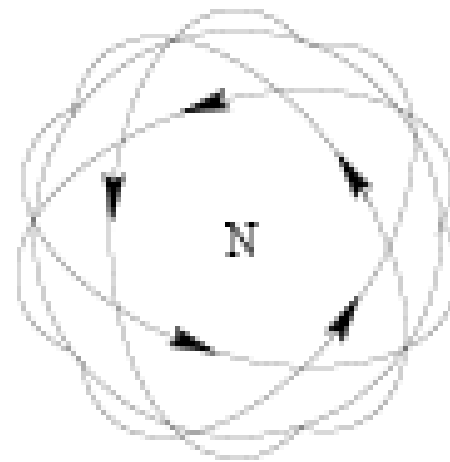
Couverture de la terre par des LEO

Utilisation des trains de satellites sur une même orbite.

Deux façons de disposer les satellites:



Constellation polaire



Constellation inclinée

Notion de couverture :

Nombre de 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.

Avantages/Inconvénients des GEO/MEO/LEO



	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 (par)	10 min	heure	jamais



Satellite Tracking System

[NASA J-Tracker](#)

[NASA J-Pass](#)

<http://www.n2yo.com>

<http://www.satview.org/>

Les bandes de fréquences Satellite et antennes (paraboles)



- La taille des antennes paraboliques est liée à la fréquence de transmission.

Il existe une relation de proportionnalité inverse entre la fréquence et la longueur d'onde.

Plus la longueur d'onde augmente (et la fréquence diminue), plus des antennes paraboliques de plus grandes tailles sont nécessaires pour recueillir le signal.

Les bandes de fréquences Satellite et antennes (paraboles)



C-Band



Ku-Band

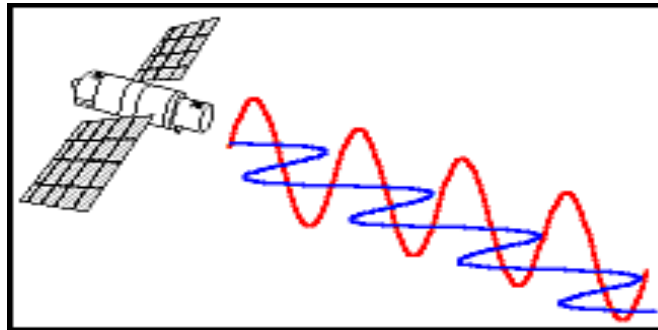
- Most commonly used bands: C-band (4 to 8 GHz) , Ku-band (11 to 17 GHz) , and Ka-band (20 to 30 GHz).



Transmission du Signal

- Les bandes de fréquences
- Les modes de transmissions
- Réutilisation de fréquence
- Liaisons inter satellites

Les Bandes de Fréquences



- Polarisations
 - Les ondes électromagnétiques sont polarisées verticalement ou horizontalement -> elles oscillent dans un plan vertical ou horizontal.
 - Permet de densifier l'utilisation de la bande passante

Les Bandes de Fréquences

- Bande C : bande la + basse
- Bande KU : bande de + en + saturé
- Bande L : bande orbite basse
- Bande KA : bande nouvellement utilisée (double hub).

Bandes	Fréquences (en GHz)	Lien montant (en GHz)	Lien descendant (en GHz)	Service
C	6/4	5,725 à 6,725	3,4 à 4,5	SFS
Ku	12/11		11,7 à 12,2	SRS
	18/11	12,75 à 18,1	10,7 à 12,7	SFS
Ka	20/30	27,5 à 30,5	17,7 à 21,7	SFS
L	1,5/1,6	1,62 à 1,65	1,52 à 1,55	SMS
	1,9/2,9	2,95 à 2,99	1,97 à 2,01	SFS/SMS

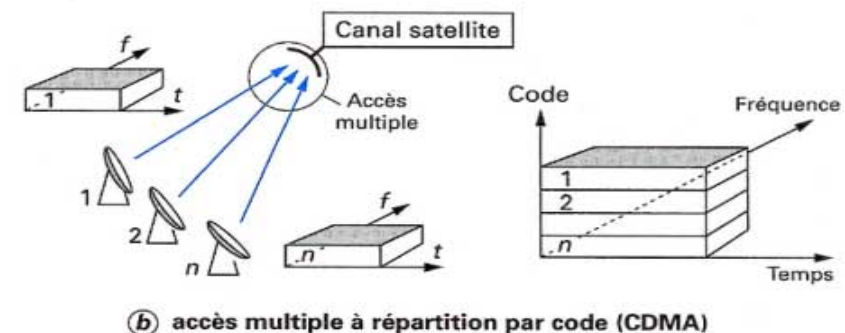
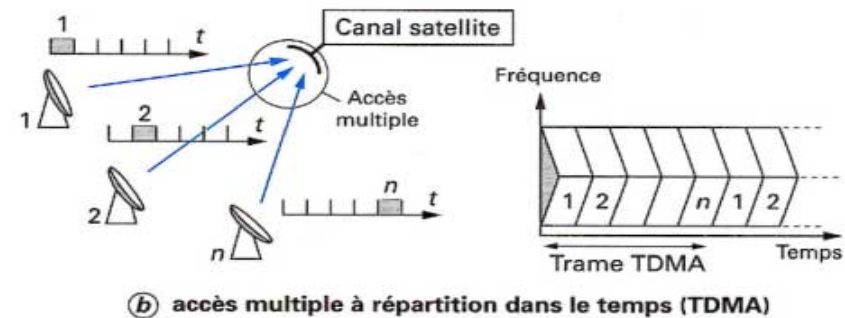
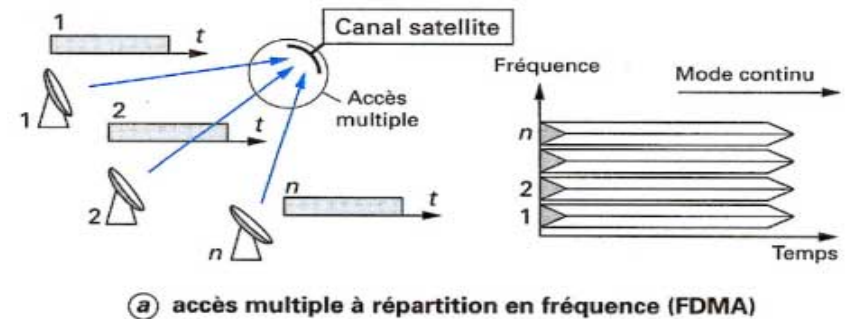
Les modes de transmissions



- Traitement à bord, multiplexage :
Charge utile transparente, amplification, transposition en fréquence -> passage aux transmissions numériques.
La généralisation des transmissions numériques -> le traitement à bord (multiplexage et commutation de paquets).
- Les modulations :
Modulation de phase 4 états (similaire au GSM).
- Politiques d'accès aux canaux satellites.

Les politiques d'accès aux canaux satellite

- Les politiques de réservation
 - L'accès multiple à répartition en fréquence (AMRF ou FDMA)
 - L'accès multiple à répartition dans le temps (AMRT ou TDMA)
 - L'accès Multiple à répartition par code (AMRC ou CDMA)





Les politiques d'accès aléatoires

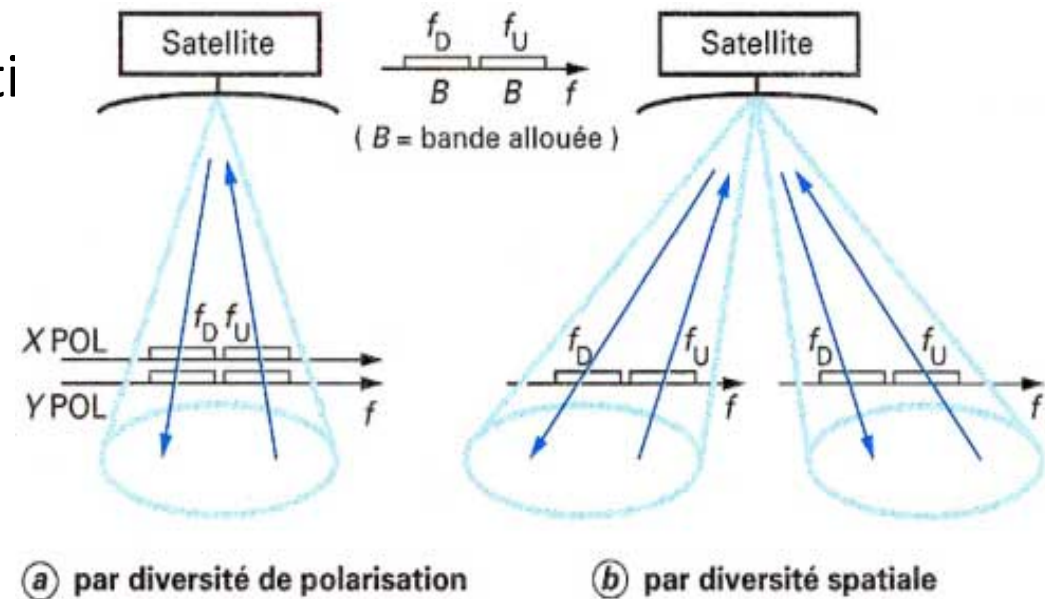
L'accès aléatoire consiste, pour les stations terrestres, à émettre dès qu'elles ont un paquet de données en leur possession, la technique ALOHA . Chaque station reçoit l'ensemble des paquets et en prélève ceux qui lui sont destiné (similaire à Ethernet).

Les politiques de réservation par paquets

Les techniques de réservation par paquet consistent essentiellement à réserver à l'avance des tranches de temps pour les stations qui ont des paquets à émettre.

Réutilisation de fréquence

- Par diversité de polarisation
- Par diversité spatiale



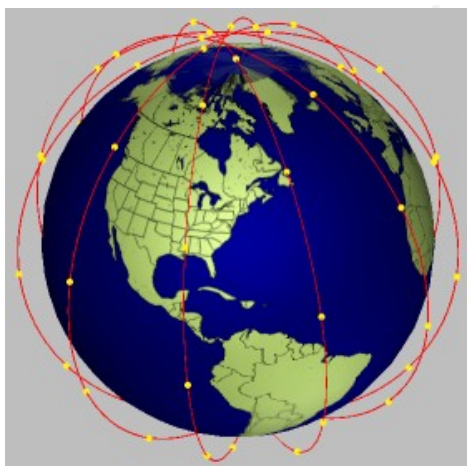
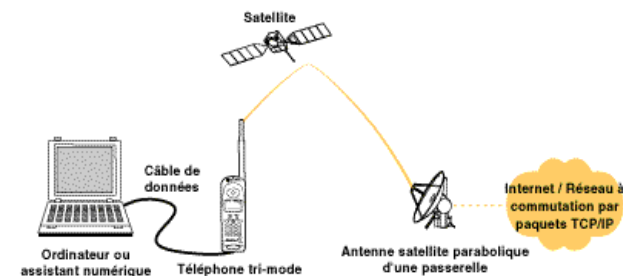
Liaisons inter satellites

- Liaisons entre deux satellites :
 - Permet de relier les stations seules à des distances supérieures sans double bon avec retour au sol intermédiaire
 - Ex : TELEDESIC, IRIDIUM, GLOBALSTAR, SKYBRIDGE.



Liaisons inter satellites

- Exemple Globalstar :
 - 48 + 8 satellites / 100 stations terriennes (RTC).
 - Petit satellite (1.50 m), grappe de satellites.
 - 7 par orbite.
 - Débit 9.6 kb/s (identique au GSM).
 - Racheté par fond d'investissement THERMO.
 - Lancement prévu de 8 satellites de remplacement.
 - Fin 2004 essai avec Airbus liaison mobile entre avion et satellite.
 - 0.15 € et 1€ / minute mais abonnement cher.



Les technologies d'accès à Internet par satellite



- VSAT(Very Small aperture terminal)
- DVB-S(Digital Video Broadcast Satellite)
- DVB-RCS (Digital Video Broadcast – return Channel via Satellite)
- UDLR (Unidirectional Link Routing)

Les technologies d'accès à Internet par satellite (suite 1)



- VSAT
 - propriétaire
 - Premier standard d'accès par satellite
 - Satellites en orbite géostationnaire + antennes de 0.9 à 1.8 mètres
 - Download 8Mbps , Upload 512 Kbps
- UDLR
 - le protocole UDLR permet de masquer l'unidirectionnalité d'une liaison satellitaire en utilisant une voie de retour terrestre. Ce protocole, transparent pour le niveau IP, émule une connectivité bidirectionnelle et broadcast sur un lien unidirectionnel.
 - Mise au point par L'INRIA
 - Peut être utilisée avec n'importe quel voie de retour (ADSL, RTC, GSM ...)
 - Quasi-absence de modifications des infrastructures existantes (satellites géostationnaires)

Les technologies d'accès a Internet par satellite (suite 2)



- DVB-S (déclinaison satellite du DVB)
 - Définition de transmissions des signaux MPEG-2
 - Capable d'acheminer des données TCP/IP à grande vitesse
 - Diffusion unidirectionnelle
 - Ce standard ne prévoit pas de voie retour
- DVB-RCS
 - Validé en fin 2000
 - Déclinaison des standards DVB avec un retour par satellite (2 kbps)
 - Permet le transport du protocole IP, de nombreux protocoles des routage et de transport
 - Petites antennes (75 cm à 1 m)
 - Download 60 Mbps , Upload 1.2 Mbps

Sources

[How Do Satellites Work? By William Cook, 1996](#)

[The Living Earth – Earth View](#)

[Advanced Communications Technology Satellite \(ACTS\)](#)

[Stevens – Low Earth Orbiting LEO](#)

[CompassRose International Publications – Introduction to Global Satellite Systems](#)

[searchNetworking.com Definitions - Satellite](#)

[LEO Illustration](#)

[HST Project Science Office](#)

[Hubble Picture](#)

[Hubble Image](#)

[Space Debris](#)

[More Space Debris](#)

[What is Medium Earth Orbit?](#)

[About GPS](#)

[Global Positioning Overview](#)

[What is GPS?](#)

[Geo Satellites](#)

[Geostationary Operational Environmental Satellites](#)

[GMS - Geostationary Meteorological Satellites](#)

[GOES - Information on the GOES Data Collection System](#)

[Feng Yun 2](#)

[NASA: J-Tracker](#)