

Cours Capteurs et Satellites

Dr SADOUNI Salheddine

Introduction

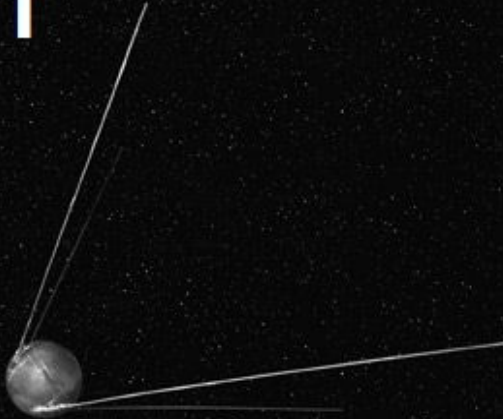
- *La Seconde Guerre mondiale favorise l'essor de deux techniques très éloignées :*
- *les missiles*
- *et les micro-ondes.*
- *La maîtrise atteinte ultérieurement dans l'utilisation conjointe de ces deux techniques ouvre l'ère des télécommunications par satellites.*
- *Il apparaît alors que le service ainsi rendu complète favorablement*
- *celui fourni jusqu'alors exclusivement par les réseaux au sol (faisceaux hertziens et câbles).*

Historique des Satellites

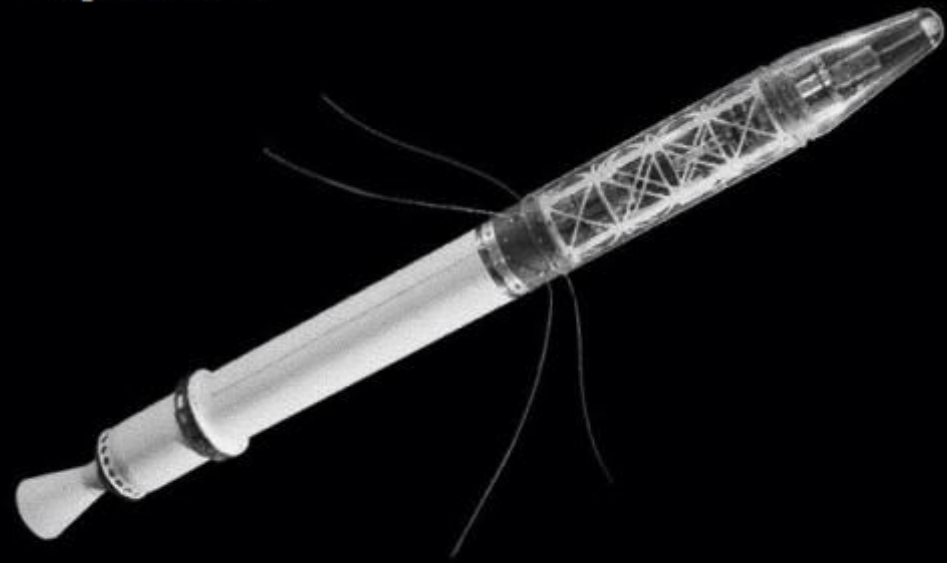
- Les **premiers satellites artificiels** sont envoyés durant la **Guerre Froide**.
- Ce sont les soviétiques qui réussissent, les premiers, à en envoyer avec **Spoutnik I. Spoutnik 2**
- suivra ensuite avec **Laika** à son bord (**le premier être vivant dans l'espace**).
- La course à l'espace étant lancé, les **Etats-Unis envoie leur premier satellite: Explorer I**.
- Tous ces satellites sont utilisés à des **fins scientifiques**.

Spotnik 1 et 2 Explorer 1

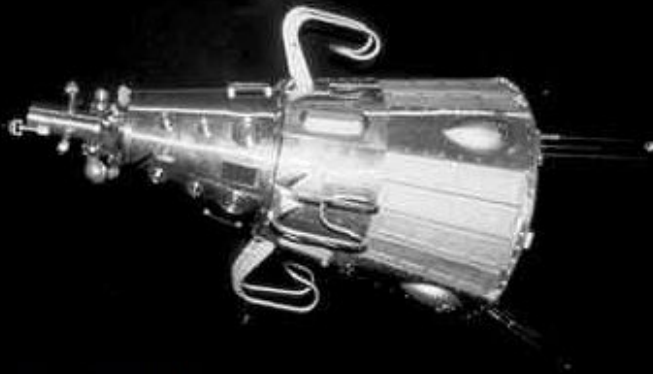
Sputnik 1



Explorer 1



Sputnik 2



La multiplication des utilisations des satellites

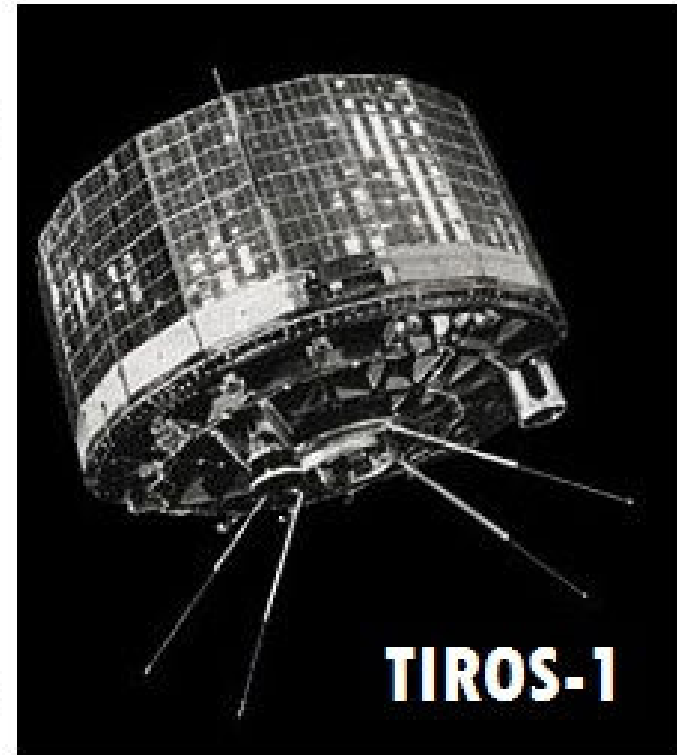
- Durant la **course à l'espace**, les premiers **satellites militaires** apparaissent:
- la série **Corona** (satellite américain permettant **d'espionner les russes**).
- En **1960**, est envoyé **TIROS-1**, le satellite inaugurant les premiers satellites **d'observation météorologique**.
- Les satellites vont ensuite apparaître les uns après les autres:
 - **Landsat-1 (observation de la Terre)**,
 - **GEOS-3 (satellite radar depuis l'espace)**...



Landsat-1 GEOS-3 TIROS-1

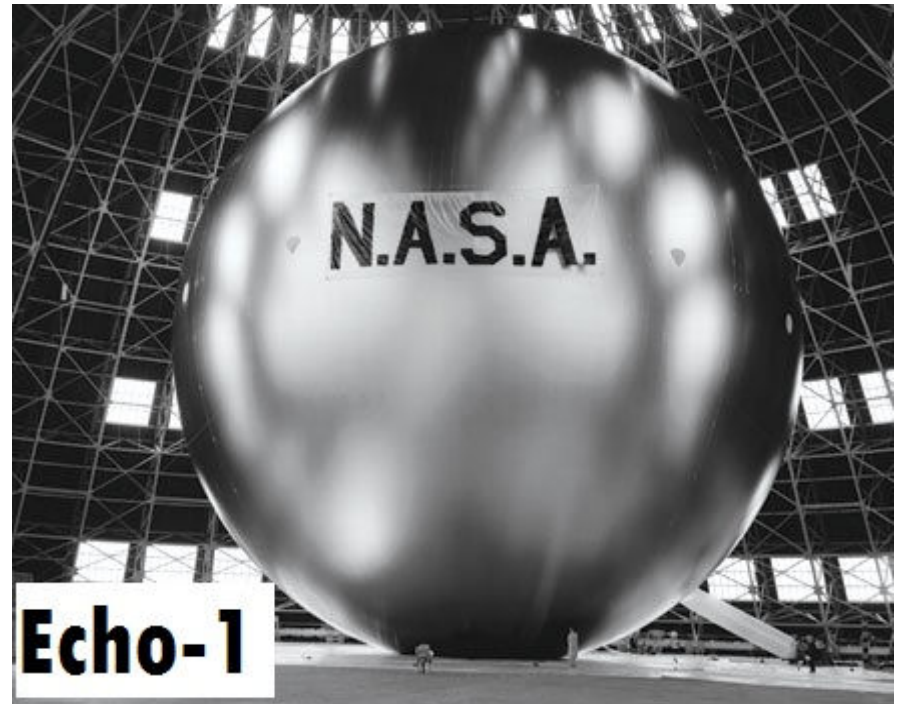


GEOS-3



Vers des satellites à utilité commerciale

- C'est en **1960**, que le premier satellite créé pour le **commerce** voit le jour, c'est un satellite de **télécommunication nommé Echo**.
- S'en suivra de nombreux autres satellites destinés au **commerce**.



Quelques dates Importantes

- *L'ère spatiale débute en 1957 avec le lancement du premier satellite artificiel (Spoutnik).*
- *vœux de Noël du président Eisenhower diffusés par Score (1958),*
- *Satellite réflecteur Echo (1960)*
- *transmission différée par le satellite Courier (1960),*
- *Satellites répéteurs à large bande Telstar et Relay (1962),*
- *premier satellite géostationnaire Syncom (1963).*
- *En 1965, le premier satellite géostationnaire commercial Intelsat I ou Early Bird*
- *la même année est lancé le premier satellite de télécommunications soviétiques de la série des Molnya.*

Le développement des satellites

- *Les premiers systèmes à satellite offraient une **capacité faible et un coût relativement Élevé***
- *Intelsat I : 68 kg au lancement,*
- *pour une capacité de 480 voies téléphoniques*
- *à un coût annuel par voie de 32 500 \$ de l'époque)*
- *L'abaissement du coût est le résultat de nombreux efforts conduisant*
- *à la production de lanceurs fiables, capables de mettre en orbite des satellites de plus en plus lourds*
- *(3 750 kg au lancement pour Intelsat VI*

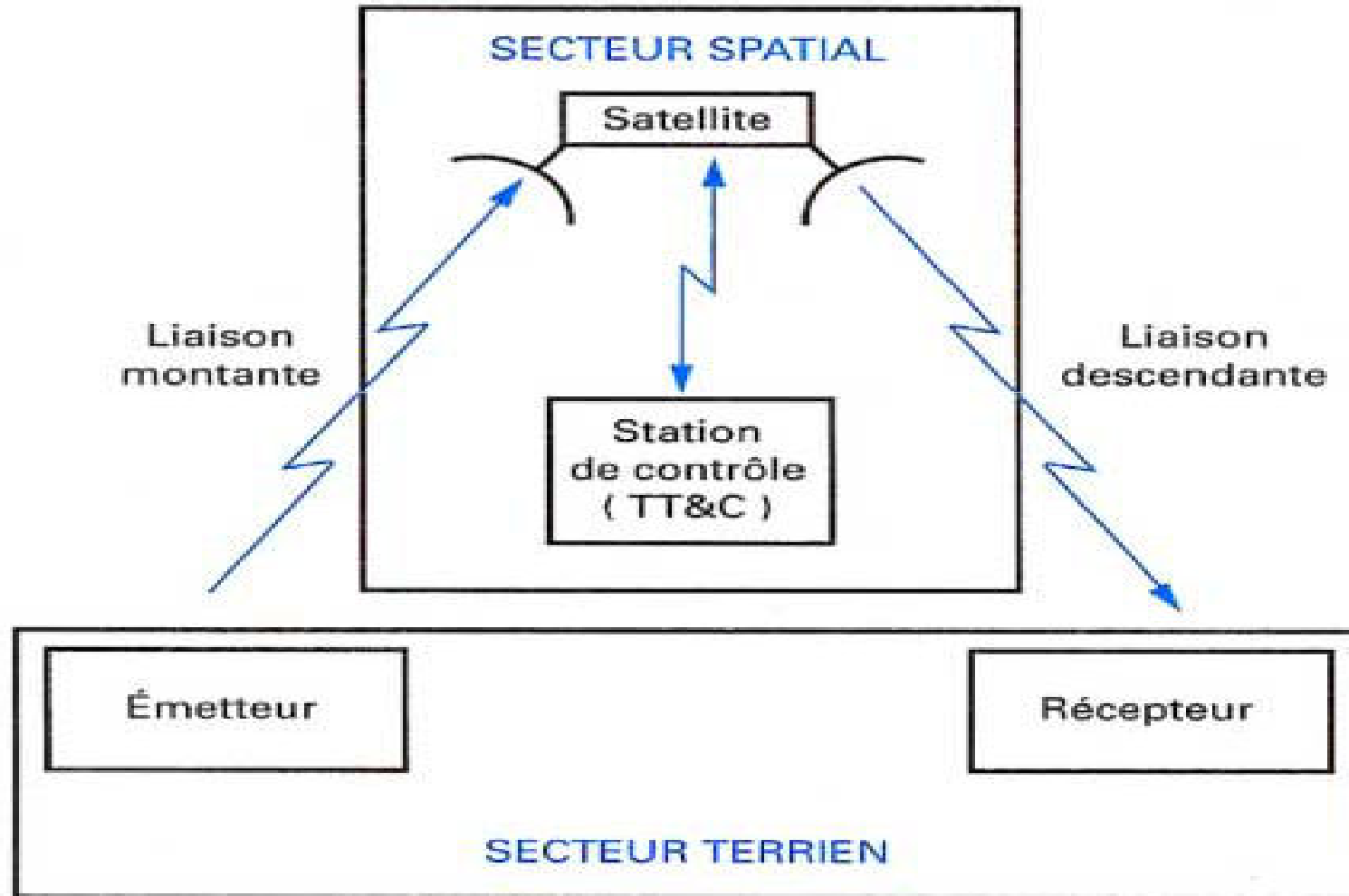
Le développement des satellites (suite)

- *la maîtrise croissante des techniques **micro-ondes** a permis*
- *d'embarquer des **amplificateurs d'émission de puissance plus élevée,***
- *d'élaborer des **antennes multifaisceaux***
- *de **réutiliser la même bande de fréquences,** plusieurs fois,*
- *La capacité du satellite s'est accrue, aboutissant à un coût par voie téléphonique réduit (**80 000 voies sur Intelsat VI** pour*
- *un coût annuel **par voie de 2 880 \$ en 1991).***

Architecture d'un système de communications par satellite

- les différentes composantes d'un système de télécommunications par satellite Sont:
- un secteur spatial ;
- un secteur terrien.

Composantes d'un système de télécommunications par satellite



TT&C = équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande

Secteur spatial

- Le secteur spatial comporte
- le satellite et l'ensemble des moyens de contrôle situés au sol,
- c'est-à-dire l'ensemble des stations
- de poursuite,
- de télémessure
- et de télécommande
- (TT&C : *tracking, telemetry and command*),
- ainsi que le centre de contrôle du satellite,
- où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et vérifiées les fonctions vitales du satellite.

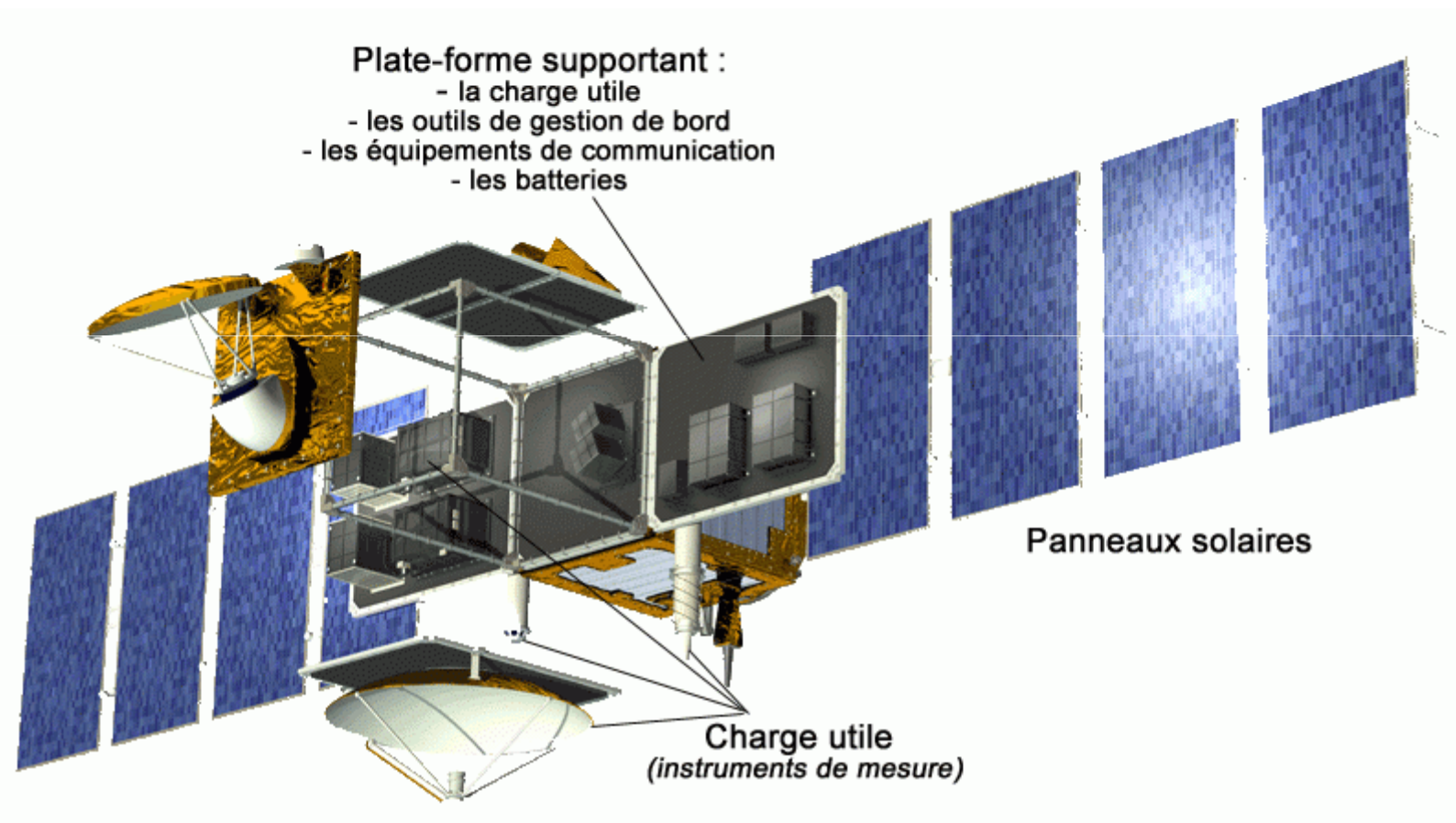
TT&C : *tracking, telemetry and command*



Le satellite

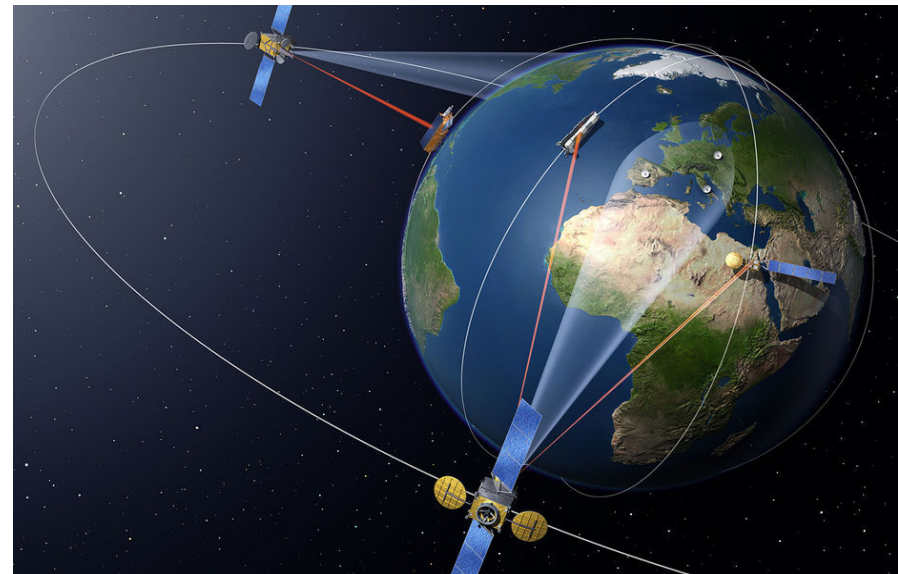
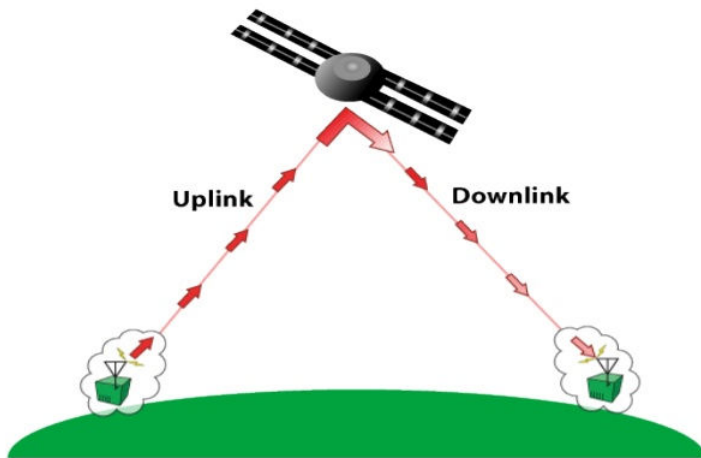
- Le satellite est constitué d'une **charge utile et d'une plate-forme**.
- **La charge utile** comporte les **antennes de réception et d'émission**,
- et l'ensemble des **équipements électroniques** assurant la **transmission des signaux**.
- **La plate-forme** comporte l'ensemble des **sous-systèmes** permettant à la charge utile de fonctionner.
- On y trouve :
 - la **structure** ;
 - l'**alimentation électrique** ;
 - le **contrôle thermique** ;
 - le **contrôle d'attitude et d'orbite** ;
 - les **équipements de propulsion** ;
 - les **équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande(TT&C)**.

La structure d'un satellite



Différents types de liaisons avec le satellite

- Les ondes **radioélectriques porteuses** émises par les stations terriennes sont reçues par le satellite ces liaisons s'appellent **liaisons montantes (uplink)**.
- **Après amplification** dans chaque canal, ces porteuses sont **regroupées sur l'antenne d'émission**.
- Le satellite les émet, à son tour, vers les stations terriennes réceptrices : ce sont les **liaisons descendantes (downlink)**.
- le satellite peut acheminer les porteuses reçues **vers un autre satellite avant que celles-ci ne soient retournées vers le sol**.
- De telles liaisons entre satellites sont appelées **liaisons intersatellites**.



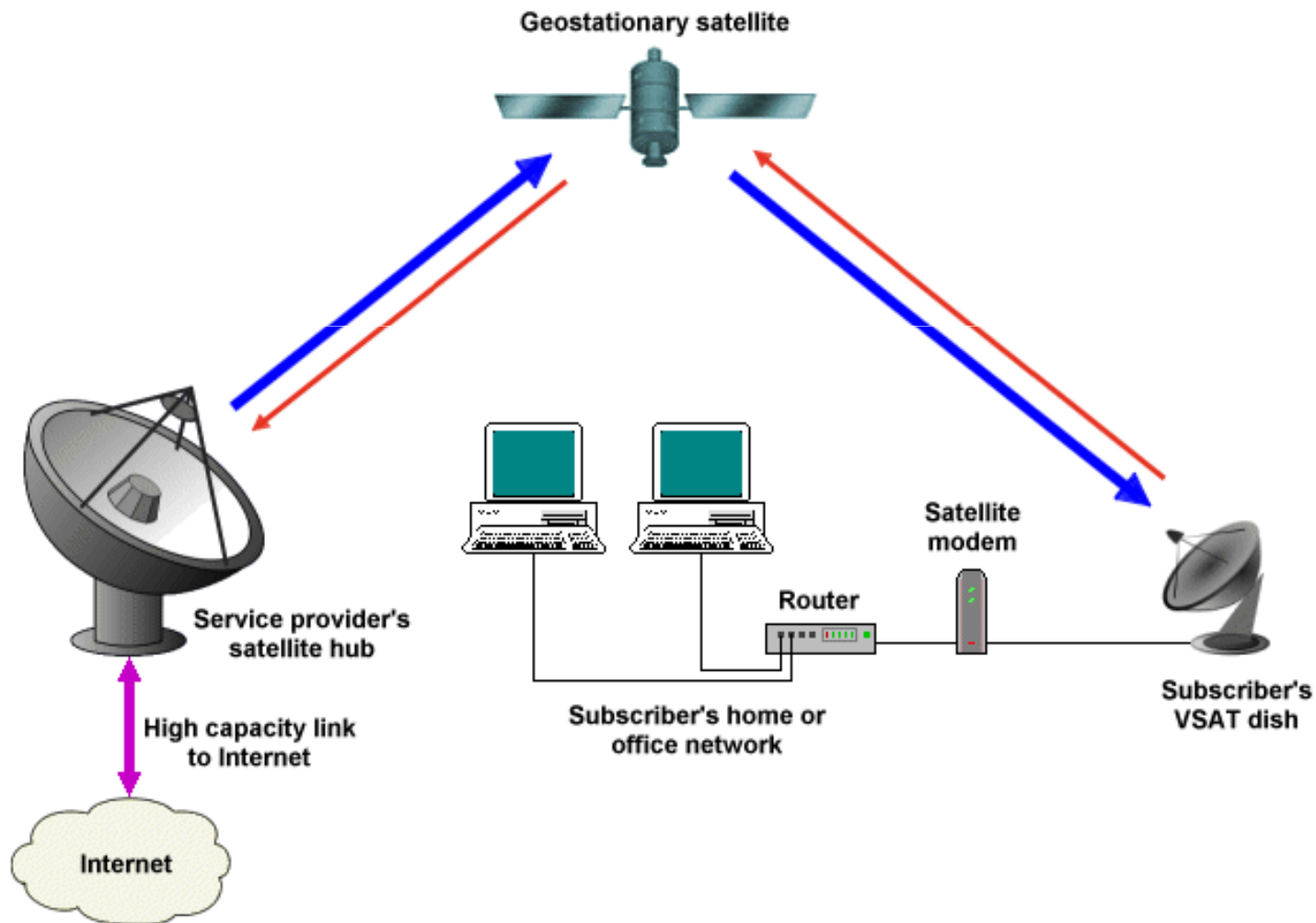
Redondance fiabilité et durée de vie

- Pour assurer un service avec une disponibilité donnée, un **système de télécommunications par satellite doit disposer de plusieurs satellites**
- afin d'assurer **une redondance**.
- Un satellite peut en effet cesser d'être disponible en raison **d'une panne** ou parce qu'il est **en fin de vie**:
- la **fiabilité est une mesure de la probabilité de panne et dépend**
- de la **fiabilité des équipements et des schémas de redondance** ;
- la **durée de vie est liée uniquement à la possibilité pour le satellite d'être maintenu à poste dans une attitude nominale,**
- c'est-à-dire à la **quantité de carburant disponible pour le sous-système de propulsion et de contrôle d'attitude et d'orbite.**
- On prévoit en général, pour un système, un **satellite opérationnel, un satellite de secours en orbite et un satellite de secours au sol.**
- La **fiabilité du système** fait intervenir la **fiabilité de chacun des satellites** mais aussi **la fiabilité du lancement.**

Secteur terrien

- Le secteur terrien est constitué par **l'ensemble des stations terriennes**,
- le plus souvent **raccordées aux terminaux des usagers par un réseau terrestre**
- **ou directement dans le cas de petites stations (VSAT : *very small aperture terminal*) et de stations mobiles.**
- **Les stations se distinguent par :**
- **leur taille**, qui varie **selon le volume de trafic à acheminer** sur la liaison spatiale,
- **Les plus grandes** sont équipées **d'antennes de 30 m de diamètre** (standard A du réseau Intelsat)
- Et **les plus petites d'antennes de 0,6 m** (stations de **réception de la télévision directe**).
- et **selon le type de trafic** (téléphone, télévision, données).

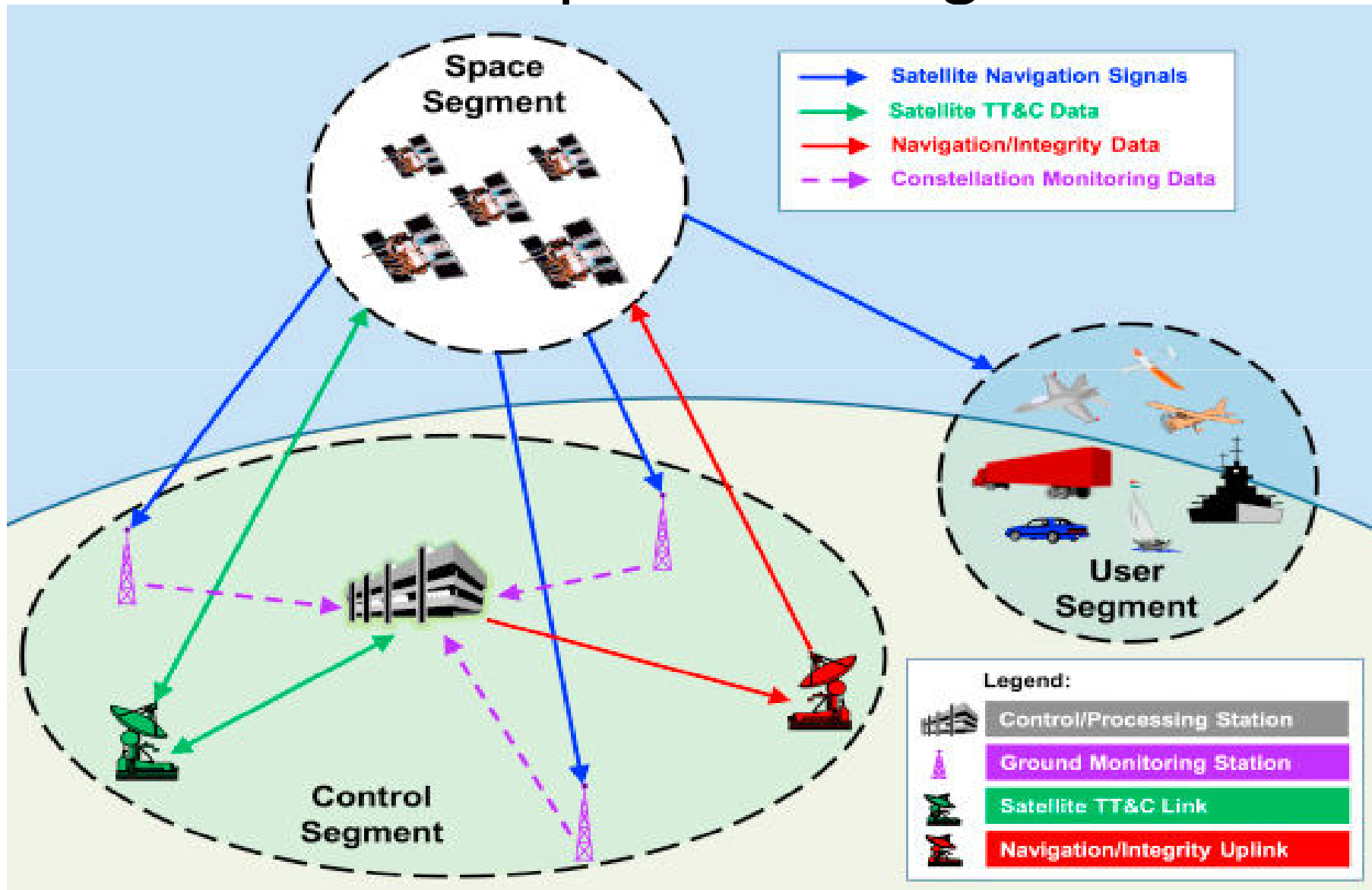
Systeme de reception emission VSAT



Types de stations

- On distingue:
- les stations fixes,
- les stations transportables,
- les stations mobiles.
- Certaines stations sont à la fois émettrices et réceptrices.
- D'autres sont réceptrices uniquement
- (**RCVO : receive only**) : c'est le cas par exemple des stations de réception d'un système de radiodiffusion par satellite,
- ou d'un système de distribution de signaux de télévision ou de données.

Les différents segments d'un système satellites pour la navigation



les propriétés d'un systèmes de télécommunications par satellite

- les liaisons par satellite ont rapidement **conquis des marchés spécifiques.**
- Les systèmes de télécommunications par satellite **offrent en effet trois propriétés,** qu'on ne trouve **pas, ou à un degré moindre,** dans les **réseaux terrestres :**
 1. **possibilité de diffusion ;**
 2. **large bande ;**
 3. **rapidité de mise en œuvre et de reconfiguration.**

Développement des services

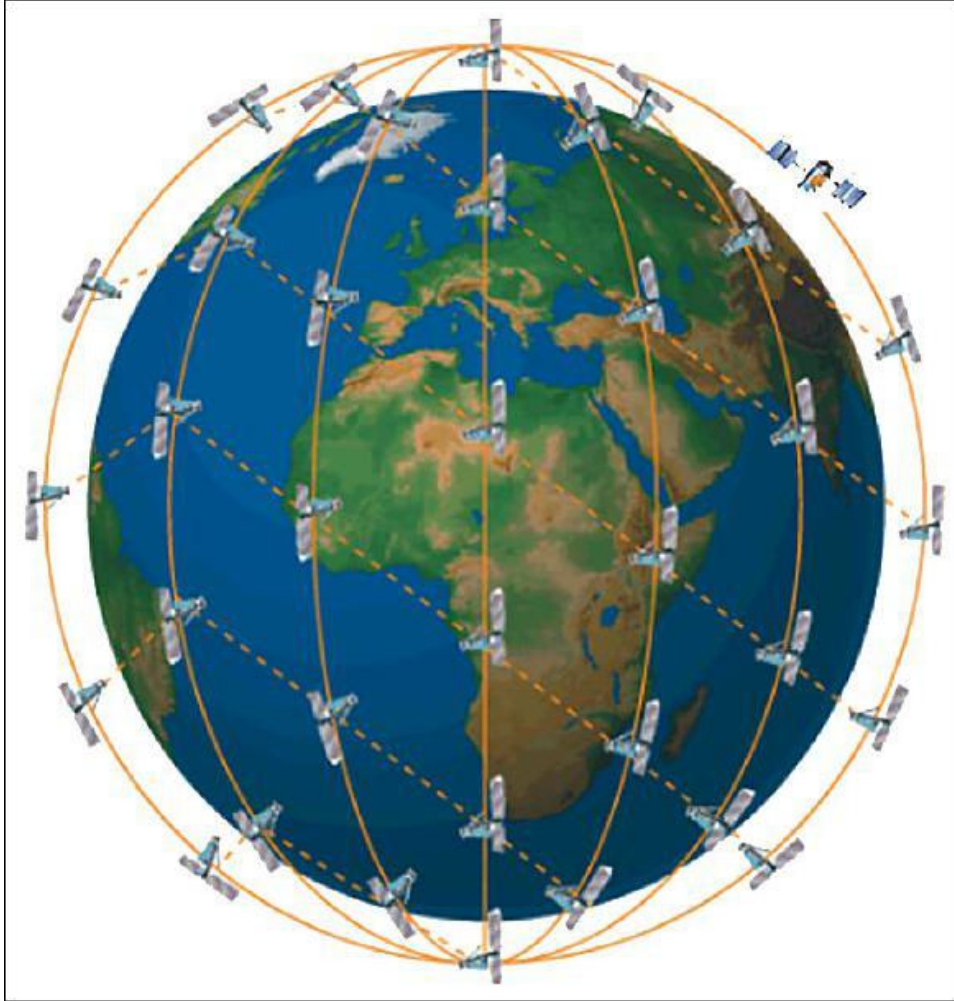
- **Initialement**, un système à satellite comportait **un petit nombre de stations terriennes**
- **quelques stations par pays**, équipées **d'antennes de 15 à 30 m de diamètre**,
- **collectant le trafic** sur une **zone étendue par le réseau terrestre**.
- **Ultérieurement**, **le nombre de stations terriennes a augmenté**, avec une **réduction en taille (antennes de 0,6 à 4 m)**
- et une **dispersion géographique accentuée**.
- Les stations **se sont rapprochées de l'utilisateur**.
- Le potentiel des **services offerts** par les télécommunications par satellite s'est donc **diversifié**.



Systemes VSAT (*very small aperture terminal*)

- **terminal à très petite ouverture**
- désigne une technique de communication **bidirectionnelle par satellite**
- utilise au sol des antennes paraboliques **directives dont le diamètre est inférieur à 3 mètres (0,75 m et 1,2 m)**
- et visent un **satellite géostationnaire**.
- Le VSAT est **constitué de trois parties principales**, à savoir :
- **le hub** : il s'agit du **cœur du réseau**. Le hub, installé au sol, dispose d'une **antenne** ayant un diamètre compris **entre 7 m et 9 m** ayant le même principe de fonctionnement qu'une station terrestre.
- **le satellite** : c'est un relais hertzien.
- **les stations distantes** (ou *remote*) en anglais.

Constellation de satellites

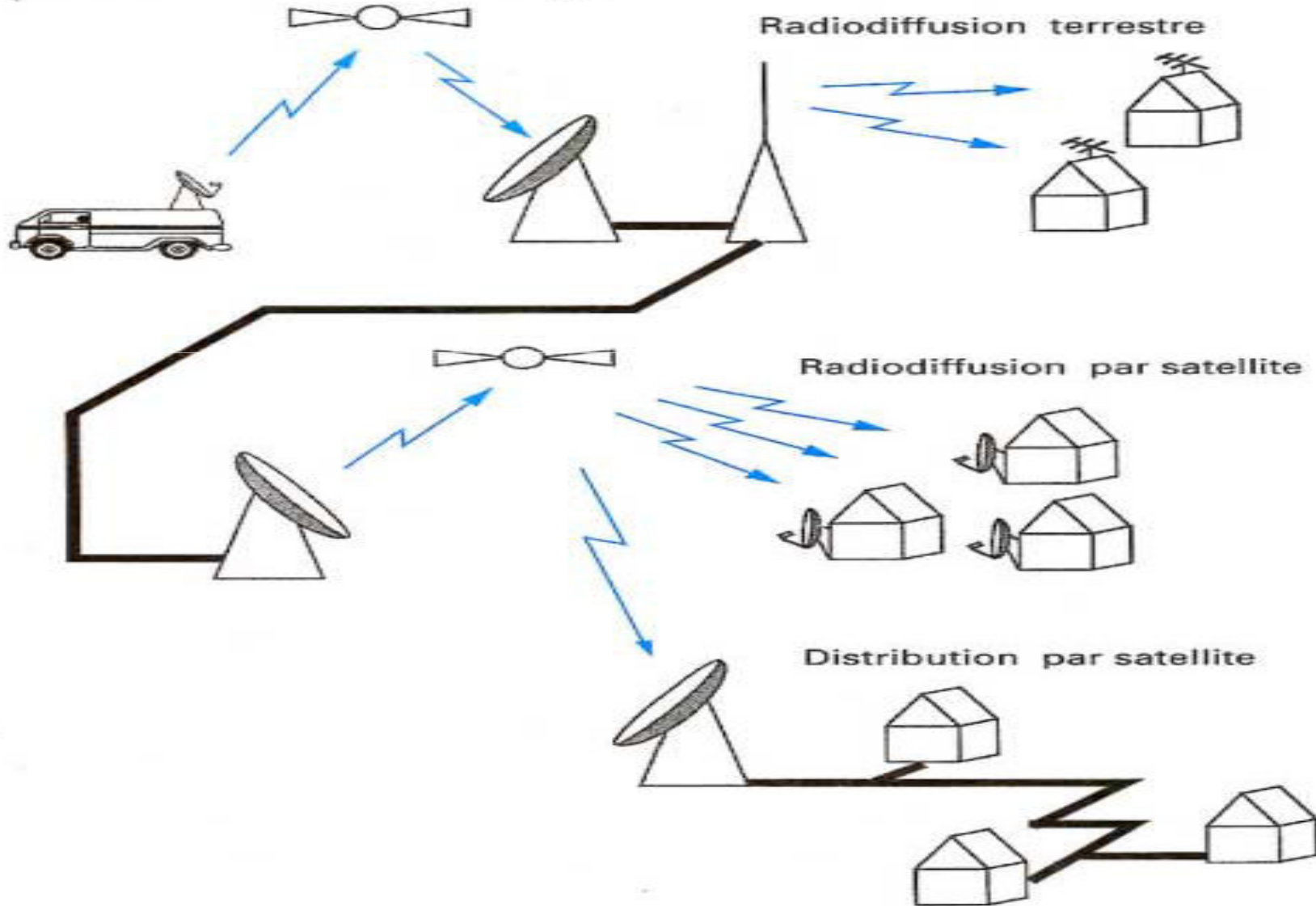


l'évolution de la taille des stations terriennes mobiles.



Systemes de radiodiffusion

Liaison de reportage
(SNG: *Satellite News Gathering*)



Les Orbites des satellites

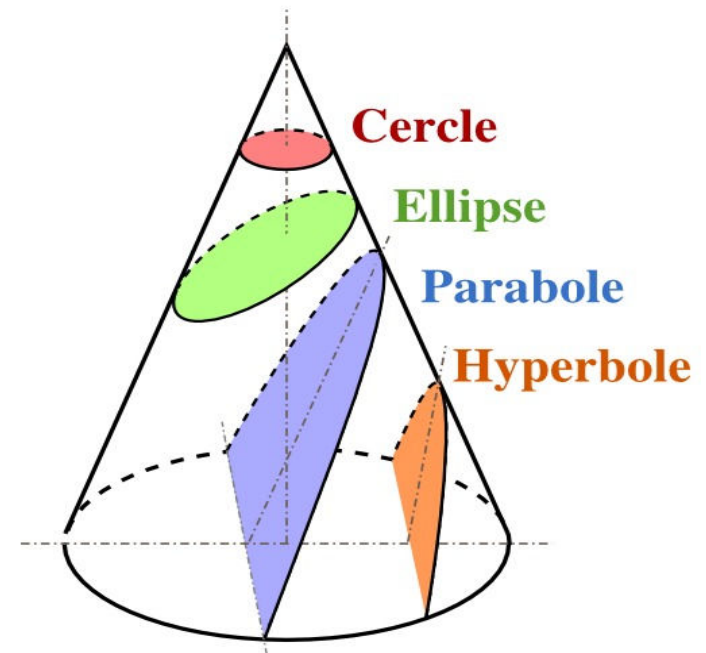
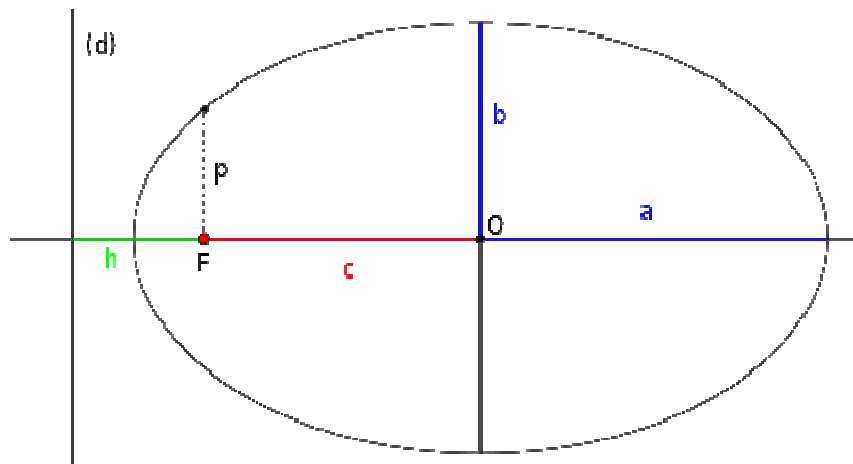
- Plusieurs orbites sont envisageables pour des missions de communications ou de surveillance.
- Avant de présenter leurs caractéristiques et de les comparer,
- il est nécessaire d'établir quels sont les paramètres qui caractérisent une orbite

Paramètres orbitaux loi de newton

- L'orbite d'un satellite répond à la **loi de gravitation de Newton** :
- deux corps de **masses respectives m et M** s'attirent avec **une force F (N) donnée par** :
- $F = GMm/r^2$
- où
- r est la **distance séparant les deux corps**
- et **G la constante de gravitation $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.**

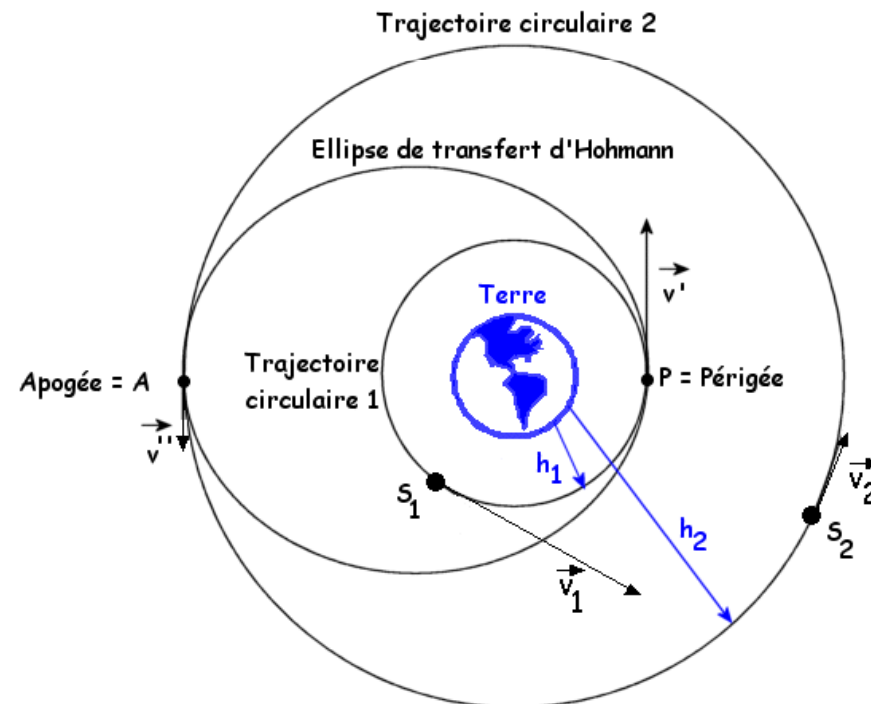
lois de Képler orbite elliptique

- De la loi de Newton se déduisent les propriétés suivantes (**lois de Képler**) :
- l'orbite est une conique dont le plan contient le centre de la Terre.
- Pour un satellite de télécommunications, la conique retenue est une ellipse, et le foyer est le centre de la Terre.



lois de Képler orbite circulaire

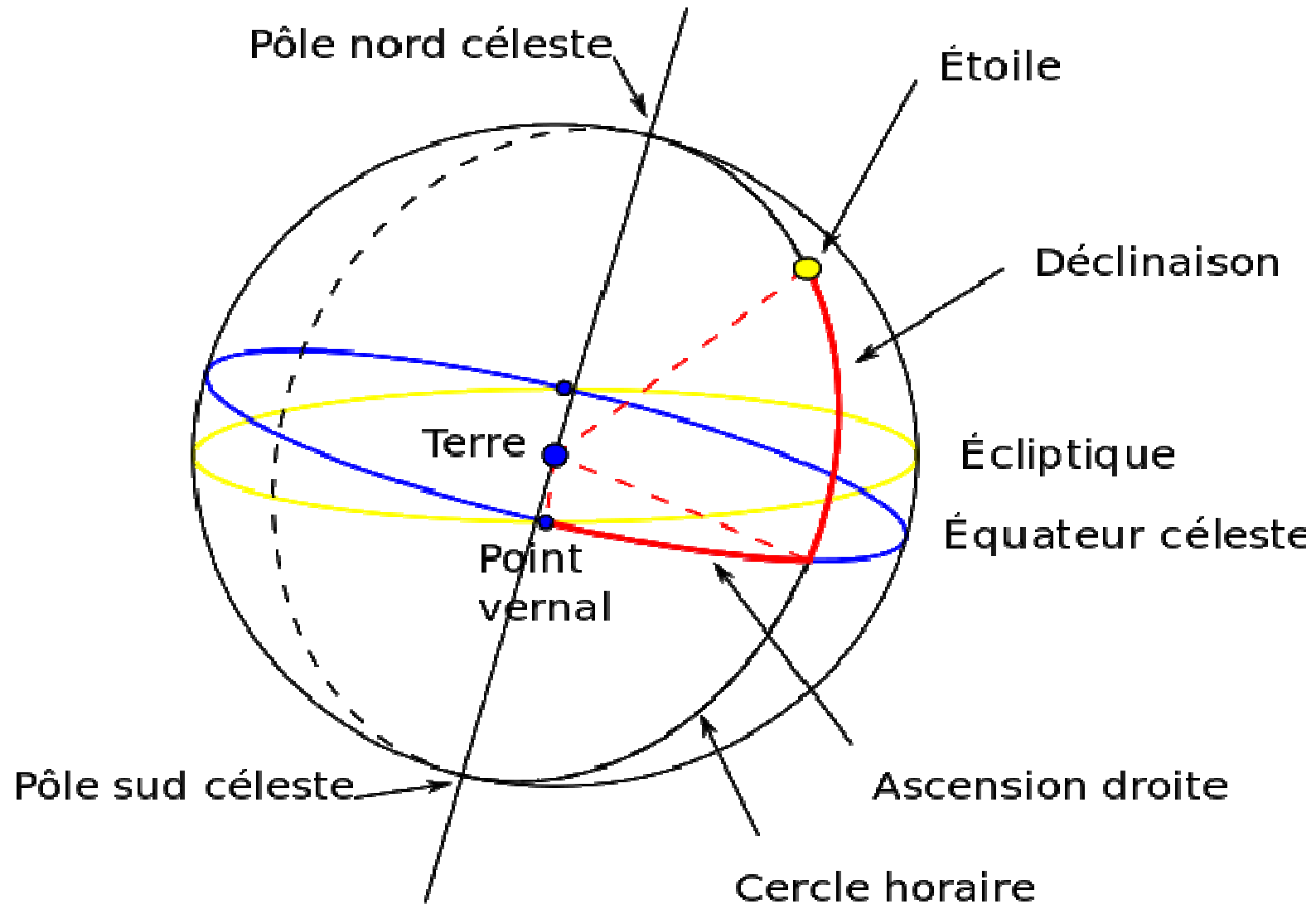
- Dans le cas particulier où l'orbite est circulaire, le centre de l'orbite coïncide avec le centre de la Terre
- le rayon vecteur du centre de la Terre au satellite balaye des aires égales pendant des intervalles de temps égaux ;



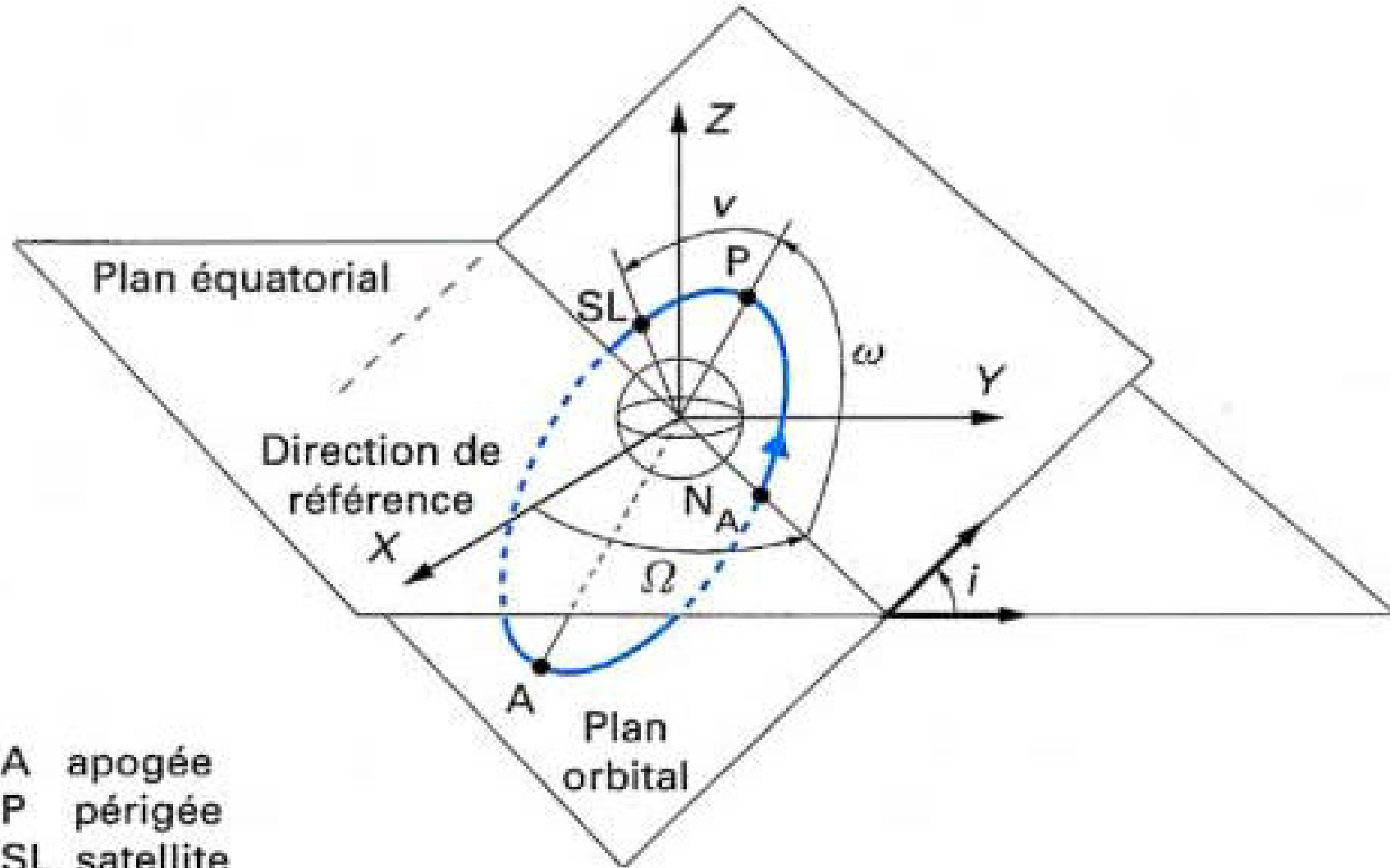
Positionner le satellite dans l'espace

- Six paramètres permettent de positionner le satellite dans l'espace
- deux paramètres pour la détermination du **plan de l'orbite** :
 1. l'inclinaison du plan orbital (i)
 2. *et l'ascension droite du nœud ascendant* (Ω) ;
- un paramètre pour le **positionnement de l'orbite dans son plan** ;
 3. l'argument du périégée (ω) ;
- deux paramètres pour la **forme de l'orbite** :
 4. le demi-grand-axe de l'ellipse (a),
 5. *et son excentricité* (e) ;
- un paramètre pour la **position du satellite sur l'ellipse** :
 6. l'anomalie vraie (v).

Pré-requis



Détermination de la position d'un satellite dans l'espace



Le plan de l'orbite

- Le plan de l'orbite est obtenu en faisant **pivoter le plan équatorial de la terre autour de la ligne des nœuds de l'orbite.**
- **Les nœuds sont** les intersections de l'orbite avec le plan équatorial de la terre.
- Le **nœud ascendant** correspond au **passage du satellite dans le plan** équatorial de la terre de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord.
- Le **nœud descendant** correspond au passage de **l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud.**
- **L'angle de rotation** autour de la ligne des nœuds est **l'inclinaison du plan orbital, i .**
- **Cet angle, mesuré au nœud ascendant,** est compris entre 0° et 180° . Il est **compté positivement**

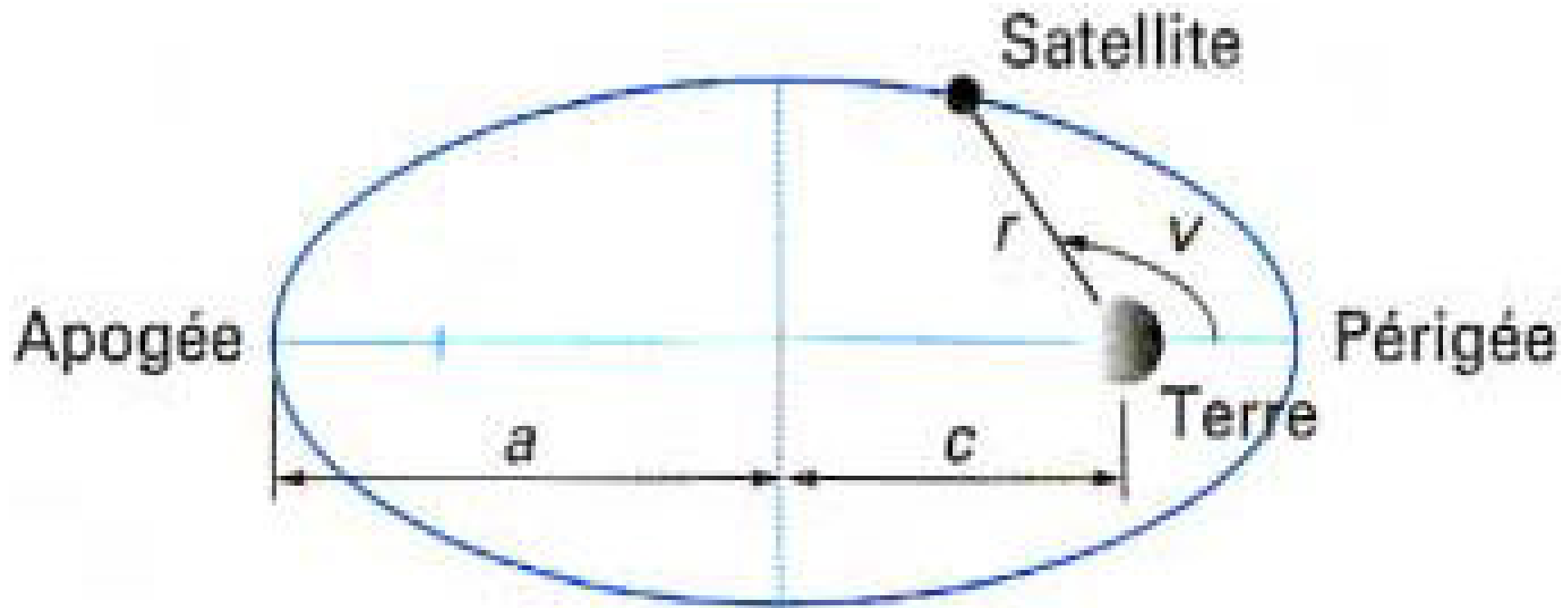
positionnement de l'orbite dans son plan

- Le centre de la Terre est l'un des **foyers de l'orbite elliptique** du satellite.
- Le **grand axe de l'orbite** passe donc par le centre de la Terre.
- La direction du périégée dans le plan de l'orbite est définie par
- **l'argument du périégée, ω (Oméga minuscule)**.
- **Cet angle a pour sommet le centre de la Terre**
- et **fixe la direction du périégée par rapport à celle du nœud ascendant**.
- Il est compté positivement de **0° à 360°** dans la direction du mouvement
- du satellite.
- Le **périégée est le point de l'orbite le plus proche** du centre de la Terre.
- À l'autre extrémité du grand axe se trouve
- **l'apogée qui est le point de l'orbite le plus éloigné** du centre de la Terre.

forme de l'orbite et son excentricité

- La forme de l'orbite est déterminée par son excentricité, e ,
- *et la longueur du demi-grand axe, a .*
- *La valeur de l'excentricité est $e = c/a$*
- où c représente la distance du centre de l'ellipse au centre de la Terre.
- Pour une orbite circulaire, l'excentricité est nulle, et le centre de la Terre est aussi le centre de l'orbite circulaire.
- La position du satellite sur l'orbite est définie par
- l'anomalie vraie v : C'est l'angle qui a pour sommet le centre de la Terre et qui fixe la direction du satellite par rapport à la direction du périhélie.
- Il est compté dans la direction du mouvement du satellite de 0° à 360° .

Détermination de la forme de l'ellipse et de la position du satellite sur l'orbite



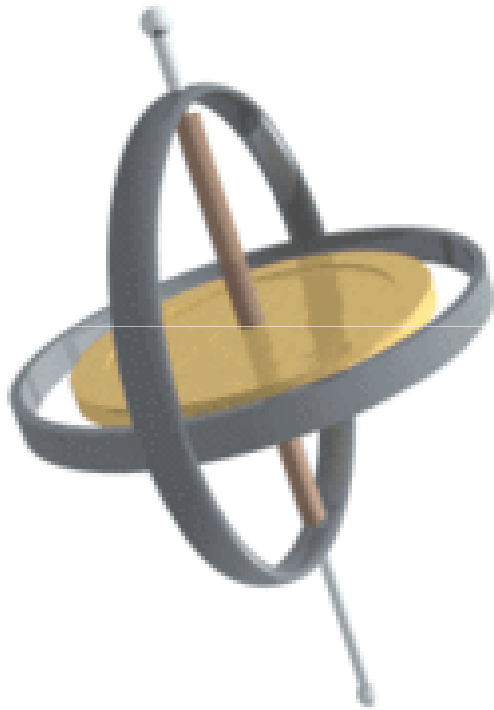
Perturbations

- Les perturbations sont dues essentiellement aux forces perturbatrices suivantes :
- composantes non sphériques de l'attraction terrestre ;
- attraction du Soleil et de la Lune ;
- pression de radiation solaire ;
- traînée aérodynamique.

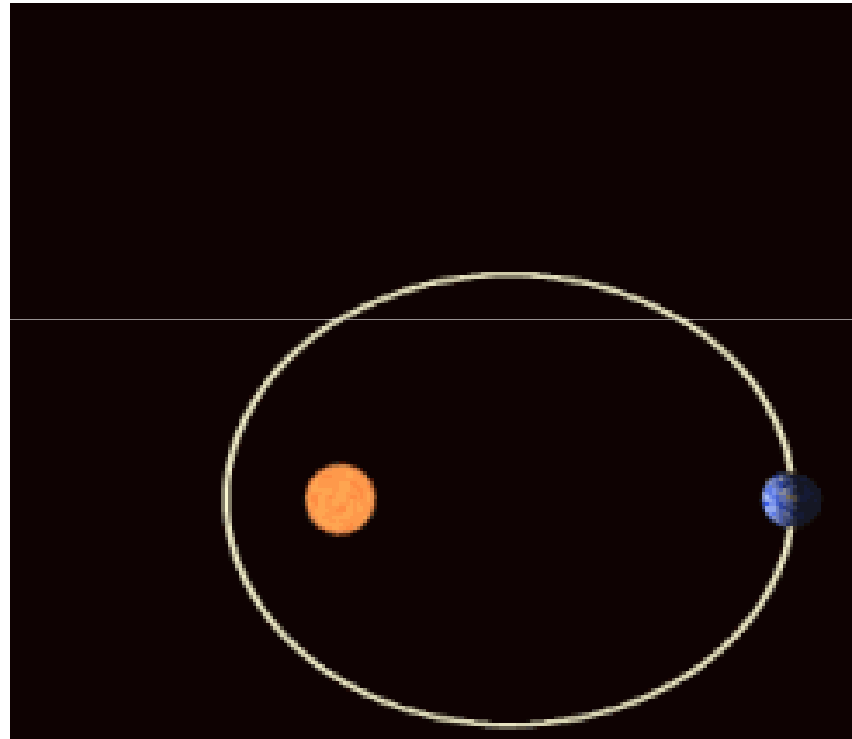
Asymétrie de l'attraction terrestre

- La Terre n'est pas un **corps sphérique et homogène**.
- Le **potentiel terrestre** en un point **de l'espace ne dépend** pas seulement **de la distance au centre de masse**.
- *Il dépend aussi de*
- *la **latitude***
- *et de la **longitude** du point considéré,*
- *et du **temps***
- *en raison des **irrégularités de la rotation de la Terre***
- *et de la **répartition des masses**.*
- **L'asymétrie de l'attraction terrestre** produit des **effets sur**
- **l'ensemble des paramètres orbitaux.**
- Les effets **prédominants** sont :
- **une régression nodale :**
- **une rotation apsidale :**

régression nodale et rotation apsidale



une régression nodale

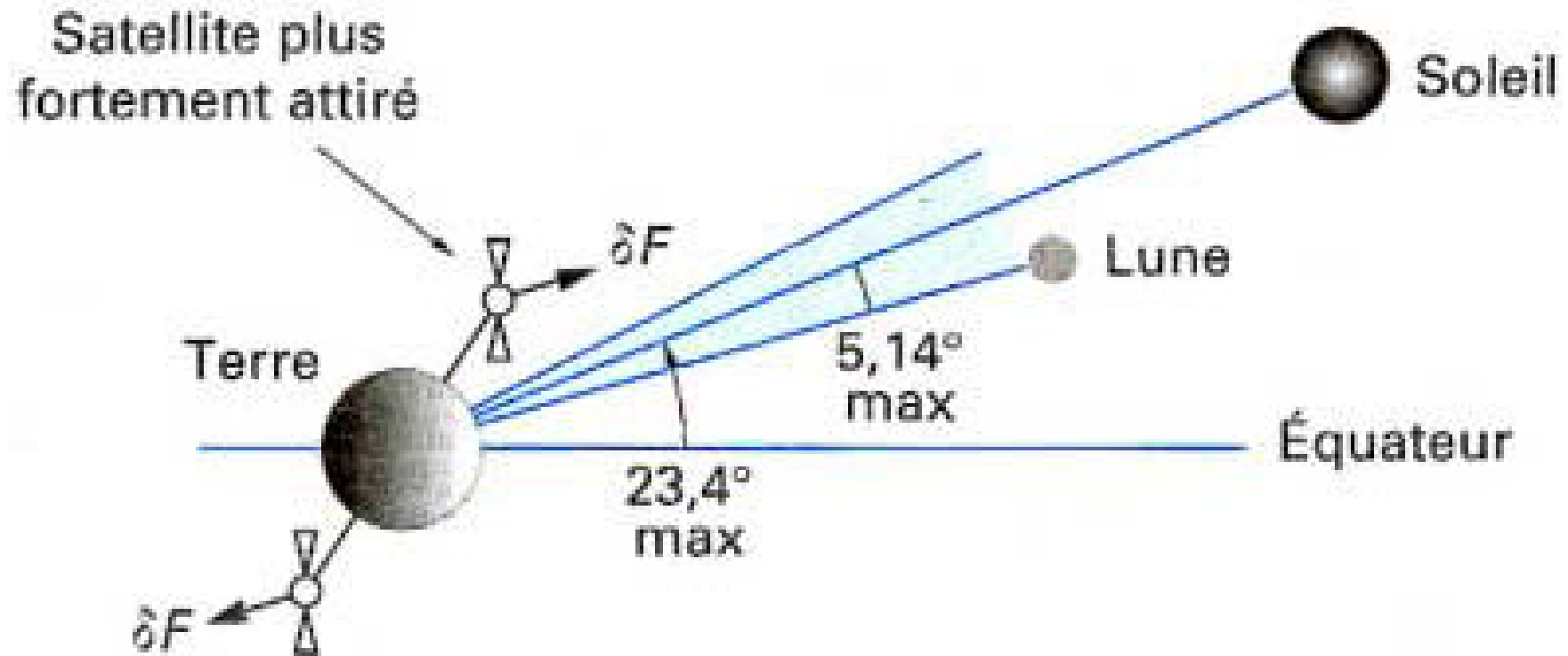


une rotation apsidale

Attraction de la Lune et du Soleil

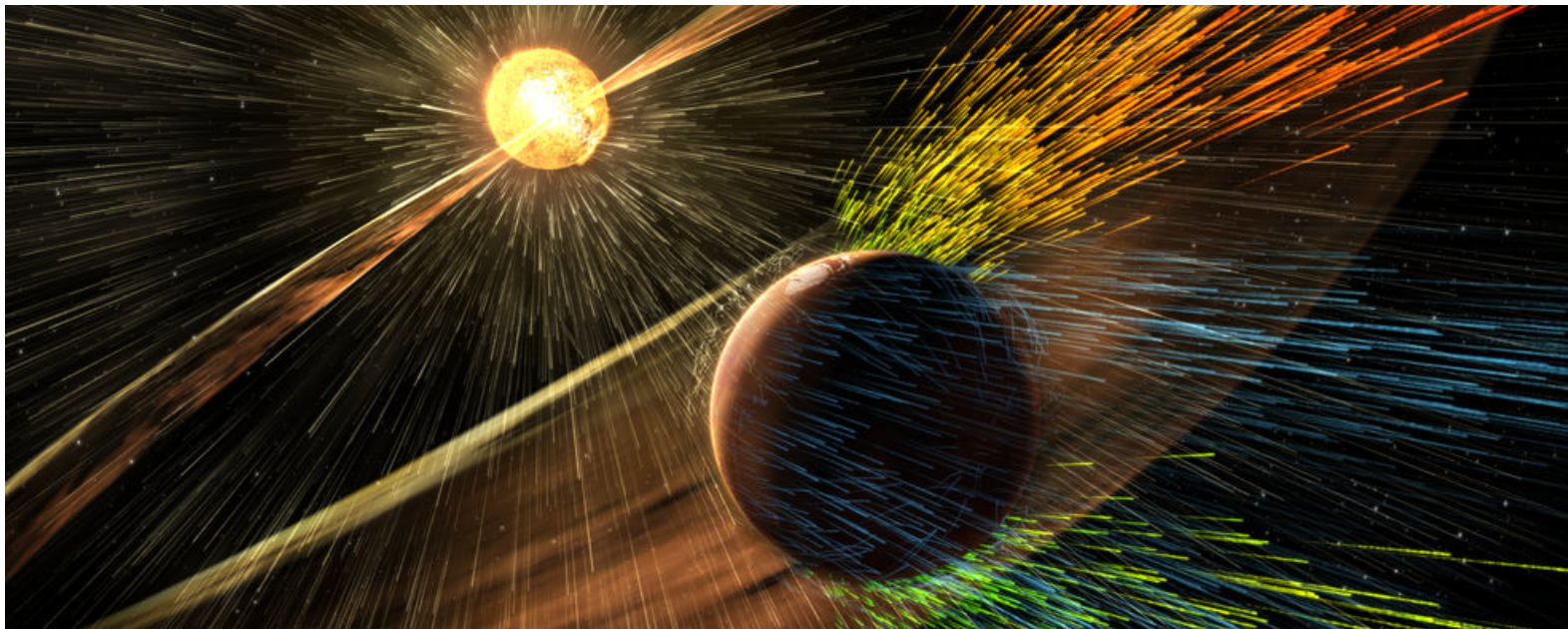
- La **Lune et le Soleil** créent chacun une **force attractive**,
- d'autant **plus importante** que le satellite est proche de la Lune ou du Soleil.
- Ces forces **varient tout au long de l'orbite** et tout se passe, pour le système **Terre-satellite**, comme s'il existait **une force perturbatrice δF** (delta minuscule) **agissant sur :**
 - ***la moitié de l'orbite dans une direction,***
 - ***et sur l'autre moitié dans la direction opposée*** comme indiqué sur la figure .
- L'effet sur l'orbite du satellite dépend des **paramètres orbitaux**.
- Il est ***faible pour des satellites en orbite basse.***
- Pour un satellite **géostationnaire**, il se traduit par **une dérive de l'inclinaison de l'orbite de l'ordre de $0,85^\circ$ par an.**

Effet de l'attraction de la Lune et du Soleil



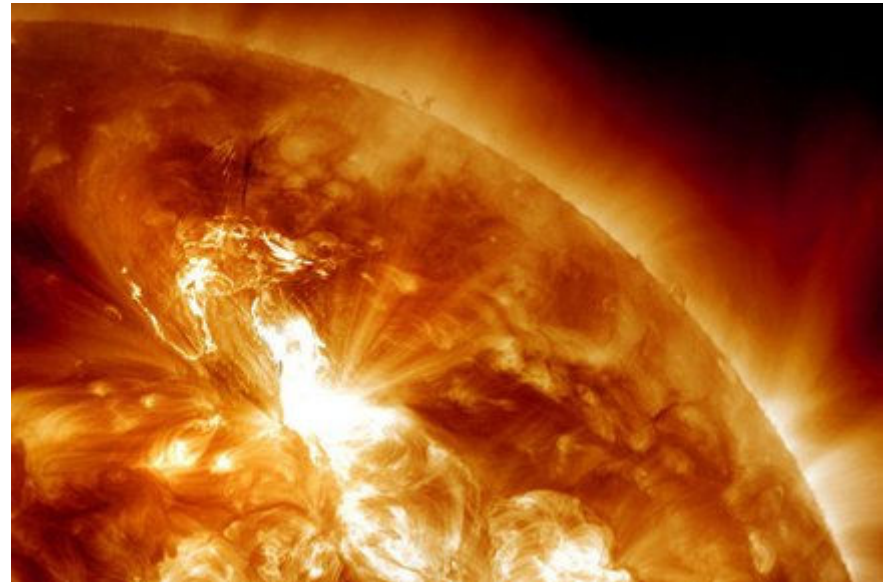
Pression de radiation solaire

- Un **élément de surface** du satellite **orienté du côté du Soleil** est soumis à **une pression fonction de la réflectivité de la surface**.
- Un **satellite de masse m** ,
- **de surface apparente S_a en direction du Soleil**,
- **de réflectivité égale à 0,5** (valeur typique), subit **une accélération**
- Γ (gamma majuscule) (m/s^2) due à la **pression de radiation** égale à :
- **$\Gamma = 6,77 \times 10^{-6} S_a/m$**



Exemple de pression due au radiations solaire

- Les **panneaux solaires** constituent pratiquement la **surface apparente du satellite**.
- Pour des **satellites en orbite basse**, le rapport
- S_a/m est de l'ordre de $2 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{kg}$; l'**accélération** due à la pression de radiation est de l'ordre de $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$
- et son effet est limité.



Exemple pour un satellite Géostationnaire

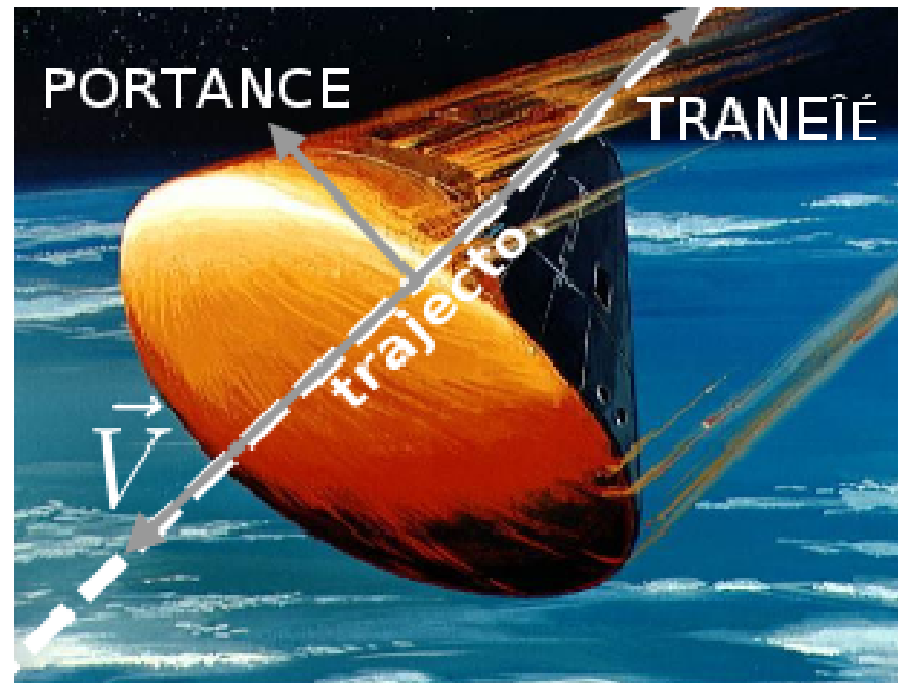
- Pour des satellites de télécommunications **géostationnaires**
- de **forte puissance électrique** sur lesquels seront montés des **panneaux solaires de grande taille** surface de **100 m²**
- pour une **masse de 1 000 kg** par exemple,
- le rapport S_a/m est de l'ordre de **10⁻¹m²/kg** ;
- l'effet essentiel dans ce cas est de modifier **l'excentricité de l'orbite**, qui **évolue cycliquement avec une période de 1 an.**

Traînée aérodynamique

- Cette traînée s'exerce sur **les satellites en orbite basse.**
- La force d'origine **aérodynamique s'exerce sur le satellite en sens inverse**
- la masse **volumique de l'atmosphère,**
- **L'effet principal** du frottement atmosphérique est une **décroissance du demi-grand axe de l'orbite** due à une **diminution de l'énergie** de l'orbite.
- Une orbite **circulaire reste circulaire,** mais son **altitude diminue** tandis que **la vitesse du satellite s'accroît.**

Traînée aérodynamique orbite elliptique

- Pour une **orbite elliptique**, le **freinage** se situe principalement au **périgée**.
- L'altitude de l'apogée diminue, l'altitude du périgée restant pratiquement constante :
- **l'excentricité diminue** et l'orbite tend à **devenir circulaire**



Classification des orbites

- On distingue **plusieurs types d'orbites** en fonction des objectifs de la **mission**.
- **Orbites circulaires**
- L'orbite **circulaire la plus répandue** est celle du **satellite géostationnaire**.
- Elle correspond à la **trajectoire d'un satellite dans le plan équatorial de la Terre**,
- **animé d'une vitesse angulaire égale à celle de la Terre**
- et **dans le même sens**,
- de telle sorte que le **satellite apparaisse comme immobile** par rapport à celle-ci.
- Pour cela, il faut que **la période orbitale soit égale à un jour sidéral**,
- c'est-à-dire au temps mis par la Terre pour tourner d'un tour sur elle-même, soit
- **23 h 56 min 4 s = 86 164 s**.
- Cela impose une valeur **du rayon de l'orbite**, soit :
- **$a = 42\,164$ km**, et donc une **altitude $R_0 = 35\,786$ km**.

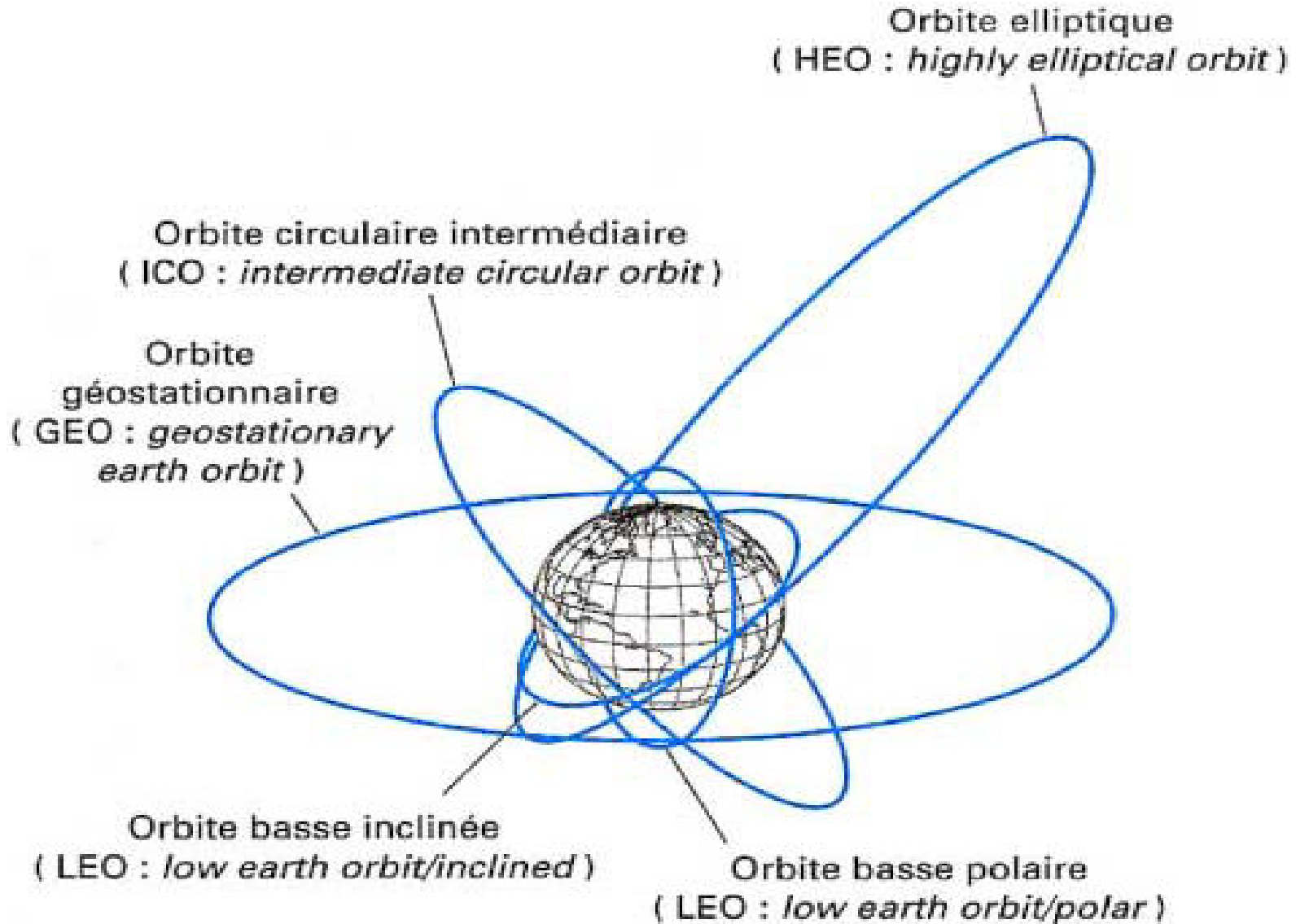
L'avantage du satellite géostationnaire

- L'avantage du satellite géostationnaire est d'offrir, **avec un seul satellite**, **une couverture importante de la Terre** (42 % de la surface de la Terre est en visibilité du satellite),
- et une **position fixe dans le ciel**.
- **Le pointage initial des antennes** de stations terriennes en est facilité.
- On peut éviter **les dispositifs de poursuite**.
- **L'effet Doppler est limité** (de l'ordre de 10^{-8})

LEO ICO

- Les **orbites circulaires polaires ou inclinées** ne sont considérées qu'à des **altitudes basses** (**LEO**: *low earth orbit* entre **500 et 2 000 km**)
- ou **intermédiaires** (**ICO** : *intermediate circular orbit* vers **10 000 km**).
- Le choix de ces **altitudes est déterminé par l'atmosphère terrestre**
- pour **la limite inférieure**, par **les pics de densité de particules ionisantes** (**électrons et protons**) formant les **ceintures de radiations** qui entourent la Terre,
- et qui se situent vers **5 000 km (protons)**
- et **20 000 km (électrons)**.
- Ces particules ont pour effet de **dégrader le rendement électrique des panneaux solaires des satellites**.

Types d'orbites



Orbites elliptiques

- Les orbites **elliptiques** sont utilisées pour **réaliser une couverture régionale**
- à des **latitudes moyennes** (de **40° à 70 °**)
- Il est fait appel à une **orbite inclinée à $i = 63,4^\circ$** pour **maintenir l'apogée de l'orbite au-dessus de la zone de service.**
- sous un angle de **site élevé (entre 60° et 90 °)**.
- **La période de l'orbite** est choisie de telle sorte que le satellite **revienne à l'apogée** lorsque **la zone de service se retrouve sous l'apogée.**
- un **angle de site** (angle dans un plan vertical local sous lequel on voit le satellite par rapport à l'horizon) .

Angle du Site ou élévation

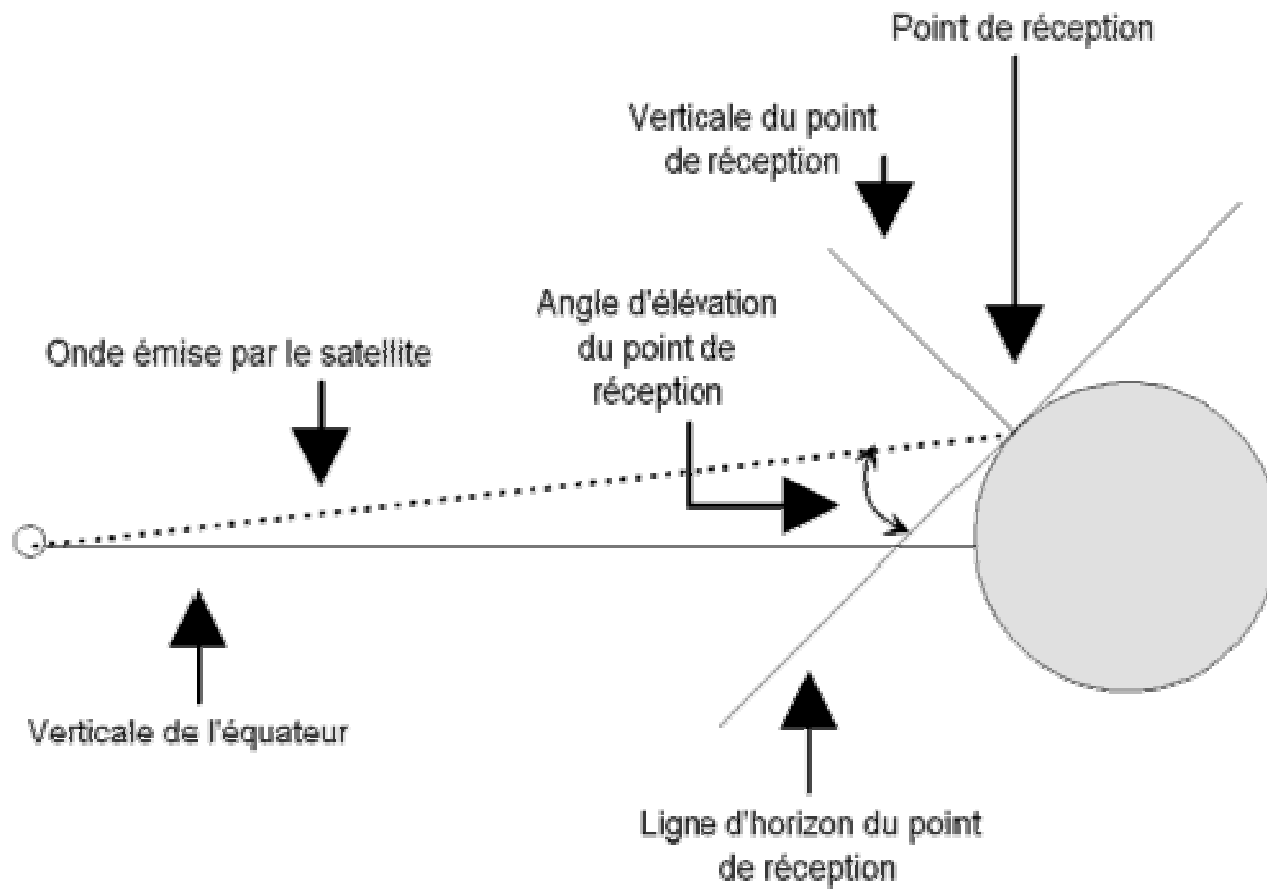
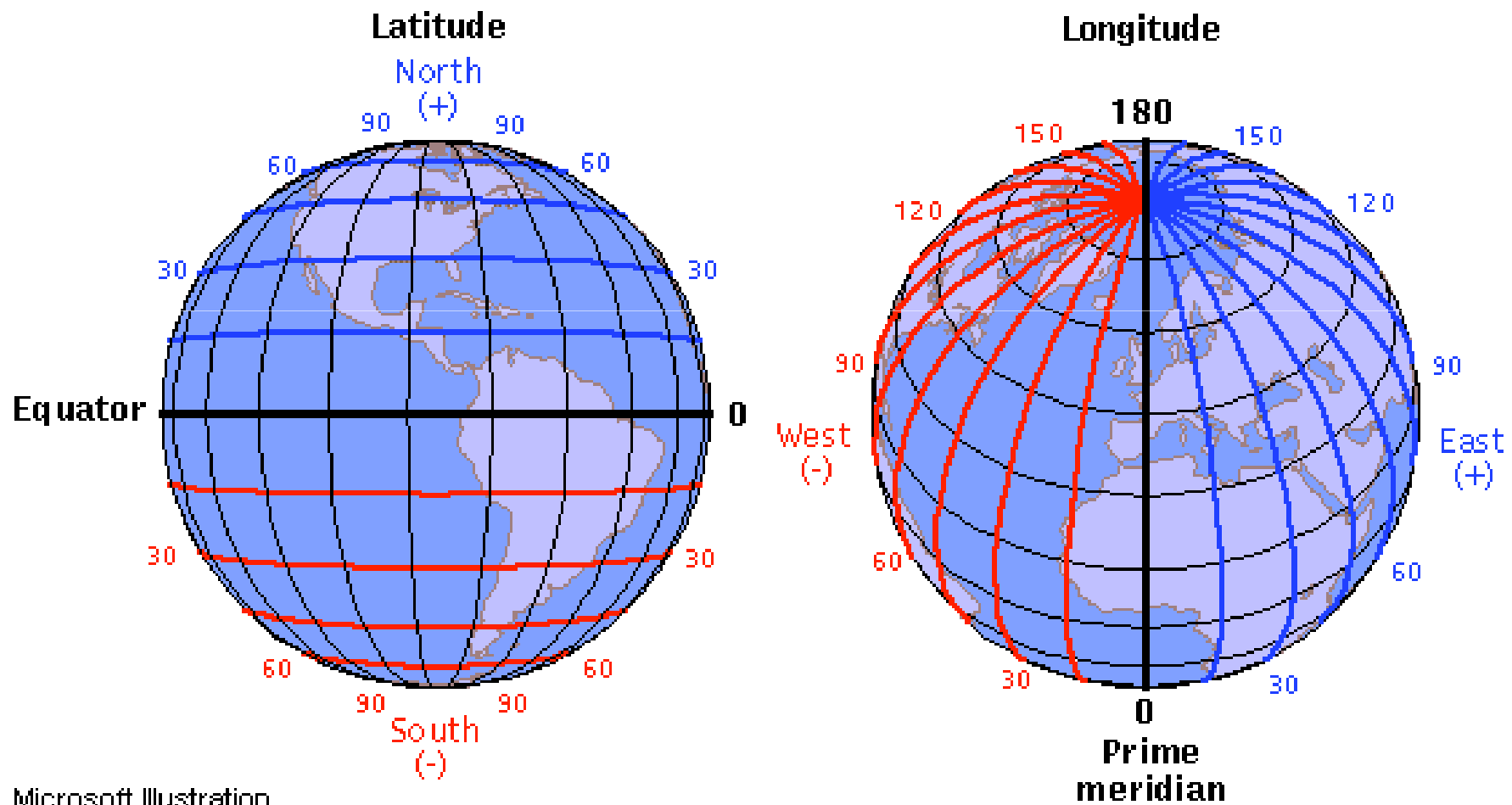


fig 1

Latitude et longitude

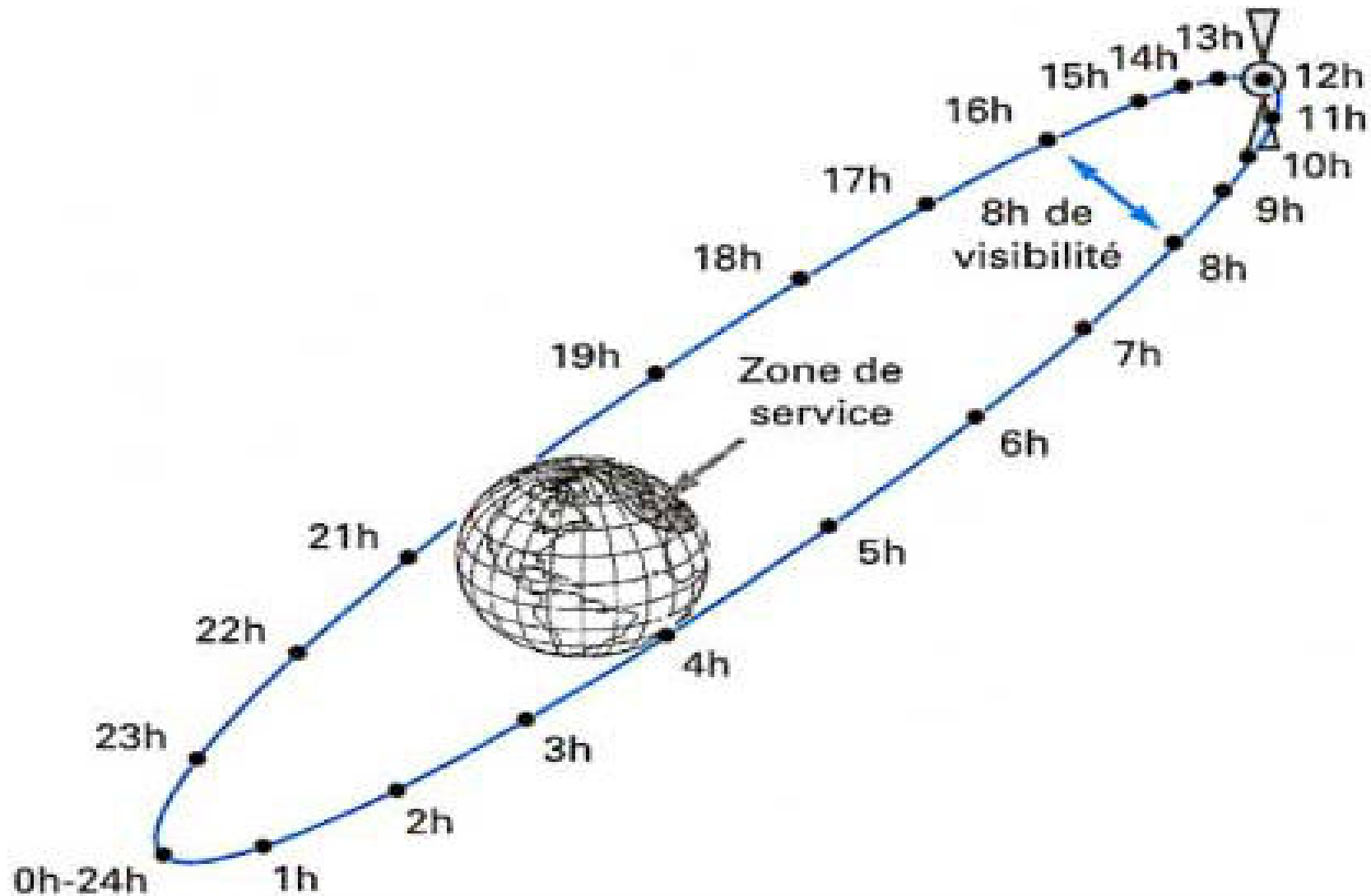


Microsoft Illustration

Orbite Tundra

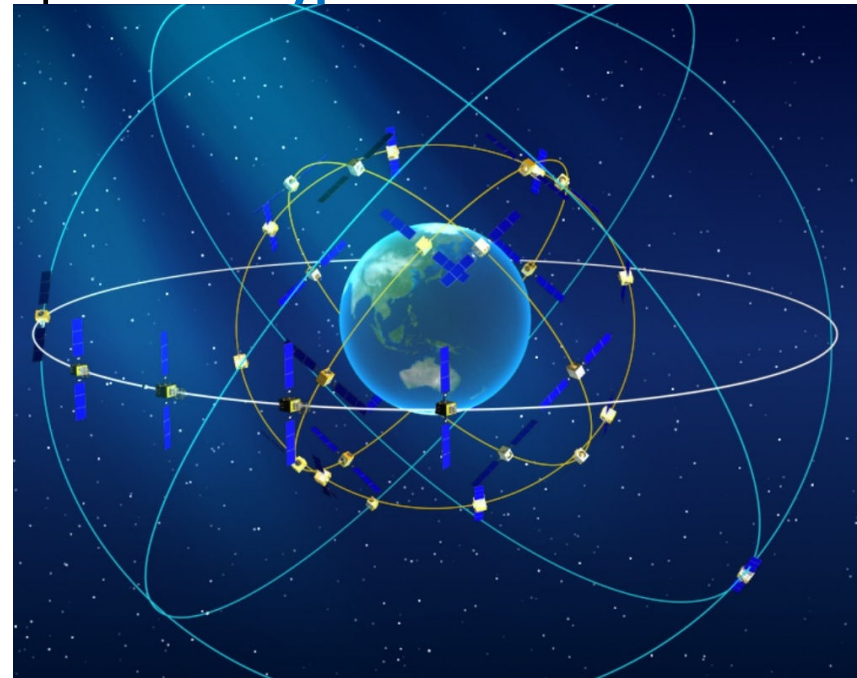
- le satellite **reste environ 8 h au voisinage de l'apogée**, en visibilité des stations terriennes de la zone de service.
- Un système à **trois satellites** permet **une couverture permanente de la zone de service**,
- avec toutefois **la nécessité d'un transfert**
- **(handover) des communications d'un satellite vers un autre trois fois par jour**

Orbite Tundra (excentricité = 0.2, période = 24 h, inclinaison = 63.4°)



Constellations de satellites

- La couverture assurée par **un satellite peut être insuffisante** au regard de la **couverture souhaitée pour la zone de service**.
- D'autre part, si la mission est assurée par un **satellite non géostationnaire**, la couverture d'une région donnée **n'est pas permanente**.
- Il faut alors envisager des systèmes comportant **plusieurs satellites**.
On **parle de constellations**
- De telles constellations présentent plusieurs **types de couverture**.
- On peut distinguer:



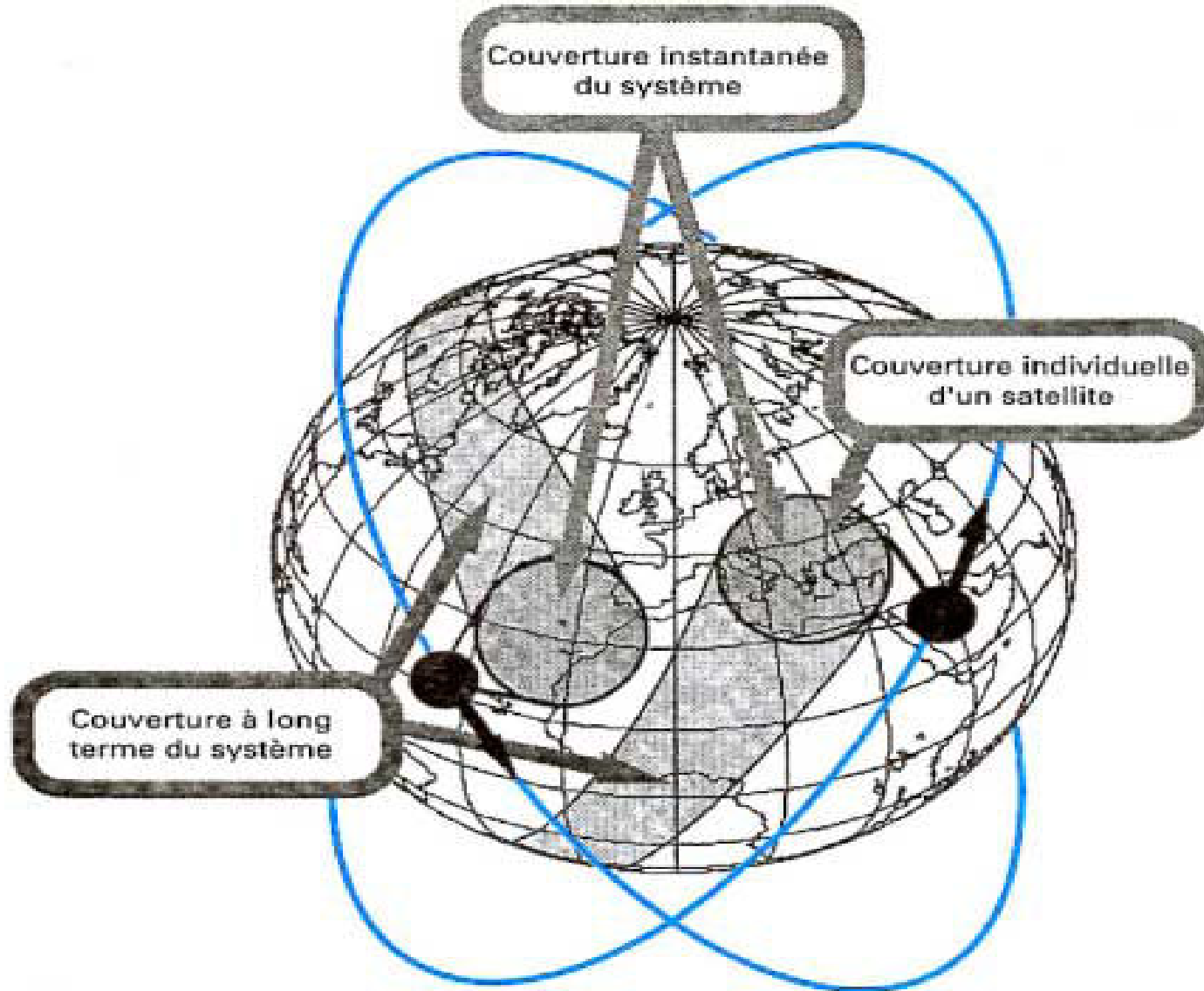
types de couverture par une constellation

- **La couverture instantanée d'un satellite** : il s'agit de la région de la Terre pour laquelle la spécification minimale de couverture (gain d'antenne, angle de site) est assurée par ce satellite ;
- **la couverture instantanée du système**: c'est la réunion, à un instant donné, des couvertures instantanées de l'ensemble des satellites de la constellation ;

Le troisième type: la couverture à long terme du système

- **la couverture à long terme du système** : c'est la couverture **réalisée par l'ensemble des satellites de la constellation au bout d'un temps suffisamment long**
- pour que les paramètres statistiques de cette couverture en un point donné (pourcentage du temps pendant lequel la spécification de couverture est réalisée) ne soient plus **affectés par les mouvements respectifs des satellites et de la Terre.**

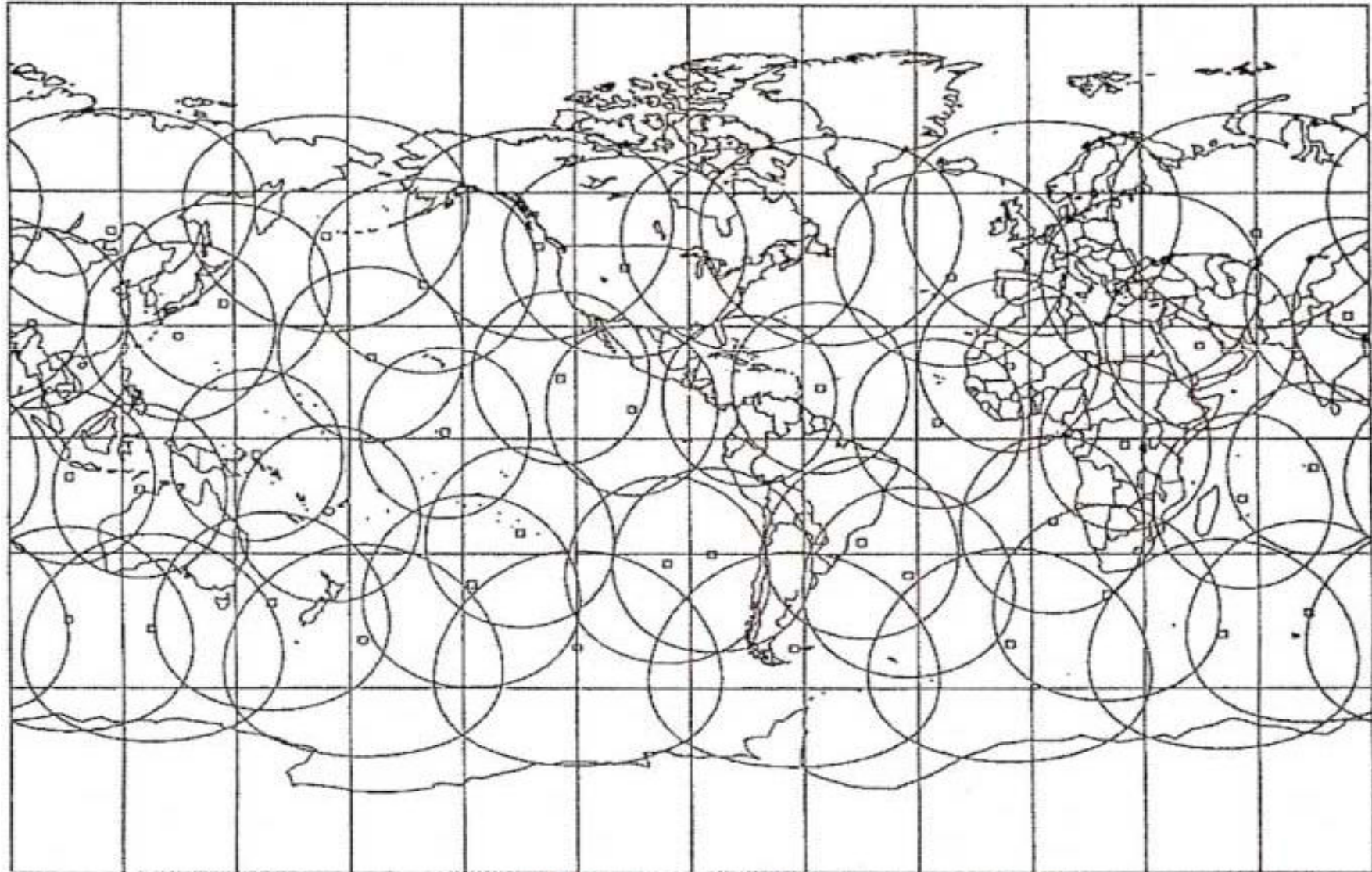
Types de couverture d'une constellation



exemple de couverture instantanée (Globalstar)

- La figure **suivante** montre un exemple de **couverture instantanée d'un système** constitué:
- par une **constellation de 48 satellites**
- à une **altitude de 1 400 km**
- répartis **dans 8 plans orbitaux**
- **inclinés à 52°**
- Pour un tel système, la couverture à **long terme est une zone:**
- **comprise entre $\pm 65^\circ$ de latitude,**
- à l'intérieur de laquelle un angle de **site minimal de 10° est garanti**
- pendant **100 % du temps.**

Couverture instantanée du système Globalstar



Procédures de lancement

- La procédure de lancement vise à mettre
- le nombre désiré de satellites
- dans le plan orbital souhaité,
- avec la position relative prévue.
- Afin de réduire le coût du lancement par satellite, et si la performance du lanceur le permet, plusieurs satellites sont lancés simultanément

Procédure de lancement

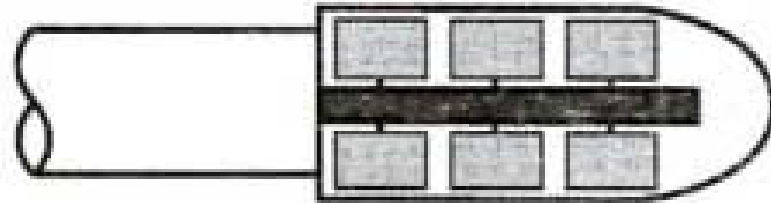
- Les satellites sont placés par le lanceur sur une orbite provisoire, parfois appelée **orbite de parking**, généralement **circulaire**.
- L'allumage d'un moteur incorporé à *chaque satellite* modifie l'orbite du satellite considéré et le place sur **une orbite dite de transfert**
- Cette **orbite est elliptique** :
- son **périgée** est à l'altitude de l'orbite de parking
- et son **apogée a pour altitude celle de l'orbite définitive**

Les quatre étapes de mise d'un satellite dans son orbite final

- il faut procéder en **quatre étapes**
 1. **allumage du moteur** à l'instant où le **satellite est à l'emplacement désiré** pour **le périgée de l'orbite de transfert,**
 2. **parcours inertiel sur l'orbite de transfert** moteur éteint,
 3. **Renversement du satellite,**
 4. **réallumage du moteur à l'apogée de l'orbite** pour circulariser celle-ci.
- Le positionnement relatif des satellites sur **l'orbite finale** peut se faire par des **choix différents du moment d'allumage du moteur** selon le **satellite concerné**

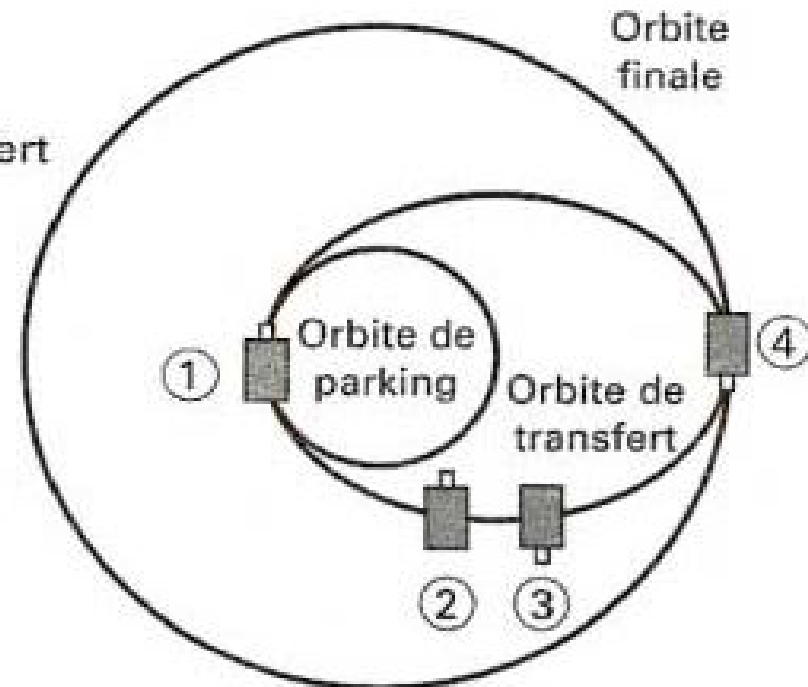
Étapes d'une procédure de lancement

a lancement multiple sur l'orbite de parking



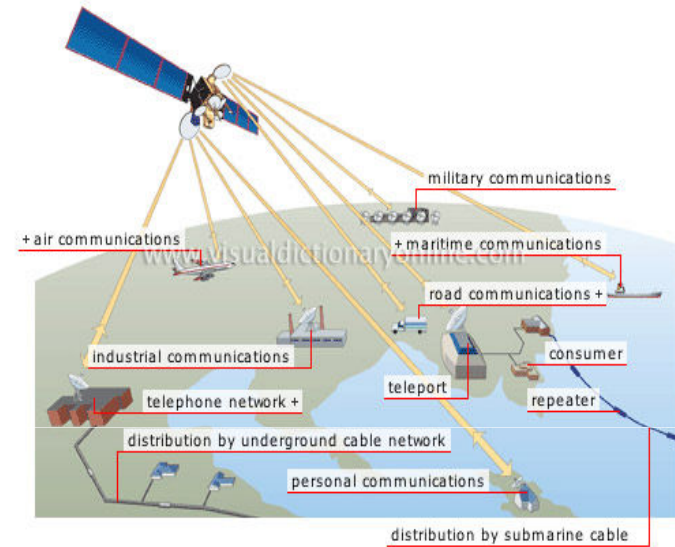
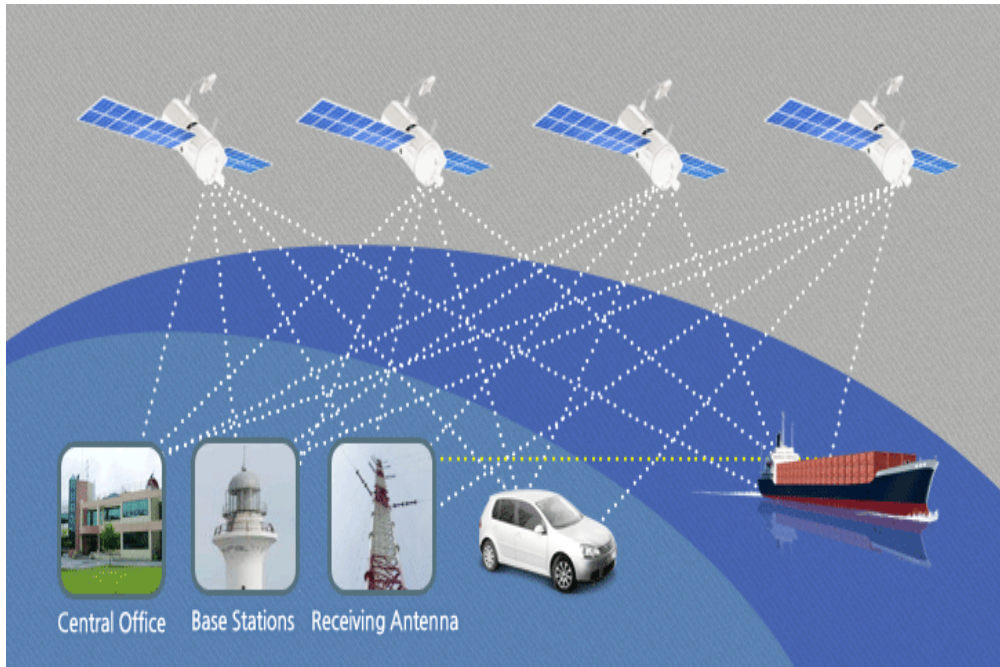
- ① injection sur orbite de transfert
- ② parcours inertiel
- ③ retournement
- ④ circularisation

b transfert puis circularisation



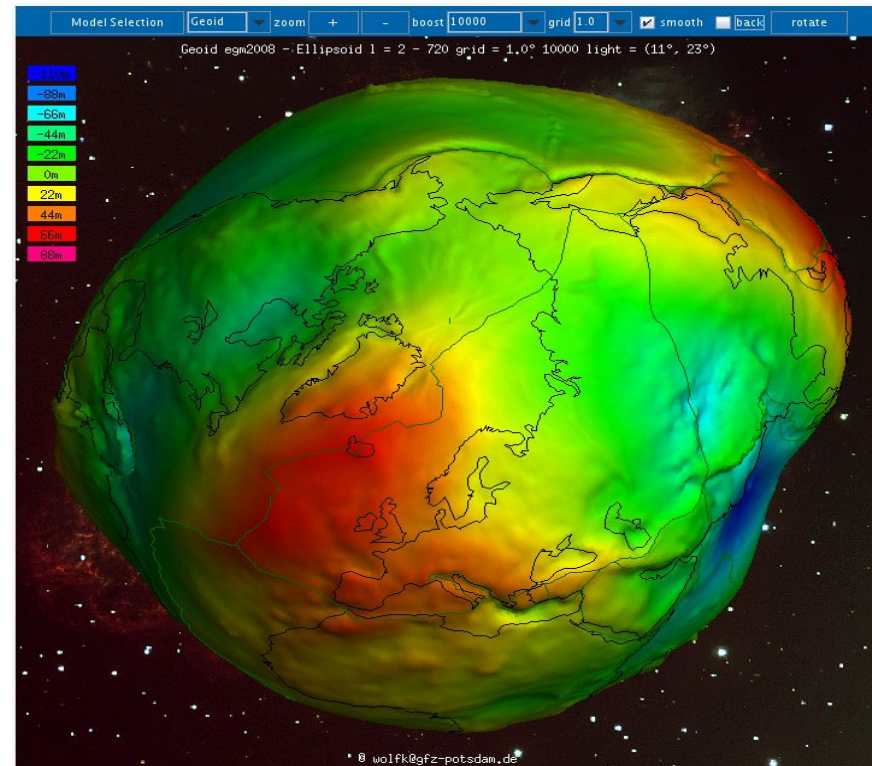
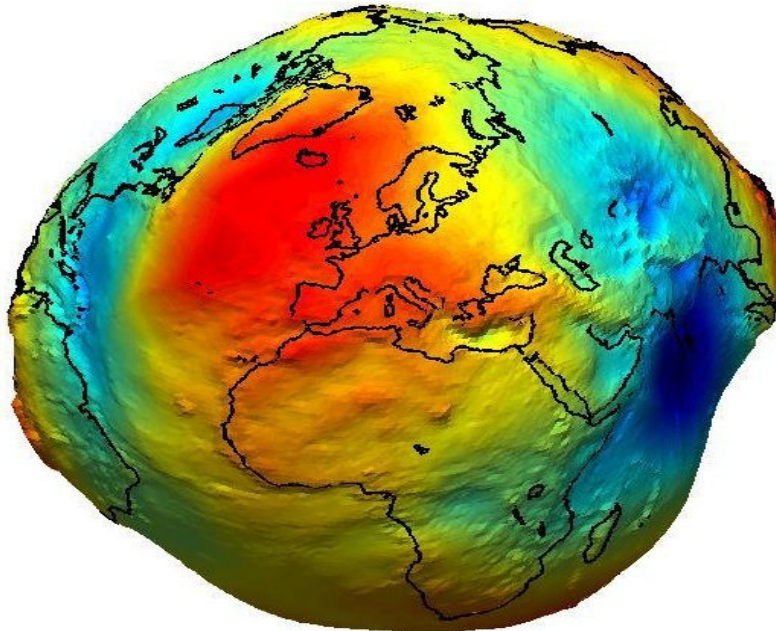
Les domaines d'applications des satellites

- Les domaines d'application sont très variés Les plus importants d'entre eux sont :
- Météorologie
- Télécommunications
- Navigation maritime et aérienne
- Télédétection des Ressources terrestres
- Océanographie
- Géodésie



Géodésie

- On peut distinguer deux domaines d'application de la technique spatiale à la géodésie :
 1. la **géodésie dynamique**
 2. Et la **géodésie de position**.
- **La géodésie dynamique** consiste essentiellement en **l'étude du champ de pesanteur sur l'ensemble du globe**,
- et des **conséquences qu'on peut en tirer sur la forme géométrique de la Terre**,
- le **mouvement des pôles**,
- la **rotation de la Terre**,
- la **déviations de la verticale en tout point**.



Le principe de ces mesures en géodésie

- Le principe de ces mesures est basé sur l'interaction entre la forme de la Terre et ses anomalies
 1. renflement équatorial,
 2. masses montagneuses,
 3. différences de densité
 4. et la trajectoire du satellite.
- Puisque ces anomalies ont un effet **perturbateur prévisible sur la trajectoire d'un satellite**, on peut **utiliser ce phénomène en sens inverse**, c'est-à-dire
- **mesurer les perturbations de la trajectoire pour en déduire la grandeur des sources de perturbations.**

La géodésie de position

- La géodésie de position sert à **calculer la position de points de la surface terrestre dans un système de coordonnées.**
- Les méthodes **classiques de la triangulation terrestre**
- Exigent une **visibilité directe des points voisins d'un réseau.**
- Cette contrainte importante, **ne garantissant une grande précision et une homogénéité que dans une zone assez restreinte,**
- Par contre, l'utilisation des **satellites** permet **de relier des stations terrestres à des points de l'espace,** ce qui permet **d'augmenter considérablement la distance** entre deux **points voisins d'un même réseau** et de calculer celui-ci dans un **système de coordonnées géocentrique unique,**
- assurant ainsi une **précision et une homogénéité globales.**

satellites utilisés dans le but de la Géodésie de position

- Les satellites utilisés dans ce but peuvent être
- **passifs** ils fonctionnent comme **simples réflecteurs de la lumière solaire ou d'une onde**
- ou **actifs**. Ils sont alors capables
- de **réaliser diverses tâches**, comme l'émission de puissants éclairs,
- **l'émission d'une fréquence-étalon**,
- la **transmission d'informations codées**.

