

Université Saad Dahlab de Blida
Faculté des sciences
Département de Journalisme scientifique

Les Satellites
et leurs applications



sujet :
proposé par Mer ZELLA Lakhdar
présenté par Mer BOUDJELLAL Mohamed

année 2006-2007

Sommaire

Chapitre 1 : Satellites artificiels

1.1	Historique	4
1.2	Domaine de développement.....	4
1.3	Définition	4
1.4	La vie d'un satellite	4
1.5	Architecture d'un satellite.....	5
1.6	Ceinture de radiation de Van Allen.....	5
1.7	Différentes vitesses de satellisation	5
1.8	Orbites	5
1.8.1	Les orbites circulaires ou quasi-circulaires.....	6
1.8.2	Les orbites elliptiques.....	6
1.8.3	Autres dénominations	7
1.9	Scénarios de lancement d'un satellite.....	8

Chapitre 2 : Les satellites de télécommunication

2.1	Historique.....	9
2.2	L'évolution des satellites.....	9
2.2.1	Mode passif.....	9
2.2.2	Mode actif.....	9
2.2.3	Les premiers satellites de communication.....	9
2.3	Définition.....	9
2.3.1	Les systèmes GEO	10
2.3.2	Les systèmes MEO.....	10
2.3.3	Les systèmes LEO.....	10
2.3.4	Les systèmes elliptiques.....	10
2.4	Connectivité.....	10
2.4.1	Liaison point à point.....	10
2.4.2	Liaison point à multipoints.....	10
2.4.3	Liaison multi point interactifs.....	11
2.5	Fonctions utiles	11
2.5.1	La station spatiale.....	12
2.5.2	La station terrestre.....	12
2.5	Bandes de fréquence.....	13
2.5.1	Les fréquences	14
2.5.2	Bandes fréquences.....	14
2.5.3	Services	14
2.6	Principaux opérateurs de services fixes par satellites	14
2.7	Les services de télécommunications par satellites	15
2.7.1	La téléphonie.....	15
2.7.2	La télédiffusion.....	15
2.7.3	La transmission de données.....	16
2.7.4	Le multimédia	16
2.7.5	La radiomessagerie.....	16
2.7.6	L'Internet	16
2.8	Différentes constellation de satellite.....	16
2.8.1	Introduction	16
2.8.2	Iridium.....	16
2.8.3	Globalstar	17
2.8.4	Skybridge	18
2.8.5	Teledesic	18
2.8.6	Thuraya.....	18
2.9	Services commerciaux	19
2.9.1	INMARSAT.....	20
2.9.2	INTELSAT.....	20
2.9.3	EUTELSAT.....	20

Chapitre 3 : Les satellites de télédétection

3.1	Historique.....	21
3.2	Principe de télédétection.....	21
3.2.1	Le rayonnement électromagnétique(REM).....	22
3.2.2	L'interaction avec l'atmosphère.....	23
3.2.3	L'interaction rayonnement-cible	23
3.2.4	Les capteurs (radiomètres)	24
3.2.5	Détection passive et active.....	24
3.2.6	Quelques détecteurs	25
3.2.7	Caractéristiques d'un satellite :L'orbite et sa fauché.....	25
3.2.8	Résolution spatiale , espacement des pixels	26
3.2.9	Résolution spectral	27
3.2.10	Résolution radiométrique	27
3.2.11	Résolution temporelle ou répétitive	28
3.3	Application dans le domaine militaire	28
3.4	Satellites de météorologie.....	28
3.4.1	Introduction.....	28
3.4.2	GOES.....	29
3.4.3	NOAA (AVHRH)	29
3.4.4	Autres satellites météorologiques.....	30
3.5	Satellites d'observations de la terre.....	30
3.5.1	LANDSAT.....	30
3.5.2	SPOT.....	30
3.6	Imagerie et observation du sol	30
3.6.1	Introduction	31
3.6.2	Différents types d'imagerie	31
3.6.3	Différents types de résolutions	33
3.6.4	Applications.....	34

Chapitre 4:Positionnement-Localisation

4.1	GLONASS.....	36
4.2	Gallileo (système européen de navigation par satellite)	36
4.2.1	Les services de gallileo	37
4.3	NAVSTAR/GPS.....	38
4.3.1	Principe de localisation GPS.....	40
4.3.2	Application du système GPS	42

Chapitre 5 :La géodésie spatial

5.1	Introduction.....	44
5.2	Le système Transit	44
5.3	Le système Argos.....	44
5.4	Le système Doris.....	45
5.4.1	Intérêt du système Doris.....	46
5.4.2	Les applications du positionnement.....	47
5.5	Positionnement par laser	47

Bibliographie

Chapitre 1 : Satellites artificiels

1.1 Historique

Le 4 octobre 1957, pour la première fois, un satellite artificiel (spoutnik 1) fut lancé autour de la terre.

Conçu par la Russie (ex URSS) ce satellite ouvrait l'ère spatiale.

Alors que l'homme rêvait de voyager dans l'espace depuis très longtemps, il parvenait enfin à mettre au point une fusée (lanceur) suffisamment puissante pour vaincre la pesanteur terrestre. La voie a été entrouverte par l'Allemagne en 1942 par la construction de la première fusée moderne (V2) qui avait permis d'établir les fondements des technologies de propulsion et de guidage. Puis entre 1945 et 1957, des progrès technologiques avaient été réalisés par le biais des missiles, ce qui permet d'aboutir au lanceur spatial.

La Russie (ex URSS) et les Américains vont s'engager dans le déploiement de satellites militaires pour la reconnaissance photographique (espionnage), la navigation, et la détection des différentes menaces etc.

D'autres pays accéderont à l'espace comme la France, le Japon, la Chine, l'Inde, etc.

1.2 Domaine de développement

Dès le début de l'ère spatiale, la recherche se développera dans trois directions.

- a) L'exploitation du système solaire et l'univers
- b) Les vols habités
- c) La surveillance et la gestion de la terre ; satellite de navigation, de télécommunication, de détection des ressources terrestres, de météorologie...

La pollution, la couche d'ozone ; l'effet de serre, la climatologie et bien d'autres domaines sont étudiés en permanence et avec efficacité par les satellites.

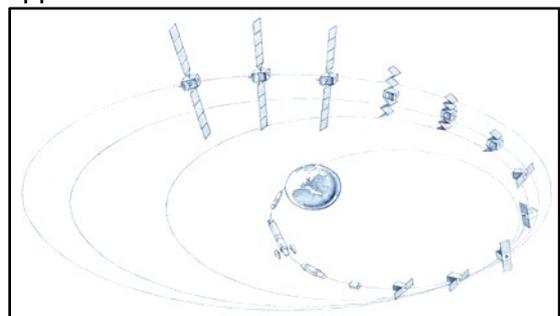
1.3 Définition

Un satellite est un corps qui gravite autour d'un autre corps ainsi la lune est satellite de la terre et la terre est un satellite du soleil. Les objets introduits dans l'espace par l'homme et qui continuent à tourner autour de la terre ou d'une autre planète sont désignés sous le nom de satellites artificiels. La trajectoire décrite périodiquement par le satellite est appelée orbite.

1.4 La vie d'un satellite

Fig.2

Un satellite commence sa vie dans l'espace replié sous la coiffe du lanceur (fusée), qui protège des frottements de l'air lors du passage dans l'atmosphère. Le satellite se sépare du lanceur lorsqu'il est sur l'orbite. Dans les heures qui suivent, les panneaux solaires sont déployés, son altitude



par rapport à la terre et au soleil s'adapte, et le satellite effectue les manœuvres nécessaires pour rejoindre son orbite définitive. (Fig.2)

C'est la phase de mise en route qui varie selon la mission :

En orbite basse, le satellite est généralement injecté sur une trajectoire proche de celle choisie.

En orbite géostationnaire, il est injecté sur une orbite de transfert,

Il n'est cependant pas opérationnel immédiatement.

La phase de recette en sol est destinée à valider un environnement réel le fonctionnement et les performances du système impossible ont réalisé au sol.

Les différents instruments sont donc progressivement « réveillés » et testés.

1.5 Architecture d'un satellite

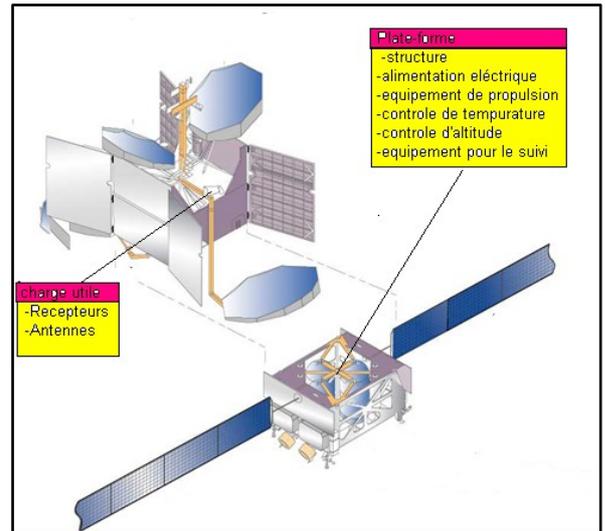
Les satellites sont des objets très variés et ont de ce fait une architecture qui leur est propre

L'élément central ; la plate-forme ou « bus » supporte les équipements nécessaires à la mission, qu'on appelle la charge utile et est équipée pour lui fournir les ressources nécessaires à son fonctionnement.

Elle comprend notamment : (Fig.3)

- Structure
- Alimentation électrique (génération, distribution et stockage)
- Équipement de propulsion
- Contrôle de température–
- Contrôle de l'attitude du satellite (orientation dans l'espace, stabilisation selon les trois axes)
- Équipement pour le suivi (télémétrie), le contrôle (télécommande) et la localisation du satellite.

Fig.3



Les satellites sont classés suivant leur masse. On peut les regrouper en 7 catégories, allant du plus grand au plus petit

satellite grand		moyen	petit	mini	micro	nano	pico
poids	Plus de 3 tonne	1 à 3 tonne	500 à 1000 kg	100 à 500 kg	10 à 100 kg	1 à 10 kg	Inf. à 1 kg

1.6 Ceinture des radiations de Van Allen

On distingue deux zones chargées de protons très énergétiques dues aux rayons cosmiques : (Fig.4)

1 er zone : 1500 km à 5000 km d'altitude

2 er zone : 13000 km à 20000 km d'altitude

Les radiations détériorent les équipements électroniques des satellites.

Ces zones définissent les trois domaines d'altitude.

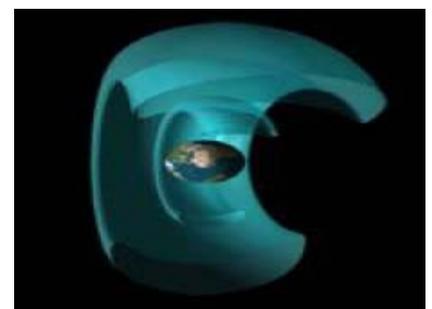


Fig.4

1.7 Différentes vitesses de satellisation

Pour pouvoir mettre un satellite en orbite autour de la terre, il faut lui donner une certaine vitesse, elle se nomme première vitesse cosmique. Elle est environ égale à $v_1 = 7,9 \text{ km/s}$ (28080 km/h) Pour les sondes spatiales il faut une vitesse plus importante car la sonde doit s'échapper de la gravitation terrestre. (Fig.5)

Elle est égale à $v_2 = 11,2 \text{ km/s}$ (40320 km/h). C'est la vitesse d'évasion.

On a les situations suivantes pour les satellites et sondes

Si v est inférieur à v_1 alors l'objet lancé retombe sur la terre.

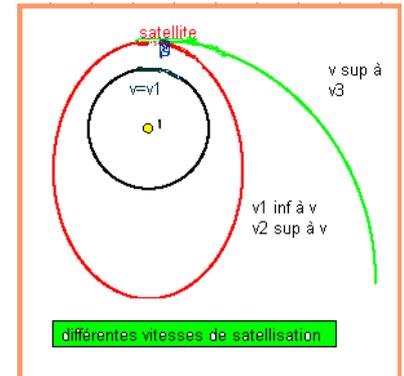
Si v est égale à v_1 alors le satellite a une orbite circulaire.

Si v est compris entre v_1 et v_2 alors le satellite a une orbite elliptique.

Si v est supérieur à v_2 alors la sonde a une orbite elliptique autour du soleil.

Si v est supérieur à $v_3 = 16,1 \text{ km/h}$ la sonde quittera l'attraction solaire, toutefois, à ce jour, aucun des

engins spatiaux n'a échappé à la gravitation du soleil.



1.8 Orbites

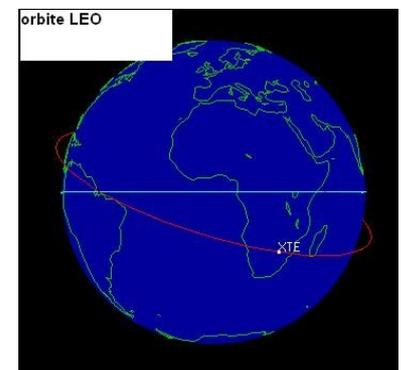
La diversité des missions spatiales a pour conséquence une grande variété d'orbites. En fonction de ces missions, les orbites décrites par les satellites de la terre s'organisent en deux grandes catégories.

1.8.1 Les orbites circulaire ou quasi-circulaires :

Les satellites en orbite circulaire sont classés par leur altitude moyenne :

- Orbite basse : LEO (Low Earth Orbit) pour une altitude inférieure à 1500 km et supérieure à 500 km . (Fig.6)
- Orbite moyenne : MEO (Medium Earth Orbit) pour une altitude voisine de 20000 km .
- Orbite haute : GEO (Geostationary Earth Orbit) pour une altitude de 36000 km

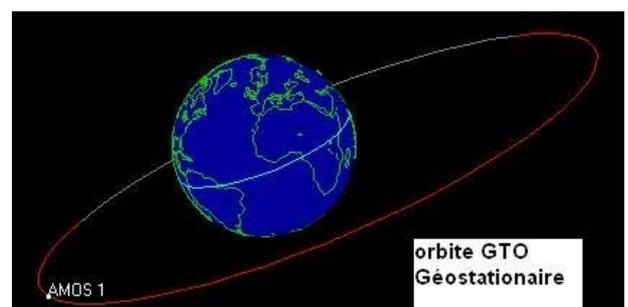
(Fig.6)



1.8.2 Les orbites elliptiques :

Cette orbite est généralement provisoire, puisqu'on y met des satellites à orbite géostationnaire GTO (Geostationary Transfer orbit) (Fig.7)

Parmi les orbites elliptiques, l'orbite de transfert géostationnaire est caractérisé par une apogée située à 36000 km . Ce qui correspond à l'altitude des satellites géostationnaires. Cette orbite est



l'étape quasi-incontournable pour mettre un satellite géostationnaire à poste.

Dans une première phase, le satellite est injecté en périgée d'une altitude de 500 km, puis il décrit l'orbite elliptique de transfert.

Fig.7

Dans une seconde phase, lors de l'un des passages du satellite à l'apogée on lui donne une impulsion supplémentaire à l'aide d'un moteur d'apogée, pour « circulariser » son orbite à cette altitude de 36000 km.

1.8.3 Autres dénominations

1. L'orbite très excentrique HEO (Highly Excentric orbit) :

Les satellites qui sont placés sur ces orbites ont une vitesse faible au voisinage de leur apogée, dans cette situation, leur vitesse par rapport au sol peut être très faible, comme s'ils étaient pendant un moment sur orbite GEO.

2. L'orbite inclinée ; les satellites sont situés sur une orbite inclinée d'un angle par rapport à l'équateur.

1. L'orbite phrasée ; les satellites ont la propriété de survoler au bout d'un temps fini, le même point (zone) physique de la terre ; la période orbitale du satellite doit être dans un rapport rationnel avec la période sidérale de la terre.

1. L'orbite de parking ; on appelle ainsi ,des orbites intermédiaire ou un satellite ou une sonde interplanétaire sont injectées par un lanceur ,avant restitution d'orbite, en attente d'une injection précise notamment pour les transferts interplanétaires.

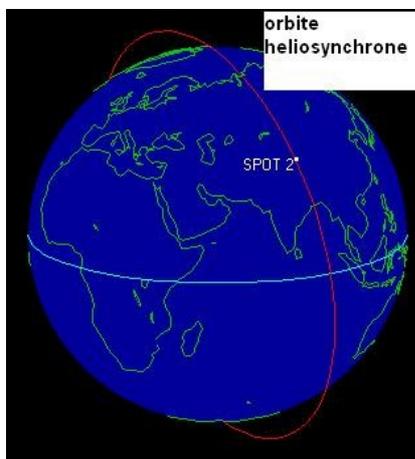
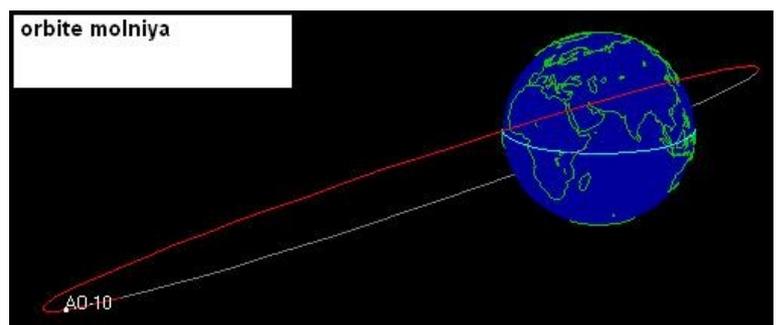


Fig.8

1. L'orbite héliosynchrone (polaire) : cette orbite passant près des pôles présente la particularité de permettre au satellite qui s'y trouve de passer toujours à la même heure solaire au-dessus d'un lieu du globe et peuvent au bout d'un certain temps couvrir toute la surface du globe. (Fig. 8)

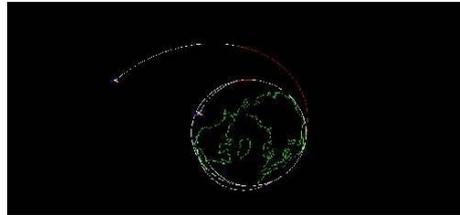
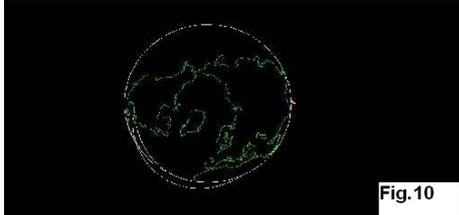
1.8.3.6 L'orbite géostationnaire : les satellites géostationnaires tournent autour de la terre sur une orbite située dans le plan de l'équateur, à 36000km d'altitude .leur mouvement étant synchronisé avec la rotation de la terre autour de l'axe du pôle. Ils surplombent toujours la même partie du globe.

1.8.3.7 L'orbite de type molniya : souvent utilisée par les russes ; cette orbite elliptique très excentrique (périgée vers 600 km ,apogée vers 40000 km) ,est inclinée de 63° .(Fig.9) **Fig.9**



1.9 Scénario de lancement d'un satellite Géostationnaire

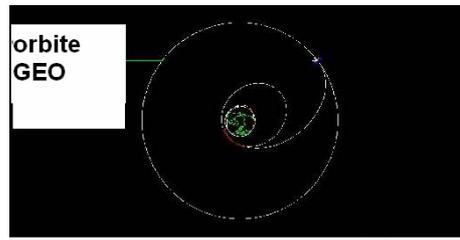
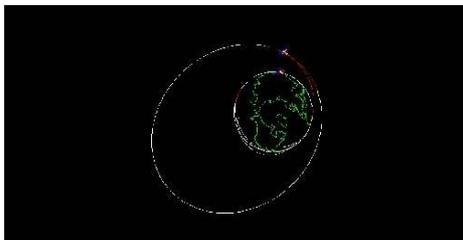
a) Le satellite est lancé de la base de cap Canaveral (USA) à **00 :04 :30 heure** locale .Le satellite est mis en orbite basse circulaire autour de la terre. On laisse parcourir



le satellite un certain nombre de fois **fig. 10.**

b) Le moteur d'apogée permet d'accélérer la vitesse du satellite **Fig.11** et de le positionner sur une orbite elliptique de transfert (GTO). **Fig.12.**

c/ Dès que l'apogée est atteinte, un changement de vitesse permet de stabiliser le satellite sur orbite définitive c.a.d dans ce cas en orbite géostationnaire, GEO. **Fig. 13**



Chapitre 2 : Les satellites de télécommunication

2.1 Historique

Dès 1945, Arthur C. Clarke décrit dans son ouvrage *De l'autre côté du ciel* un système de satellites artificiels de la Terre pouvant être utilisé dans le domaine des communications toutes les régions du globe afin de relier entre elles toutes les régions du globe. Le satellite serait mis en place dans l'espace à une altitude de quelque 35 790 km, de telle sorte que sa vitesse de révolution autour de la Terre soit la même que celle de la rotation de notre planète.

2.2 L'évolution des satellites

2.2.1 Mode passif :

Les premiers satellites furent d'abord passifs ; ils se contentaient simplement de réfléchir les signaux émis par les stations terrestres. En 1960, les Américains mettent en orbite leur premier satellite en mode passif Echo 1.

Ce satellite était un ballon de plastique aluminé de 30 centimètres de diamètre.

2.2.2 Mode actif :

Les deuxièmes types de satellite furent ensuite actifs. C'est-à-dire qu'ils possédaient leur propre système de réception et d'émission. Le premier satellite actif, Telstar 1, fut américain. Mis en orbite deux ans après Echo 1, ce satellite disposait d'un enregistreur à bande qui enregistrerait les données lors de son passage au-dessus d'une station émettrice.

Ensuite, il les diffusait lorsqu'il se situait au-dessus d'une station réceptrice.

2.2.3 Les premiers satellites de communication

1960	1 ^{er} satellite de communication ECHO
1963 1	1 ^{er} satellite géostationnaire SYCHOM
1965 1	1 ^{er} satellite commercial géostationnaire « EARLY BIRD » INTELSAT 240canaux de téléphone + 1 canal TV
1976	3 satellites MARISAT pour la communication maritime
1982	1er système satellite de téléphone mobile INMARSAT-A
1988 1	1 ^{er} satellite privé de télécom. internet PAN AMERICAN
1993 1	1 ^{er} système satellitaire de téléphone digitale
1998 1	1 ^{er} système global de téléphone portable par satellite

2.3 Définition

Un satellite de télécommunication peut être considéré comme une sorte de relais hertzien. Ils permettent par l'intermédiaire de stations terrestres de faire transmettre des données de différentes natures.

(Données télégraphique, téléphonique, radiodiffusion, télédiffusion, transmission de données, internet ect).

Les systèmes de télécommunications par satellites sont classés en fonction de l'altitude (orbites) des satellites.

On distingue ainsi 3 différents type d'orbite.

2.3.1 Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit) qui correspondent à des satellites évoluant sur l'orbite géostationnaire.

Les systèmes GEO ont été les premiers utilisés et restent aujourd'hui majoritaires. L'orbite est extrêmement encombrée et l'on trouve presque un satellite tous les deux degrés. L'avantage de cette orbite est évidemment le fait que le satellite reste fixe par rapport à la Terre et qu'il n'est pas nécessaire de le poursuivre au moyen d'antennes mobiles au sol. L'avantage vient aussi du fait que l'altitude du satellite étant très élevée (ce dernier "voit" environ 42%

de la surface de la Terre (Trois satellites suffisent pour couvrir tout le globe)

Les inconvénients sont le temps de propagation, il faut compter environ 250 ms pour un aller et retour vers le satellite.

2.3.2. Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit.) Qui correspondent à des satellites évoluant en orbite moyenne.

Le système ICO se base sur une constellation de 10satellites sur 2 plans inclinés de 45°.

2.3.3. Les systèmes LEO (Low Earth Orbit) qui correspondent à des satellites évoluant en orbite basse. Plusieurs grands systèmes (Iridium, Globalstar, SkyBridge, Teledesic) se basent sur de telles constellations. L'avantage de ces systèmes est le temps de propagation très court, typiquement 10 ms de temps de propagation pour un satellite à 1.500 km d'altitude. Cet avantage fait de ces systèmes d'excellents candidats pour des applications interactives mettant en jeu des terminaux mobiles avec des antennes omnidirectionnelles et des amplificateurs de faibles puissances.

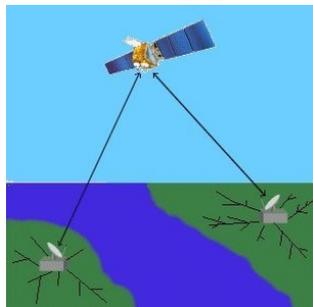
2.3.4 Les systèmes elliptiques qui correspondent à des satellites évoluant en orbite elliptique.

Ce type de satellite est utilisé depuis 1967 par le système Molnya qui assure des télécommunications pour la Sibérie. Son orbite est inclinée de 63° par rapport au plan équatorial.

2.4 Connectivité

On distingue 3 formes génériques de connectivité

2.4.1 Liaison point à point : Fig.1



Le satellite relie les réseaux téléphoniques de deux continents, de deux îles, ou de deux régions très éloignées dans un pays vaste et peu dense (Canada, Australie, Russie, Brésil, ...). Il permet ainsi les communications longue distance, Communications téléphoniques, fax, données internet sont indifféremment transmises entre station. C'est par exemple la tâche principale des INTELSAT. Chaque transpondeur peut relayer des centaines d'appels téléphoniques, les données étant compressées.

Fig.1

2.4.2 Liaison point à multipoints:Fig. 2

Le satellite transmet les programmes télévisés des studios de la chaîne à l'émetteur local, qui les revoit par ondes

b) Le module de service

Assure la télémétrie, la télécommande, le contrôle de l'altitude et de l'orbite au moyen de la liaison radio avec le sol. Il oriente les panneaux solaires de façon à obtenir la puissance maximale de l'alimentation. Il comprend la batterie pour la télécommande et l'alimentation pendant les éclipses du soleil. Il contrôle l'installation électrique et la température des principaux composants.

c) Le générateur solaire

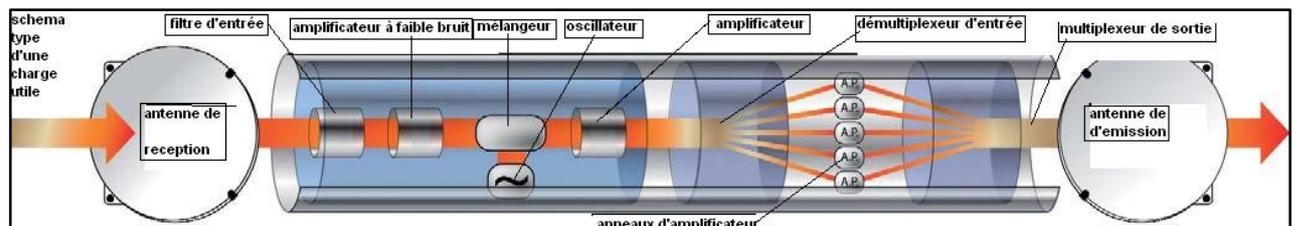
Groupe un grand nombre de cellules au silicium en fonction de la puissance du satellite. Il faut plusieurs dizaines de milliers de cellules pour obtenir la puissance souvent supérieure à 3kW en fin de vie. En effet les cellules reçoivent l'impact des microparticules à haute énergie provenant de l'espace qui diminue leur rendement.

d) Le module de communication

Il reçoit le signal de la Terre, le démodule, l'amplifie, le re-module sur des fréquences différentes et enfin, le dirige vers l'antenne d'émission.

e) Le module des antennes

Il est établi en fonction des zones à desservir. Il comprend : l'antenne de réception, la ou les antennes d'émission, l'antenne de télémétrie et de la télécommande. Les signaux captés sont réémis sur une fréquence différente, en général plus basse. Ce changement de fréquence entre les antennes de réception et d'émission est assuré par des appareils appelés répéteurs (**fig. 5**), chargés également d'amplifier massivement le signal.



Le satellite est un répéteur transparent, il n'intervient pas sur le standard du signal transmis

Fig. 5

f) Les transpondeurs :

Les satellites commerciaux transportent un certain nombre de transpondeurs. Par exemple un signal télévisé peut disposer d'un transpondeur à lui seul alors qu'un autre transpondeur achemine des centaines d'appels téléphoniques. Les plus grands des satellites commerciaux peuvent être munis d'une cinquantaine de transpondeurs. Le signal capté par un satellite est affaibli par la distance qu'il a parcourue. Avant d'être amplifié par des préamplificateurs à faible bruit, il est déphasé du bruit de fond qui l'accompagne, converti en une fréquence différente et transmis.

g) Empreinte de pas : les satellites emploient un faisceau concentré pour donner un signal plus fort au-dessus d'une plus petite zone de la terre. Cette zone s'appelle : l'empreinte de pas du satellite. **Fig.6**

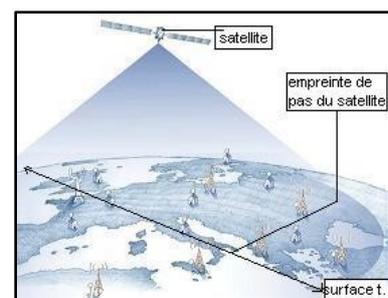


Fig.6

2.5.2 Les stations terrestres

Les stations terrestres peuvent être de diverses échelles. Les grandes stations, dont les antennes paraboliques peuvent avoir jusqu'à 30 m de diamètre, permettent de collecter les communications d'une zone à un niveau international. Elles sont réservées aux grands opérateurs. Et les petites stations plus légères, les VSAT (Very Small Aperture Terminal), qui sont dotées d'antennes paraboliques d'un mètre de diamètre.

a) parabole

Élément incontournable de la réception satellite. Comme pour une antenne de télévision, c'est elle qui capte le signal venant du satellite et qui le concentre vers le convertisseur. Plus une parabole est grande, meilleur est son gain. **Fig.7**



b) LNB (Low Noise Block)

En réception satellite, le signal recueilli par l'antenne parabolique est trop faible pour pouvoir l'exploiter directement ; il faut l'amplifier, c'est l'un des rôles du LNB nommé également tête.

c) Démodulateur

Aussi appelé récepteur. Cet appareil peut recevoir un signal modulé en hautes fréquences et le transformer en informations basses fréquences. En réception satellite, il permet l'obtention des signaux audio, vidéo et données véhiculées par une onde porteuse, afin de les restituer via les circuits du téléviseur, d'un ordinateur. Il transforme les fréquences en tensions et traite l'information de façon à ce qu'elle soit lue par un ordinateur.

d) Mode d'utilisation des Satellites

Un satellite de télécommunications peut être utilisé comme un simple relais hertzien entre deux stations terrestres, mais il comprend également d'autres options intéressantes. Il offre ainsi une capacité de diffusion, pouvant retransmettre les signaux émis depuis la Terre vers plusieurs stations espacées. Réciproquement, le satellite peut capter des informations en provenance de différentes stations d'émission, présentant dans ce cas une capacité de collecte. De plus, il est maintenant possible de concevoir des systèmes de liaisons directes entre satellites. Bien qu'ils soient très complexes à mettre en oeuvre, Iridium a mis en place en 1999, un système de téléphonie mobile mondiale assuré par un réseau de 66 satellites en orbite basse, où chacun est relié à quatre autres satellites.

2.6 Bandes de fréquences

Pour éviter un chaos total dans le ciel, une réglementation internationale spécifique et stricte a été mise en place par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) concernant la répartition des fréquences; elle fait partie intégrante du règlement international des radiocommunications. Cette réglementation définit notamment la position orbitale des satellites et les bandes de fréquences qu'ils doivent utiliser et respecter. Plusieurs types de services de communications par satellites sont définis dans la réglementation :

- a) le service fixe par satellite (**SFS**),
- b) le service mobile par satellite (**SMS**), qui comporte un service mobile terrestre et un service mobile maritime,
- c) le service de radiodiffusion par satellite (**SRS**).

2.6.1 Les fréquences

Les bandes de fréquences mises en oeuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz

La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres.

2.6.2 Bande Fréquences

Fréquences des services satellites dans la région 1 (Europe, Afrique et Asie du Nord)

Bande	Sens montant/descendant	Largeur de gamme
Services fixes par satellite		
Bande C	6/4 GHz	1100 MHz
Bande X	8/7 GHz	500 MHz
Bande Ku	14/11 GHz	1000 MHz
Bande Ku	14/12 GHz	250 MHz
Bande Ka	30/20 GHz	2500 MHz
Services mobiles par satellite		
Bande L	1,6/1,5 GHz	29 MHz
Services de radiodiffusion par satellite		
Bande K	17/12 GHz	800 MHz

©

2.6.3 Services

Il existe également une répartition géographique en 3 régions :

- La région 1 (Europe, Afrique, Moyen-Orient et la Russie).
- La région 2 (Asie, Océanie)
- La région 3 (Amérique)

La bande C : bande est utilisée par les satellites commerciaux pour les services SFS, Elle est aujourd'hui fortement encombrée. Cette bande est divisée en deux sous bandes ; la plus basse, pour les flux descendants (satellite/terre) et la plus haute, pour les flux montants (terre/satellite).

La bande Ku : n'est pas encore encombrée, est surtout utilisée pour les SFS et exclusivement pour les SRS dans les bandes 12/11 GHz.

La bande Ka : permet l'utilisation d'antennes encore plus petites. Cette bande est surtout utilisée par les terminaux
Mobiles de type GSM.

La bande L : est principalement destinée aux satellites en orbite basse. Les bandes de fréquences de la bande L ont été définies par la conférence mondiale (CAMR) de 1992 pour le service mobile par satellite.

La bande X : est réservée aux applications militaires.

2.7 Principaux opérateurs de services fixes par satellite

Compagnie	nbre satellite	Pays
Intelsat 19		International
PanAmSat 20		Etats-Unis
SES Global	21	Européen. Luxembourg
Eutelsat 18		Européen. France
Loral Space & Communication	13	Etats-Unis
SES Americom	20	Etats-Unis
Telenor 3		Norvège
USAT Copr.	8	Japon
Inmarsat al		Internation
Space Communications Corp.	4	Japon
Telesat Canada	4	Canada
Satellites Mexicanos S.A. de C.V. (Satmex)	2	Mexiqu e

2.8 Les Services de télécommunications par satellites

Les satellites de télécommunications peuvent être classés en fonction des services qu'ils sont appelés à rendre.

On distingue ainsi les services de **téléphonie**, les services de **télédiffusion**, les services de **transmission de données**, les services **multimédia**, la **radio messagerie** et **l'Internet**.

2.8.11 La téléphonie

On peut distinguer les systèmes de téléphonie fixe par satellite et les systèmes de téléphonie mobile par satellite. La téléphonie fixe par satellite concerne essentiellement les appels internationaux qui mettent en jeu un satellite.

Les satellites utilisés sont de type géostationnaire.

A côté de la téléphonie fixe par satellite on trouve la téléphonie mobile par satellite et dans ce domaine, deux familles de systèmes existent :

- Les systèmes de téléphonie mobile par satellite géostationnaires (GEO)
- Les systèmes de téléphonie mobile par satellites MEO et LEO.

Parmi les systèmes utilisant des satellites GEO on peut citer Inmarsat qui a été le premier système de communications mobiles par satellites d'abord pour la desserte en mer puis en avion et en terrestre.

Et Thuraya qui offre un service de téléphonie mobile sur l'Asie centrale, le Moyen Orient, l'Afrique centrale et l'Europe.

Parmi les systèmes de téléphonie mobile par satellites LEO on citera Iridium et Globalstar.

Ces deux systèmes sont à couverture mondiale ou quasi mondiale.

2.8.21 La télédiffusion

La transmission vidéo par satellite est la première application des satellites de télécommunications. Elle est estimée à 60% de la capacité du secteur spatial.

Le premier système de télédiffusion directe numérique par satellite DIRECT TV aux Etats Unis est entré en service en

1994. En France deux bouquets ont été lancés en 1996 (TPS et Canal Satellite). Ces systèmes utilisent des satellites géostationnaires ce qui permet d'utiliser des antennes fixes chez les usagers. DIRECT TV possède ses propres satellites alors que Canal Satellite utilise un satellite Astra et TPS un satellite Eutelsat Hot Bird .

2.83 La transmission de données

Les réseaux d'entreprise par satellite sont apparus vers 1980 grâce à la diminution de la taille des stations terriennes. On parle de VSAT (Very Small Aperture Terminal) pour des stations terriennes dont le diamètre d'antenne est inférieur à 2,4 mètres

28.4 Le multimédia (Fig. 10)

Le multimédia haut débit se situe à la convergence de l'audiovisuel, de l'informatique et des télécommunications. Il bénéficie des nouvelles capacités techniques des satellites de télécommunication multimédia (bandes de fréquence Ka et Ku) et offre une très large gamme de services :

- voix, vidéoconférence, visiophone
- tous les services de données possibles : symétriques ou asymétriques, moyen et haut débit, multimédia ou non, interactifs ou différés, etc.
- applications : télétravail, télémedecine, télé-enseignement, télé-achat, tout échange de données
- accessibilité directe pour tous les usagers par des terminaux adaptés, dans le monde entier, même sans infrastructure Télécom au sol.



Fig.10

28.5 La radiomessagerie

La radiomessagerie par satellites est un service offert sur plusieurs satellites GEO comme Inmarsat-C et D, OmniTracs ou encore EutelTracs. Elle existe aussi sur des constellations en orbite basse telle OrbComm.

28.6 L'Internet

L'Internet par satellite est un sujet très important actuellement et le satellite fait partie des solutions d'accès local au même titre que le LMDS, l'ADSL, les solutions câblées ou d'autres technologies. SkyBridge d'Alcatel fait partie de ce type de systèmes.

29 Différentes constellations de satellites

2.9.1 Introduction

Cette partie a pour but l'étude de constellations de satellites en orbite basse. Ils sont de deux types :

Les LEO de phonie (Iridium, Globalstar) et

Les LEO Large bande pour réseaux multimédias haut débit (Skybridge, Teledesic)

29.2 Iridium

Le système Iridium (Fig.11) fut la première constellation de satellites de télécommunications en orbite basse (LEO : Low Earth Orbit) à proposer ses services de communication téléphonique (voix, données, fax, messageries) effectuée à partir d'appareils portables de partout dans le monde,

Iridium fût la première alternative aux constellations de satellites géostationnaires qui souffrent d'un retard inconfortable pour la téléphonie dû à l'éloignement (35 786 km d'altitude).

Description:

- **Constellation :**
 - Orbite basse : LEO altitude moyenne : 780km
 - Largeur du corps triangulaire : 1 mètre
 - 66 satellites en service (6 en secours)
 - 6 plans orbitaux
 - Inclinaison des plans orbitaux : 86,4 degrés
 - Période orbitale : 100 minutes 28 secondes
- **satellite**
 - durée de vie : 5ans à 8 ans
 - poids : 690 kg
- **Services :**
 - Téléphonie
 - Données, fax
 - Messageries
- **Liaison :**
 - ISL (Inter Satellite Link) en bande L (1616-1626.5 MHz)
 - Satellite Terre : Bande Ka sens ascendant 29.1-29.3 GHz
Sens descendant 19.4-19.6 GHz

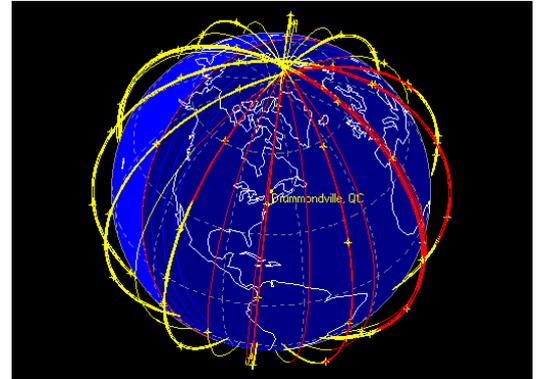


Fig.11

29.3 Globalstar

Le système Globalstar (fig.12) de télécommunication sans fil par satellite est conçu pour offrir des services voix, données et télécopie à ses abonnés partout dans le monde. Les abonnés de Globalstar reçoivent des appels à l'aide d'un terminal portatif peu différent en aspect aux téléphones cellulaires actuels. Les appels sont relayés par la constellation, sur une orbite de 1414 km d'altitude, vers une station terrienne, puis par les réseaux terrestres (filaire ou sans fil) jusqu'à leur destination finale. Pour qu'une communication fonctionne, même entre deux mobiles Globalstar il faut donc qu'il y ait une station Terrestre sous le faisceau des satellites concernés par la communication. Ce système requiert une infrastructure terrestre conséquente pour couvrir l'ensemble du globe terrestre. Les passerelles sont les points d'interconnexion entre la constellation de satellites Globalstar et l'infrastructure de télécommunications terrestre existante.

Description

- **Constellation**
 - orbite basse : LEO altitude moyenne : 1410 km
 - 48 satellites en service (8 en secours)
 - 8 plans orbitaux
 - inclinaison des plans orbitaux : 52 degrés
- **Satellites :**
 - durée de vie : 7ans ½
 - poids : 450 kg
- **Services :**
 - Téléphonie
 - Données, fax
- **Liaison :**
 - pas de liaison inter satellite



Fig.12

- Mobile Satellite : Bande L sens ascendant 1.61-1.626 GHz
 Bande S sens descendant 2.483-2.5 GHz
- Passerelle Satellite : Bande C sens ascendant 5.09-5.25 GHz
 Bande C sens descendant 6.875-7.055 GHz

29.4 Skybridge

Le système skybridge (Fig.13) propose un accès large bande par satellite qui est mis en fonction en 2001, il permet un accès haut débit à des services multimédias interactifs pour tous et partout. Grâce à un temps de propagation faible et une couverture de 350 km de rayon par cellule, Skybridge offrira des performances qui devraient être comparables aux réseaux terrestres en contournant les limitations dues à la boucle locale. De plus, ce système prend de l'ampleur avec le passage de 2 constellations de 32 satellites à un système de 80 satellites.

Description :

- Constellation :
 - orbite basse : LEO altitude moyenne : 1469 km
 - 80 satellites en service (au lieu des 64 prévus)
 - 20 plans orbitaux de 4 satellites
- Satellites :
 - durée de vie : 8 ans
 - poids : 1250 kg
- Services :
 - Téléphonie
 - Données, fax, vidéo
- Liaison :
 - pas d'ISL
 - Terminal Satellite : Bande Ku 12.75-14.5 GHz pour liaison ascendante
10.7-12.75 GHz pour liaison descendante
(dans bande Ku = 11-14 GHz)
 - Passerelle-Satellite : Bande Ka
- Passerelles :

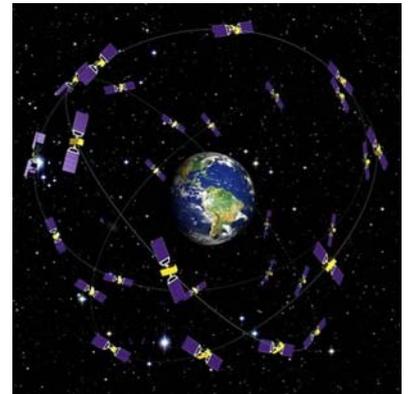


Fig.13

Le contrôle du segment sol (Control Ground Segment : CGS) inclut les centres de contrôle de satellite (Satellite Control Center : SCC) et les passerelles de commande et télémétrie (Telemetry and Command : TT&C). Les CGS contrôlent la constellation en s'assurant que les satellites sont correctement positionnés et orientés dans leur plan orbital. La position des satellites ne nécessite pas de poursuite car elle est déterminée par GPS.

29.5 Teledesic

Le système teledesic est le plus abouti techniquement. Il est constitué de douze orbites quasi-polaires de vingt-quatre satellites chacune à une altitude de 1500 km (un hand-over inter satellite toutes les sept minutes). Les satellites communiquent avec huit voisins : deux en avant, deux en arrière et deux de chaque côté. Cette redondance des liens est garante de résistance aux pannes et à la charge. Pour Teledesic et Iridium, il suffit d'une station terrestre pour assurer l'interconnexion entre les téléphones satellitaires et le réseau terrestre. Simplement, contrairement aux réseaux radio maillés classiques, ce n'est pas toujours le même satellite qui communique avec cette station terrestre.

29.6 Thuraya



Thuraya (Fig.14) l'opérateur de téléphonie mobile a choisi un satellite géostationnaire plutôt que de s'appuyer sur des constellations en orbites basses.

Le satellite, un engin de plus de trois tonnes en orbite, a proposé ses services en 2001. Le segment spatial, d'une durée de vie contractuelle comprise entre douze et quinze ans, ne nécessite pas de renouvellement a contrario des constellations en orbites basses (LEO). Le terminal Thuraya, à peine plus grand qu'un GSM, combine la voix, le fax, la messagerie (SMS), l'e-mail et la data. Il est également doté d'un GPS qui vous permet de connaître votre position (à 100m près) et de la transmettre par téléphone ou SMS. Il offre également de nombreuses possibilités pour la gestion de flottes, la sécurité des personnels isolés et l'orientation. Couverture : Europe, Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale, partie Nord de l'Afrique, Asie, Continent Indien, Russie Orientale, etc...

2 10 Services commerciaux

2 10 INMARSAT

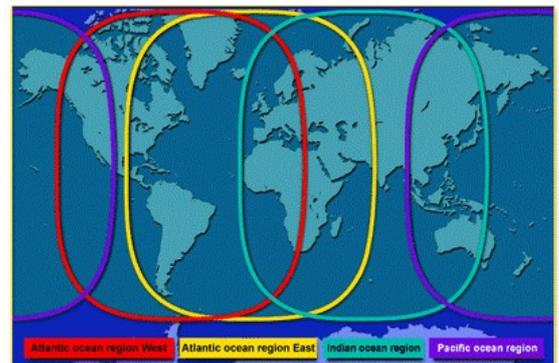
Inmarsat a été créée à l'initiative de l'Organisation maritime internationale (OMI) pour mettre en place le secteur spatial nécessaire pour améliorer les communications maritimes, contribuant ainsi à améliorer les communications de détresse et les communications pour la sauvegarde de la vie humaine en mer. Inmarsat est fondé en 1979. Au fil des ans, le mandat d'Inmarsat a été élargi pour inclure la mise en place du secteur spatial nécessaire pour améliorer les communications aéronautiques et celles du service mobile terrestre ainsi que les communications sur les plans d'eau ne faisant pas partie du milieu marin. Inmarsat est composée de quelque 81 pays membres. Elle possède et exploite l'un des plus importants réseaux de satellites de télécommunications, constitué de 10 satellites en orbite géostationnaire à environ 36 000 kilomètres de la Terre, il comprend notamment les deux satellites de la dernière génération, Inmarsat-4 (I-4), qui ont été lancés en 2005. Il existe un troisième satellite I-4 dont le lancement est prévu pour la fin 2007. La durée de vie commerciale de la flotte de satellites I-4 devrait s'étendre jusqu'à l'année 2020 environ

La couverture INMARSAT (fig. 15)

Les satellites fournissent le support de transmission. Les stations de transit assurent les fonctions d'acheminement des appels, d'interfaçage avec les réseaux conventionnels, de taxation etc...

ALGERIE TELECOM vient de se doter de sa propre station de transit, destinée à prendre en charge le trafic des terminaux INMARSAT évoluant sur le territoire national et celui des navires.

Fig.15



La station de transit algérienne fonctionne dans trois standards : B, M et mini M Elle permet d'acheminer

- Le trafic des abonnés du réseau terrestre vers les terminaux INMARSAT.
- Le trafic des terminaux Inmarsat entre eux et vers les réseaux conventionnels (fixe, mobiles, télex, transmission de données).
- Les appels de détresse et d'assistance des navires en mer

2 10 2 INTEL SAT

Intelset est une organisation issue d'un traité intergouvernemental qui possède et exploite, des satellites géostationnaires servant à la prestation, à l'échelle mondiale, de services de télécommunications.

Elle a pour mission première d'assurer la connectivité à l'échelle mondiale avec le réseau public commuté de télécommunications afin de garantir des services de télécommunications internationales à ses pays membres.

142 pays participent à la gouvernance et à l'exploitation du système Intelset.

Le satellite Intelset 1, connu sous le nom de early bird, a été lancé en 1965. Il disposait d'une capacité de 240 circuits vocaux, équivalant à celle d'un canal de télévision bidirectionnel entre l'Europe et les Etats-Unis. Les satellites de quatrième génération ; lancé à partir de 1974, était doté d'une capacité de 4000 circuits vocaux.

2 10 3 EUTEL SAT

Eutelsat avec des ressources en orbite sur 23 satellites offrant une couverture sur toute l'Europe, le Moyen-Orient, l'Afrique et l'Inde, et sur de larges zones de l'Asie et du continent américain, Eutelsat est l'un des trois premiers opérateurs mondiaux de satellites en terme de chiffre d'affaires. La flotte des satellites d'Eutelsat assure la diffusion de près de 2 100 chaînes de télévision et 950 stations de radio à une audience de plus de 120 millions de foyers. Elle sert également une large gamme de services fixes et mobiles de télécommunication et de diffusion de données pour les réseaux vidéo professionnels et les réseaux d'entreprise, ainsi que des services haut débit pour les fournisseurs d'accès Internet, les collectivités locales ainsi que pour les transports routiers, maritimes et aériens. Eutelsat, dont le siège est à Paris, regroupe 27 pays. .

Chapitre 3 : Télédétection

3.1 Historique

Le terme "télédétection" a été inventé en 1960 par Evelyn Pruitt du Bureau de la Recherche Navale des Etats-Unis mais l'histoire de la télédétection remonte bien plus loin. Les premières photographies aériennes ont été prises d'un ballon captif près de Paris en 1858. Des photographies ont été prises à partir de plate-formes très diverses: cerfs-volants, fusées.

Pendant la première guerre mondiale la photo aérienne a été maîtrisée et utilisée à grande échelle, de façon systématique. Des appareils ont été spécifiquement conçus pour la reconnaissance aérienne et des méthodes de traitement ont été mises au point pour produire des photos.

En 1959, le satellite américain EXPLORER VI a transmis la première image de la terre vue de l'espace. Le premier satellite météorologique du monde, TIROS I, a été lancé en 1960; c'était le précurseur des satellites météorologiques. Les premières photographies de la terre, prises à l'aide d'appareils tenus à la main dans l'espace, ont fourni des renseignements extraordinairement abondants sur la terre et l'eau sur une vaste superficie. Les missions effectuées ultérieurement par les Etats- Unis et la Russie (ex URSS) ont été dotées d'un matériel photographique et de "scanneur" (radiomètre à balayage) plus sophistiqués, destiné spécifiquement à obtenir des images pour l'évaluation des ressources.

Les vols spatiaux avec hommes à bord réussissaient à démontrer la valeur de l'imagerie spatiale mais elles étaient souvent de courte durée et ne fournissaient pas une couverture photographique uniforme à l'échelle mondiale. Ces limites ont été largement surmontées grâce à la mise au point des satellites d'étude des ressources terrestres comme la série américaine LANDSAT. En fonctionnant dans une orbite plus basse que les satellites météo, LANDSAT et plus tard, des systèmes similaires ont assuré une meilleure résolution spatiale, tout en ayant une couverture temporelle moins fréquente.

Outre les satellites actuellement opérationnels, plusieurs autres systèmes expérimentaux ont été lancés et ont démontré l'intérêt de la surveillance de la terre depuis l'espace. Citons par exemple le satellite NIMBUS VII . Depuis quelques années, plusieurs pays, autre que la Russie (ex URSS) et les Etat-Unis ont lancé leurs propres satellites de télédétection.

Il faut préciser que les avions continuent de jouer un grand rôle dans la télédétection à cause de leur souplesse d'utilisation, en ce qui concerne l'altitude, la planification et les détecteurs. Les avions servent souvent de plates-formes pour tester les détecteurs qui seront utilisés sur les satellites.

Alors que l'acquisition des données et les techniques d'analyse, continuent de progresser, la télédétection est aujourd'hui capable de fournir des informations utilisables en temps voulu pour ceux qui en ont besoin. En ce sens, la météorologie et l'imagerie spatiale s'est largement diffusées et vulgarisées (navigation sur Internet possible sur une couverture d'images spatiales continue , exemple :<http://earth.google.com/>) est probablement les domaine d'application dans lequel la télédétection est considérée comme opérationnelle, au moins de façon générale.

3.2 Principe de télédétection

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. » Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles.

Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après.

1. Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible

2. Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

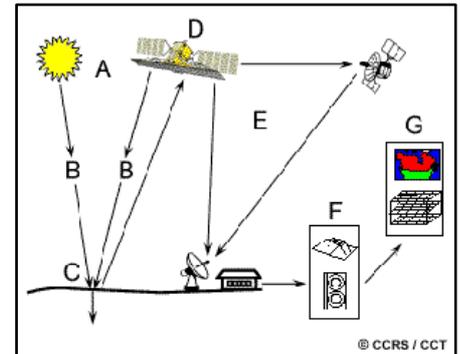
3. Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

5. Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

6. Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

7. Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

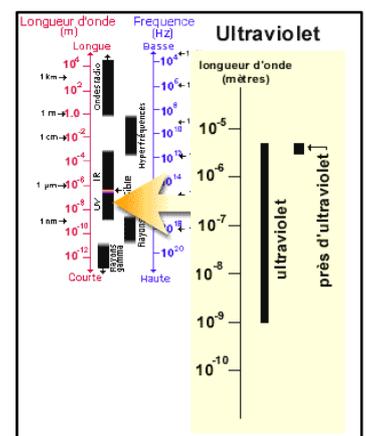


3.2.1. Le rayonnement électromagnétique (REM)

Le **rayonnement électromagnétique (REM)** est une énergie qui apparaît sous forme de rayons X, de lumière visible, de micro-ondes et d'ondes radio. Ces formes de **REM**, qui peuvent initialement apparaître comme des phénomènes séparés, font, en fait partie d'un spectre continu. Le meilleur exemple est celui d'un prisme, qui sépare la lumière blanche en différentes couleurs, dont chacune représente une longueur d'ondes lumineuse différente. La lumière visible est la seule partie du **REM** détectable par l'œil humain

Le **spectre électromagnétique** s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'**ultraviolet**. Ce rayonnement se situe au-delà du violet de



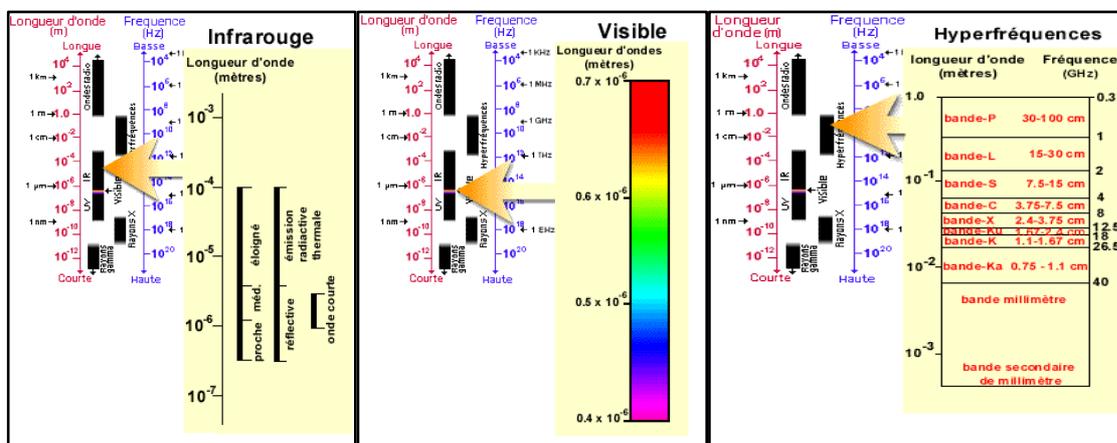
la partie du spectre visible. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet.

La lumière que nos yeux (nos tout premiers "capteurs de télédétection") peuvent détecter se trouve dans ce qui s'appelle le "spectre visible". Les longueurs d'onde visibles s'étendent de 0,4 à 0,7 μm

La partie de l'infrarouge (**IR**) du spectre s'étend approximativement de 0,7 à 100 μm . L'infrarouge se divise en deux catégories: **IR réfléchi** et **IR émis** ou **thermique**. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible. L'infrarouge réfléchi s'étend approximativement de 0,7 à 3 μm .

L'infra-rouge thermique est très différent du spectre visible et de l'infrarouge réfléchi.

Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de 3 à 100 μm .



3.2.2 Interactions avec l'atmosphère

Le milieu perturbateur: l'atmosphère, l'environnement qui absorbe, diffuse, réfléchissent partiellement le rayonnement électromagnétique et introduisent ainsi des parasites. Ils diminuent d'autant la capacité de détecter sur le rayonnement qui parvient au capteur les informations provenant uniquement de la scène.

3.2.3 Interactions rayonnement-cible

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (**A**) l'énergie, la transmettre (**T**) ou réfléchir (**R**) l'énergie incidente.

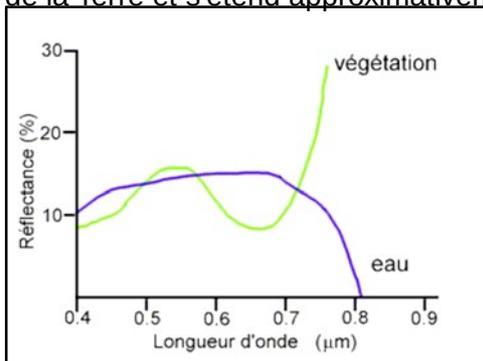
L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction ou selon leur combinaison.

La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge.

Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de 3 à 100 μm .



Graphique de signatures spectrales de l'eau et de la végétation.

3.2.4 Les capteurs (radiomètres)

On classe les capteurs selon différents critères. Il existe des capteurs imageurs et d'autres non-imageurs ; comme leur nom l'indique, les capteurs imageurs produisent une image de la scène, alors que les capteurs non-imageurs produisent des mesures en points ou des profils.

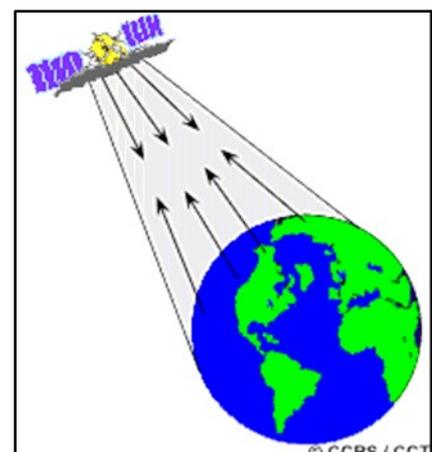
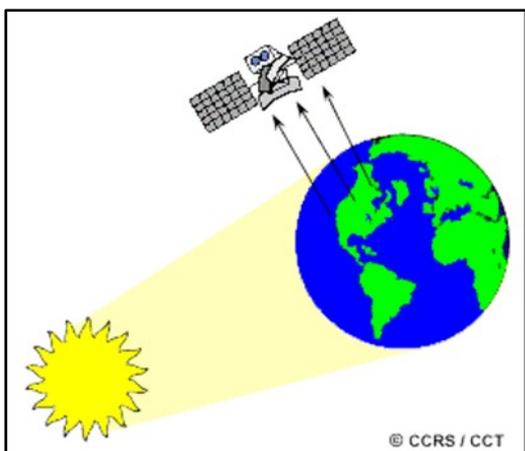
On distingue ;

- Le capteur (radiomètre) non-imageur passif
- Le capteur (radiomètre) imageur passif à balayage (**scanner**)
- Le capteur (radiomètre) actif (scattéromètre).
- Le capteur (radiomètre) imageur actifs (**radar**)

3.2.5 Détection passive et active

L'énergie du Soleil est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchi lorsque le Soleil illumine la Terre. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchi le soir, tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.

Un capteur actif produit propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs utilisent les longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le Soleil telles que les hyperfréquences ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est illuminée. Le laser fluoromètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.



3.2.6 Quelques détecteurs

- .Emulsion photographiques
- .Film panchromatique noir/blanc
- .Film IR noir /blanc
- .Film couleur
- .Film IR couleur
- .Détecteur à semi-conducteur

3.2.7 Caractéristiques d'un satellite - l'orbite et sa fauchée

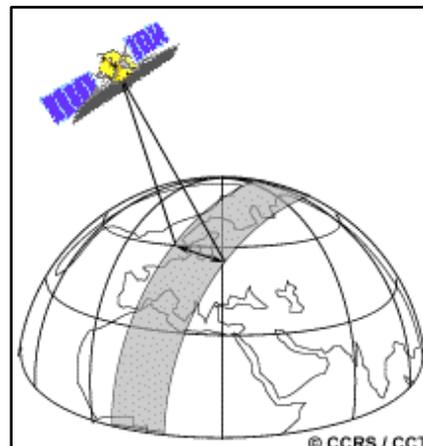
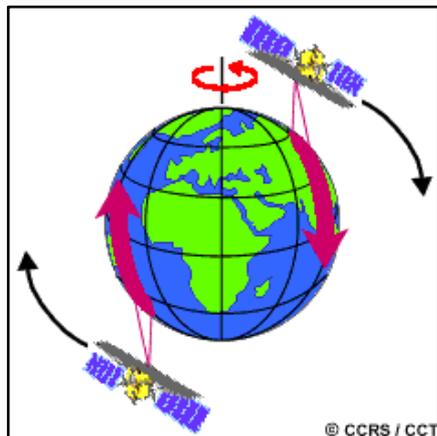
Les capteurs peuvent être placés sur différentes plates-formes. De nos jours ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection. Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission.

Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude, l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites ont une altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la terre, ils ont une **orbite géostationnaire (GEO)**. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique.

Les satellites d'observation et de météo sont situés sur de telles orbites.

L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

D'autres plates-formes spatiales suivent une **orbite quasi polaire**. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaires ont aussi une orbite **héliosynchrone**; de cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.



De nos jours, la plupart des plates-formes satellitaires sont placées sur orbite quasi-polaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la Terre, et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite.

Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement **orbite ascendante et orbite descendante**. Si l'orbite est aussi héliosynchrone, l'orbite ascendante du satellite se fait du côté ombragé de la Terre, tandis que l'orbite descendante se fait du côté éclairé par le Soleil. Les capteurs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchi par la Terre ne recueillent donc de l'information qu'au cours leur orbite descendante, lorsque le Soleil illumine la Terre. Les capteurs actifs qui possèdent leur propre source d'illumination ou les capteurs passifs qui enregistrent l'énergie émise

par la planète (l'énergie infrarouge thermique par exemple) peuvent amasser des données autant lors des orbites ascendantes que descendantes de leurs satellites.

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de **couloir-couvert ou fauchée**. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi- polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud.

Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une composante vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une **nouvelle région à chacun des passages consécutifs** du satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet.

Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points **nadir**. On définit le **cycle de passage** du satellite comme étant la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard. Le satellite aura alors effectué un cycle orbital complet. La période de temps nécessaire pour compléter un cycle orbital complet varie d'un satellite à l'autre.

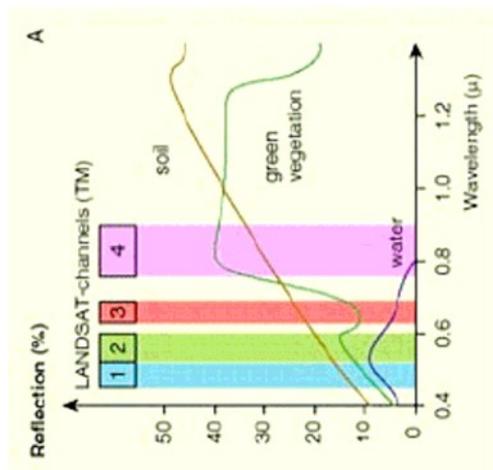
La durée du cycle orbital ne doit pas être confondue avec la période de revisite. Avec les capteurs orientables, les instruments peuvent observer une surface avant et après les passages de l'orbite au-dessus de la cible, ce qui permet une période de revisite beaucoup plus courte que le cycle orbital. La période de passage au nadir est un facteur important pour plusieurs applications de la télédétection, spécialement lorsque des images fréquentes sont nécessaires (par exemple : pour surveiller la dispersion lors d'un déversement d'hydrocarbures ou pour mesurer l'ampleur d'une inondation). Les satellites à orbite quasi-polaire ont une couverture plus fréquente des régions de latitude élevée par rapport à la couverture des zones équatoriales. Cette plus grande couverture est due à l'élargissement, vers les pôles, de la zone de chevauchement entre deux fauchées adjacentes

3.2.8 Résolution spatiale, espacement des pixels

Le degré de détail spatial qui peut être observé ou enregistré par un capteur est dénommé **résolution spatiale**. Pour un système donné de capteur plate-forme, la résolution spatiale est habituellement exprimée par la plus petite unité de surface qui peut être distinguée de ses voisins. Dans un système de capteurs "imageurs", les éléments qui constituent l'image s'appellent des **pixels**, terme dérivé de "picture elements". La superficie de la surface de la terre, représentée par un pixel, correspond normalement à la résolution spatiale du capteur, c'est-à-dire à la taille cellulaire de la résolution au sol.



Figure1 : photographie aérienne ; composition 20x20m (500m-CNES)
figure 2 : photographie aérienne à une résolution 2 m x2m



3.2.9 Résolution spectrale

Un capteur donné peut détecter le REM seulement sur une gamme limitée de longueurs d'ondes, qui est dite bande spectrale. La largeur de la bande spectrale, c'est-à-dire l'étendue de la gamme réduite aux longueurs d'ondes détectées, est dénommée **résolution spectrale**.

Certains capteurs comprennent un certain nombre de multi-spectraux ou multi-bandes. Quand nous regardons la terre dans deux ou plusieurs bandes simultanément, il est possible de distinguer une plus large gamme de caractéristiques. L'ensemble des réponses types émanant d'une cible spécifique vue par un capteur dans différentes bandes spectrales constitue **la signature spectrale** de cette cible.



3.2.10 Résolution radiométrique

Les données des capteurs peuvent être stockées sous des formats **analogiques** ou **numériques**. Dans un système analogique, les variations de la "puissance" du signal initial, (par exemple, la variation de la luminosité dans une image) sont représentées par des variations continues dans un autre milieu, comme la tension ou la densité du film. Une représentation numérique au contraire découpe le signal initial en échelles discrètes, dont chacune porte une valeur numérique. L'étendue du signal initial, telle qu'elle est représentée par une seule valeur numérique, est appelée la **résolution radiométrique** du capteur. Les données numériquement enregistrées, contrairement aux données analogiques, peuvent être facilement traitées par ordinateurs et peuvent être copiées d'une façon répétitive, sans altérer les données d'origine ou les copies.



3.2.11 Résolution temporelle ou répétitivité

Elle correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manoeuvre du satellite. Le facteur temps est important en télédétection. Notons que le satellite SPOT offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d'assurer une excellente résolution temporelle. Sans manoeuvre, la résolution temporelle de SPOT est de 26 jours, 16 jours pour LANDSAT TM et 14.5 jours pour NOAA AVHRR.

3.3 Application dans le domaine militaire

Le MIC couvre autant les besoins de défense que ceux de la sécurité nationale; son champ d'application est très large. Il concerne aussi bien la création ou la mise à jour de cartes que les missions de surveillance d'installations, de sécurité, d'activités militaires tout comme l'estimation rapide des dommages. À l'échelle mondiale, l'imagerie satellitaire est devenue le nerf de la "guerre" des forces armées et de police. Disposer dans un laps de temps très court de renseignements "utiles", issus de la gestion de bases de données et de l'interprétation d'images satellite est essentiel pour les décideurs en charge du respect de la souveraineté des États, ou encore de l'observation de zones d'intérêt national ou international. Pour répondre à ces besoins spécifiques liés à l'activité défense, Spot Image a développé le concept d'un centre de compétences opérationnel intégré: le MIC (Mapping and Information Centre).

3.4 Satellites de météorologie

3.4.1 Introduction

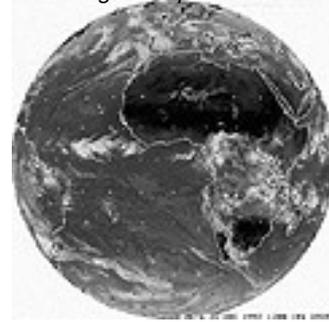
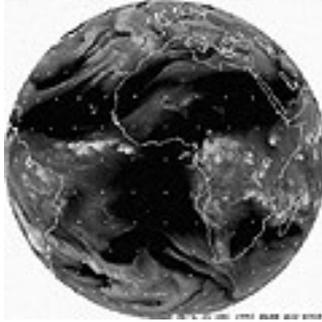
La prédiction et la surveillance de la météo a été l'une des premières applications civiles (ou non-militaires) de la télédétection. Le premier satellite météorologique fut TIROS-1 (Television and Infrared Observation Satellite), qui a été lancé en 1960 par les États-Unis. Ces satellites avaient tous des orbites polaires héliosynchrones, ce qui permettait une couverture répétitive des systèmes météorologiques mondiaux.

En 1966, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) des États-Unis a lancé le satellite géostationnaire Applications Technology Satellite (ATS-1) qui fournissait des images hémisphériques de la surface de la Terre et de la couverture de nuages à toutes les 30 minutes.

Pour la première fois, le développement et le mouvement des systèmes météorologiques pouvaient être surveillés de façon continue.

Aujourd'hui, plusieurs pays exploitent des satellites météorologiques pour surveiller les conditions climatiques autour du globe. Généralement, ces satellites utilisent des capteurs à résolution spatiale grossière (en comparaison aux systèmes pour l'observation de la Terre) et couvrent de grandes surfaces du globe. Leur résolution temporelle, généralement élevée, fournit des observations fréquentes de la surface de la Terre, de l'humidité atmosphérique et de la couverture de nuages, ce qui permet de surveiller et de prédire les conditions climatiques de l'ensemble du globe. Nous allons maintenant décrire quelques satellites/capteurs utilisés en météorologie

Image METEOSAT dans le canal 1,
21 décembre 1997 à 12 GMT. Le canal 1 couvre les plages visibles et proche infrarouge du spectre.



3.4.2 GOES

Le système GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) est le successeur de la série ATS. Les satellites GOES ont été conçus par la NASA pour NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour fournir au United States National Weather Service des images fréquentes et à petite échelle de la surface de la Terre et de la couverture de nuages. Depuis plus de 20 ans, la série GOES a surtout été utilisée par les météorologues pour la surveillance et la prédiction de la météo. Ces satellites font partie d'un réseau mondial de satellites météorologiques qui sont alignés à des intervalles de 70° de longitude autour de la Terre pour offrir une couverture presque totale du globe. Deux satellites GOES, placés en orbite géostationnaire à 36 000 km au-dessus de l'équateur, voient chacun un tiers de la Terre.

Deux générations de satellites GOES ont été lancées pour mesurer les rayonnements émis et réfléchis, desquels nous pouvons dériver les températures atmosphériques, les vents, l'humidité et la couverture de nuages.

La première génération de satellites GOES s'étend de 1975 (avec GOES-1) à 1992 (avec GOES-7).

La deuxième génération a commencé avec GOES-8 (lancé en 1994). Ces satellites peuvent observer la Terre de façon presque continue, ce qui permet de prendre plus d'images (à toutes les quinze minutes). Cette augmentation en résolution temporelle, jumelée aux améliorations de la résolution spatiale et radiométrique des capteurs, procure une information pertinente et des données de meilleure qualité pour la prédiction des conditions météorologiques.

GOES-8 et les autres satellites de la deuxième génération sont équipés d'instruments d'imagerie et de sondage séparés. Les bandes infrarouges permettent aux satellites de capter des images le jour et la nuit. Le dépointage latéral des capteurs et la possibilité de choix de bandes permettent d'acquérir des images d'un hémisphère complet, ou encore, des images à petite échelle d'une région choisie. Cette dernière possibilité permet aux météorologues de surveiller des régions problématiques spécifiques pour améliorer les prévisions à court terme.

3.4.3 NOAA(AVHRR)

La NOAA opère aussi une autre série de satellites utiles pour la météorologie et pour d'autres applications.

Ces satellites, en orbite polaire héliosynchrone (830 à 870 km au-dessus de la Terre), font partie de la série Advanced TIROS (datant du début des années 1960). Ils complètent l'information fournie par les satellites géostationnaires (comme GOES). Les deux satellites, dont chacun produit une couverture totale de la Terre, travaillent conjointement pour assurer que les données de toutes les régions de la Terre soient mises à jour au moins à toutes les six heures. Un satellite croise l'équateur du nord au sud, tôt le matin, et l'autre le croise dans l'après-midi.

À bord des satellites NOAA se trouve le capteur primaire AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Celui-ci est utilisé pour la météorologie et pour l'observation à petite échelle de la surface de la Terre.

Le capteur AVHRR capte le rayonnement électromagnétique du visible, proche IR, du moyen IR et de l'IR thermique. La fauchée au sol mesure 3000 km.

3.4.4 Autres satellites météorologiques

Les États-Unis exploitent la série de satellites DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) qui sont aussi utilisés pour la surveillance météorologique.

Il existe plusieurs autres satellites météorologiques en orbite qui ont été lancés et qui sont exploités par d'autres pays ou groupe de pays dont le Japon avec la série GMS, l'Inde avec la série IRS, et communauté européenne avec les satellites Météosat.

3.5 Satellites d'observation de la Terre

3.5.1 Landsat

Bien que plusieurs satellites météorologiques (comme ceux décrits dans la section précédente) soient également utilisés pour la surveillance de la surface de la Terre, ceux-ci n'ont pas été conçus pour la cartographie détaillée. Les premières images des satellites météorologiques dans les années 60, et par les images acquises lors des missions spatiales habitées, le premier satellite d'observation Landsat-1 a été lancé par la NASA en 1972. Landsat avait été conçu pour tester la faisabilité d'une plate-forme multi-spectrale d'observation de la Terre non habitée. Depuis, le programme Landsat a permis l'acquisition de données sur tous les coins de la planète. En 1985, le programme a été commercialisé pour fournir des données aux divers utilisateurs civils.

Parmi les facteurs qui ont contribué au succès de Landsat, il faut mentionner une

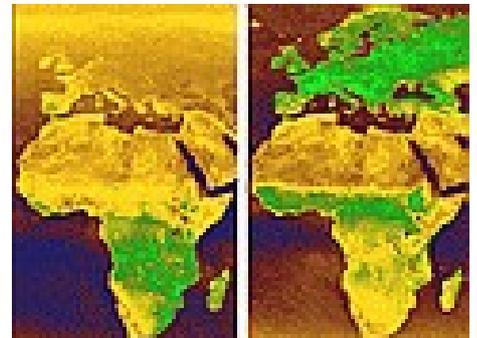
combinaison de capteurs avec des domaines spectraux façonnés pour l'observation de la

Terre, une résolution spatiale fonctionnelle et une bonne couverture du globe (fauchée et

répétitivité). La longévité du programme a permis d'accumuler des archives de données

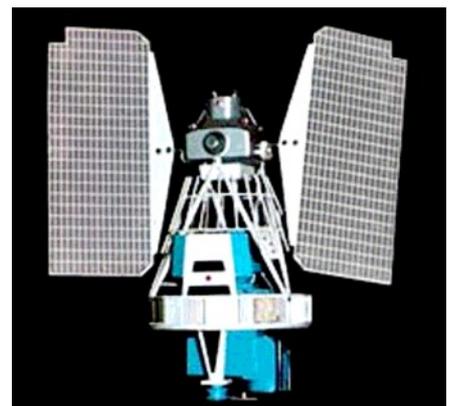
volumineuses sur les ressources terrestres, ce qui facilite la surveillance à long terme ainsi

que le maintien des données historiques et de la recherche. Tous les satellites Landsat ont été placés en orbite héliosynchrone polaire. Les trois premiers satellites (Landsat-1 à Landsat-3) se situaient à une altitude de 900 km (LEO) avec une répétitivité de 18 jours, tandis que les derniers orbitent à une altitude approximative de 700 km avec une répétitivité de 16 jours.

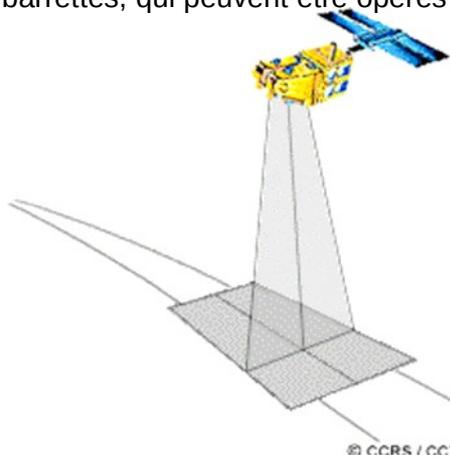


3.5.2 SPOT

Le système SPOT (Système pour l'observation de la Terre) est une série de satellites d'observation de la Terre qui ont été conçus et lancés par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) de la France, avec l'aide de la Belgique et de la Suède. SPOT-1 a été lancé en 1986, et a été suivi d'autres satellites lancés à tous les trois ou quatre ans. Tous les satellites sont en orbite

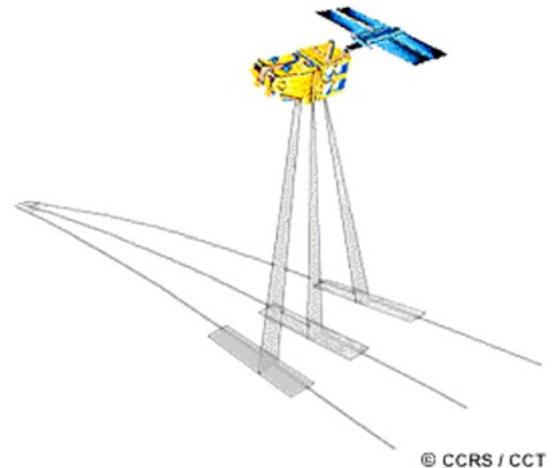


héliosynchrone polaire à une altitude de 830 km, ce qui produit une répétitivité de 26 jours. Conçu dans le but d'acquérir des données de télédétection à des fins commerciales, SPOT est le premier satellite à utiliser la technologie du balayage à barrettes ou balayage longitudinal. Tous les satellites SPOT ont deux balayeurs multi bandes HRV (haute résolution visible) à barrettes, qui peuvent être opérés indépendamment ou simultanément.



SPOT est utile pour les applications qui requièrent une excellente résolution

spatiale (comme la cartographie urbaine) et combine également les avantages d'un coût abordable et de pouvoir acquérir des données satellites au moment idéal. Les images SPOT trouvent plusieurs applications dans des domaines qui nécessitent des images fréquentes, tels que la foresterie et l'agriculture. L'acquisition d'images stéréoscopiques a joué un rôle important pour les applications en cartographie et pour la dérivation d'information



topographique (modèle numérique de terrain - MNT) des données satellitaires.

3.6 Imagerie et observation du sol

3.6.1 Introduction

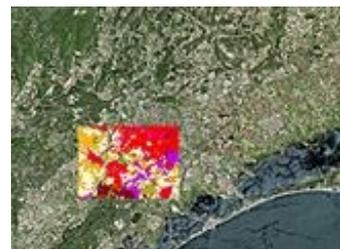
Chaque capteur est conçu pour des applications spécifiques. Les bandes spectrales acquises par un capteur optique déterminent les applications pour lesquelles il sera utile. Quant au capteur radar, ce sont l'angle d'incidence et la fréquence utilisée qui en déterminent l'utilisation. Pour chaque application, il existe une combinaison spécifique de résolutions spectrale spatiale et temporelle. Selon l'application que l'on souhaite obtenir, on dispose de plusieurs types d'image

3.6.2 Différents types d'images

1 L'imagerie panchromatique

Les données panchromatiques sont représentées sous forme d'images en noir et blanc. Elle sert principalement à obtenir des informations de type " géométrique formes ", dimensions et surface :

Parcelle (spot image)

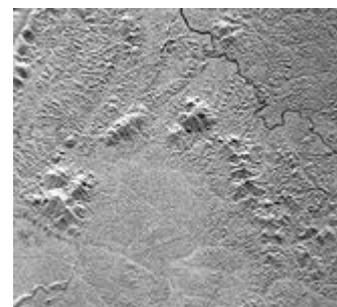


2. L'imagerie multi-bande

Elle sert principalement à obtenir des informations à caractère " qualitatif "

(Ex. classification des types de végétation sur des parcelles).

Région de **Montpellier** Distribution Spot Image³



3. L'imagerie radar

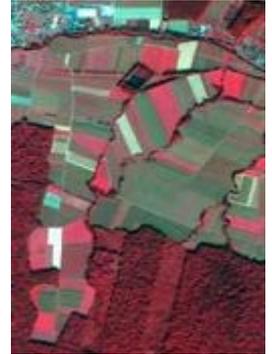
Le radar imageur, système actif, permet l'élaboration d'images (typiquement 100 km x 100 km) de jour comme de nuit même à travers les nuages.

Le radar est sensible aux propriétés diélectriques des milieux (teneur en eau), et à leur rugosité. Il est également sensible aux structures géométriques à l'échelle de la longueur d'onde
Image ERS de la forêt tropicale en Guyane française (bande C, résolution 20 m).

3.6.3 Différent types de résolutions

1. Résolution de 1 à 5 mètres

- Identification, cartographie, caractéristiques d'objets de taille humaine (bancs, voitures, équipements publics, arbres isolés, constructions individuelles)
- Détection de petites zones végétatives, de maladies des plantes, de petites parcelles agricoles(Identification des cultures Colmar1998 Spot 5 super mode)
- Différenciation de types de bâtiments et d'habitats
- Modèles numériques de terrain (MNT)



2. Résolution de 5-10 mètres

- Localisation/cartographie de bâtiments, de routes, de propriétés, de terrains agricoles, de rues La comparaison d'images satellitaires à plusieurs dates permet un suivi de l'évolution de l'occupation du sol, constituant une aide précieuse pour la planification urbaine.

- Différenciation de végétation, de maladies sur des parcelles moyennes

- Classification de terrains de faible superficie

Dans le domaine de l'agriculture de précision, les images satellitaires permettent de gérer les surfaces cultivées au niveau de la parcelle.



3. Résolution de 20 -30 mètres

Localisation et géométrie des grandes infrastructures (aéroports, centres villes, banlieues, complexes commerciaux, sportifs, industriels). Couverts forestiers et agricoles de grande étendue, classification générale des terrains .



Image de la région de Bordeaux
© Spot Image

4. Résolution de 80-100 mètres

- Cartographie de structures géologiques régionales.
- Santé phytosanitaire dans de vastes régions.

5. Résolution de plus de 1000 mètres

- Végétation régionale.
- Événements régionaux climatiques ou sanitaires (désertification, insectes...).

3.6.4 Applications

1. Agriculture

La télédétection offre une méthode sûre et efficace de cueillette d'information dans le but de cartographier le type de culture et de calculer la superficie des cultures. La télédétection peut fournir de l'information sur la structure de la végétation, le type de plantes et leur état de santé.

Les résultats de l'interprétation des données de télédétection peuvent être intégrés dans un système d'information géographique (SIG) et dans un système de gestion des cultures, et peuvent aussi être combinés à des données auxiliaires pour fournir de l'information sur les droits de propriété, les pratiques de gestion, etc.

Les pays de la Communauté Européenne (CE) utilisent la télédétection pour aider à remplir le mandat et les exigences de la politique agricole de la CE.

2. Forêts

La télédétection nous donne des moyens d'identifier et de délimiter rapidement les différents types de forêts et de ses espèces ainsi que l'estimation de la biomasse, d'analyser l'étendue et l'échelle du problème de la déforestation. La télédétection est utilisée pour la détection et la surveillance des feux de forêts et la repousse après un feu.

3. Géologie

La télédétection n'est pas limitée aux applications géologiques directes; elle est utilisée dans la planification et la logistique, comme la planification de routes d'accès dans une région minière, la surveillance de projet et dans la création de cartes de base sur lesquelles les données géologiques peuvent être superposées.

Elle est utilisée dans l'exploration pétrolière, la géologie environnementale et la cartographie planétaire.

4. Hydrologie

Les techniques de télédétection sont utilisées pour mesurer et effectuer le suivi de la superficie de l'inondation, pour orienter les secours de façon efficace et pour fournir des évaluations quantifiables sur l'étendue des terres et des infrastructures touchées.

L'incorporation des données de télédétection dans un SIG permet le calcul et l'évaluation rapides des niveaux d'eau, des dommages et des régions en danger d'inondation.

5. Volcans

La télédétection est utilisée pour surveiller les éruptions volcaniques et produire des schémas, des cartes thématiques et des diagrammes destinés à prédire le risque potentiel dans les zones avoisinantes des volcans.

Les données de télédétection peuvent aider à détecter les différences lithologiques, les changements de végétation et les variations altimétriques qui font suite aux événements volcaniques, ainsi que l'étendue et la croissance des centres urbains dans les zones menacées.

6. Tremblements de terre

La télédétection permet aux géologues d'identifier, les lignes de failles actives. Leur analyse permet aux autorités de prendre les mesures qui s'imposent. C'est immédiatement après un tremblement de terre que les données transmises par les satellites peuvent aider à repérer les zones où une intervention rapide s'impose

7. Cyclones

La télédétection peut aider à suivre les tempêtes et à prévenir les populations.

Chaque année, le monde voit passer environ 100 cyclones tropicaux. Les pluies battantes, les vents violents et les mers déchaînées peuvent entraîner d'importantes pertes humaines et économiques

8. Océanographie

La télédétection peut apporter dans notre connaissance des océans de nombreux détails comme la direction et vitesse des courants, la hauteur des vagues, la température de l'eau, la quantité de plancton et les déversements d'hydrocarbures... elle peut apporter aussi la connaissance de la topographie mondiale des fonds océaniques et le niveau de la mer .

9. Cartographie

La télédétection est un puissant outil cartographique pour appréhender des questions extrêmement variées et toujours plus nombreuses relevant entre autre,de la géographie rurale de la géo-archéologie , de l'aménagement , de la géographie urbaine

10. Glaces océanique

La télédétection permet de déterminer la concentration de la glace,le type , l'age et les mouvements de la glace elle permet la détection et la surveillance des icebergs et la surveillance de la pollution.

11. L'atmosphère

La télédétection a notamment permis de quantifier la pollution de l'air et sa teneur en gaz à effets de serre. Elle a aussi permis de suivre l'évolution, depuis plus de 25 ans, du fameux trou dans la couche d'ozone.

Enfin, l'étude de l'atmosphère passe aussi par celle de ses aérosols, les particules en suspension. Une avancée qui pourrait en annoncer d'autres dans le domaine de l'observation du climat

12. Climatologie spatiale

La climatologie s'attache à étudier le système climatique et son évolution au cours du temps et en s'intéressant soit au climat global, soit à des climats régionaux .pendant longtemps le système climatique modélisé s'est vu réduit à deux composantes : l'atmosphère et l'océan,on sait aujourd'hui que la réalité est plus complexe. Les satellites d'observation fournissent de longues séries de mesures précises, globales et compatibles avec la dimension globale des phénomènes climatiques.

Chapitre 4 : Positionnement - Localisation

4.1 GLONASS

Le système GLONASS (global orbitography navigation satellite system) utilise 24 satellites évoluant sur 3 plans à une altitude de 19100 kilomètres. Le programme GLONASS a débuté en 1982 et a été déclaré complètement opérationnel en 1993 par les autorités russes. Les difficultés financières qu'a connu l'Union soviétique et la faible durée de vie des satellites (2 à 3 ans) ont ensuite entraîné une lente dégradation de la constellation. Le système fonctionne à présent en mode dégradé avec seulement 7 satellites opérationnels.

Un programme de redéploiement du système GLONASS est en cours. De nouveaux satellites de type "GLONASS-K", bénéficiant d'une durée de vie étendue (7 à 8 ans) et de meilleures caractéristiques de transmission, vont être lancés prochainement. La reconstitution complète de la constellation devrait intervenir en 2006.

Le système GLONASS n'est pas actuellement compatible avec le système GPS. Par contre, il devrait être compatible avec le futur système européen GALILEO.

Configuration de GLONASS

Détenteur du système	RUSSIE
Nombre de satellites	10 (7 opérationnels)
Site de Lancement	Baikonur Cosmodrome, Kazakstan
Nombre de plans orbitaux	3, inclinés entre eux de 64.8°
Altitude des orbites	19130km
Période de révolution	11h15m40s
Système géodésique	PZ90
Référence de temps	UTC Russie
Onde porteuse L1	L1 : 1602.0 - 1614.94 MHz
Onde porteuse L2	L2 : 7/9 L1
Code binaire Coarse/Acquisition	C/A : 511 bits sur L1
Code binaire Precise	P : 5110000 bits sur L1 et L2
Message de navigation	Durée 2m30s, à 50 bits/s
Secteur de contrôle	5 stations

Certains fabricants proposent des solutions compatibles GPS - GLONASS, mais les incertitudes autour de la pérennité de ce système et sur son avenir font que les applications actuelles sont presque exclusivement de nature scientifique.

4.2 GALILEO (Système européen de navigation par satellite)

Le système GALILEO complètement déployé comprend 30 satellites (27 opérationnels et 3 de réserve) répartis entre trois plans d'orbites circulaires moyennes (MEO) de 23222 km

d'altitude, inclinés à 56 degrés par rapport à l'équateur. Chaque satellite décrit son orbite autour de la terre en 14 heures .le système Galileo diffusera dix signaux dans des bandes de fréquences différentes pour cinq services différents. Il sera interopérable avec le GPS américain et le GLONASS russe, qui sont les deux autres systèmes existants de navigation par satellites. Les utilisateurs pourront établir une localisation terrestre avec le même récepteur à partir de n'importe quelle combinaison de satellites Galileo offrira une précision de localisation en temps réel de l'ordre du mètre avec une haute disponibilité des services et informera les utilisateurs en quelques secondes de la défaillance éventuelle d'un satellite.(grâce au nombre important de plates formes et à la présence de 3 satellites de réserve , les pannes éventuelle sur un satellite passeront inaperçues).

4.2.1 Les services de Galileo.

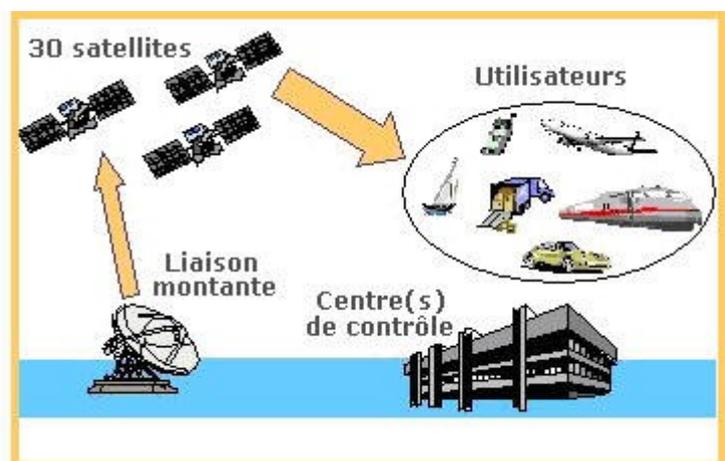
_Le service ouvert (OS.Open Service) fournira des données de localisation et de synchronisation. Le service est gratuit et libre d'accès pour tout possesseur d'un récepteur GALILEO, il fournira des données de positionnement, de navigation et de datation compatibles avec ceux du GPS et de GLONAS

_Le service de sécurité de la vie (SOL.Safety Of Life service) fournira des données d'intégrité avec un détail d'alerte de quelques secondes, authentifié dans les signaux du service ouvert. Il délivrera un service sécurisé, intègre et certifiable, en vue des applications critiques sur le plan de la sécurité de la vie tels que le transport aérien, maritime et terrestre.

_Le service public réglementé (PRS.Public Regulated Service) fournira des données de localisation, de synchronisation et d'intégrité et dont l'accès est contrôlé. Il s'adressera en priorité aux utilisateurs remplissant une mission de service public, très dépendants de la précision, de la qualité du signal et de la fiabilité de sa transmission (services d'urgence, transport de matières dangereuses, etc.)

_Le service commercial (CS.Commercial Service) fournira des services de diffusion d'informations qui pourront être cryptées dans des signaux du service ouvert, et un signal de navigation dont l'accès pourra être contrôlé. En échange d'une redevance versée à l'opérateur GALILEO, il offrira de nombreux services à valeur ajoutée (garantie du service, intégrité et continuité du signal, précision de la datation et des données de positionnement et de navigation au mètre près, etc.)

_Un service de recherche et sauvetage (SAR.Search And Rescue sauvetage et diffusera les réponses à ces signaux. Service) relaiera les signaux de détresse des balises de recherche et



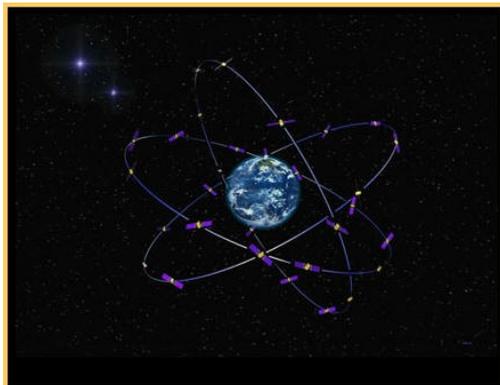
Grâce aux systèmes de navigation par satellites, des millions d'utilisateurs équipés d'un récepteur conçu pour capter et traiter les signaux satellites peuvent être aujourd'hui localisés à tout moment et n'importe où à la surface du globe.

Depuis son lancement dans les années 70, le GPS (Global Positioning System) américain est devenu le système universel de navigation par satellites créant ainsi les conditions d'une dépendance technique, politique, stratégique et économique de millions d'utilisateurs.

Aujourd'hui, l'Europe se décide à afficher clairement une volonté politique d'émancipation vis à vis de la tutelle technologique des Etats-Unis. Un gage de souveraineté et d'autonomie.

Le projet GALILEO prend véritablement corps lorsque, le 13 janvier 1999, le Parlement européen adopte une résolution intitulée « Vers un réseau transeuropéen de positionnement et de navigation, comprenant une stratégie européenne pour un système mondial de navigation par satellites (GNSS 1)

En juin 2004, l'Union Européenne et les Etats-Unis d'Amérique signent l'accord sur la coexistence et l'interopérabilité complète entre le système européen Galiléo et le système américain GPS. La complémentarité des systèmes Galiléo, GPS et Glonass, et la redondance des informations seront au seul bénéfice des utilisateurs. La coexistence de plusieurs systèmes de navigation leur garantiront ainsi la continuité, l'intégrité, la disponibilité et la sécurité des services proposés



Constellation de Galiléo

4.3 NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging / Global Position System)

Le système NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging / Global Position System) est né de la fusion de deux programmes expérimentaux américain (l'US Navy et l'US Air Force) sur le positionnement au sol par satellites en 1973. Les satellites ont été mis sur orbite à partir de 1978 et le système NAVSTAR a été déclaré totalement opérationnel en 1994 pour les besoins de la défense et à titre de sous-produit, pour servir la communauté civile.

Le système est composé de trois secteurs ;

a) Le secteur spatial.

La constellation compte aujourd'hui 27 satellites du block II de 500kg environ. Ce sont des satellites qui ont été lancés en 1989 et 1997.

Ces satellites sont équipés de façon à pouvoir activer des dégradations volontaires du signal émis. Ils ont une durée de vie nominale de 7,5 ans. Leurs orbites sont quasi circulaires, de rayon 26 500 km (soit à une altitude d'environ 20 200 km), de période égale à environ 43082 sec, soit la moitié de la période sidérale terrestre, soit 11h 58 min. Ils sont répartis dans six plans inclinés de 55° sur l'équateur et déphasés de 60°. Cette répartition spatiale garantit la visibilité en permanence d'au

moins six satellites en tout point du globe. Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance du segment de contrôle, maintient une échelle du temps avec grande précision grâce à ses horloges atomiques embarquées, et transmet des signaux à la Terre.

b) Le secteur sol ou de contrôle ;

Le contrôle au sol du système est assuré par des stations de surveillances dépendant exclusivement des USA. elles sont au nombre de cinq et sont situées sur les îles d'Ascension (océan Atlantique), a Diego Garcia (océan indien),a Kwajalein et Hawaii (océan Pacifique) ainsi qu' au Colorado Springs ,(station maîtresse ou MCS.Master Control Station).Les stations de contrôles sont équipées , entre autres ,de récepteurs GPS stationnés sur des points géodésiques dont les coordonnées sont connues avec précision.la station de contrôle maîtresse calcul en permanence les temps de propagation ionosphérique, les effets mécaniques relativistes, la dérive des horloges, et établit les éphémérides des satellites (capital ,puisque les systèmes récepteurs utilisent ce positionnement précis pour leurs calculs),ces informations sont ensuite retransmises aux satellites de la constellation.

c) Le secteur utilisateurs :

Le segment utilisateurs est composé de l'ensemble des utilisateurs de récepteurs GPS. Ces récepteurs sont passifs, ils ne font que recevoir les signaux transmis par les satellites GPS. Ils mesurent les distances entre l'antenne-réceptrice et les satellites-émetteurs, de décoder les messages radiodiffusés et de calculer la position de l'utilisateur.

Le signale GPS

Chaque satellite possède une horloge atomique maintenue à 7 us du temps UTC et émet à 2 fréquences élevées en bande L de L1=1560 MHz et de longueur d'onde 19 cm et L2= 1230MHz et longueur d'onde de 24 cm .cette fréquence ne traverse ni béton ni feuillage dense .il est donc nécessaire que le récepteur soit dans une zone dégagée.

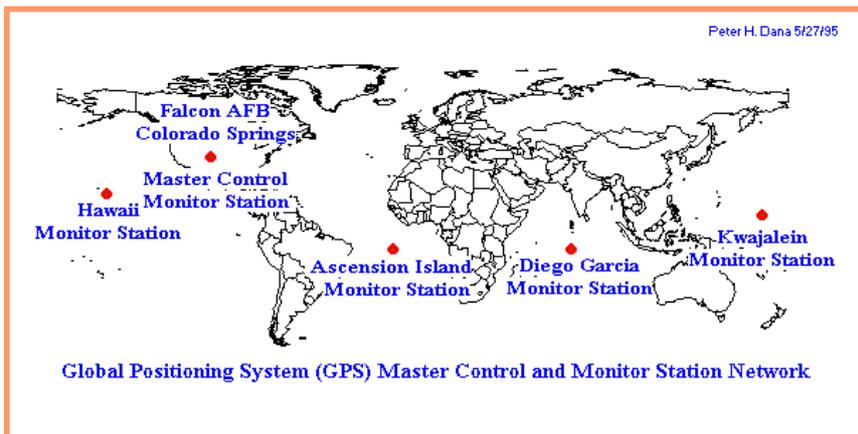
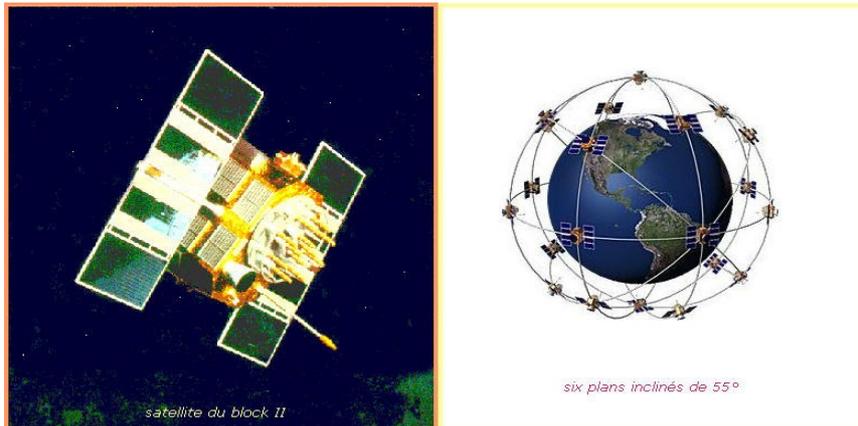
Trois types de signaux sont émis par les satellites de blocs I,II,IIA et IIR :

_un message de navigation avec l'amalche du système (état, identification,position,temps) sur L1 à 50 Hz durant 30sec.

_un code dit C/A(clear/access ou Coarse/Acquisition) au rythme de la milliseconde,permettant la mesure de la distance,module L1.Code de 1023 bits est émis à 1.023 Mbits/sec,il dure 1 seconde.C'est ce signal qui peut être dégradé par une erreur volontaire appelée SA(selective availability).

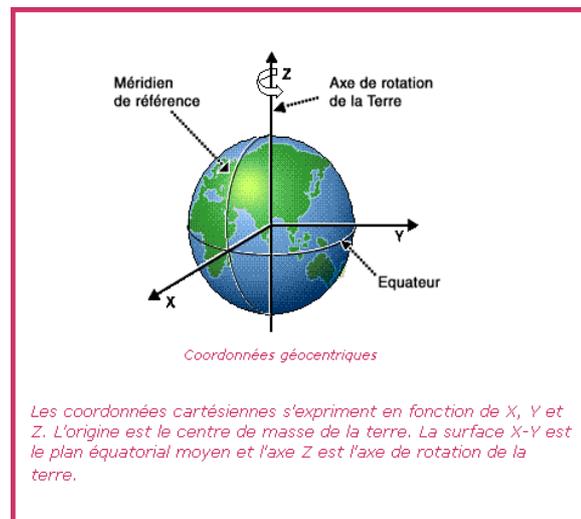
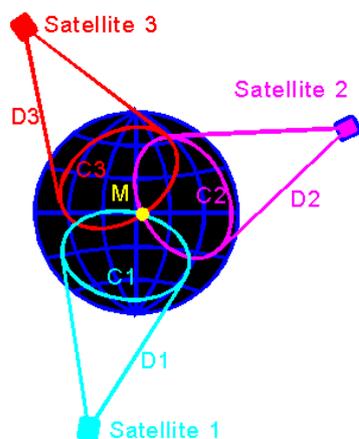
_un code dit P ou Y(Précision) à intervalles longs et réservé uniquement aux utilisateurs privilégiés du GPS. Ce code est émis sur L1 et L2 à une fréquence 10 fois plus grande de 10.23Mbits/sec. Sa durée est de 7 jours. Les clients utilisent des clés de décryptage.

Les satellites de nouvelles générations ,bloc IIR-M diffuseront un nouveau code exclusif aux militaires américains (code M) sur les porteuses L1et L2.quant aux satellites bloc IIF, ils transmettront de plus une nouvelle onde porteuse L5 qui sera modulée par 2 nouveaux code civils I5 et Q5.



4.3.1 Principe de localisation GPS

Le principe de localisation est en lui même très simple. En effet, si on imagine de vouloir localiser un point M, de la surface du globe terrestre, il suffit d'entrer en contact avec 3 satellites. Chaque satellite envoie son numéro d'identification, sa position précise par rapport à la terre, ou dans le repère lié à Greenwich, l'heure exacte d'émission du signal. Le récepteur GPS, grâce à son horloge supposée synchronisée sur celle des satellites, calcule donc le temps de propagation à la vitesse de la lumière et en déduit la distance au satellite.



- Le point M est donc sur une sphère de rayon D_1 et de centre le satellite S_1 , l'intersection avec le globe donne un premier cercle C_1 .
- Le point M est aussi sur une sphère de rayon D_2 et de centre le satellite S_2 , l'intersection avec le globe donne un deuxième cercle C_2 . Les cercles C_1 et C_2 se coupent donc en 2 points.
- Le point M est enfin sur une sphère de rayon D_3 et de centre le satellite S_3 , l'intersection avec le globe donne un troisième cercle C_3 . C'est le troisième satellite "qui lève l'indétermination" et précise de manière unique le point M cherché.

Positionnement en altitude :

Lorsque l'on veut en plus de la latitude et longitude, l'altitude, on utilise un quatrième satellite. Plus ce dernier sera proche de la verticale de M, plus l'altitude sera fiable. En pratique il arrive que M puisse "voir" 12 satellites. Un algorithme de calcul affine donc la position 3D en utilisant un maximum de satellites. D'ailleurs le récepteur GPS indique de lui même, le nombre de satellites en vue, c'est à dire utilisables.

Par exemple un satellite visible au ras de l'horizon sera inopérant pour calculer l'altitude. Réciproquement un satellite à la verticale de M donnera un mauvais positionnement horizontal. Pour des appareils évolués, le récepteur affiche le positionnement des satellites utilisés, ce qui permet d'apprécier la qualité de l'information calculée. Certains appareils indiquent même la précision de la localisation.

Cette influence de la géométrie de la constellation est caractérisée par un coefficient GDOP (Geometric Dilution Of Precision). L'UERE (User Equivalent Range Error) de standardisation GPS est de l'ordre de 16 à 23 m pouvant aller jusqu'à 400 m après 14 jours sans transfert de données. La précision réelle est le produit GDOP par UERE.

La réalité

L'horloge du récepteur est moins précise que celle du satellite et n'est jamais parfaitement synchronisée. Le calcul consiste donc à résoudre des équations dont les inconnues sont les trois coordonnées X Y Z de M, et une erreur de temps et inconnue mais identique pour toutes les mesures des distances approchées D_1, D_2, D_3, \dots puisque tous les satellites sont parfaitement synchronisés entre eux. Ainsi le récepteur utilise les données de quatre satellites pour résoudre son problème, soit par mesures successives avec une seule voie de réception, soit par mesures simultanées avec un récepteur à plusieurs voies. Cette dernière méthode est naturellement impérative pour des engins évoluant à grande vitesse.

Le G.P.S. assure en tous points du globe un positionnement et une navigation en trois dimensions, précis à 100 mètres près pour les utilisateurs classiques (soumis à une dégradation éventuelle aléatoire des signaux), et approchant 10 mètres dans le plan horizontal et 15 mètres en altitude pour les usagers privilégiés ou l'armée américaine.

GPS Différentiel : La méthode consiste à utiliser un récepteur placé en une station connue. Il calcule donc l'erreur volontaire SA dont nous avons parlé plus haut, et qui dégrade la précision. Cette information de correction est alors répercutée sur les récepteurs du voisinage. C'est ainsi que fonctionnent les avions qui peuvent alors se positionner à quelques mètres près.

Les nouvelles techniques permettent d'atteindre une précision centimétrique.

4.3.2 Applications du système GPS

1. La navigation militaire

Le GPS étant à la base un projet militaire, il est clair qu'il y a de nombreuses applications dans ce domaine : il a été utilisé durant la guerre des Balkans et la seconde guerre du Golf pour le guidage des missiles et pour guider les troupes et les localiser (guerre chirurgicale).

2. Les activités scientifiques et de recherche :

- a) Comparaisons d'horloges atomique avec le GPS : Le temps atomique est égal à la moyenne de 250 horloges atomiques dispersées dans le monde entier .L'horloge atomique connectée avec le récepteur GPS détermine la différence de temps.
- b) Mesure de la tectonique des plaques : Pour mesurer la vitesse à laquelle les plaques avancent, on fait appel aujourd'hui au GPS. Des antennes GPS sont placées sur des roches puis on calcule avec précision la position de l'antenne (repères) dans l'espace. On obtient ainsi la déformation dans une zone considérée.
- c) Géophysique : La présence de récepteur GPS sur tous les continents permet d'étudier la dérive des continents.
- d) sismologie (surveillance des failles actives) : un réseau GPS est mis en place autour d'un grand nombre de failles actives de part le monde, en USA, au Japon, en Turquie, en France ce réseau permet l'analyse de la déformation de la surface du sol dans la région de la faille et donne des informations sur la profondeur de la fracture, la longueur des segments actifs ; les zones où le risque de séisme est plus important .D'autre part après un séisme, la mesure GPS donne accès au déplacement total du sol occasionné par le séisme.
- e) Vulcanologie : Grâce au GPS, il est possible de surveiller la déformation d'un volcan en activité. On peut suivre au jour le jour les déformations dues à la montée de lave. Ces mesures sont utiles aux volcanologues pour quantifier les phénomènes associés à une éruption.
- f) Météorologie : le système GPS permet de positionner instantanément des points de mesure avec précision. Il est devenu l'outil privilégié pour les mesures météorologiques fixes (positionnement) et mobile (navigation) soient terrestres, maritimes ou aériennes. De nombreuses campagnes de mesure qui nécessitent des synchronisations précises entre différents lieux utilisent le temps GPS comme référence : mesure de vapeur d'eau ; mesure du vent par radiosondage, mesure de l'eau précipitale en temps réel.
- g) Océanographie : les récepteurs GPS contrôlent le niveau moyen des mers.
- h) étude de l'atmosphère : Le GPS permet d'étudier la quantité d'électrons libres dans l'ionosphère (effet ionosphérique) et de vapeur d'eau présente dans la troposphère (effet troposphérique).
- i) cartographie-topographie :
- j) Spéléologie : il vérifie le positionnement des cavités déjà connues pour en améliorer la précision sur l'inventaire des massifs karstiques.
- k) Trajectographie : l'analyse précise de trajectoire de sportifs en ski de compétition a été obtenue grâce à des techniques GPS.
- l) Surveillance de migration des animaux : en plaçant des balises sur des animaux les scientifiques peuvent observer leurs déplacements.

3 Les activités commerciales

La navigation par satellite fait de plus en plus partie du quotidien des occidentaux est ces applications sont extrêmement diverses. Il y a bien sûr le fait que le système GPS équipe de plus en plus de voitures. Mais les applications destinées aux civils ne se limitent pas à cela uniquement. Il existe en effet bien d'autres systèmes qui utilisent le GPS ou le GPS couplé avec un autre système.

- a) l'agriculture de précision : l'Agriculture de précision est un concept de gestion des passerelles agricoles. Elle repose sur le principe d'apporter la bonne dose, au bon moment, au bon endroit.
- b) la pêche de précision : les pêcheurs peuvent localiser leur bateau avec une grande précision pour assurer leur sécurité face aux intempéries ou collisions et augmenter la productivité de leurs activités de pêche.
- c) le guidage : les récepteurs GPS est utilisé comme système de navigation des rallyes (voiture , motos ..) ,aeroplaneurs ;il est utilisé comme guide touristique numérique pour rondonneurs ou touriste urbain .il est aussi utilisé dans les aéroports pour la surveillance et le contrôle du trafic au sol (avions , voitures de secours ,les bras télescopiques ,les places au parking ...).les transporteurs routiers et ferroviars suivent le mouvement de leurs camions , wagons ou conteneurs et peuvent ainsi lutter contre les vols et les fraudes .
- d) le secours : le GPS est utilisé pour les services de secours (pompiers, police, urgences médicales, secours en mer ou en montagne). Argos est un système opérationnel de

localisation

et de collecte de données par satellite, développé par CLS, le Cnes en France et les Etats-Unis, depuis 1978. Il est essentiellement dédié à l'étude et à la protection de l'environnement et aux applications à caractère scientifique.

Chapitre 5 : La géodésie spatiale

5.1 Introduction

La géodésie spatiale constitue un apport considérable dans le domaine des Sciences de la Terre. Le GPS n'est pas la seule technique de positionnement employée mais il y a d'autres techniques.



5.2 Le Système Transit

Le premier système de positionnement développé par L'U.S. Navy, TRANSIT, utilisait le principe de l'effet Doppler. C'est un système descendant, les satellites sont émetteurs et les récepteurs sont passifs ce qui permet de réduire leur taille et d'un point de vue militaire, de les rendre plus "furtifs".

Ce système a été mis en service en 1958 et est resté uniquement à usage militaire jusqu'en 1967, date à laquelle la communauté scientifique et en particulier les géodésiens l'ont adopté pour leurs travaux.

Il n'a plus été maintenu à partir de 1985 et le dernier satellite a cessé d'émettre en 1988.

Ce système a été largement utilisé en géodésie spatiale et les meilleurs résultats obtenus l'ont été en point isolé avec une exactitude absolue de l'ordre de 80 centimètres.

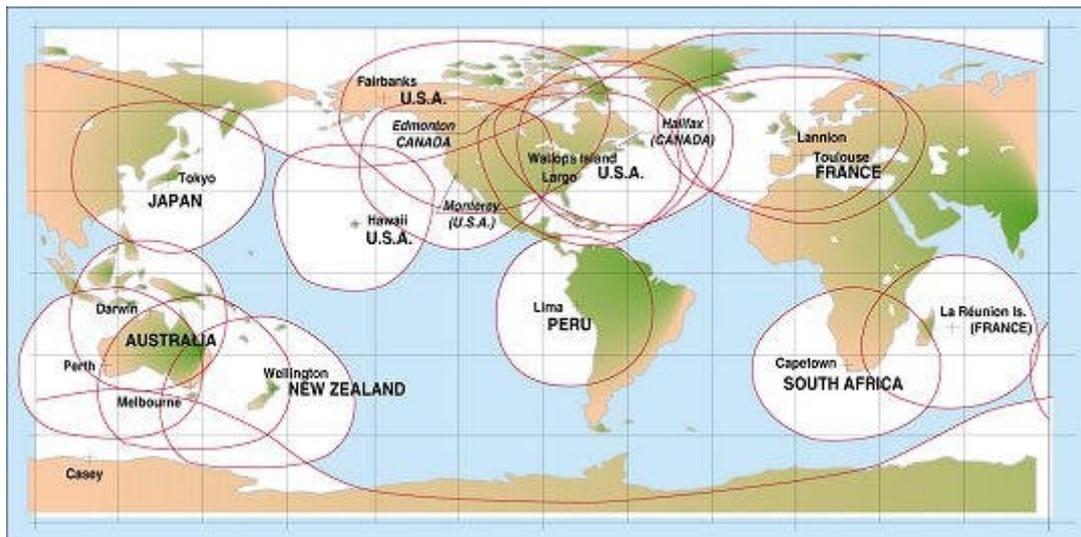
5.3 Le Système Argos

Argos est devenu le système de référence pour l'étude et la protection de l'environnement à l'échelle mondiale.

Le système satellitaire Argos est né d'une coopération entre :le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), l'Agence américaine d'étude de l'atmosphère et de l'océan (NOAA), l'Agence spatiale américaine (NASA), l'Agence spatiale japonaise (NASDA), l'Organisation européenne des satellites météorologiques (EUMETSAT).

Contrairement à TRANSIT, il est ascendant, ce sont les récepteurs qui émettent vers les satellites. Ceux-ci renvoient ensuite les observations collectées vers trois centres de collectes qui sont Wallops Island en Virginie (Etat Unis), Gilmore Creek en Alaska et Lanion en France.

Ces données sont ensuite envoyées à Toulouse pour traitements, puis les informations sur les coordonnées et la vitesse de l'objet à positionner sont ensuite distribuées aux utilisateurs.

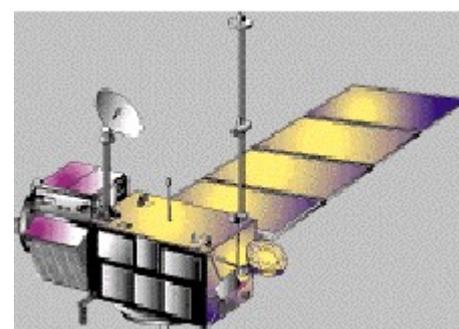


Fonctionnement :

- 1 - Les balises Argos émettent automatiquement des messages qui sont reçus par des satellites en orbite terrestre basse.
- 2 - Les satellites transfèrent les messages vers des stations terrestres.
- 3 - Les stations terrestres transmettent automatiquement les messages vers les centres de traitement Argos.
Les centres de traitement déterminent la position des émetteurs, traitent les données fournies par les capteurs.
- 4 - Les centres de traitement distribuent les résultats aux utilisateurs.

5.4 Le Système Doris

Le système DORIS (Détermination d'orbite et Radio positionnement Intégrés par Satellite) a été conçu et développé par Le CNES, le GRGS et l'IGN. Son but est d'apporter une réponse aux besoins en matière d'orbitographie précise et de positionnement de précision. Comme Argos, DORIS est un système ascendant. Les balises au sol transmettent leurs données aux récepteurs, installés sur des satellites, qui effectuent le comptage Doppler. Ensuite ils retransmettent les données, via des centres de collecte, au CNES à Toulouse afin que soit réalisé les calculs d'orbites ou de coordonnées de points au sol. Le secteur spatial est composé par des récepteurs embarqués sur différents satellites, aujourd'hui les satellites d'observations de la Terre SPOT2, SPOT3 et SPOT4 et sur le satellite océanographique TOPEX/POSEIDON. L'altitude des satellites porteurs doit être comprise entre 700 et 1500 km. Au-delà le signal émis par les balises sol est trop faible.



Cinquante deux balises d'orbitographie réparties d'une façon homogène autour du globe servent à calculer des orbites des satellites avec une précision de l'ordre de 10 centimètres. Pour cela ces balises disposent d'horloges ultra stables et émettent sur deux fréquences 2036.25 MHz et 401.25

5.4.2 Les applications du positionnement

a) La géodésie de grande précision

Coordonnées absolues 3D dans le Système de Référence Terrestre International, réseaux géodésiques globaux ou régionaux, référence d'altitudes pour la hauteur de l'océan et ses variations, mouvements du géocentre .

b) La géotechnique

Glissement de terrain, points d'appui pour le positionnement et la navigation en mode différentiel.

c) La géodésie opérationnelle

Rattachement de points fixes isolés, points d'appui de réseaux locaux, pointage d'antenne, calage d'images aériennes ou spatiales.

d) La géophysique

Mesures de déformations, tectoniques régionales, surveillance sismique

5.5. Positionnement par Laser

La géodésie consiste à localiser très exactement des points à la surface de la Terre et à déterminer avec précision la surface d'altitude zéro, le géoïde. La géodésie spatiale utilise des repères extérieurs à la Terre : satellites artificiels, ou encore les quasars.

Principe du positionnement par laser

Cette technique encore appelée " télémétrie laser sur satellite " ou SLR, "Satellite Laser Ranging", s'est développée dès 1965. Elle consiste en la mesure ultra précise du temps aller retour d'une impulsion de lumière verte visible qui atteint le satellite où elle est réfléchi dans des prismes de réflecteurs et renvoyée jusqu'à un capteur placé au sol. La station comporte :

- un laser à impulsions courtes : 100 picosecondes, et à haute cadence : 10 hertz,
- un télescope de poursuite des satellites pour recevoir la lumière réfléchi par le satellite,
- un chronomètre de très haute précision et une horloge ultra précise,
- le satellite qui constitue juste une cible passive renvoyant le signal.

Connaissant le temps de trajet aller retour de la lumière entre la source et le satellite, ainsi que la vitesse de la lumière, on calcule directement la distance

Références bibliographiques et électroniques

1. <http://jason.oceanobs.com>
2. http://Europa.en.int/comm/energy_transport
3. <http://www.esa.int/navigation>
4. <http://www.dartfish.com>
5. <http://www.galileoju.com>
6. <http://www.cite-sciences.fr>
7. <http://www.cieletespace.com>
8. fr.rian.ru/russia
9. www.cnes_edu.org
10. www.Noah.gov
11. Eumelsatlas.com
12. www.SPOTImag.fr
13. www.meteofrance.com
14. www.univer.ERSer.fr
15. www.obsat-satellitessecretsamericans.htm
16. www.france5.fr/espace

