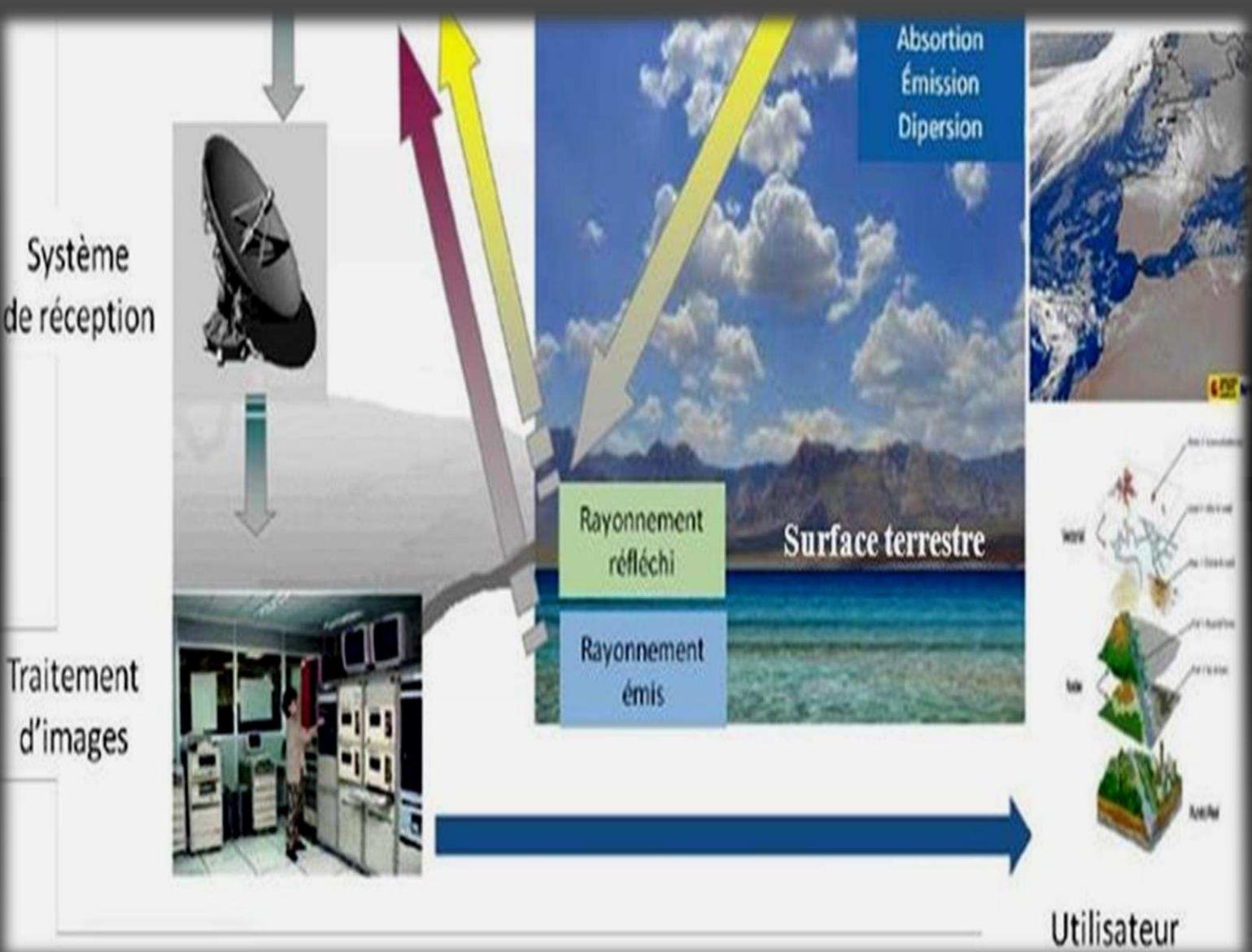


POLYCOPIE DE COURS DE TÉLÉDÉTECTION



PAR
DR. DAHEL AMINA TANIA

DESTINE AUX ETUDIANTS DE MASTER II
SPECIALITE: BIORESSOURCES MARINES

POLYCOPIE DE COURS DE TÉLÉDÉTECTION



PAR
DR. DAHEL AMINA TANIA

Avant-propos

Ce polycopié s'adresse aux étudiants inscrits en master II, son contenu est conforme au canevas officiel de la matière enseigné en deuxième année de master, spécialité « Bioressources Marines »; filière Hydrobiologie Marine et Continentale « HBMC » et domaine des Sciences de la Nature et de la vie. Il est rédigé dans le but de permettre aux étudiants d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandées.

L'analyse spatiale est aujourd'hui l'une des démarches fondamentales en géographie. Son abord nécessite la maîtrise de notions complexes. Ce manuscrit, qui facilite l'approche ; suit une progression logique ; explique systématiquement le vocabulaire spécialisé, illustre les concepts par des exemples précis et complets. Il commence donc par des généralités sur la télédétection avant d'entamer, les quatre chapitres dans lesquels les principales méthodes de la télédétection sont décrites et étudiées, permettant aux étudiants d'acquérir les connaissances de base des techniques de télédétection et d'analyse de l'information géographique.

Dr. DAHEL Amina Tania

TABLE DES MATIERES

Généralités		
1.	Introduction et importance de la télédétection	1
Chapitre I: Instruments de télédétection		
1.	Navigation au radar	5
1.1.	Définition d'un radar	5
1.2.	Définition de la navigation	5
1.3.	Navigation au radar naval	5
1.3.1.	Spécificités du radar naval	6
1.4.	Importance de la navigation au radar	14
1.4.1.	Surveillance maritime	14
1.4.2.	Domaine civil	14
2.	Principes de navigation astronomique (identification des corps célestes)	15
2.1.	Introduction	15
2.2.	Navigation Astronomique	15
2.2.1.	Le matériel nécessaire	16
2.2.2.	Le sextant	19
2.3.	Principe de la navigation Astronomique.	22
2.3.1.	La visée	22
2.3.2.	Les calculs	23
2.3.3.	Le tracé	25
3.	Détection des stocks (bancs migrateurs) par satellite.	26
3.1.	Introduction	26
3.2.	La pêche par détection	26
3.2.1.	Les avantages de la pêche par détection	28
3.2.2.	Les applications de détection	29
3.3.	Une espèce, une signature	30
3.4.	Le rôle de la détection en surveillance et évaluation des ressources aquatiques.	31
3.5.	Exemple de la pêche par détection d'une espèce migratrice	33
Chapitre II: Bases physiques de la télédétection		
1.	Les principes de la télédétection	35
1.1.	Définition de la télédétection	35
1.2.	Principe de la télédétection des surfaces naturelles	35
1.3.	Différentes étapes de la télédétection des surfaces naturelles	35
1.4.	Quelques applications	37
1.4.1.	Echelle régionale	37
1.4.2.	Echelle globale	38
1.5.	Détection passive et active	38
1.5.1.	Télédétection passive	38
1.5.2.	Télédétection active	39
2.	Le rayonnement électromagnétique et le spectre électromagnétique	40

2.1.	Définition du rayonnement électromagnétique	41
2.2.	Le spectre électromagnétique	44
2.2.1.	Trois fenêtres spectrales principalement utilisées en télédétection spatiale	45
3.	Interactions avec l'atmosphère	48
3.1.	La diffusion	48
3.1.1.	La diffusion de Rayleigh	48
3.1.2.	La diffusion de Mie	49
3.1.3.	La diffusion non-sélective	50
3.2.	L'absorption	50
4.	Interactions rayonnement-cible	52
4.1.	Modes de réflexion de l'énergie	52
4.1.1.	La réflexion spéculaire	52
4.1.2.	La réflexion diffuse	53
4.2.	Propriétés optiques des feuilles, de l'eau, du sable et du sol.	54
4.3.	Signatures spectrales	55

Chapitre III: L'imagerie satellitaire

1.	Plates-formes et capteurs	58
1.1.	Les plates-formes	58
1.1.1.	Les plates-formes au sol	58
1.1.2.	Les plates-formes aéroportées	58
1.1.3.	Les plates-formes satellitaires	59
1.2.	Les capteurs	60
1.2.1.	Les capteurs passifs	60
1.2.2.	Les capteurs actifs	60
2.	Caractéristiques des capteurs et Caractéristiques des satellites	61
2.1.	L'orbite	61
2.1.1.	Orbite géostationnaire	61
2.1.2.	Orbite quasi polaire	62
2.2.	La fauchée	62
2.3.	Les points nadir	63
3.	Caractéristiques des images	64
3.1.	Le pixel	64
3.2.	L'échelle	65
4.	Caractéristiques des capteurs	66
4.1.	Résolution spatiale	67
4.2.	Résolution spectrale	68
4.3.	Résolution radiométrique	68
4.4.	Résolution temporelle ou répétitivité	69
5.	Le principe d'acquisition des données	71
5.1.	Balayage multispectral	71
5.1.1.	Le balayage perpendiculaire à la trajectoire	71
5.1.2.	Le balayage parallèle à la trajectoire	72
6.	Quelques satellites d'observation des ressources terrestres	73
6.1.	Satellites et capteurs météorologiques	73
6.2.	Satellites et capteurs d'observation de la Terre	74
6.3.	Satellites et capteurs d'observation marine	76

6.4.	Autres détecteurs	78
7.	Les vraies et fausses couleurs	80
7.1.	Les vraies couleurs	80
7.2.	Les fausses couleurs	80

Chapitre IV: Les traitements d'images

1.	Prétraitements : corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques	85
1.1.	Transmission des données de télédétection	85
1.2.	Éléments d'interprétation visuelle	86
1.3.	Prétraitement et corrections des données : Normalisation	86
1.3.1.	Corrections géométriques	87
1.3.2.	Corrections des effets atmosphériques	90
1.3.3.	Les corrections radiométriques ou effets directionnels	90
2.	Rehaussement de l'image et Rehaussement du contraste des images	92
2.1.	Rehaussement linéaire du contraste	92
2.2.	Les filtres spatiaux	93
3.	Classifications : classifications non supervisées et classifications supervisées	96
3.1.	Classifications supervisées	96
3.2.	Classifications non supervisées	97

Chapitre V: Les applications

1.	Les applications	98
1.1.	Agriculture	98
1.2.	Foresterie	100
1.3.	Géologie	101
1.4.	Hydrologie	102
1.5.	Glaces océaniques	104
1.6.	Couverture et l'utilisation du sol	105
1.7.	Océans	105
	Références bibliographiques.	109

Introduction et importance de la télédétection

1. Introduction :

La télédétection a été utilisée pour soutenir la recherche dans de nombreux domaines tels que le suivi de la déforestation et de l'exploitation minière illégale, la surveillance des changements du littoral, la cartographie des habitats fauniques et le suivi des températures mondiales. Cependant, il est essentiel de comprendre les concepts clés et les différentes approches de la télédétection afin de choisir les données de télédétection appropriées pour les plans de conservation et décisions de gestion.

Le mot télédétection (en anglais « remote sensing ») désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le néologisme « remote sensing » fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque les capteurs sont venus compléter la traditionnelle photographie aérienne. Ainsi l'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en cinq grandes époques :

- de 1856, date à laquelle, pour la première fois, un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale.
- de la première guerre mondiale à la fin des années 50, la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour la cartographie, la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation. On assiste à un progrès continu de l'aviation, des appareils photographiques et des émulsions (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarouge fausse couleur). Les méthodes de la photo-interprétation sont précisées et codifiées.
- la période qui commence en 1957 et s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration de l'Espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace.
- le lancement en 1972 du satellite ERTS (rebaptisé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la

télédétection moderne. Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.

- depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection,

En résumé voici les dates les plus importantes qui ont marquées l'historique de la télédétection :

- 1839 : Mise au point de la photographie (Niepce, Daguerre).
 - 1844 : Premières photographies aériennes réalisées depuis un ballon par G.F. Tournachon dit Nadar.
 - 1856 : Le même Nadar fait breveter l'installation d'une chambre photographique à bord de la nacelle d'un ballon pour la prise de photographies aériennes verticales.
 - 1858-1898: laussedat expérimente systématiquement l'utilisation de la photographie aérienne (ballon) en cartographie et met au point les méthodes de la photogrammétrie.
 - 1909: Premières photographies depuis un avion (Wright).
-

- 1914-1918 : Utilisation intensive de la photographie aérienne comme moyen de reconnaissance pendant la 1ère guerre mondiale.
- 1919 : Mise au point du premier restituteur stéréoscopique moderne (appareil de Poivilliers) pour l'utilisation des photographies aériennes en cartographie topographique.
- 1919-1939 : Essor de la photographie aérienne pour la cartographie et la prospection pétrolière (Moyen-Orient).
- 1940 : Apparition des premiers radars opérationnels en Grande-Bretagne (bataille d'Angleterre).

- Depuis 1945: Développement continu de la photographie aérienne comme méthode opérationnelle de cartographie et de surveillance de l'environnement. Perfectionnement des appareils et des émulsions (infrarouge).
-

- 1957 : Lancement de Spoutnik 1, premier satellite artificiel.
 - 1960-1972 : Développement parallèle de la technique des satellites et des capteurs (mise au point des radiomètres et radars imageurs).
 - 1960 : Lancement de Tiros, premier satellite météorologique équipé de caméras de télévision pour le suivi des masses nuageuses.
 - 1964-69 : Embarquement d'appareils photographiques à bord d'engins spatiaux habités.
-

- 1972 : Lancement d'ERTS, rebaptisé Landsat 1, premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres.
- 1974-78 : Mise en place, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, du réseau des satellites météorologiques géostationnaires.
- 1978 : Lancement de Seasat, premier satellite spécialisé dans la télédétection de l'océan, équipé, entre autres capteurs, d'un radar.
- 1982 : Apparition de la haute résolution spatiale pour l'observation de la Terre : lancement de Landsat 4, équipé du radiomètre « Thematic Mapper ».
- 1986 : Lancement de SPOT 1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre), satellite français de télédétection. Début de l'exploitation commerciale des images (Société Spotimage).
- 1991 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-1, équipé de plusieurs capteurs passifs et captifs pour l'étude de l'environnement global de la planète.
- 1999 : Lancement par la société privée Space Imaging Corp. du satellite IKONOS, offrant des images à très haute résolution spatiale (1 m).

2. Importance de la télédétection.

La télédétection couvre un grand champ d'applications qui satisfont de nombreux besoins, aussi bien pour les utilisateurs institutionnels (ministères, agences gouvernementales, organisations internationales) que pour des acteurs privés (sociétés, agriculteurs, organisations non gouvernementales, etc.). Elle offre des solutions qui sont souvent plus économiques que des moyens plus traditionnels (enquêtes de terrain par exemple) ou qui bénéficient d'une intégrité, d'une objectivité qui en font un arbitre impartial (par exemple, pour la surveillance de l'application des politiques agricoles). De plus, dans un certain nombre de cas, la télédétection reste la seule méthode pour traiter des problèmes qui ne peuvent être résolus par des moyens classiques (endroits inaccessibles par des moyens terrestres...). La liste donnée sur l'importance et le rôle de la télédétection est loin d'être exhaustive, de nouvelles applications voient régulièrement le jour...

1. Navigation au radar

1.1. Définition d'un radar.

Le radar (de l'anglais radio Detection And Ranging) est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter la présence et déterminer la position ainsi que la vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou la pluie. Les ondes envoyées par l'émetteur sont réfléchies par la cible, et les signaux de retour sont captés et analysés par le récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La distance est obtenue grâce au temps aller/retour du signal, la direction grâce à la position angulaire de l'antenne où le signal de retour a été capté et la vitesse avec le décalage de fréquence du signal de retour généré selon l'effet Doppler.

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes : en météorologie pour détecter les orages, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance du trafic routier, par les militaires pour détecter les objets volants mais aussi les navires, en astronautique, etc.

1.2. Définition de la navigation.

La navigation est la science et l'ensemble des techniques qui permettent de :

- connaître la position (coordonnées) d'un mobile par rapport à un système de référence, ou par rapport à un point fixe déterminé.
- calculer ou mesurer la route à suivre pour rejoindre un autre point de coordonnées connues.
- calculer toute autre information relative au déplacement de ce mobile (distances et durées, vitesse de déplacement, heure estimée d'arrivée, etc.)

1.3. Navigation au radar naval.

Les systèmes radar marin peuvent fournir des informations de navigation radar très utiles pour les navigateurs à bord des navires. La position du navire pourrait être fixée par le relèvement et la distance des informations, une cible fixe fiable sur l'écran

radar. Les Radar sont largement utilisés pour: la prévention des collisions en mer ; faciliter la navigation de nuit et en situation de faible visibilité ; permettre de faire le point rapidement ; permettre lorsqu'il est bien utilisé, de prévenir les abordages ; Déetecter une cible à grande distance ou invisible de nuit ; créer une zone sécurisée autour du bateau.

1.3.1. Spécificités du radar naval :

Les cibles sont noyées dans un bruit de fond dû au retour radio occasionné par les vagues (le fouillis de mer). Ces retours fluctuent rapidement dans la mesure où les vagues évoluent dans le temps. Par gros temps, il peut ainsi devenir difficile de distinguer un navire d'une vague particulièrement élevée. Le radar naval est particulier à plus d'un titre:

- les cibles à imager sont complexes et fortement variables: un pétrolier ne ressemble pas à une frégate ou à un voilier.
- la surface équivalente radar des cibles peut varier de $0,5 \text{ m}^2$ (périscope) à plusieurs centaines de milliers de mètres carrés (porte conteneur).
- les cibles sont en mouvement et balancées par le mouvement de la mer sur trois axes.
- les cibles peuvent être masquées en partie par la houle par gros temps.

1.3.1.1. Le principe de base du radar :

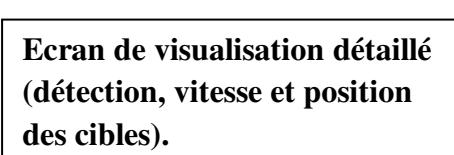
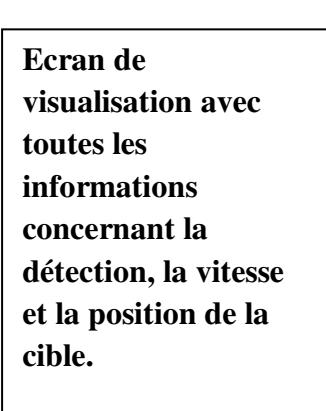
Les ondes radio-électriques de haute fréquence comme le radar se comportent comme les rayons lumineux. L'émetteur remplace la source sonore (détonation du pistolet) ou encore la source lumineuse (lampe de projecteur).

Le radar émet des ondes radio-électriques et les transmet au réflecteur de l'antenne. L'antenne remplace ici le réflecteur similaire du projecteur. Comme le faisceau de lumière du projecteur, l'énergie radio est focalisée par le réflecteur d'antenne, puis émise en rayons denses dans une direction déterminée. L'antenne tourne et émet ainsi son faisceau sur 360° . Les ondes réfléchies par les objets aux alentours sont à nouveau interceptées par celle-ci et converties en images.

Les ondes radio sont plus ou moins réfléchies par les obstacles qu'elles rencontrent. La couleur des obstacles est sans importance, par contre leur "conductivité électrique" joue un grand rôle : les bons conducteurs (métaux), bâtiments, enrochements, etc, réfléchissent mieux que les mauvais (bois, plastique).

Par la réflexion de milliers d'échos, et les milliers de points qui en résultent étant réunis sur l'écran, il se forme une image des environs semblable à un plan de situation.

Les écrans radar modernes ressemblent à des terminaux de jeux vidéo complexes. La détection, la vitesse et la position de la cible peuvent être superposées sur des cartes indiquant des routes ou d'autres points de repère marquants. La plupart des progrès récents dans le domaine des écrans et des traitements de signaux radar résultent des progrès réalisés en informatique et en électronique.



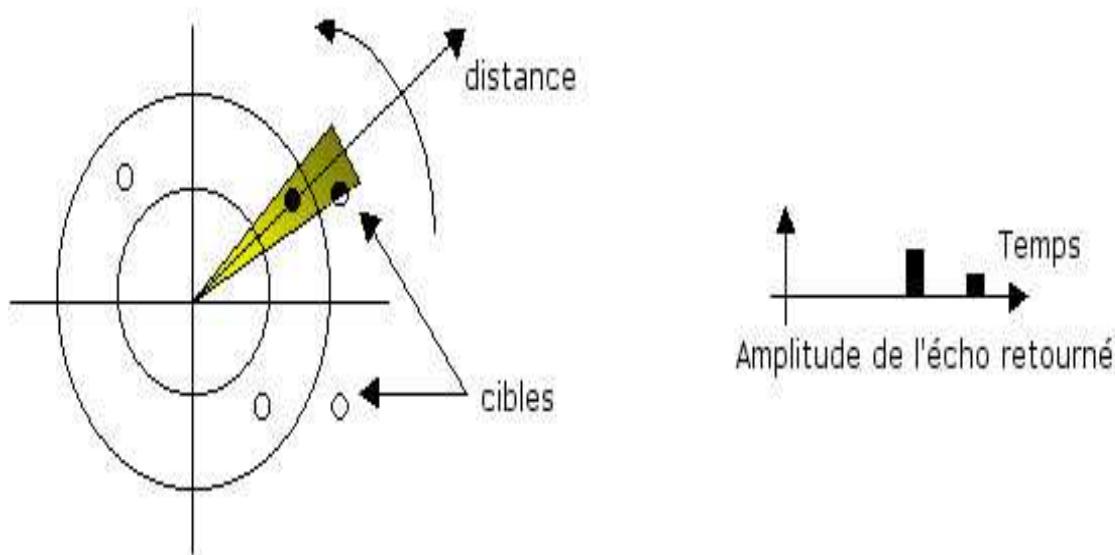
Les écrans radar modernes (www.riceelectronics.com/marine-radar)

1.3.1.2. Mode de fonctionnement :

Le radar propage des impulsions radio-électriques dans l'air à la vitesse de la lumière (300'000 km/s). L'impulsion est réfléchie par un objet et revient comme écho.

Le radar détermine ainsi l'éloignement de la cible en mesurant le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et le retour de l'écho.

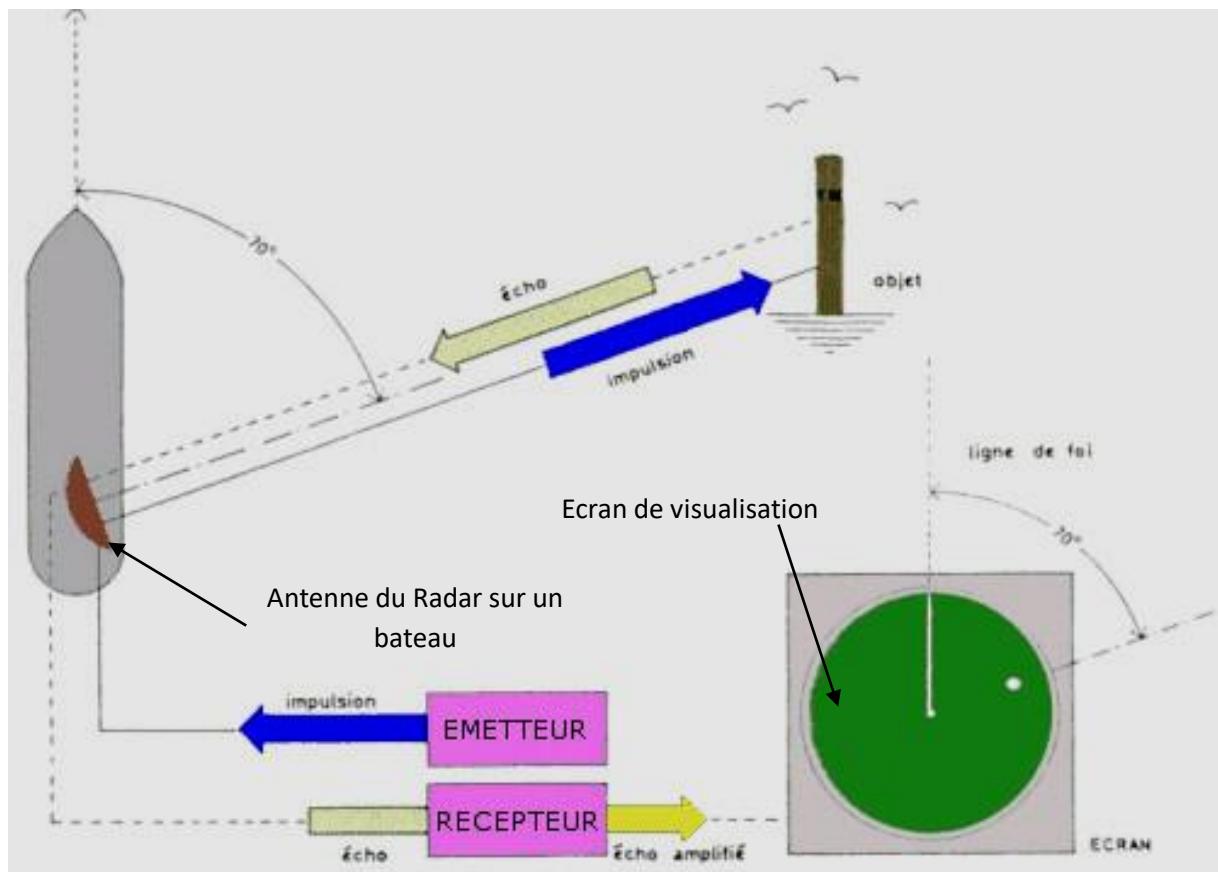
Le relèvement (direction angulaire) de la cible détectée est déterminé par la direction vers laquelle pointe l'antenne du radar lorsqu'elle émet l'impulsion.



Direction angulaire

(www.orange-marine.com/content/52-les-radars)

Un système typique de radar se compose de trois composants de base: Un émetteur/récepteur, une antenne, et un écran de visualisation.



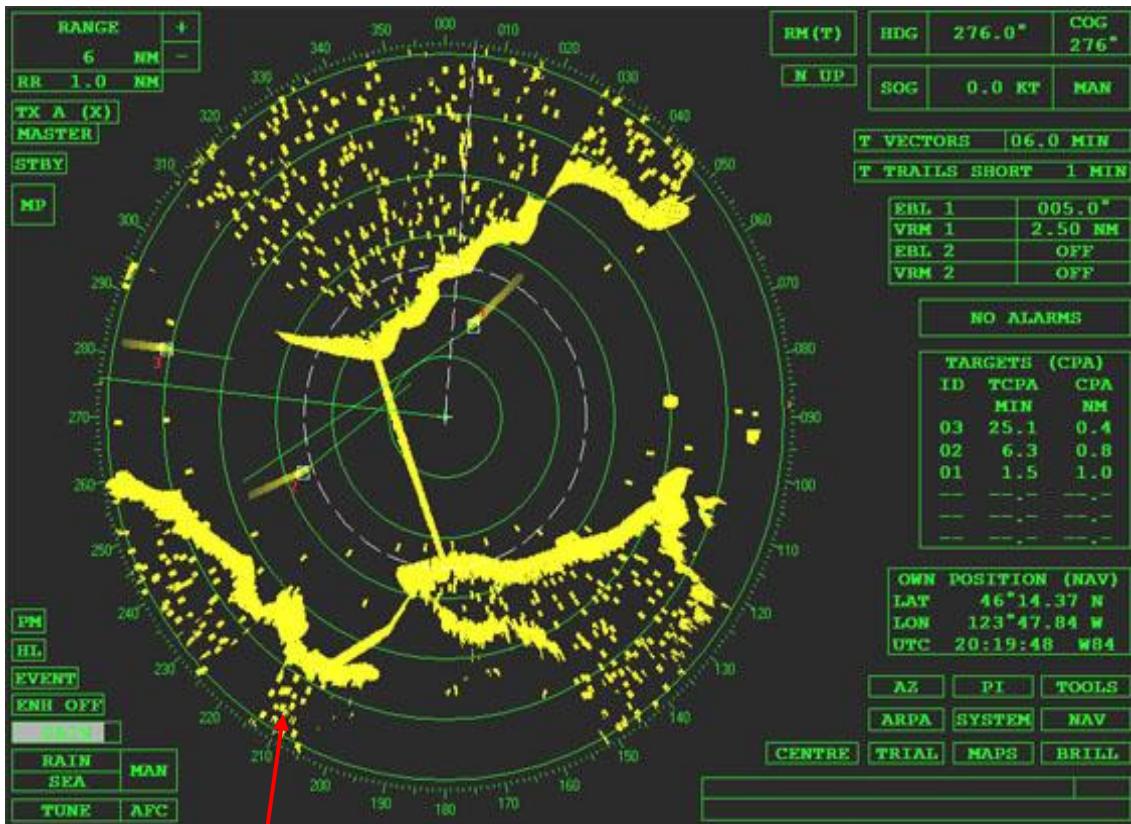
Fonctionnement du système radar.

(www.orange-marine.com/content/52-les-radars)

Dans la plupart des petits radars, l'émetteur/récepteur est situé dans le module de l'antenne.

L'émetteur produit les impulsions de fréquence radio d'une longueur d'onde déterminée qui sont émises lorsque l'antenne tourne. Un dispositif de commutation interrompt la transmission à intervalles réguliers et emploie alors l'antenne comme récepteur pour capter l'énergie renvoyée par des objets se trouvant sur le chemin du faisceau lors de l'émission.

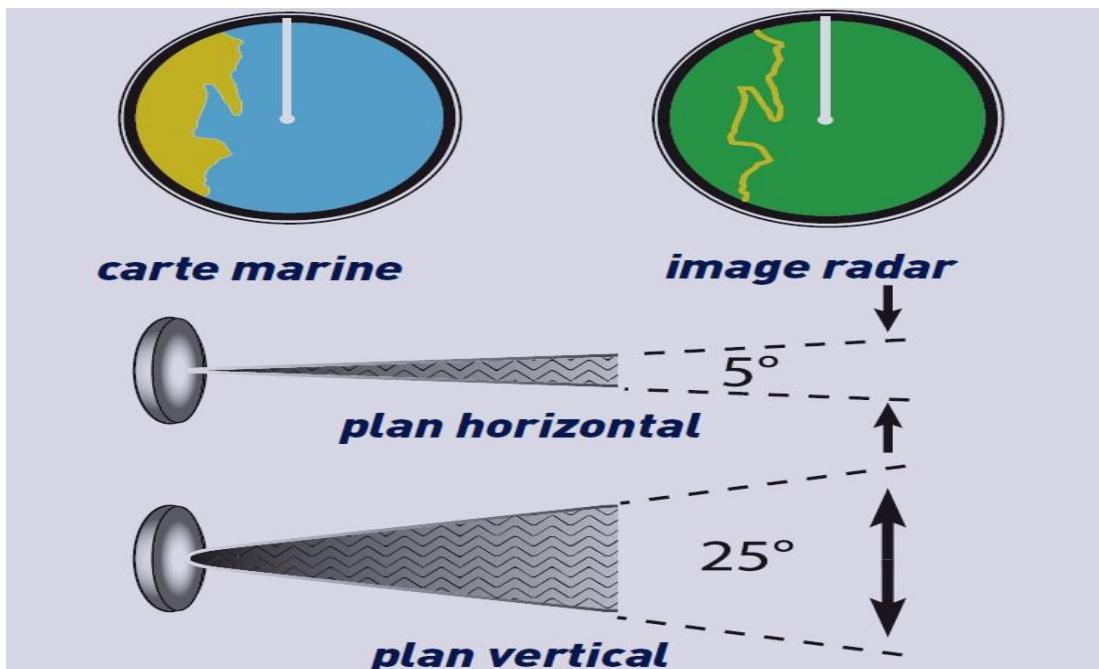
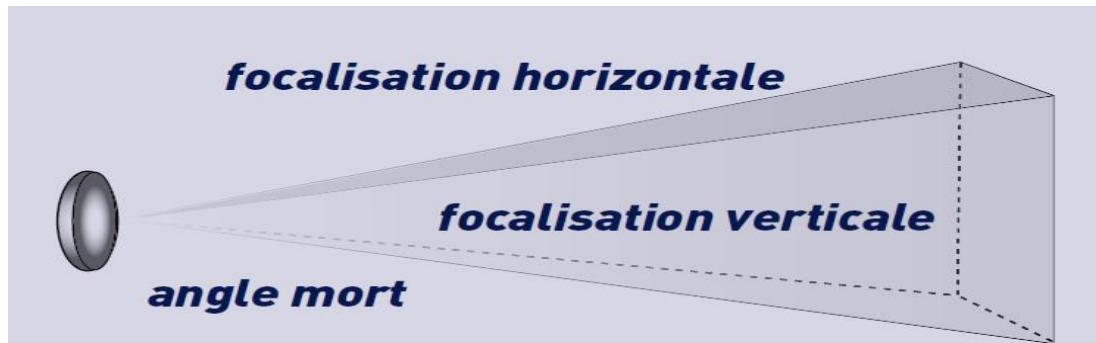
Les échos réfléchis sont amplifiés, puis transformés de telle sorte qu'ils apparaissent sur l'écran sous forme de points lumineux (spots).



1.3.1.3. Forme du faisceau ou focalisation :

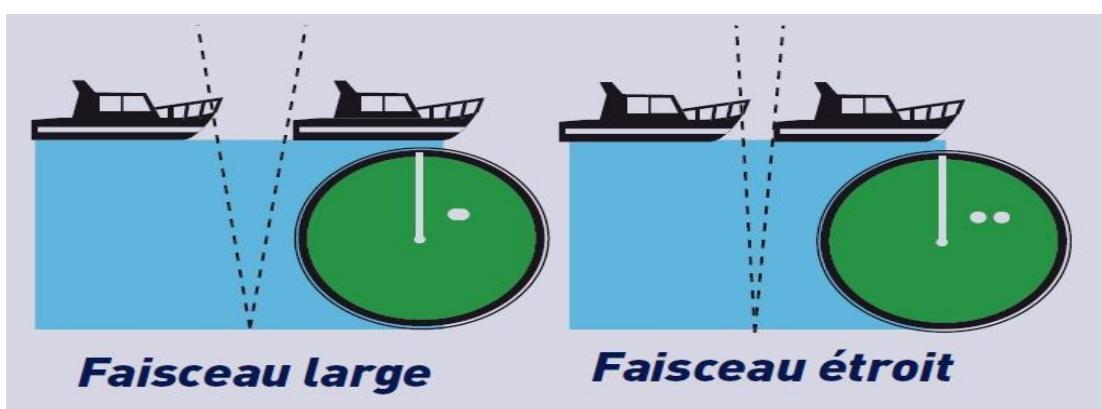
Il est mentionné dans les caractéristiques des radars deux données très importantes concernant l'antenne, par exemple:

- faisceau horizontal : entre 2° et 6°
- faisceau vertical : 25° et 30°



Focalisations horizontale et verticale du radar

(www.orange-marine.com/content/52-les-radars)



Faisceau sur plan horizontal à rayons étroit (2°) et large (6°).

(www.orange-marine.com/content/52-les-radars)

Les ondes électromagnétiques, émanant de l'antenne d'un radar, sont concentrées et réfléchies, comme les ondes lumineuses, dans une seule direction, par un réflecteur faisant partie de l'antenne. Il ne s'agit pas, comme pour le projecteur, d'une focalisation de forme ronde, mais d'une focalisation en éventail.

Pour repérer les cibles, l'antenne émet sur le plan horizontal, un rayon très étroit entre 6° et 2° . Plus une antenne est large, plus le faisceau est étroit.

Un faisceau large (6°) caractéristique des antennes sous radôme (de diamètre entre 45 et 60 cm), pourra confondre les échos de deux bateaux en une seule cible tandis qu'un faisceau étroit (2°) des antennes à poutre (de diamètre entre 120 et 180 cm), illustrera bien nettement les deux cibles.

Sur le plan vertical, le rayon de balayage est de 25° à 30° et son centre est dirigé vers l'horizon de façon à tenir compte du roulis et du tangage sans perdre les cibles de vue.

Si la focalisation verticale est trop grande, il y a gaspillage d'énergie; par contre, si elle est trop petite, un objet (bouée, berge basse, ponton), se trouvant sous la portée de l'antenne, ne peut en théorie plus être repéré.

Aucune antenne n'est parfaite. Le projecteur lui non plus ne peut focaliser son faisceau d'une manière parfaite. On perçoit non seulement les objets se trouvant dans le cône du projecteur, mais également ceux qui ne sont pas éclairés directement.

1.3.1.4. Sensibilité de détection :

Deux conditions doivent être satisfaites pour qu'une cible soit détectée au radar. Celle-ci doit être située au-dessus de l'horizon radar et renvoyer un écho suffisamment puissant.

La force d'un écho renvoyé par une cible dépend grandement de la largeur de celle-ci et de sa hauteur au-dessus de l'horizon radar. Ces facteurs ne sont cependant pas les seuls et une petite cible très réfléchissante peut fort bien renvoyer un écho supérieur à celui d'une cible plus importante mais dont le pouvoir de réflexion est faible.

Autres facteurs de détection

- **L'aspect** est un facteur important affectant la force de l'écho. De nombreux objets qui sembleraient devoir donner de bons échos s'avèrent de mauvaises cibles radar parce que l'énergie qu'ils renvoient est réfléchie dans une direction

autre que celle d'origine (phénomène exploité par les bateaux furtifs). Les pires cibles sont constituées par les surfaces unies et légèrement en pente comme les rivages sablonneux, les bancs de sable ou de boue, et les collines aux pentes douces, de formes régulières et dénuées de végétation.

- **Les surfaces** verticales, telles que falaises et les bâtiments isolés qui présentent une surface relativement unie, constituent de bonnes cibles dans la mesure où elles font face au radar.
- **La conductivité** électrique joue également un grand rôle : les bons conducteurs (métaux), bâtiments, enrochements, etc, réfléchissent mieux que les mauvais (bois, plastique).
- **Coins réflecteurs.** Nous savons que l'onde radar est particulièrement sensible à la géométrie de la surface, ainsi un coin réflecteur constitue un objet extrêmement rétrodiffusant. Le radar ne perçoit que les distances, or la distance parcouru par l'onde est strictement identique quelque soit la position où elle frappe l'objet. L'écho total renvoyé est donc interprété comme provenant de la base du coin réflecteur quelque soit ses dimensions.

Options utiles

Une installation radar composée uniquement d'un moniteur et d'une antenne, est comparable à la vue qu'aurait un automobiliste circulant sur un réseau routier sans panneaux de directions: il voit le chemin, il peut éviter les obstacles, mais il sait très difficilement où il se trouve et dans quelle direction il se dirige.

Pour lire sur l'écran directement des caps, mais également pour orienter l'image par exemple au nord comme une carte typographique, l'installation est reliée à un compas magnétique (**fluxgate**).

Pour afficher directement des positions de longitude et de latitude, un GPS de bord peut également être couplé à l'installation, ce qui permet d'afficher directement sur l'écran les waypoints mais aussi des vitesses et des temps de ralliement.

1.4. Importance de la navigation au radar.

1.4.1. Surveillance maritime :

La surveillance maritime est l'ensemble des activités généralement dévolues aux garde-côtes et à la police maritime. Ces activités incluent:

- Les zones dangereuses et hautement fréquentées;
- la surveillance de la zone économique exclusive, en particulier les zones de pêche;
- les activités de secours en mer.
- la détection de zones de pollution (dégazages sauvages, marées noires)
- la limitation de la contrebande et du trafic de drogue, de l'immigration illégale, ainsi que de la piraterie (comme dans le détroit de Malacca). Pour ce dernier point, il s'agit souvent de détecter de petits navires rapides naviguant proches de la côte, ce qui est un problème technique difficile.

1.4.2. Domaine civil :

Le radar équipant un bateau permet d'assurer la fonction d'évitement d'obstacles de nuit comme de jour et dans la brume. Ces obstacles sont soit la côte, soit d'autres navires, soit des objets dérivants comme des icebergs.

2. Principes de Navigation Astronomique.

(Identification des corps célestes)

2.1. Introduction.

De tout temps, les hommes ont cherché à se déplacer sur la mer... Au début, ils se sont contentés de suivre les côtes on parle de la navigation côtière. Rapidement, le besoin d'effectuer des voyages sur des distances plus grandes a nécessité des techniques plus élaborées On parle de navigation hauturière.

Sur un navire, le terme "navigation" désigne toute technique qui permet de répondre à la question "**ou suis-je ?**" et de représenter ce point sur une carte marine.

La navigation désigne également l'ensemble des techniques et méthodes qui permettent au navire :

- de déterminer sa position,
- de calculer la route à suivre pour se rendre à sa destination, en toute sécurité.

2.2. Navigation Astronomique.

Très tôt, l'homme a constaté que le mouvement des astres (soleil, étoiles, lune) pouvait être déterminé à l'avance et fournir des indications précises sur la position de l'observateur. La mise au point de plusieurs instruments capable de relever la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon, dont le plus abouti est le sextant, a permis au navigateur de déterminer sa latitude. Les progrès dans l'horlogerie, en procurant au navigateur un référentiel horaire stable, ont permis de calculer avec une justesse croissante, la longitude. La navigation astronomique nécessite de savoir, identifier les astres, utiliser un sextant, consulter des éphémérides et effectuer des calculs qui permettent de recaler la position estimée du navire.

En réalité la maîtriser de la Navigation Astronomique de nos jours n'est pas nécessaire puisqu' elle a été remplacée par le GPS, il peut nous donner à toute heure du

jour et de la nuit et par tous les temps une position exacte, sans aucun calcul, et pour un prix égal à celui d'un sextant. On va l'étudier quand même pour maintenir la tradition et comprendre la science des marins d'autrefois, aussi pour garder la forme et l'esprit vif ...mais également pour le plaisir...

2.2.1. Le matériel nécessaire :

En synthétisant, on peut dire qu'il y a 3 étapes dans l'étude de la navigation astronomique, chacune de ces étapes ayant ses outils propres :

Etape n° 1 : La visée.

Quelle que soit la méthode utilisée, vous aurez toujours besoin au minimum d'un sextant et d'un chronomètre.

- **Le sextant :** instrument qui permet par un jeu de miroirs de mesurer la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon avec une bonne précision.



Le sextant

(www.astronomie.skyrock.com/3036283769-Sextant-Sextans.html)

- **Le chronomètre de marine :** Il s'agit d'une montre qui donne l'heure UT (heure universelle). Elle doit être la plus précise possible. Pour la connaître, c'est très facile : en France en été on soustrait 2h à l'heure légale (celle de votre montre), et en hiver on soustrait 1h.



Chronomètre de marine (Horloge marine)

(www.nautic-instruments.nl/fr/autonautic-instrumental).

Etape n° 2 : Les calculs.

Vous pourrez aussi avoir éventuellement besoin de :

- **La calculatrice :** une calculatrice scientifique programmable de préférence.
- **Les éphémérides :** Ce sont des tables qui donnent la position des astres tout au long de l'année (du soleil, de la lune, ou des planètes) ou Les tables pré-calculées : (méthode "manuelle") (comme les HO-249 ou les tables de Dieumegard et Bataille).

EPHEMERIDES NAUTIQUES DU SOLEIL A 0H UT - ANNEE 2010										
Date	Jr.	AHvo	Var AHvo	Dec	Var Dec	AH50	T. Pass	Lever	Coucher	
2010 Mai 27	J	180 43.9	14.999	N 21 14.5	0.4	244 26.8	11 57 8	4 20 (58)	19 35 (302)	
2010 Mai 28	V	180 42.2	14.999	N 21 24.4	0.4	245 25.9	11 57 15	4 19 (58)	19 36 (302)	
2010 Mai 29	S	180 40.3	14.999	N 21 34.0	0.4	246 25.0	11 57 23	4 19 (58)	19 37 (302)	
2010 Mai 30	D	180 38.3	14.999	N 21 43.3	0.4	247 24.2	11 57 31	4 18 (57)	19 38 (303)	
2010 Mai 31	L	180 36.3	14.999	N 21 52.1	0.4	248 23.3	11 57 39	4 17 (57)	19 38 (303)	
2010 Jun 1	M	180 34.1	14.998	N 22 0.6	0.4	249 22.5	11 57 48	4 17 (57)	19 39 (303)	

POSITIONS SIMPLIFIEES DES PRINCIPALES ETOILES EN 2010										
Nom	ASCENSION VERSE				DECLINAISON					
	JANVIER	AVRIL	JUILLET	OCTOBRE	JANVIER	AVRIL	JUILLET	OCTOBRE		
Hipocrate	00 40.2	00 40.3	00 40.4	00 40.4	N 42 2.0	N 42 0.0	N 42 0.2	N 42 2.4		
*Altair	62 11.0	62 10.6	62 10.0	62 10.1	N 8 53.7	N 8 53.6	N 8 53.8	N 8 54.0		
Ankaa	353 18.1	353 18.3	353 17.7	353 17.1	S 42 15.2	S 42 15.0	S 42 14.6	S 42 14.7		
*Antares	112 29.7	112 29.0	112 28.6	112 28.9	S 26 27.2	S 26 27.3	S 26 27.4	S 26 27.4		
*Arcturus	145 58.1	145 57.5	145 57.5	145 57.8	N 19 7.6	N 19 7.5	N 19 7.7	N 19 7.7		
Atria	107 34.4	107 32.7	107 31.9	107 32.7	S 69 2.6	S 69 2.6	S 69 2.9	S 69 3.0		
Avior	234 18.6	234 18.9	234 19.6	234 19.2	S 59 32.4	S 59 32.9	S 59 32.8	S 59 32.4		

Les éphémérides

(www.astrogap.e-monsite.com/pages/dictionnaire-astrologique/ephemerides)

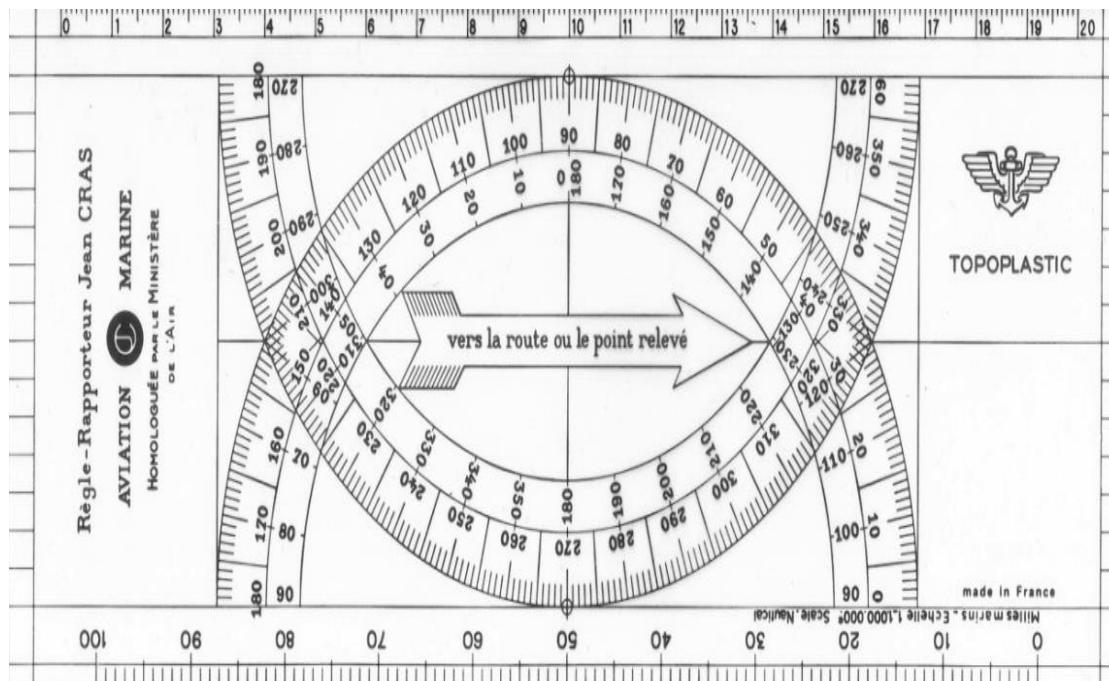
Etape n° 3 : Le tracé.

En effet, contrairement à ce que l'on pourrait croire, à l'issue de tous ces calculs on n'obtient pas directement sa position en latitude/longitude, comme sur l'écran d'un GPS.

Il faut reporter les résultats des calculs sur une carte par un tracé, comparable à celui que l'on aurait pu faire en navigation côtière en reportant des relèvements compas. Ce n'est qu'à l'issue de ce tracé que l'on obtient graphiquement le point sur la carte.

Les outils nécessaires pour ce tracé sont ceux de la table à carte traditionnelle que vous connaissez déjà:

Carte (ou canevas de Mercator), **règle Cras** (ou rapporteur breton), **compas**, **crayon**, **gomme**...



Règle de Cras

(www.sesame-nautic.fr/navigation/regles-de-navigation)

2.2.2. Le sextant :

2.2.2.1. Description du sextant.

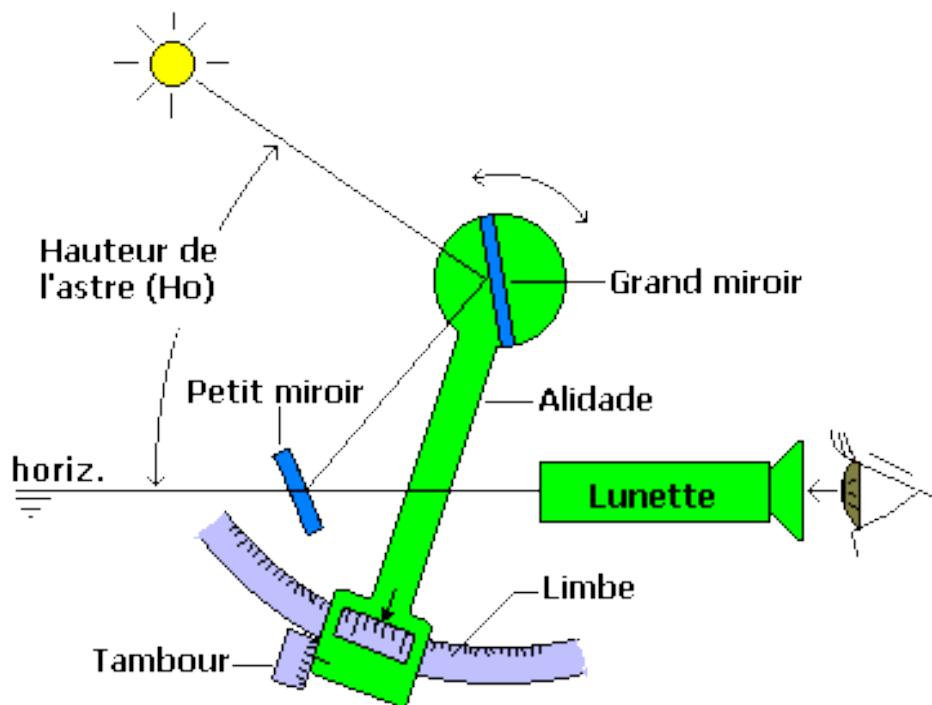
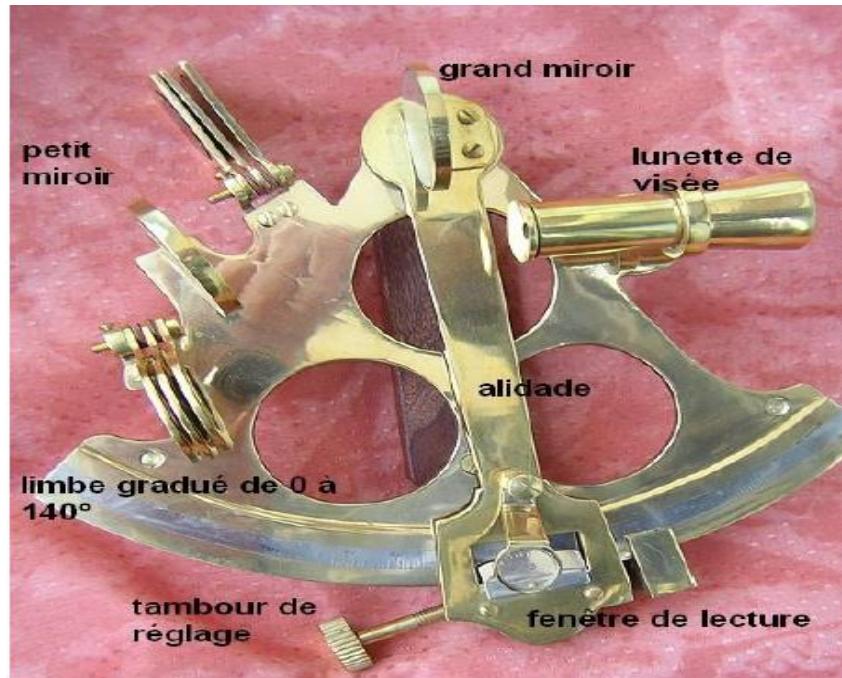
La lunette est alignée avec le **petit miroir**, qui est fixé au bâti de l'instrument. Ce miroir est à moitié transparent. Par le côté transparent, le navigateur peut voir l'horizon directement. Le petit miroir réfléchi également partiellement l'image du grand miroir où l'on voit l'astre.

Le **Grand Miroir** est mobile, et s'incline avec **l'alidade**. En bougeant l'alidade, on change l'angle entre les deux miroirs. La hauteur de l'astre est lue sur le **limbe**.

Un **tambour** permet d'affiner la visée. Les degrés entiers sont lus sur le limbe, et les minutes sur le tambour.

Le sextant a également deux sets de filtre de façon à éliminer la lumière excessive, particulièrement lorsque l'on observe le soleil. L'utilisation de deux filtres ou

plus, devant le grand miroir lorsqu'on observe le soleil est obligatoire. De sérieuses lésions oculaires peuvent résulter d'une observation du soleil sans l'utilisation des filtres.



Le sextant

(www.studylibfr.com/doc/3884941/le-sextant--description)

2.2.2.2. Observation au sextant :

Il s'agit de mesurer avec précision 2 choses :

1 - L'angle entre l'astre choisi et l'horizon. La mesure ainsi obtenue est la "hauteur de l'astre". Nous verrons que cette hauteur doit être corrigée pour tenir compte de certaines imperfections.

2 - L'instant précis de cette mesure : il s'agit de l'heure UT précise à la seconde à laquelle l'astre choisi tangente l'horizon, dans l'œil du sextant. On la mesure à l'aide d'un chronomètre (Un **chronomètre de marine**, appelé aussi **montre de marine**, est une horloge suffisamment précise pour être utilisée comme une base de temps portable).

2.2.2.3. Le procédé :

a - Munissez-vous d'un chronomètre. Lorsque la trotteuse des secondes est à 0, déclenchez le chronomètre. Notez l'heure de la montre (par exemple : 10h 28min 0s)

b - Montez sur le pont du bateau avec votre chronomètre et votre sextant et placez-vous face au soleil, à l'endroit le plus stable possible. Le pied du mat, en général. Le chronomètre "tourne" toujours...

c - Mettez le sextant à 0 et visez l'horizon. Si celui-ci vous apparaît comme une ligne continue, c'est que votre sextant est parfaitement réglé. Si l'horizon vous apparaît "en escalier", cas le plus fréquent, agissez sur le tambour du sextant pour aligner les 2 parties. La valeur alors lue sur le sextant est la **collimation** dont il faudra tenir compte lors des calculs.

d - Mettez les filtres en place et visez le soleil. Lorsque celui-ci apparaît dans la lunette, débrayez le tambour et basculez le corps du sextant pour aller chercher l'horizon, tout en gardant le soleil dans le grand miroir. Quand vous avez l'horizon et le soleil ensemble dans la lunette, embrayez le tambour. Le chronomètre "tourne" toujours...

e - Voilà maintenant le point délicat de la mesure : vous devez faire exactement tangenter le bord inférieur du soleil avec la ligne d'horizon. A l'instant précis où vous obtenez cette tangence parfaite, sextant bien vertical, vous arrêtez le chronomètre.

f - Redescendez à la table à carte sans rien toucher et ajoutez l'indication du chronomètre à l'heure initiale pour obtenir l'**heure exacte de la visée**. Par exemple, en continuant le cas ci-dessus, si vous avez arrêté votre chronomètre à 0h 4 min 12s, l'instant de la mesure est : 10h 28 min + 4 min 12 s = 10h 32 min 12 s.

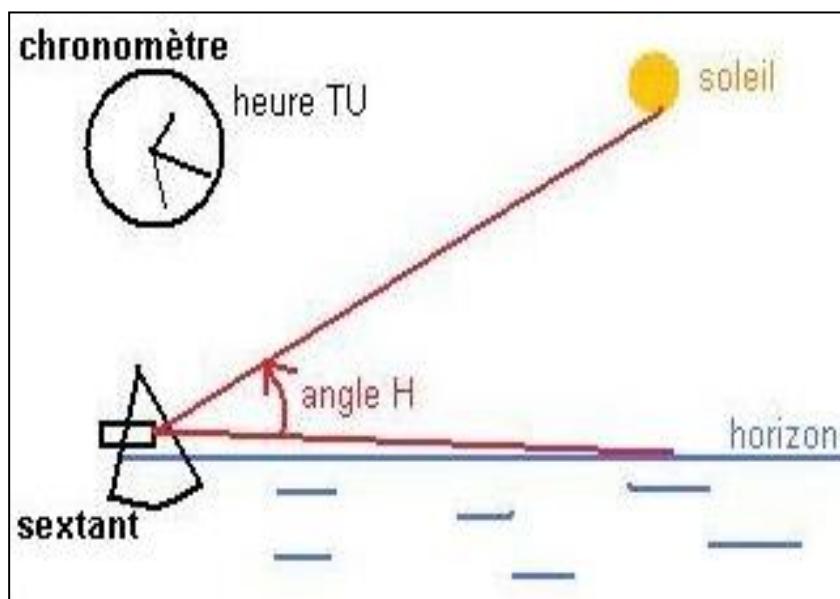
Le sextant quant à lui, vous indique la **hauteur angulaire** de l'astre au-dessus de l'horizon. Il s'agit de la hauteur donnée par l'instrument, appelée "Hauteur Instrumentale" Hi. La Hauteur Vraie Hv sera obtenue après correction de Hi.

2.3. Le principe de la navigation Astronomique.

2.3.1. La visée :

Tout commence par une observation au cours de laquelle on mesure avec précision 2 paramètres :

- 1 - l'angle H entre l'horizon et l'astre ;
- 2 - l'heure TU de cette mesure.



La visée

(www.astronomie.skyrock.com)

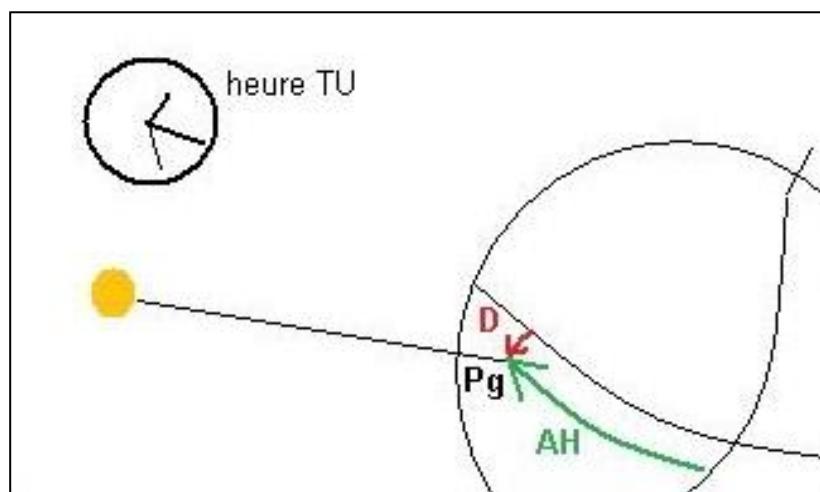
2.3.2. Les calculs:

A partir des informations données dans les Ephémérides, on calcule la position précise de l'astre à l'heure TU de l'observation.

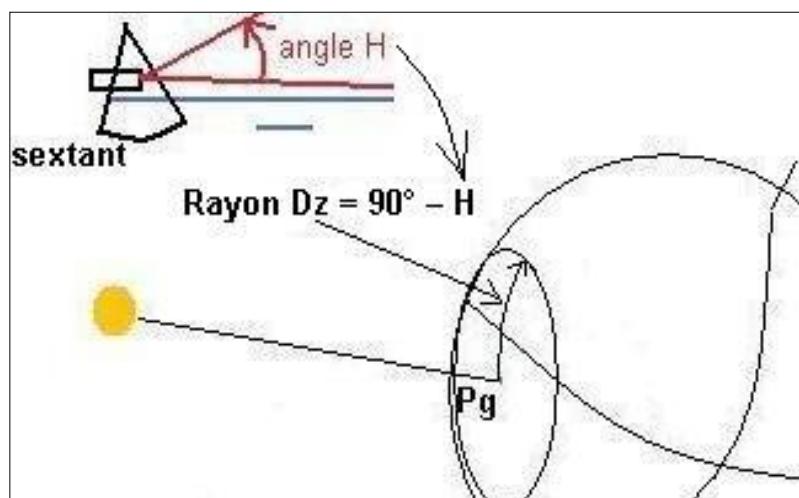
Cette position est aussi celle de Pg, point de la Terre situé exactement à la verticale de l'astre.

La position de Pg est ainsi connue :

- en latitude (appelée Déclinaison D)
- et en longitude (appelée Angle Horaire AH).



La valeur de l'angle H mesuré au sextant permet de déterminer exactement la distance Dz qui sépare l'observateur du point Pg (1 minute d'angle = 1 mille marin) $Dz = 90^\circ - H$



On sait désormais que l'on se trouve sur un cercle dont le centre est Pg et le rayon Dz.

Pour pouvoir tracer avec suffisamment de précision et sur une carte marine de dimensions "normales", il a fallu inventer une méthode spéciale. C'est la méthode de la « Droite de hauteur » par la position estimée (ou point de calcul) :

On choisit sur la carte, dans la zone dans laquelle on sait être, un point de calcul : Pc.

On calcule la distance exacte à vol d'oiseau entre Pc et Pg (orthodromie entre Pc et Pg)

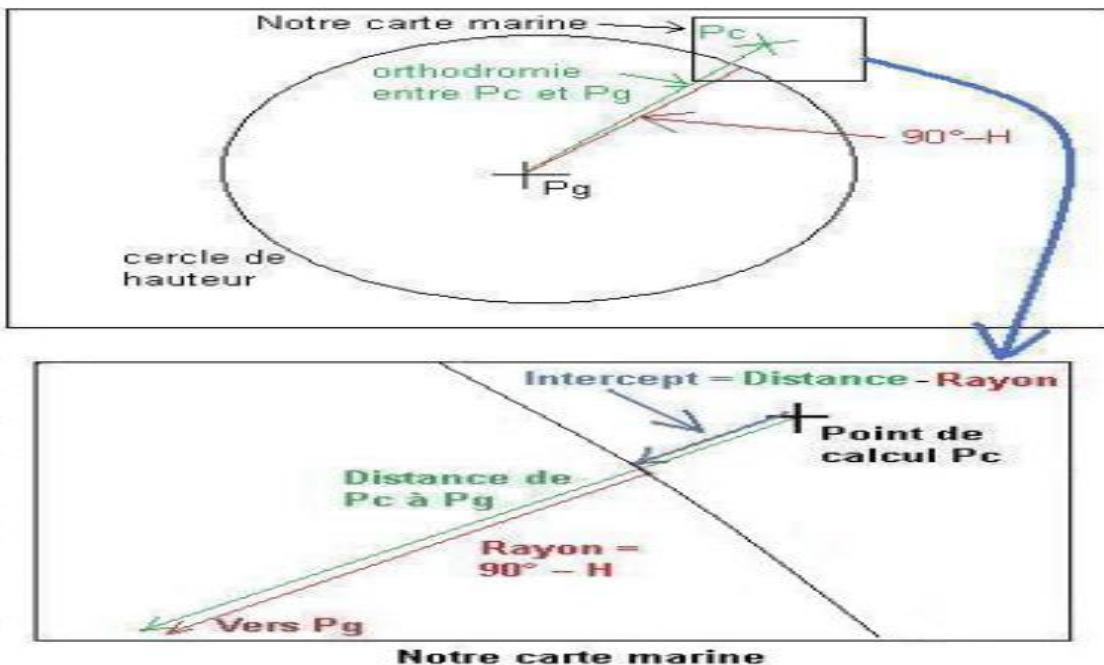
On s'aperçoit qu'il y a une petite différence entre la distance mesurée Dz (obtenue à partir de la hauteur H) et la distance calculée.

C'est évidemment parce que notre point Pc n'est pas exactement sur le cercle (puisque'il a été choisi "à l'estime").

La différence entre Dz et la distance calculée est l'**intercept** $I = Hv - Hc$ (hauteur vraie - hauteur calculée)

Pour obtenir la Hauteur calculée ou estimée on utilise la formule suivante :

$$He = \arcsin[\sin(L) \cdot \sin(D) + \cos(L) \cdot \cos(D) \cdot \cos(AHL)]$$



Carte marine (www.astronomie.skyrock.com)

2.3.3. Le tracé :

Pour obtenir la position, il faut faire un tracé sur la carte de la zone où on navigue :

- A partir du point de calcul P_c , on trace l'**azimut** calculé (direction de l'astre visé)
- Sur cet azimut, on porte l'intercept

$$Z = \text{arcTg} \left(\frac{\sin(\text{AHL})}{(\cos(L) \cdot \text{tg}(D)) - (\sin(L) \cdot \cos(\text{AHL}))} \right)$$

Où : L=Latitude

D=Déclinaison

AHL= Angle Horaire Local

- Par le nouveau point ainsi obtenu, on trace la perpendiculaire à l'azimut.

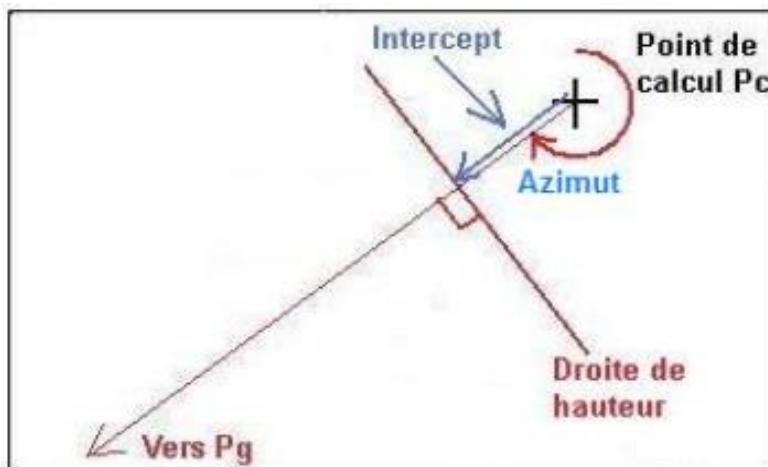
C'est la **Droite de Hauteur**.

En réalité, cette "droite" devrait être une courbe, puisque c'est une portion du cercle.

Mais le cercle est si grand, et cette portion si petite, que l'approximation est sans importance pratique.

On est "quelque part" sur cette droite.

Pour préciser la position, il faut recouper cette droite par une deuxième droite, issue d'une deuxième observation



Le tracé (www.astronomie.skyrock.com)

3. Détection des stocks (bancs migrateurs) par satellite.

3.1. Introduction.

Autrefois, le succès d'une campagne de pêche dépendait beaucoup de la vue, de l'odorat et de l'ouïe du pêcheur. Ainsi, le pêcheur choisissait-il souvent une position en hauteur avantageuse comme le mât de vigie, afin de repérer le poisson. Aujourd'hui, l'aviation moderne et les satellites ont porté les possibilités d'observation de l'homme à un niveau inimaginable pour les générations antérieures; en même temps, on a mis au point des appareils qui ont étendu les perceptions de l'homme bien au-delà des limites de ses sens. La combinaison de ces technologies a donné naissance à une science moderne connue sous le nom de télédétection, qui peut être définie comme l'acquisition d'informations sur un objet ou un évènement sans contact physique avec celui-ci. Nous commençons seulement à découvrir certains des moyens par lesquels la télédétection peut être appliquée à la recherche séculaire de l'homme pour récolter la nourriture que la mer lui offre.

3.2. La pêche par détection.

Le pêcheur dispose des instruments électroniques et mécaniques (appareil, jumelles) et le plus important c'est les connaissance informatique et maîtrise l'électronique (utilisation des appareils) et océanographique et environnemental (concentration de matière dissoute et en suspension, variations dans les niveaux de production primaire, distribution des isothermes de surface, emplacement de limites frontales, zones d'upwelling, structures des courants et de la circulation des eaux. Les paramètres dégageant des renseignements sur ces facteurs de milieu permettent de prévoir la répartition des poissons ou plus généralement de définir les habitats des poissons marins. Il est souvent plus facile d'identifier ces habitats que la présence de poissons).

L'utilisation de satellite, permet aux pêcheurs d'élaborer une stratégie à une échelle prise «la zone de pêche »:

-Il s'intéresse au banc de poisson et leurs caractères« espèce, quantité, distribution, lieu, temps localisation.....».

-Il est équipé d'un système d'informatique qui permet de savoir toute caractéristique et dimensions des bancs de poissons « largeur, longueur, volume, surface du banc de poisson et leur distance par rapport au bateau » .

-Il facilite la capture de l'espèce cherchée.

On mesure donc tout l'intérêt des pêcheurs par la disposition des images satellitaires, ces derniers élaborent une stratégie à une échelle beaucoup plus large, grâce au traitement des données informatiques associés avec leurs savoir-faire.

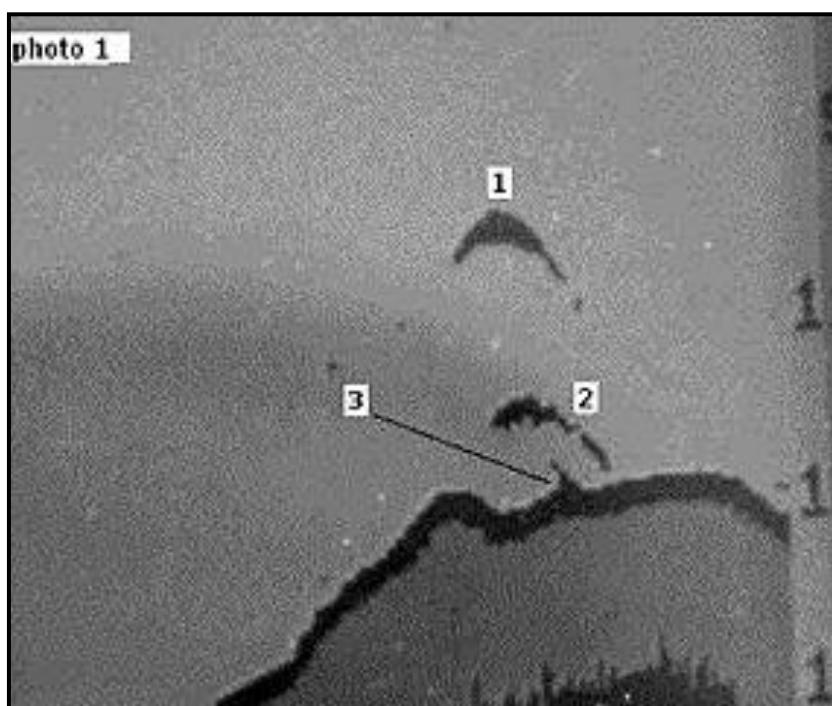


Photo 1 : L'écho du poisson

1. Forme d'un arc presque parfait à celui du poisson, 2. Le poisson est tronqué, sans doute est-il plus en périphérie du cône, 3. Correspond probablement à un troisième poisson se confondant avec le fond, ou à un obstacle.

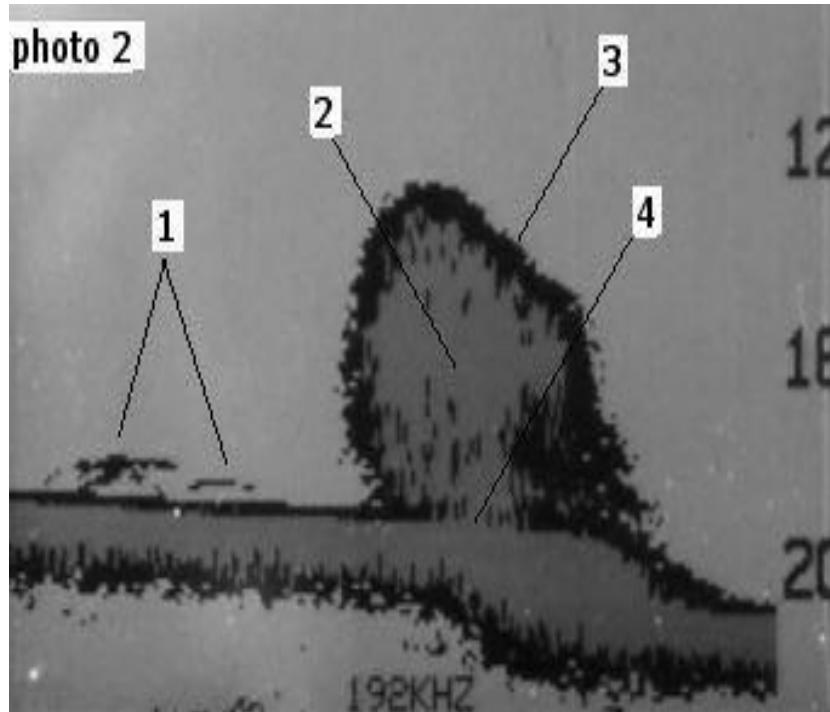


Photo 2 : Ici on voit deux autres types d'échos de poissons :

1. La ligne quasi horizontale due à un déplacement trop lent de la barque,
2. Banc de poisson, 3. Le banc se distingue généralement d'un obstacle en dur par sa forme arrondie, son pourtour effiloché, 4. Base parfois distincte de l'écho de fond.

3.2.1. Les avantages de la pêche par détection :

L'ensemble des connaissances des techniques de pêches (métrise scientifique et celle du matériel) offre des images déterminants:

-La structure et la forme du banc du poisson : La taille des bancs ; la densité des bancs ; sa présence dans un lieu définit à un temps précis ; fonctions antiprédatrices des bancs de poissons.

-Grâce au poste informatique de la cabine de pilotage, qui est équipé d'un logiciel, les pêcheurs reçoivent une série d'images « primaires » et « secondaires », résultant l'état de l'eau, l'état du bancs de poissons , la route du bateau et la localisation des coups de senne...

- Cette technologie aide le patron à repérer les « grandes tendances » de sa zone de navigation.
- Les indications du sondeur permettent de maintenir le filet entre la surface et le fond et de le positionner face à un banc de poissons grâce au sonar.
- Le sondeur sert à connaitre la hauteur d'eau sous le bateau, la qualité des fonds et éventuellement à détecter les bancs de poissons.
- Permet de connaitre la distance du chalut du fond et de la surface et ajuster le niveau du chalut par rapport à celui du banc de poissons.
- Le pêcheur peut également agir sur la vitesse du navire dans le même but.

3.2.2. Les applications de détection :

Dès observations obtenues par détection sur la surface des océans peuvent apporter une bonne part des renseignements nécessaires pour évaluer et améliorer la production potentielle des fonds de pêche. Aujourd'hui, on l'emploie pour la gestion, la conservation et l'exploitation de ces ressources.

Dans la détection des bancs de poissons migrateurs dont on utilise des techniques pour la localisation, la quantité, l'engin de pêche utilisé, les pêcheurs ont la capacité de maîtriser ces techniques grâce aux différents applications peuvent être utilisées directement, indirectement ou comme une aide générale dans la détection et l'évaluation des ressources halieutiques.

3.2.2.1. Méthodes directes de détection des poissons.

La plus directe et la plus simple dans le domaine de la pêche est le repérage visuel du poisson. Les flottilles qui exploitent la grande pêche comme le thon dépendent du repérage visuel du poisson à partir d'avion pour se diriger. Elle s'appuie sur la photographie aérienne, présente l'emplacement de bancs mobiles de poissons, (ne peut pas être communiqué assez rapidement aux pêcheurs).

3.2.2.2. Méthodes indirectes de détection des poissons:

La mesure des paramètres influant sur la répartition et l'abondance de poissons aide à évaluer une ressource halieutique. La recherche sur les effets environnementaux liés à la pêche consiste, en grande partie, à mettre en corrélation un paramètre unique avec la répartition spatiale et temporelle des poissons. Il est très probable, cependant, que le poisson soit sensible à l'ensemble des facteurs du milieu. Aussi, est-il nécessaire de corrélérer un grand nombre de paramètres, obtenus par télédétection, avec la répartition du poisson.

Les paramètres environnementaux le plus couramment mesurés par les capteurs aériens et spatiaux sont les suivants: propriétés optiques ou bio-optiques de surface (le coefficient d'atténuation diffuse, la matière totale en suspension, les pigments de chlorophylle et les macrophytes sont couramment regroupés sous le terme général de couleur d'océan); température de surface, caractéristiques de circulation verticale et horizontale; salinité, pollution du pétrole et état de la mer. Ces connaissances nous fournissent :

-La mesure des paramètres influant sur la répartition et l'abondance de poissons aide à évaluer une ressource halieutique.

-Mettre en corrélation soit un ou plusieurs paramètres avec la répartition spatio-temporelle et verticale des poissons.

-le poisson est sensible à l'ensemble des facteurs du milieu. Il est nécessaire de corrélérer un grand nombre de paramètres environnementaux obtenus par télédétection, avec la répartition du poisson.

3.3. Une espèce, une signature :

L'utilisation des satellites en pêche nous donne des informations précises et exactes, par des formes et des couleurs spécifiques pour une localisation précise de chaque bancs de poisson soit directement ou indirectement (chaque être vivant ou profondeur, paramètre d'eau, relief ...). L'avantage de cette méthode est que l'ensemble des paramètres est maîtrisé, observée par des satellites spécifiques. Il est alors possible

de donner une "signature" acoustique spécifique à chaque espèce. Ces résultats ne sont encore utilisables que par la recherche, le transfert vers les professionnels n'étant pas réalisable à court terme.

- La fréquence du signal acoustique se situe en général entre 20 et 200 kHz. Sur un navire donné, le signal est à fréquence fixe. Plus celle-ci est basse, plus la portée est grande.

- La détection des poissons de grands fonds exige des fréquences faibles, situées entre 25 et 40 kHz. Les sondeurs classiques sont inopérants au-delà de 800 m de profondeur.

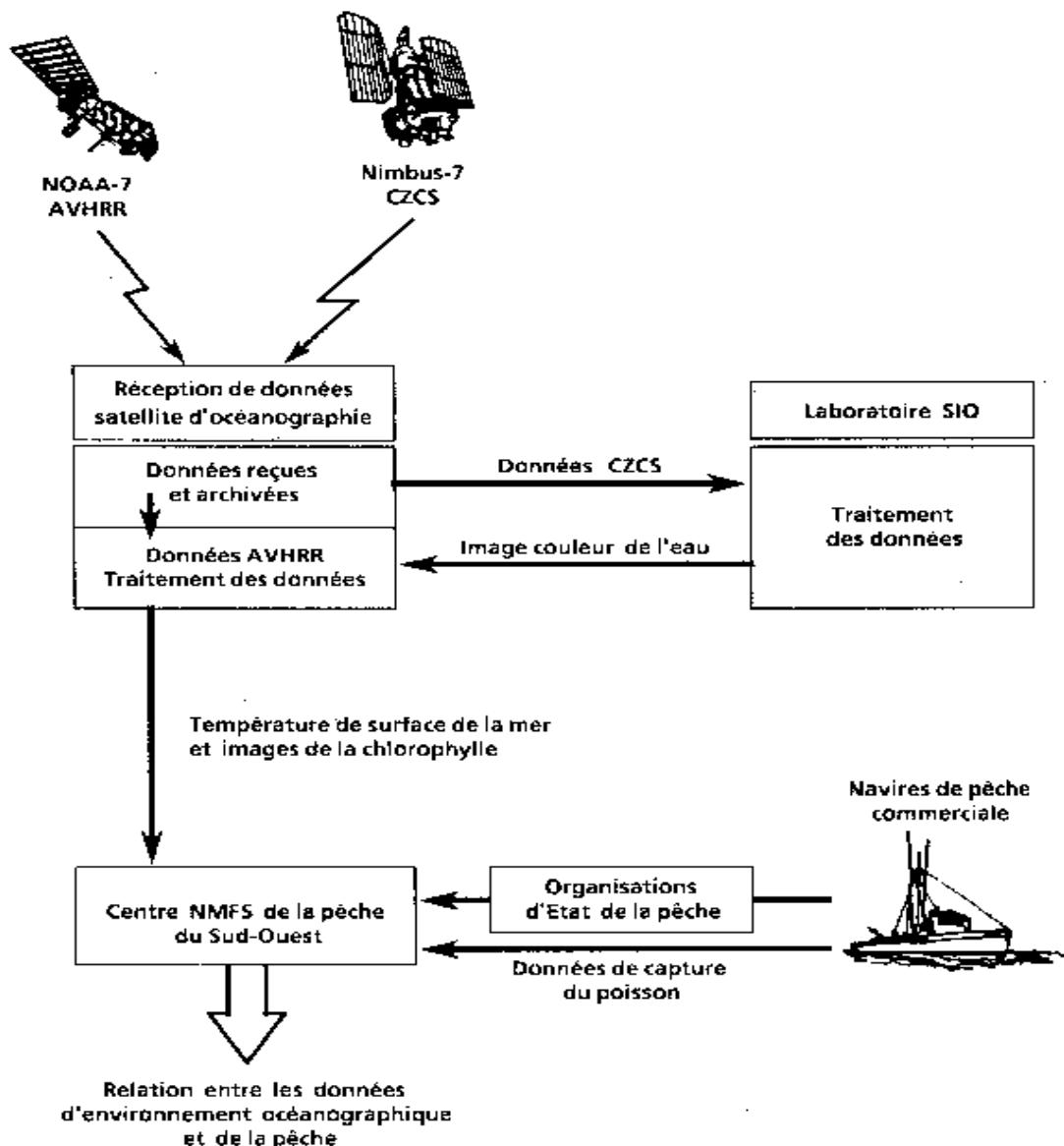
- L'association d'un sondeur et un ordinateur qui est capable de traiter toutes les données recueillies sont utiles aux pêcheurs et de s'intégrer à un réseau informatique de bord.

Le sondeur à multi-faisceaux, toujours en développement, doit dépasser les inconvénients du sondeur classique, dont le faisceau unique est large de 10 à 12°. Il envoie sur le fond 32 faisceaux de 1°, ce qui triple la largeur de détection et offre une résolution plus précise, en réduisant les confusions d'écho.

3.4. Le rôle de la détection en surveillance et évaluation des ressources aquatiques :

Dans le cadre d'une gestion plus éco systémiques des ressources naturelles et en particulier d'une gestion durable des pêches (« Pêche durable »), ainsi que de la Gestion intégrée des zones côtières, ou pour évaluer ou monitorer la biodiversité, de nombreux pays ont mis en place des systèmes de suivi des populations et remontées de certains poissons migrateurs (saumons, anguilles notamment). Cela nécessite des pêches électriques, des opérations de *Capture-marquage-recapture*, avec éventuelles poses de puces électroniques ou balises (radiopistage) ou encore via des comptages en passes à poisson (vidéo et comptage par mesure de la résistivité ou par infrarouge quand l'eau n'est pas trop turbide et que les poissons sont peu nombreux), avec évaluation du poids de

l'animal et de la biomasse de migrants par un appareil spécial. Des systèmes acoustiques de type sonar permettant de discriminer les espèces. Il reste difficile de faire des comptages automatiques de populations importantes en remontée ou en migrant ou partant, des photos aériennes permettent aussi une certaine évaluation de la biomasse et du nombre d'individus.



Réseau de collecte et de traitement des données satellitaires, utilisé par le service des pêches maritimes (Butler *et al*, 1992).

3.5. Exemple de la pêche par détection d'une espèce migratrice :

Direction du déplacement de bancs de sardines japonaises à partir de levés aériennes.	
Technique de Télédétection	Télédétection aéroportée. Plate-forme: Cessna U-206 G. Capteur: observation visuelle et caméra aérienne.
Objectif	Déetecter, identifier et surveiller la forme et le mouvement de bancs de sardines, <i>Sardinops Melanosticat</i> , au large de la côte sud-est de Hokkaido, Japon.
Intérêt de l'expérience	Les levés aériens conviennent mieux pour l'observation de bancs de sardines que les mesures par sonar ou les observations sous-marines, parce qu'ils sont plus synoptiques, couvrent une zone géographique plus vaste et facilite la cartographie. ces capteurs pourraient fournir des renseignements importants sur la répartition du germon et guider les pêcheurs vers des zones optimales de pêche.
Méthode	On a déterminé la forme, la couleur et le déplacement des bancs de sardines en observant un couloir d'un km à partir d'un petit avion à une altitude de 500 m. Puis, on a mesuré les bancs à partir de photo- graphies aériennes, et déterminé leur déplacement suivant trois distributeurs de teinture jaune attachés à des dispositifs flottants
Résultats et conclusion	-Les dimensions relatives des bancs de sardines dans la zone observée, indiquant respectivement le rapport de largeur, longueur, étendue verticale. La plus grande dimension, la largeur, correspond généralement au bord de tête d'un banc. Cette expérience a démontré que les méthodes de levé aérien conviennent bien pour l'étude du comportement des bancs de poissons. Il serait souhaitable cependant, d'établir un système coordonné et synchronisé d'observations aériennes et marines. -Le capteur aéroporté pourrait grandement faciliter l'évaluation des ressources en fournissant des observations en "temps réel" sur le nombre et la taille des bancs de poissons.

	<p>-Evaluer l'aire de distribution et le niveau de localisation du secteur côtier de l'industrie halieutique.</p> <p>- Fournir des estimations courantes du nombre d'embarcations de réactions opérationnelles, repérés par type et grande catégorie de pêche: non- mécanisée et mécanisée.</p> <p>-Fournir des renseignements sur le niveau d'activité des bateaux de pêche opérationnels au début de la campagne de pêche. Enregistrer par l'écho- sondeur peut être considérée comme une proportionnelle à la taille du banc de poissons. Le facteur de conversation proportionnel a été calculé à partir d'expériences de contrôle. On peut également déterminer le caractère du fond de la mer par un enregistrement de l'écho-sondeur.</p>
--	--

1. Les principes de la télédétection

1.1. Définition de la télédétection.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, « d'observer » et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci.

Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc.

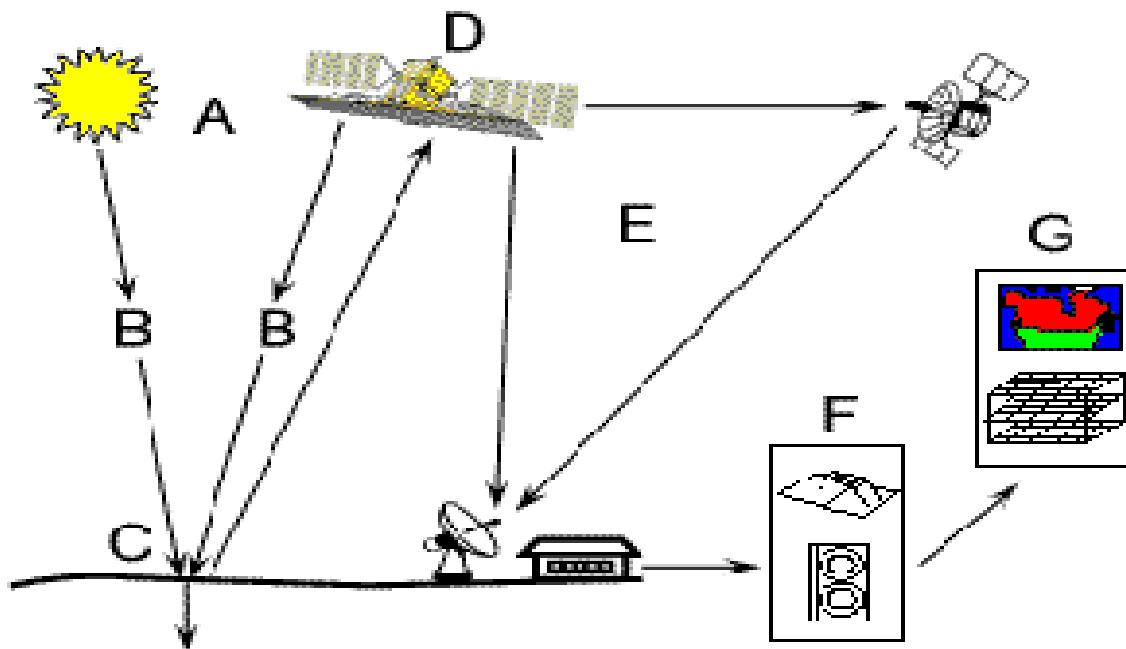
1.2. Principe de la télédétection des surfaces naturelles.

Des capteurs (radar, lidar, sonar..) embarqués sur des plates-formes (vecteurs) satellitaires, aéroportées, ballons ou au sol permettent de mesurer le rayonnement en provenance des surfaces concernées.

Ce rayonnement est soit réfléchi directement par ces surfaces soit émis. Les données de télédétection sont le plus souvent en forme d'images.

1.3. Différentes étapes de la télédétection des surfaces naturelles.

Dans la télédétection des surfaces naturelles, il faut passer par plusieurs étapes pour comprendre la cible et résoudre un problème particulier : il faut s'intéresser aux interactions du rayonnement avec l'atmosphère et la cible, ensuite une fois que l'énergie diffusée ou émise par la cible est enregistrée par le capteur, il faut la transmettre, aux stations de réception où l'information sera transformée en images (numériques ou photographiques) pour être interprétée et analysée afin de l'utilisée pour étudier ou résoudre un problème particulier concernant la cible.



Differentes étapes de la télédétection

(ccrs/cct, 2015)

a. 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.

b. 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.

c. 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.

d. 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.

e. 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).

f. 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.

g. 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.

1.4. Quelques applications.

1.4.1. Echelle régionale.

a. Agriculture :

Rendements des cultures, réponses de la végétation à certaines contraintes environnementales, activité photosynthétique,

b. Foresterie :

Cartographie forestière, estimation de certaines caractéristiques des peuplements forestiers, déforestation et état sanitaire, ...

c. Hydrologie :

Spatialisation de l'intensité des pluies sur un BV (échos radar), couverture végétale, ...

d. Occupation du sol/zones humides/Topographie :

Cartographie de l'occupation du sol, répartition des espèces, établissement des modèles numériques de terrain (cartes topographiques) à l'aide de la stéréoscopie satellitaire, ...

1.4.2. Echelle globale.

a. Météorologie et climat :

Suivi de l'évolution spatio-temporelle de la couverture nuageuse, ..

b. Océanographie, ressources marines :

Dynamique et caractéristiques des mers et océans, phytomasse,..

c. Changements globaux :

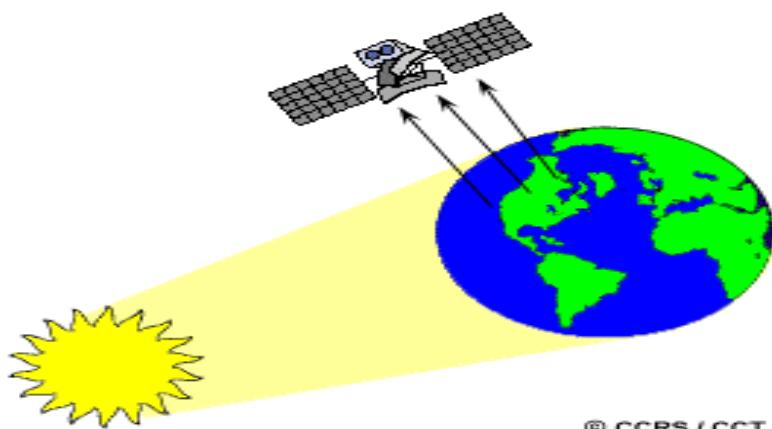
Structure et productivité primaire des biomes terrestres, échanges énergétiques...

1.5. Télédétection passive et active.

1.5.1. Télédétection passive :

L'énergie du Soleil est soit réfléchie (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 réfléchie lorsque le Soleil illumine la Terre et en absence de nuages. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchie le soir. Tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.

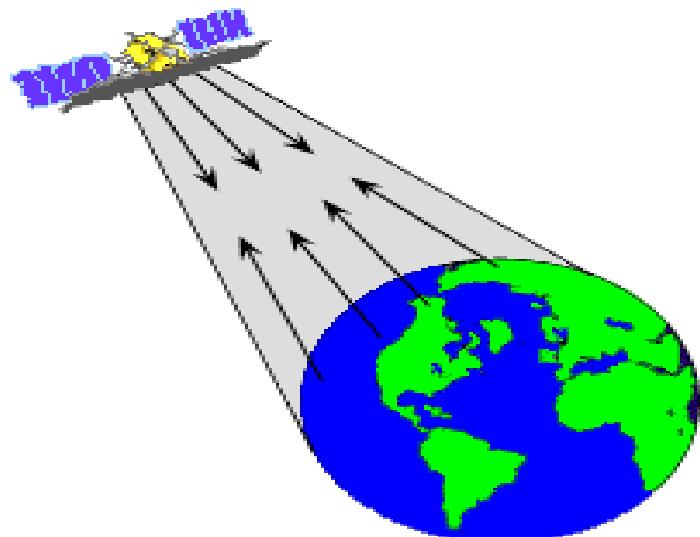


Télédétection passive (ccrs/cct, 2015).

1.5.2. Télédétection active :

Un capteur actif produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est 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. Par contre, les capteurs actifs doivent produire une énorme quantité d'énergie pour bien illuminer une cible. Le laser fluoromètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.



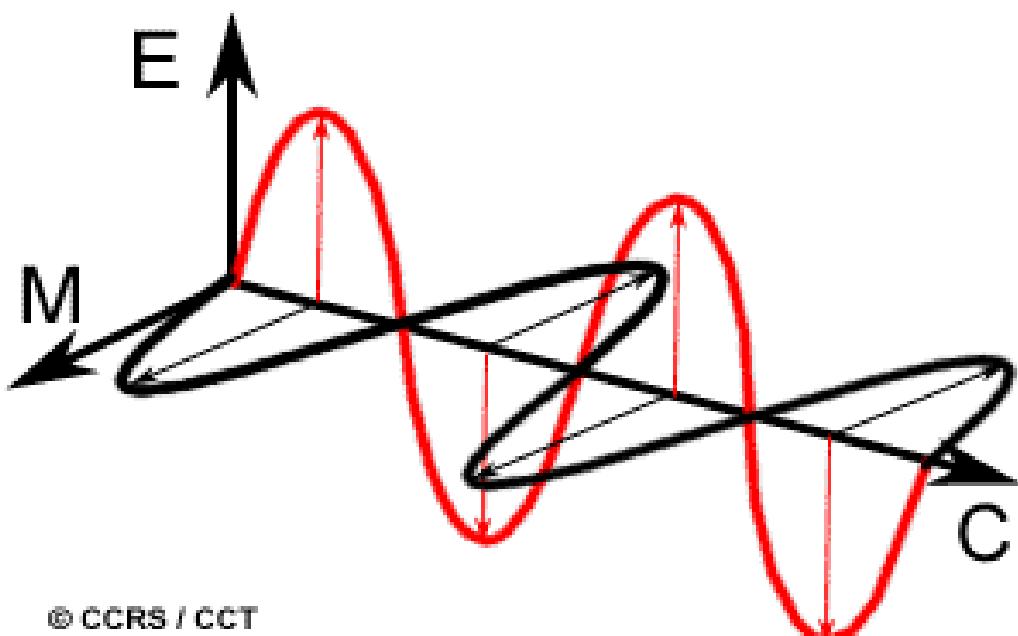
Télédétection active (ccrs/cct, 2015).

2. Le rayonnement électromagnétique et le spectre électromagnétique.

2.1. Définition du rayonnement électromagnétique.

Ensemble de radiations de natures similaires mais dont les longueurs d'ondes sont différentes. Les rayonnements électromagnétiques sont plus communément appelés « lumières », que celles-ci soient visibles par l'homme (lumière blanche) ou non (Ultraviolet, Infrarouge, rayon, etc.)

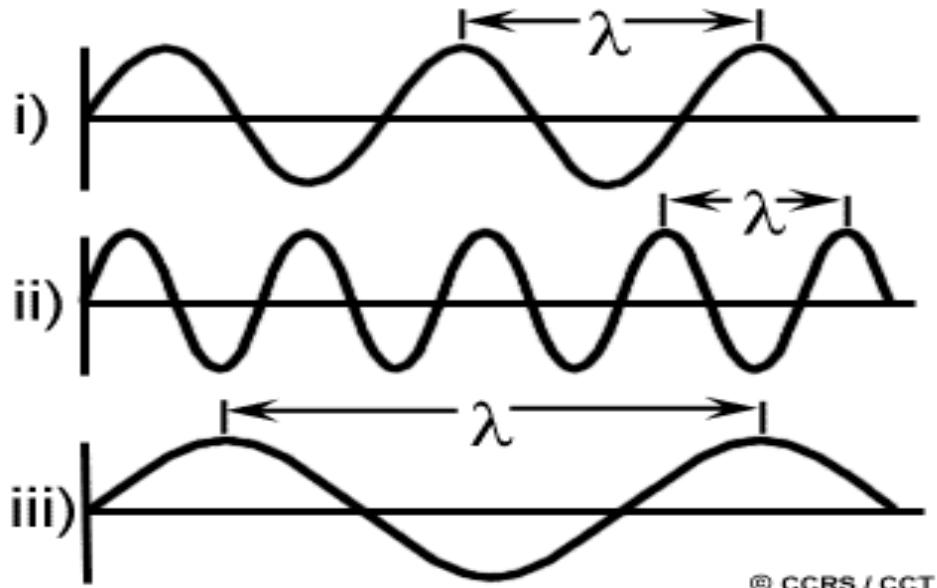
Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre (figure ci-dessous), se déplacent à la vitesse de la lumière (c) qui est égale à 3.10^8 m.s $^{-1}$.



Nature et propagation d'une onde électromagnétique

(ccrs/cct, 2015).

Pour comprendre la télédétection, il est indispensable de saisir les deux composantes du rayonnement électromagnétique que sont la longueur d'onde et la fréquence.



Représentation de la longueur et de la fréquence des ondes

(ccrs/cct, 2015).

a. La longueur d'onde (λ) lambda:

C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes :

Où :

Le nanomètre $\Rightarrow 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ mètre.}$

Le micromètre $\Rightarrow 1 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mètre}$

Le centimètre $\Rightarrow 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ mètre.}$

b. La fréquence (v) Gamma :

Inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz), un Hz équivaut à une oscillation par seconde - ou en multiples de Hertz, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des fréquences très élevées:

Où :

Le kilohertz $\Rightarrow 1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$.

Le mégahertz $\Rightarrow 1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$.

Le gigahertz $\Rightarrow 1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$.

Longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la relation suivante:

$$\lambda = c / v$$

Où :

λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique

c : vitesse de la lumière (3.10^8 m.s^{-1})

v : la fréquence de l'onde

Par conséquent, plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et réciproquement.

Remarque :

La période (T) : Elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle ou une oscillation: $T = 1/v$. L'unité est la seconde.

Un hertz (Hz) : Est équivalent à un évènement par seconde (s^{-1} ou $1/\text{s}$).

Application :

Le premier élément nécessaire à la télédétection est une source d'énergie pour illuminer une cible.

Question :

1. Quelle est d'après vous la source d'énergie électromagnétique la plus abondante à laquelle nous ayons accès ?
2. Quel est le dispositif de télédétection que nous utilisons pour percevoir cette énergie ?
3. Si la vitesse de la lumière est de 3×10^8 m/s, calculez la longueur d'onde d'un rayonnement qui possède une fréquence de 500 000 Ghz (Ghz = gigahertz = 10^9 Hz). Exprimez votre réponse en micromètre (μm).

Réponses :

1. Le Soleil est la source d'énergie électromagnétique la plus abondante, et est utilisé comme source d'énergie initiale principale en télédétection.
2. Nos yeux sont les dispositifs de télédétection que nous utilisons pour capter le rayonnement du Soleil. Ils peuvent être considérés comme des capteurs de télédétection (et ils sont très bons) car ils captent la lumière visible du Soleil, ce qui nous permet de voir.
- 3.

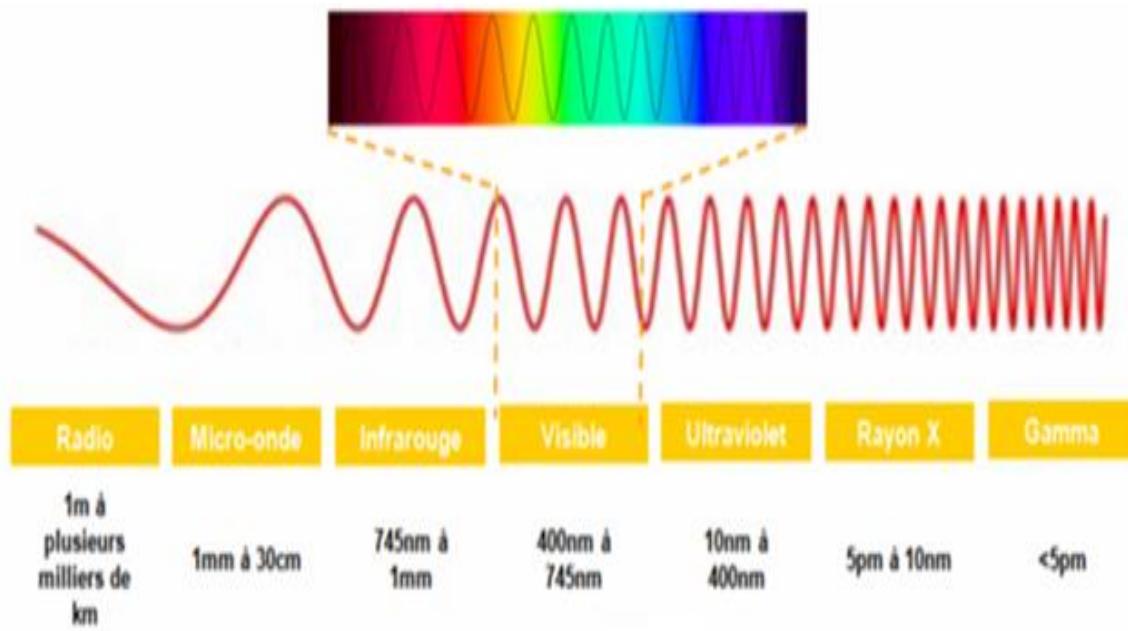
$$\lambda = \frac{3.10^8}{5.10^{14}} = 0,6.10^{-6} \text{ m soit } 0,6 \mu\text{m (LUMIERE ROUGE)}$$

En utilisant l'équation qui démontre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence, nous pouvons calculer la longueur d'onde du rayonnement qui possède une fréquence de 500 000 Ghz.

2.2. Le spectre électromagnétique.

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.



Le spectre électromagnétique

(www.e-cours.univ-paris1.fr).

En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :

- Les rayons gamma (γ):** Ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes.
- Les rayons X:** Rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien).

- c) **Les ultraviolets:** Rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules.
- d) **Le domaine visible:** Correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum (0,5 μm) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge.
- e) **L'infrarouge:** Rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu. En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages.
- f) **Les ondes radar ou hyperfréquences:** Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre comme pour la télédétection dans l'infrarouge thermique et radar.
- g) **Les ondes radio:** Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre.

2.2.1. Trois fenêtres spectrales principalement utilisées en télédétection spatiale:

- a) Le domaine du visible.
- b) Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique).
- c) Le domaine des micro-ondes ou hyperfréquences.

a. Le domaine du visible.

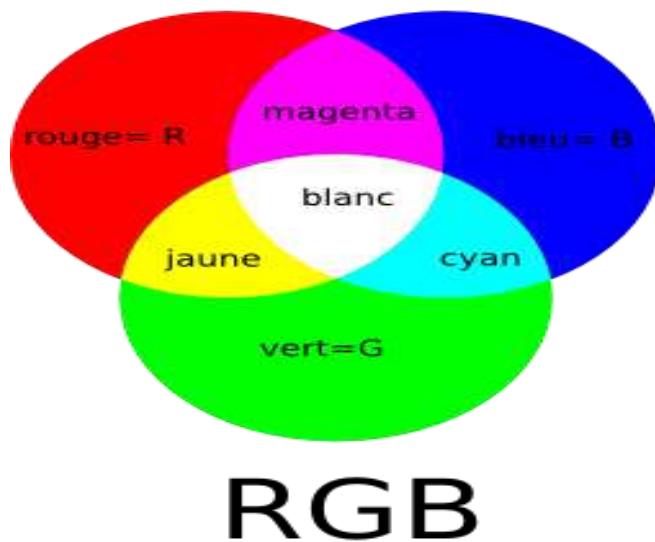
La lumière que nos yeux (nos tout premiers "capteurs de télédétection") peuvent déceler se trouve dans ce qui s'appelle le "spectre visible", qui représente une bien petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'œil nu, mais il peut cependant être capté par d'autres dispositifs de télédétection. Les longueurs d'onde visibles s'étendent de 0,4 à 0,7 μm .

La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte. Les longueurs d'onde du spectre visible que nous percevons comme des couleurs communes sont énumérées ci-dessous. Il est important de noter que c'est la seule portion du spectre que nous pouvons associer à la notion de couleurs.



- **Violet** : 0.4 - 0.446 μm
- **Bleu** : 0.446 - 0.500 μm
- **Vert** : 0.500 - 0.578 μm
- **Jaune** : 0.578 - 0.592 μm
- **Orange** : 0.592 - 0.620 μm
- **Rouge** : 0.620 - 0.7 μm

Le bleu, le vert et le rouge sont les couleurs (ou les longueurs d'onde) primaires du spectre visible. Une couleur primaire ne peut être créée par deux autres couleurs, mais toutes les autres couleurs peuvent être créées en combinant les couleurs primaires. Même si nous voyons la lumière du Soleil comme ayant une couleur uniforme ou homogène, en réalité, elle est composée d'une variété de longueurs d'onde dans les parties de l'ultraviolet, du visible, et de l'infrarouge du spectre.



b. Le domaine de l'infrarouge.

L'infrarouge s'étend approximativement de 0,7 à 100 μm , ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. On distingue généralement quatre types d'infrarouges qui vont du proche infrarouge à l'infrarouge lointain, en passant par l'infrarouge moyen et le thermique.

- **Le proche infrarouge.** Le proche infrarouge (0,7 μm à 1,6 μm) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). C'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre.
- **L'infrarouge moyen.** L'infrarouge moyen (1,6 μm à 4 μm) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique.
- **L'infrarouge thermique.** Dans ce domaine spectral (4 μm à 15 μm), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets.
- **L'infrarouge lointain.** L'infrarouge lointain (15 μm à 100 μm) n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles.

c. Le domaine des hyperfréquences.

Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de 1 mm à 1 m. Les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'infrarouge thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio.

3. Interactions avec l'atmosphère.

Introduction :

Avant que le rayonnement utilisé pour la télédétection n'atteigne la surface de la Terre, celui-ci doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère, les particules et les gaz qui peuvent le dévier ou le bloquer. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption.

3.1. La diffusion.

Elle se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale.

Il existe trois types de diffusion :

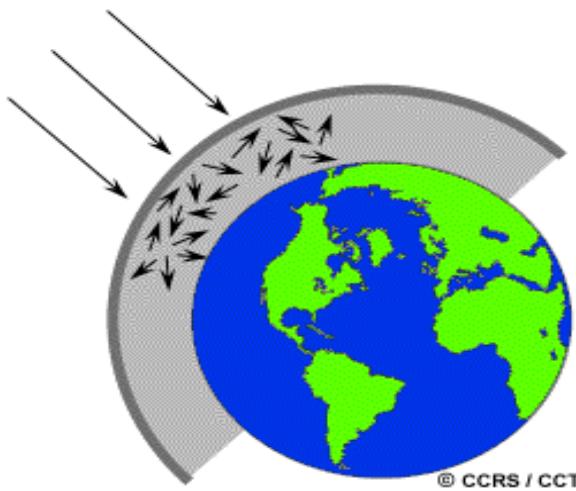
- la diffusion de Rayleigh
- la diffusion de Mie
- la diffusion non-sélective.

3.1.1. La diffusion de Rayleigh:

Elle se produit lorsque la taille des particules est « inférieure » à la longueur d'onde du rayonnement. Celles-ci peuvent être soit des particules de poussière ou des molécules d'azote ou d'oxygène.

La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'onde que les grandes longueurs d'onde.

Ce phénomène explique pourquoi nous percevons un ciel bleu durant la journée. Comme la lumière du Soleil traverse l'atmosphère, les courtes longueurs d'onde (correspondant au bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées.



Diffusion de Rayleigh

(ccrs/cct, 2015)

3.1.2. La diffusion de Mie:

Elle se produit lorsque les particules « sont presque aussi grandes » que la longueur d'onde du rayonnement.

Ce type de diffusion est souvent produit par la poussière, le pollen, la fumée et l'eau. Ce processus domine quand le ciel est ennuagé.



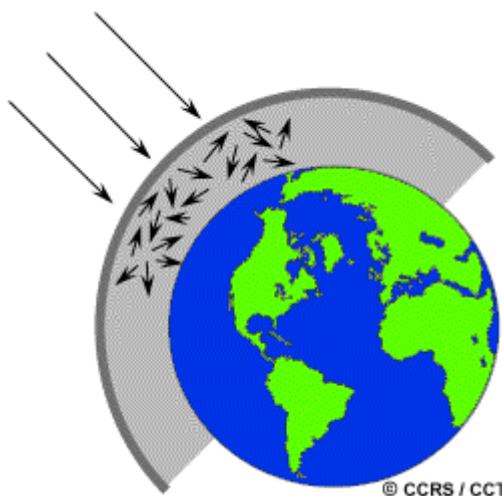
Diffusion de Mie

(ccrs/cct, 2015).

3.2.3. La diffusion non-sélective:

Ce genre de diffusion se produit lorsque les particules (les gouttes d'eau et les grosses particules de poussière) sont « beaucoup plus grosses » que la longueur d'onde du rayonnement. Nous appelons ce genre de diffusion "non-sélective", car toutes les longueurs d'onde sont dispersées.

Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert, et le rouge de façon presque égale, ce qui produit un rayonnement blanc (lumière bleue + verte + rouge = lumière blanche). C'est pourquoi le brouillard et les nuages nous paraissent blancs.



Diffusion non-sélective

(ccrs/cct, 2015).

3.2. L'absorption.

Elle survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, bioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

- L'ozone absorbe les rayons ultraviolets qui sont néfastes aux êtres vivants. Sans cette couche de protection dans l'atmosphère, notre peau brûlerait lorsqu'elle est exposée au Soleil.
- Le bioxyde de carbone est un gaz qui contribue à l'effet de serre. Ce gaz absorbe beaucoup de rayonnement infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.
- La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge et des hyperfréquences qui entrent dans l'atmosphère.

Remarque:

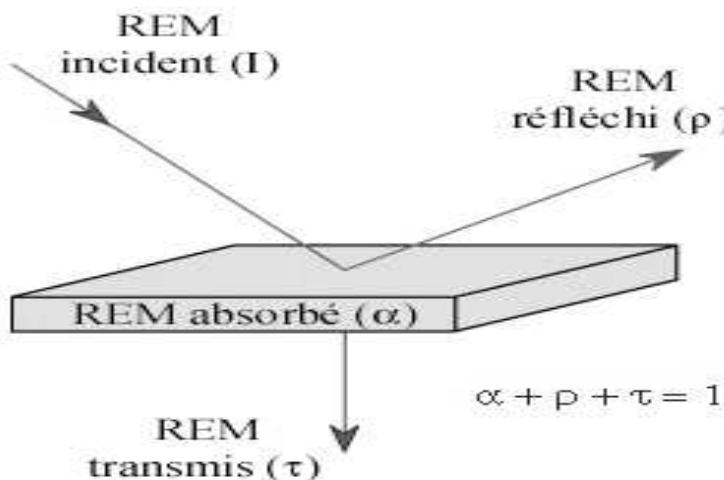
Parce que ces gaz et ces particules absorbent l'énergie électromagnétique dans des régions spécifiques du spectre, ils influencent le choix de longueurs d'onde utilisées en télédétection.

Les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption atmosphérique, et qui sont donc utiles pour la télédétection, sont appelées « les fenêtres atmosphérique ».

4. Interactions rayonnement-cible.

Introduction :

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lors que l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (a) l'énergie, la transmettre (t) ou réfléchir (p) l'énergie incidente.



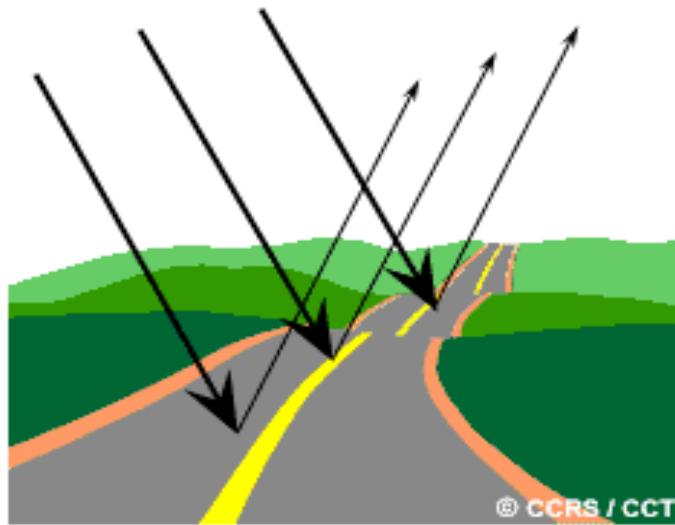
- L'absorption (a) se produit lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par la cible,
- La transmission (t) lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible,
- La réflexion (p) lorsque la cible redirige l'énergie du rayonnement,
- En télédétection, on mesure le rayonnement réfléchi (p) par la cible.

4.1. Modes de réflexion de l'énergie.

La « réflexion spéculaire » et la « réflexion diffuse » représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie.

4.1.1. La réflexion spéculaire :

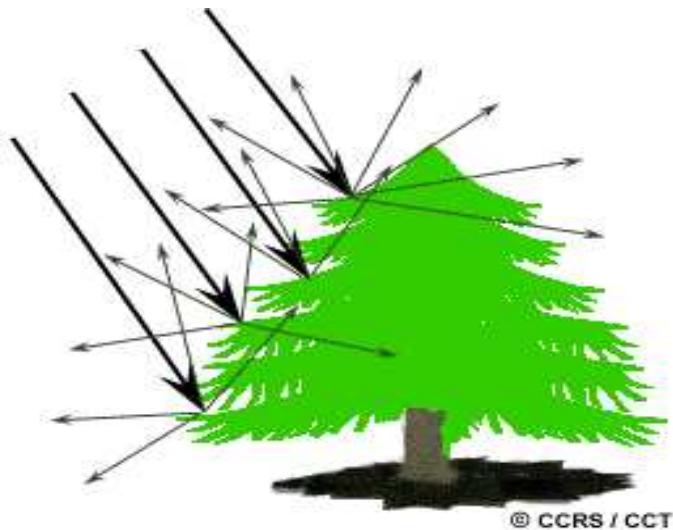
Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction (comme c'est le cas d'un miroir).



Réflexion spéculaire (ccrs/cct, 2015).

4.1.2. La réflexion diffuse :

Elle se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie uniformément dans toutes les directions.



Réflexion diffuse (ccrs/cct, 2015).

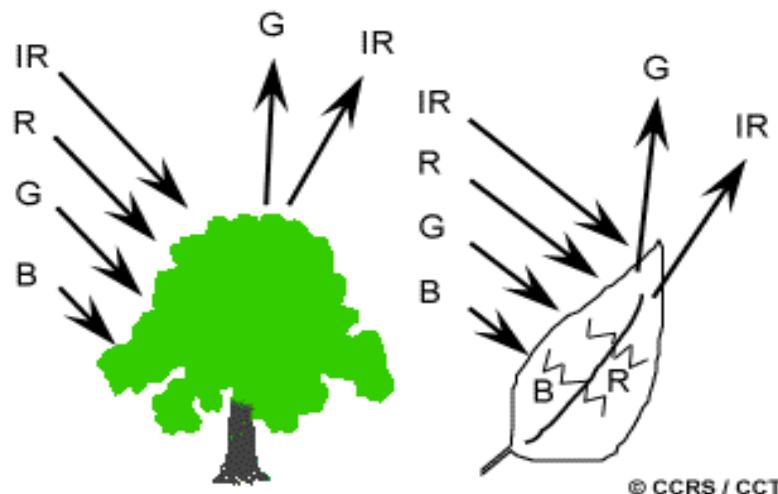
4.2. Propriétés optiques des feuilles, de l'eau, du sable et du sol.

a. Les feuilles:

La chlorophylle, une molécule que nous retrouvons à l'intérieur des feuilles, **absorbe** fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du « rouge » et du « bleu », mais **réfléchit** « le vert ».

Les feuilles, qui contiennent un maximum de chlorophylle en été, sont donc « plus vertes » pendant cette saison car elles **absorbent** « plus de rouge et de bleu » et **réfléchissent** « le vert ».

En automne, les feuilles qui contiennent alors moins de chlorophylle, **absorbent** « moins de rouge », et paraissent donc **rouges ou jaunes**.



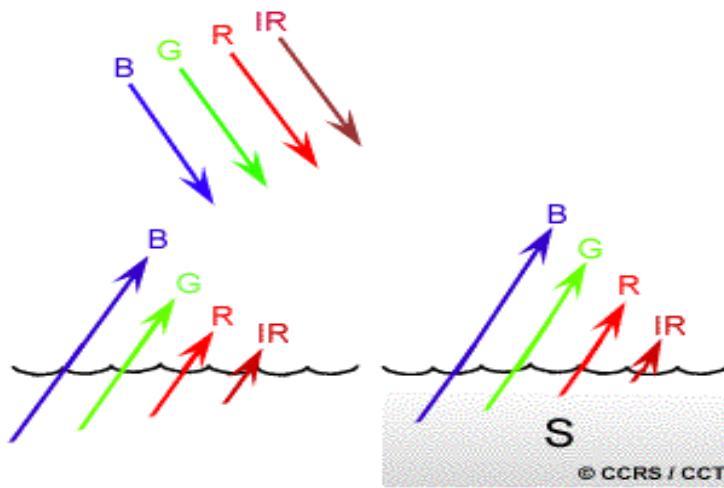
Propriétés optiques des feuilles et de la végétation chlorophyllienne

(ccrs/cct, 2015).

c. L'eau:

L'eau **absorbe** davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible « **le rouge et du proche infrarouge (IR)** ». Ainsi, l'eau paraît généralement **bleue ou bleu-vert** car elle **réfléchit** davantage les petites longueurs d'onde « **bleu et vert** ».

La chlorophylle dans les algues **absorbe** « plus de bleu » et **réfléchit** « plus de vert ». L'eau paraît donc **plus verte** quand elle contient des algues.



Propriétés optiques de l'eau

(ccrs/cct, 2015)

d. Le sable ou sol nu:

Le sable ou un sol nu sont **réfléchissants** pour tous les rayons « bleus, verts, rouges et PIR ». Ils apparaissent très lumineux et donc **blancs** en télédétection.

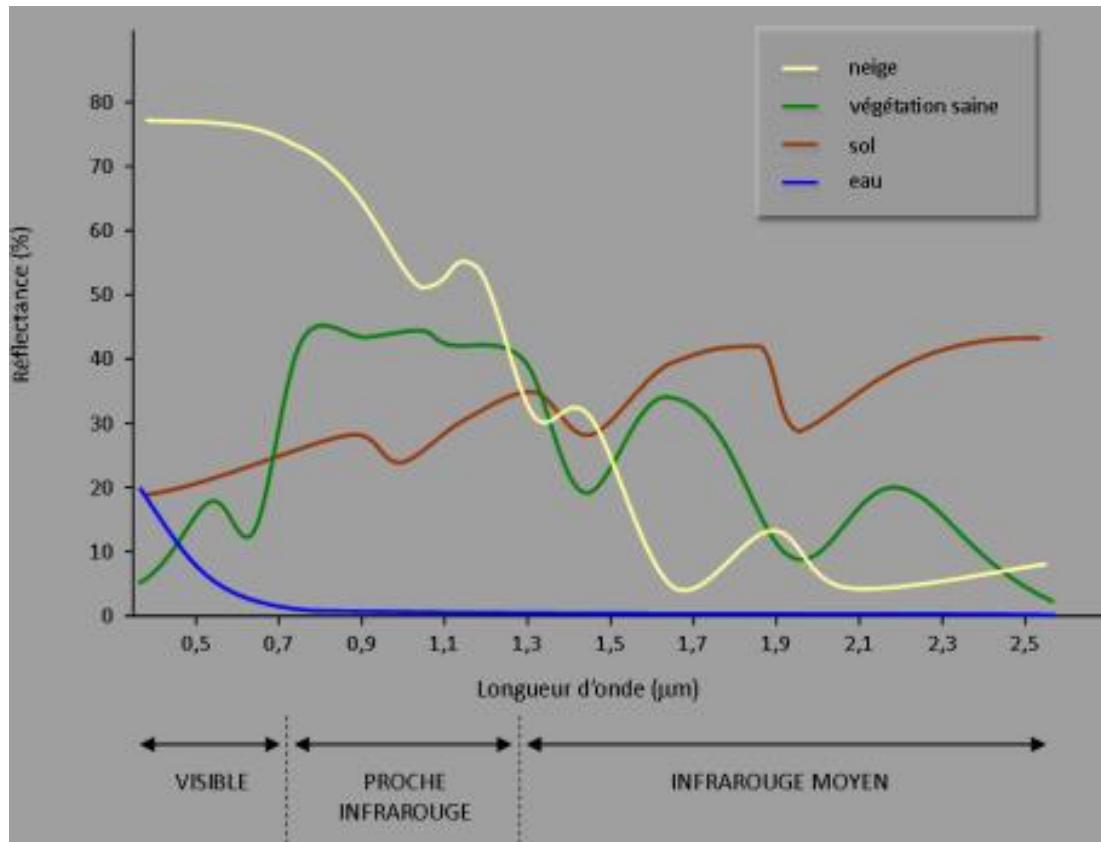
e. Sol humide:

Comme pour l'eau, le sol humide **absorbe** davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible « **le rouge et du proche infrarouge (IR)** ».

Ces exemples démontrent que nous observons des réponses très différentes aux mécanismes d'absorption, de transmission et de réflexion selon la composition de la cible et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre.

4.3. Signatures spectrales.

C'est l'empreinte de chaque cible, c'est-à-dire c'est l'analyse du signal électromagnétique réfléchi ou émis par une surface qui permet de caractériser sa composition.



Signature spectrale

(www.e-cours.univ-paris1.fr).

- En ce qui concerne la signature spectrale des **sols**, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau
- **L'eau** a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue.
- La signature spectrale de la **neige** est très forte dans les courtes longueurs d'onde, mais elle diminue rapidement dans le proche infrarouge, pour atteindre des valeurs très faibles dans l'infrarouge moyen où le rayonnement est absorbé par l'eau.
- La **végétation** a une faible réflectance dans le visible et une réflectance élevée dans le proche infrarouge.

Les capteurs vont donc capter un signal très faible dans les régions du bleu et du rouge, un signal un peu plus important dans le vert et un signal fort dans le proche infrarouge. La

combinaison des deux réflectances (d'une faible réflectance dans le visible et d'une réflectance élevée dans le proche infrarouge) est spécifique à la végétation. C'est pourquoi on parle de « **Signature spectrale** ».

1. Plates-formes et capteurs

1.1. Les plates-formes.

Pour enregistrer adéquatement l'énergie réfléchie ou émise par une surface ou une cible donnée, on doit installer un capteur sur une **plate-forme** distante de la surface ou de la cible observée.

1.1.1. Les plates-formes au sol :

Sont souvent utilisés pour enregistrer des informations détaillées sur la surface. Ces informations sont, par la suite, comparées aux informations recueillies par avion ou à partir d'un satellite. Les capteurs au sol sont souvent placés sur des échelles, des échafaudages, des édifices élevés, des grues, etc.



Plates-formes au sol (Google, 2022).

1.1.2. Les plates-formes aéroportées :

Sont principalement situées sur des **avions** à ailes fixes, quoique des hélicoptères soient parfois utilisés. L'utilisation des avions est fréquente car cela facilite la cueillette de données ou d'images détaillées de la surface de la Terre.



Plates-formes aéroportées (Google, 2022).

1.1.3. Les plates-formes satellitaires :

Situées sur des navettes spatiales ou satellites L'utilisation des satellites est plus fréquents, ils sont en orbite autour de la Terre et permettent une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre.



Plates-formes satellitaires

(Google, 2022)

2.2. Les capteurs.

Il existe 2 grandes familles de capteurs:

2.2.1. Les capteurs passifs :

Enregistrent les rayonnements naturels solaires, tels que les systèmes photographiques, balayeurs ou scanners.

2.2.2. Les capteurs actifs :

Produisent leur propre source d'éclairement, tels que les lidar radar, Echosondeurs et les sonars.

2. Caractéristiques des satellites.

Introduction :

Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre.

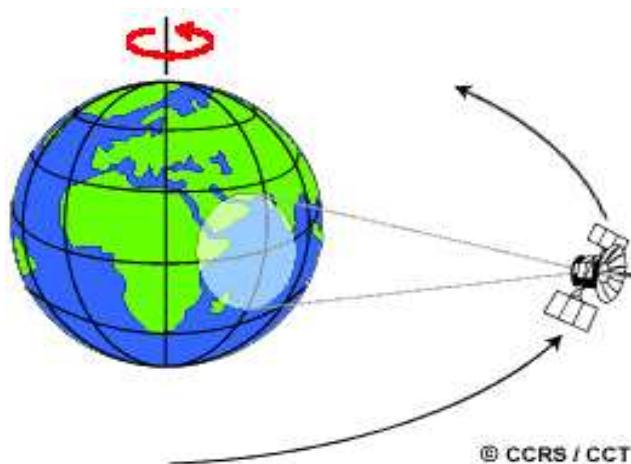
2.1. L'orbite.

La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée « Orbite ». L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission.

On distingue deux sortes d'orbites.

2.1.1. Orbite géostationnaire.

Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36.000 km et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une même région c'est-à-dire, il regarde toujours la même région de la surface de la Terre. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites.



Satellite en orbite géostationnaire

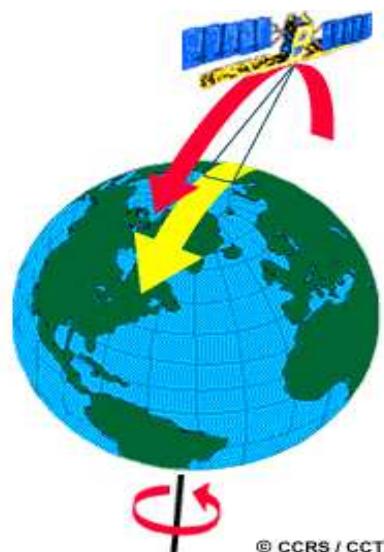
(ccrs/cct, 2015).

2.1.2. Orbite quasi polaire.

Appelé ainsi à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. Avec cette configuration et combinée à la rotation de la Terre (ouest-est), les satellites arrivent à observer presque la totalité de la surface de la Terre.

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**.

Les autres satellites sont des **orbites circulaires** quelconques qui offrent l'avantage de passer à la même altitude au dessus d'un point de la terre mais à des heures différentes. C'est le cas des satellites *ERS-1* et *ERS-2*.

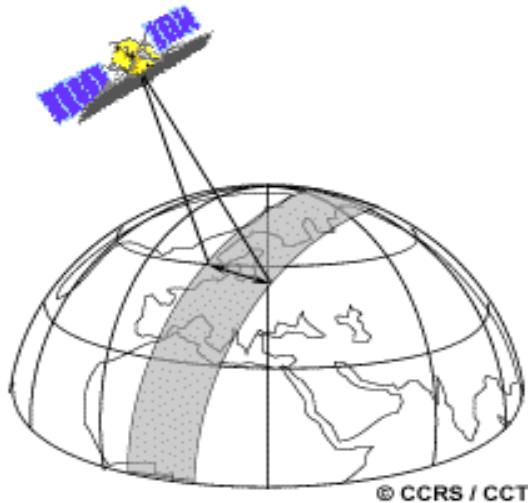


Satellite en orbite quasi polaire

(ccrs/cct, 2015).

2.2. La fauchée.

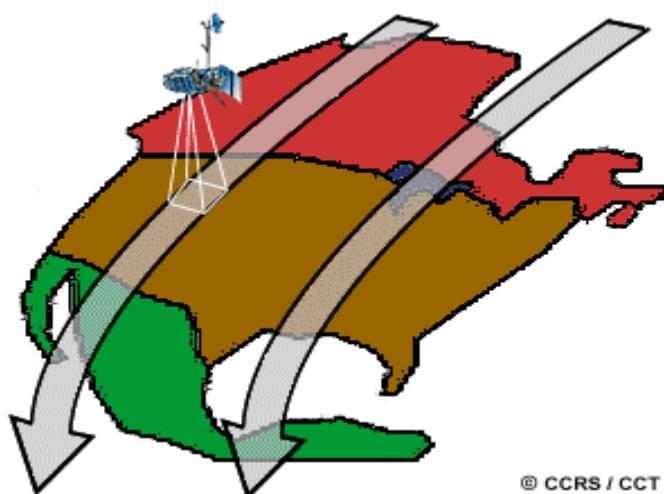
Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de « couloir-couvert ou fauchée ». Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres



La fauchée (ccrs/cct, 2015).

2.3. Les points nadir.

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 ».



Les points nadir (ccrs/cct, 2015)

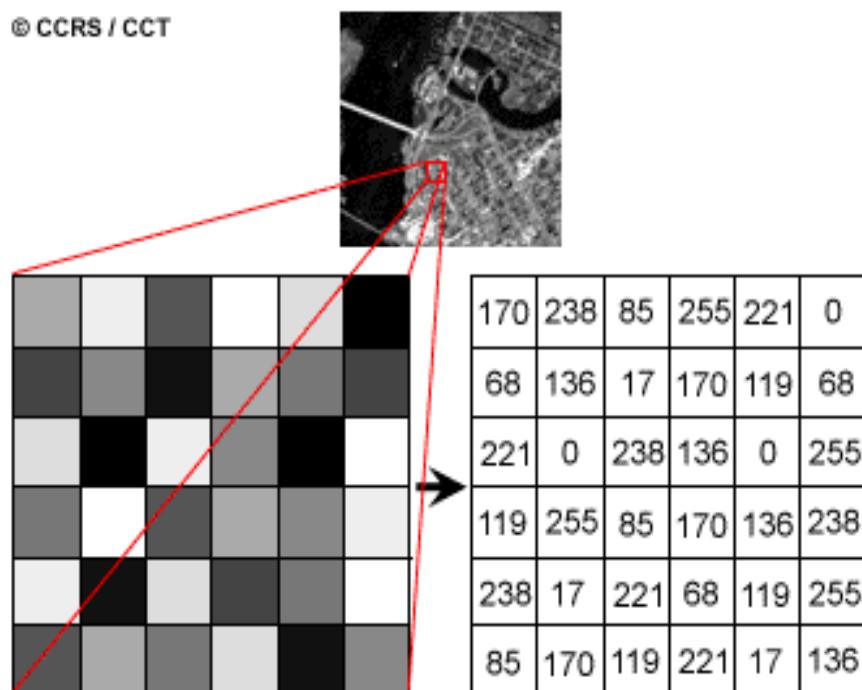
3. Caractéristiques des images.

3.1. Le pixel.

C'est le plus petit élément d'une image. Il est normalement carré et représente une partie de l'image. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie correspondant à 20 m sur 20 m au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques.

Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une **résolution "grossière" ou "basse"**. Les images à **résolution fine ou élevée** permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions.

Les capteurs utilisés par les militaires par exemple, sont conçus pour obtenir le plus de détails possible. Ils ont donc une résolution très fine. Les satellites commerciaux ont une résolution qui varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres.



Les pixels (ccrs/cct, 2015).

3.2. L'échelle.

Le rapport entre la distance que l'on mesure sur une image ou une carte, et la distance correspondante au sol est appelée échelle. Une carte ayant une échelle de 1:100 000 représente un objet au sol de 100.000 cm (1 km) par un objet de 1 cm. Les cartes pour lesquelles le rapport est petit (1:100 000) sont des cartes à petite échelle, tandis que les cartes pour lesquelles ce rapport est plus grand (1:5 000) sont des cartes à grande échelle.

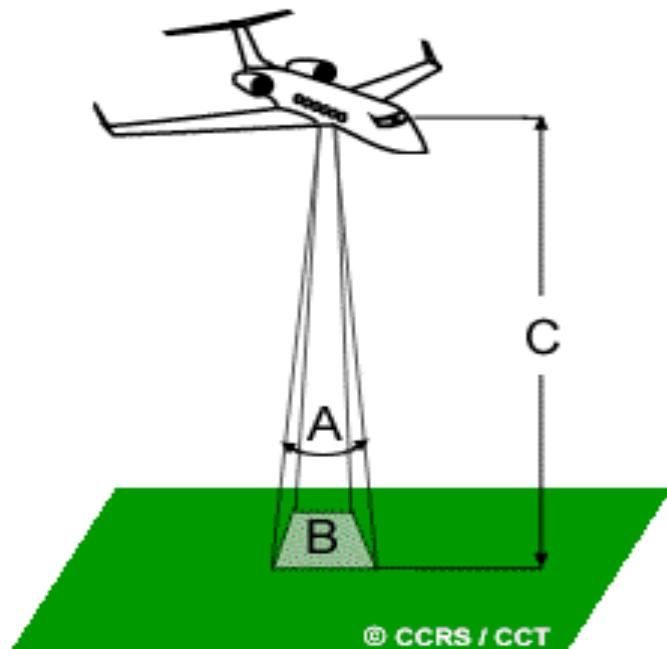
4. Caractéristiques des capteurs.

Introduction :

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plateforme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails.

Par exemple, un astronaute à bord de la navette spatiale lorsqu'il regarde la Terre par rapport à ce que vous pouvez observer à bord d'un avion. L'astronaute pourra voir une province entière d'un seul coup d'œil mais ne pourra pas distinguer les maisons.

Lors d'un vol en avion au-dessus d'une ville, il est possible de voir des édifices et des automobiles, mais la région observée est beaucoup plus petite que celle vue par l'astronaute.



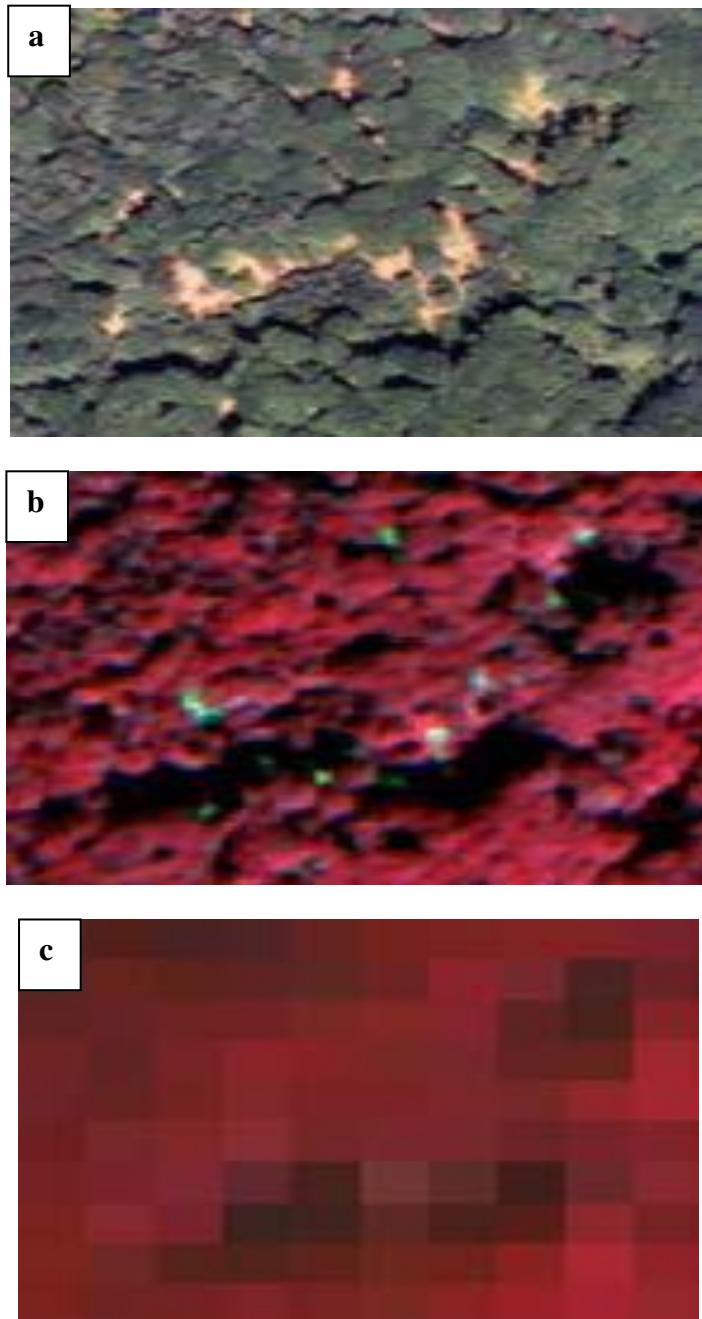
Champ de vision instantanée selon la distance du capteur de la terre

(ccrs/cct, 2015).

Quatre types de résolution caractérisent un capteur de télédétection, au sol ou embarqué

4.1. Résolution spatiale.

C'est la surface minimale d'échantillonnage observée instantanément par le capteur satellitaire c'est-à-dire c'est la mesure de la finesse des détails d'une image et cette surface correspond au « **Pixel** ».



a) Photographie aérienne ; b) Composition colorée à une résolution spatiale fine (élevée) $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ (ARAT Push broom-CNES) ; c) Composition colorée SPOT à une résolution spatiale grossière (basse) de $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ (ccrs/cct, 2015).

4.2. Résolution spectrale.

Elle correspond aux bandes ou intervalles de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles.

L'eau et la végétation, peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez grand (le visible et l'infrarouge par exemple). Alors que les différents types de roche ne sont pas aussi faciles à différencier et nécessitent l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin.

Plusieurs instruments de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde à différentes résolutions spectrales. Ces instruments sont appelés « Capteurs multispectraux ».

Des capteurs multispectraux plus développés, appelés « Capteurs hyperspectraux » sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen.

4.3. Résolution radiométrique :

La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme « Plage dynamique ».

Les données images sont représentées par une valeur numérique variant entre 0 et 2 à une certaine puissance moins un. Cet intervalle correspond à un nombre de bits utilisés pour encoder des valeurs en format binaire. Chaque bit représente un exposant de la base 2 (par exemple, 1 bit = $2^1 = 2$). Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés pour représenter l'intensité enregistrée.

Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8 = 256$ niveaux d'intensité disponibles car il aura 256 valeurs numériques disponibles allant de 0 à 255. Si seulement 4 bits sont utilisés, alors seulement $2^4 = 16$ valeurs allant de 0 à 15 seront disponibles. La résolution radiométrique sera donc plus faible. Les données

enregistrées sont souvent affichées en tons de gris, avec le noir représentant une valeur numérique de "0" et le blanc représentant la valeur numérique maximale.

En comparant une image de 2-bits à une image de 8-bits à une image de 8-bits d'une même scène, on peut voir l'énorme différence dans le nombre de détails qu'il est possible de distinguer selon la résolution radiométrique.



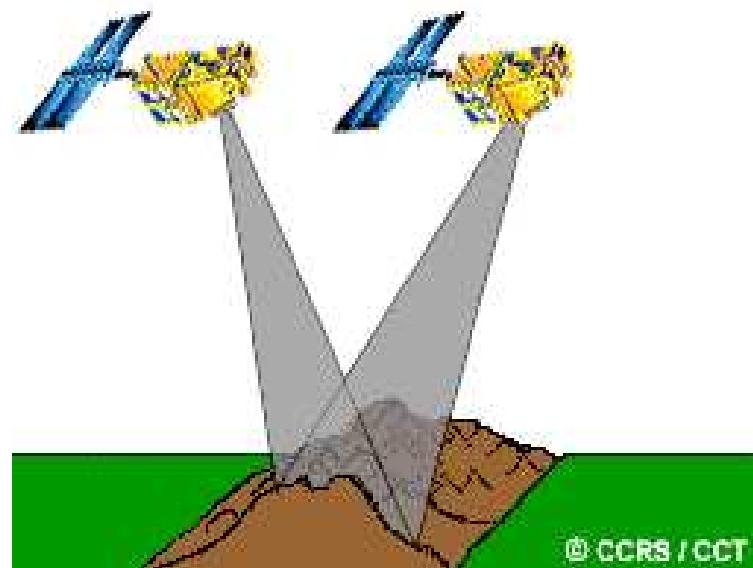
La résolution radiométrique faible (4 bits). La résolution radiométrique faible (8 bits).

(ccrs/cct, 2015).

4.4. Résolution temporelle ou répétitivité.

Elle correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène (même point). Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite.

En amassant des données périodiquement et de façon continue, il est possible de suivre les changements qui surviennent à la surface de la Terre, qu'ils soient naturels (comme le développement de la végétation ou l'évolution d'une inondation) ou de source humaine (comme le développement des milieux urbains ou la déforestation).



Résolution temporelle ou répétitivité
(ccrs/cct, 2015).

5. Le principe d'acquisition des données.

Contrairement aux capteurs photographiques, plusieurs capteurs électroniques acquièrent leurs données en utilisant un « **Système à balayage** ».

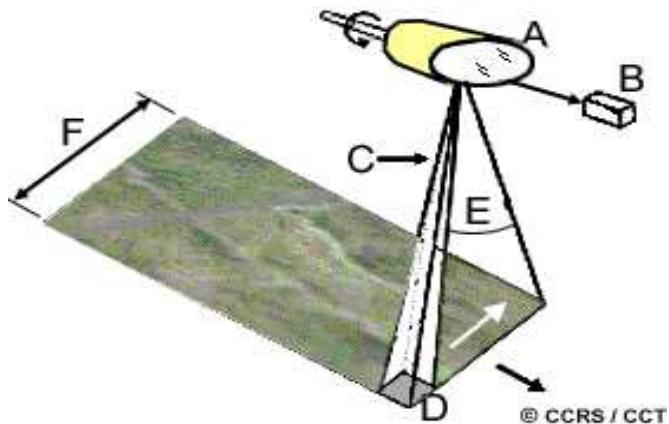
5.1. Balayage multispectral.

Les systèmes à balayage peuvent être utilisés sur des plates-formes aériennes ou spatiales, et opèrent essentiellement de la même façon. Un système à balayage qui utilise plusieurs longueurs d'onde pour acquérir les données est appelé un « **Balayeur multispectral (BMS)** ».

Il y a deux méthodes principales (ou modes) de balayage pour amasser des données multi spectrales: le balayage perpendiculaire à la trajectoire et le balayage parallèle à la trajectoire.

5.1.1. Le balayage perpendiculaire à la trajectoire :

Ratisse la Terre en une série de lignes. Le balayage s'effectue d'un côté du capteur à l'autre,

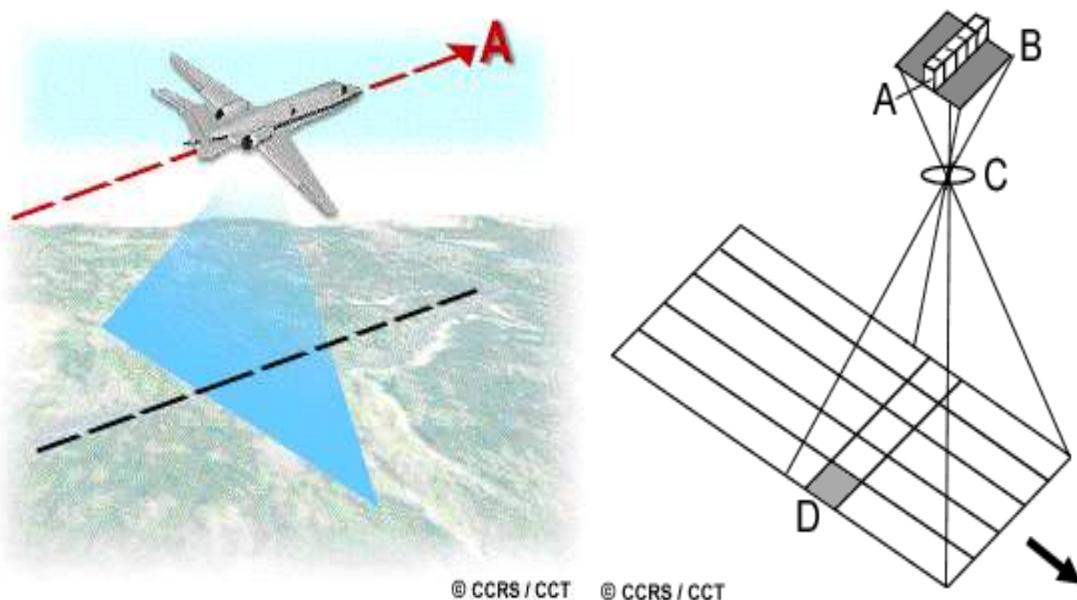


Balayage perpendiculaire à la trajectoire

(ccrs/cct, 2015).

5.1.2. Le balayage parallèle à la trajectoire : (balayeuse à barrettes)

Utilise aussi le mouvement de la plate-forme afin d'enregistrer les données le long de lignes successives et de construire une image bidimensionnelle.



Balayage parallèle à la trajectoire ou balayeuse à barrettes
(ccrs/cct, 2015).

6. Quelques satellites d'observations des ressources terrestres

6.1. Satellites et capteurs météorologiques.

a. GOES : (Geostationary Operational Environmental Satellite).

Conçu par la NASA pour NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en 1975. Il existe 8 satellites GOES, le dernier GOES-8 a été lancé en 1994, sur lequel on a procédé à plusieurs améliorations techniques. Ces satellites, placés en orbite géostationnaire (observent les Amériques du nord et sud, la plus grande partie des océans Atlantique et Pacifique), à 36.000 km d'altitude au-dessus de l'équateur, peuvent observer la Terre de façon presque continue, ce qui permet de prendre plus d'images (toutes les quinze minutes). Cette augmentation en résolution temporelle, jumelée aux améliorations de la résolution spatiale et radiométrique des capteurs, procure une information et des données de meilleure qualité pour la prédition des conditions météorologiques.

Applications :

- Surveille les nuages, pollution et identification de tempêtes sévères.
- Identification de la brume durant la nuit.
- Différenciation des nuages de pluie et de neige ou glace durant le jour.
- Détection de feux et d'éruptions volcaniques.
- Détermination de la température de la surface des océans durant la nuit.
- Evaluation du contenu en humidité des couches atmosphériques intermédiaires.
- Identification des vents qui entraînent les nuages, les tempêtes sévères, la pluie torrentielle.
- Détermination de la température de la surface des océans, détection de poussière et de cendre volcanique dans l'atmosphère.

b. NOAA : (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Mis en place par l'Organisation Météorologique Mondiale, le premier satellite a

étaient mis en orbite en 1970 et depuis 18 furent lancés. Ils sont en orbite polaire héliosynchrone (830 à 870 km au-dessus de la Terre). Ils complètent l'information fournie par les satellites géostationnaires (comme GOES). Les deux satellites (NOAA ET GOES), assurent 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.

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.

Applications :

- La surveillance des nuages, de la neige, de la glace.
- La surveillance de l'eau, de la végétation et de l'agricole.
- La surveillance de la température de la surface des océans, volcans, feux de forêts et humidité du sol ...

6.2. Satellites et capteurs d'observation de la Terre.

a. Landsat :

A été lancé par la NASA en 1972 .Il existe 7 satellites, Tous ont été placés en orbite héliosynchrone polaire. Les trois premiers satellites (Landsat-1 à Landsat-3) se situaient à une altitude de 900 km avec une répétitivité de 18 jours, tandis que les derniers orbitent à une altitude approximative de 700 km avec une répétitivité de 16 jours.Ils croisent l'équateur le matin pour profiter des conditions d'illumination optimale.

Les satellites de la série Landsat portent plusieurs capteurs comme les systèmes de caméras RBV (Return Beam Vidicon), le système radiomètre MSS (Multi Spectral Scanner), et plus tard, le radiomètre TM (Thematic Mapper) Chacun de ces capteurs a une fauchée de 185 km.

Applications :

- Discrimination (distinction) entre le sol et la végétation,
- Discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle)
- Discrimination entre la neige et les nuages.
- Discrimination entre les minéraux et les types de roches.
- Délimitation des étendues d'eau et humidité dans le sol.
- Surveillance de la santé et contenu de la masse biologique.
- Bathymétrie/cartographie côtière.
- Identification des types de végétation et de plantes.
- Identification du stress de la végétation.
- Identification des traits culturels et urbains.

b. SPOT : (Système pour l'observation de la Terre).

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. Ils croisent l'équateur vers 10h30 heure solaire locale. Conçu dans le but d'acquérir des données de télédétection à des fins commerciales, SPOT a été le premier satellite à utiliser la technologie du balayage à barrettes.

Tous les satellites SPOT ont deux capteurs balayeurs multibandes HRV (haute résolution visible) à barrettes, qui peuvent être opérés indépendamment ou simultanément. Chaque HRV peut capter en mode panchromatique (une seule bande) et offre une excellente limite de résolution spatiale de 10 m. Ils peuvent aussi capter en mode multibande (MLA) (trois bandes) qui offre une résolution spatiale de 20 m.

La fauchée pour les deux modes est de 60 km à partir du nadir et lorsque le capteur s'éloigne du nadir, la fauchée augmente de 60 à 80 km de large.

Applications :

- Cartographie urbaine.

- Cartographie et dérivation d'information topographique dans la foresterie et l'agriculture.

c. IRS : (Indian Remote Sensing satellite).

Combine les caractéristiques des capteurs de Landsat MSS et TM et du capteur HRV de SPOT. Le troisième satellite de la série, IRS-1C, lancé en décembre 1995, a trois capteurs : une caméra de haute résolution panchromatique à une bande (PAN), le capteur à quatre bandes LISS-III (Linear Imaging Selfscanning Sensor) de résolution moyenne, et le capteur à deux bandes WiFS (Wide Field of View) de faible résolution.

Applications :

- Planification urbaine.
- Cartographie et la discrimination de la végétation.
- Cartographie terrestre et gestion des ressources naturelles.
- La surveillance de la végétation à l'échelle régionale.

6.3. Satellites et capteurs d'observation marine.

a. Le satellite Nimbus-7 :

Lancé en 1978 par la NASA et a été placé en orbite héliosynchrone polaire à une altitude de 955 km. Le cycle de répétition du satellite permettait une couverture complète de la Terre tous les six jours, ou toutes les 83 orbites.

Le satellite Nimbus-7, portait le CZCS (Coastal Zone Colour Scanner), c'est le premier capteur spécifiquement conçu pour la surveillance des océans et des étendues d'eau. Sa fauché était de 1566 km au nadir, il a cessé de fonctionner en 1986. Parmi d'autres capteurs portaient par le satellite Nimbus-7, il y a LIMS ; SAMS ; SAMII ; ERB ; SMMR ; THIR...

Applications :

- Observer la couleur et la température de l'océan, particulièrement dans les régions côtières
- Déetecter les polluants dans les couches supérieures de l'océan

- Déterminer la nature des matériaux en suspension dans la colonne d'eau.
- Mesure de la formation de glace à la surface des océans.

b.MOS : (Marine Observation Satellite).

A été lancé en février 1987 par le Japon, Ces satellites portent trois différents capteurs : un radiomètre multispectral électronique à autabalayage (MESSR), un radiomètre du visible et de l'infrarouge thermique (VTIR), et un radiomètre micro-ondes à balayage (MSR). Semblable au satellite Landsat, donc en orbite héliosynchrone polaire, se situent à une altitude d'environ 909 km avec une répétitivité de 17 jours.

Applications :

- Surveiller les courants océaniques et la température des surfaces de la mer.
- Surveiller la vapeur d'eau atmosphérique et les niveaux de chlorophylle des océans.
- Surveiller les précipitations et la végétation terrestre.

c. SeaWIFS: (Sea-viewing Wied-Field-of-View)

A bord du satellite SeaStar. L'altitude de son orbite est de 705 km et l'heure locale de passage à l'équateur est fixée à midi. Deux combinaisons de résolution spatiale et de largeur de fauchée sont disponibles pour chaque bande : un mode avec une résolution de 1,1 km (au nadir) avec une fauchée de 2800 km, et un mode avec une plus faible résolution de 4,5 km (au nadir) avec une fauchée de 1500 km.

Applications :

- La détection et la surveillance du plancton.
- Surveillance de l'influence des océans sur les processus climatiques (emmagasinage de chaleur).
- Surveillance des cycles du carbone, du souffre et de l'azote.

Remarque : Ces satellites d'observation marine sont importants pour la surveillance de la pollution et de la santé des océans à l'échelle mondiale et régionale. Ils aident aussi aux scientifiques à comprendre l'influence et l'impact des océans sur le système climatique de la Terre.

6.4. Autres détecteurs

Il existe aussi plusieurs autres types de détecteurs qui sont utiles à la télédétection. L'information n'est pas très détaillée, mais constitue une bonne introduction aux différentes sources et aux concepts alternatifs d'acquisition d'imagerie

a. Vidéo :

Les caméras vidéo sont un moyen utile et peu coûteux pour acquérir des données et des images, la résolution spatiale est plus grossière que pour la photographie et les images numériques. Les caméras utilisées pour l'enregistrement vidéo mesurent la radiation dans les plages du visible, du proche infrarouge et parfois dans la portion de l'infrarouge moyen du spectre électromagnétique. Les données de l'image sont enregistrées sur bande magnétique et peuvent être immédiatement visualisées.

Applications :

- Gestion de désastres naturels (feux, inondations).
- Evaluation des moissons et des maladies.
- Contrôle de danger environnemental.
- Surveillance policière.

b. FLIR :

Le système infrarouge à balayage frontal, fournit une perspective oblique plutôt que nadir de la surface de la Terre. Ce détecteur est normalement placé sur des avions ou des hélicoptères et acquiert des images de la région à l'avant de la plate-forme. Les systèmes à balayage frontal ont une résolution spatiale élevée.

Applications :

Les forces armées utilisent ce genre de système pour des opérations de secours.

c. Fluorescence par laser :

En recevant de l'énergie, certaines cibles deviennent fluorescentes ou émettent de l'énergie. Il illumine la cible avec une radiation de longueur d'onde déterminée et est capable de détecter de multiples longueurs d'onde de radiation fluorescente.

Applications :

Cette technologie a été testée pour des applications océanographiques comme :

- Cartographie de la chlorophylle.
- Détection de polluants.
- Détection de déversements accidentels ou naturels d'hydrocarbures.

d. RADAR : (Radio Detection and Ranging).

Est un système actif qui fournit sa propre source d'énergie électromagnétique. Lorsque l'énergie atteint la cible, une portion de l'énergie est réfléchie vers le détecteur. En enregistrant le délai et l'amplitude de l'énergie réfléchie par toutes les cibles lors du passage du système, nous pouvons produire une image à deux dimensions de la surface.

Le RADAR produit à sa propre source d'énergie, nous pouvons donc obtenir des images le jour ou la nuit. L'énergie micro-onde peut également pénétrer à travers les nuages et la pluie, il est considéré comme une détectrice toute saison.

e. Lidar : (Light Detection and Ranging).

Est une technique d'imagerie active qui ressemble beaucoup à celle du RADAR. Ce système qui émet des impulsions de lumière laser et détecte l'énergie réfléchie par la cible. Le temps requis par l'énergie pour rejoindre la cible et retourner au détecteur détermine la distance entre les deux.

Applications :

- Mesure de la hauteur des forêts par rapport à la surface du sol.
- Mesure de la profondeur de l'eau par rapport à la surface de l'eau (profilomètre laser).
- Etudes atmosphériques et surveillance des mouvements atmosphériques.

7. Les vraies et fausses couleurs.

Introduction :

Nous avons vu que le principe des compositions colorées consiste à affecter aux trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu) trois images acquises au-dessus d'une même région, au même moment mais dans des longueurs d'onde différentes. En fonction de l'affectation des couleurs primaires aux trois bandes spectrales, on obtient soit une composition colorée dite naturelle ou « Vraies couleurs », soit une composition en « Fausses couleurs ».

7.1. Les vraies couleurs.

On affecte aux bandes spectrales acquises dans les longueurs d'onde du bleu, du vert et du rouge, les trois couleurs primaires correspondantes. Le rouge est attribué à la bande rouge, le vert à la bande verte et le bleu à la bande bleue. L'image résultante correspond donc exactement à ce qu'un observateur pourrait observer s'il se trouvait à bord du satellite.

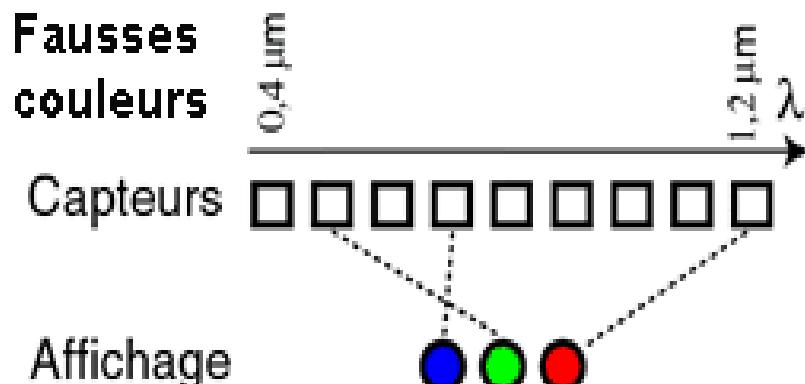


7.2. Les fausses couleurs.

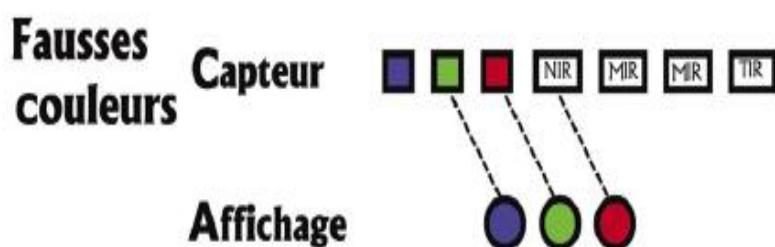
Si les bandes spectrales de l'image ne correspondent pas aux trois couleurs primaires, l'image qui en résulte est appelée une image en « Fausses couleurs ». Par conséquent, la couleur d'un objet dans l'image affichée n'a pas de ressemblance avec sa couleur réelle.

L'intérêt de Mettre une image en fausse couleur sert à faire ressortir certains éléments de l'image, les rendre plus sensibles à la vision humaine. Cela sert également à

mieux délimiter les différentes zones de l'image.

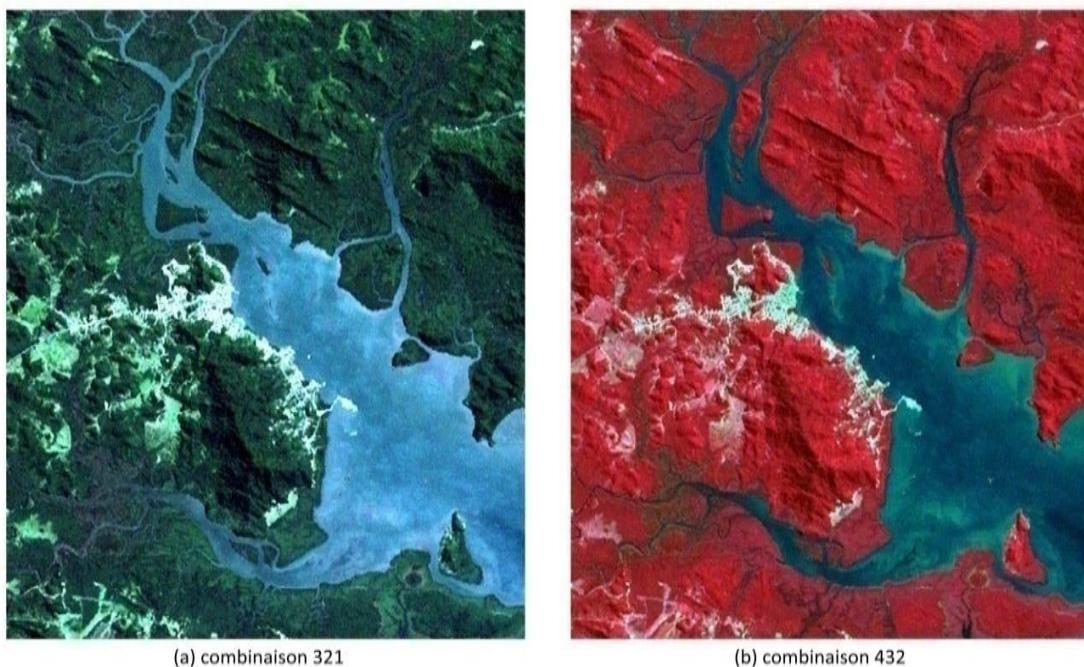


Il existe plusieurs façons de produire des images en 'fausses couleurs' chacune étant plus adaptée à une application particulière :



Une composition colorée particulièrement efficace en télédétection est la composition dite "Infrarouge fausses couleurs". Elle associe les bandes proches infrarouge, rouge et verte du capteur aux couleurs rouge verte et bleue de l'écran.

Cette composition est très efficace pour analyser la végétation, et elle présente l'avantage pour l'interprète d'avoir pratiquement les mêmes propriétés que les photographies infrarouges en couleur utilisées depuis longtemps par les photo-interprètes. Elle exploite la particularité du spectre réfléchi par les végétaux, qui présente un "Pic" important dans le proche infrarouge. Sur une image en "Fausses couleurs infrarouge", la végétation qui a une forte activité photosynthétique apparaît en rouge vif (Pic de l'infrarouge proche), l'eau apparaît pratiquement en noir (ce matériau absorbe pratiquement toutes les longueurs d'onde) et les surfaces minérales (sol nu, béton), apparaissent dans des tons de bleu à blanc.



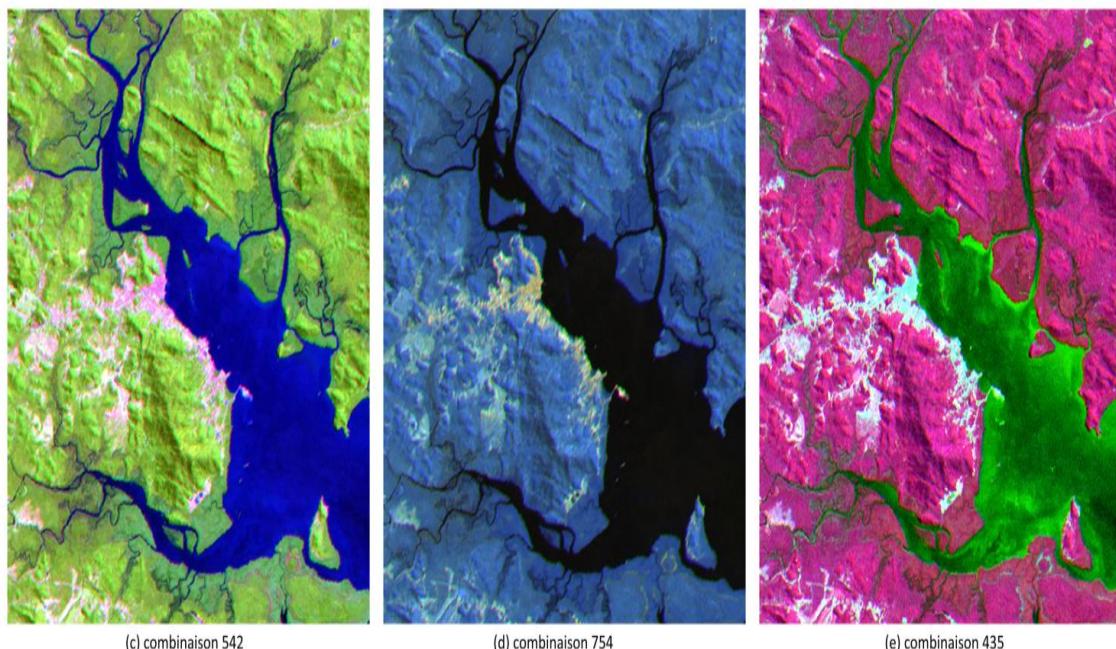
(a) combinaison 321

(b) combinaison 432

- (a) Composition colorée « Vraies couleurs » réalisée à partir des bandes 321,**
(b) « Infrarouge fausses couleurs » réalisée à partir des bandes 432

L'image (a) présente une composition en « Vraies couleurs » réalisées à partir des bandes spectrales bleue, verte et rouge du capteur Landsat TM. Sur cette image, la végétation apparaît en vert foncé, les surfaces cultivées en vert plus clair et les surfaces minérales (bâties) apparaissent très claires (blanc). L'eau, quant à elle, apparaît dans des teintes qui vont du bleu foncé au bleu cyan, selon la profondeur et la turbidité.

Quant l'image (b) présente une composition en « Infrarouge fausses couleurs » réalisées aussi à partir des bandes spectrales bleue, verte et rouge du capteur Landsat TM. Sur cette image, la végétation apparaît en rouge vif, les surfaces cultivées en rouge rosé et les surfaces minérales (bâties) apparaissent très claires (bleu très clair). L'eau, quant à elle, apparaît dans les teintes bleu foncé à vertes, selon la profondeur et la turbidité.



Exemples de compositions colorées « Fausse couleurs » réalisées à partir des bandes spectrales du satellite Landsat TM

Les colorations associées à chaque type de milieu en fonction de la combinaison réalisée sont résumées dans le tableau I.

Tableau I : Grille d'identification et d'interprétation des principaux types de surface pour chacune des combinaisons des figures ci-dessus.

Images	Couleurs / Bandes spectrales			Principaux types de milieux			
	Rouge	Vert	Bleu	Eau	Végétation	Sols nus (cultures)	Bâti
(a)	3	2	1	Bleu foncé (eau profonde ou peu turbide) à bleu-cyan (faible profondeur ou forte turbidité)	Vert foncé (forêt), vert très foncé (mangrove)	Vert pomme	Blanc
(b)	4	3	2	Bleu foncé (eau profonde ou peu turbide) à bleu-vert (faible profondeur ou forte turbidité)	Rouge vif (forêt), rouge plus terne (mangrove)	Rouge - rosé	Bleu très clair
(c)	5	4	2	Bleu soutenu (eau profonde ou peu turbide) à bleu légèrement plus clair (faible profondeur ou forte turbidité)	Vert vif (forêt), vert plus terne (mangrove)	Vert pomme	Rose - mauve
(d)	7	5	4	noire	bleu (forêt), bleu légèrement plus foncé (mangrove)	Bleu ciel	Jaune - orange
(e)	4	3	5	Vert foncé (eau profonde ou peu turbide) à vert clair (faible profondeur ou forte turbidité)	Pourpre (forêt), pourpre légèrement plus foncé (mangrove)	Rose pâle	Bleu ciel à blanc

Tableau II. Distinctions et confusions visuelles possibles entre les différents milieux pour chacune des combinaisons du tableau I.

Images	commentaires
(a)	Risque de confusion entre l'eau et la végétation (ex des nios au nord-est et au sud-ouest de l'image) Risque de confusion entre certains sols nus et les bâts Distinction entre la végétation et les sols nus, mais pas de différenciations à l'intérieur de chaun de ces deux milieux Différenciation de plusieurs types d'eau
(b)	Bonne séparation de l'eau et des autres types de surface Différenciation de plusieurs types d'eau Distinction claire de chaque type de surface Confusion possible entre certains sols cultivés et la végétation
(c)	Distinction nette entre l'eau et les autres types de surface Différenciation moins nette de plusieurs types d'eau Bonne séparation de la végétation et des sols nus (culture, bâti) Confusion possible entre certains sols nus et le bâti
(d)	Distinction nette entre l'eau et les autres types de surface Bonne séparation de la végétation et des sols nus (culture, bâti) Confusion possible entre certains sols nus et le bâti
(e)	Bonne séparation de l'eau et des autres types de surface Différenciation de plusieurs types d'eau Bonne séparation de la végétation et du bâti Risque de confusion entre certains sols cultivés et la végétation

1. Prétraitements : corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques.

1.1. Transmission des données de télédétection.

Les données acquises par un capteur aéroporté peuvent être recueillies une fois que l'avion est de retour au sol. Elles peuvent ensuite être traitées et, finalement, remises à l'utilisateur.

Par contre, les données acquises par un satellite doivent être transmises électroniquement à une station de réception sur Terre, car le satellite demeure en orbite pour plusieurs années.

On utilise trois méthodes de transmission des données :

- A.** Les données peuvent être transmises directement à une station de réception sur Terre, si le satellite se situe dans le cercle de réception de la station.
- B.** Si le satellite n'est pas dans le cercle de réception d'une station, les données peuvent être stockées par un enregistreur à bord du satellite.
- C.** Les données peuvent être aussi retransmises à la station de réception par des satellites de communication qui sont en orbite géostationnaire autour de la Terre. Les données sont transmises de satellite à satellite jusqu'à ce qu'on puisse les retransmettre à la station.

- Pour plusieurs capteurs, il est possible de fournir rapidement des images aux clients qui en ont un urgent besoin.
- Ce traitement rapide des données est utilisé pour fournir des images aux navires
- Le traitement d'images en temps réel pour des capteurs aériens est utilisé pour envoyer des images infrarouges thermiques directement aux pompiers qui combattent un feu de forêt. Exemple du Vigisat créé en 2002.

1.2. Éléments d'interprétation visuelle.

L'interprétation et l'identification des cibles en télédétection sont souvent faites de façon visuelle, c'est-à-dire par un interprète humain.

Les cibles peuvent être des structures naturelles ou artificielles, faites de divers points, lignes ou surfaces. Les cibles peuvent être définies en fonction de la manière dont elles diffusent le rayonnement. L'intensité du rayonnement est mesurée et enregistrée par un capteur pour être ensuite transformée en un produit utilisable tel qu'une photo aérienne ou une image satellite.

La reconnaissance des cibles est la clé de l'interprétation et de l'extraction d'information. L'observation des différences entre les cibles et leurs arrière-plans implique la comparaison entre différentes cibles en se basant sur une combinaison des caractéristiques suivantes : ton, forme, taille, patron, texture, ombre et association :

- **Le ton** (nuance) réfère à la clarté relative ou la couleur (teinte) des objets dans une image.
- **La forme** réfère à l'allure générale, la structure ou le contour des objets.
- **La taille** d'un objet sur une image est fonction de l'échelle.
- **Le patron** (modèle existant) réfère à l'agencement spatial des objets visiblement
- **La texture** (variations de teintes) réfère à l'arrangement et à la fréquence
- **Les ombres** donnent une idée du profil et de la hauteur relative des cibles
- **L'association** tient compte de la relation entre la cible d'intérêt et d'autres objets ou structures qui sont à proximité.

1.3. Prétraitement et corrections des données : Normalisation.

Les données brutes parviennent à la station de réception sous « forme numérique ». Elles sont alors traitées pour corriger les distorsions géométriques, atmosphériques, et radiométriques. Elles sont ensuite converties dans un « format standard » et sont sauvegardées sur bandes magnétiques, disquettes ou CD-ROM.

1.3.1. Corrections géométriques :

Corriger les distorsions de l'image dues en particulier aux :

a) Déformations liées à l'instrument

- Etalonnage du capteur,
- Défaut d'égalisation entre barrettes,
- Angle de visée (visée oblique ou visée verticale)
- Vitesse de balayage...

b) Déformations liées à l'environnement

- Rotation de la terre,
- Relief ...

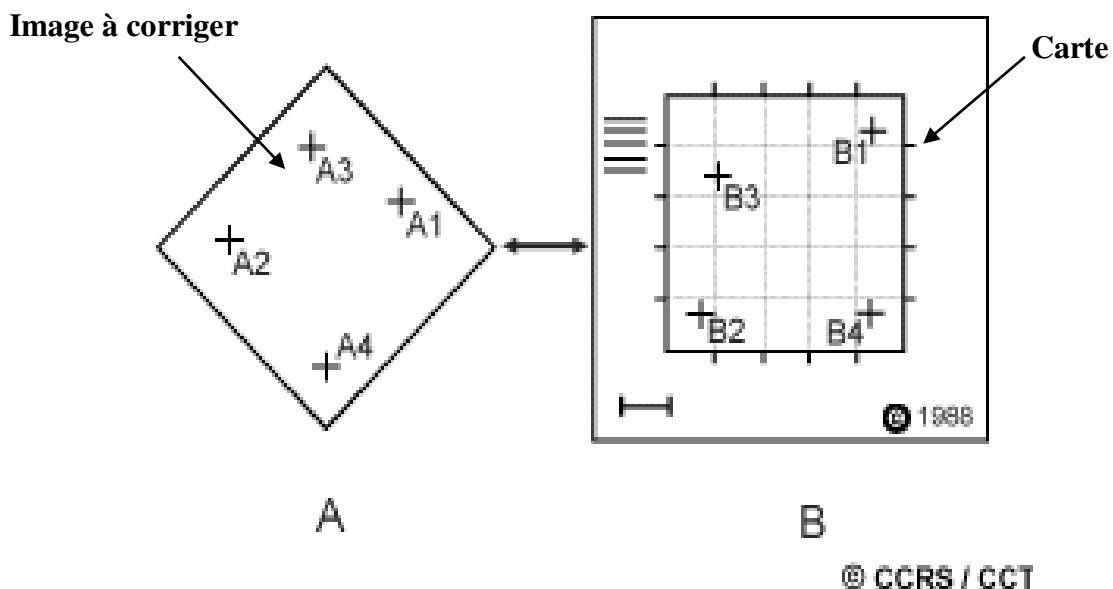
c) Déformations liées au vecteur

- Variation d'altitude du satellite,
- Variation de la vitesse de déplacement,
- Attitude (tangage) ...

1.3.1.1. Correction de type « Image-à-carte ».

Le processus de correction géométrique consiste à identifier des coordonnées de l'image (c'est-à-dire ligne et colonne) de plusieurs points clairement distincts, appelés « Points de contrôle au sol (PCS) » ou « Points amers » sur l'image à corriger (A -A1 à A4) et à les assortir à leur véritable position en coordonnées au sol (par exemple en latitude et longitude).

Les vraies coordonnées au sol sont habituellement mesurées à partir d'une carte (B - B1 à B4), soit sur papier ou en format numérique. Une fois que plusieurs couples de PCS bien distribuées ont été identifiés, l'information est traitée par l'ordinateur pour déterminer les équations de transformation à être appliquées aux coordonnées originales (ligne et colonne) pour obtenir les nouvelles coordonnées au sol.



Correction de type « image-à-carte »

(ccrs/cct, 2015).

1.3.1.2. Correction de type « Image-à-image ».

La correction géométrique peut aussi être effectuée d'une image à une autre image et on l'utilise souvent avant d'effectuer les différents procédés de transformation.

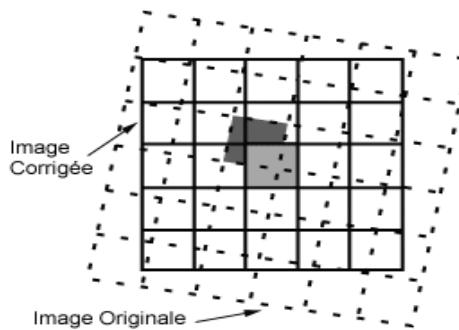
Toute correction géométrique « image-à-image », nécessite le reéchantillonnage de l'image afin de déterminer la valeur numérique de l'image d'origine à placer dans la nouvelle localisation du pixel de l'image corrigée.

Il existe trois principales méthodes de rééchantillonnage :

- Le plus proche voisin,
- L'interpolation bilinéaire,
- La convolution cubique.

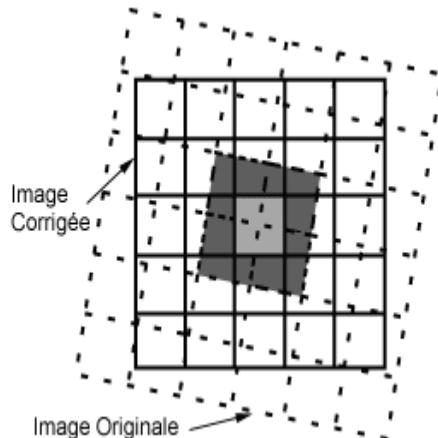
a. Méthode du plus proche voisin.

Un pixel de l'image corrigée prend la valeur du pixel qui lui est le plus proche sur l'image d'origine.



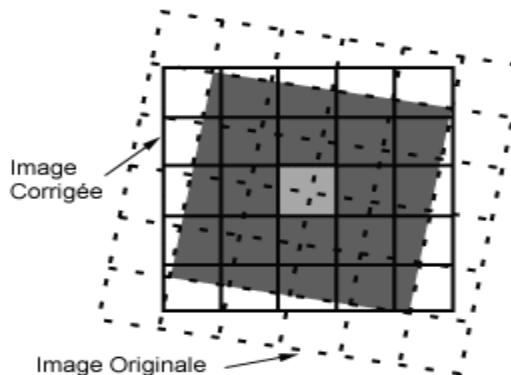
b. Méthode d'interpolation bilinéaire.

Un pixel de l'image corrigée prend la moyenne pondérée par la distance des 4 pixels les plus proches sur l'image d'origine.



c. Méthode de convolution ou interpolation cubique.

Un pixel de l'image corrigée prend la moyenne pondérée par la distance des 16 pixels les plus proches sur l'image d'origine.



1.3.2. Corrections des effets atmosphériques.

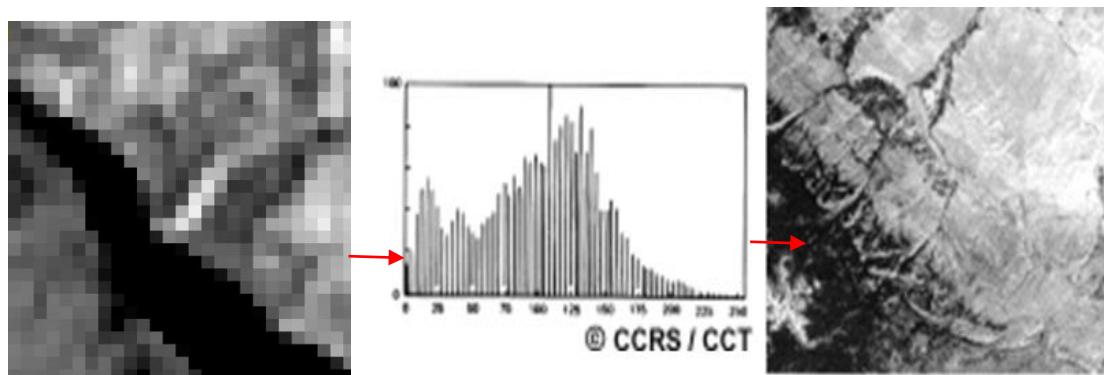
Le rayonnement réfléchi au niveau du capteur est la résultante du rayonnement réfléchi par la cible et par l'atmosphère. Le but des corrections atmosphériques est d'éliminer les effets de l'atmosphère et d'accéder à une mesure réelle de la réflectance des cibles.

Elle permet ainsi de :

- Mesurer les grandeurs physiques réelles des surfaces (réflectance au sol, température, etc.).
- Effectuer des comparaisons multi-temporelles des images.

Un exemple sur une des méthodes utiliser dans la correction des effets atmosphériques est la méthode qui consiste à examiner l'intensité observée (valeur numérique du pixel) dans une région ombragée ou un objet très sombre (tel un grand lac clair -A) et à réaliser une représentation statistique des données , après déterminer la valeur minimale (B) pour chacune des bandes spectrales.

La correction est appliquée en soustrayant la valeur minimale observée, de tous les pixels dans chaque bande.



Corrections des effets atmosphériques

(ccrs/cct, 2015)

1.3.3. Les corrections radiométriques ou effets directionnels.

La lumière solaire qui éclaire les objets est perturbée par sa traversée de l'atmosphère et n'éclaire pas tous les objets sous un même angle.

De plus, la lumière réfléchie par les objets doit également traverser l'atmosphère avant d'être analysée par le capteur du satellite et cette traversée perturbe également le signal. Ces perturbations sont dues à la présence de gaz et de poussières qui peuvent absorber et/ou réfléchir certaines longueurs d'ondes, modifiant ainsi les propriétés spectrales du rayonnement

Les corrections radiométriques peuvent être nécessaires à cause :

- Des variations dans la géométrie ou angle d'illumination et angle de visée entre les images.
- Des conditions atmosphériques.
- Du bruit et de la réponse du capteur.

Elles peuvent être corrigées par la modélisation de la distance entre les aires de la surface terrestre observées, le Soleil et le capteur. Ceci est souvent requis pour pouvoir faire des comparaisons plus rapides entre des images prises par différents capteurs à différentes dates ou heures, ou pour faire des mosaïques d'images avec un seul capteur en maintenant les conditions d'illumination uniformes d'une scène à l'autre.

Les corrections sont plus ou moins faciles à corriger selon les types de surfaces observées.

- Pour un sol nu, ces effets sont généralement faciles à corriger.
- Pour un couvert végétal, ces effets sont plus complexes. Car il s'agit de l'interaction des facteurs propres au couvert et les facteurs exogènes (l'angle de visée et de l'angle solaire)

2. Rehaussement des images et Rehaussement du contraste des images.

Introduction :

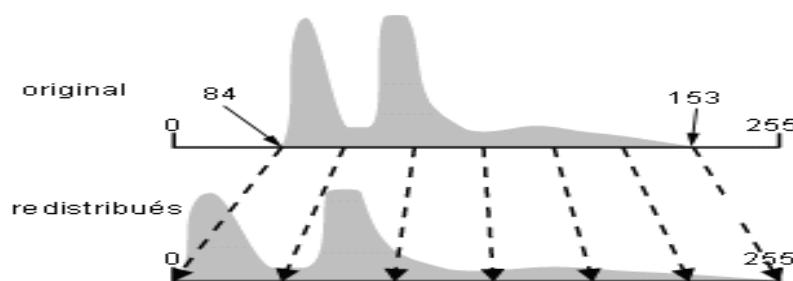
Même s'il est possible d'effectuer différentes corrections, il peut s'avérer que l'image ne soit pas à son meilleur pour l'interprétation visuelle. Il faut donc réaliser une amélioration de la qualité visuelle de l'image afin de faciliter son interprétation.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de rehausser le contraste et les détails d'une image. Nous n'en décrirons que quelques-unes.

2.1. Rehaussement linéaire du contraste.

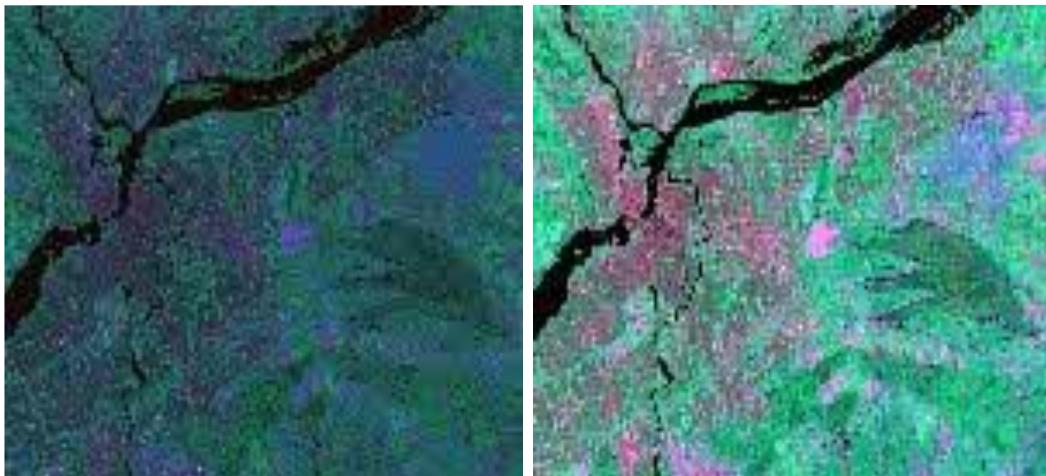
C'est la méthode la plus simple. Afin de l'appliquer, on identifie les limites supérieures et inférieures d'intensité représentées sur l'histogramme (les valeurs minimales et maximales), et à l'aide d'une transformation linéaire, on étire ces valeurs sur l'ensemble des valeurs disponibles.

Dans notre exemple, la valeur minimale des données initiales dans l'histogramme est de 84 et la valeur maximale est de 153. Ces 70 niveaux n'occupent qu'un tiers des 256 valeurs disponibles. Un rehaussement linéaire étire de façon uniforme cet intervalle afin d'utiliser la totalité des valeurs de 0 à 255. Ce procédé rehausse le contraste dans l'image en pâlissant davantage les régions claires de l'image et en assombrissant davantage les régions plus foncées. Ceci facilite l'interprétation visuelle.



Rehaussement linéaire du contraste (ccrs/cct, 2015).

Le graphique suivant montre l'augmentation du contraste dans une image avant et après un rehaussement linéaire.



L'augmentation du contraste dans une image avant (image de gauche) et après (image de droite) un rehaussement linéaire.

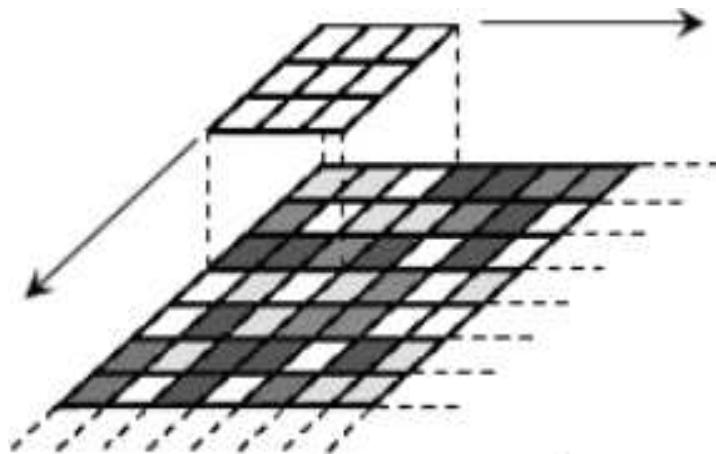
2.2. Les filtres spatiaux.

Ils représentent une autre méthode de traitement numérique utilisé pour le rehaussement d'une image. Ces filtres sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques telles que le fond, la structure et la texture d'une image en se basant sur leur fréquence spatiale (variation des différents tons).

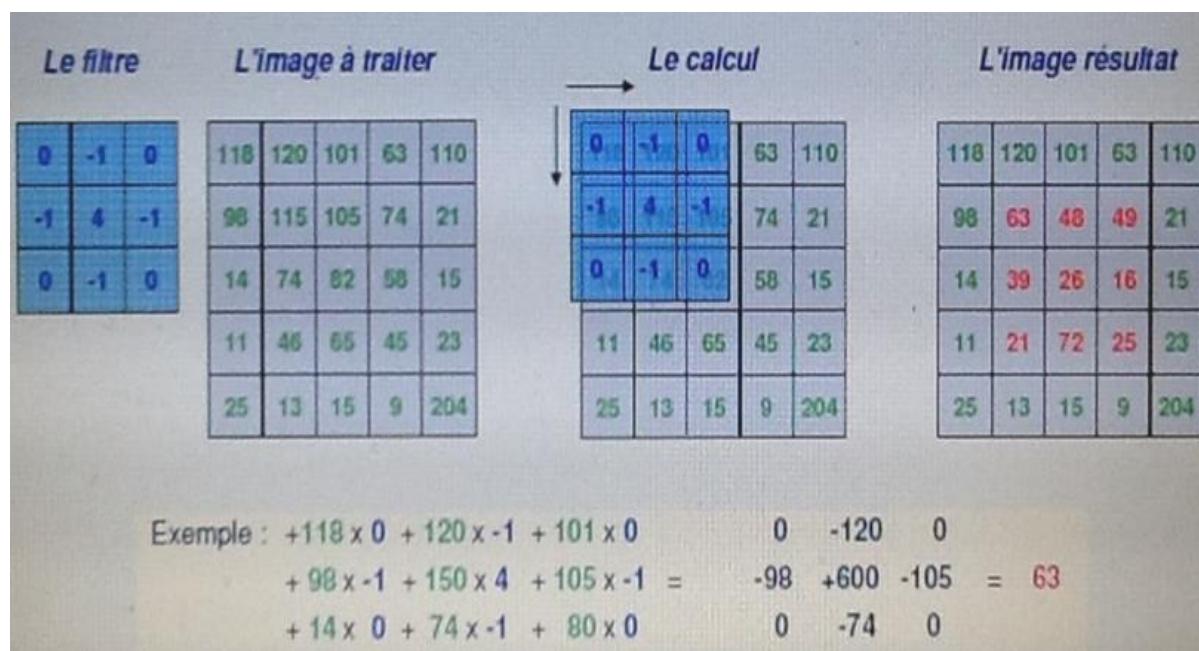
- Les régions d'une image où la texture est « rugueuse » sont les régions où les changements dans les tons sont importants; ces régions ont une fréquence spatiale élevée.
- Les régions « lisses » ont une variation des tons qui est plus graduelle sur plusieurs pixels; ces régions ont une fréquence spatiale faible.

La méthode de filtrage spatial consiste à déplacer une « fenêtre » d'une dimension de quelques pixels (ex. : 3 sur 3, 5 sur 5, etc.) au-dessus de chaque pixel de l'image. On applique alors un traitement mathématique utilisant les valeurs des pixels sous la fenêtre et on remplace la valeur du pixel central par le résultat obtenu. La fenêtre est déplacée le long des colonnes et des lignes de l'image, un pixel à la fois, répétant le calcul jusqu'à ce que l'image entière ait été filtrée. En modifiant le calcul effectué à l'intérieur de la

fenêtre, il est possible de rehausser ou de supprimer différents types de caractéristiques présents dans une image.



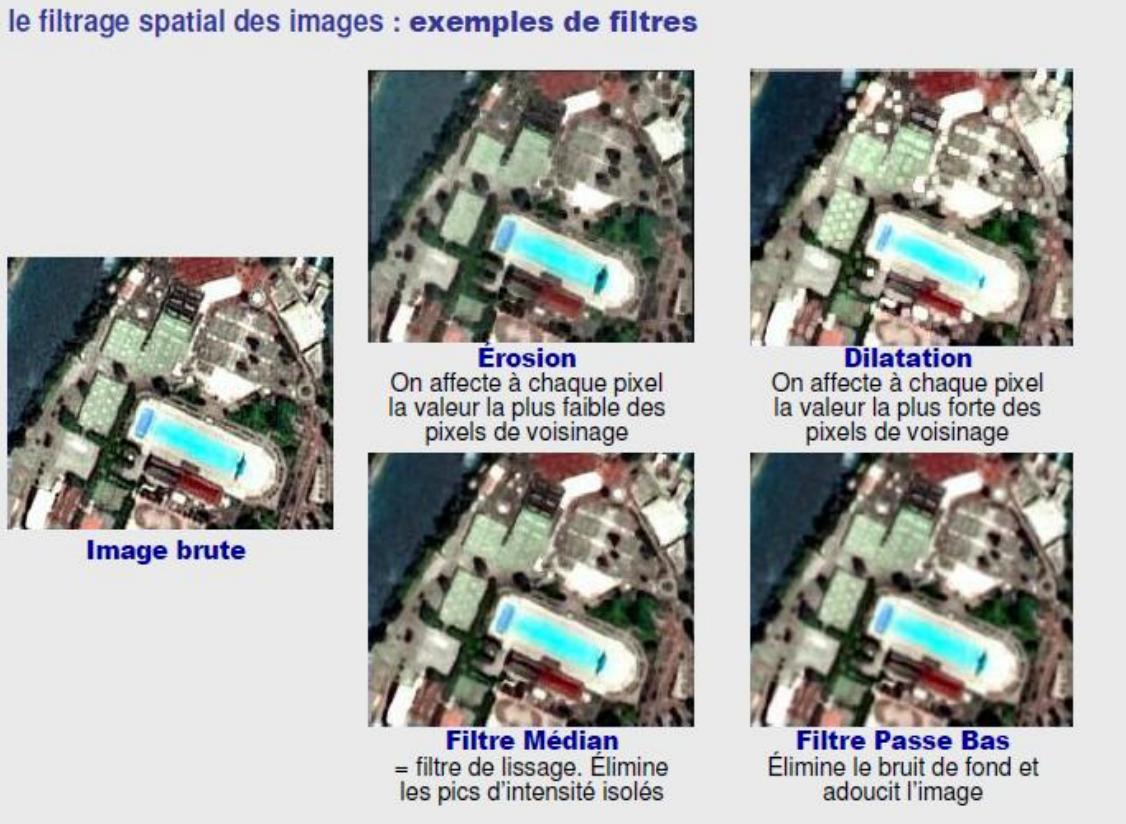
Filtre spatial (ccrs/cct, 2015).



La méthode de filtrage spatial (ccrs/cct, 2015).

Il existe plusieurs sortes de filtre, Par exemple « un filtre passe-bas », il réduit les plus petits détails d'une image. Il est donc utilisé pour lisser une image. « Les filtres passe-haut » font le contraire : ils sont utilisés pour raviver les petits détails d'une image.

le filtrage spatial des images : exemples de filtres



le filtrage spatial des images : exemples de filtres



Exemples de filtres spatiaux (ccrs/cct, 2015).

3. Classifications : classifications non supervisées et classifications supervisées

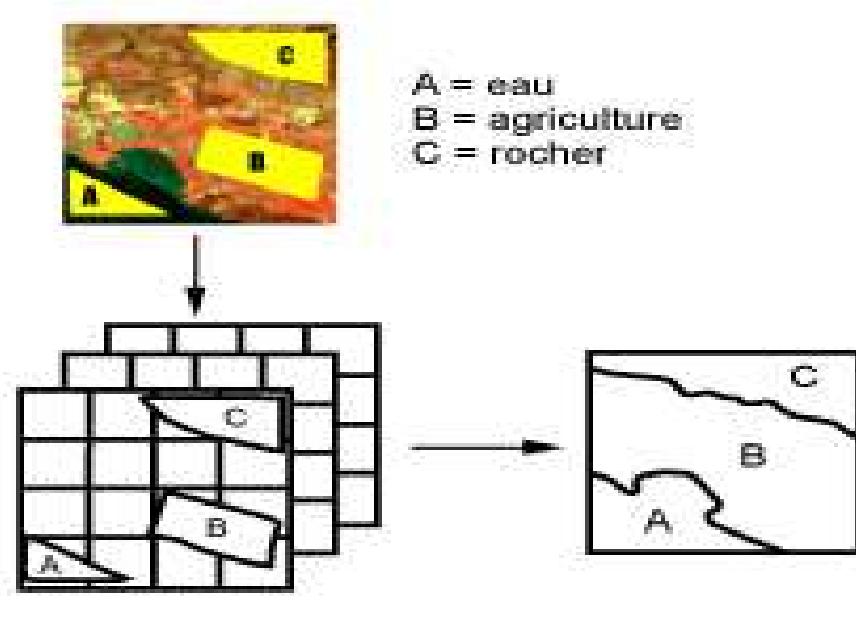
C'est extraire d'une image des classes thématiques (cultures, urbain, forêts, routes, lacs, ...etc.).

3.1. Classifications supervisées.

L'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un « Ensemble de données-tests ». La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste et sa familiarité avec les régions géographiques.

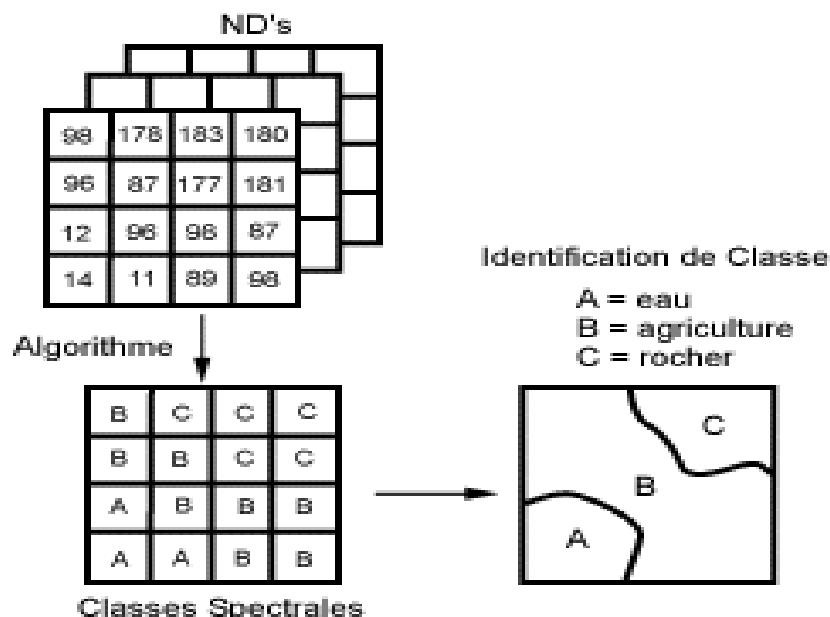
L'ordinateur utilise un programme spécial ou « Algorithmes de classification » afin de déterminer la « Signature spectrale » ou numérique de chacune des classes.

Une classification supervisée commence donc par l'identification des « Classes d'information » qui sont ensuite utilisées pour définir les « Classes spectrales » qui les représentent.



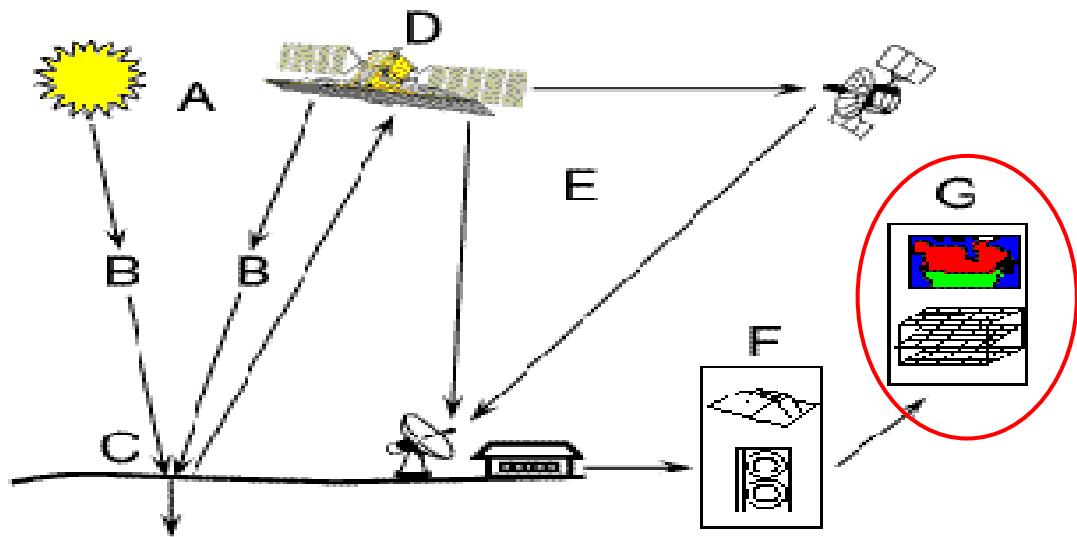
3.2. Classifications non supervisées.

Procède de la façon contraire. Les « Classes spectrales » sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des « Classes d'information » utile (si possible). Des programmes appelés « Algorithmes de classification » sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données.



(ccrs/cct, 2015)

1. Les applications



Comme nous l'avons vu précédemment, chaque capteur est conçu pour des applications spécifiques. Les bandes spectrales acquises par un capteur optique déterminent les applications pour lesquelles il sera utile.

1.1. Agriculture.

Tout producteur agricole a besoin d'information pour gérer efficacement ses récoltes. Il doit disposer des outils d'information qui lui permettent de planifier ses opérations et de faire face aux multiples aléas pouvant menacer sa production, telles que des infestations d'insectes, intempéries, sécheresses ou dommages reliés au stress des végétaux, qui peuvent affecter le potentiel de sa récolte et les conditions de sa terre.

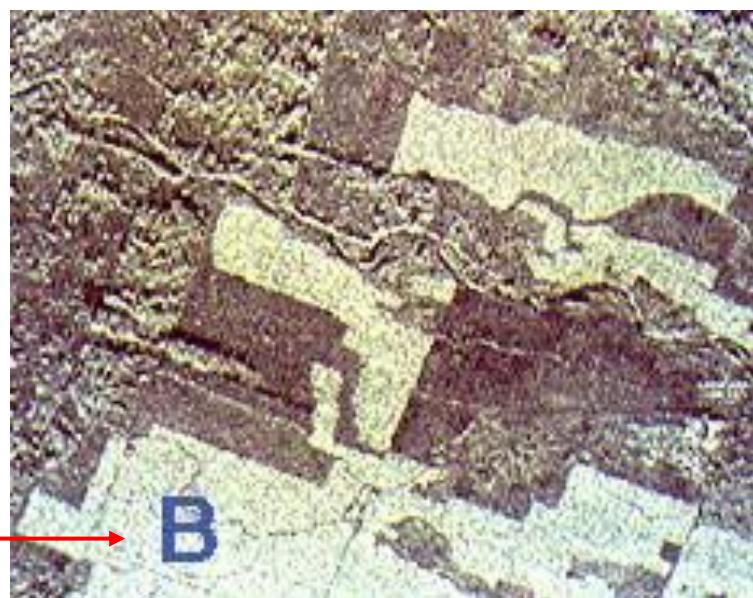
Les images satellitaires et aériennes servent à classification des cultures, à l'assurance de la santé et de la viabilité des productions et à la surveillance des mesures d'intervention.

Parmi les applications de la télédétection à l'agriculture mentionnons :

- La classification des types de cultures

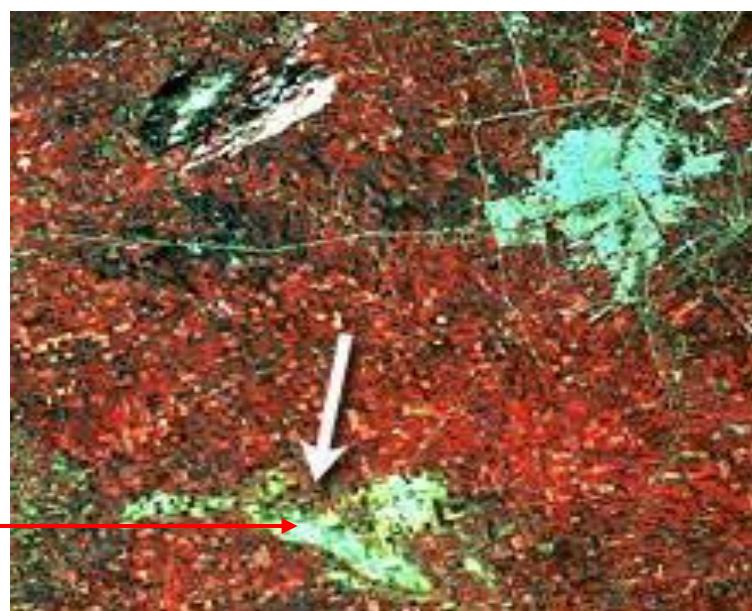
- L'évaluation de la santé des cultures.
- L'estimation de la production totale d'une récolte.
- La cartographie des caractéristiques du sol.
- La cartographie des pratiques de gestion du sol.

Les feuilles de bananiers, ont une rétrodiffusion plutôt brillante (B dans l'image)



Classification des types de cultures.

Zones touchées des infestations de champignons et de mauvaises herbes



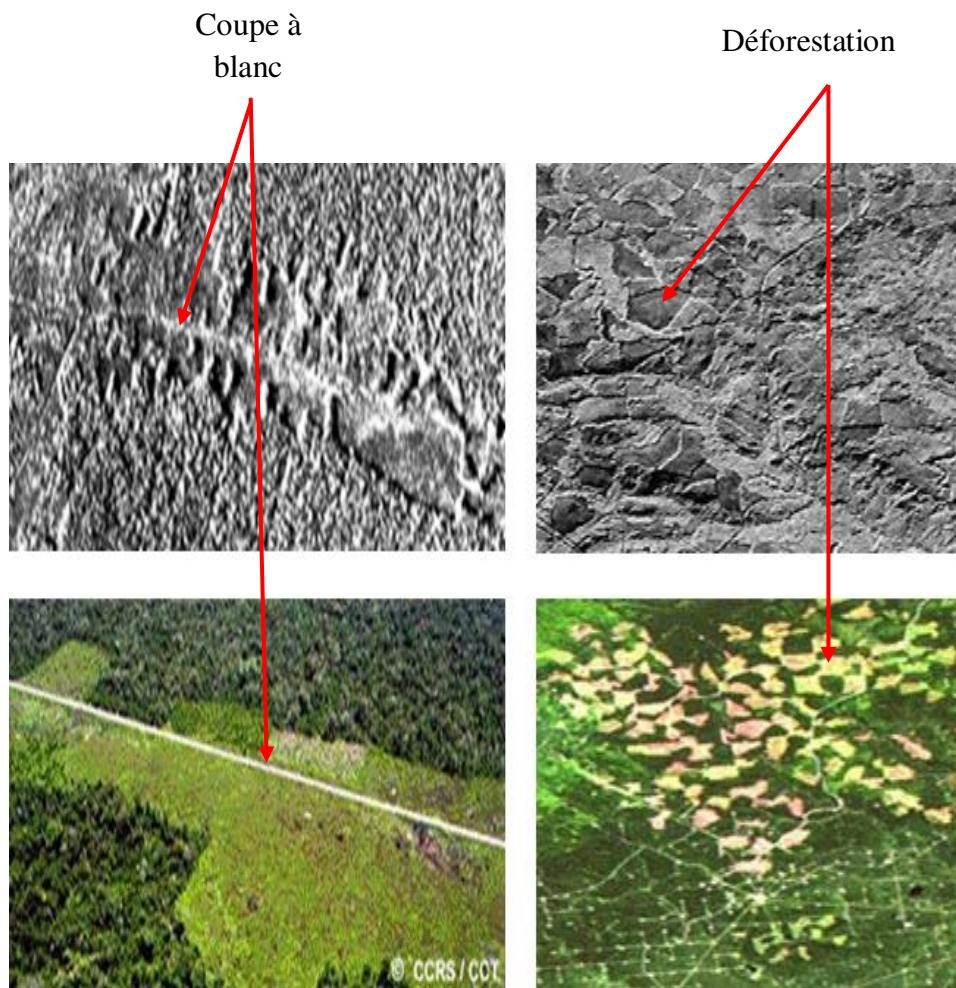
Evaluation de la santé des cultures.

1.2. Foresterie.

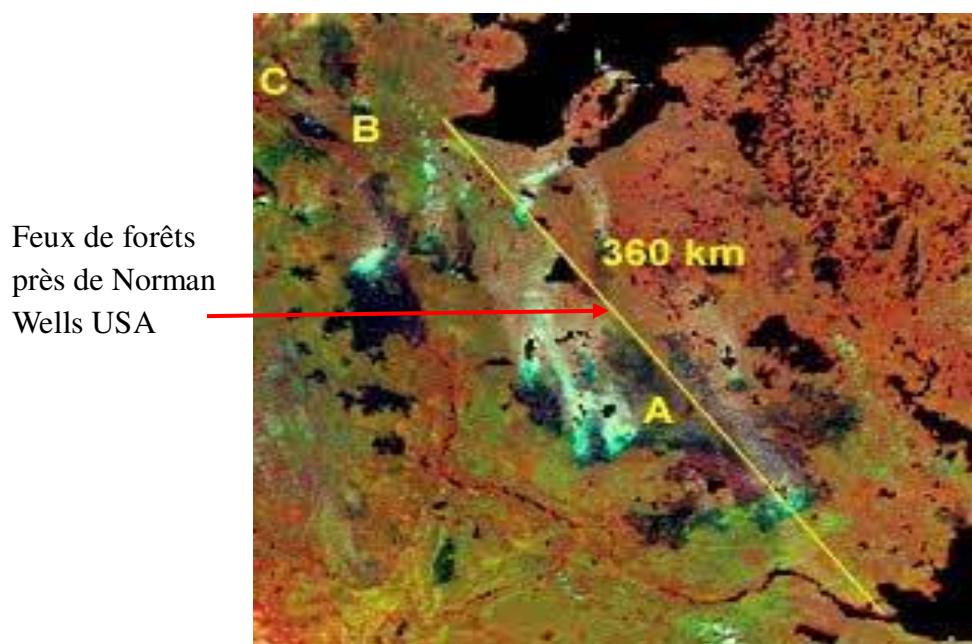
L'importance des forêts comme ressource alimentaire et protectrice, comme habitat, comme pourvoyeur de papier, de matériaux de construction et de combustion ainsi que de plantes médicinales est indéniable. Les forêts jouent également un rôle important dans les réserves et l'équilibre des échanges de CO₂ sur la Terre.

Parmi les applications de la télédétection en foresterie se trouvent :

- Cartographie de coupe à blanc et déforestation.
- Cartographie des zones brûlées.
- Inventaire des forêts.
- Inventaire des espèces.



Cartographies des coupes à blanc et déforestation.



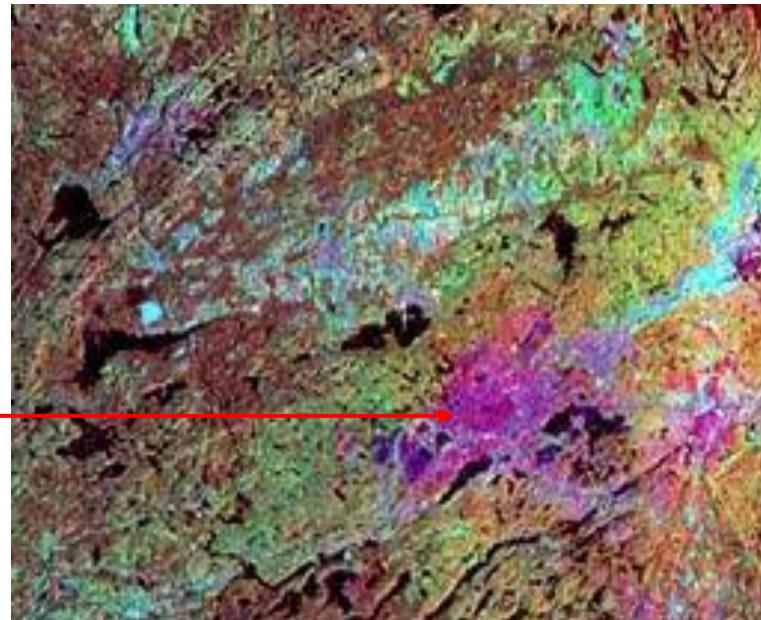
Cartographie des zones brûlées.

1.3. Géologie.

La géologie est l'étude des formes de terrain, des structures et de l'écorce terrestre, et a pour but de comprendre les processus physiques qui modifient la croûte terrestre. Elle est généralement perçue comme étant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales et pétrolières dans le but d'améliorer les conditions de vie de la société.

Voici une liste des principales applications de la télédétection pour la géologie :

- La cartographie lithologique et structurale.
- Exploitation des agrégats (sable et gravier).
- L'exploration pétrolière et minière.
- La géologie environnementale.
- La cartographie et surveillance des taux de sédimentation.
- La cartographie et surveillance des phénomènes naturels.
- La cartographie des risques géologiques.



Les composantes minérales et sédimentaires

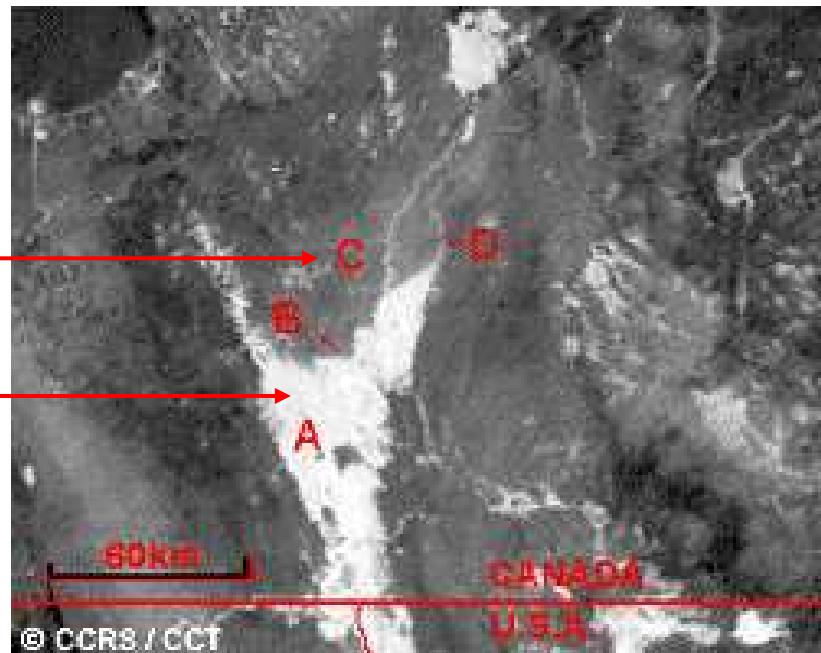
Cartographie et surveillance des taux de sédimentation.

1.4. Hydrologie.

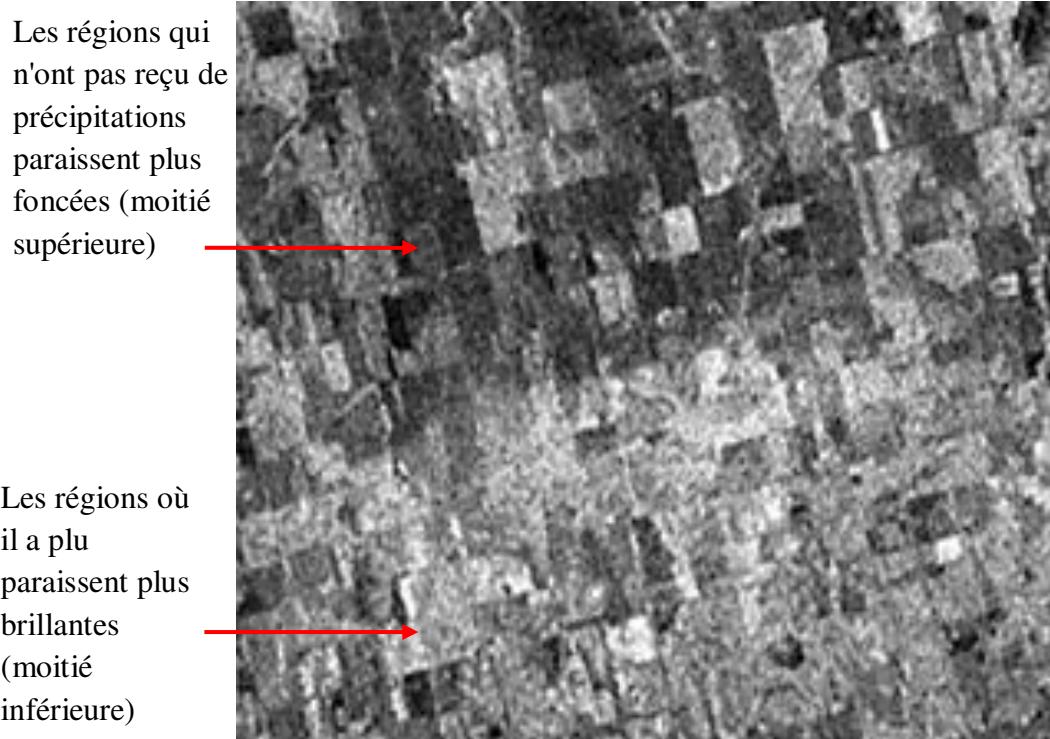
L'hydrologie est l'étude de l'eau sur la Terre, qu'elle coule à la surface, qu'elle soit gelée sous forme de glace ou de neige, ou qu'elle soit emprisonnée dans le sol.

Voici quelques applications hydrologiques :

- La cartographie et la surveillance des marécages.
- L'évaluation de l'humidité du sol.
- La surveillance et la cartographie de l'étendue et l'épaisseur d'une surface de neige.
- La surveillance et la cartographie des inondations.
- La détection des changements dans les rivières et les deltas.
- La détection des fuites des canaux d'irrigation.



Surveillance et la cartographie des inondations.



Evaluation de l'humidité du sol

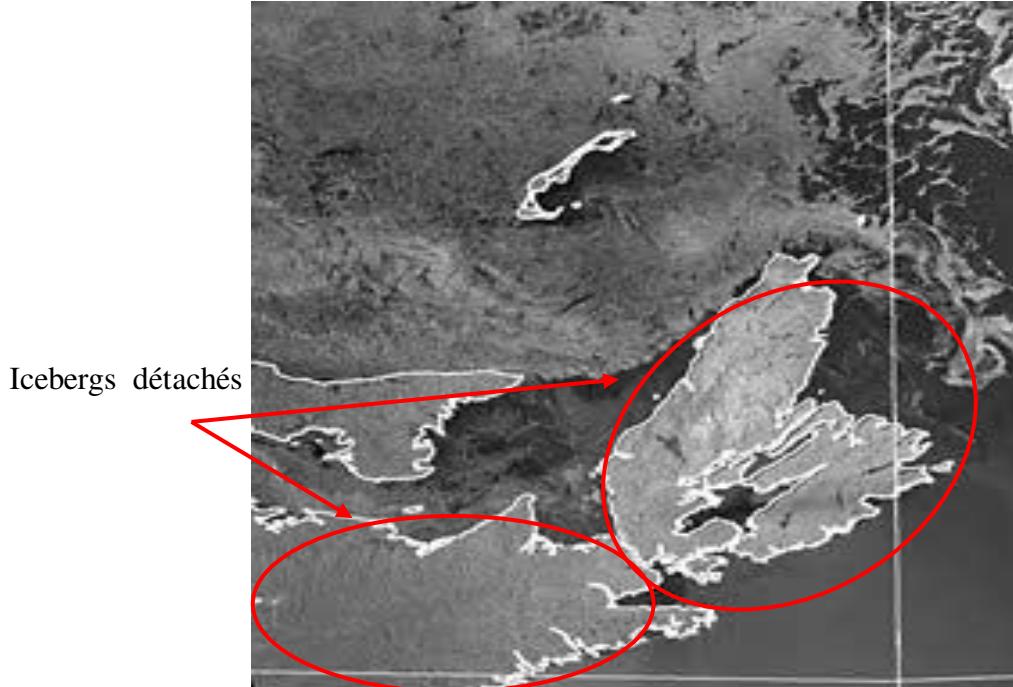
1.5. Glaces océaniques.

La glace recouvre une partie importante de la surface de la Terre et constitue une préoccupation majeure pour les industries de la pêche et du transport maritime, pour la garde côtière, les projets de construction maritime pour les études sur les changements climatiques au niveau du globe.

La glace océanique polaire couvre de façon saisonnière une région égale à la superficie du continent nord américain, soit 25 millions de km².

Voici quelques exemples des applications de l'information sur les glaces de mer :

- La concentration de la glace.
- Le type, l'âge et les mouvements de la glace.
- La détection et la surveillance des icebergs.
- La topographie de surface.
- L'identification des chenaux pour la navigation, le transport et les services de secours.
- L'habitat de la faune.
- La surveillance de la pollution.
- La météorologie et les recherches sur les changements climatiques.
-



Détection et la surveillance des icebergs

1.6. Couverture et l'utilisation du sol.

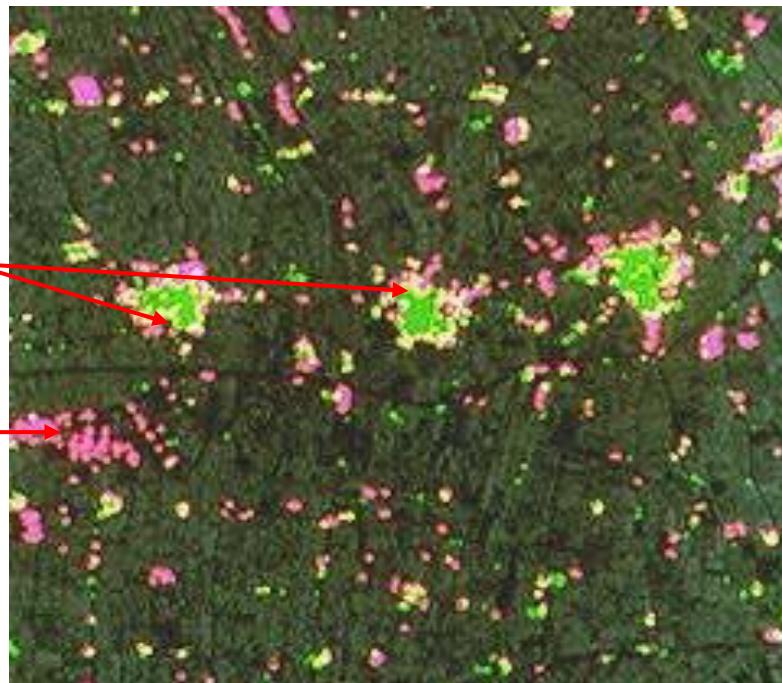
La couverture du sol fait référence à la couverture de la surface sur le sol, que ce soit de la végétation, des infrastructures, de l'eau, le sol nu ou autres.

Voici une liste de quelques applications de la télédétection pour l'utilisation du sol :

- La gestion des ressources naturelles.
- La protection de l'habitat sauvage.
- L'expansion et le développement urbains.
- La délimitation de l'étendue de dommage (tornades, inondations, volcans, tremblements de terre, feux).
- La détection de cibles - l'identification de pistes d'atterrissement, de routes, de clairières, de ponts, de l'interface terre-eau.
-

Les points verts montrent les régions urbaines de 1973

Les points roses montrent les régions urbaines de 1985



Expansion et le développement urbains

1.7. Océans.

En plus de constituer une importante source de nourriture et une immense ressource biophysique, les océans servent aussi de voies de transport, ils sont importants dans la formation des systèmes météorologiques et comme réservoirs à CO₂. Les océans sont un élément majeur dans l'équilibre hydrologique de la Terre.

Voici quelques exemples d'applications aux océans :

Identification des patrons océaniques :

- Courants, patrons de circulation régionale, zones de cisaillement.
- Zones de résurgence, bathymétrie d'eau peu profonde.

Prévisions des tempêtes :

- Évaluation du vent et des vagues.

Évaluations des réserves de poissons et des mammifères marins :

- Surveillance de la température et qualité de l'eau.
- Production océanique, concentration et dérive du phytoplancton.
- Inventaire et surveillance de l'aquaculture.

Déversements d'hydrocarbures :

- Cartographie et prédition de l'étendue et de la dérive des déversements.
- Support stratégique pour la planification des opérations de secours.
- Identification des régions de fuites naturelles pour l'exploration.

Transport maritime :

- Planification de routes.
- Etudes de densité du trafic.
- Surveillance des pratiques de pêche.

Zones intertidales :

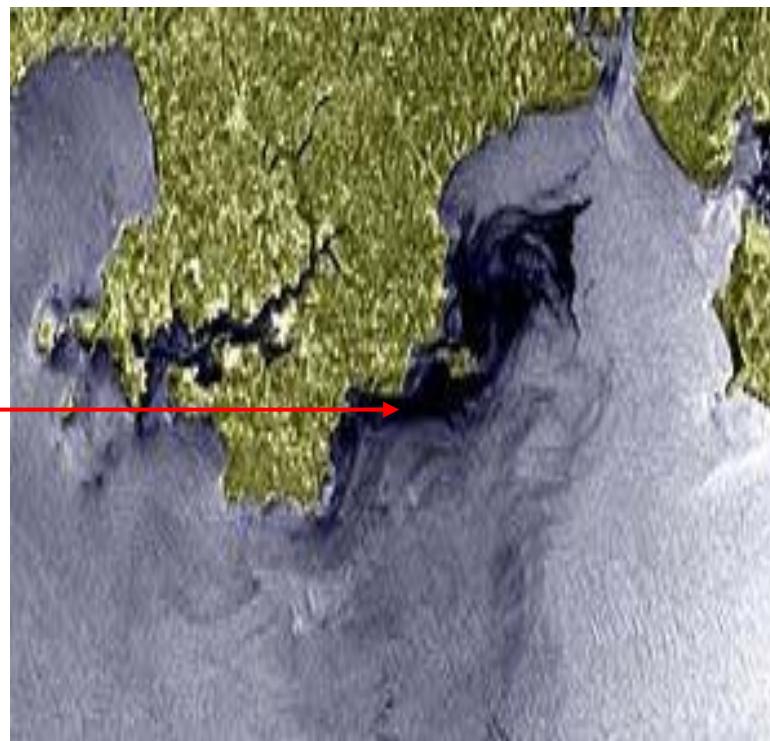
- Effets des marées et des tempêtes.
- Délimitation de l'interface terre-eau.
- Cartographie des éléments côtiers.
- Dynamiques des plages.
- Cartographie de la végétation côtière
- Effet des activités anthropogéniques

Les vagues internes se forment entre les couches d'eau de différentes densités

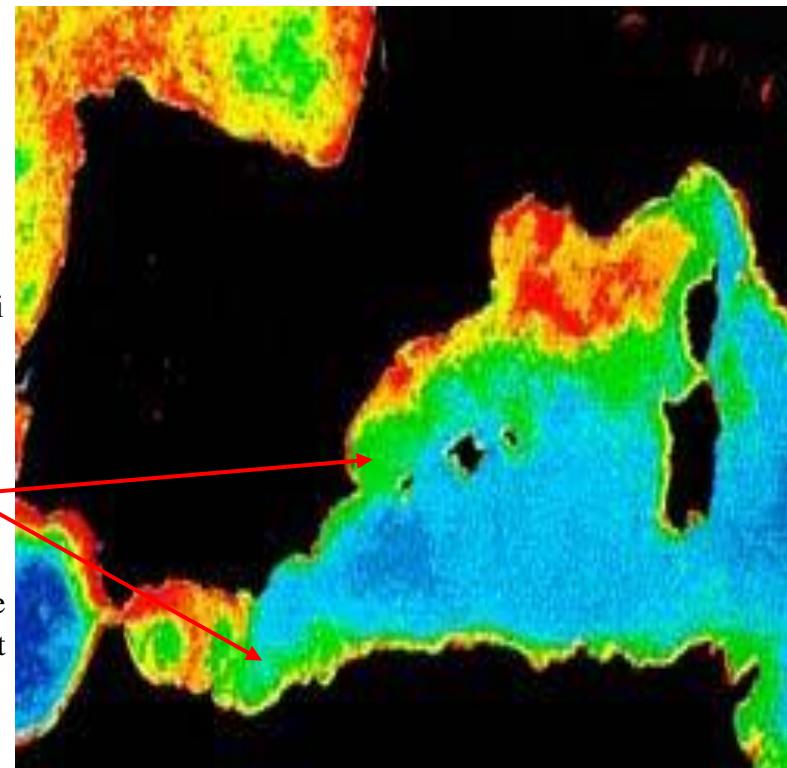


Éléments océaniques

Les tons foncés représentent les régions où le pétrole est présent



Détection de déversements d'hydrocarbures



La chlorophylle, qui absorbe la lumière rouge (ce qui produit la couleur bleu-vert de l'océan), est considérée comme un bon indicateur de la santé de l'océan et de son niveau de productivité

Couleur des océans et les concentrations de phytoplancton.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bavoux, J.J., Chapuis, R., Delmer, S., Mannone, V., Passegue, S. et Volpoet, P., 1998. Introduction à l'analyse spatiale. Edition Armand Colin-95 p.
- Bonn, J. F., & Rochon, G., 1992. Précis de télédétection, vol 1: Principes et méthodes. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec. ISBN: 2-7605-0613-4, 485 p.
- Bonn, J. F., 1996. Précis de télédétection, volume 2 : Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec. ISBN 978-2-7605-0888-0, 648 p.
- Butler, M.J.A.; Mouchot, M-C.; Barale, V.; Le Blanc, C., 1992. Application de la télédétection à la pêche marine: manuel d'initiation. FAO Document technique sur les pêches. No. 295. Rome, FAO. 203 p.
- Caloz, R., Collet, C., 2001. Précis de télédétection - Volume 3 : Traitement numérique d'image de télédétection : Presses de l'Université du Québec. ISBN 9782760516892, 406p.
- Centre canadien de télédétection/ Cours tutoriel Canada (ccrs/cct), 2015. Notions fondamentales de télédétection.
- Kergomard, C., 2019. La télédétection aéro-spatiale : Une introduction. Cours, 1-6 p
- Minvielle, E., Souiah, S.A., 2003. L'analyse statistique et spatiale : statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Editions du temps, 284 p.
- Provencher, L., Maurice Dubois, J. M., 2007. Précis de télédétection, volume 4, Méthodes de photo-interprétation et d'interprétation d'image, Presses de l'Université du Québec (22 octobre 2007) ISBN-10: 2760514854, 504p.
- Walton, G. F., 1989. Centre for Remote Sensing and Spatial Analysis (CRSSA). Rutgers University in New Brunswick, New Jersey.

Sites internet:

<http://astrogap.e-monsite.com/pages/dictionnaire-astrologique/ephemerides.html>

<https://astronomie.skyrock.com/3036283769-Sextant-Sextans.html>

<http://www.crssa.rutgers.edu>

<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-4-spectre-electromagnetique.html>

<https://www.fao.org/3/T0355F/T0355F01.htm#ch1.1>

<https://www.nautic-instruments.nl/fr/autonautic-instrumental/454-autonautic-chronometre-de-marine-en-boite.html>

<https://www.orange-marine.com/content/52-les-radars>

<http://www.riceelectronics.com/marine-radar.html>

<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellite-et-photos-aerielles/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/introduction/9364>

<https://www.sesame-nautic.fr/navigation/regles-de-navigation/regle-jean-cras-evolution.html>

<https://studylibfr.com/doc/3884941/le-sextant---description>