

MODULE 1

- Typologie des images numériques

François Cavayas
GEO2522

TÉLÉDÉTECTION NUMÉRIQUE

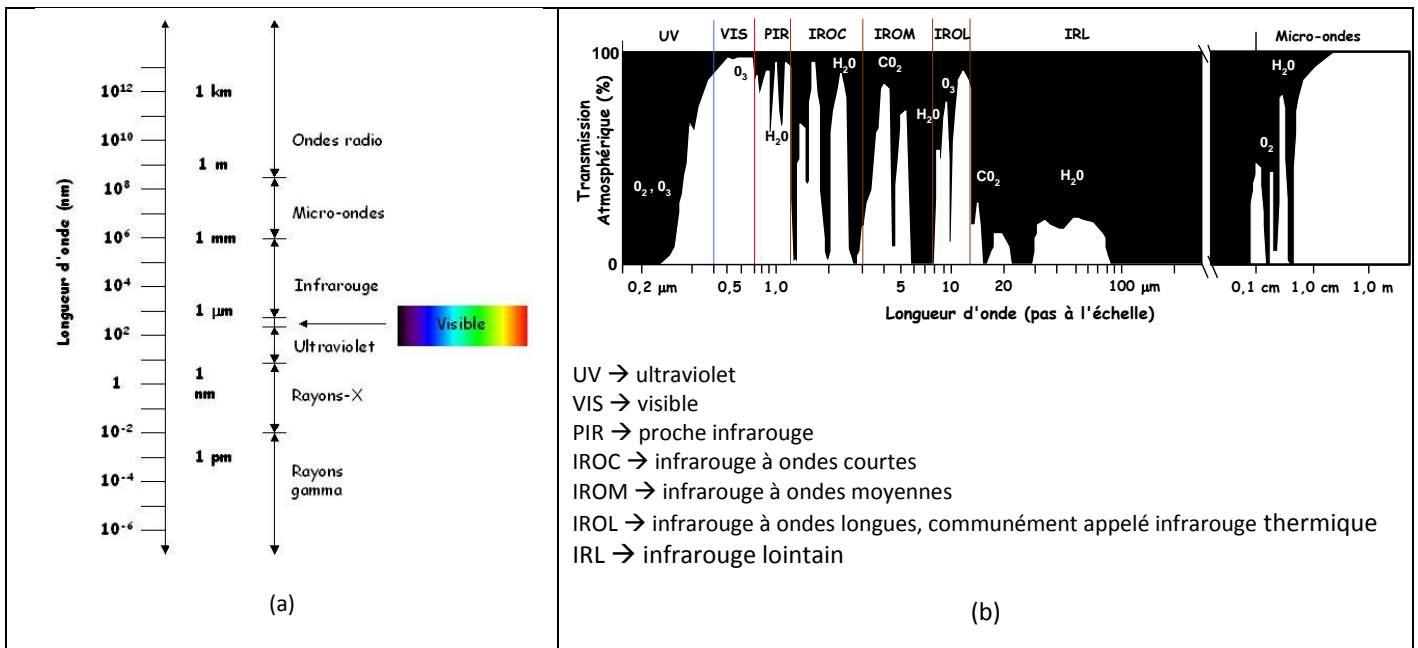
IMAGES NUMÉRIQUES

1 INTRODUCTION

Pris au sens littéral du mot, la télédétection signifie l'action d'acquérir des informations sur un objet ou un phénomène sans que le détecteur soit en contact physique avec l'objet étudié.

Dans son acception actuelle, le terme télédétection désigne ce domaine scientifique et technique dont le but est l'acquisition d'informations sur l'environnement terrestre par le biais de mesures du rayonnement électromagnétique (RÉM) provenant des objets. Les objets peuvent générer soit eux-mêmes du RÉM à cause des processus physiques internes (radioactivité, photoluminescence, agitation thermique) ou après réflexion/diffusion du RÉM provenant d'une source externe (ex. le soleil, un laser, etc.). Les mesures sont prises par des appareils spécialisés, les capteurs, à bord des plates-formes aériennes ou spatiales. Les capteurs modernes codifient leurs mesures de sorte qu'elles soient lisibles directement par ordinateur. Nous parlons ainsi de la télédétection numérique.

Avec l'invention des systèmes de collecte et de détection (mesure) du rayonnement électromagnétique (désormais indiqué RÉM) adaptés à ses différents types (rayons gamma, X et UV; visible et infrarouge; ondes radio) de nouveaux horizons se sont ouverts devant les scientifiques étudiant la nature et les propriétés des corps terrestres et célestes à distance. Pour ceux qui font de la télédétection des corps terrestres, tous les types de rayonnement ÉM ne sont cependant pas accessibles. La principale cause d'inaccessibilité est l'atmosphère terrestre. Les gaz qui la composent absorbent l'énergie électromagnétique ne laissant que quelques « fenêtres atmosphériques » (i.e. des bandes de longueurs d'onde) disponibles (fig. 1).



L'étroite fenêtre atmosphérique dans l'UV (0,3 à 0,4 μm) n'est pas couramment utilisée. Les fenêtres atmosphériques du VIS, du PIR ainsi que les deux fenêtres atmosphériques dans l'IROC sont surtout utilisées pour mesurer le rayonnement solaire réfléchi par les objets (section 2). Parmi les autres fenêtres dans l'infrarouge, seul l'IROL (communément appelé Infrarouge thermique) est couramment utilisée pour mesurer le RÉM émis par les objets mêmes à cause de l'agitation thermique des molécules de leur matière (section 3). Dans les micro-ondes le capteur le plus utilisé est le radar (section 4). Contrairement aux capteurs dédiés à la mesure du rayonnement solaire réfléchi ou du rayonnement émis, le radar possède sa propre source de RÉM. Ce rayonnement est dirigé vers les objets et le radar mesure ce qui est réfléchi par les objets dans sa direction. Les capteurs munis de leur propre source de rayonnement sont appelés **capteurs actifs**, tandis que ceux qui opèrent sur la base du rayonnement qui existe dans la nature, sont appelés **capteurs passifs**.

1.1 QU'EST-CE QU'ON MESURE EN TÉLÉDÉTECTION?

Un capteur de télédétection opérant dans les fenêtres atmosphériques indiquées à la figure 1 mesure la quantité d'énergie ÉM qui provient des objets terrestres à une longueur d'onde ou à un intervalle donné de longueurs d'onde (bande spectrale). Le capteur a besoin des quantités d'énergie suffisante pour effectuer une mesure de qualité du RÉM. La solution est d'observer un objet pendant un court laps de temps appelé **temps de résidence** (le temps d'une pose qu'on appelait en photographie). La quantité d'énergie normalisée pour le temps de résidence c'est le **flux** ou en termes plus techniques **la puissance** du RÉM (tab. 1). C'est la quantité de base mesurée par un capteur. Pour pouvoir généraliser davantage les résultats des mesures il faut s'affranchir des configurations particulières de chaque capteur et des conditions spécifiques lors de l'acquisition des données. Le flux mesuré est ainsi normalisé par unité de surface observée (densité du flux) et par angle solide d'observation (densité du flux par stéradian) ou luminance (tab. 2). Pour des raisons historiques la nomenclature employée dans la partie des ondes micrométriques et la partie des micro-ondes n'est pas la même (tab. 1). Pour ne pas alourdir le texte nous utiliserons désormais le terme flux comme terme générique pour signifier : quantité du RÉM mesurée par un capteur, et nous donnerons le terme spécifique s'il s'avère nécessaire.

Tableau 1 : Quantités radiométriques d'intérêt


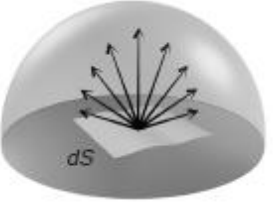
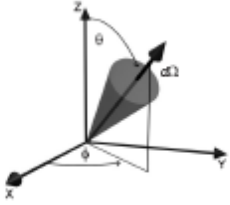
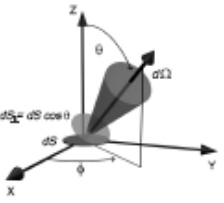
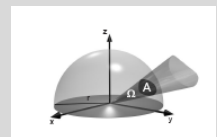
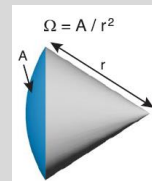
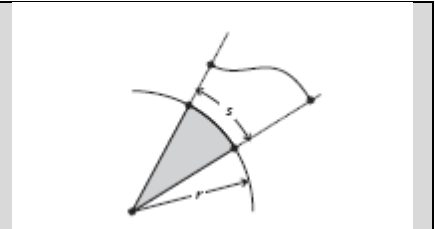
Ondes micrométriques	Micro-ondes	Unités	
Énergie	Énergie	Joule (J)	
Flux	Puissance	Watt (W) = J/sec	
Éclairement (Flux par unité de surface) – RÉM incident à une surface	Densité de puissance (ou de flux)	$W m^{-2}$	
Exitance ou Émittance (Flux par unité de surface)- RÉM sortant d'une surface (réfléchi ou émis)	Densité de puissance (ou de flux)	$W m^{-2}$	
Intensité (Flux provenant d'une source ponctuelle par angle solide)	Intensité	$W sr^{-1}$	
Luminance (Densité de flux par angle solide d'observation ou de réflexion/émission)	Brillance	$W m^{-2} sr^{-1}$	

Tableau 2 Définition d'un angle solide

Un angle plan ϑ est défini comme le rapport de la longueur d'un arc s d'un cercle et le rayon r centré au point de définition : $\theta = \frac{s}{r}$. L'arc peut être considéré comme la projection d'une ligne quelconque sur le plan sur le cercle. Les angles plans sont mesurés en radians (rad). Un angle ϑ quantifie la sous-tendance angulaire d'un segment linéaire vu par le point de définition. Un cercle a une circonférence de $2\pi r$, il sous-tend donc un angle plan de 2π rad.

Un angle solide Ω est défini de manière similaire comme le rapport d'une aire A sur la surface d'une sphère au carré du rayon de la sphère : $\Omega = \frac{A}{r^2}$. L'aire du segment A peut être considérée comme la projection d'une aire de forme quelconque sur la surface de la sphère. Les angles solides sont mesurés en stéradians (sr). Un angle Ω quantifie la sous-tendance angulaire d'une aire 2-D dans l'espace 3-D vue par le point de définition. La surface d'une sphère a une aire de $4\pi r^2$, il sous-tend donc un angle solide de 4π sr. Étant donné une aire de surface A inclinée d'un angle ϑ entre la normale à la surface et une direction de vue, l'angle solide est réduit d'un facteur de $\cos \vartheta$: $\Omega = \frac{A}{r^2} \cos \vartheta$. Les angles plans ou solides définis comme des rapports n'ont pas de dimensions physiques. L'utilisation des unités artificielles rad ou sr est pour éviter des confusions lorsqu'on fait référence à des quantités angulaires.



Le flux d'énergie généré à une longueur d'onde ou une bande spectrale dépend en premier lieu des caractéristiques physicochimiques des objets. Puisque chaque objet ou classe d'objets a ses propres caractéristiques nous pouvons, en principe, en mesurant le flux d'énergie, reconnaître les objets à distance et/ou évaluer leurs caractéristiques. Cependant, dans la pratique, la simple mesure du flux à une longueur d'onde ou une bande spectrale donnée n'a qu'un potentiel informatif limité. Pour accroître ce potentiel on dote souvent le capteur d'un mécanisme de mesure du flux en faisant varier un ou plusieurs paramètres du RÉM. Nous le faisons merveilleusement bien avec notre propre système optique en intégrant trois « mesures » du flux en simultané dans les bandes spectrales du visible : bleu, vert et rouge, et que notre cerveau interprète comme la couleur des objets (section 4). À part les variations du flux dans le spectre, nous pouvons faire varier la polarisation du rayonnement. La polarisation exprime la direction de battement d'une onde électromagnétique. Au spectre et à la polarisation nous pouvons ajouter l'angle d'observation d'un objet ainsi que la phase du rayonnement. Cette dernière a rapport au nombre de cycles accomplis par une onde entre deux moments précis dans le temps, ou, entre deux endroits précis dans l'espace. Cependant il faut noter que la mesure du flux en fonction des différents paramètres du RÉM n'est pas toujours possible. Tout dépend de la nature de la source du RÉM. Parmi les capteurs examinés dans notre cours seul le radar exploite pleinement la polarisation et la phase des ondes. La raison principale est que le radar utilise un rayonnement électromagnétique monochromatique (pratiquement une seule longueur d'onde) dont les propriétés sont contrôlables lors de son émission. Par contre, les autres capteurs opèrent sur la base d'un RÉM polychromatique (plusieurs longueurs d'ondes) dont les propriétés ne sont pas contrôlées lors de son émission (polarisation aléatoire).

Un dernier paramètre nos négligeable pour certains types d'application de la télédétection est le temps d'observation. À titre d'exemple, le flux du rayonnement émis dans l'infrarouge thermique suit le cycle d'échauffement – refroidissement journalier des objets en fonction du cycle journalier du soleil. Chaque objet présente son propre cycle. En observant les objets à différents moments pendant une journée il est donc possible de restituer ce cycle et de là reconnaître les objets et comprendre leurs caractéristiques. Les espèces végétales (naturelles ou cultivées) ont pour leur part leur propre cycle de croissance pendant une année. Puisque les caractéristiques physicochimiques de la végétation changent dans le temps ainsi va le flux provenant de la végétation. En multipliant les observations du même objet pendant l'année il est donc possible d'acquérir des informations intéressantes sur cet objet. C'est le même principe que l'on applique lorsque nous voulons « traquer » un objet (ex. mouvements d'icebergs) ou suivre l'évolution d'un phénomène (ex. inondations) ou encore détecter les changements pluriannuels des paysages.

1.2 C'EST QUOI UNE IMAGE NUMÉRIQUE DE TÉLÉDÉTECTION?

Un capteur peut être doté d'un mécanisme lui permettant de créer une « image » numérique des flux provenant d'une surface entière. La formation de cette image est le résultat d'un double échantillonnage : un échantillonnage spatial ainsi qu'un échantillonnage électronique. L'opération de l'échantillonnage spatial peut être vue comme suit dans le cas le plus simple d'un capteur passif. Une grille « imaginaire » est projetée par le capteur sur la surface de l'objet dont on veut acquérir une image. Cette grille couvre entièrement la surface de l'objet sans laisser des trouées (échantillonnage exhaustif). Chaque point de la grille constitue un point d'échantillonnage spatial. Le RÉM provenant de chaque point de la grille passe à travers le système de collecte du capteur et est dirigé (focalisé) à un endroit précis où se trouve le détecteur. Ce dernier est constitué d'un matériau photosensible. Le RÉM interagit avec les particules de ce matériau. Si son énergie est suffisante elle peut causer la libération des électrons de la structure cristalline du détecteur. Le flux des électrons libérés constitue un courant électrique dont le voltage varie

en fonction du nombre d'électrons libérés qui, à son tour, est fonction de la quantité du rayonnement électromagnétique collecté par chaque point de la grille. Ce courant faible après amplification et conditionnement passe par les circuits complexes d'un convertisseur analogique-numérique où des mesures du voltage sont prélevées à des intervalles de temps constants. Cette cadence d'échantillonnage électronique est calculée de sorte que chaque mesure prélevée représente le flux du rayonnement provenant d'un point spécifique de la grille. Les mesures prélevées sont codifiées de sorte qu'elles soient lisibles directement par ordinateur. Voyons avec un peu plus de détails tout ce processus de formation d'une image numérique.

1.2.1 L'échantillonnage spatial

L'opération de l'échantillonnage spatial s'enclenche à intervalle de temps constant pendant que la plate-forme (section 1.3) se déplace le long de sa trajectoire de vol. Nous pouvons ainsi parler des stations d'échantillonnage pour désigner les positions du capteur où cette opération est enclenchée. À chaque station, le capteur « prélève » un certain nombre d'échantillons, chaque échantillon comprenant le flux qui lui parvient d'une parcelle de surface précise, que nous appellerons désormais *unité d'échantillonnage* (UÉ) (fig. 2). Les différents capteurs utilisés en télédétection opèrent sur la base d'une UÉ dont la taille varie de quelques cm² à quelques km². Le temps de prélèvement des échantillons par station est tellement court (millièmes de seconde) que nous pouvons considérer sans erreur appréciable que, entre-temps, la plate-forme est restée immobile. Le plus souvent les échantillons sont prélevés selon deux axes orthogonaux, l'un est tenu perpendiculaire à la trace au sol de la trajectoire de vol (axe transversal) et l'autre nécessairement parallèle à cette dernière (axe longitudinal ou azimutal). L'échantillonnage est exhaustif dans le sens que les UÉ couvrent l'entièreté de la surface visée (en gris dans la figure 2). Les modes de prélèvement d'échantillons spatiaux sont fondamentalement de deux types : le balayage et l'instantané (fig. 3).

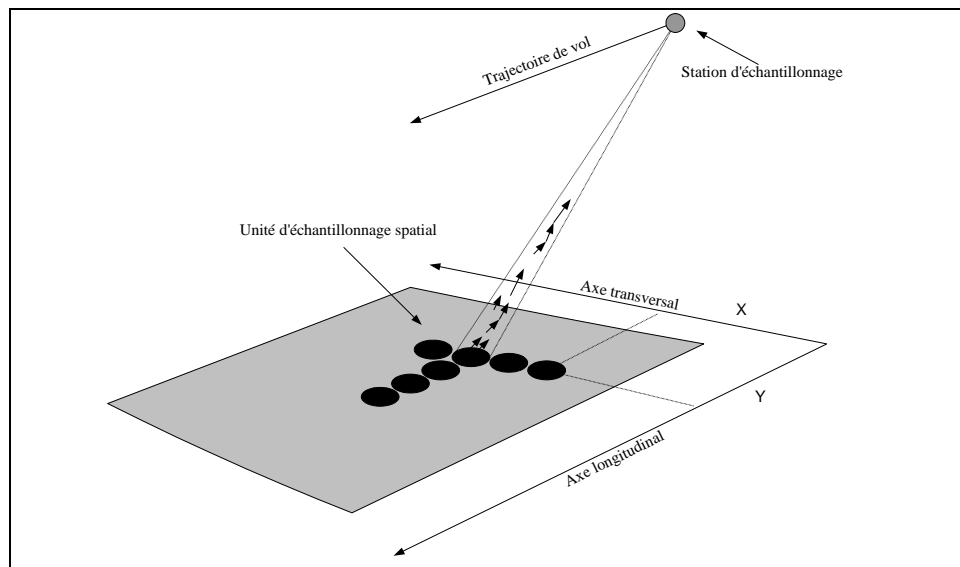


Figure 2 Prélèvement d'échantillons spatiaux du RÉM par un capteur imageur

Les capteurs passifs peuvent opérer selon les deux modes. En mode balayage (fig. 3b), par station, ils prélèvent leurs échantillons seulement selon l'axe transversal (fig. 2), on parle alors d'une *ligne de balayage*. La longueur de cette ligne (ou *fauchée*) peut être de plusieurs kilomètres tandis que sa largeur

est celle d'une UÉ, donc aussi petite que quelques centimètres. En multipliant les stations d'échantillonnage il est possible de créer des lignes de balayage juxtaposées et ainsi construire dynamiquement l'image entière de la surface survolée. Les capteurs opérant en mode instantané sont capables de prélever des échantillons dans les deux axes à la fois, et de créer ainsi une image instantanée de la surface survolée par station d'échantillonnage (fig. 3c). Que ce soit selon l'un ou l'autre des modes, le système de collecte du capteur, possède un mécanisme approprié pour pouvoir séparer par station d'échantillonnage le rayonnement provenant de la surface survolée selon sa *direction d'arrivée* au système de collecte. Chaque capteur a sa propre résolution angulaire dans les deux axes de référence en deçà de laquelle la séparation du rayonnement selon sa direction est impossible. C'est justement cette résolution angulaire (le cône imaginaire de la figure 2) et la distance séparant le capteur du sol qui définissent la taille de l'UÉ.

Les **capteurs actifs** utilisés en télédétection, comme le radar que nous verrons dans notre cours, opèrent en mode balayage (fig. 3a). Toutefois, la façon de former un échantillon spatial diffère de celle des balayeurs passifs. Ils utilisent, en effet, un mécanisme pour séparer le rayonnement selon le *temps d'arrivée* au système de collecte et non pas selon sa *direction d'arrivée* comme dans le cas passif. Par station d'échantillonnage, une impulsion EM est émise et aussitôt un chronomètre se met en marche. Puisque le RÉM se propage à vitesse constante et la distance qui sépare un point au sol du capteur varie d'un endroit à l'autre, les ondes après avoir parcouru la distance capteur-sol et, après réflexion, sol-capteur (voyage aller-retour), arriveront au capteur à des moments différents après l'émission de l'impulsion. La dimension de l'UÉ dans l'axe transversal est fonction de l'intervalle du temps entre deux mesures consécutives du chronomètre et de la distance qui sépare le capteur du sol. Dans l'autre axe, la dimension de l'UÉ dépend de la résolution angulaire du système de collecte (l'antenne dans le cas du radar) comme dans le cas passif. Toutefois, comme nous le verrons plus loin, les radars modernes sont capables d'échantillonner le RÉM selon des unités spatiales beaucoup plus fines dans la direction longitudinale en utilisant une technique spéciale appelée synthèse d'une antenne.

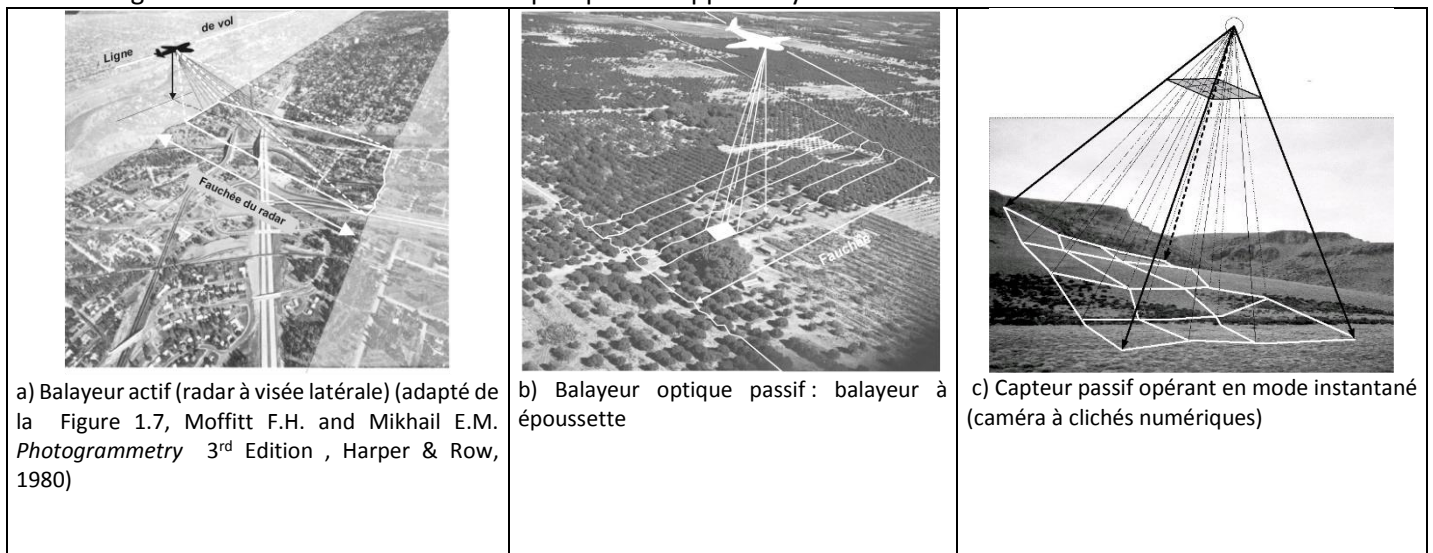


Figure 3 Les deux modes d'échantillonnage spatial du RÉM (balayage, instantané) par les capteurs imageurs

1.2.2 L'échantillonnage électronique

Par station d'échantillonnage, le RÉM collecté échantillon par échantillon est transformé par le système de détection en un signal électrique continu. Le système de détection comprend un ensemble de circuits

et des dispositifs électroniques qui conditionnent le signal électrique (amplification, filtrage, etc.) à un niveau approprié pour la prise de mesures. Le signal électrique conditionné passe enfin par le convertisseur analogique-numérique. Il s'ensuit un échantillonnage à fréquence fixe de ce signal et la mesure de son voltage selon une échelle numérique relative ou *échelle de niveaux de gris* (fig. 4). Nous parlons aussi de la *numérisation* ou de la *quantisation* du signal. Cette échelle est exprimée en nombre de bits d'information. Un autre terme employé surtout dans le commerce pour signifier ce nombre est la *profondeur du pixel*. Ainsi à une profondeur de 6 bits, un échantillon peut prendre une valeur (niveau de gris ou compte numérique) de 0 à 63 pour un total de 64 valeurs ($2^6=64$); à une profondeur de 8 bits, les valeurs varient entre 0 et 255 ($2^8=256$); à une profondeur de 16 bits, l'échelle de teintes de gris varie de 0 à 65 535 ($2^{16}=65\,536$). Les capteurs de télédétection utilisent surtout les 8 bits mais la tendance actuelle est pour plus de bits.

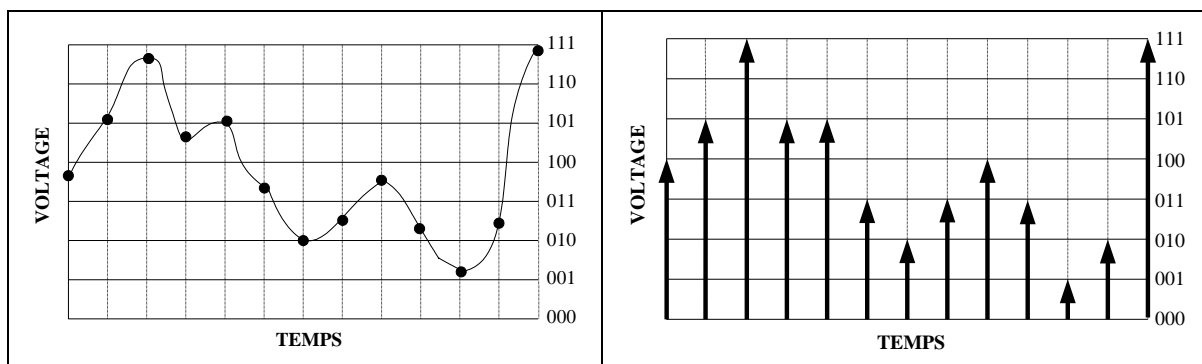
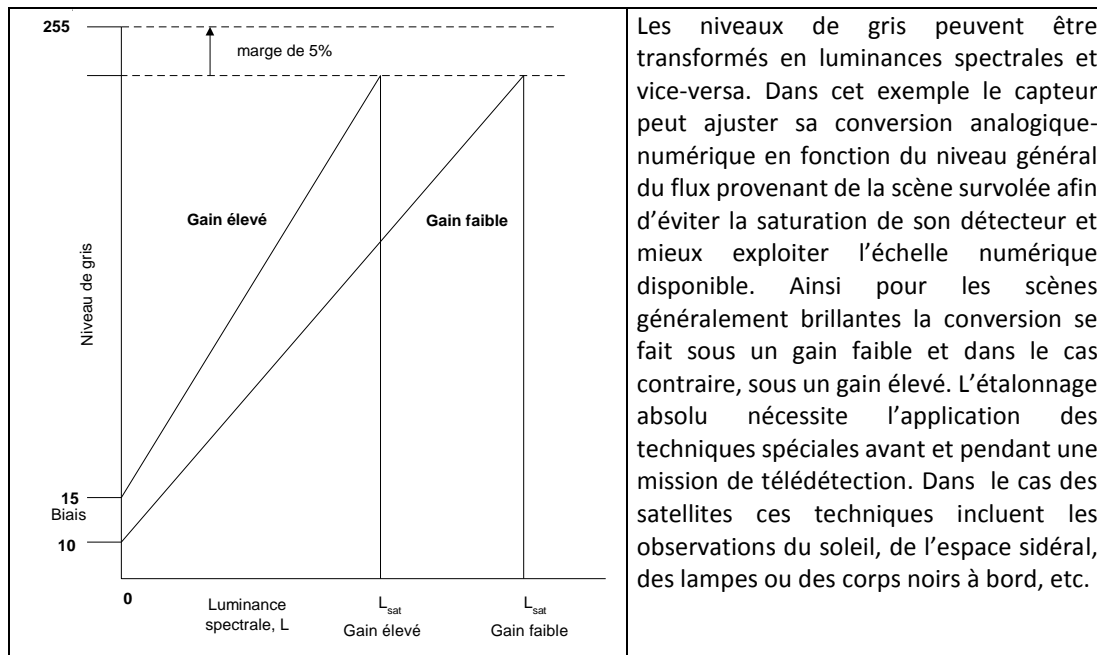


Figure 4 Conversion analogique-numérique : a) le signal analogique est échantillonné à fréquence fixe, ici 13 échantillons prélevés; b) la valeur attribuée à chaque échantillon est exprimée selon une échelle de gris, ici échelle de 3 bits ($2^3=8$ niveaux de gris possibles de 0 à 7). La séquence des valeurs numériques prélevées (échelle décimale) serait dans ce cas : 4-5-7-4-4-3-2-3-4-3-1-2-7

La correspondance entre la valeur numérique mesurée et le flux du RÉM collecté par échantillon spatial se fait via le processus de *l'étalonnage (absolu) du capteur* (figure 5). L'étalonnage est nécessaire pour toute étude de télédétection visant notamment : a) l'estimation des propriétés biophysiques des objets au sol (humidité des sols, biomasse végétale, etc.) ou b) l'analyse d'une séquence d'images (temporelle, spatiale, angulaire) prises par le même capteur.



Les niveaux de gris peuvent être transformés en luminances spectrales et vice-versa. Dans cet exemple le capteur peut ajuster sa conversion analogique-numérique en fonction du niveau général du flux provenant de la scène survolée afin d'éviter la saturation de son détecteur et mieux exploiter l'échelle numérique disponible. Ainsi pour les scènes généralement brillantes la conversion se fait sous un gain faible et dans le cas contraire, sous un gain élevé. L'étalonnage absolu nécessite l'application des techniques spéciales avant et pendant une mission de télédétection. Dans le cas des satellites ces techniques incluent les observations du soleil, de l'espace sidéral, des lampes ou des corps noirs à bord, etc.

Figure 5 Représentation graphique de la fonction (linéaire) d'étalonnage absolu établie pour le capteur ETM+ du satellite Landsat-7.

1.2.3 L'image comme un fichier numérique

Le résultat de ce double échantillonnage (spatial et électronique) est une image numérique qui n'est en fait rien d'autre qu'un tableau ordonné, une matrice, de nombres entiers. Chaque élément de la matrice (le pixel) représente le rayonnement mesuré et codifié provenant d'un point spécifique de la grille de l'échantillonnage spatial. Cependant le mode d'échantillonnage électronique et une foule de traitements post-acquisition font en sorte que l'image disponible à l'utilisateur ait des pixels dont la localisation et/ou les dimensions ne correspondent pas exactement aux unités spatiales d'échantillonnage initial. C'est pourquoi on parle souvent du **pixel au sol** pour décrire la correspondance entre image et la surface (quelque chose d'analogue à l'échelle d'une photographie). Cette matrice est contenue dans un fichier numérique et ses éléments disposés selon les spécifications d'un format quelconque dédié au stockage d'images (jpg, tiff, etc.).

Pour visualiser le contenu d'une image on peut utiliser le moniteur de l'ordinateur ou une imprimante. En modulant la brillance du spot lumineux d'un moniteur d'ordinateur en fonction de la valeur numérique de chaque élément du tableau nous pouvons visualiser cette matrice dans le sens d'une image conventionnelle en noir et blanc (fig. 6). Si le capteur acquiert des images à composantes multiples, l'image disponible à l'utilisateur comprendra autant de matrices que des composantes. Nous pouvons visualiser chaque composante comme une image en noir et blanc ou en choisir trois et les visualiser sous forme d'un composé couleur comme il sera question plus loin. La combinaison de trois images monochromes acquises en simultanément par le capteur produit la sensation visuelle de la couleur. Cette combinaison peut se matérialiser grâce à la carte graphique d'un ordinateur et son moniteur couleur. Chaque image est alors « colorisée » suivant les trois couleurs additives : le bleu, le vert et le rouge. La modulation relative de chacune des couleurs additives par la brillance des images monochromes peut ainsi créer des millions de combinaisons qui sont perçues par l'œil comme des couleurs différentes (tonalité, saturation, brillance).

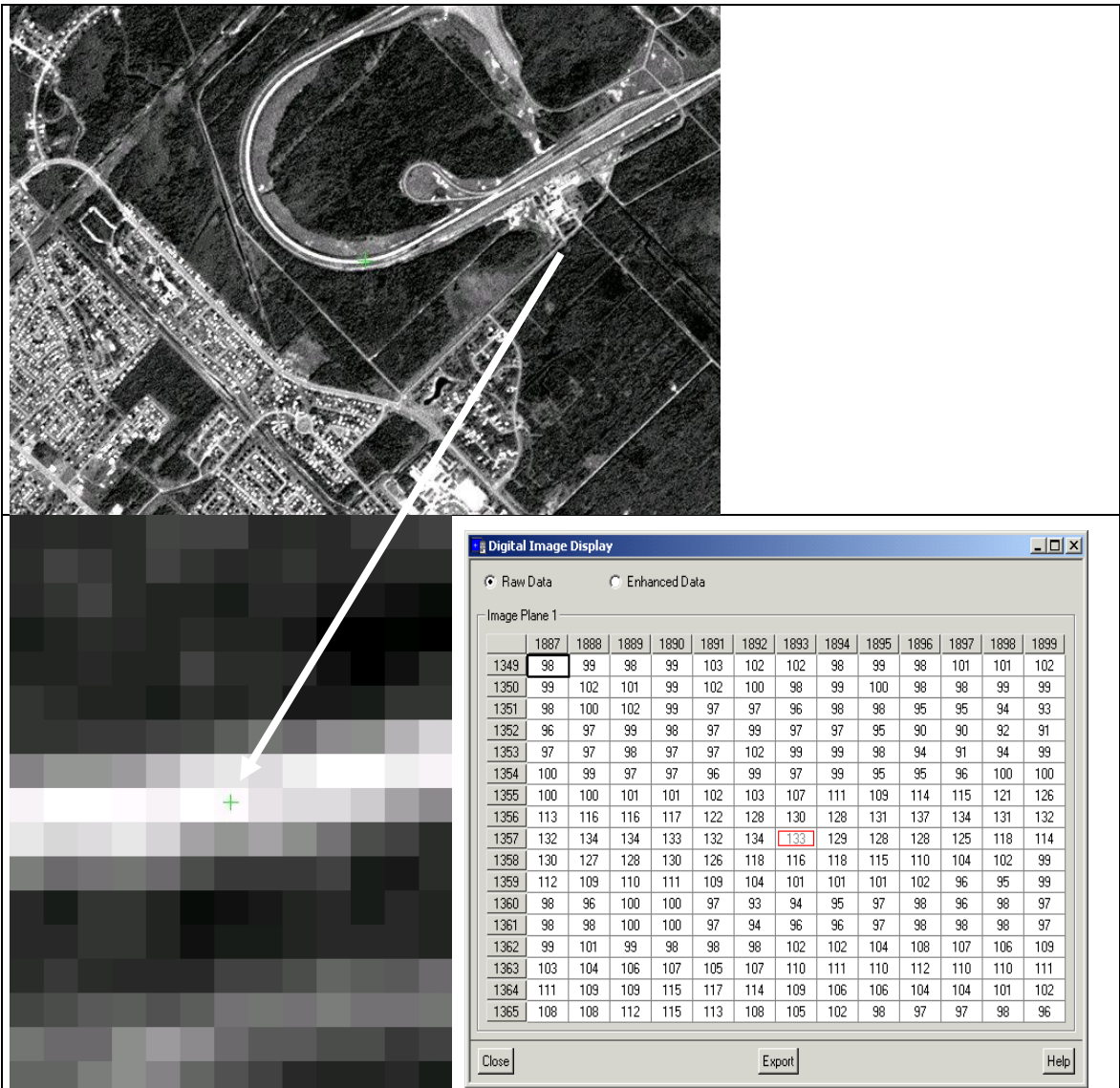


Figure 6 L'image numérique n'est rien d'autre qu'un tableau ordonné de nombres entiers. Une fois l'image affichée ou imprimée dans le sens conventionnel d'une image nous pouvons l'analyser selon les principes de l'interprétation manu-visuelle. En appliquant des principes mathématiques et statistiques appropriés nous pouvons également la traiter par ordinateur.

1.3 LES PLATES-FORMES DE TÉLÉDÉTECTION

Les plates-formes les plus utilisées pour supporter les opérations d'acquisition d'images sont les avions et les satellites automatiques.

En principe tout avion peut être aménagé afin de recevoir les capteurs et les autres instruments de support à l'acquisition d'images. Le choix d'un type d'avion pour la réalisation d'une mission de télédétection dépend de plusieurs paramètres comme le plafond de vol et le rayon d'action. Généralement nous classons les avions selon le plafond de vol qu'ils autorisent en trois catégories (tab. 3). Ce sont des plates-formes flexibles quant au choix des conditions ambiantes et du moment de survol tout en permettant l'accès à l'instrumentation par l'opérateur. Le survol proche de la surface terrestre permet d'obtenir d'images d'une grande finesse du détail avec des capteurs relativement simples de fabrication. Cependant ce rapprochement de la surface terrestre empêche de couvrir par une seule image un territoire étendu. Il faut donc multiplier les passages pour pouvoir le couvrir adéquatement. Il s'ensuit souvent la création d'une foule d'images indépendantes qu'il faut par la suite raccorder d'une certaine manière (aérotriangulation, mosaïquage), ce qui n'est pas toujours une sinécure. En étant des plates-formes sensibles aux conditions de vent ou de turbulence, surtout les avions à basse et à moyenne altitude, la qualité des images peut parfois présenter des sérieux défauts, difficiles à corriger. Il faut noter cependant, que l'intégration des GPS avec les systèmes inertiels dans les opérations d'acquisition d'images permet actuellement de reconstituer avec grande exactitude la position du capteur au moment de l'acquisition des données, ce qui facilite et allège les opérations des traitements géométriques de l'imagerie. Avec l'arrivée massive des satellites automatiques, les avions sont de plus en plus limités à des survols systématiques pour la prise clichés numériques. Avec les autres capteurs numériques les survols se font *ad hoc* pour répondre à des besoins spécifiques ou pour faire des expériences avec des nouveaux capteurs avant de les utiliser à bord de satellites.

Tableau 3 Caractéristiques des avions utilisés comme plates-formes de télédétection

Paramètres	Types d'avions		
	À plafond bas	À plafond moyen	À plafond haut
Altitude	< 9km	9 km - 15 km	> 15km
Vitesse au sol Minimale Maximale	~100 km/h entre 250-500 km/h	~150km/h entre 600 -1000 km/h	entre 800-4000 km/h
Stabilité	Modérée	Modérée à élevée	Élevée
Rayon d'action	< 2500 km	< 5000 km	< 6000 km
Couverture des images	Limitée (< 1000 km ²)	Moyenne	Large (>1000 km ²)
Contraintes	Opération à partir de n'importe quel site	Opération à partir des aéroports	Opération à partir des grands aéroports
Coûts d'opération	Faibles	Modérés	Importants

Parmi les satellites automatiques, ceux dits à orbite terrestre basse ou à défilement sont d'intérêt pour notre cours. L'altitude orbitale varie entre 200 et 1500 km de la surface de la Terre. La plupart de ces satellites suivent une orbite quasi polaire et presque circulaire (fig. 7a). La quasi-circularité de l'orbite assure une échelle constante des images tandis qu'une orbite quasi-polaire assure : a) une couverture systématique de la presque totalité de la surface terrestre, b) une récurrence d'acquisition d'images au-

dessus du même territoire avec une fréquence fixe, et c) l'héliosynchronisme. Cette dernière propriété permet de conserver un angle constant entre le plan orbital du satellite et la direction Terre-Soleil (fig. 7b). Pour les missions utilisant des capteurs opérant dans le spectre solaire, l'héliosynchronisme garantit une illumination solaire presque constante du même territoire pendant une saison donnée lors des passages du satellite. Pour d'autres missions, l'héliosynchronisme garantit un approvisionnement électrique adéquat par l'exposition presque constante au soleil des panneaux solaires. C'est le cas des missions utilisant des capteurs actifs comme les radars. Une orbite héliosynchrone qui optimise cette exposition est celle dite orbite crépusculaire où l'orbite reste à la limite entre la face éclairée et la face cachée de la Terre. Un exemple des satellites suivant ce type d'orbite sont les satellites canadiens de la série RADARSAT.

Même si le satellite gravite autour de la Terre en demeurant sur un plan orbital incliné d'un angle donné par rapport à l'équateur, il n'est pas de même par sa trace au sol parce que la Terre tourne (fig. 7c). Un satellite à orbite basse se déplace à une vitesse au sol de l'ordre de 7 km/sec et peut exécuter quelques 14 révolutions autour de la Terre par jour. Lors d'une révolution, le segment de l'orbite où le satellite se dirige du pôle nord vers le pôle sud nous l'appelons le segment descendant de l'orbite. L'autre segment (du pôle sud vers le pôle nord) s'appelle le segment ascendant de l'orbite. La plupart des satellites héliosynchrones passent au-dessus de la face éclairée de la Terre en orbite descendante et croisent l'équateur entre 10 et 11 heures locales, à l'exception des orbites crépusculaires où l'heure de passage se situe entre les 5 et 6h le matin (fig. 7d). D'autres plans d'orbite peuvent être choisis afin d'augmenter la fréquence de récurrence du satellite au-dessus du même territoire dans une zone restreinte en latitude autour de l'équateur, au détriment de l'héliosynchronisme et de la couverture systématique de l'ensemble de la surface terrestre. Il est à noter que plusieurs satellites intègrent maintenant des GPS afin de mieux préciser leur position dans l'espace. Ces informations, comme dans le cas aéroporté, facilitent et allègent considérablement les traitements géométriques des images surtout celles destinées à la cartographie de précision.

Un atout indéniable des satellites est l'acquisition systématique d'images au-dessus du même territoire. L'intervalle de temps entre deux acquisitions successives constitue la **résolution temporelle nominale** du capteur. Supposons qu'un satellite héliosynchrone croise l'équateur en orbite descendante à un endroit précis à une longitude disons 60°W . Après avoir complété une révolution autour de la Terre, il repasse au-dessus de l'équateur (fig. 7d et 7e). Pendant ce temps-là, la Terre a tourné autour de son axe dans une direction ouest-est en raison de 15° par heure. Si l'on admet que le satellite complète sa révolution à 1h30' approximativement, il croisera maintenant un endroit qui se trouve à $22,5^{\circ}$ environ à l'ouest de notre localité, soit à $82,5^{\circ}\text{W}$. En supposant une Terre sphérique de 6371 km de rayon, $22,5^{\circ}$ en longitude signifient $22,5^{\circ} \times 111 \text{ km}/1^{\circ} = 2498 \text{ km}$ environ. Ainsi entre deux croisements successifs de l'équateur il y a une « trouée » de 2498 km. Nous comprenons donc qu'un certain nombre de révolutions est nécessaire pour que le satellite couvre ces trouées avant que le même endroit qu'il a croisé au départ (à 60°W dans notre exemple) soit maintenant croisé de nouveau par le satellite en orbite descendante. Ce nombre de révolutions diminue au fur et à mesure que la latitude augmente. En effet la distance entre deux croisements successifs du parallèle de 60° est la moitié de celle à l'équateur ($22,5 \times 111 \text{ km}/1^{\circ} \times \cos 60^{\circ}$). Il est certain qu'un capteur avec une fauchée de 200 km comblera beaucoup plus rapidement les trouées qu'un capteur à 11 km de fauchée peu importe le parallèle examiné. Mais, comme nous le verrons plus tard, à l'état actuel des choses plus la fauchée est grande plus la résolution spatiale est grossière. Il existe actuellement deux solutions pour contourner ce problème et ainsi augmenter la résolution temporelle tout en maintenant la finesse de la résolution spatiale. La première solution est de doter le capteur avec une capacité de modification de sa direction de visée (dépointage, satellite agile). Ainsi même si le satellite ne croise pas notre endroit, une visée oblique à l'est et/ou à l'ouest de la trajectoire du satellite

peut rendre la résolution temporelle aussi fine que 1 à 2 jours pour cet endroit précis. La deuxième solution est la constellation des satellites. Pour les satellites munis des capteurs dont l'opération ne dépend pas de la présence du rayonnement solaire, la résolution temporelle est par définition plus fine puisque le satellite peut acquérir des données aussi bien en orbite descendante qu'en orbite ascendante (fig. 7d).

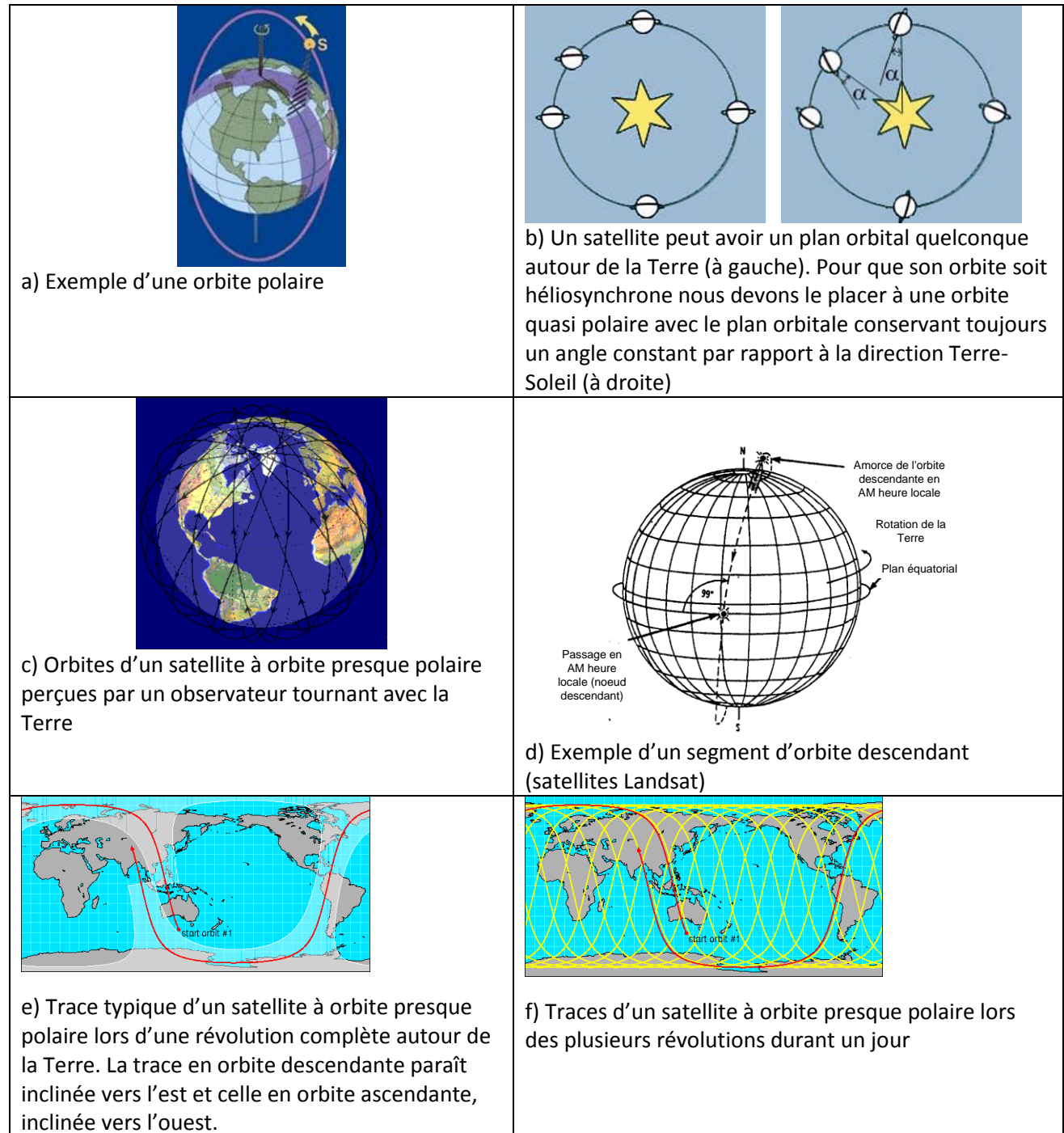


Figure 7: Caractéristiques d'une orbite quasi-polaire et héliosynchrone.

2.1 FORMATION DES IMAGES : BASES DE PHYSIQUE

Le cycle du rayonnement solaire détecté par un capteur à bord d'un avion ou d'un satellite est le suivant (fig. 8) :

- (1) Le rayonnement émis par le soleil arrive aux confins de l'atmosphère terrestre après avoir parcouru une distance d'environ 150 000 000 km (à la vitesse de propagation du RÉM de 3×10^8 m/sec, cette distance est parcourue en moins de 9 minutes);
- (2) il traverse l'atmosphère en interagissant avec les constituants atmosphériques;
- (3) il atteint la surface terrestre où il interagit avec les objets; une portion de ce rayonnement est réfléchié dans la direction d'un capteur
- (4) il atteint le capteur aéroporté après avoir traversé une certaine couche atmosphérique, ou
- (5) il atteint le capteur satellital après avoir traversé l'atmosphère dans son ensemble.

Quelques détails sur ce transfert radiatif sont donnés par la suite.

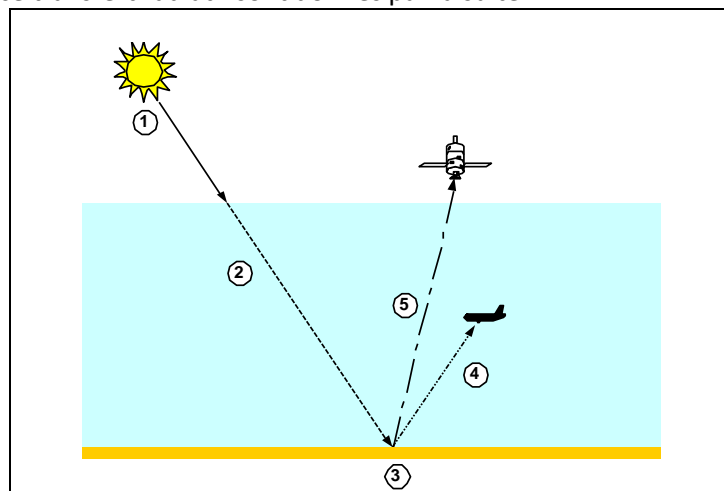


Figure 8 : Transfert radiatif du rayonnement solaire

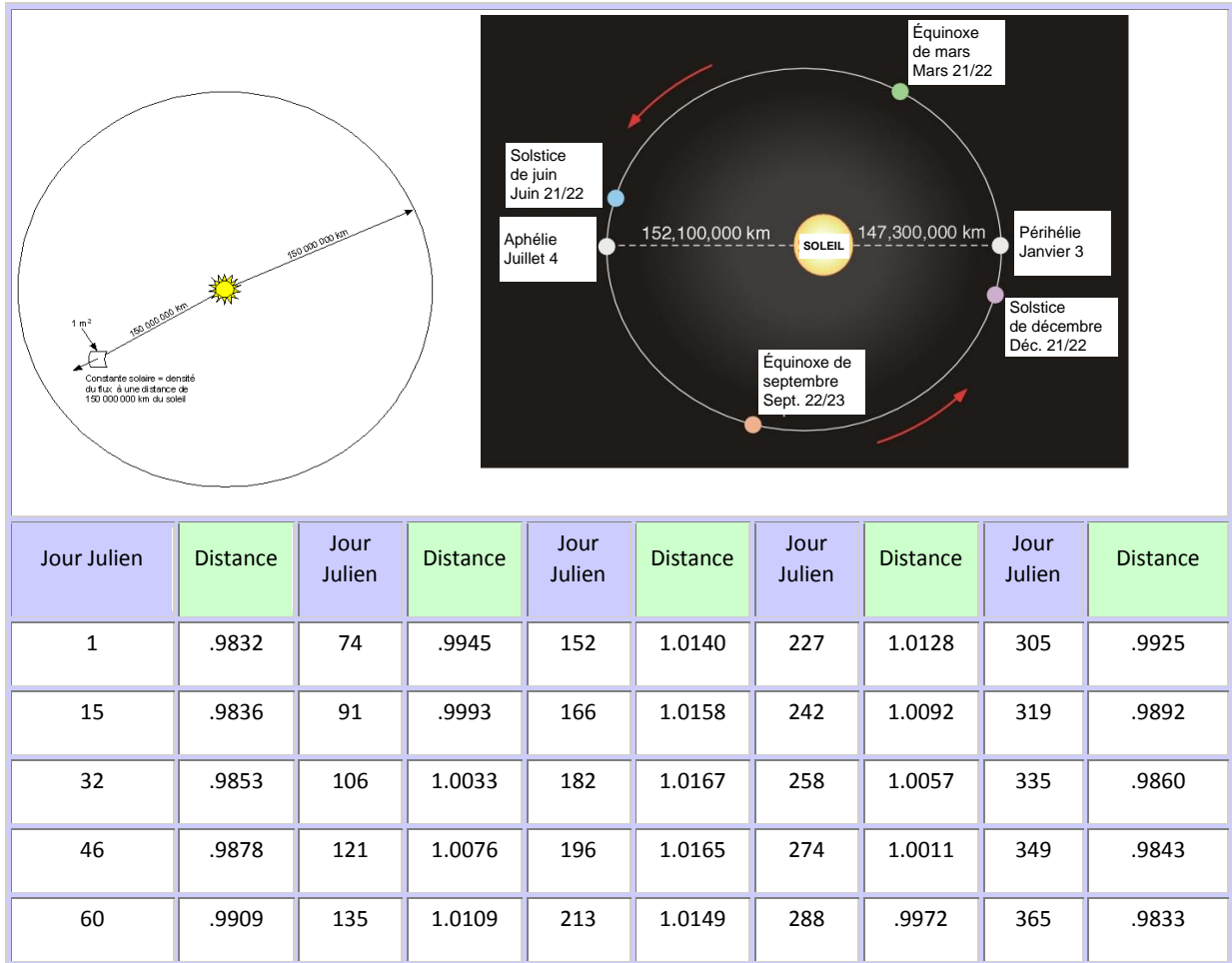
2.1.1 Le soleil comme source de RÉM



Le rayonnement solaire nous parvient de la couche externe du soleil, la photosphère. L'émission du rayonnement est pratiquement stable dans le temps. La température moyenne de la photosphère est évaluée à 5900 K. Selon la théorie d'émission du rayonnement par une source incandescente (section 3), à cette température, la densité du flux énergétique (ou émittance ou exitance énergétique) est de l'ordre de $6,1 \times 10^7$ W m⁻² (Loi de Stefan-Boltzman). En supposant le soleil une sphère de rayon 7×10^8 m, la quantité totale du flux qui émane de la sphère solaire s'élève à 3×10^{26} W. Cette énergie se propage dans l'espace dans toutes les directions autour du soleil (propagation par ondes sphériques). Au fur et à mesure qu'on s'éloigne du soleil la densité du flux baisse car l'énergie totale émise se distribue sur des surfaces des sphères de rayon toujours croissant. La Terre se trouve à une distance moyenne du Soleil qui s'élève à $1,5 \times 10^{11}$ m (ou 1 unité astronomique). Le flux

émis de 3×10^{26} W distribué également sur la surface d'une sphère de rayon égal à 1 U.A. a une densité de l'ordre de 1350 W m^{-2} . Ainsi le rayonnement solaire incident à une surface de 1 m^2 aux confins de l'atmosphère (ou éclairement énergétique) vaut 1350 W m^{-2} . Ce que nous appelons **la constante solaire**, ou plus précisément, le flux qui traverse une surface de 1 m^2 placée perpendiculairement aux rayons solaires à une distance d'une unité astronomique. Puisque la distance Terre-Soleil varie d'un jour à l'autre, nous devons ajuster cette valeur en fonction de la date d'acquisition de données (tab. 4).

Tableau 4 Distance Terre-Soleil en unités astronomiques



Le rayonnement solaire n'est pas constant en fonction de la longueur d'onde. Ces 1350 W m^{-2} sont répartis d'une façon inégale dans le spectre. La connaissance de cette répartition spectrale est importante pour la modélisation du signal de télédétection dans cette partie du spectre et l'ajustement des capteurs. La figure 9 montre cette répartition telle que prédite par la théorie d'émission du rayonnement par une source incandescente à 5900 K (Loi de Planck, section 3) avec ajustement pour la distance moyenne Terre-Soleil. Nous constatons que la densité du flux spectral présente un pic dans le vert ($0,5 \mu\text{m}$). La photosphère du soleil n'étant pas une source homogène quant à sa constitution et sa température, des déviations sont observables par rapport à ce qui est prédit par la loi d'émission (figure 9 : éclairement exo-atmosphérique). Sur la même figure nous observons aussi que le rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre est modifié après son passage par l'atmosphère à cause de l'absorption par les gaz atmosphériques. Ce point est décrit plus en détail un peu plus loin.

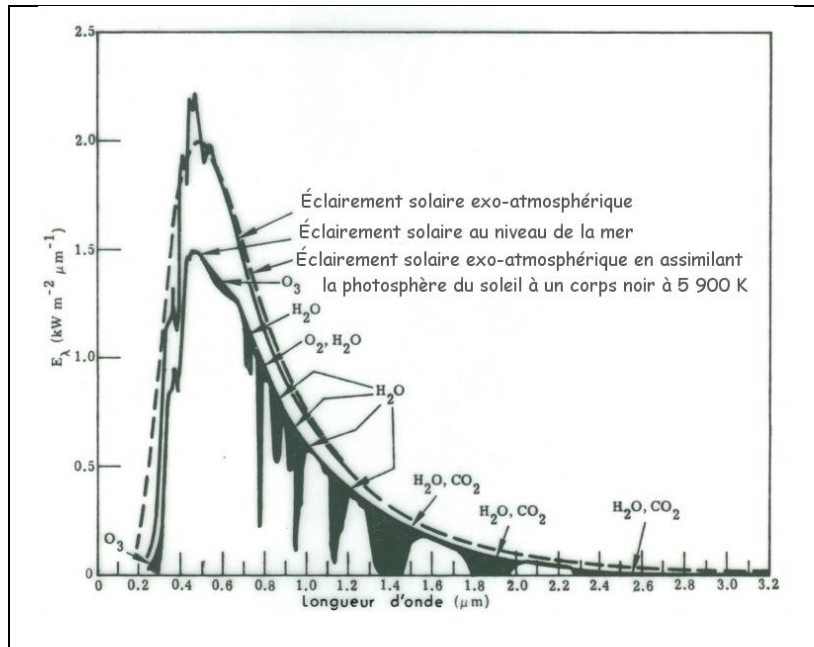


Figure 9 : Répartition spectrale du rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère et au niveau de la mer

La position du soleil au-dessus de l'horizon au moment de l'acquisition de données est un facteur important à considérer. Cette position est décrite par des coordonnées angulaires : l'angle zénithal (ou si l'on préfère son complément, l'élévation du soleil) et l'angle azimutal. Ces angles sont définis en fonction des coordonnées géographiques du lieu, le jour julien et l'heure.

2.1.2 Le passage du rayonnement solaire par l'atmosphère

Les constituants atmosphériques, gaz et particules en suspension, peuvent causer des modifications à une ou plusieurs propriétés du rayonnement solaire.

- 1) Longueurs d'ondes : les constituants atmosphériques ont la capacité d'absorber le rayonnement selon sa longueur d'onde. L'exemple classique est l'ozone stratosphérique qui absorbe très fortement (heureusement) le rayonnement dans l'UV. L'énergie absorbée a comme conséquence d'augmenter la température de l'air, ce qui a une répercussion dans l'émission atmosphérique dans les longues longueurs d'onde (section 3). Dans les longueurs d'ondes d'intérêt ici, la conséquence de cette absorption est que la répartition spectrale de l'énergie solaire qui atteint la surface terrestre n'est pas tout à fait la même que celle aux confins de l'atmosphère.
- 2) Direction de propagation : les constituants atmosphériques peuvent absorber le rayonnement et le réémettre sans modifier sa longueur d'onde, mais leur émission se fait dans une direction pas nécessairement la même que l'initiale. Nous parlons du phénomène de la diffusion atmosphérique. Souvent on aborde la diffusion en termes probabilistes. Les probabilités de diffusion dans une direction quelconque sont calculées en fonction du rapport entre grosseur de la particule et longueur d'onde. Pour les très petites particules vis-à-vis la longueur d'onde, nous parlons de la diffusion de Rayleigh, pour les particules d'une grosseur équivalente à la longueur d'onde, de la diffusion de Mie et pour les particules supérieures à la longueur d'onde, de la diffusion non sélective. Le rayonnement qui n'est pas diffusé subit un changement de vitesse qui a comme résultat un fléchissement des rayons solaires, nous parlons de la réfraction

- atmosphérique. Ce phénomène est souvent négligé en télédétection
- 3) Intensité : absorption et diffusion ont comme effet de diminuer l'intensité du rayonnement qui parvient finalement à la surface terrestre. Cette diminution est exprimée par une quantité que l'on appelle la **transmittance atmosphérique**. De l'autre côté, le rayonnement diffusé peut parvenir aussi à la surface terrestre et constitue une source d'éclairement secondaire de la surface que nous appelons : **l'éclairement (diffus) du ciel**.

Un élément qui module l'action de l'atmosphère est la position du soleil au-dessus de l'horizon au moment de l'acquisition de données. Plus le soleil est bas à l'horizon, son rayonnement traverse une plus grande couche atmosphérique et subit plus d'altérations que dans le cas où le soleil est haut à l'horizon.

2.1.3 Les interactions avec la surface terrestre

Le rayonnement solaire qui atteint la surface (directement ou indirectement après diffusion) peut être réfléchi par la surface et retourner vers l'espace d'où il provient, il peut être absorbé par la matière et se transformer à une autre forme d'énergie ou il peut être transmis dans le volume occupé par l'objet. Selon la loi de conservation de l'énergie la somme de l'énergie réfléchi, absorbé et transmise doit être égale à l'énergie incidente. En normalisant les énergies par la quantité totale du rayonnement incident nous retrouvons ainsi les trois quantités de base de la télédétection dans cette partie du spectre : la réflectance (ρ), l'absorptance (α) et la transmittance (τ) (fig. 10). De ces trois quantités celle qui nous intéresse c'est la réflectance des objets. C'est elle qui est à la base de la brillance des objets telle que perçue sur une image de télédétection. L'absorptance est d'intérêt pour la compréhension des phénomènes d'échauffement des objets durant le cycle diurne du soleil et qui ont des répercussions sur le rayonnement émis dans l'infrarouge thermique (section 3). Quant à la transmittance, elle est considérée souvent nulle car la plupart des objets sont opaques au rayonnement solaire. Pour ces objets nous parlons ainsi de la réflexion de surface. Pour les objets translucides (comme les feuilles des plantes) ou transparents (dépendant de la longueur d'onde) comme un volume d'eau nous parlons aussi d'une réflectance de volume.

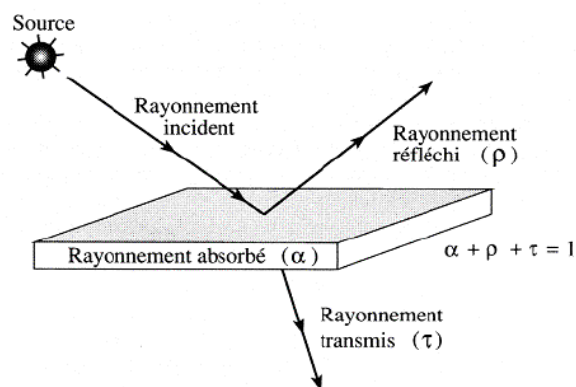


Figure 10 Interactions du rayonnement solaire avec la surface

La réflectance des objets peut varier de 0 (absorption+transmission totale) à 1 (réflexion totale) ou en pourcentage de 0% à 100%. La réflectance n'est pas constante dans le spectre. La variation de la réflectance selon la longueur d'onde constitue la **signature spectrale** de l'objet. Nous l'appelons ainsi pour indiquer que chaque objet terrestre peut être distingué des autres objets par sa façon unique, en principe,

de réfléchir le rayonnement solaire. Dans le cas qui nous occupe ici où le rayonnement incident est le rayonnement solaire, donc longueurs d'onde de l'UV à l'IROM, composition chimique et géométrie de surface sont les deux principaux facteurs qui modulent la signature spectrale de l'objet.

Nous examinerons par la suite brièvement les propriétés de réflexion des principaux éléments de surface incluant les roches et les sols, la végétation, l'eau et la neige ainsi que les matériaux artificiels.

Les roches et les sols

Les roches sont rarement directement exposées en surface (affleurements). Même si le sont, leurs surfaces subissent des altérations qui modifient la signature spectrale des principaux minéraux qui les composent et que nous mesurons habituellement en laboratoire. En règle générale dans la partie du visible, les roches composées des minéraux foncés ont des réflectances basses, et ceux composés des minéraux pâles ont des réflectances élevées; les roches à texture grossière réfléchissent plus que celles à texture fine. Dans l'infrarouge la réflectance par type de roche est en générale plus forte que dans le visible. Quelques exemples des spectres de réflectance sont donnés dans la figure 11. On peut constater que le rapport entre les réflectances dans le visible des différents types de roches est maintenu grosso modo dans l'infrarouge.

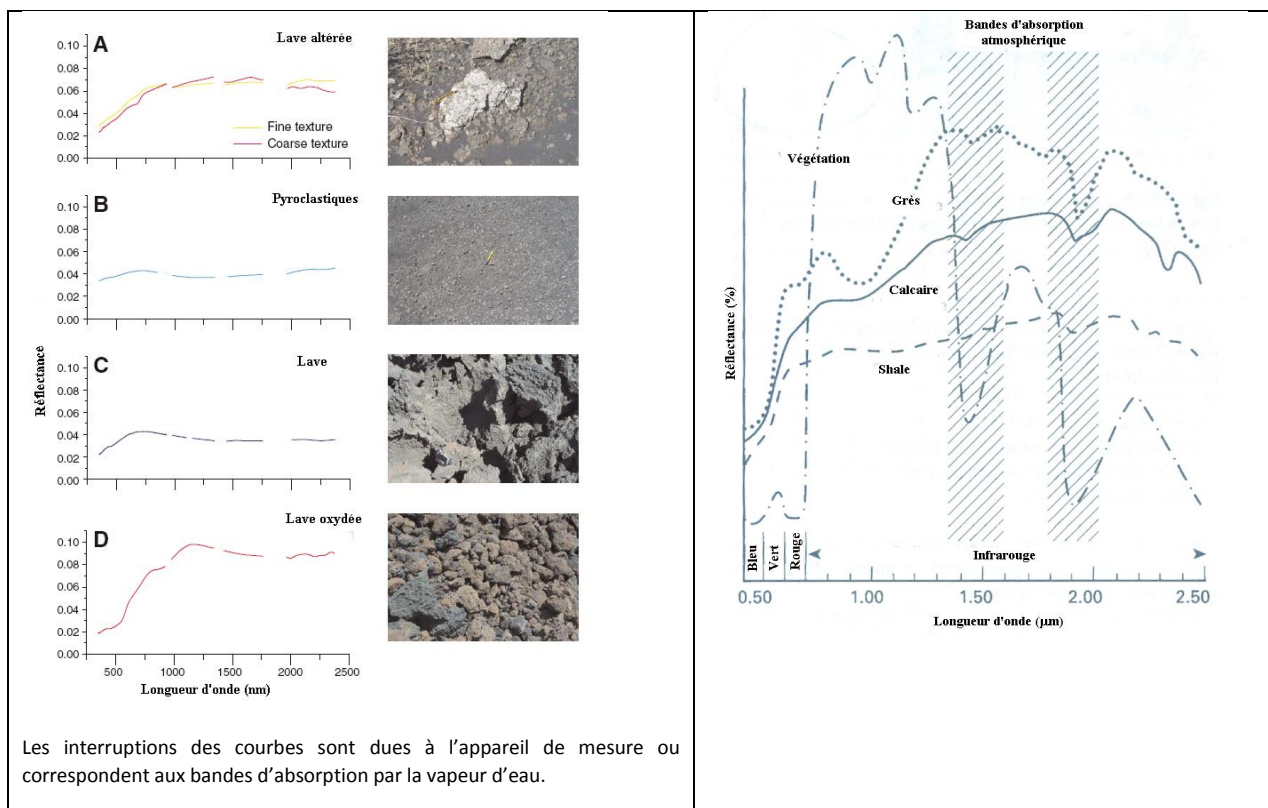


Figure 11 Exemples des signatures spectrales des roches

La réflectance des sols varie en fonction de leur composition (texture), les conditions de surfaces (labour, etc.), leur humidité, ainsi que leur contenu en oxyde de fer et en matière organique. Des sols bien drainés ont une forte réflectance. Les sols mal drainés ont des réflectances basses. Les sols à texture grossière ont des réflectances plus élevées des sols à texture fine. L'augmentation de l'humidité relative fait baisser la

réflectance indépendamment de la texture. La même observation vaut pour le contenu en matière organique. Les surfaces avec des mottes sont des sols à texture fine, les plus sombres indiquant la dominance de l'argile et les plus pâles indiquant la dominance du limon. Les sols fraîchement labourés ont des réflectance basses comparés à des sols non labourés, dû à l'humidité du sous-sol. Les sols qui forment des mottes, dû à l'argile, ont des réflectances plus basses que les sols friables. Quelques exemples des spectres de réflectance sont donnés dans la figure 12.

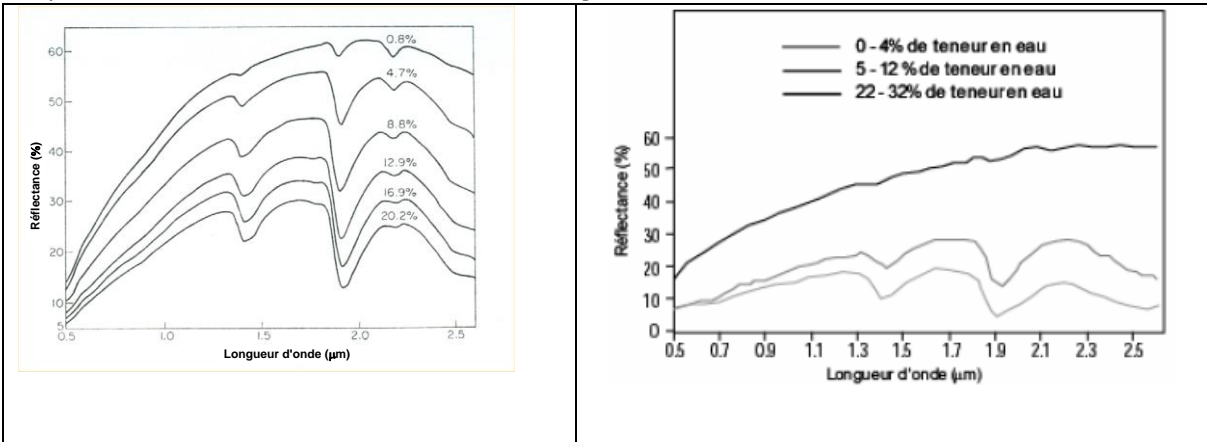


Figure 12 : (a) Réflectances spectrales d'un sol limoneux en fonction de son contenu en eau, (b) Réflectances spectrales d'un sol sableux en fonction de son contenu en eau

La végétation

Le feuillage est sans doute l'élément constituant des plantes qui influence le plus la réflexion du rayonnement solaire par la végétation. La figure 13 montre la signature spectrale typique d'une feuille verte. Les divers pigments, dont la chlorophylle, influencent le comportement de réflexion de la feuille dans la partie du visible; la structure de la feuille joue un rôle important dans le proche infrarouge tandis que le contenu en eau de la feuille est le facteur primordial dans l'infrarouge à ondes courtes. En règle générale, dans le visible le feuillage des différentes espèces végétales ne montrent pas des différences significatives. C'est dans l'infrarouge, notamment dans le proche infrarouge, que les espèces se distinguent par leur niveau de réflectance (fig. 14). La figure 14 montre que les feuilles sèches, dues à l'absence de chlorophylle et de l'eau ont un comportement réflectif différent des feuilles vertes.

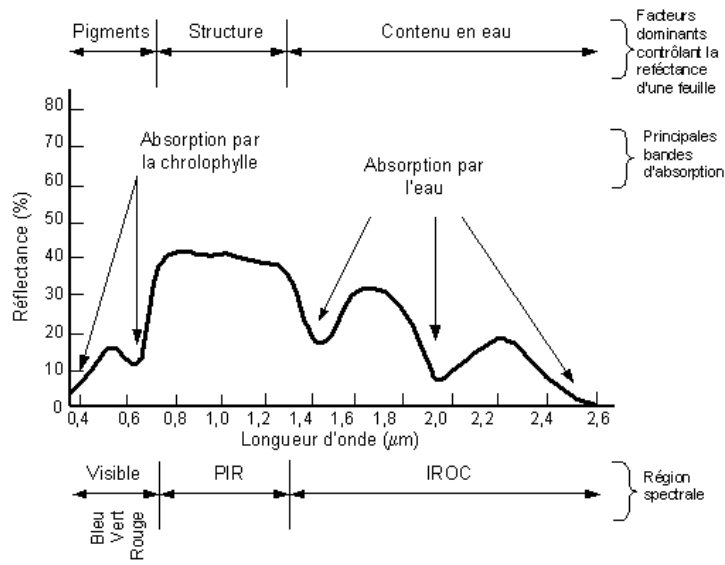


Figure 13 Signature spectrale typique d'une feuille verte

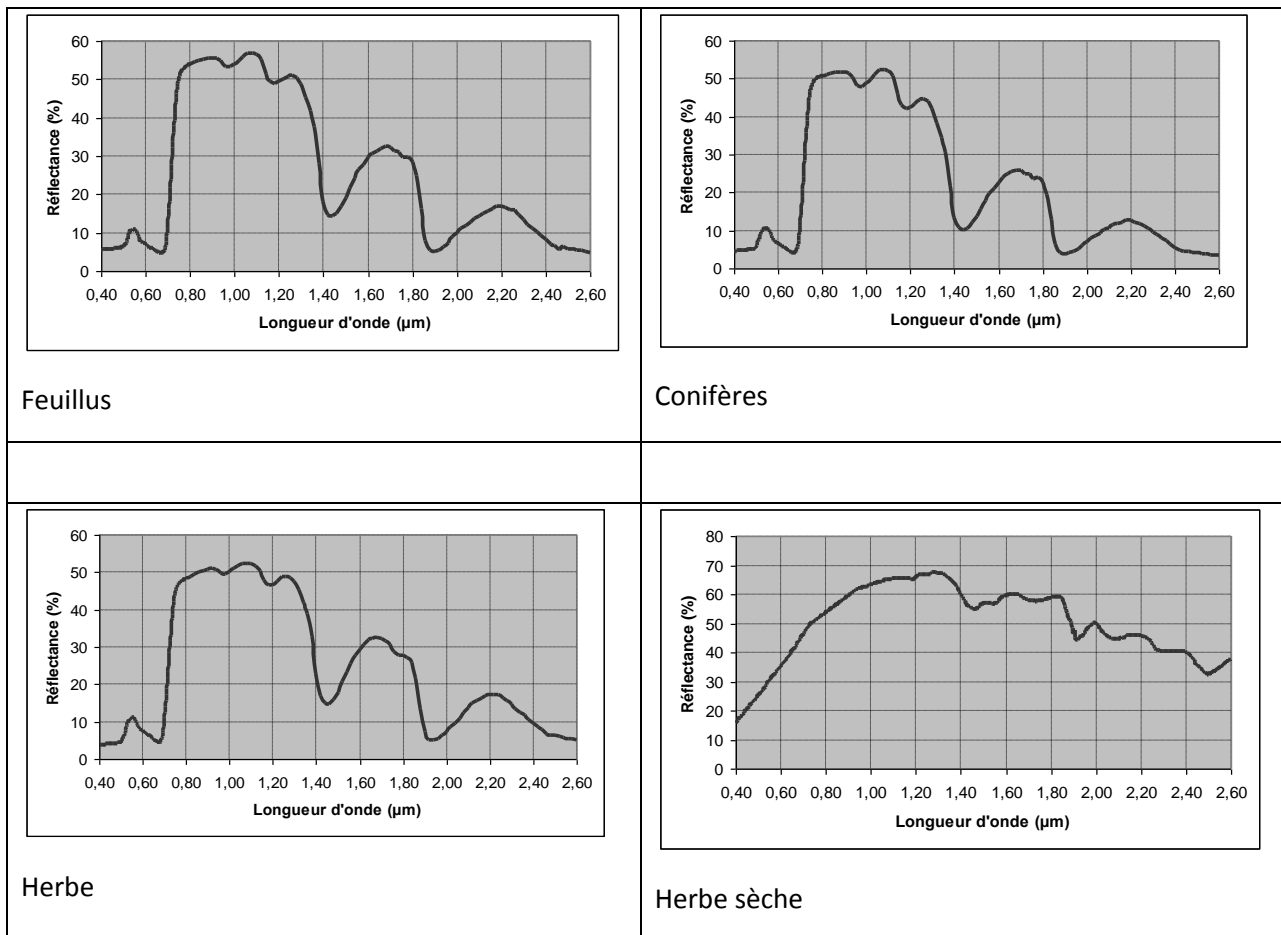


Figure 14 Signature spectrale typique des feuilles vertes ou sèches des trois espèces végétales

Pour la télédétection, cependant, ce n'est pas seulement une feuille, mais aussi les caractéristiques géométriques de la plante, le nombre d'individus par pixel au sol, la distribution spatiale, la présence des strates, la visibilité du sol, la topographie du site, la quantité d'ombrages, etc. qui influencent la réflectance (fig. 15). La réflectance des plantes est aussi fonction de leur cycle annuel de croissance.

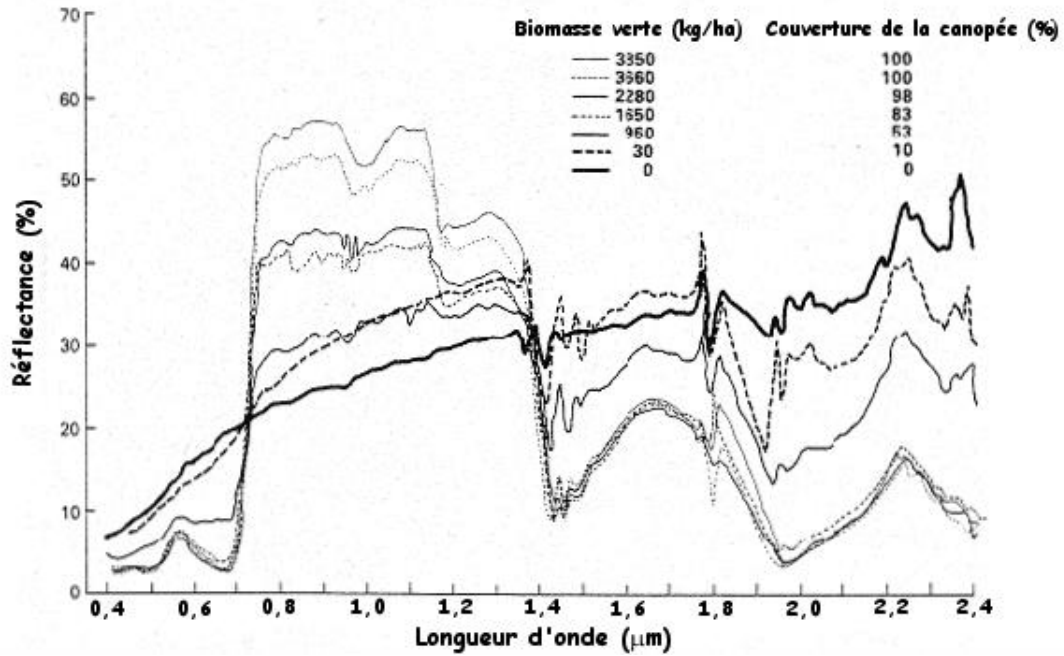


Figure 15 : Signature spectrale typique d'une culture agricole (coton) en fonction de sa biomasse

Eau/neige

La réflectance de l'eau (pure) est très différente selon qu'elle se trouve à l'état liquide ou solide (neige et glace). En état liquide l'eau a une réflectance faible dans le visible et très faible dans l'infrarouge. Les éléments dissous ou en suspension dans l'eau (particules, algues, matière organique) jouent également un rôle très important (fig. 16).

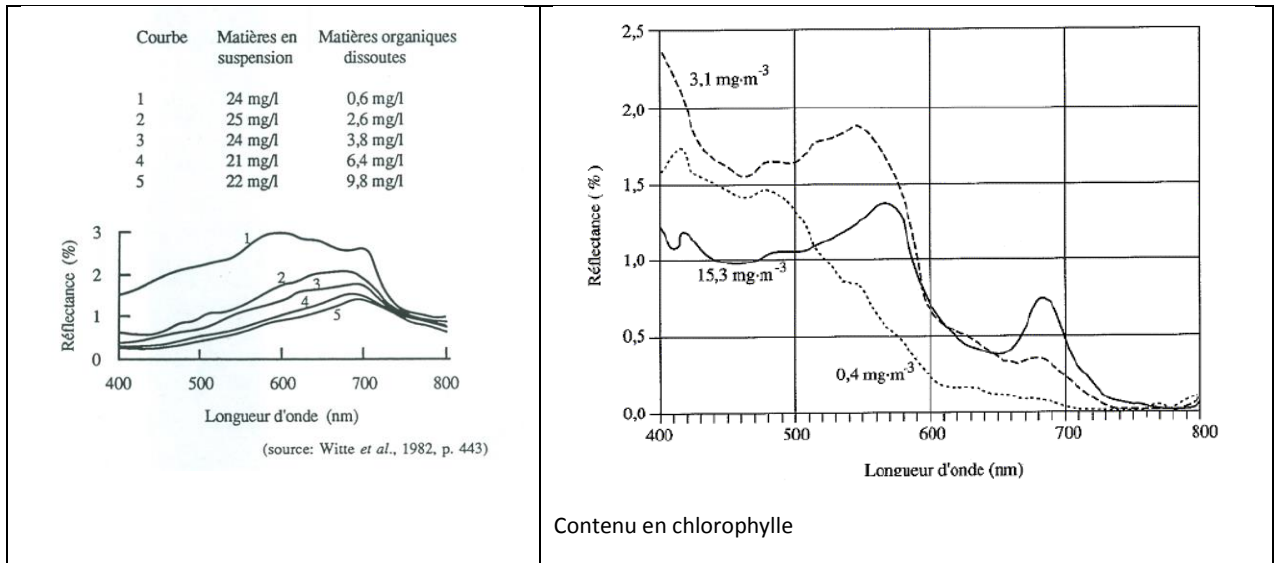


Figure 16 Signatures spectrales d'un plan d'eau en fonction des éléments dissous

La neige a un comportement très différent dans le visible-proche infrarouge et dans l'infrarouge à ondes courtes. Dans le premier cas, elle a une réflectance très forte frôlant les 100% dans la bande bleue. La réflectance baisse significativement dans l'IROC ne dépassant pas les 20% (fig. 17a). C'est dans l'IROC où c'est le plus facile donc de différencier la neige des nuages qui ont des réflectances similaires dans les autres parties du spectre solaire. La neige bien sûr n'a pas une signature spectrale unique. Un facteur important qui modifie cette signature est la grosseur des cristaux (granulométrie) tel que montré à la figure 17b.

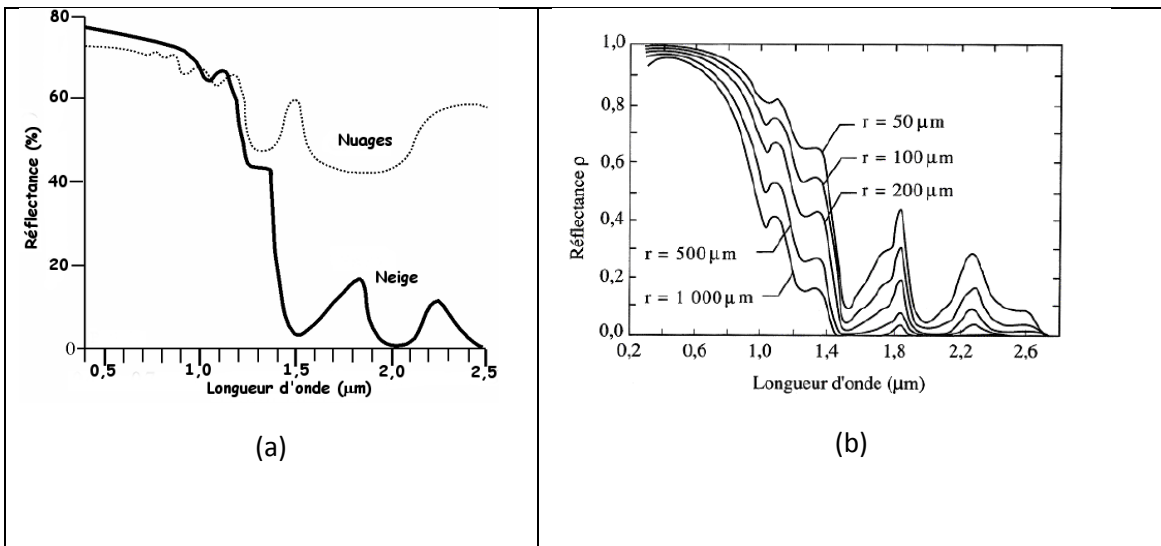


Figure 17 : Signatures spectrales de la neige

Les matériaux artificiels (asphalte, béton, métal, etc.) ont des réflectances fort différentes. Cependant, contrairement au couvert végétal, leur réflectance demeure relativement stable dans le spectre avec une certaine tendance à la baisse dans l’IROC à l’exception de l’aluminium (fig. 18)

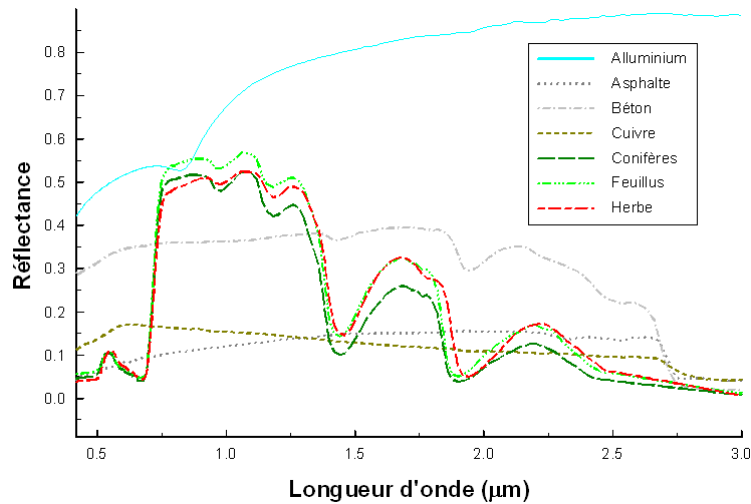


Figure 18 : Réflectance de différents matériaux artificiels

2.1.4 Le flux du rayonnement réfléchi

La figure 19 nous donne une idée du spectre du flux total réfléchi par les différents types de surface en fonction de l'éclairement solaire (en ignorant les effets atmosphériques) et des signatures spectrales des objets. Le flux « retient » à la fois les caractéristiques du rayonnement incident et de la réflectance des matériaux. Cependant un capteur ne mesure pas le flux total mais la portion du flux qui lui parvient d'une direction spécifique (on mesure la luminance). Quelle est cette portion dépend du comportement réflectif des surfaces, de la position du soleil et bien sûr de la direction de visée du capteur. Certains objets ont tendance à concentrer le rayonnement à une direction spécifique (réflecteurs spéculaires). Ce sont des objets dont les aspérités de surface (rugosité) ont une hauteur moyenne inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. D'autres objets ont tendance à distribuer le flux réfléchi plus ou moins également dans l'ensemble de l'hémisphère du ciel (réflecteurs diffus). Ce sont des objets dont les aspérités de surface ont une hauteur moyenne supérieure à la longueur d'onde du rayonnement. Si le réflecteur est parfaitement diffus (lambertien) le flux mesuré est indépendant de l'angle de visée et il est proche du tiers du flux total réfléchi par la surface. Dans les autres cas, le flux mesuré est fort dépendant de la position du soleil et du capteur. La figure 20 illustre les deux cas extrêmes de réflecteurs : spéculaire et lambertien.

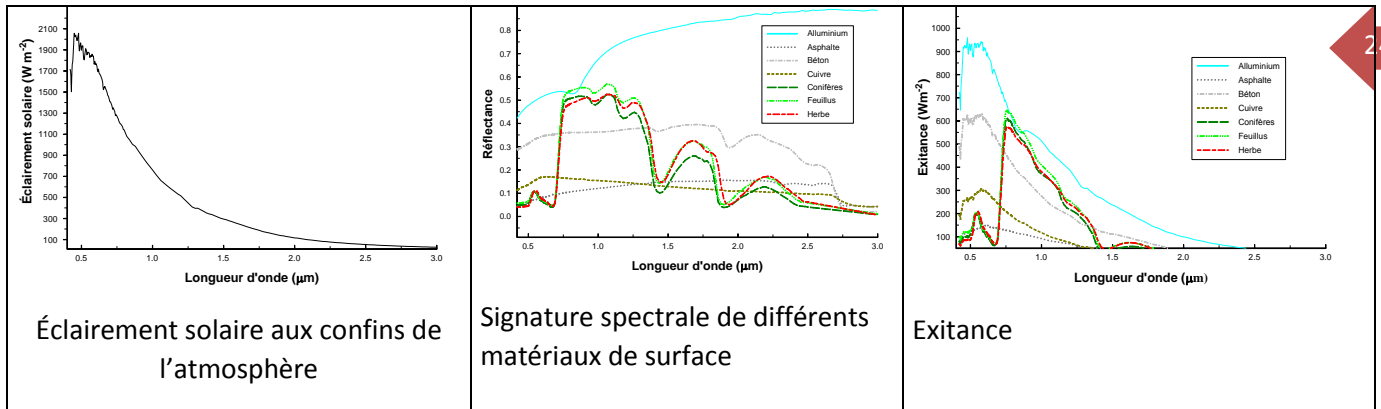


Figure 19 Le flux du rayonnement réfléchi est le reflet des caractéristiques du rayonnement incident et de la réflectance des objets.

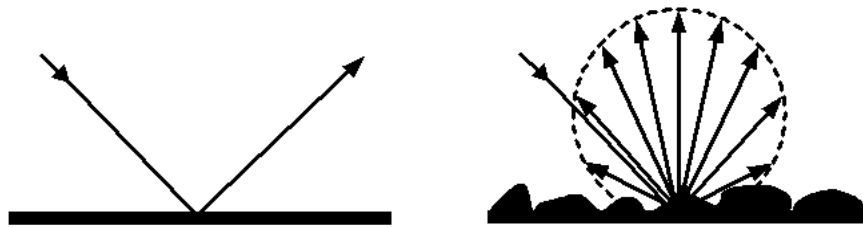


Figure 20 Un réflecteur parfaitement spéculaire concentre le rayonnement réfléchi dans une seule direction (à gauche); tandis qu'un réflecteur parfaitement diffus le distribue d'une façon égale dans l'hémisphère du ciel.

2.1.5 Le passage du rayonnement réfléchi par l'atmosphère

Comme dans le cas du rayonnement solaire qui se dirige vers la surface, le rayonnement réfléchi diminue en intensité en traversant l'atmosphère (par absorption et par diffusion). On comprend que plus nous sommes proches de la surface moins les effets atmosphériques se font sentir (cas aéroporté). Le capteur ne mesure cependant pas que le rayonnement réfléchi dans sa direction mais également un rayonnement « parasite ». Ce dernier provient de la diffusion du rayonnement solaire incident. À l'encontre du rayonnement du ciel qui se dirige vers la surface, ce rayonnement est dirigé directement vers le capteur. Son effet se fait sentir sur l'image par un voile qui fait baisser les contrastes entre les objets. La figure 21 nous montre justement que les tonalités de gris sont fonction de plusieurs paramètres dont la position du soleil, le type de réflecteur ainsi que des conditions atmosphériques. La bande spectrale où l'on opère joue également un rôle très important. À titre d'exemple, le voile atmosphérique est plus intense dans la bande bleue et va en diminuant dans l'infrarouge; la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère affecte les bandes spectrales dans l'infrarouge mais presque pas celles dans le visible.

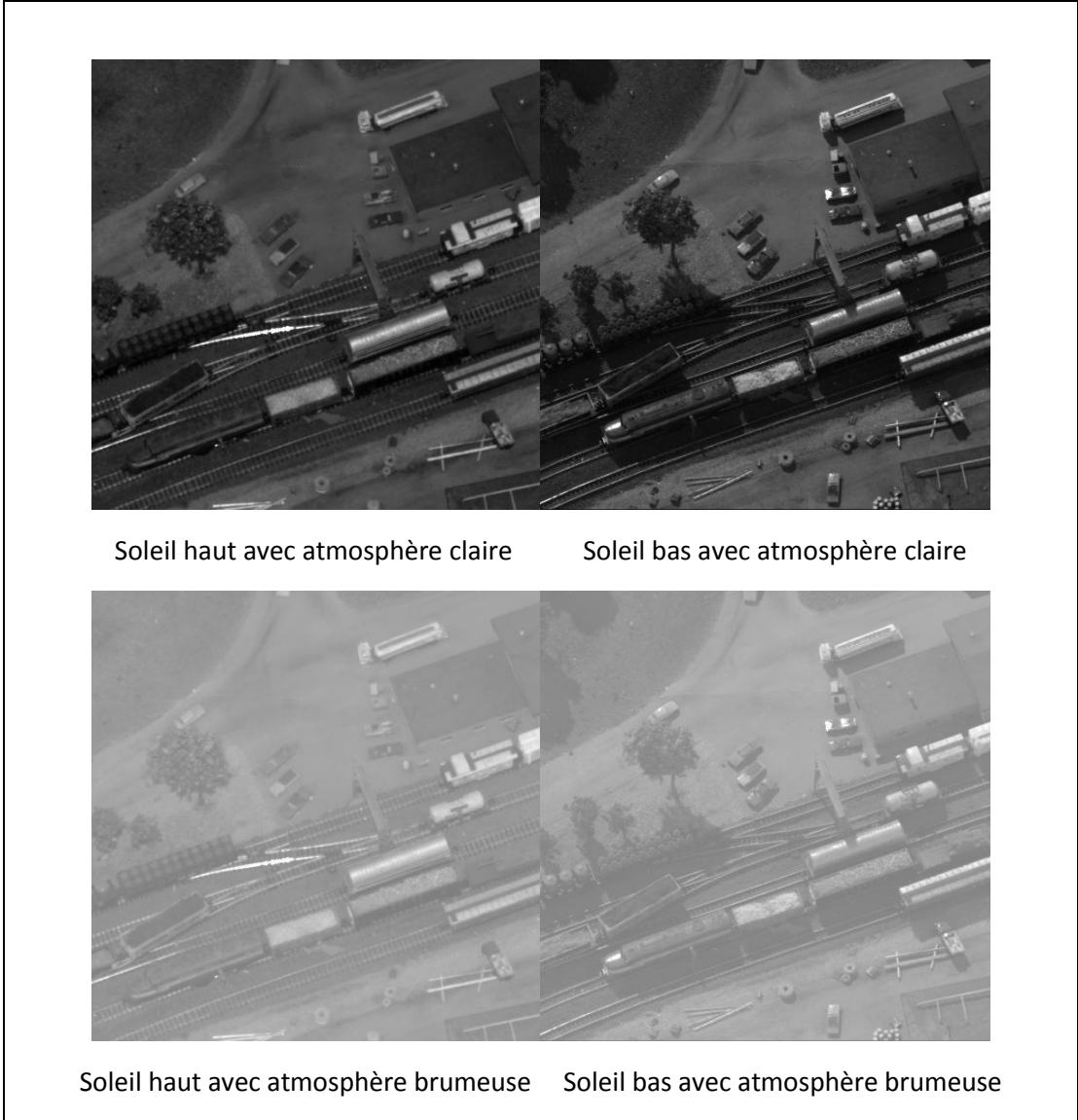


Figure 21 Les teintes de gris varient en fonction des conditions externes lors de l’acquisition des images en plus du type de réflecteur visé par le capteur

2.1.6 Le problème des nuages

Les nuages constituent un obstacle majeur à l’acquisition des images de qualité par satellite parce qu’ils sont opaques au rayonnement solaire. La connaissance de la climatologie, et plus précisément de la nébulosité, est donc essentielle à l’observation de la Terre dans le domaine spectral d’intérêt dans ce module. La carte de la figure 22a montre la fréquence de ciel complètement dégagé à l’échelle planétaire. Elle a été compilée à partir de données recueillies durant une décennie par des stations météorologiques au sol. Nous observons par exemple qu’au Québec cette fréquence se situe en deçà de 10%. Cette fréquence de ciel dégagé sur certaines zones et périodes de l’année constitue un bon indicateur de la difficulté d’acquisition d’images sans nuages par satellite. Les histogrammes de la figure 22b représentent

sur une base mensuelle, le nombre moyen de tentatives nécessaires à l'acquisition d'une image par le satellite SPOT dont la couverture nuageuse serait inférieure à 10%

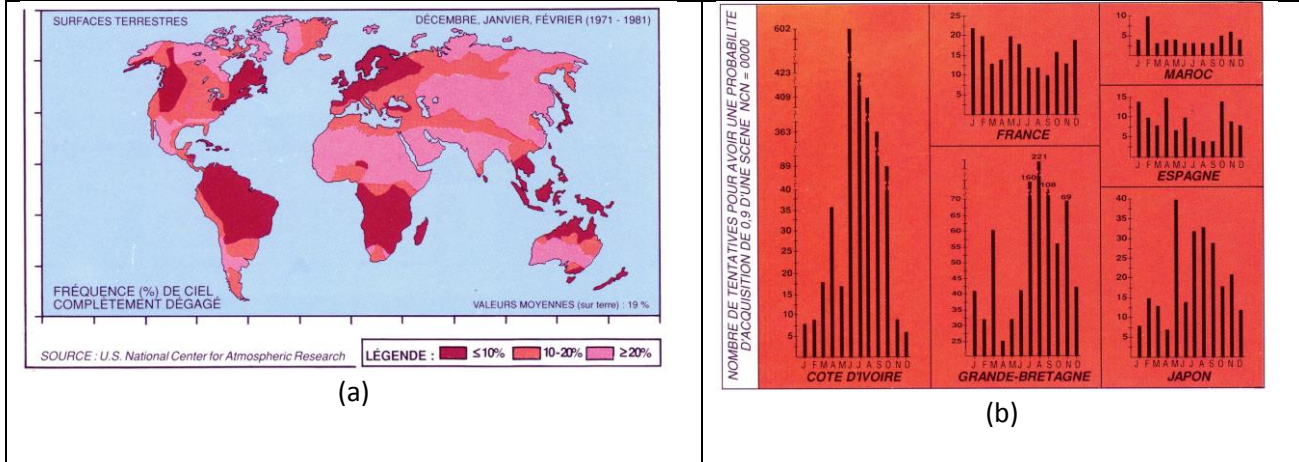


Figure 22 Nébulosité (a), et probabilités d'acquisition d'une image satellitale avec une couverture nuageuse inférieure à 10%.

Dans le cas aéroporté les effets des nuages se font moins sentir car l'avion peut voler en dessous des nuages. Les ombres des nuages sont souvent visibles sur les images. Lorsque les nuages sont bas, même les images aéroportées peuvent être de piètre qualité (fig. 23).

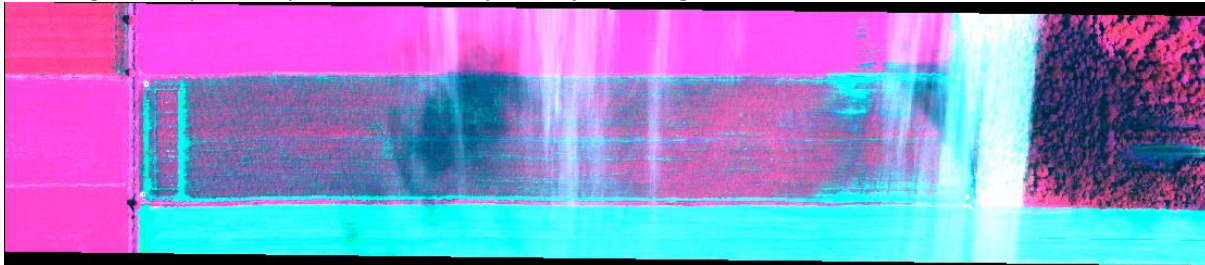


Figure 23 : Les images aéroportées ne sont pas toujours épargnées du problème des nuages.

2.1.7 Le captage du rayonnement solaire réfléchi

Le capteur est muni des filtres capables de séparer le rayonnement selon sa longueur d'onde. Des détecteurs avec des matériaux sensibles à une gamme donnée de longueurs d'ondes sont placés à un endroit précis sur le plan focal du système optique afin d'effectuer la transformation rayonnement – courant électrique. La figure 24 compare les courbes de sensibilité spectrale des six détecteurs utilisés par les capteurs TM de Landsat-4 et -5 ainsi que d'ETM+ de Landsat-7. Même si l'intervalle par bande spectrale couverte par ces trois capteurs est le même et le matériau utilisé est le même on n'arrive jamais à fabriquer des détecteurs avec une réaction tout à fait similaire face au rayonnement. Il est donc important à part l'étalonnage du capteur de connaître la sensibilité spectrale des détecteurs lorsque nous voulons étudier les phénomènes sur la base du flux mesuré par le capteur.

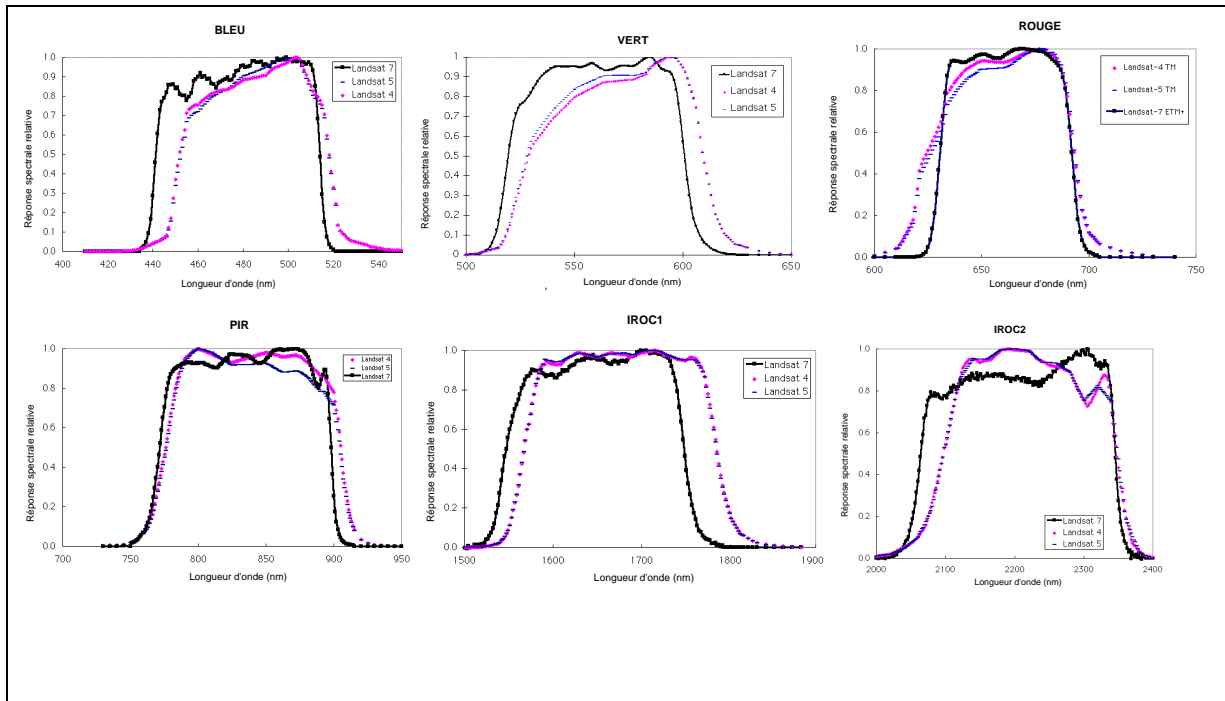


Figure 24 : Sensibilité spectrale des capteurs TM des satellites Landsat 4 et 5 ainsi que du capteur ETM+ du satellite Landsat-7 par bande spectrale d’opération dans le spectre solaire.

Les images numériques issues de la mesure rayonnement solaire réfléchi selon une seule bande spectrale couvrant une grande partie du VIS sont appelées panchromatiques (PAN). Lorsque le flux est mesuré dans plusieurs bandes spectrales en simultanément nous pouvons obtenir des images soit multispectrales (MSP) ou hyperspectrales (HSP). Souvent les capteurs MSP possèdent aussi une bande PAN et acquièrent ainsi des images dans ces deux modes en simultanément. Les particularités de toutes ces images numériques sont résumées au tableau 4. Le contenu radiométrique de ces images est examiné avec plus de détails dans la section 2.4.

Tableau 4 : Typologie de l'imagerie numérique du rayonnement solaire réfléchi

<p>Panchromatique (version 1) : Image provenant de la mesure du flux dans l'ensemble du visible entre environ 0,45 μm et 0,7 μm</p>
<p>Panchromatique (version 2) : Image provenant de la mesure du flux dans le VIS et le PIR entre 0,45 ou 0,5 et 0,9 μm</p>
<p>Multispectrale</p> <p>Image composée de trois ou plusieurs bandes spectrales (jusqu'à une dizaine tout au plus). La largeur de bande est de plusieurs dizaines, voire parfois de centaines, de nanomètres ($1\text{nm} = 10^{-3} \mu\text{m}$). Les bandes spectrales ne sont pas nécessairement contiguës. Le plus souvent les composantes spectrales sont réparties comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • VIS : 2 à 4 bandes (violet, bleu, vert, jaune, rouge) • PIR : 1 ou 3 bandes • IROC : Habituellement 1 bande dans IROC1 et 1 bande dans IROC2
<p>HSP : Image composée de nombreuses bandes spectrales (entre quelques dizaines et quelques centaines). La largeur de bande est étroite, d'une dizaine de nanomètres, et les bandes spectrales sont contiguës. Les bandes spectrales sont habituellement réparties comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proche UV : 2 à 3 bandes • Visible à PIR (inclusivement) : Une soixantaine de bandes spectrales • IROC : Entre 100 et 150 bandes spectrales

2.2 FORMATION DES IMAGES : BASES TECHNOLOGIQUES

2.2.1 Les balayeurs

Vers la fin des années 60 les premiers balayeurs furent introduits dans les opérations de télédétection. Parmi ces balayeurs celui qui a survécu jusqu'à nos jours est celui dit à époussette. Ces balayeurs comportent un seul détecteur par composante image et un système de collecte avec un miroir mobile qui leur permet de définir d'une façon dynamique chacune des unités d'échantillonnage le long d'une ligne de balayage (fig. 25). Un exemple classique est celui des capteurs de la série des satellites américains Landsat jusqu'au Landsat-8. Leur survie est dû au fait que les balayeurs plus modernes que nous examinerons par la suite ont une technologie pour laquelle nous n'avions pas trouvé jusqu'à tout récemment des matériaux sensibles pour certaines bandes spectrales particulièrement dans l'infrarouge. Ces derniers temps des avancées technologiques permettent de combler de plus en plus ces lacunes et ainsi l'usage des balayeurs à époussette ira en diminuant jusqu'à leur abandon complet.

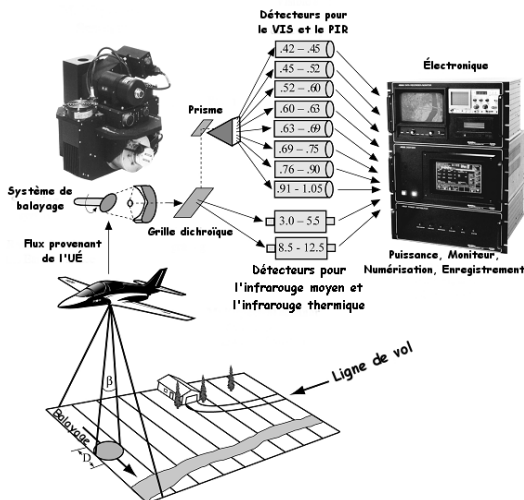


Figure 25 : Balayeur à époussette

Les balayeurs modernes sont dits balayeurs à râteau. Les détecteurs du type CCD (Dispositif à transfert de charge) sont alignés dans la direction de balayage (barrettes CCD). Le système de collecte sépare le rayonnement, à la limite de sa résolution angulaire, selon la direction de leur provenance et les focalise sur des détecteurs séparés dans l'alignement (fig. 26). La ligne de balayage aura donc autant d'unités d'échantillonnage que le nombre de détecteurs par alignement. Puisque « l'image » de chaque unité d'échantillonnage est formée sur un détecteur en particulier, le capteur acquière en simultanément tous ces échantillons. Nous pouvons ainsi considérer que l'image d'une ligne de balayage est formée d'un coup (un instantané). Plusieurs variantes de ce type de capteurs existent. À titre d'exemple il y a certains balayeurs à râteau qu'ils possèdent plusieurs systèmes de collecte – systèmes de détection, chacun spécialisé à l'acquisition d'une seule composante d'image. D'autres, plus sophistiqués, ne possèdent qu'un système de collecte avec plusieurs alignements de détecteurs pour effectuer la même opération. Également les balayeurs à râteau destinés à l'acquisition d'images avec une UÉ très fine au sol possèdent un système de détection complexe composé de plusieurs « étages » d'alignements (technologie Time Delay and Integration- TDI) qui permettent d'éviter les traînées sur les images tout en améliorant les contrastes.

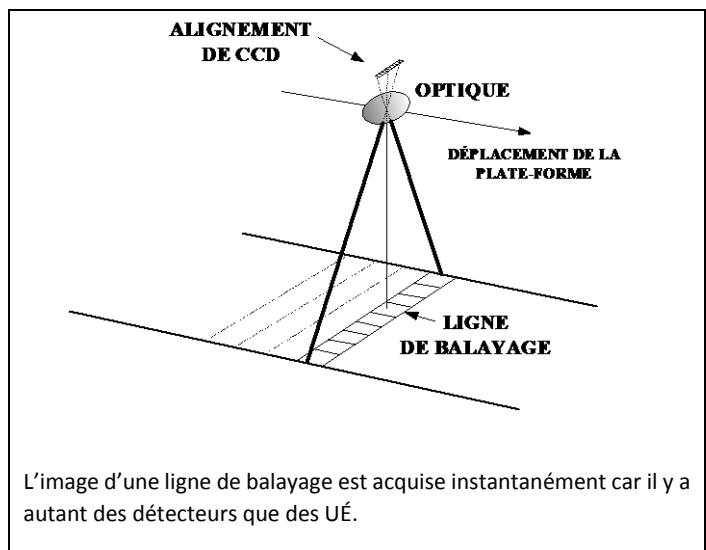


Figure 26 Balayeur à râteau

La technologie moderne n'autorise d'aligner que quelques 12 000 détecteurs. Pour augmenter la fauchée d'une ligne de balayage, plusieurs techniques sont employées. Un exemple est donné par la figure 27. Dans cet exemple le balayeur crée 6 images (une par alignement) en mode multi-bande (4 bandes spectrales au total) ainsi qu'en mode panchromatique légèrement décalées l'une par rapport à l'autre dans le sens d'avancement de la plateforme mais avec un certain recouvrement dans le sens du balayage. Par traitement post-acquisition ces images individuelles sont « mosaïquées » pour construire une image multi-bande qui aurait dû être acquise avec 4 alignements de 6892 détecteurs chacun ainsi qu'une image panchromatique avec 27 568 détecteurs.

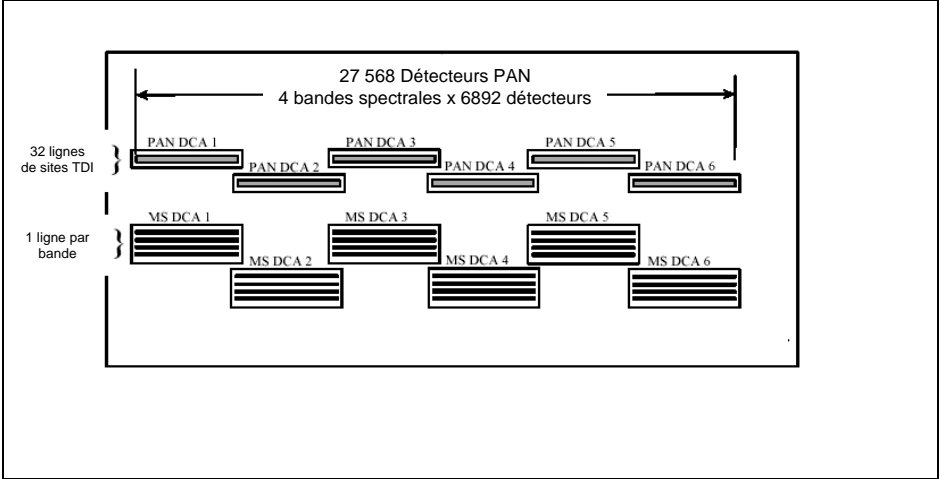


Figure 27 Alignement des détecteurs TDI-CCD (mode PAN) et des détecteurs CCD (mode multi-bande) sur le plan focal du balayeur à râteau du satellite Quick-Bird 2. La longueur d'un alignement ne fait qu'une vingtaine de cm

2.2.2 Les caméras numériques

Ces dernières années une avancée technologique dans le domaine des détecteurs est celle des matrices de détecteurs du type CCD. Ceci a permis la fabrication des caméras numériques, la contrepartie électronique de la caméra photographique standard. Bien qu'en télédétection ces caméras ne soient que dans leurs premiers balbutiements, elles sont vouées à devenir le capteur standard en télédétection. Le mode instantané est un atout indéniable pour l'acquisition d'images « géométriquement » stables et facilite de beaucoup la création des couples d'images stéréoscopiques. Les caméras les plus sophistiquées disponibles actuellement comprennent un seul système de collecte, un mécanisme de dispersion du RÉM selon sa longueur d'onde et autant des matrices de CCD que des bandes spectrales (souvent pas plus que 3 bandes). La solution la moins sophistiquée, offre la possibilité de créer une image à trois bandes avec une seule matrice de CCD. Dans ce cas, un nombre de détecteurs par rangée de la matrice est assigné à une bande spectrale spécifique. Généralement le nombre de détecteurs d'une matrice ne peut pas dépasser actuellement les 25 millions (5000 x 5000) ou 25 Megapixels selon le jargon employé dans le commerce.

2.2.3 Acquisition des stéréoimages

L'acquisition des stéréophotographies était une opération importante pour la cartographie de base. En photo-interprétation la perception de la troisième dimension est un atout important. Ces idées sur le comment générés des images stéréoscopiques ont été reprises avec les capteurs numériques. Pour les caméras à clichés numériques les mêmes principes s'appliquent que ceux dans le cas des photographies aériennes (fig. 28). Dans le cas des balayeurs à râteau différentes approches sont utilisées. Un exemple est donné à la figure 29 avec un capteur aéroporté dit tri-linéaire. Ce capteur possède trois alignements de CCD. À chaque station trois lignes de balayage sont formées. Ainsi à la fin de l'opération il y a trois images du même territoire qui sont formées : arrière, verticale (verticale) et avant. Ces images peuvent être regardées deux par deux en stéréoscopie ou utilisées pour la stéréorestitution.

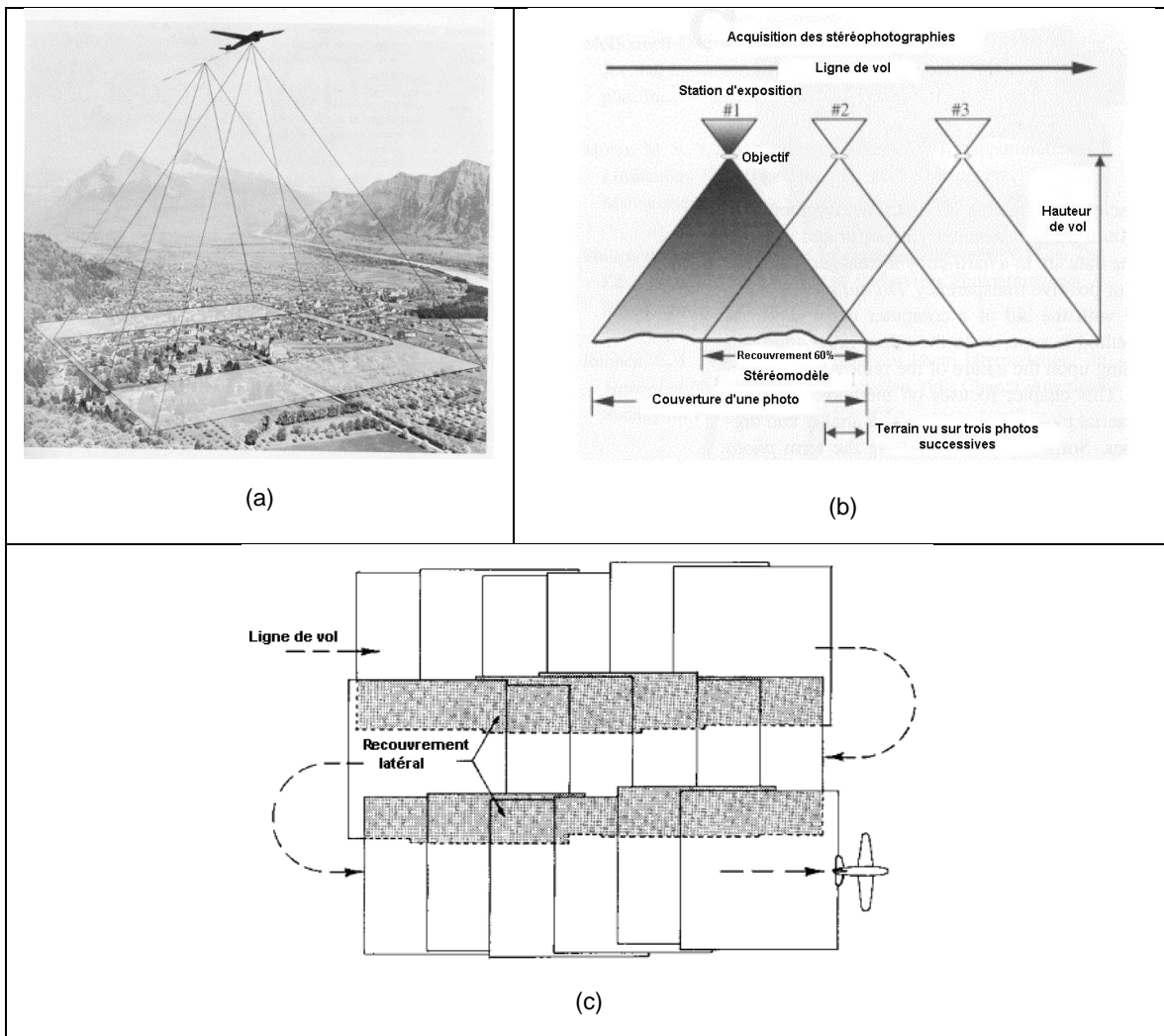


Figure 28 : Acquisition des stéréophotographies lors d'une mission photographique, principes repris avec les caméras numériques

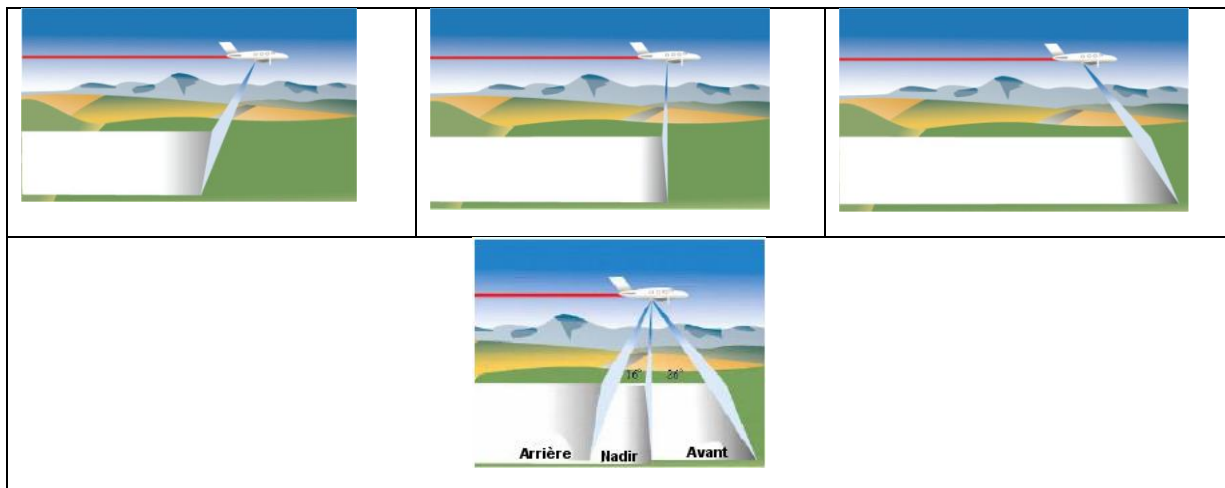


Figure 29 : Balayeur à râtelier tri-linéaire

Dans le cas des satellites trois approches sont suivies tel que montré à la figure 30 : a) recouvrement transversal de deux orbites différentes en dépointant par télécommande le champ de vision du capteur (miroir amovible) d'un angle approprié; b) un système à deux alignements CCD observant en arrière et en avant du satellite obtenant ainsi un recouvrement longitudinal (même orbite), les deux images sont obtenues par un système fixe (pas besoin de télécommande pour dépointer le champ de vue) et c) une approche polyvalente qui permet d'obtenir le recouvrement désiré de la même orbite ou des orbites différentes, un peu la combinaison des deux approches précédentes. Dans ce dernier cas le champ de vue du capteur est changé par mouvement télécommandé du corps du satellite dans son ensemble (satellites agiles).

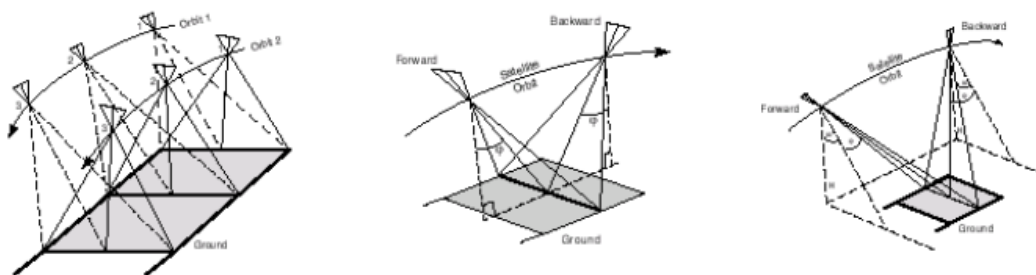


Figure 30 : Approches de création des stéréoimages à partir des satellites

2.3 PROPRIÉTÉS DE BASE DES IMAGES

Pour pouvoir caractériser le contenu des images surtout en rapport aux différents domaines d'application de la télédétection nous employons une série de mesures. Nous examinerons par la suite certaines de ces mesures que l'on appelle résolutions (spatiale, spectrale, et radiométrique). La notion de la résolution temporelle a été expliquée en introduction en discutant des plateformes spatiales

2.3.1 Résolution spatiale

La résolution spatiale est utilisée comme un indicateur du plus petit objet que nous sommes capables d'identifier sur une image. Toutefois il n'y a d'unanimité sur la façon de la mesurer sur une image numérique. Le plus souvent la dimension de l'unité d'échantillonnage au sol sert comme mesure de base (fig. 31). Toutefois deux facteurs définissent la résolution : la dimension de l'unité d'échantillonnage (fig. 31) ainsi que le contraste entre un objet et son environnement. La relation entre ces deux facteurs est illustrée par un exemple fictif montré à la figure 32. Ici nous supposons que le flux capté à distance est la somme des flux provenant des « parcelles atomiques » de la surface incluse dans une UÉ. Plus grande est l'UÉ, un plus grand nombre de parcelles atomiques contribue au flux total mesuré et ainsi ce dernier tend à s'uniformiser d'une UÉ à l'autre. Les micro-variations spatiales du flux observables à une UÉ fine associées à la présence des objets de petite taille et de bon contraste avec leur environnement immédiat disparaissent au fur et à mesure que l'UÉ s'élargisse. Seules les variations les plus marquantes persistent. Si un objet réfléchit d'une façon tout à fait distincte de son environnement, même si sa taille est inférieure à celle d'une UÉ, il est donc possible de détecter sa présence. Mais le tout s'arrête souvent là car son identification devient difficile et surtout l'analyse de ses caractéristiques géométriques devient impossible.

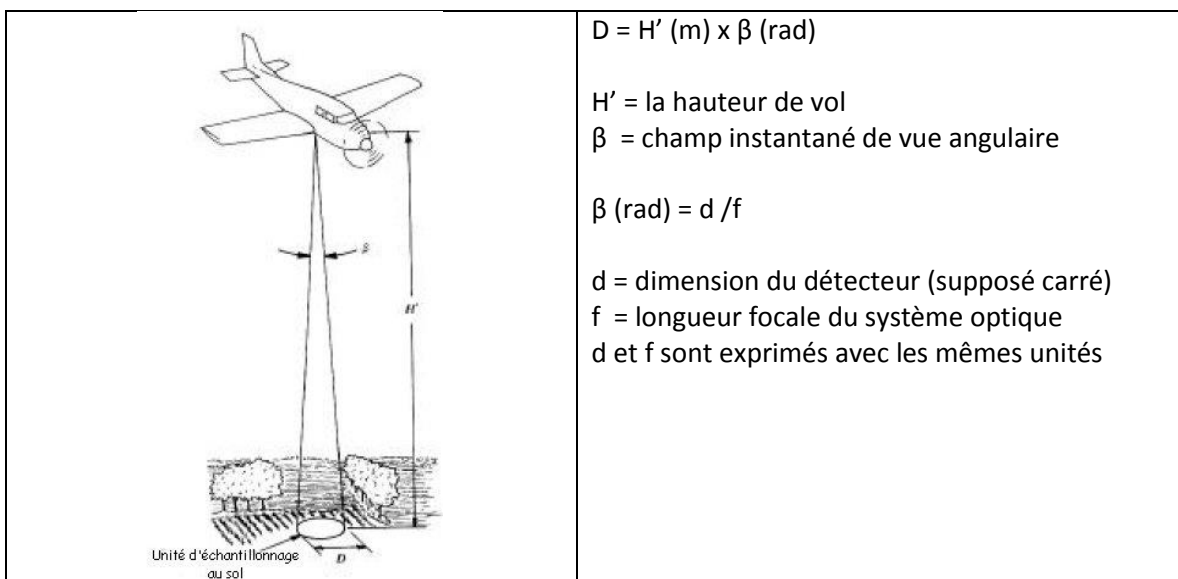


Figure 31 Dimension de l'unité d'échantillonnage

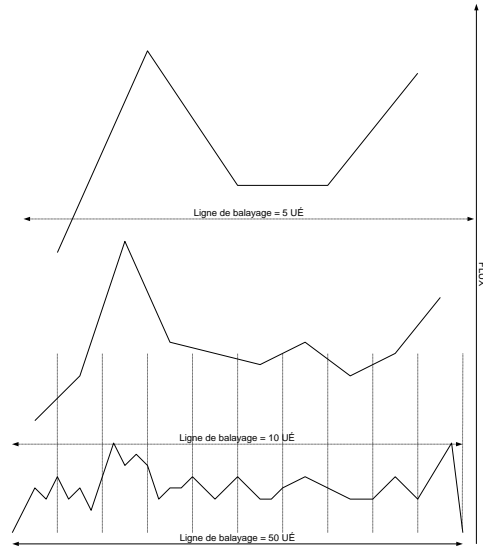


Figure 32 Le dédoublement progressif d'une UÉ tend à estomper les micro-variations spatiales du flux associées à la présence des objets de petite taille.

La relation entre taille de l'UÉ et la capacité de restitution des objets de petite taille est illustrée par la figure 33 avec deux images d'une UÉ respectivement de 15 m et de 60 cm. Le bâtiment observé par les deux capteurs a des dimensions de quelques centaines de mètres donc respectivement environ 10 et 100 fois plus grandes que les dimensions de l'UÉ des images. Les profils des valeurs numériques le long de la toiture du bâtiment montrent clairement l'effet de l'UÉ tel qu'expliqué précédemment : les micro-variations du flux créées par les éléments de la toiture observables à l'UÉ fine tendent à s'estomper à l'UÉ grossière. L'objet « toiture » conserve tout de même grâce à sa taille un bon contraste avec son environnement immédiat ce qui permet de détecter sa présence à l'UÉ de 15 m. Mais malgré cette taille, son identification est difficile car le flux mesuré s'apparente à celui d'autres objets. Décrire sa forme géométrique avec exactitude n'est pas non plus facile. Cet exemple montre clairement que le critère du rapport entre la taille d'un objet et celle de l'UÉ employé souvent par les praticiens en télédétection pour évaluer le potentiel cartographique d'une image n'est pas sans faille.

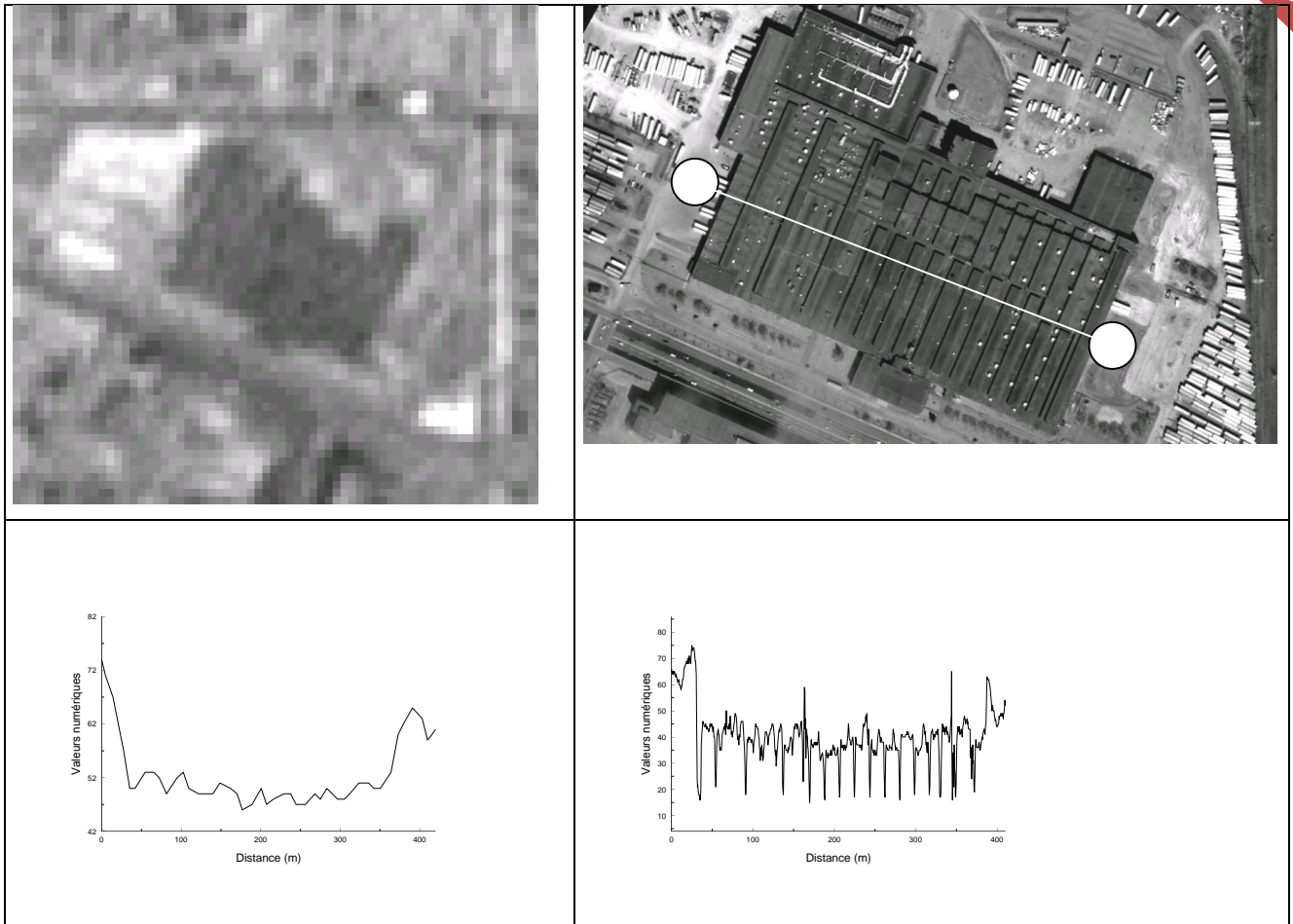


Figure 33 Effets de l'UÉ et du contraste sur la perception des objets de grande taille; à gauche un extrait de la bande PAN (version 2) du capteur ETM+ de Landsat-7 (UÉ de 15 m) et à droite un extrait d'une image PAN (version 2) du satellite QuickBird (UÉ de 60 cm)

La figure 34 est présentée afin d'illustrer qu'un autre critère souvent employé pour juger de la résolution spatiale de l'image, la distance minimale entre objets, ne mène pas nécessairement à une bonne anticipation des caractéristiques géométriques du médium de travail. Ici des réservoirs d'hydrocarbures observés par deux capteurs à UÉ différente ont une taille et un espacement qui garantiraient selon ce critère leur visibilité sur les deux images satellites. Les deux réservoirs avec un fort contraste apparaissent en effet comme des objets distincts sur ces images. Le réservoir avec un contraste moyen apparaît comme une entité distincte sur l'image avec une UÉ de 6 m et d'une taille similaire aux deux autres réservoirs. Dans l'image à 20 m d'UÉ nous l'apercevons encore mais sa taille apparaît plus petite par rapport aux deux autres réservoirs. Quant aux 3 réservoirs d'un faible contraste avec leur environnement, ils sont tant bien que mal perceptibles sur l'image à 6 m d'UÉ tandis qu'ils sont presque confondus avec leur environnement sur l'autre image. Mais même sur la photographie aérienne numérisée avec un pixel au sol de 1 m, présentée dans la même figure, ces trois réservoirs sont surtout perceptibles grâce à l'ombre qu'ils projettent au sol. C'est donc la relation entre l'UÉ, la taille d'un objet et son contraste qui est à la base d'une définition plus complète de ce qu'est la résolution spatiale.

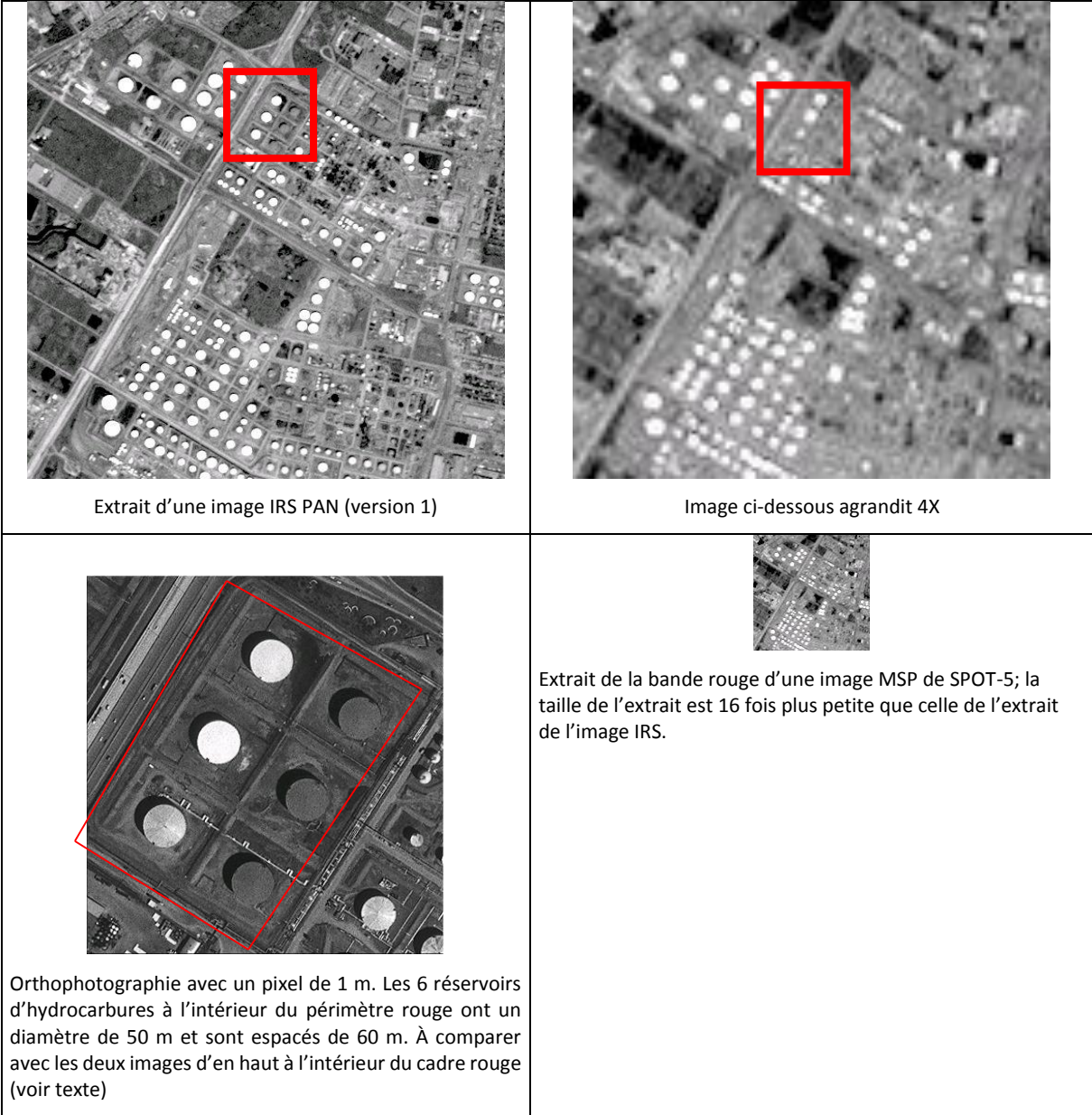


Figure 34 Distance entre objets, contraste et unité d'échantillonnage spatiale définissent c'est que la résolution spatiale

2.3.2 Résolution radiométrique

Les caractéristiques radiométriques des images peuvent être considérées d'un point de vue différent selon le type d'information recherchée. À titre d'exemple, pour ceux qui s'intéressent à la restitution des propriétés biophysiques des objets à partir des images, la question qui les préoccupe le plus est ce qu'une différence d'un niveau de gris entre deux pixels représente en termes de réflectance des objets au sol. Pour les autres qui s'intéressent à restituer la géométrie des objets à partir des images, la façon dont les contrastes entre objets sont restitués sur les images est le facteur de première importance. Dans tous les cas la notion de *la résolution radiométrique* d'un capteur est centrale. Plusieurs mesures sont utilisées pour l'exprimer. La mesure de base cependant demeure le nombre de bits utilisés lors de l'échantillonnage électronique. Une image à 256 niveaux de gris (8 bits) a une résolution radiométrique plus fine qu'une autre à 64 niveaux de gris, toutes deux observant la même surface sous les mêmes conditions.

2.3.3 Résolution spectrale

Elle fait référence au nombre, l'espacement et la largeur des bandes spectrales échantillonnées dans le spectre du rayonnement solaire réfléchi. Ainsi une image multispectrale avec sa dizaine de bandes spectrales a une résolution spectrale plus faible qu'une image hyperspectrale avec sa centaine des bandes spectrales. Bien sûr l'image panchromatique a la résolution spectrale la plus faible de toutes les images (1 seule bande spectrale).

2.4 PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES

Un cliché numérique possède la géométrie d'une projection centrale comparativement à une carte topographique qu'à des échelles moyennes et grandes est une projection orthographique (fig. 35). Dans le cas d'un cliché parfaitement vertical, la différence de la géométrie est apparente lorsque dans le cas du relief topographique (ou tout objet surélevé) avec la distorsion géométrique caractéristique du déplacement radial (fig. 36).

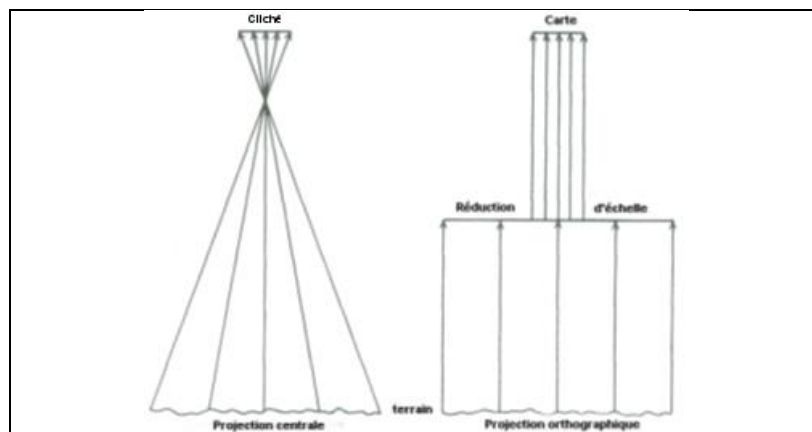


Figure 35 Différence de projection entre un cliché numérique et une carte topographique

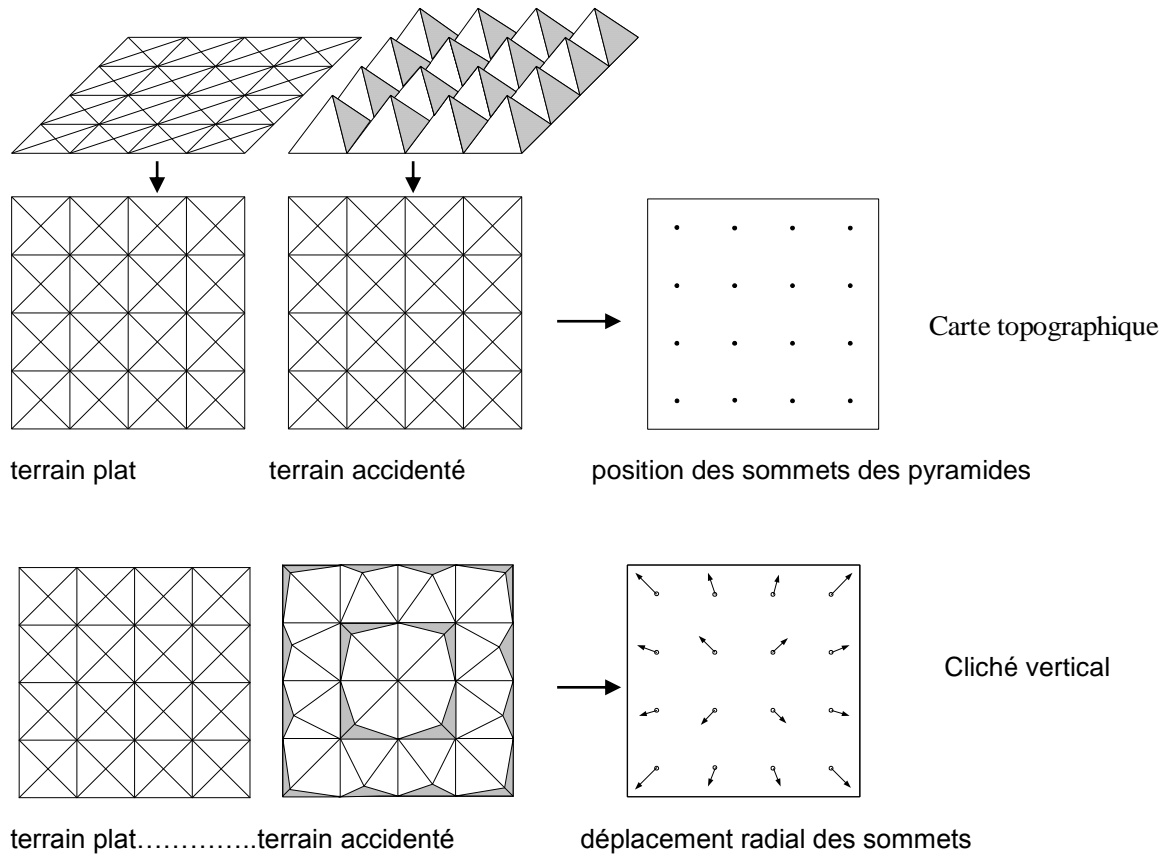


Figure 36 Différence entre une carte et un cliché numérique vertical

Les balayeurs à râteau ont une projection centrale le long d'une ligne de balayage. La géométrie est similaire à celle d'un cliché mais seulement dans la direction de balayage. Dans un terrain accidenté, il y a des déplacements dus au relief similaires à ceux d'un cliché mais seulement dans la direction d'une ligne de balayage.

Les balayeurs à époussette quant à eux utilisent une projection cylindrique le long d'une ligne de balayage. Ainsi même si le terrain est plat et horizontal des déformations géométriques sont présentes dues aux variations de la taille de l'unité d'échantillonnage au sol particulièrement aux extrémités des images (fig. 37).

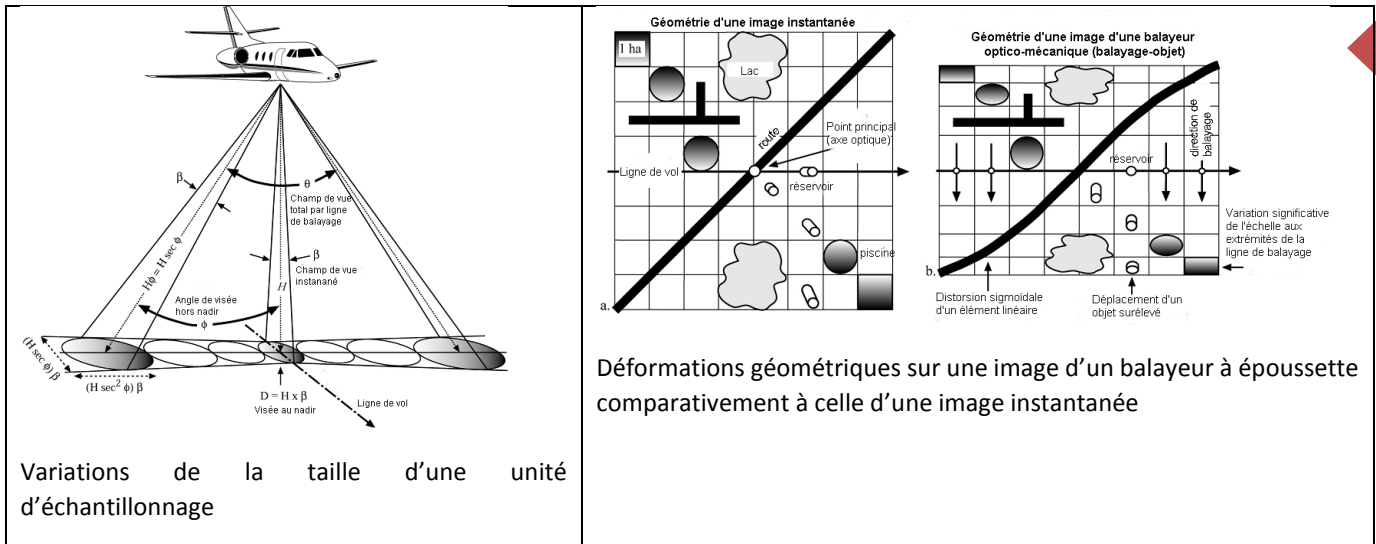


Figure 37 Caractéristiques géométriques d'une image d'un balayeur à époussette aéroporté

Les images satellitales proviennent presque exclusivement des balayeurs. Leur champ total de vue d'une ligne entière de balayage est très étroit comparativement à un balayeur aéroporté (une dizaine de degrés versus une centaine de degrés). La cause principale de déformation pour des images prises à la verticale est la courbure de la Terre. Particulièrement pour les capteurs à fauchée large (ex. 2000 km) des variations similaires à celles observées aux extrémités des balayeurs aéroportés à époussette (fig. 37) sont alors présentes. Puisque la vitesse du satellite est grande et le temps d'échantillonnage électronique est très court pour une ligne de balayage entière, nous sommes forcés à un échantillonnage spatial avec des larges unités (de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres). Plus la fauchée devient étroite plus le temps d'échantillonnage électronique est grand et nous pouvons ainsi se permettre d'échantillonner avec des unités spatiales fines. Cependant plus l'unité au sol devient fine, plus les distorsions dues au relief topographique ainsi que les déplacements des objets surélevés deviennent apparentes.

Nous avons vu qu'avec les balayeurs à râteau nous prenons des images en dépointant de la verticale le champ de vue du capteur. Dans ce cas-ci les variations de la taille de l'unité d'échantillonnage deviennent importantes. Ainsi par exemple pour un capteur dont l'unité d'échantillonnage au sol à une visée verticale est de l'ordre de 60 cm x 60 cm, cette taille devient à un angle de dépointage de 25° de 1m x 1m environ. Puisque la taille d'une unité d'échantillonnage a une répercussion importante sur la résolution spatiale des images (la finesse du détail visible sur les images) on comprend qu'une image oblique aura une résolution spatiale plus ou moins dégradée par rapport à une image verticale. Les déplacements du relief sont dans ce cas très importants.

2.5 PROPRIÉTÉS RADIOMÉTRIQUES

2.5.1 Images panchromatiques

La brillance des objets, particulièrement la végétation, présente des différences importantes selon la version (1 ou 2). Les capteurs à bord des satellites de la série SPOT, le capteur ALI à bord du satellite EO-1 (Terra) et le capteur OLI à bord du satellite Landsat-8 fournissent des images en version 1. Les capteurs à bord d'IKONOS, QUICKBIRD, WORDVIEW ainsi que le capteur ETM+ de Landsat 7 fournissent des images en version 2. Un exemple est donné à la figure 38 avec le Mont-Royal et ses environs. Les tonalités des mêmes objets ne sont pas similaires, en particulier, la végétation.

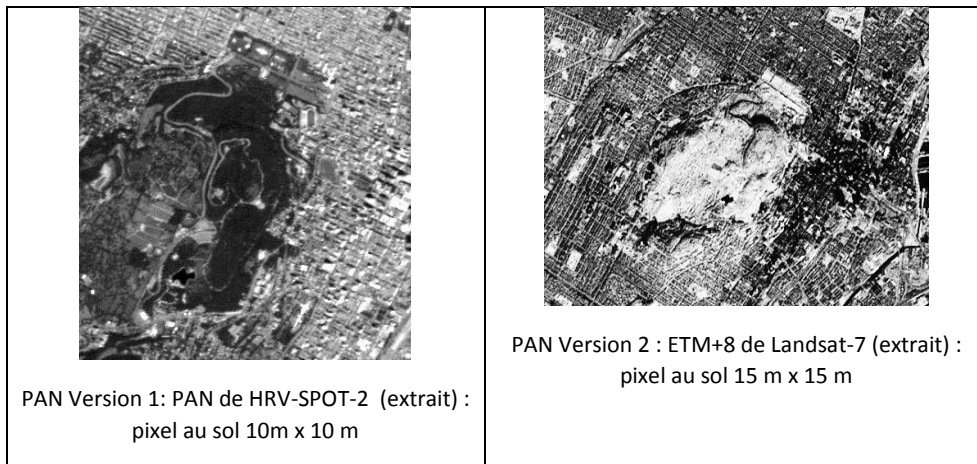


Figure 38 Différences dans la brillance des objets entre les deux versions de PAN

Pour expliquer cette différence en termes radiométriques nous analyserons la façon dont les valeurs numériques sont attribuées à des pixels couverts de végétation. Nous supposerons que :

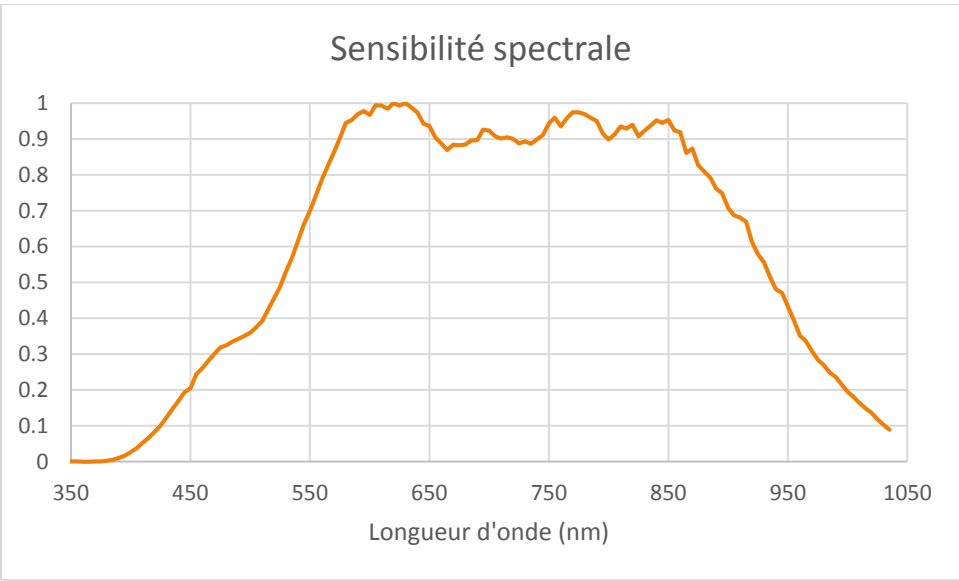
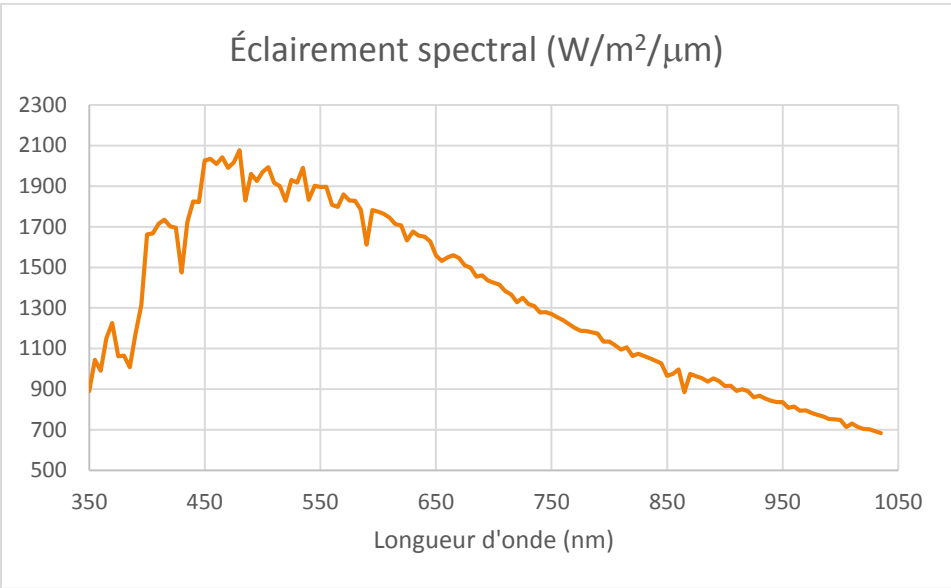
- L'atmosphère n'est pas présente
- Le soleil est au zénith
- La surface est horizontale couverte, par exemple, de feuillus et elle réfléchit le rayonnement solaire d'une façon isotrope (réflecteur parfaitement diffus ou lambertien)

Cas du capteur à bord du satellite Ikonos (PAN VERSION 2) :

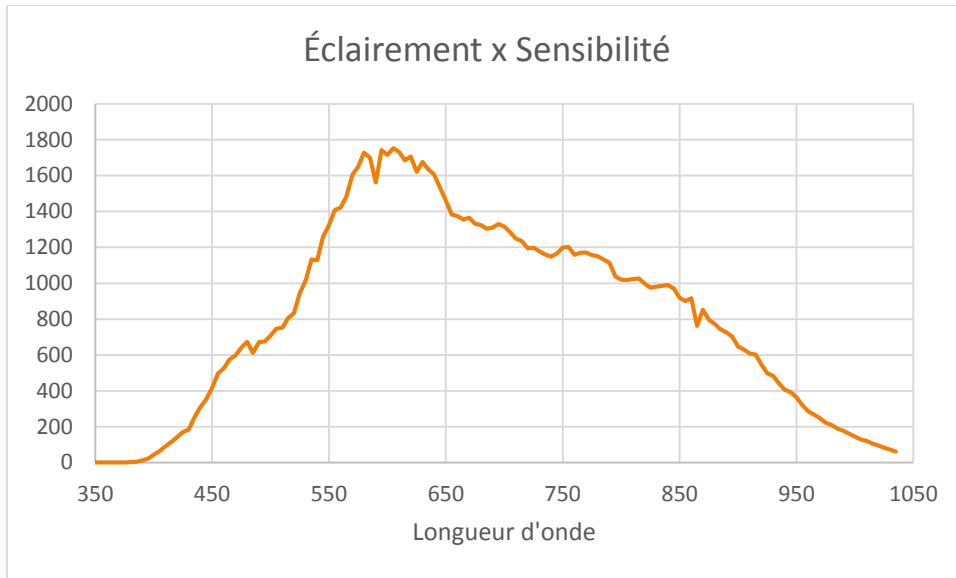
Question 1 : Quelle est la densité du flux du rayonnement solaire (éclairage) qui atteindrait la surface en l'absence de l'atmosphère dans la bande panchromatique d'Ikonos (0.35 à 1.035 μm)?

Éclairage recherché ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$) = moyenne d'éclairages par longueur d'onde pondérée par la sensibilité spectrale du capteur :

$$E(PAN) = \frac{\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * E(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * \Delta\lambda}$$



$$\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * \Delta\lambda = 82.809$$

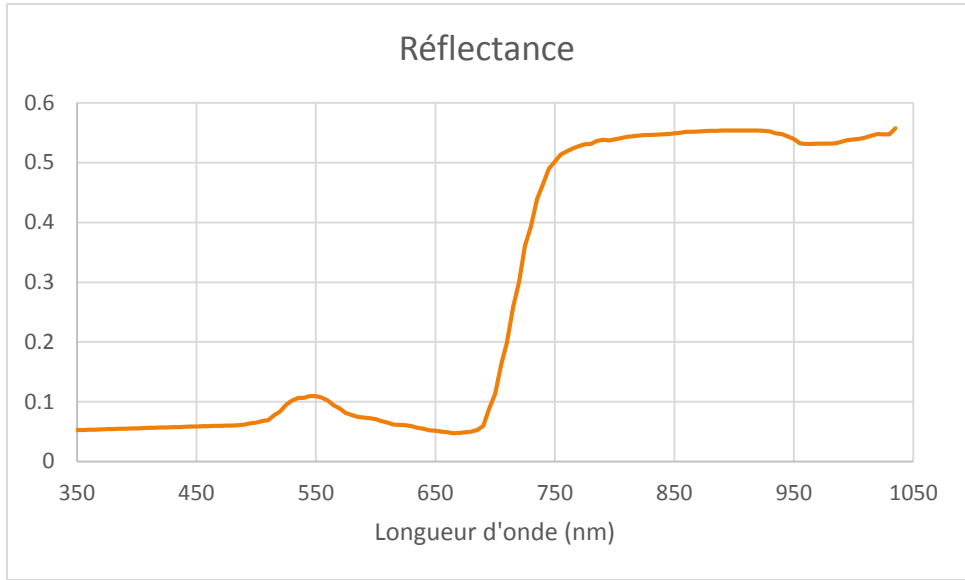


$$\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * E(\lambda) * \Delta\lambda = 113025.352$$

$$E(PAN) = \frac{\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * E(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{0.35}^{1.035} S(\lambda) * \Delta\lambda} = \frac{113025.352}{82.809} = 1364.892$$

Question 2 : Quelle est la réflectance de l'objet?

$$\rho(PAN) = \frac{\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * \rho(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda}$$



$$\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * \rho(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda \rho(PAN) = 28817.574$$

$$\rho(PAN) = \frac{\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * \rho(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda} = \frac{28817.574}{113025.352} = 0.255$$

QUESTION 3 : Quelle est la luminance reçue par le capteur?

$$L(PAN) = \frac{E(PAN) * \rho(PAN)}{\pi} = 110.772 \text{ (W/m}^2\text{/sr/}\mu\text{m)}$$

QUESTION 4 : Quelle est la valeur numérique ?

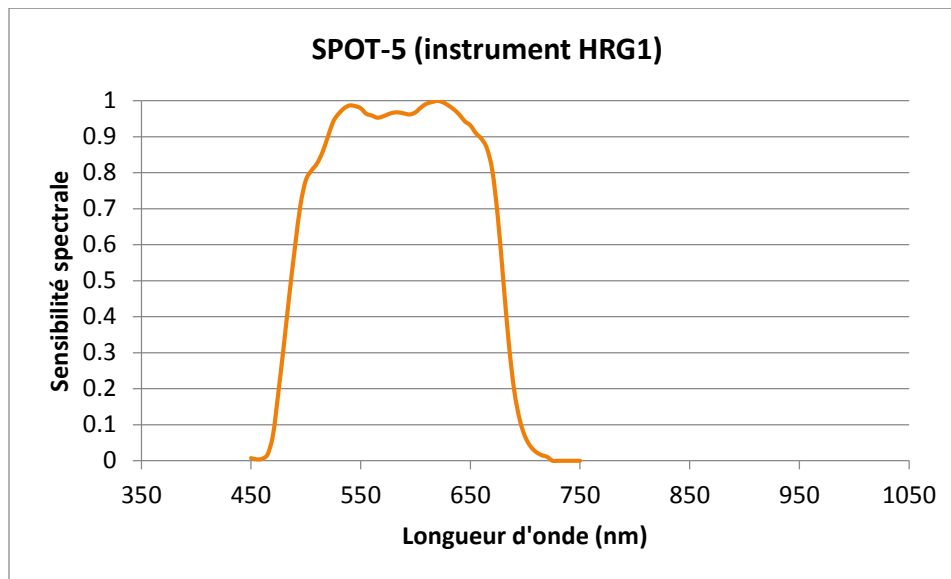
La conversion luminance en VN (échelle 11 bits = $2^{11} \rightarrow 0$ à 2047) se fait comme suit :

$$L(PAN) = \frac{(VN/C)}{D\lambda}$$

Où C = une constante d'étalonnage et $D\lambda$ = la largeur effective de la bande panchromatique. La constante C est définie pour chaque acquisition de données (ajustement du capteur selon le contexte). Pour la bande PAN elle tourne autour de 20. La bande effective est considérée entre 0.526 μm et 0.929 μm , i.e. 0.403 μm . Alors on peut trouver dans notre exemple que $VN = \text{arrondi}(110.772 * 20 * 0.403) = 893$.

Cas de l'instrument HRG1 à bord du satellite SPOT-5

Les mêmes opérations en partant d'une sensibilité spectrale restreinte entre 450 nm et 750 nm au lieu de celle d'Ikonos qui va de 350nm à 1035 nm.



Ainsi

$$E(PAN) = \frac{\sum_{0.45}^{0.720} S(\lambda) * E(\lambda) * \Delta\lambda}{\sum_{0.45}^{0.720} S(\lambda) * \Delta\lambda} = \frac{65749.923}{37.239} = 1765.609 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$$

$$\rho(PAN) = \frac{\sum_{0.45}^{0.720} E(\lambda) * \rho(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{0.35}^{1.035} E(\lambda) * S(\lambda) \Delta\lambda} = \frac{4910.68328}{65749.9232} = 0.075$$

$$L(PAN) = \frac{E(PAN) * \rho(PAN)}{\pi} = 41.975 \text{ (W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m)}$$

La conversion L en VN (échelle de 8 bits donc 0 à 255 niveaux de gris) se fait par une équation du type $L = C * VN$. La constante est variable d'une image à l'autre (ajustement du capteur selon le contexte). Elle tourne autour de 2 donc dans notre exemple VN environ 84.

Conclusion

Par ces calculs on peut expliquer pourquoi la différence des teintes entre les deux versions de panchromatique concernant la végétation :

Réflectance spectrale moyenne

La bande IKONOS (version 2) : 0.255 vs la bande HRG1 (version 1) : 0.075

Ainsi même si l'éclairement spectral moyen pour IKONOS est plus bas que dans le cas de HRG1, la luminance au capteur est environ 2.5 fois plus forte.

2.5.2 Images multispectrales

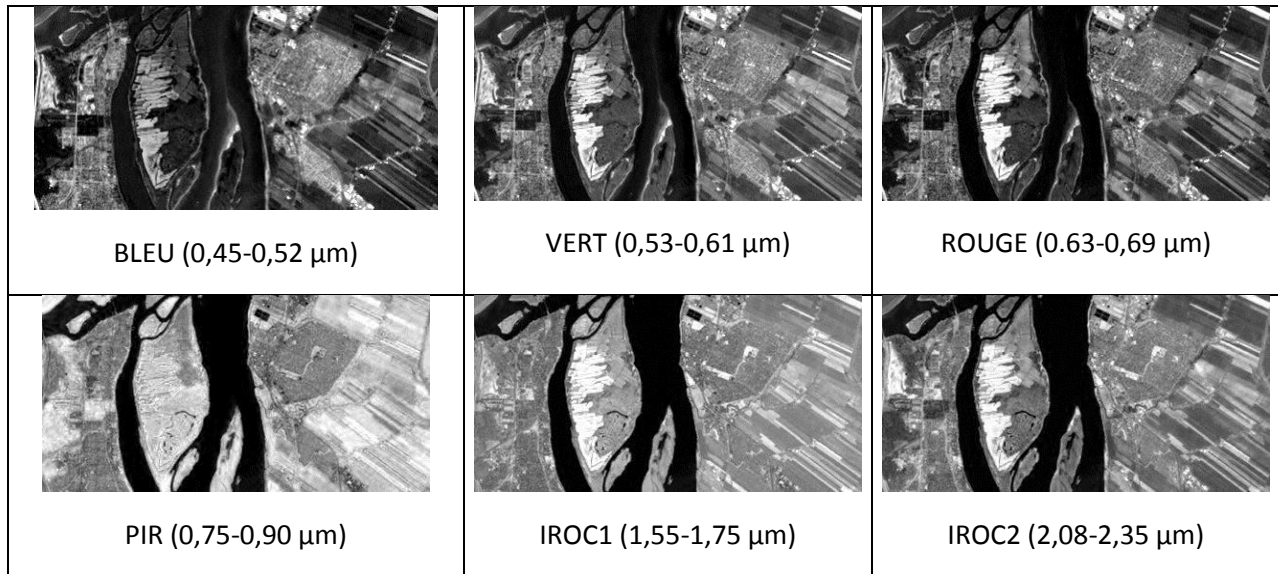
D'une manière similaire que précédemment, nous pouvons calculer la luminance dans chacune des bandes d'une image multispectrale. Tel que mentionné (section 2.1.7), même si les capteurs opèrent dans le même intervalle spectral, leurs sensibilités spectrales ne sont pas tout à fait les mêmes. Ainsi des légères différences sont observables quant à la brillance des images. Ces différences sont plus accentuées lorsqu'on examine les valeurs numériques (même échelle de gris) dépendant du mode d'étalonnage des capteurs (conversion luminances en valeurs numériques). Ceci est un problème lorsque nous voulons utiliser des images multispectrales provenant des capteurs différents pour réaliser un projet.

Un autre élément qui différencie les images multispectrales est leur résolution spectrale. À titre d'exemple le tableau 5 compare les bandes spectrales disponibles par deux capteurs satellitaires. On constate que l'image SPOT ne possède pas une bande dans le bleu, donc impossible de visualiser son contenu en créant une image en couleur normale (Rouge-Vert-Bleu). Également elle ne possède pas une bande dans les 2 µm. Comme nous l'avons mentionné, cette bande est particulièrement utile pour différencier la neige des nuages.

Tableau 5 : Comparaison des deux capteurs multispectraux; le capteur ETM+ a une résolution spectrale en termes du nombre de bandes que le HRG

Capteur satellital	Bandes spectrales (en micromètres)
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat 7	1. 0,45 - 0,52 (Bleu) 2. 0,52 - 0,60 (Vert) 3. 0,63 - 0,69 (Rouge) 4. 0,76 - 0,90 (Proche Infrarouge) 5. 1,55 - 1,75 (Infrarouge à ondes courtes) 6. 2,08 - 2,35 (Infrarouge à ondes courtes)
HRG (Haute Résolution Géométrique) de SPOT-5 (Système Probatoire d'Observation de la Terre)	1. 0,50 - 0,59 (Vert) 2. 0,61 - 0,68 (Rouge) 3. 0,79 - 0,89 (Proche infrarouge) 4. 1,52 - 1,75 (Infrarouge à ondes courtes)

L'examen visuel des trois bandes en simultané par le biais de la couleur facilite l'identification visuelle des objets comparativement à l'examen de trois images monochromes séparées. D'autre part l'œil et le cerveau humain sont beaucoup plus sensibles aux variations de la couleur qu'aux variations des tons de gris. Cependant l'utilisation des bandes spectrales hors du visible pour la création des composés fausses couleurs nécessite la bonne compréhension des signatures spectrales des objets dont on a fait mention plus tôt. La figure 39 présente un exemple avec des composés couleurs obtenus à partir de l'extrait suivant d'une image multispectrale du capteur ETM+ de Landsat-7 :



Les combinaisons classiques similaires à celles obtenues via les films couleur : a) couleurs normales; b) couleurs infrarouge ou fausses couleurs. Les combinaisons « exotiques » : c) la bande du rouge est remplacée par la bande IROC2 pour une meilleure perception de l'humidité des sols; d) la combinaison généralement suggérée pour les études de la végétation, les trois parties du spectre solaire sont conservées : Visible, PIR, IROC1; e) les trois bandes dans l'infrarouge ensemble, bonne sensibilité à la texture des sols (sable, limon, glaise); f) la même chose que dans d) toutefois avec une inversion des bandes dans l'infrarouge : plus grande ressemblance à la combinaison classique fausses couleurs.

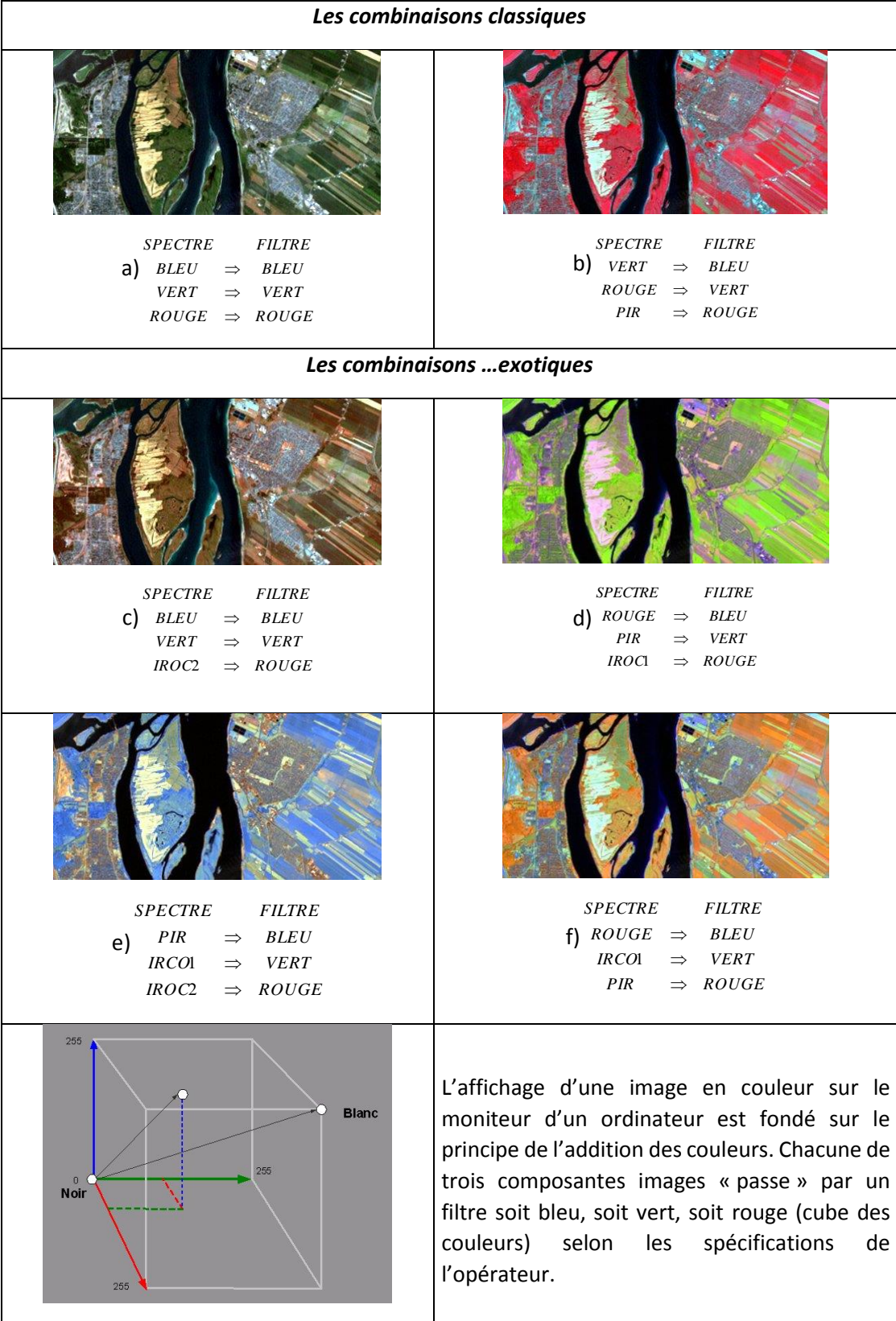


Figure 37 Différents composés couleur obtenus avec les six bandes spectrales du capteur ETM+ du satellite Landsat-7.

2.5.3 Images hyperspectrales

La figure 38 montre un composé coloré de trois de 224 bandes possibles acquises par le capteur hyperspectral aéroporté AVIRIS qui en fait c'est un système de 4 appareils (spectromètres imageurs) opérant en simultanément avec les spécifications suivantes :

Appareil	Longueurs d'onde	Nombre de bandes	Largeur de bande
1	0,41-0,70 μm	31	9,4 nm
2	0,68-1,27 μm	63	9,4 nm
3	1,25-1,86 μm	63	9,7 nm
4	1,84-2,45 μm	63	9,7 nm

La deuxième partie de cette figure montre la signature spectrale apparente (en fait le flux mesuré au niveau du capteur) des quelques points (pixels) localisés sur l'image. La comparaison de ces courbes avec celles de la figure 19 montre clairement l'immense potentiel de ce type d'imagerie pour l'identification précise des types de matériaux. Il est à noter que les anomalies apparentes (creux) dans la continuité des courbes spectrales comparativement à la figure 19 sont dues à la présence des gaz atmosphériques (oxygène, ozone, vapeur d'eau...) qui absorbent fortement le RÉM à ces longueurs d'ondes spécifiques.

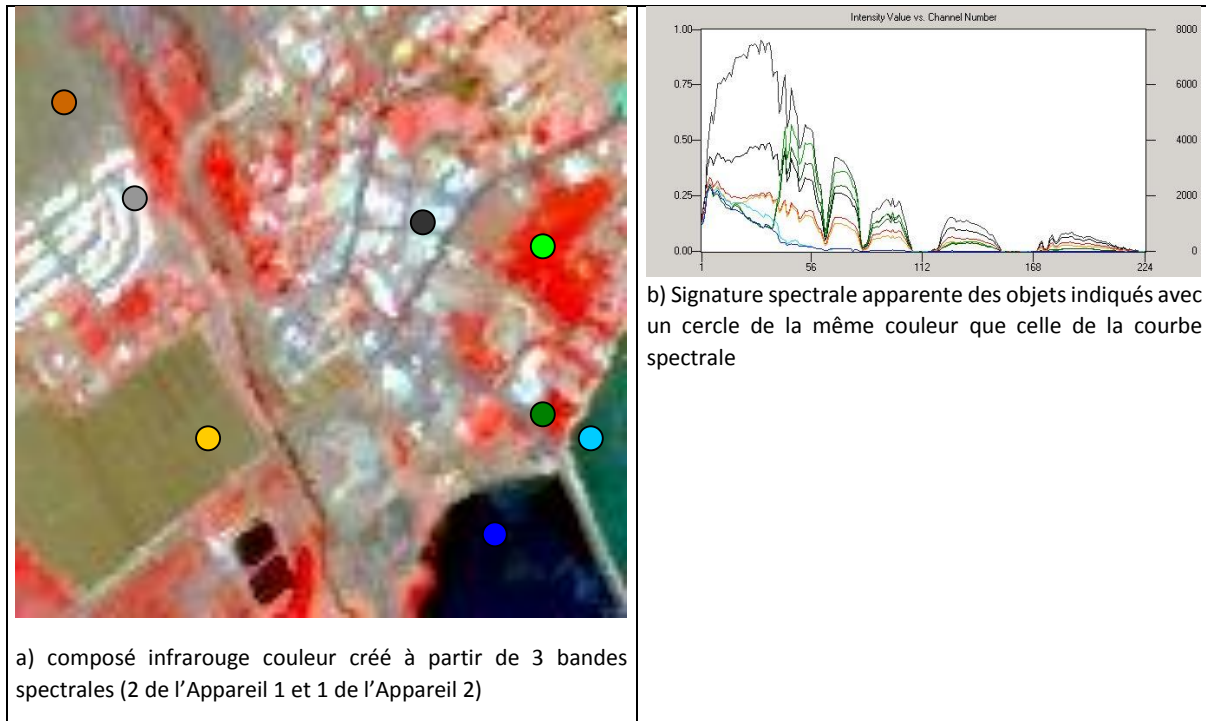


Figure 38 Imagerie hyperspectrale du capteur aéroporté AVIRIS (extrait). Pixel au sol 7 m x 7m

Si déjà avec les images multispectrales à une dizaine de bandes spectrales, la visualisation des trois bandes à la fois par le biais de la couleur présente une certaine difficulté, avec les images hyperspectrales la situation devient très problématique. L'usage de l'ordinateur pour l'analyse de leur contenu est impératif.

3.1 FORMATION DES IMAGES : BASES DE PHYSIQUE

3.1.1 Émission du rayonnement

À la manière du soleil, les objets terrestres émettent eux-mêmes du rayonnement électromagnétique à des quantités bien sûr infiniment plus petites que celles émises par le soleil. Pour étudier les caractéristiques d'émission des objets terrestres nous faisons appel à un émetteur thermique idéal, le **corps noir**. Ce corps a la capacité d'absorber tout le REM qui reçoit et de l'émettre, à un taux maximal permis par les lois de la thermodynamique, d'une façon isotrope vers le milieu environnant. Les lois qui régissent l'émission du corps noir sont présentées dans la Boîte 1. La loi de Stefan-Boltzman nous donne le rayonnement total émis par un corps noir. Nous pouvons comprendre que la quantité du rayonnement émis est fonction de la quatrième puissance de sa température cinétique. Ce rayonnement n'est pas réparti dans le spectre d'une façon uniforme (fig. 39). Cette répartition est décrite par la loi de Planck tandis que la loi de Wien permet de localiser rapidement la longueur d'onde où le rayonnement émis présente un pic (fig. 39). Plus la température interne croît, plus le pic d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde. Comme nous pouvons le constater par la figure 39, l'émission de la plupart des objets terrestres se fait pour l'essentiel dans la zone de l'infrarouge avec un pic d'émission dans la partie de l'infrarouge thermique (8 μm à 14 μm). La présence d'une fenêtre atmosphérique à ces longueurs d'onde permet la détection à distance de ce rayonnement électromagnétique et la création d'images, communément appelées thermographies.

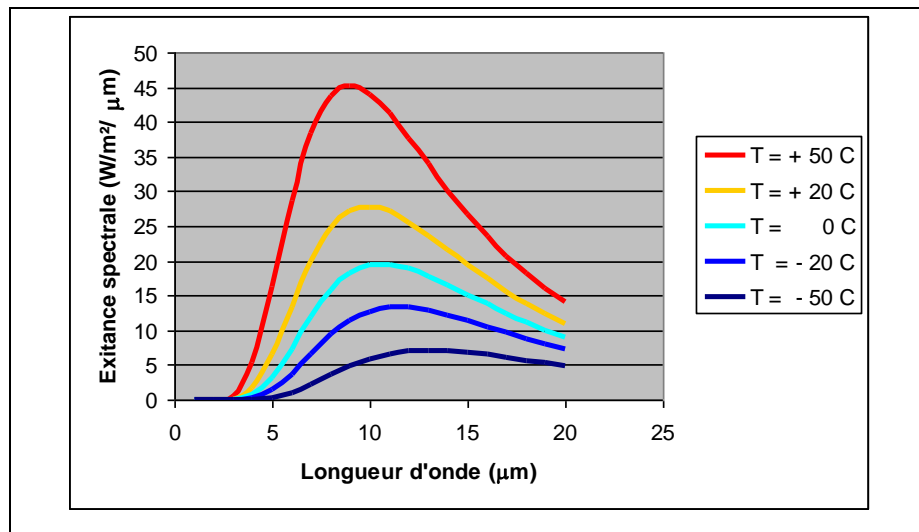


Figure 39 Émission spectrale des corps noirs à différentes températures

Cependant les objets réels ne sont pas des corps noirs parfaits. Le rayonnement émis par longueur d'onde est plus faible que celui d'un corps noir à la même température que le corps réel. On introduit alors une quantité dite émissivité spectrale pour décrire l'efficacité d'émission d'un corps réel. L'émissivité spectrale $\epsilon(\lambda)$, est le rapport entre l'émittance spectrale du corps réel M_{cr} à l'émittance spectrale d'un corps noir M_{cn} se trouvant à la même température que le corps réel :

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M_{cr}(\lambda, T)}{M_{cn}(\lambda, T)}$$

Certains objets terrestres, comme l'eau, ont une émissivité constante selon la longueur d'onde. Nous les appelons, les corps gris. D'autres ont une émissivité variable dans le spectre et on les appelle, les corps à émissivité sélective (fig. 40). Le tableau 6 donne les valeurs de l'émissivité dans l'infrarouge thermique des certains matériaux de surface. Comme nous pouvons le constater leur émissivité tourne autour de 0,98 à l'exception de l'aluminium poli qui ne parvient pas à émettre du rayonnement dans l'infrarouge thermique à des quantités proches de celles d'un corps noir à la même température (mauvais émetteur).

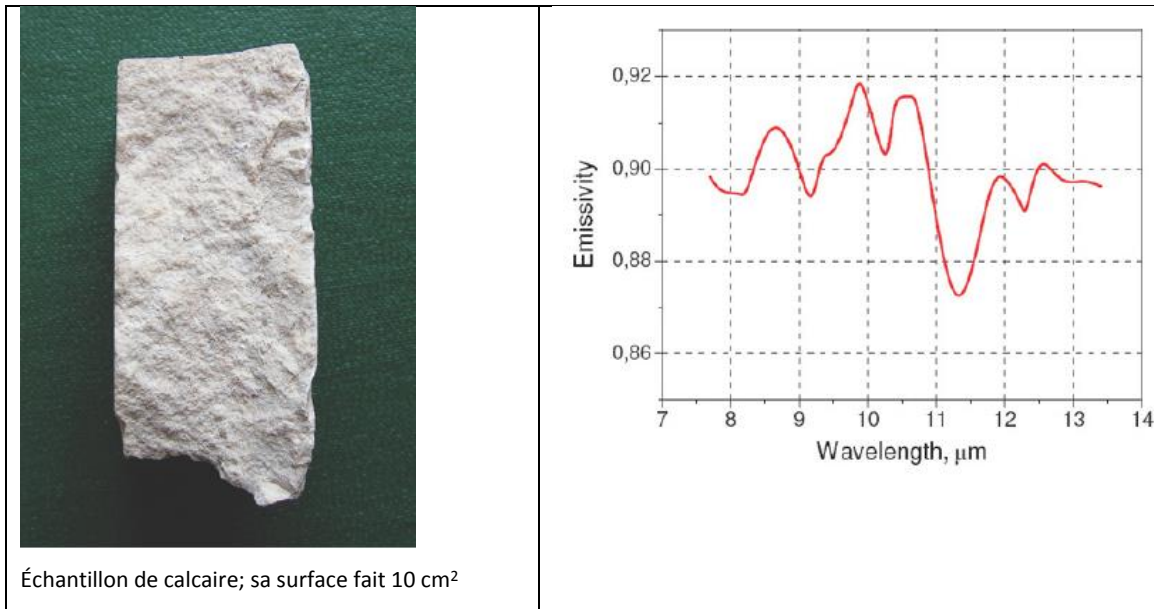


Figure 40 Exemple d'un corps à émissivité spectrale sélective

Tableau 6 Émissivité des matériaux dans l'infrarouge thermique

Matériau	Émissivité
Granite	0,81
Sable (grains larges)	0,91
Asphalte (pavage)	0,96
Eau pure	0,99
Béton (trottoir)	0,97
Aluminium poli	0,06
Aluminium avec couche de peinture noire	0,97
Conifères	0,99
Feuillus	0,97

1. La loi de Planck : L'émittance spectrale d'un corps noir dans une longueur d'onde quelconque est donnée par :

$$M(\lambda) = \left(\frac{c_1}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1 \right)} \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$$

où $c_1 = 3,742 \times 10^{-16} [\text{W m}^2]$
 $c_2 = 1,439 \times 10^{-2} [\text{m K}]$
 T = la température cinétique du corps noir (en K)

Puisque le corps noir émet d'une façon isotrope, un appareil de mesure idéale placée dans n'importe quelle position autour d'un corps noir il observera la même luminance spectrale :

$$L(\lambda, \theta, \phi) = \frac{M(\lambda)}{\pi} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}]$$

2. La loi de Stefan-Boltzman : L'émittance (totale) de l'objet dans l'ensemble du spectre est :

$$M = \sigma T^4$$

où σ = la constante de Stefan-Boltzmann = $5,669 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$.
Comme précédemment, la luminance (totale) d'un corps idéale est donnée par la relation :

$$L = \frac{M}{\pi} \Rightarrow L = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}]$$

Cette loi nous montre que la quantité totale du rayonnement émis augmente rapidement avec un accroissement de la température (voir les exemples de la figure 1).

3. La loi de déplacement de Wien : La longueur d'onde où l'émittance spectrale atteint son maximum est donnée par la relation

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{C}{T}$$

où $C = 2898 [\mu\text{m K}]$

Cette loi nous montre que plus la température du corps augmente plus l'émission maximale survient à des longueurs d'ondes plus petites (voir les exemples de la figure 1)

3.1.2 Le rôle de l'atmosphère

D'une manière similaire au rayonnement solaire réfléchi, le rayonnement émis diminue en intensité en traversant l'atmosphère à cause de l'absorption par des gaz atmosphériques, notamment la vapeur d'eau, ainsi que de la diffusion. Ici, étant donné la longueur d'onde du rayonnement, seulement les plus grosses particules, comme la suie, sont responsables de la diffusion. Le rayonnement émis par les différentes parcelles de terrain peut être diffusé par l'atmosphère dans la direction de visée du capteur augmentant ainsi le flux mesuré au-dessus d'une unité d'échantillonnage spécifique. C'est un phénomène analogue au voile atmosphérique dans le cas des images du rayonnement solaire réfléchi. Il faut aussi noter que l'atmosphère est un émetteur de rayonnement dans l'infrarouge thermique. Une partie de ce rayonnement est dirigée vers la surface (quelque chose d'analogue à l'éclairement du ciel) et après réflexion par la surface terrestre, dirigée vers le capteur. En d'autres termes le rayonnement mesuré par le capteur est un peu plus fort que celui qui serait capté si seule l'émission par l'objet influençait la mesure.

Les nuages sont opaques au rayonnement provenant du sol nous bloquant ainsi la vue du sol. Puisque les nuages sont à des températures beaucoup plus basses que le sol, ils ressortent sur les images avec une teinte sombre (fig. 41).

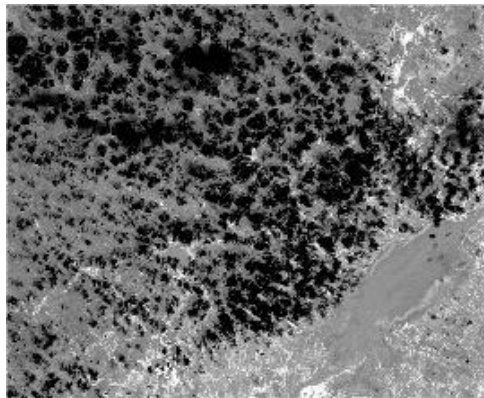


Figure 41 Apparence des nuages sur une thermographie

3.1.3 Le captage du rayonnement

Les choses se passent d'une façon similaire que dans le cas des capteurs du rayonnement solaire réfléchi. Des filtres spéciaux sont utilisés pour ne capter que le rayonnement dans une seule bande spectrale ou dans plusieurs bandes spectrales. Des détecteurs appropriés sont utilisés pour transformer le rayonnement dans ces longueurs d'ondes en courant électrique. La figure 42 montre les courbes de sensibilité spectrale des détecteurs utilisés dans les capteurs TM (Landsat 4 et 5) et ETM+ (Landsat 7). Puisque le capteur mesure le rayonnement émis il peut opérer aussi bien le jour que la nuit.

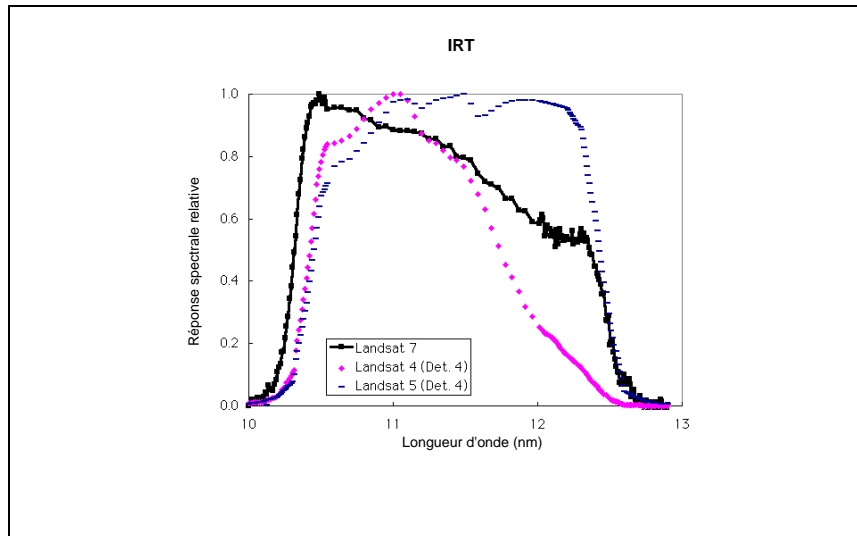


Figure 42 Courbes de sensibilité spectrale des détecteurs dans l'infrarouge thermique du capteur TM (Landsat 4 et 5) et d'ETM+ (Landsat-7)

3.2 FORMATION DES IMAGES : BASES TECHNOLOGIQUES

Jusqu'à tout récemment les images dans l'infrarouge thermique étaient acquises avec des balayeurs à époussette. Actuellement, la technologie CCD est applicable dans cette partie du spectre et des balayeurs à râteau prennent la place des balayeurs à époussette. Il faut noter que lorsque un capteur acquiert des images en simultané dans le spectre solaire ainsi que dans l'infrarouge thermique, il ne peut pas toujours maintenir la même finesse d'une unité d'échantillonnage au sol dans les deux types d'images. Ceci est particulièrement vrai pour les capteurs fonctionnant avec une unité d'échantillonnage plus fine que la centaine de mètres. La raison est la suivante : le rayonnement émis est beaucoup plus faible que le rayonnement solaire réfléchi. Pour le même temps d'échantillonnage spatial et électronique d'une ligne de balayage le flux reçu par une unité d'échantillonnage équivalente est très faible comparativement à celui du rayonnement réfléchi. Pour former des thermographies de qualité nous sommes ainsi forcés d'échantillonner une unité plus large pour pouvoir collecter un rayonnement d'une intensité suffisante. À titre d'exemple, le capteur ETM+ de Landsat a une unité d'échantillonnage de 30 m x 30 m tandis que dans l'infrarouge thermique son unité est de 60 m x 60 m.

3.3 PROPRIÉTÉS DE BASE DES IMAGES

Les notions des résolutions spatiale, radiométrique et spectrale, examinées avec les images du rayonnement solaire, s'appliquent aussi dans le cas des thermographies. Ici, cependant, lorsqu'on fait référence au contraste, on parle du contraste thermique entre objets et non pas du contraste de la réflectivité du rayonnement solaire.

3.4 PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES

Les mêmes principes concernant les balayeurs du rayonnement solaire s'appliquent ici aussi : projection cylindrique pour les balayeurs à époussette et projection centrale pour les balayeurs à râteau.

3.5 PROPRIÉTÉS RADIOMÉTRIQUES

Dans l'infrarouge thermique la quantité du rayonnement émis et capté à distance est pour l'essentiel fonction de la température de la couche superficielle d'un objet au moment de la prise de données. Ainsi en règle générale plus un objet est chaud plus sa brillance sur une thermographie sera forte. La température d'un objet ainsi que le flux radiatif résultant varient dans le temps même en l'espace d'une journée. Plusieurs facteurs expliquent cette variabilité. Nous essayerons d'en aborder les principaux.

Le rayonnement électromagnétique qu'un objet puisse absorber provient principalement du soleil. Cette absorption est directement liée à l'absorptance de l'objet dans l'ensemble du spectre solaire (fig. 10). Puisque les objets sont pour la plupart opaques, nous pouvons dire que l'absorptance est égale à (1-albédo), albédo étant le terme utilisé pour désigner la réflectance des objets dans l'ensemble du spectre solaire. La température cinétique du corps suivra alors le cycle diurne d'apport énergétique par le soleil. Sa température monte graduellement depuis l'aube pour atteindre un maximum autour du midi et par la suite descend pour atteindre un minimum à minuit et le processus recommence. À part l'albédo qui fixe la quantité du rayonnement solaire absorbée par un objet, une myriade d'autres facteurs interviennent (densité du matériau, contenu en humidité, etc.) pour que les objets ne se trouvent pas à la même température au même moment durant le jour. D'autres facteurs interviennent aussi pendant la nuit pour que les objets n'atteignent pas la même température au même moment après la disparition du soleil. La figure 43 illustre ceci d'une façon schématique pour des matériaux typiques. Ainsi, l'apparence visuelle des objets sur une thermographie de jour comme de nuit dépendra du moment de la prise de données. Les contrastes 'thermiques' entre les diverses catégories d'objets, tel que montré par cette figure, sont meilleurs un peu avant midi et un peu après le crépuscule. D'autres exemples des variations diurnes des températures de surface observées sur le terrain sont donnés par la figure 44. Examinons avec plus de détails le comportement des objets typiques et leur impact sur les thermographies de jour et de nuit (fig. 45)

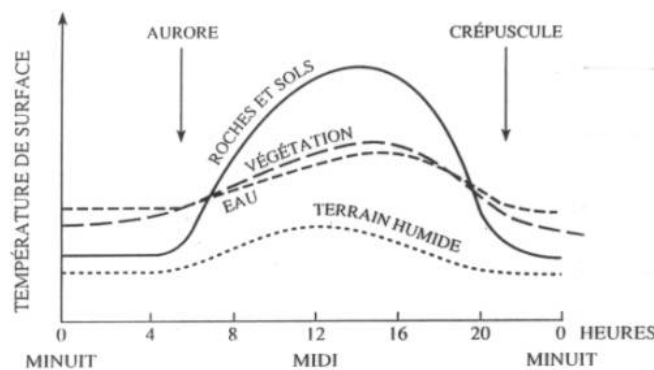


Figure 43 Variations diurnes typiques des températures de surface

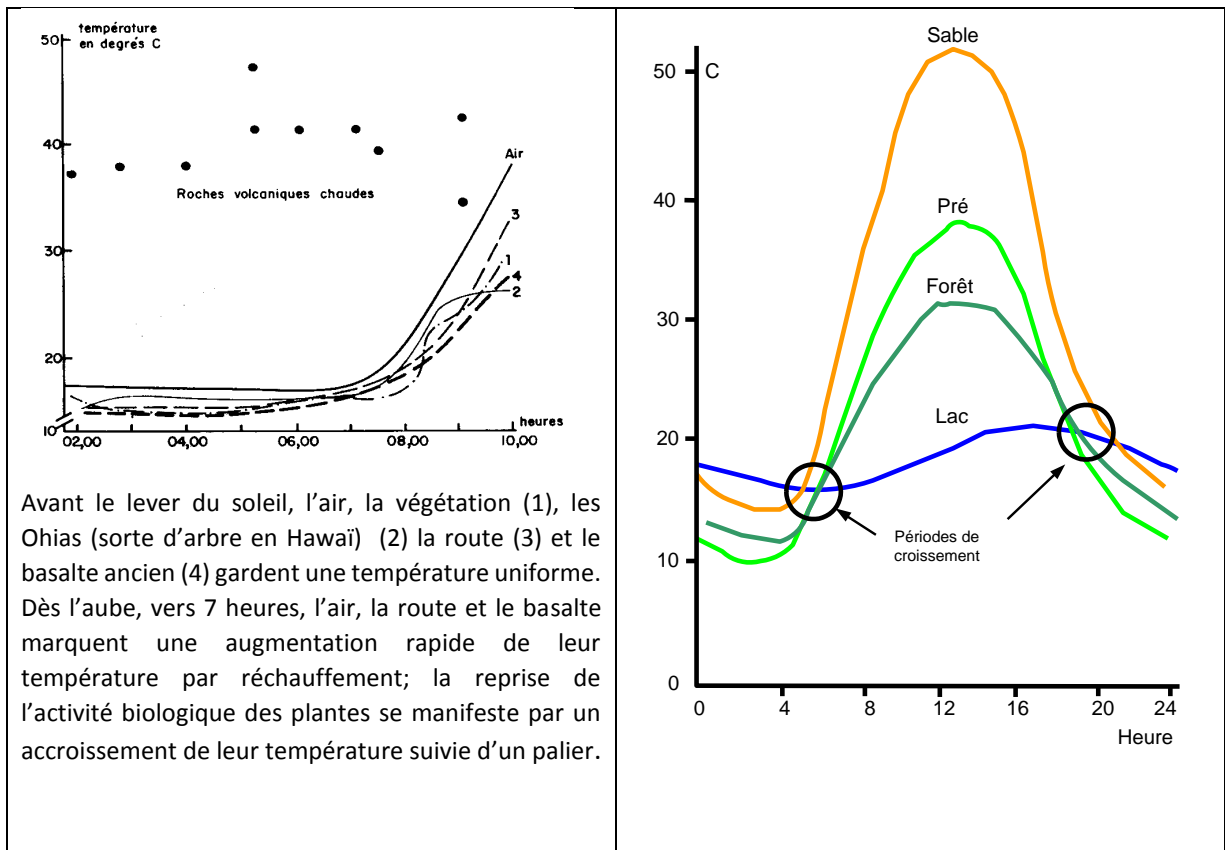


Figure 44 Variations diurnes des températures de surface mesurées sur le terrain

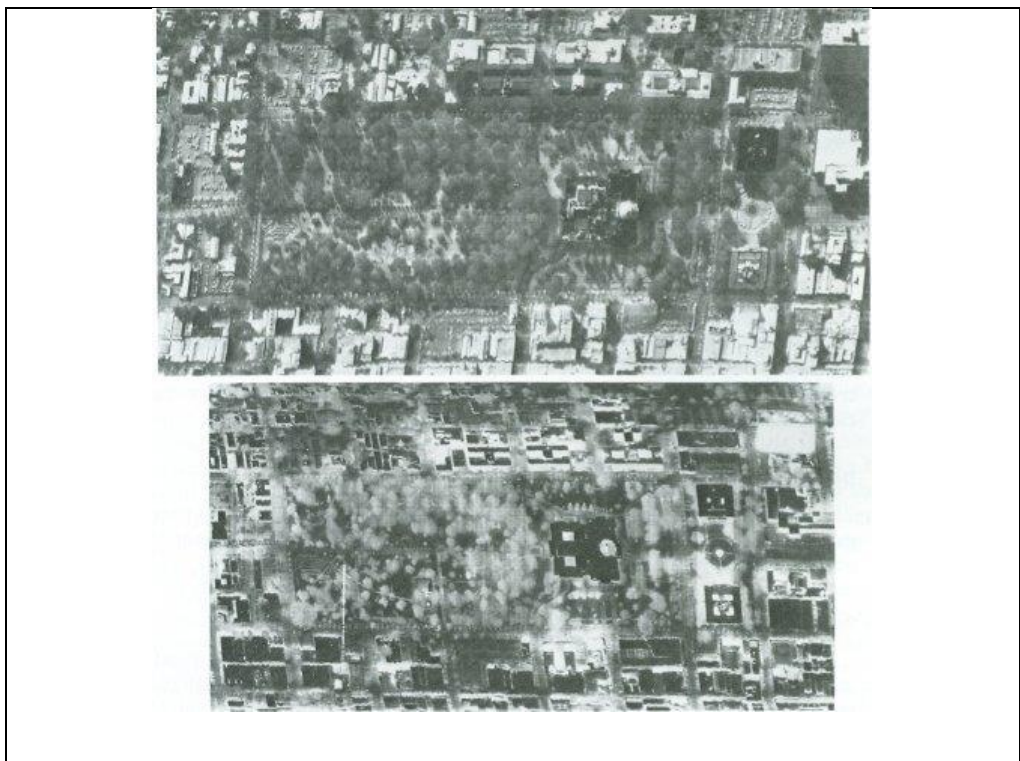


Figure 45 Thermographies aéroportées de jour et de nuit (8 to 14µm) acquises à 11:25 h (haut) et à 0:20 h (bas)

3.5.1 L'eau versus les sols et les roches

Les masses d'eau sont généralement plus froides que les roches et les sols pendant le jour. Elles apparaissent donc avec des teintes de gris plus foncées durant le jour. L'inverse est observable durant la nuit. L'explication est la suivante : la convection (transfert de chaleur par contact) n'opère pas dans les sols et les roches pour transférer l'énergie solaire absorbée durant le jour vers l'intérieur des roches et des sols. Conséquemment, la chaleur est concentrée près de la surface durant le jour, causant une plus haute température et donc une plus forte émission. Pendant la période de refroidissement nocturne, la chaleur emmagasinée durant le jour est rayonnée vers l'atmosphère mais il n'y a pas des courants de convection pour ramener de la chaleur vers la surface de ces solides, ce qui se passe dans le cas de l'eau. Ainsi leurs teintes de gris sont plus faibles pendant la nuit.

Si le temps d'acquisition d'une thermographie n'est pas connu, la teinte d'une masse d'eau comparée à celle de son environnement est un indice fiable : l'eau apparaît plus brillante que les surfaces adjacentes durant la nuit. L'inverse est vrai pour une thermographie de jour.

3.5.2 La végétation

Les arbres du type décidu pendant la saison de feuillaison apparaissent avec une teinte plutôt foncée sur une thermographie de jour. Ceci est dû au phénomène de transpiration du feuillage qui est à son maximum pendant le jour faisant ainsi baisser la température des feuilles. Pendant la nuit les mêmes arbres apparaissent avec une teinte plutôt pâle. Ceci est explicable par la quantité d'eau contenue dans le feuillage et par un certain échauffement dû à la convection par l'air en conjonction avec l'inversion des températures de l'air (l'air à la hauteur des troncs est plus chaud qu'au niveau du sol). Les conifères ne présentent pas des variations aussi marquées de leur température.

L'herbage et d'autres types de végétation basse sont en général chauds pendant le jour mais ils atteignent rapidement la température de l'air après le coucher du soleil. Pendant une nuit calme, l'air proche du sol peut être plus froid que l'air quelques mètres plus haut, ainsi ce type de végétation apparaîtra avec des teintes plus foncées que les conifères ou les feuillus pendant la nuit.

Un feuillage moins vigoureux ou mort apparaîtra en général avec des teintes plus pâles qu'un feuillage en santé dû à l'absence de transpiration.

3.5.3 Les terrains humides

Tous les autres paramètres qui influencent l'émission tenus constants, un terrain humide paraîtra plus foncé qu'un terrain sec le jour comme la nuit à cause du refroidissement dû à l'évaporation de l'eau absorbée.

3.5.4 Les surfaces pavées

Les matériaux comme le ciment, l'asphalte ou la terre battue apparaissent en général avec des teintes plutôt pâles, aussi bien le jour que la nuit. Ils ont un fort ratio surface/volume et ils absorbent continuellement des fortes quantités de rayonnement solaire durant le jour. Puisque leurs capacités thermiques sont relativement élevées, ces matériaux rayonnent fortement plusieurs heures après le coucher du soleil. La terre battue apparaît moins brillante que les autres matériaux pendant la nuit car elle perd sa chaleur plus vite.

3.5.5 Les surfaces métalliques

Les surfaces de métal à nu (sans peinture, ni oxydés) apparaissent avec des teintes foncées, le jour comme la nuit. Tel que mentionné, leurs surfaces polies ont des émissivités substantiellement plus basses que les autres objets habituellement trouvés dans une scène. Le rayonnement émis est de faible intensité.

3.5.6 Les sources de haute température

Le rayonnement thermique de ces sources comme les feux de forêt est peu affecté par le moment du jour. Elles émettent des grandes quantités de rayonnement apparaissant brillantes tout le temps.

3.5.7 Les objets fantômes

La silhouette des certains objets peut rester empeignée au sol même si ces objets ne sont plus là au moment de l'acquisition des données, particulièrement dans le cas des thermographies de nuit. Par exemple, des avions ou des automobiles stationnées pendant plusieurs heures avant le coucher du soleil masquent l'asphalte directement en dessous du soleil. La partie masquée ne s'échauffe pas de la même manière que le reste, ainsi elle paraîtra plus froide même si l'objet a déjà quitté depuis un long moment (Figure 46).

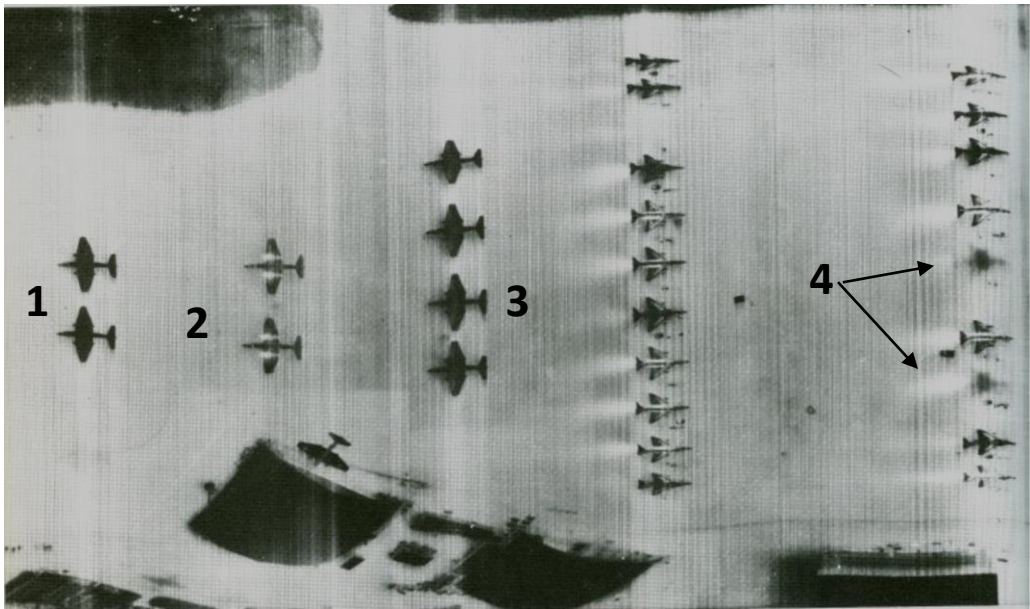


Figure 46 Les avions étant des objets métalliques, apparaissent normalement foncées sur les thermographies des nuits (1). Les avions dont le moteur tourne font apparaître des zones blanches (2) et laissent paraître derrière eux des stries blanches sur le sol réchauffé (3). Dans le cas des avions qui ont déjà décollé nous observons leur silhouette fantôme ainsi que les stries blanches (4) (Adapté de Brookman A. « *Le monde invisible* », Éditions Garnier, 1983)

3.5.8 Le relief topographique

Les versants orientés sud-est (hémisphère nord) s'échauffent plus vite pendant le jour que ceux exposés nord-ouest car ils reçoivent du rayonnement solaire dès le lever du soleil. Ainsi une thermographie prise le jour au-dessus d'un terrain montagneux nous donnera l'impression visuelle du relief à cause du niveau différentiel d'échauffement des versants. Cette impression visuelle s'estompe pendant la nuit car un certain équilibre thermique est atteint pour l'ensemble de versants. Il faut noter que pendant la nuit, les vallées peuvent paraître plus foncées que les versants à cause de l'engouffrement de l'air froid (inversion des températures de l'air). La figure 47 est un exemple frappant de la différence entre les thermographies de jour et de nuit d'un terrain montagneux.

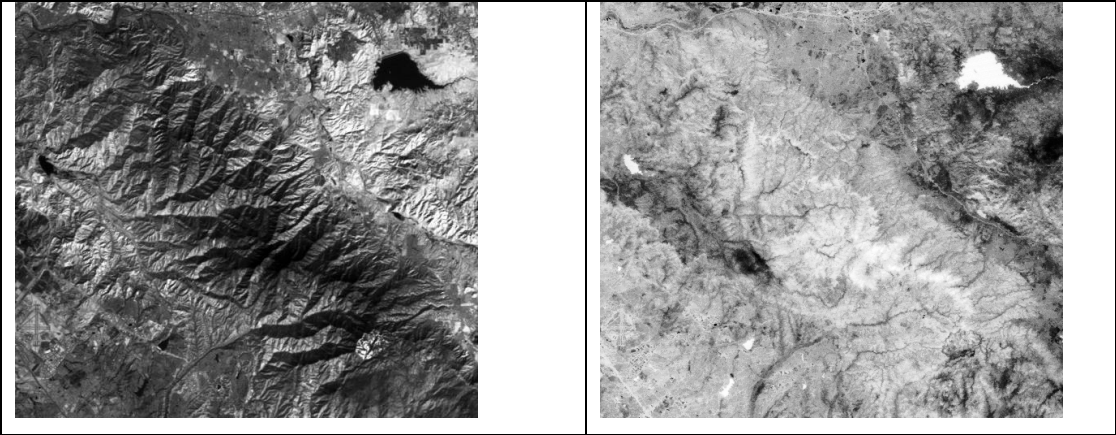


Figure 47 Thermographies (Landsat) de jour (à gauche) et de nuit (à droite). Les images ont été acquises vers 11h30 et 21h30 (heure locale) à deux dates différentes.

4.1 FORMATION DES IMAGES : BASES DE PHYSIQUE

Schématiquement, un radar de télédétection fonctionne comme suit (Figure 1). Le transmetteur (oscillateur hyperfréquences) génère une impulsion électromagnétique dans la partie des micro-ondes du spectre électromagnétique. Le circulateur (interrupteur) isole le système de réception et permet l'émission du rayonnement via l'antenne vers la surface visée. Le rayonnement interagit avec la surface et une partie est réfléchie (diffusée) vers l'antenne. Entre-temps le circulateur isole le système de transmission pour permettre au rayonnement de retour de passer via l'antenne au système de réception. Il s'ensuit le traitement du signal électrique généré par le rayonnement de retour, sa numérisation et finalement l'enregistrement de données. Ici il faut noter que les radars modernes ne génèrent pas directement une image dans le sens des capteurs optiques examinés précédemment.

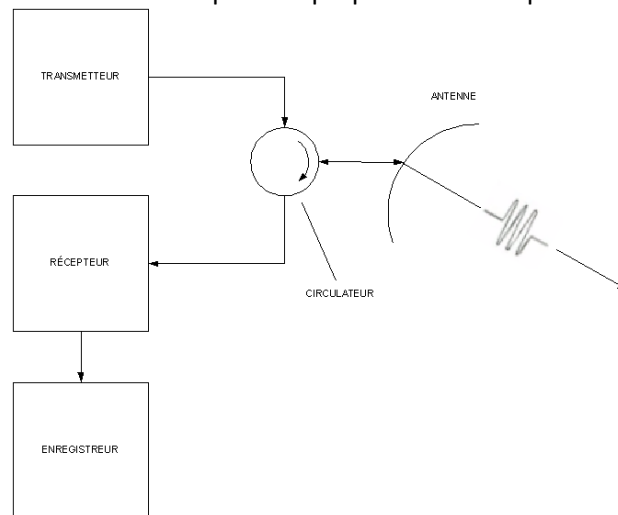


Figure 48 Fonctionnement d'un radar imageur

Quelques détails sur ce transfert radiatif sont donnés par la suite.

4.1.1 Le rayonnement généré par le radar

Les radars opèrent sur la base des ondes monochromatiques (pratiquement une seule longueur d'onde). Une telle onde ainsi que les paramètres qui la définissent sont décrits dans l'Annexe 1. L'usage d'un rayonnement monochromatique nous donne la possibilité de contrôler aisément sa polarisation (autant lors de l'émission que de la réception). Le fait aussi de posséder la source du rayonnement à bord offre la possibilité de comparer le rayonnement reçu avec une réplique du rayonnement transmis et ainsi de connaître la phase des ondes reçues. Le fait aussi de pouvoir contrôler la transmission-réception par l'antenne, permet de « jouer » avec les angles de visée du radar. Ces possibilités ouvrent des perspectives intéressantes pour la télédétection. Pour le moment nous examinerons les trois paramètres qui jouent un rôle important dans les interactions ondes-surface : la longueur d'onde; la polarisation et l'angle de visée.

Dans la partie du spectre ÉM des micro-ondes, et des ondes radio en général, par tradition, on utilise des bandes de fréquence et non par de bandes de longueurs d'ondes. Dans le cas des micro-ondes les bandes de fréquences sont nommées par une lettre de l'alphabet latin. Cette nomenclature est l'héritage d'un code secret militaire utilisé par les américains pendant la seconde guerre mondiale pour leurs communications. Le tableau 7 montre les différentes bandes micro-ondes avec des exemples utilisés par quelques radars imageurs à bord des satellites d'observation de la Terre lancés depuis 1990. Les radars aéroportés opèrent souvent à deux bandes de fréquences différentes tandis que les radars à bord des satellites à une seule bande de fréquences.

Tableau 7 Bandes de fréquences dans les micro-ondes.

Bande micro-ondes	Intervalle de longueurs d'ondes (cm)	Intervalle de fréquences (GHz)	Utilisation en télédétection civile (longueur d'onde utilisée en cm)	Exemples des radars satellitaires
Ka	0,75-1,10	40,0-27,0	Premiers radars aéroportés; aujourd'hui non utilisées	
K	1,10-1,67	27,0-18,0		
Ku	1,67-2,40	18,0-12,0		
X	2,40-3,75	12,0-8,0	Oui (3,2)	Terra-SAR (Allemagne)
C	3,75-7,50	8,0-4,0	Oui (5,5)	ERS (Europe) RADARSAT (Canada) ENVISAT (Europe)
S	7,5-15	4,0-2,0	Oui (10,7)	ALMAZ (Russie)
L	15-30	2,0-1,0	Oui (23,0)	J-ERS (Japon) PALSAR (Japon)
P	30-100	1,0-0,3	Oui (71,0)	Seulement radars aéroportés

Les polarisations employées par les radars sont du type linéaire (Annexe 1) et les radars peuvent envoyer les ondes polarisées dans un plan horizontal ou vertical et les recevoir sur le même plan (polarisation parallèle) ou sur un plan perpendiculaire (polarisation croisée). Ainsi nous parlons des polarisations (fig. 49) : horizontale-horizontale (HH), verticale-verticale (VV), horizontale-verticale (HV) ou verticale-horizontale (VH). On distingue ainsi les radars qui opèrent à une seule configuration parallèle (HH ou VV), ceux qui peuvent opérer selon une double configuration (HH-VV; ou HV-HH; ou VV-VH) et finalement ceux dits en quadruple polarisation qui fournissent toutes les combinaisons parallèles et croisés.

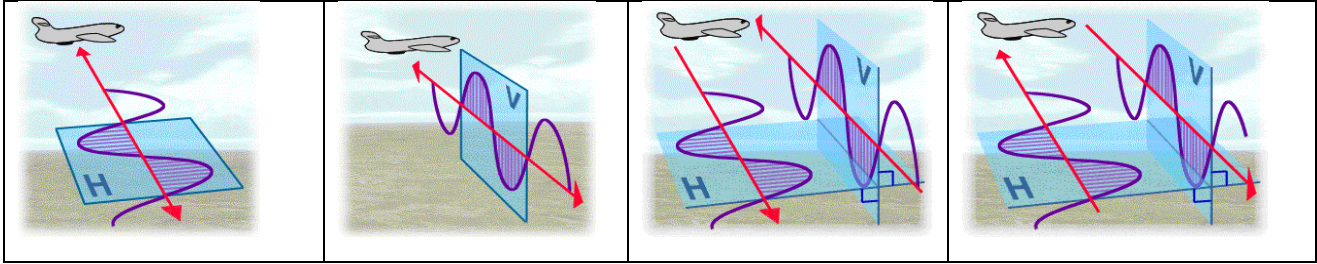


Figure 49 Différentes configurations de polarisation parallèles et croisées utilisées par les radars

L'angle de visée du début d'une ligne de balayage radar est fixé loin de la direction verticale et d'un seul côté du radar (fig. 50). Les raisons sont expliquées plus loin. Comme dans le cas d'un balayeur optique, l'angle de visée varie d'un endroit à l'autre le long d'une ligne de balayage. Le champ total angulaire de vue peut varier de quelques degrés à quelques dizaines de degrés. Il en est ainsi pour l'angle d'incidence au sol des ondes. Cet angle est d'une importance capitale pour comprendre les caractéristiques des images radar. Dans le cas d'un terrain plat et horizontal, angle de visée et angle d'incidence sont égaux. Ceci n'est pas cependant vrai pour un terrain incliné ou accidenté. Il est à noter que certains radars opèrent avec des angles de visée fixés une fois pour toutes et d'autres ont la capacité de les modifier. Cette modification ne nécessite aucun mouvement physique de l'antenne, elle se fait en variant la phase des ondes émises par les nombreux radiateurs élémentaires qui composent une antenne (voir plus loin).

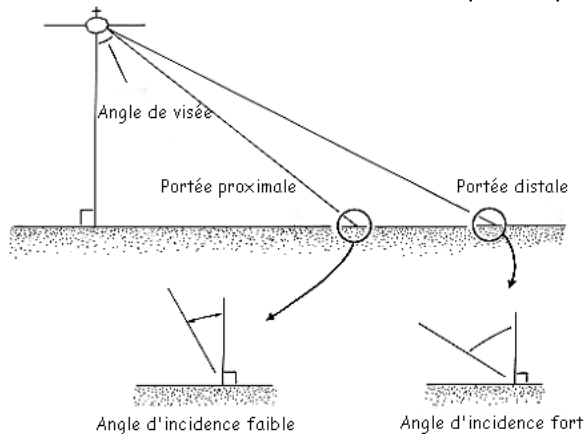


Figure 50 Définition des angles de visée et des angles d'incidence

4.1.2 Le rôle de l'atmosphère

En règle générale l'atmosphère ne joue pas un rôle important comme dans la partie du visible ni dans le parcours du radar vers le sol ni dans le parcours inverse, particulièrement pour les longueurs d'ondes supérieures à 4 cm. La seule exception est les nuages ou la pluie et ce pour les courtes longueurs d'ondes (ou l'équivalent pour les plus grandes fréquences). La figure 51 montre le degré de transmission des ondes en fonction de la fréquence en présence des nuages ou de la pluie et donne un exemple avec des images radar enregistrées en trois fréquences différentes en simultanée lors d'une tempête tropicale. Les effets de la pluie se font sentir (tache sombre) en bande X (environ 3 cm), beaucoup moins en bande C (environ 6 cm), tandis qu'en bande L (environ 23 cm) la pluie n'a aucun effet sur la transmission du rayonnement.

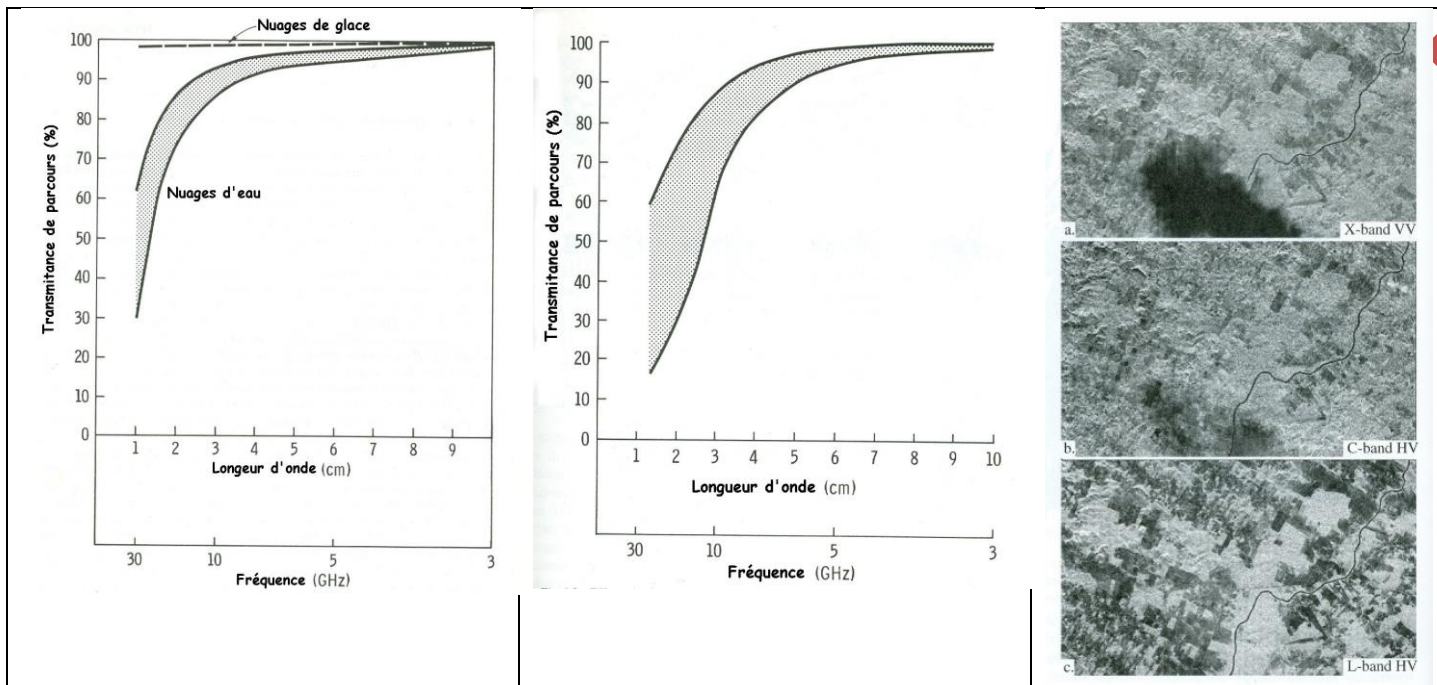
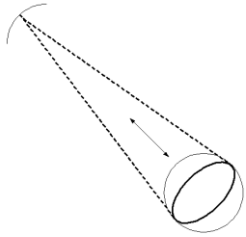


Figure 51 Effets des nuages et de la pluie sur le rayonnement micro-ondes

4.1.3 Les interactions avec la surface

Le flux mesuré par le radar est fonction de la puissance des ondes émises par la source micro-ondes, de l'angle d'incidence, de la fréquence et de la polarisation des ondes, et bien sûr des caractéristiques des objets mêmes.

En général dans le cas des radars, les propriétés de réflexion des ondes sont exprimées en unités de surface (m^2) d'interception du RÉM incident par un objet étalon (sphère). Plus spécifiquement, puisque le rayonnement réfléchi par la sphère étalon vers le radar est proportionnel à sa section (fig. 52), on peut trouver une sphère étalon qui, placée aux mêmes conditions que l'objet, réfléchit vers le radar exactement le même flux que l'objet réel. La section de cette sphère spécifique représente la capacité de réflexion de l'objet. Nous parlons alors de la section efficace d'un objet, symbolisée par la lettre grecque sigma, (σ). Une grande section efficace ($>100 m^2$) signifie un objet hautement rétrodiffus; c'est le cas des grands bâtiments, des camions ou des ponts métalliques (tab. 8). Une section efficace inférieure à $1 m^2$ signifie un objet qui renvoie un faible rayonnement vers le radar.

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Objet</th> <th>σ (m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Automobiles</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Camions</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td>Ponts métalliques</td> <td>1 000</td> </tr> <tr> <td>Grands bâtiments</td> <td>10 000</td> </tr> </tbody> </table>	Objet	σ (m ²)	Automobiles	50	Camions	500	Ponts métalliques	1 000	Grands bâtiments	10 000
Objet	σ (m ²)										
Automobiles	50										
Camions	500										
Ponts métalliques	1 000										
Grands bâtiments	10 000										
<p>Figure 52 L'aire de la section d'une sphère étalon (cercle foncée) placée aux mêmes conditions que l'objet et renvoyant le même flux que l'objet représente la capacité de réflexion vers le radar de l'objet</p>	<p>Tableau 8 Section efficace de quelques objets</p>										

Pour la télédétection des ressources terrestres nous parlons plutôt de la section efficace par unité d'aire appelée le **coefficient de rétrodiffusion radar**, σ_0 . Ceci afin de tenir compte du fait qu'une unité d'échantillonnage contient une série d'objets qui ont leurs propres sections efficaces et que tous ces objets contribuent au rayonnement de retour. En première approximation nous pouvons écrire que:

$$\sigma_0 = \sigma \text{ (m}^2\text{)}/A$$

où A est l'aire d'une unité d'échantillonnage radar. Étant donné que σ_0 est une quantité adimensionnelle (un rapport de surfaces) nous l'exprimons souvent en décibels (dB):

$$\sigma_0 \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \sigma_0$$

Ainsi 0 dB signifient une parfaite concordance entre la section efficace et la surface d'interception réelle du rayonnement (l'unité d'échantillonnage), des dB négatifs signifient une section efficace inférieure à la surface réelle d'interception, et des dB positifs signifient une section efficace plus grande que la surface réelle d'interception.

Exemple:

Un radar opérant à 3 cm de longueur d'onde avec une unité d'échantillonnage spatial de 15 m x 15 m à un angle d'incidence de 30° est à utiliser au-dessus de la mer et au-dessus de la forêt. Par des études effectuées auparavant nous avons constaté qu'à cet angle d'incidence, σ_0 pour la mer et de -28 dB et que pour la forêt, de -6 dB. Quelle est la section efficace de la mer et de la forêt?

σ_0 [mer] = $10^{-28/10} = 1,58 \times 10^{-3}$

σ_0 [forêt] = $10^{-6/10} = 0,251$

donc:

σ [mer] = $(1,58 \times 10^{-3}) \times (15\text{m}) \times (15\text{m}) = 0,356 \text{ m}^2$

σ [forêt] = $(0,251) \times (15\text{m}) \times (15\text{m}) = 56,47 \text{ m}^2$

Ainsi pour les mêmes conditions d'observation et d'illumination, le signal de retour de la mer sera de 160 fois plus faible que celui de la forêt.

La figure 53 montre la variation du coefficient du rétrodiffusion en fonction des bandes micro-ondes selon deux polarisations différentes pour le même angle de visée par le radar, une sorte de signature spectrale micro-ondes. Le comportement variable des objets est évident. Cette figure montre qu'en moyenne les occupations du sol ont tendance à avoir une section efficace de la taille ou inférieure à leur surface d'interception réelle (dB < 0). Voyons maintenant avec un peu plus de détails qu'est-ce qui explique ce comportement. Nous examinerons d'abord le cas où les ondes utilisées ont une polarisation parallèle (HH ou VV). À la fin nous discuterons de la différence entre polarisations parallèles et polarisations croisées (HV ou VH).

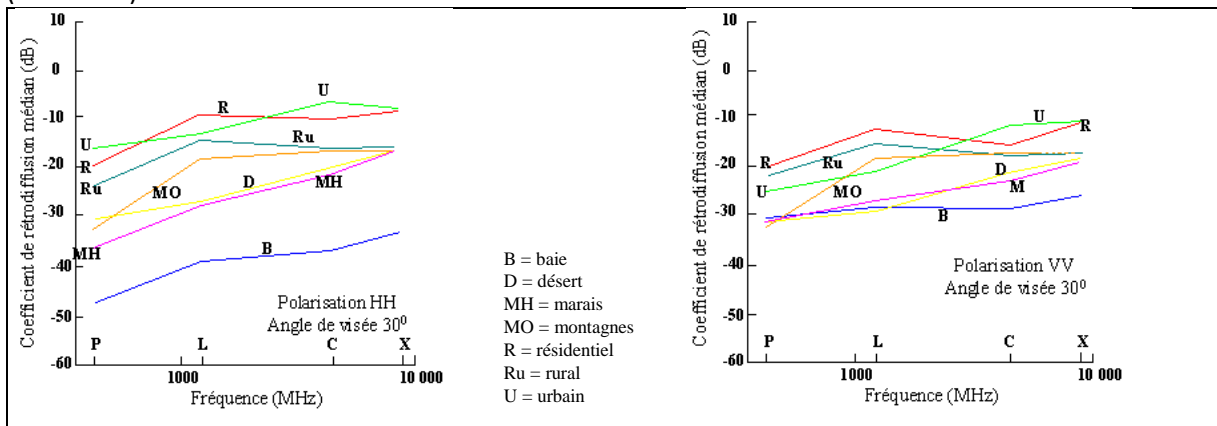


Figure 53 Signatures spectrales micro-ondes de différentes occupations des sols. La fréquence de 10000 MHz correspond à 3 cm de longueur d'onde et celle de 1000 MHz à 30 cm. Les valeurs indiquées sont les valeurs médianes d'une série de mesures (adapté de Long W. 1983, fig. 6-26, page 253)

4.1.3.1 Les mécanismes de diffusion

Pour qu'un objet retourne du rayonnement suffisamment puissant pour qu'il soit détecté par le radar doit posséder certaines propriétés géométriques et/ou électriques spécifiques. Examinons lesquelles.

Propriétés géométriques

Supposons tout d'abord que l'objet présente une surface plane et horizontale. La condition de base pour qu'il retourne du rayonnement est d'avoir une surface rugueuse. La figure 54 illustre ce concept. La rugosité est toujours fonction de la longueur d'onde du rayonnement. Elle est exprimée en comparant la hauteur moyenne des aspérités de sa surface par rapport à la longueur d'onde. Plus la rugosité est faible, plus l'objet agit comme un miroir renvoyant la majeure partie du rayonnement reçu à la direction opposée au radar. Plus la rugosité devient grande plus la specularité diminue et une partie du rayonnement reçu est renvoyée vers le radar (réflecteur diffus). C'est le même principe qui gouverne la réflexion du rayonnement solaire (module 2A). Compte tenu du fait que les ondes du rayonnement solaire ont des longueurs micrométriques et que les micro-ondes ont des longueurs centimétriques, on s'attend à ce que beaucoup plus d'objets se comportent comme des réflecteurs spéculaires que dans le cas du rayonnement solaire. Mais même entre radars les différences peuvent être importantes. Ainsi beaucoup plus de surfaces agissent comme des réflecteurs spéculaires si la longueur d'onde utilisée est de 23 cm (bande L) que de 3 cm (bande X).

Des règles empiriques existent qui nous permettent d'avoir une bonne idée à partir de quelle hauteur moyenne d'aspérités une surface peut être considérée diffuse étant donné la longueur d'onde du rayonnement. Ces règles tiennent aussi compte de l'angle d'incidence du rayonnement. On comprend que lorsque l'angle d'incidence est à pic, moins la micro-géométrie de surface joue un rôle à la modulation du rayonnement de retour :

$$\begin{array}{ll} \text{Surface lisse:} & h < \frac{\lambda}{25 \cos \theta} \\ \text{Surface de rugosité intermédiaire} & \frac{\lambda}{25 \cos \theta} < h < \frac{\lambda}{4,4 \cos \theta} \\ \text{Surface très rugueuse} & h > \frac{\lambda}{4,4 \cos \theta} \end{array}$$

où h est la hauteur moyenne des aspérités d'une surface, λ est la longueur d'onde et θ est l'angle d'incidence du REM.

À titre d'exemple pour qu'une surface soit considérée très rugueuse pour un radar opérant à 23,5 cm de longueur d'onde à un angle d'incidence de 20° , il faut que ses aspérités aient une hauteur moyenne supérieure à 5,7 cm.

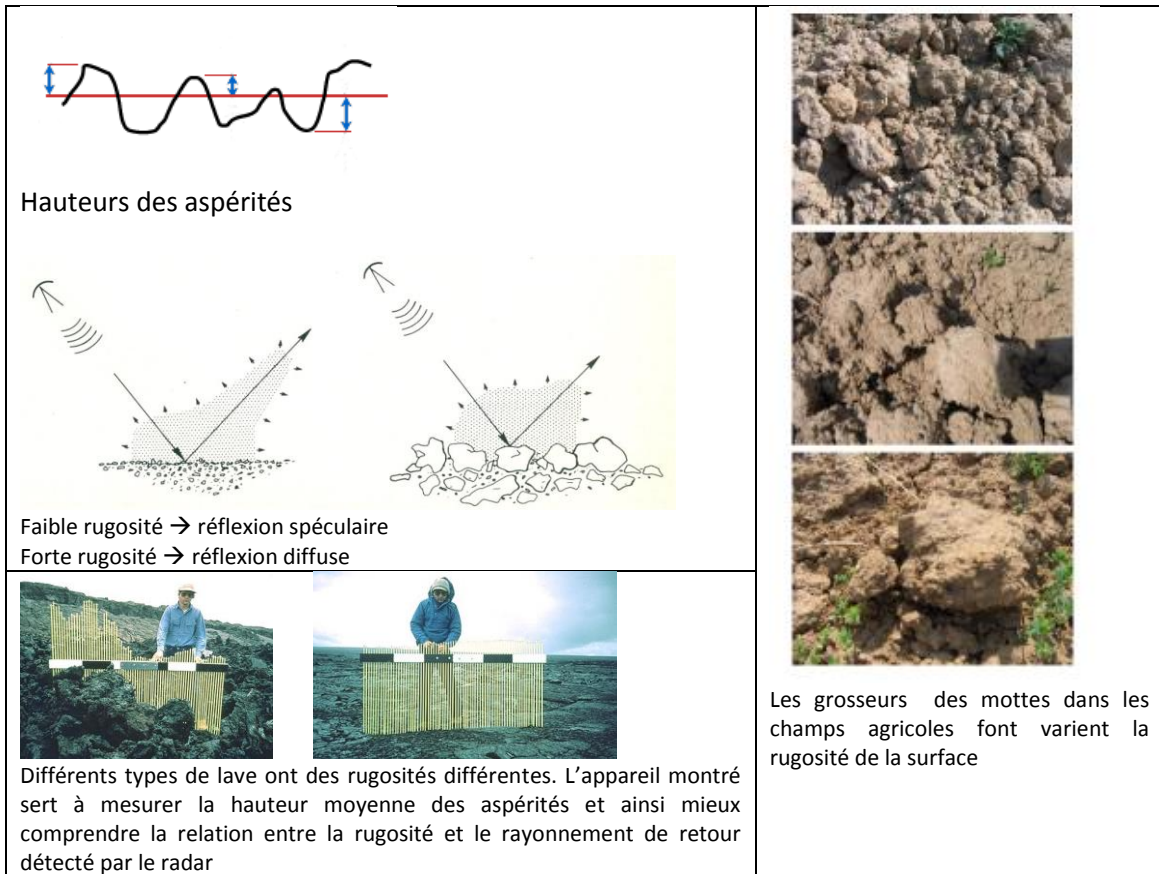


Figure 54 Rugosité de surface

Supposons maintenant que la surface visée par le radar n'est pas plane mais inclinée. Si elle fait face au radar, son inclinaison fera en sorte qu'une grande partie du rayonnement sera rétrodiffusée vers le radar particulièrement si elle est spéculaire. Pour les fortes pentes exposées au radar d'autres phénomènes ont lieu comme nous le verrons plus tard. Si la surface n'est pas orientée vers le radar elle renverra beaucoup moins de rayonnement et à la limite elle peut être complètement à l'ombre.

Des conditions de forte rétroflexion sont réunies dans certains autres cas (fig. 55). Une structure surélevée, exemple un mur ou un tronc d'arbre, avec le plan du sol devant lui forment un réflecteur en coin (dièdre; figures 55a et b). Ainsi une onde qui frappe le plan est diffusée en partie vers la structure surélevée pour « rebondir » par la suite vers le radar. Il s'ensuit une réponse plus forte que d'habitude donnant ainsi un point brillant sur une image radar. Plus le plan horizontal est lisse plus le rayonnement est concentrée vers la structure surélevée et plus le point atteint une forte brillance. Un mur avec une surface asphaltée constitue un réflecteur en coin idéal. Il en est de même pour un tronc d'arbre avec une surface d'eau stagnante. Dans d'autres cas la morphologie d'un objet est telle que l'onde après réflexion par le plan horizontal subisse des réflexions multiples avant d'être renvoyée vers le radar (trièdre, fig. 55c)

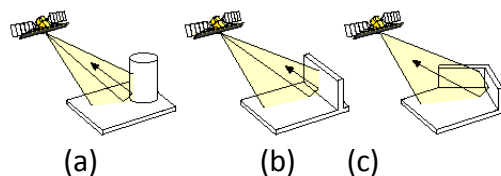


Figure 55 Configurations particulières des objets avec un fort retour radar

Propriétés électriques

Les micro-ondes présentent une plus grande capacité que les ondes micrométriques de pénétrer à l'intérieur d'une surface. Le rayonnement incident peut être à son tour diffusé par les objets dans les différentes couches en profondeur. Il s'ensuit un rayonnement de retour qui est diffusé non seulement par la surface de l'objet mais aussi par son volume. On parle ainsi de la diffusion du volume pour la distinguer de la diffusion de surface. Quelques surfaces présentant cette diffusion de volume sont illustrées par la figure 56a. Le degré de pénétration dépend de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence du rayonnement et des propriétés électriques des objets. Ces dernières nous renseignent sur le comportement des particules élémentaires qui composent leur matière face au rayonnement micro-ondes, particulièrement son champ électrique. Le rayonnement micro-ondes incident à une surface induit des courants électriques (mouvements des charges électriques élémentaires). Il y a plusieurs types de courants qui peuvent se former dépendant de la structure atomique et moléculaire des objets. Les surfaces métalliques sont des bons conducteurs d'électricité et les courants (de conduction) qui y circulent font en sorte que du rayonnement électromagnétique générée est diffusée en bonne quantité vers le radar. Les autres surfaces sont des isolants, i.e. leurs charges électriques n'ont pas la même liberté de mouvement. Des courants sont quand même créés et du rayonnement est généré mais sa diffusion vers le radar ne se fait pas aussi efficacement que dans le cas des bons conducteurs. Cette efficacité est mesurée par la constante diélectrique du matériau. Dans les micro-ondes cette constante est basse (entre 3 et 5 environ) indiquant une diffusion de surface plus ou moins faible, mais en même temps la capacité du rayonnement de pénétrer dans leur volume. La présence de l'eau (humidité) change drastiquement leur comportement car la constante diélectrique de l'eau est très élevée dans les micro-ondes (environ 80). Dans ce cas l'efficacité de rétrodiffusion de surface augmente substantiellement tandis que l'objet devient opaque au rayonnement micro-ondes.

Pour évaluer la profondeur de pénétration on introduit une quantité appelée « la profondeur de peau ». Elle est la profondeur à laquelle l'amplitude du REM pénétrant la surface diminue de 37%. La profondeur de peau est fonction de la longueur d'onde et des propriétés diélectriques de la surface. Elle est directement proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle à la constante diélectrique. Ainsi plus la longueur d'onde est grande pour une constante diélectrique donnée, plus profondément pénétrera le rayonnement et pour une longueur d'onde donnée, plus la constante diélectrique est grande moins profondément pénétrera le rayonnement. La figure 56b montre la profondeur de peau selon la longueur d'onde et le contenu en humidité pour certains types des sols. L'angle d'incidence du rayonnement peut jouer aussi un rôle important. On a évalué par exemple dans le cas des sols que l'angle doit être plus à pic pour que l'humidité joue un rôle primordial. À partir de cet angle la rugosité de la surface devient le facteur dominant. La végétation est un cas spécial (56c). La hauteur, la densité et la biomasse sont autant des facteurs qui avec les paramètres du radar (longueur d'onde, angle d'incidence) moduleront le type de diffusion dominant.

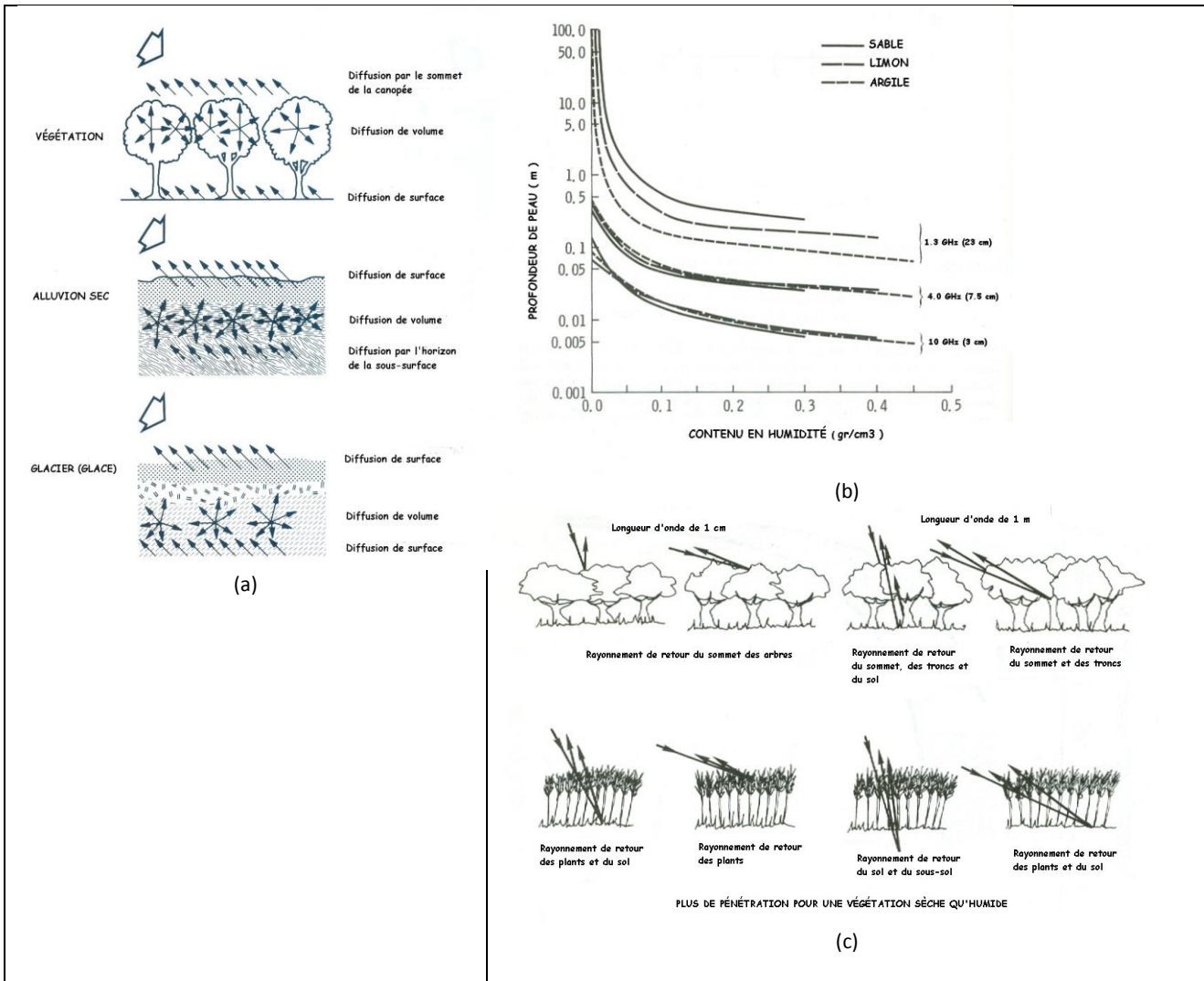


Figure 56 Pénétration des ondes et diffusion de volume

Différences de la diffusion selon la configuration de polarisation

En règle générale, les coefficients de rétrodiffusion en polarisation croisée sont de 8 à 25 dB plus bas que ceux à polarisation parallèle. Ainsi les mêmes objets apparaissent plus sombres sur les images en polarisation croisée qu'en polarisation parallèle. La raison principale est que les objets ne dépolarisent pas beaucoup les ondes incidentes, i.e. ne causent pas une rotation significative du plan de vibration des ondes réfléchies par rapport aux ondes incidentes. Ce phénomène est illustré schématiquement dans la figure 57 : (a) l'onde incidente a une polarisation verticale; (b) l'objet réfléchit vers le radar une partie du rayonnement en modifiant légèrement son plan de vibration; en d'autres mots l'onde réfléchi a maintenant deux composantes (Annexe 1), une première en polarisation verticale et une seconde en polarisation horizontale; (c) l'antenne peut « filtrer » l'une de deux composantes; (d) dans le cas où elle isole la composante verticale on créera une image en polarisation VV et dans le cas contraire, une image en polarisation VH. S'il n'y a pas de dépolarisation l'image VH nous indiquera un retour nul. Si la dépolarisation est complète (90° de rotation) c'est l'image VV que nous indiquera une réponse nulle. Si la dépolarisation est de 45° les deux images nous indiquerons un retour égal.

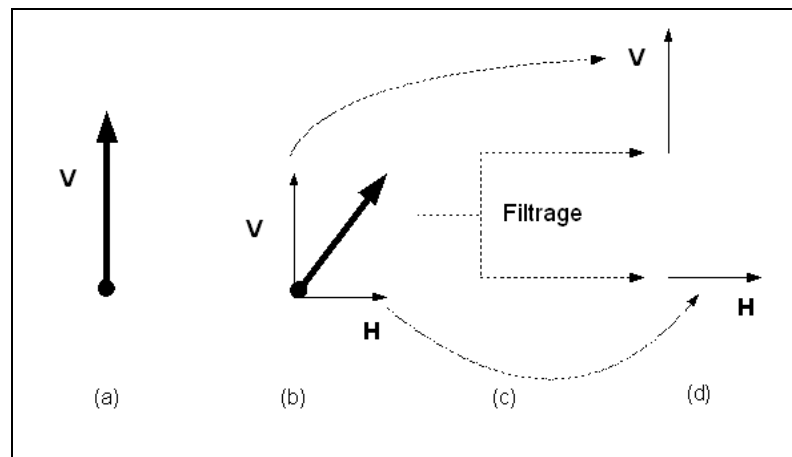


Figure 57 Dépolarisation des ondes

La figure 58 compare le comportement des objets en polarisation parallèle et polarisation croisée selon l'angle d'incidence. Un objet qui réfléchit d'une façon quasi spéculaire est perceptible par un radar en polarisation parallèle surtout dans les angles d'incidence à pic. Après 40° d'angle d'incidence son retour vers le radar devient très faible à nul. Dans le cas d'une polarisation croisée, il se passe le contraire. Il faut que l'angle soit quasiment à rasage pour qu'on commence à percevoir un retour. Une surface rugueuse suit presque la même tendance que la surface quasi-spéculaire en polarisation parallèle. Toutefois le retour est plus faible pour les angles d'incidence à pic et il est un peu plus fort pour les angles d'incidence prononcés. Dans le cas où la rugosité de surface est telle que des réflexions multiples aient lieu (l'onde rentre dans des cavités profondes) l'objet dépolarisera l'onde peu importe l'angle d'incidence et ainsi un rayonnement de retour sera perceptible en polarisation croisée. Tout objet dont la pénétration par les ondes est suffisante (diffusion volumique) aura une réponse relativement stable peu importe l'angle d'incidence que ce soit en polarisation parallèle ou croisée.

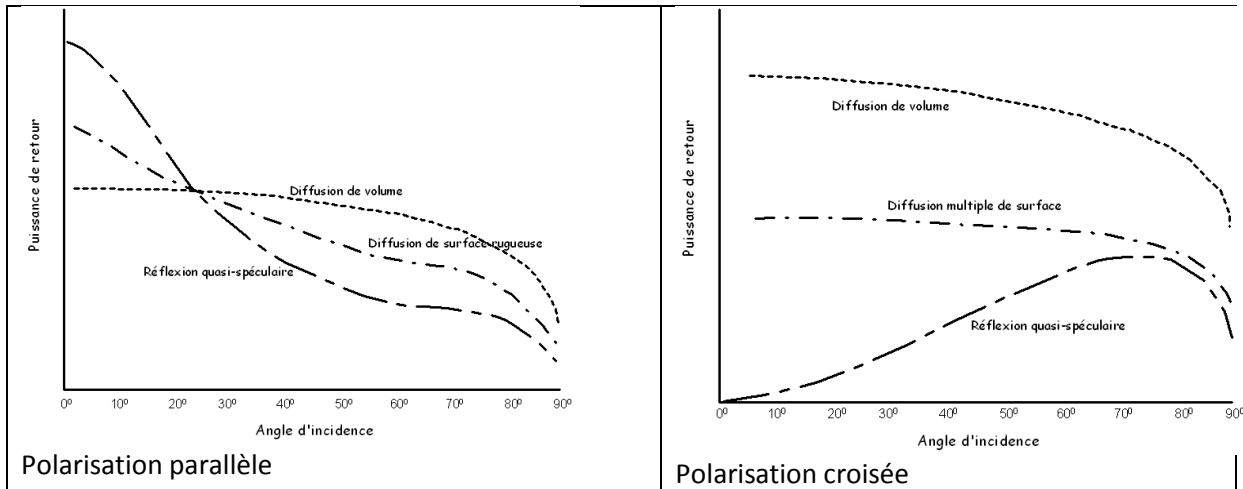


Figure 58 Importance des divers mécanismes de diffusion en fonction de la polarisation et de l'angle d'incidence

La plupart des objets donnent des réponses similaires que ce soit en polarisation VV ou HH. Certaines différences existent quand même. À titre d'exemple, une végétation avec une proéminence verticale comme le blé, rétrodiffusera plus en polarisation VV qu'en polarisation HH et une végétation avec une proéminence horizontale, en polarisation HH qu'en VV; un plan d'eau agitée a une rétrodiffusion beaucoup plus forte en VV qu'en HH.

4.1.4 Le captage

Le signal capté par l'antenne de réception est séparé selon ses deux composantes : la composante I (en phase) et la composante Q (en quadrature de phase) (Annexe 1). Ceci est fait en comparant le signal de retour à un signal qui est la réplique de celui transmis par le radar. Ces deux composantes sont numérisées en peu de bits et enregistrés sur support informatique à bord et/ou télétransmis à une station de réception terrestre. Après traitements pour améliorer la résolution spatiale (section suivante), ces données par pixel au sol constituent une image dite complexe. Ces deux images servent aux analyses plus poussées des données que sont la polarimétrie et l'interférométrie radar. Si l'on veut obtenir une image dans le sens conventionnelle on combine l'information des données complexes. On parle alors d'une image « détectée ». La figure 59 illustre les composantes d'une image complexe ainsi que l'image détectée résultante.

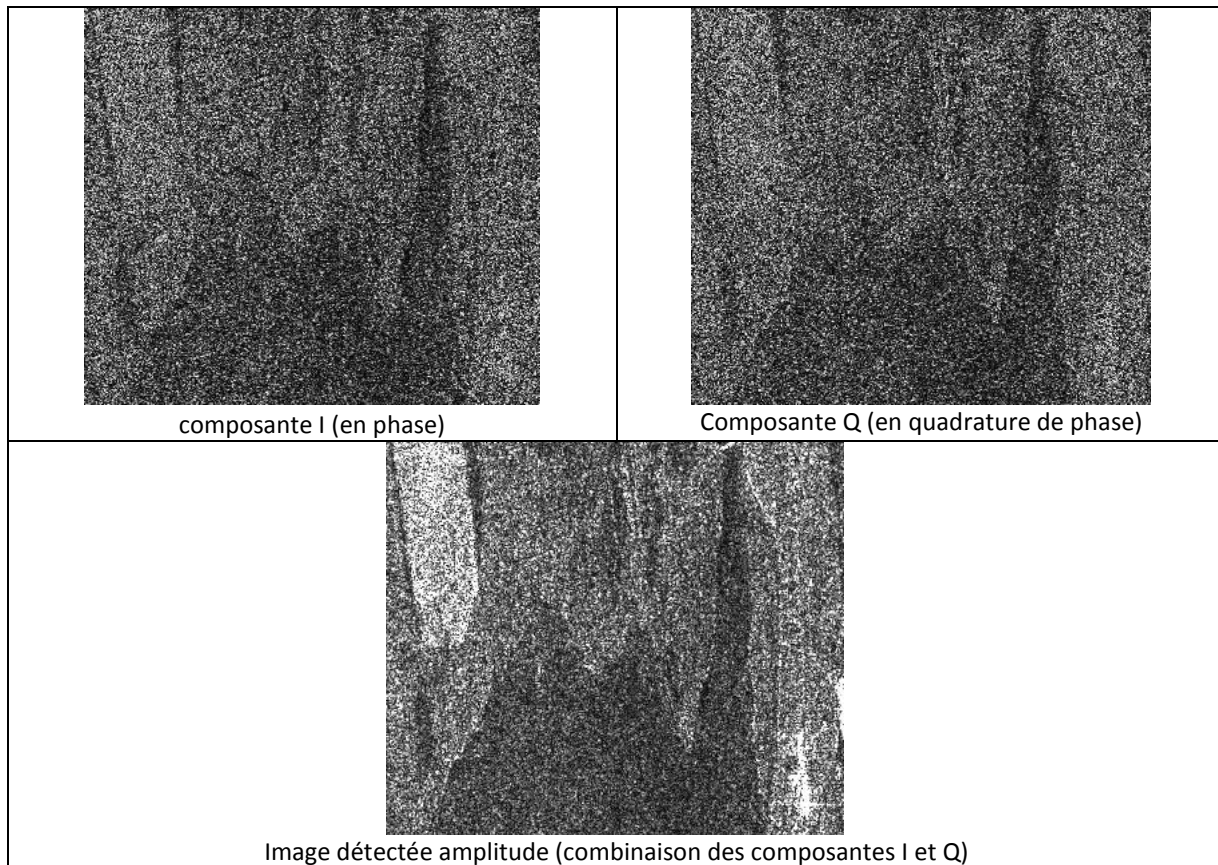


Figure 59 Acquisition d'une image radar

Les radars satellitaires fonctionnent à une seule fréquence (tab. 7). En combinant leur capacité de tenir compte de diverses configurations de polarisation nous pouvons obtenir des images mono-polarisées (polarisation parallèle ou croisée), double polarisation (en simultanée une en parallèle et une en croisée ou deux parallèles), polarisation quadruple (deux parallèles et deux croisées simultanément). Les radars satellitaires dans les années 90 étaient mono-polarisés (polarisation parallèle). À partir des années 2000 les radars ont commencé à utiliser la polarisation double et maintenant on est rendu à une polyvalence avec des radars acquérant toute configuration souhaitée. Le seul système à bord des satellites acquérant des images en plusieurs fréquences était le CIR X/C à bord de la navette spatiale pouvant acquérir des données en bande X, C et L. Les images aéroportées sont souvent acquises en double fréquence et une seule configuration de polarisation (Figure 60), mais certains radars expérimentaux peuvent générer des images avec plusieurs configurations de polarisation (fig. 61). Les différences de comportement des mêmes objets selon la fréquence utilisée sont très évidentes dans la figure 60. En bande X, à l'exception des pentes faisant face au radar et quelques quartiers urbains qui paraissent brillants, la plupart des autres occupations du sol paraissent d'un gris moyen indiquant une rugosité importante face à la longueur d'onde. Le milieu urbain et les terrains accidentés contrastent avec le reste en bande P qui paraît plus foncé qu'en bande X (faible rugosité face à la longueur d'onde). Quant à la polarisation, la Figure 61 montre que pour la même fréquence (ici bande C) les images de polarisation sont porteuses d'information sur les objets : tandis que un couvert forestier (Mont Royal) a un comportement presque similaire dans toutes les trois configurations de polarisation, les façades de bâtiments sont plus brillantes dans le cas des polarisations parallèles; certaines différences entre polarisations HH et VV sont observables surtout dans la partie centrale du Mont Royal (cimetière)

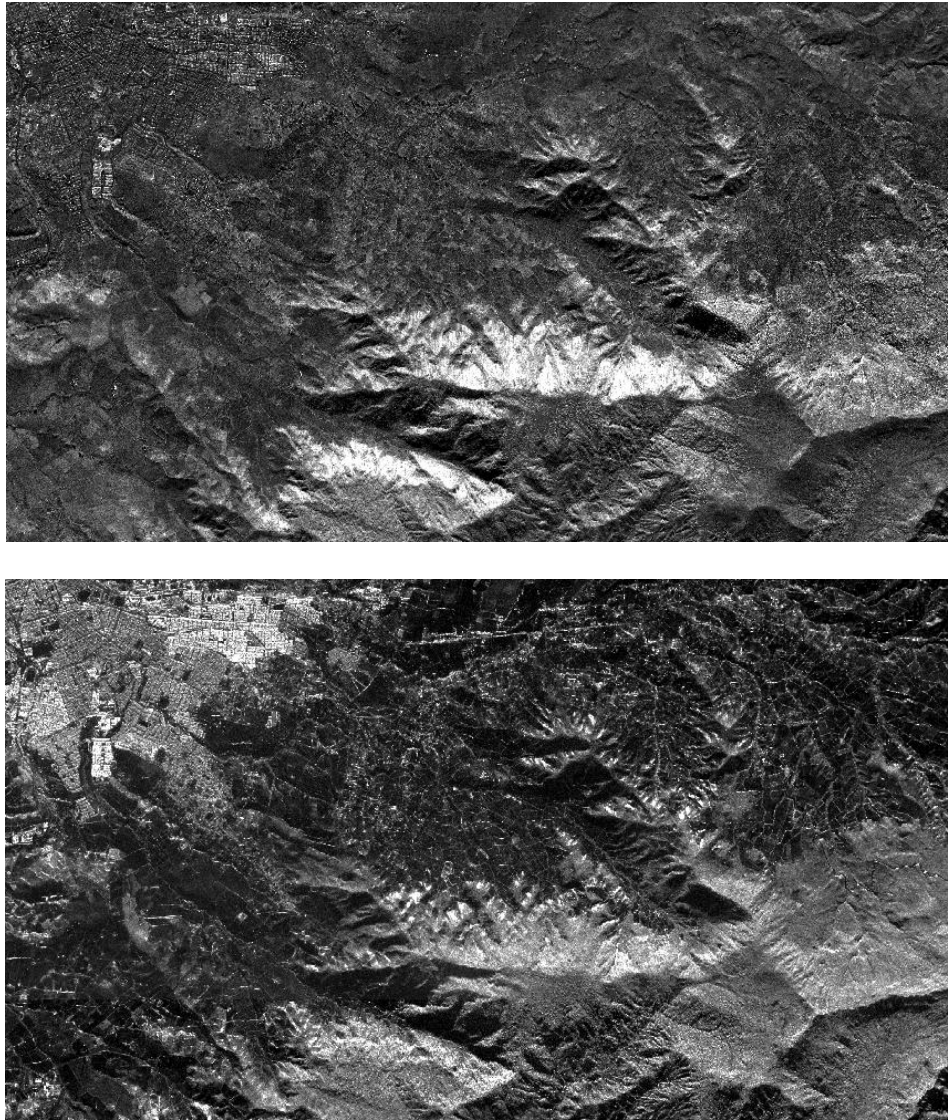


Figure 60 Images radar en bande X (haut) et en bande P (bas) acquises simultanément (deux systèmes différents) par radar aéroporté

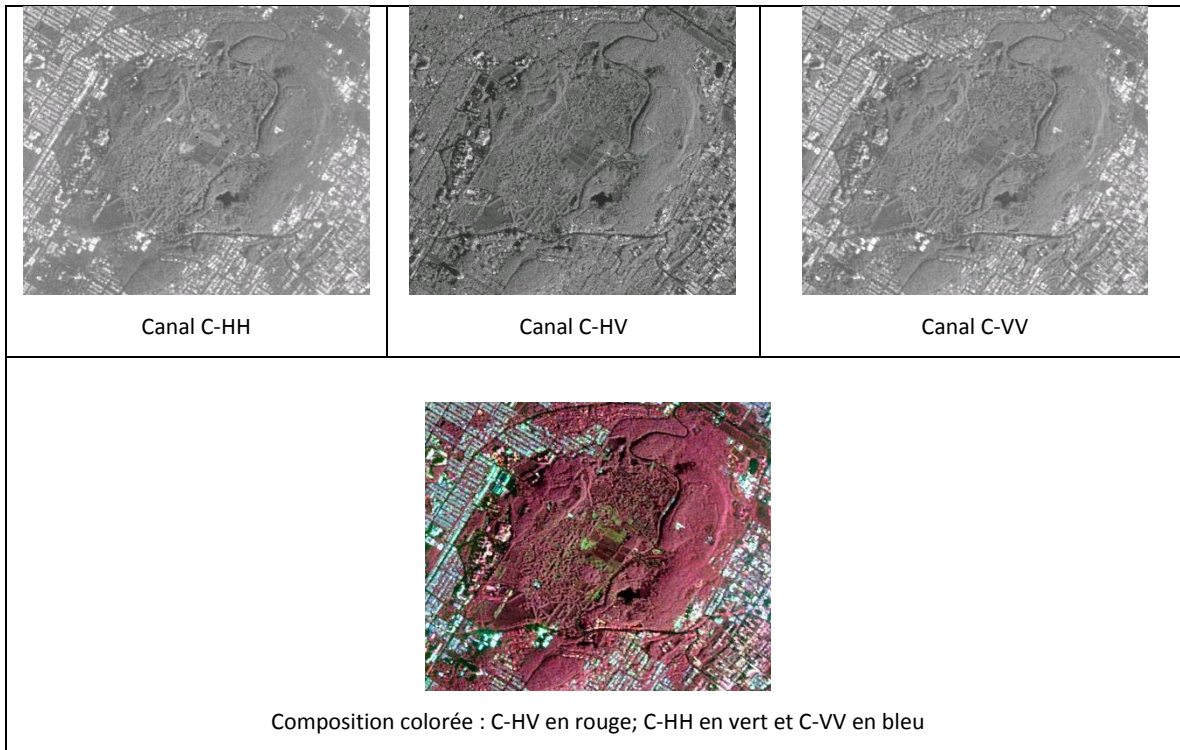


Figure 61 Images de différentes polarisations en bande C générées par un radar aéroporté à polarisation quadruple

4.2 FORMATION DES IMAGES: BASES TECHNOLOGIQUES

Nous avons déjà mentionné que les radars sont des balayeurs utilisant le temps d'arrivée des ondes pour former leurs échantillons spatiaux du RÉM. Bien que les radars modernes dits *radars à synthèse d'ouverture* (RSO ou SAR de l'anglais *Synthetic Aperture Radar*) se fondent sur ce principe simple, leur fonctionnement est complexe. Ainsi seulement qu'une brève introduction est présentée ici.

4.2.1 Formation d'une ligne de balayage

Le RSO est un radar à impulsions (fig. 48). L'antenne permet au RÉM produit par impulsion de se propager dans l'espace libre tout en demeurant concentré dans un volume restreint formant ainsi un faisceau, appelé aussi *lobe principal de l'antenne*. Ce faisceau est toujours orienté d'un côté du radar (radar à visée latérale,) pour une raison simple. Puisque le radar se fonde sur la mesure du temps d'arrivée des ondes nous ne pouvons pas viser de part et d'autre du nadir, comme dans le cas optique, car les signaux captés des objets symétriquement disposés par rapport au nadir ne seraient pas différenciables.

L'usage d'une antenne rectangulaire par les RSO de télédétection donne au faisceau une forme qui approche celle d'une pyramide oblique (forme en éventail) tel que montré par la figure 62. L'ouverture angulaire du faisceau dans les directions transversales est azimutale est donnée par la relation :

$$\theta(\text{rad}) = \frac{\lambda}{D} \text{ où } \lambda \text{ est la longueur d'onde et } D \text{ la dimension de l'antenne selon la direction analysée.}$$

L'antenne est orientée avec sa plus longue dimension dans la direction azimutale. Puisque l'ouverture angulaire du faisceau est inversement proportionnelle à la dimension de l'antenne, le faisceau aura une ouverture angulaire dans la direction transversale plus grande que celle dans la direction azimutale (fig. 62). Le choix des dimensions de l'antenne est fonction des plusieurs paramètres comme : la capacité de support physique de la plate-forme, le maintien de l'énergie ÉM émise à une direction quelconque à un niveau approprié selon la distance d'opération (un grand volume du faisceau signifie moins d'énergie disponible à un point particulier au sol). L'empreinte du faisceau au sol définit les dimensions de la ligne de balayage brute. Les radars satellitaires ont des antennes longues d'une dizaine de mètres et larges d'un mètre environ tandis que ces dimensions pour les radars aéroportés sont respectivement de 3 m et quelques dizaines de cm environ. Pour les altitudes orbitales avec ses longueurs d'antenne nous obtenons une largeur de ligne de balayage l'ordre d'une dizaine de kilomètres. C'est justement cette grande largeur d'une ligne de balayage brute qui permet aux RSO de synthétiser des lignes de balayage d'une largeur de quelques mètres même à partir des altitudes orbitales comme nous le verrons un peu plus loin.

Pendant que la plate-forme avance le long de sa trajectoire, la source du radar produit des impulsions micro-ondes avec une *fréquence de répétition* (FRI) constante. Une ligne de balayage « brute » est générée à chaque émission d'impulsion. Donc il y a autant des lignes de balayage générées par seconde que la FRI employée. Les radars satellitaires emploient une FRI élevée entre quelques 1300 impulsions par seconde à quelques 1700 impulsions par seconde. Les radars aéroportés pour leur part ne génèrent que quelques dizaines d'impulsions par seconde. La FRI est modifiable selon les besoins. Elle est choisie avec précaution afin de minimiser les confusions entre les retours du RÉM des deux lignes de balayage brutes consécutives.

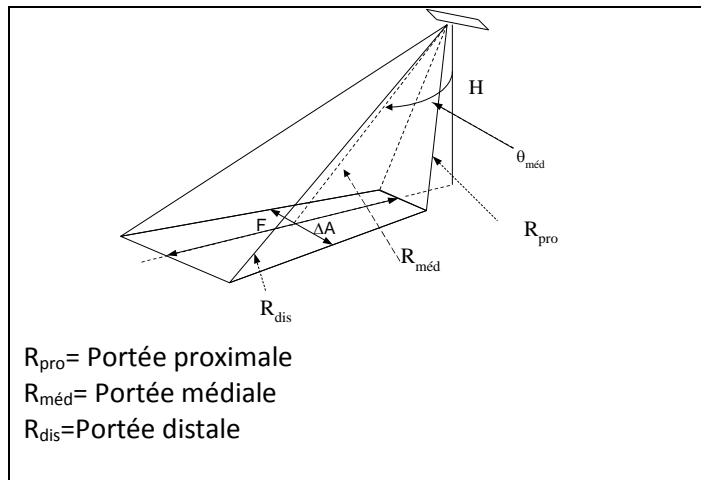


Figure 62 Formation d'une ligne de balayage

4.2.2 Dimensions d'une unité d'échantillonnage au sol: direction transversale

Le RÉM se propageant à la vitesse de la lumière atteint la surface terrestre après un certain temps, fonction de la distance qui sépare la plate-forme du point d'impact. Il va de soi que les objets se situant proche du radar réagiront en premier en réfléchissant une partie du rayonnement vers le radar. Aussitôt la transmission d'une impulsion effectuée, l'antenne se met en mode réception. La différence entre le

moment de transmission et le moment de réception peut être traduite en temps aller-retour du signal ce qui permet au radar de positionner un objet le long d'une ligne de balayage. La figure 16 illustre le principe de balayage. Le front d'ondes se déplace à la vitesse de la lumière et atteint en premier les objets les plus rapprochés du radar et progressivement les autres objets jusqu'à la limite de la ligne de balayage. Puisque le RÉM se propage à la vitesse de la lumière (ou presque dans l'air) le temps de balayage de la fauchée n'est qu'une fraction du millième de la seconde. L'antenne commence donc à recevoir le RÉM réfléchi par les objets à une portée proximale après quelques msec (voyage aller-retour des ondes) à partir de la fin de l'émission de l'impulsion et ce pendant une fraction de msec jusqu'au retour des ondes des portées distales.

Le plus court intervalle possible entre deux mesures consécutives du temps aller-retour ne peut pas être inférieur à la durée de l'impulsion, τ . Tenant compte de la vitesse de propagation du RÉM et du fait que les ondes pendant cet intervalle ont fait un voyage aller-retour, nous pouvons estimer la distance parcourue au sol par l'onde. Ceci constitue la longueur d'une unité d'échantillonnage (direction transversale). Nous pouvons aussi exprimer cet intervalle en termes de différence en portée oblique entre le début et la fin d'une unité d'échantillonnage au sol. Ainsi nous aurons (fig. 63) :

$$\text{Différence en portée oblique : } \Delta R_O[m] = \frac{c\tau}{2}; \text{ différence en portée au sol : } \Delta R_S[m] = \frac{c\tau}{2\sin\theta}$$

Ces équations tiennent compte des deux systèmes de référence employés avec le radar : portée oblique-azimut ou portée au sol-azimut. En d'autres mots, les ondes provenant des objets rapprochés dont les distances du radar ont une différence inférieure à la quantité ΔR_O ou, l'équivalent, les distances par rapport au nadir ont une différence inférieure à la quantité ΔR_S , ne sont pas différenciables au niveau du récepteur radar (fig. 64).

Compte tenu de la vitesse de la lumière, nous comprenons par ces équations que pour obtenir une longueur d'une unité d'échantillonnage de quelques mètres nous avons besoin d'une impulsion dont la durée est une fraction du millionième de seconde. Produire une telle impulsion avec une forte énergie ÉM afin de générer des signaux de retour suffisamment puissants c'est pratiquement impossible. Les RSO emploient alors une technique spécifique pour obtenir l'équivalent d'une unité d'échantillonnage fine tout en maintenant la durée de l'impulsion à quelques dizaines de microsecondes. Cette technique est appelée chirp (« frémissement »). Au lieu d'émettre une impulsion de courte durée à fréquence constante on utilise une impulsion de plus longue durée avec une fréquence variable (modulation en fréquence). Une même parcelle de terrain est alors illuminée par le train d'onde ainsi émis pendant la durée de l'impulsion et produit des multiples signaux de retour vers le radar avec des fréquences légèrement différentes. Ceci permet au radar de les distinguer et de conserver les informations nécessaires pour le traitement post-acquisition. Ce traitement réalise ce que nous appelons la « compression » de l'impulsion pour reconstituer un signal qui aurait dû retourner au radar par une parcelle illuminée par une impulsion de très courte durée à fréquence constante.

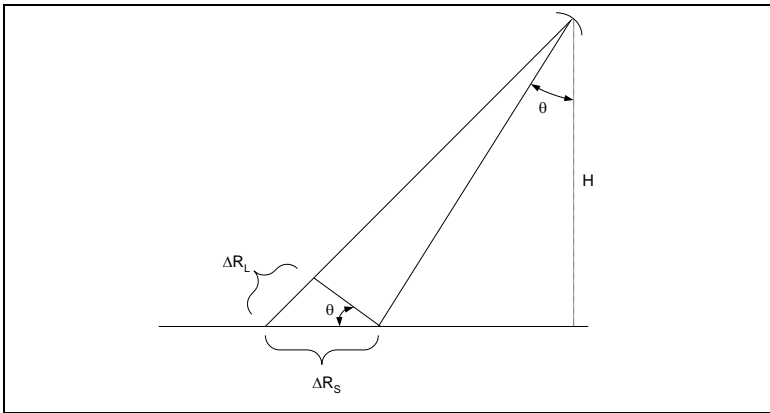


Figure 63 Longueur d’une unité d’échantillonnage exprimée en portée oblique et en portée au sol.

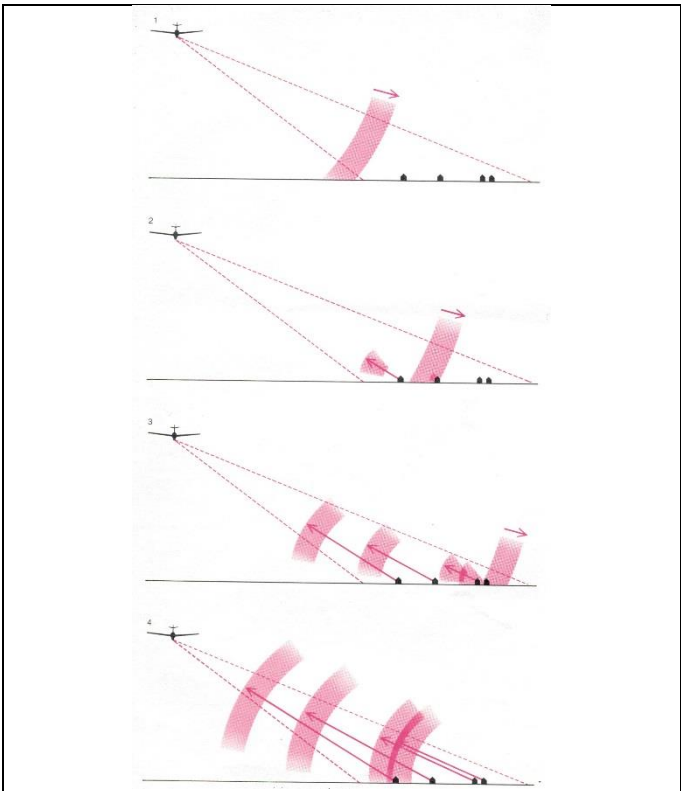


Figure 64 Principe du balayage par le front d’onde. Les deux bâtiments à l’extrémité droite de la figure sont tellement rapprochés que les ondes réfléchies par chacun d’eux ne sont pas différenciables par le temps d’arrivée au niveau du récepteur (Source Jensen 2000).

4.2.3 Dimensions d’une unité d’échantillonnage au sol: direction azimutale

Suivant l’axe azimutal le RSO exploite la largeur de sa ligne de balayage brute pour pouvoir observer le même objet au sol depuis un grand nombre de stations d’échantillonnage consécutives. Un calcul simple nous convaincra. Prenons le cas d’un radar à bord d’un satellite. Le satellite a une vitesse au sol de 6,7 km/s tandis que la FRI est de quelques 1700 Hz. Ainsi l’intervalle du temps entre émissions successives

n'est que $1/1700$ sec. À la vitesse de la plateforme ceci signifie que le faisceau ne s'est déplacé au sol que des 4 m environ ($6,7 \text{ km/sec} \times 1/1700 \text{ sec}$). Une ligne de balayage brute est de 4 km de large au centre. Un objet de largeur de 4 m situé au milieu de la fauchée peut être donc observé par le radar pendant 1000 impulsions consécutives ($4\ 000 \text{ m}/4 \text{ m}$). Bien sûr à chaque fois son emplacement par rapport au radar n'est pas le même. L'objet occupe d'abord une des extrémités de la première ligne de balayage brute, à la 500^{ème} ligne il se trouve vis-à-vis la plate-forme et la 1000^{ème}, à l'extrémité opposée. Ce changement progressif de sa position par rapport au radar qui se déplace cause l'apparition du phénomène Doppler. La fréquence de l'onde reçue par le récepteur radar est supérieure de la fréquence émise lorsque l'objet est observé pour la première fois, cette différence décroît et devient zéro lorsque objet et radar se trouvent vis-à-vis (zéro de Doppler). Ensuite la fréquence reçue devient inférieure par rapport à la fréquence émise jusqu'à ce que l'objet disparaisse du « champ de vue » du radar. Cette différence des fréquences s'appelle le décalage Doppler. En d'autres mots à chacune de stations d'échantillonnage et par portée oblique le radar est capable de différencier les ondes provenant d'un certain nombre d'objets de dimensions comparables grâce à leur décalage Doppler différent. Malgré le fait que la ligne de balayage brute n'a pas une largeur constante, la ligne de balayage synthétisée après traitement aura une largeur constante et cette largeur peut atteindre en théorie la moitié de la longueur physique de l'antenne.

4.2.4 Récapitulation

En résumé nous pouvons concevoir l'opération du RSO comme un double échantillonnage spatial par ligne de balayage brute (fig. 65). Dans la direction transversale les ondes sont séparées selon leur temps d'arrivée à l'antenne après leur voyage aller-retour des différentes portions de la fauchée (portails en portée de la figure 65b). Dans la direction azimutale les ondes sont séparées selon leur décalage Doppler (filtres Doppler de la figure 65b). Comme le montre schématiquement la figure 65a, en ignorant le mouvement de la Terre, le locus des points au sol qui se trouvent à une portée égale c'est l'arc d'un cercle inclus dans l'empreinte du faisceau, tandis que celui des points avec un décalage Doppler constant, des hyperboles. Puisque la mesure du temps d'arrivée et la mesure du décalage Doppler ont leur propre précision un échantillon comprend les ondes qui proviennent d'une surface élémentaire, l'équivalent d'une unité d'échantillonnage spatiale (Figure 65a). Le traitement des plusieurs lignes de balayage brutes en azimut (compression) permet de synthétiser des nouvelles lignes de balayage positionnées vis-à-vis des différentes stations d'échantillonnage du capteur pendant son survol (zéro de Doppler). Il ne faut pas non plus oublier que selon l'axe transversal nous avons une autre série d'échantillons par UÉ à cause de la technique du chirp. Les signaux électriques générés après détection du RÉM par UÉ sont échantillonnés et numérisés pour former ainsi une matrice de signaux par ligne de balayage brute. Dans les faits il y a deux matrices car, tel que mentionné, les radars modernes séparent les signaux en deux composantes I (en phase) et Q (en quadrature de phase) comme il est expliqué dans l'Annexe 1 et illustré par la figure 59. Chacune de ces composantes est numérisée et codée selon une échelle de gris en 4 ou 5 bits. L'image détectée est présentée le plus souvent en 16 bits.

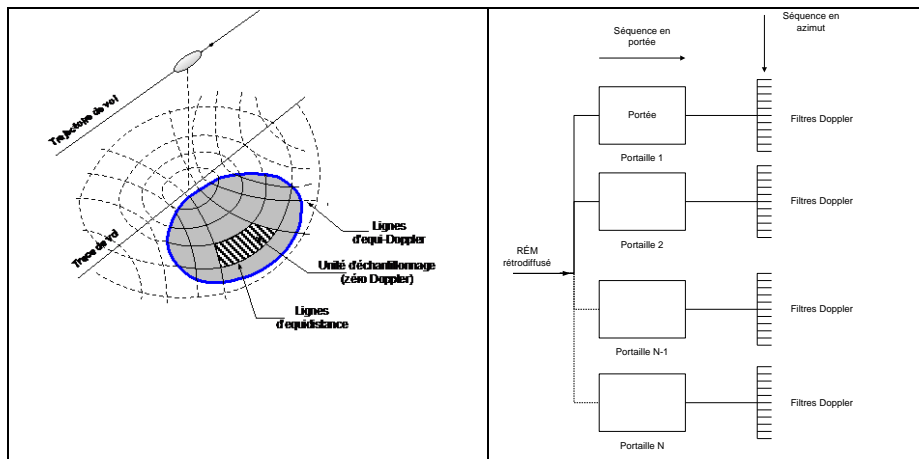


Figure 65 L'image RSO provient d'un double échantillonnage par ligne de balayage et du traitement post-acquisition des données recueillies par ligne de balayage

Le traitement se fait par des programmes informatiques spécialisés que nous appelons des processeurs SAR. Les matrices I et Q recueillies par ligne de balayage brute sont des intrants dans le processus de « compression ». Nous pouvons faire ici une analogie avec une lentille qui forme l'image d'un point lointain. Les rayons lumineux émanant de ce point qui passent à travers la lentille changent de trajet et convergent vers le point focal de la lentille pour générer l'image de ce point. Les données recueillies par le radar par unité d'échantillonnage que ce soit dans la direction transversale (chirp) ou dans la direction azimutale (Doppler) décrivent la position de chacun des rayons provenant d'une unité d'échantillonnage quelconque à leur entrée à la lentille. Pour générer un pixel final de l'image la focalisation en portée et la focalisation en azimut ont lieu d'une façon indépendante. Ceci se fait par les processeurs SAR.

L'espacement entre lignes de balayage synthétisées après compression est, à la limite, équivalent à la moitié de la longueur de l'antenne physique. Les données de base conservent cet espacement. Les images détectées sont par contre traitées afin d'obtenir une dimension du pixel au sol compatible à celle dans la direction transversale (pixel carré).

4.2.5 Modes d'acquisition des images radar

Il y a actuellement trois façon de générer une image radar : le mode zonal (Stripmap), le mode ScanSAR et le mode Spotlight (fig. 66). Le premier mode est celui que nous venons de décrire. Le ScanSAR, permet de créer une image avec une fauchée très large à partir du mosaïquage de plusieurs images en mode zonal créées par station d'échantillonnage en faisant changer la position du faisceau électroniquement. Finalement une image SpotLight suit le même principe que le mode zonal sauf que la production des images se limite à des surfaces spécifiques. En d'autres mots on ne génère pas des images continues du terrain comme dans le cas zonal. Nous pouvons ainsi utiliser un nombre d'impulsions beaucoup plus grand pour illuminer la même parcelle de terrain à l'intérieur du site choisi afin d'atteindre un pixel au sol beaucoup plus fin qu'en mode zonal.

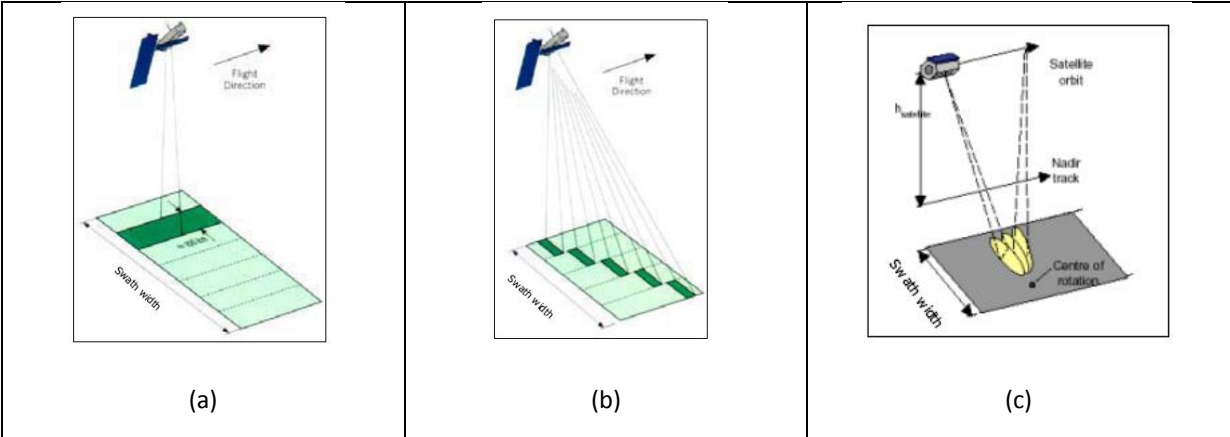


Figure 66 Différents modes d’acquisition d’images radar : (a) mode zonal; (b) mode ScanSAR et c) mode Spotlight

4.3 PROPRIÉTÉS DE BASE

Compte tenu du fait que les radars sont des capteurs uni-fréquence, la notion de la résolution spectrale ne s’applique pas. La mise en œuvre de la multifréquence nécessite l’utilisation des systèmes analogues aux capteurs optiques avec plusieurs systèmes de collecte - systèmes de détection. Ici nous parlons des radars multi-antennes, chaque antenne étant spécialisée à l’émission et la réception d’une fréquence particulière. Des tels radars existent à bord des avions mais pas encore à bord de satellites à l’exception d’une mission de la navette spatiale américaine il y a plusieurs années maintenant (mission de 1994).

Comme dans le cas optique la résolution radiométrique est exprimée d’une manière ou d’une autre par la capacité du radar de restituer des menues différences du flux ou du coefficient de rétrodiffusion. Souvent on donne comme mesure le rapport signal/bruit dans les cas des objets très peu brillants. À titre d’exemple pour des radars satellitaires ce rapport est évalué comme inférieure ou égale à 2,5 dB pour un signal faible (-18 dB). Ceci veut dire que lorsque le coefficient de rétrodiffusion est à -18 dB, la mesure par le radar commence à n’est plus être fiable, car elle est à peine plus forte que le bruit inhérent au fonctionnement du radar.

Concernant la résolution spatiale des images, plusieurs l’assimile à l’unité d’échantillonnage au sol. Cependant, comme dans le cas des images du rayonnement réfléchi l’unité d’échantillonnage seule n’est pas une mesure adéquate de la résolution spatiale. Introduire le contraste et la taille des objets n’est pas aussi facile que dans le cas des images du rayonnement solaire réfléchi. Le contraste est compliqué à évaluer à cause du bruit du chatoiement (voir plus loin). Pour illustrer les difficultés d’introduire la notion de la taille des objets nous reprenons ici l’exemple avec les réservoirs d’hydrocarbures (fig. 67). Les 6 petits réservoirs (petit cercle blanc) sont bien « résolus » sur l’image radar par contre les 4 grands réservoirs (grand cercle blanc) ne sont détectables que grâce à quelques pixels brillants. Ainsi il est difficile d’admettre la règle empirique qui est donnée dans certains ouvrages que plus il y a des pixels radar au sol qui couvrent un objet plus cet objet est discernable de son environnement. Un objet n’a pas nécessairement la même signification dans une image optique et dans une image radar.

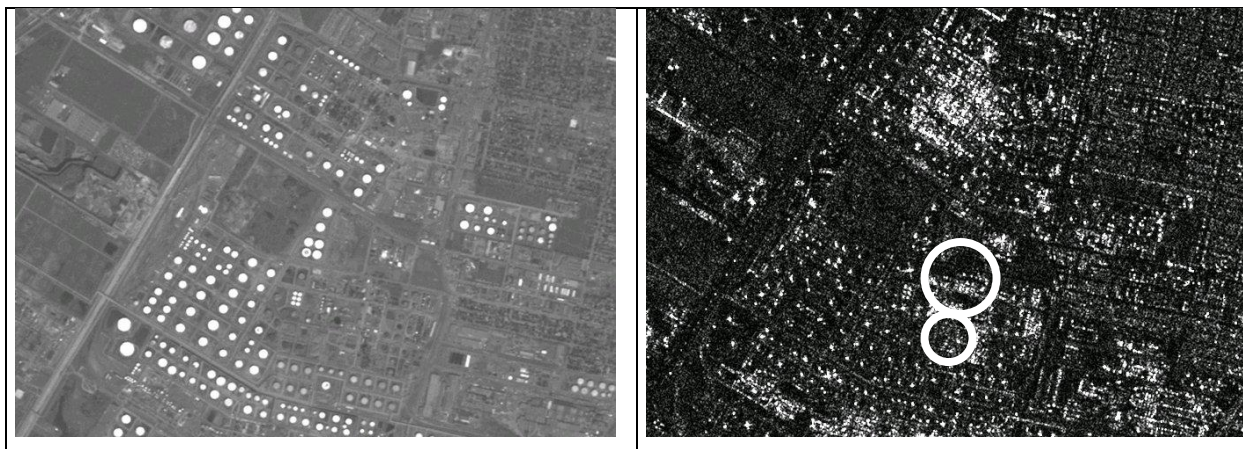


Figure 67 Résolution d'une image optique (IRS Pan) versus résolution d'une image radar (RADARSAT mode fin) avec une UÉ presque de la même taille.

4.4 PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES

Contrairement aux balayeurs optiques, le balayage est réalisé par le front d'ondes émises par la source micro-ondes comme il se propage du radar vers les limites du territoire que nous voulons couvrir. Le radar positionne les objets en fonction du temps aller-retour des ondes. Ceci confère aux images des caractéristiques géométriques uniques particulièrement lorsque le terrain présente un relief accidenté. Les images radars sont disponibles selon deux systèmes : en portée au sol et en portée oblique. Les schémas de la figure 68 montrent la différence fondamentale entre ces deux systèmes. Dans le système en portée oblique l'échelle de l'image est plus petite dans la portion de la ligne de balayage proche du radar (portées proximales) que dans la portion la plus éloignée du radar (portées distales). Par contre ces différences sont éliminées lorsque les images sont fournies dans le système en portée au sol (toujours pour un territoire plat et horizontal).

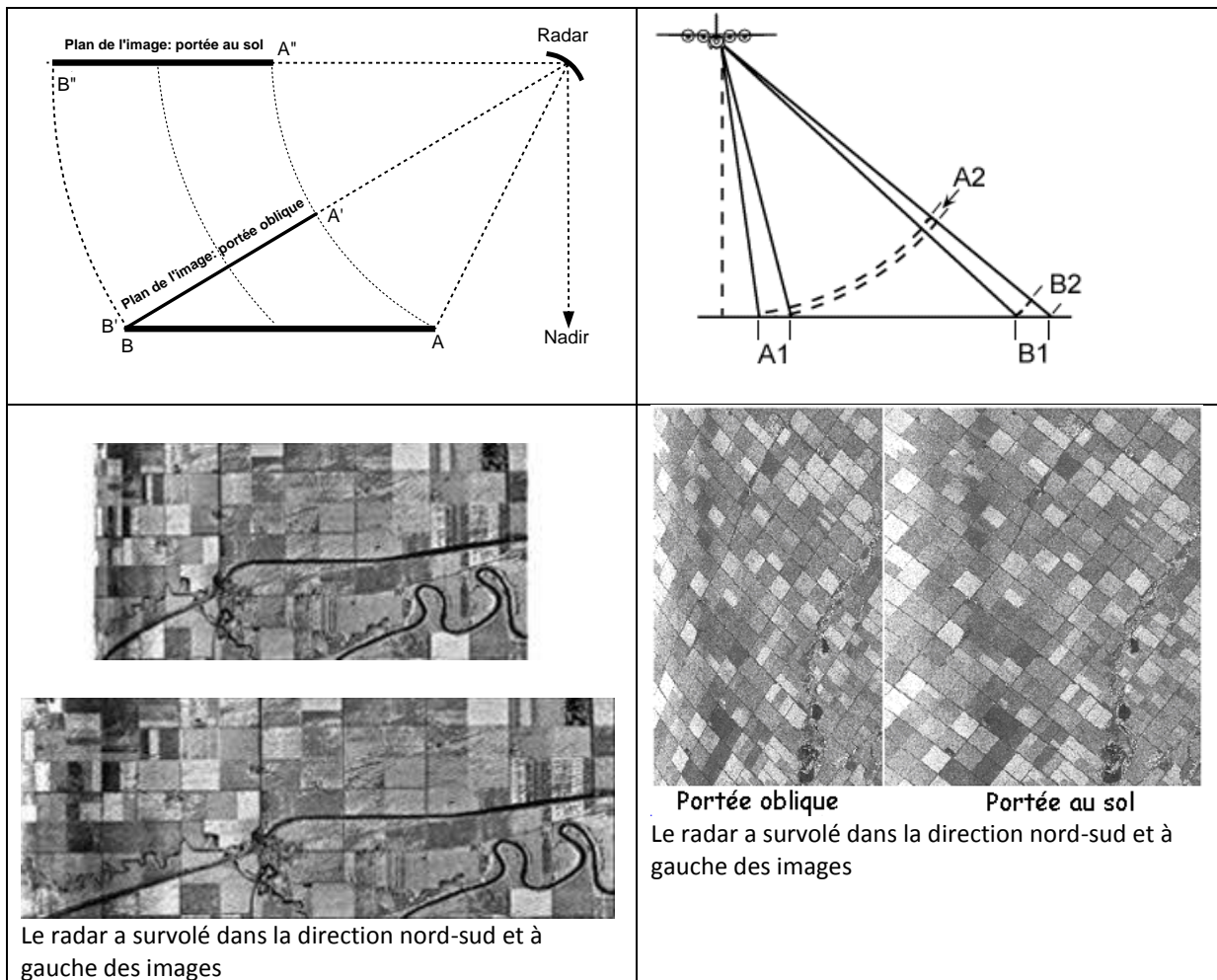


Figure 68 Différences entre les images présentées en portée oblique et en portée au sol

Ce phénomène est plus apparent dans le cas des images aéroportées car les angles d'incidence dont dépend la longueur de l'unité d'échantillonnage sont beaucoup plus variables par rapport à un radar satellital. Comme le montre la figure 69 pour la même fauchée, les angles d'incidence varient d'une soixantaine de degrés dans le cas aéroporté pour une dizaine de degrés dans le cas d'un satellite.

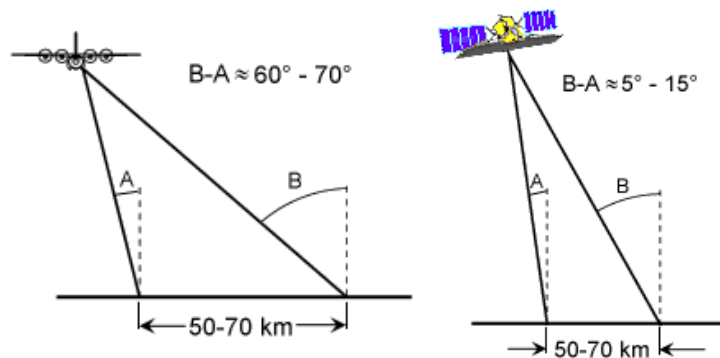


Figure 69 Variations des angles d'incidence dans le cas aéroporté et satellital

Deux phénomènes uniques aux images radar sont manifestes dans le cas des terrains accidentés : l'inversion des pentes et le raccourcissement des pentes faisant face au faisceau du radar. À ceux-là s'ajoutent les ombres du radar, des endroits où aucun rayonnement n'est réfléchi vers le radar. Des exemples de manifestation de ces phénomènes sont donnés par la figure 70 tandis que la boîte 1 explique l'origine de ces phénomènes.

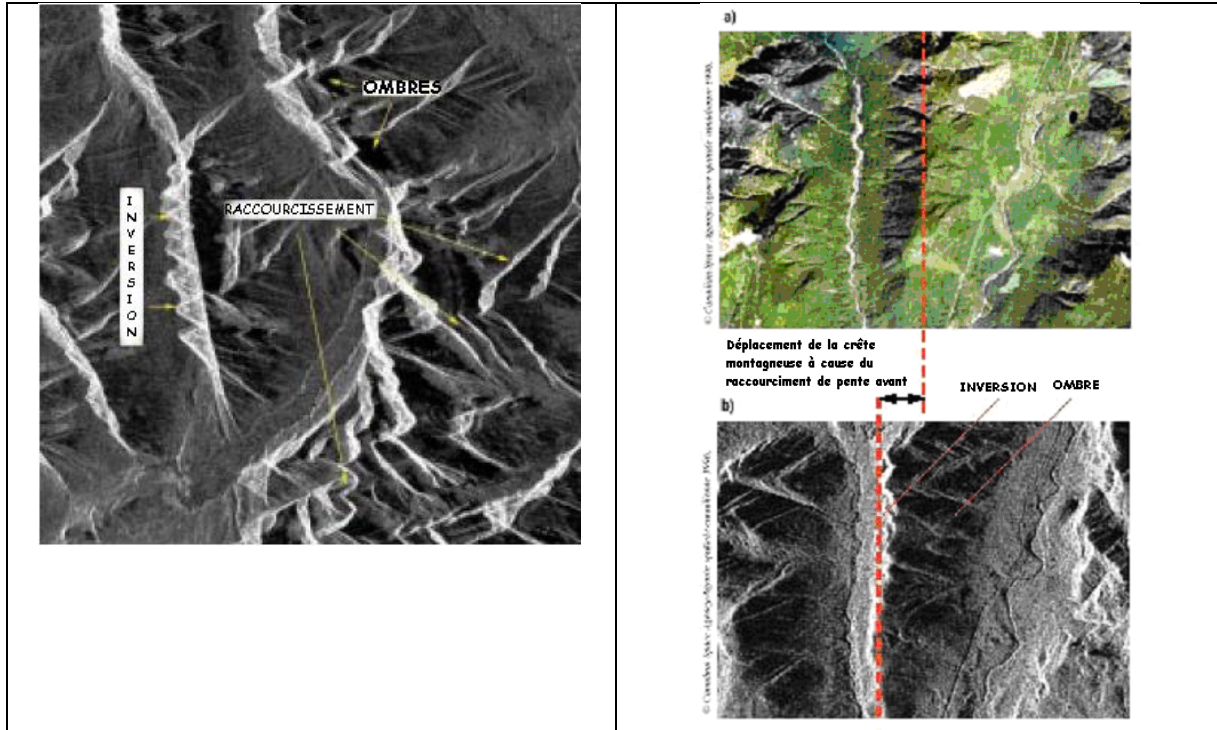
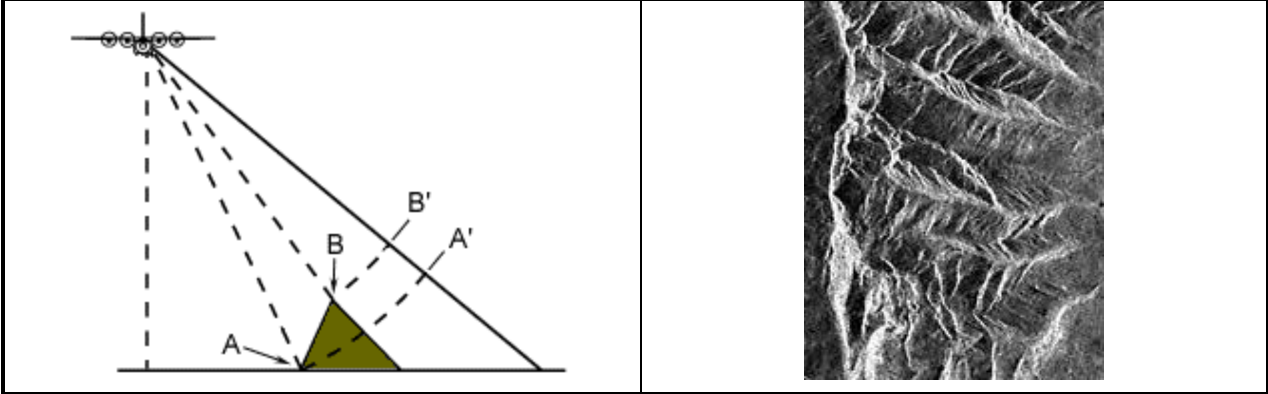


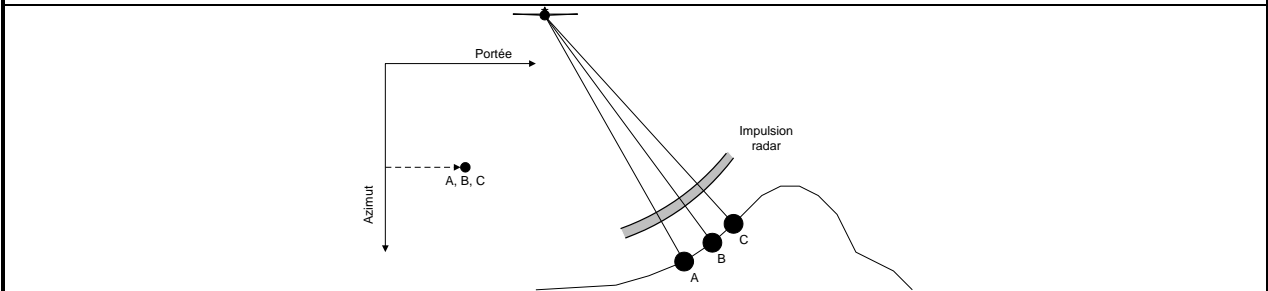
Figure 70 Images radar des terrains accidentés

BOÎTE 1

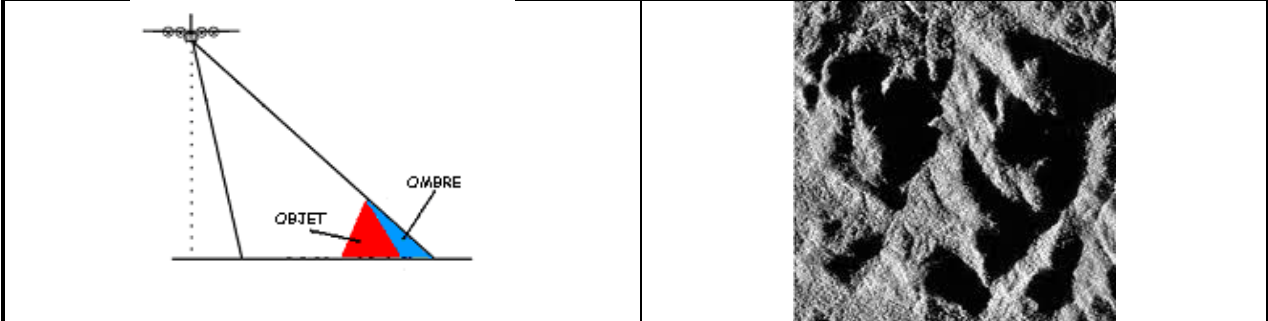
Inversion de pente: Le phénomène le plus inusité sur les images radar est l'inversion de la pente faisant face au faisceau radar. Lorsque le sommet d'un versant (B) se trouve à une distance du radar inférieure à celle de la base du versant (A), le temps aller-retour des ondes réfléchies par le sommet est plus court par rapport à la base et ainsi le sommet est imagé en premier (B' vs. A'). Cette inversion de pente se présente pour la partie du terrain proche du radar. Cette portion de l'image est très difficile à interpréter car en plus, les ondes réfléchies par plusieurs objets se situant à la même distance que le sommet du versant sont captées en même temps par le radar.



Raccourcissement des pentes : Au fur et à mesure que l'angle de visée du radar augmente l'inversion des pentes disparaît pour donner place à un autre phénomène qui est le raccourcissement apparent du versant faisant face au radar. En effet, le temps de retour des ondes par le sommet et la base du versant ne diffère pas significativement, et ainsi les images des deux points se rapprochent et à la limite se confondent. Par contre le versant opposé au radar s'il n'est pas dans l'ombre apparaît à sa longueur réelle (à l'échelle de l'image).



Ombres : Il est aussi à noter que les régions d'ombre sont inutilisables car il n'y a aucun signal de retour. Par contre dans le visible et l'infrarouge les régions d'ombre créées par l'obstruction des rayons solaires sont quand même illuminées par le rayonnement provenant du ciel et peuvent ainsi retourner un signal perceptible par le capteur.



4.4.1 La restitution de la troisième par les radars

Comme dans le cas des images du rayonnement solaire, nous pouvons aussi créer des images radar stéréoscopiques. Une branche particulière de la photogrammétrie, la radargrammétrie a vu le jour dans les années 1960 pour l'exploitation de ces images radar surtout pour la cartographie topographique des territoires sous couvert forestier important ou des zones avec un couvert nuageux fréquent.

Des images acquises avec différents angles de visée en maintenant l'orientation du faisceau constant par rapport au terrain sont souvent utilisées pour acquérir des images stéréoscopiques (stéréo du même côté; figure 71). Le déplacement différent du relief cause la parallaxe nécessaire à l'observation stéréoscopique. Pour la stéréo du même côté le déplacement est vers le radar et dépend de la hauteur de l'objet. Dans ce cas on place sous le stéréoscope à gauche l'image avec l'angle de visée le plus à pic (déplacement plus grand) et l'autre à droite.

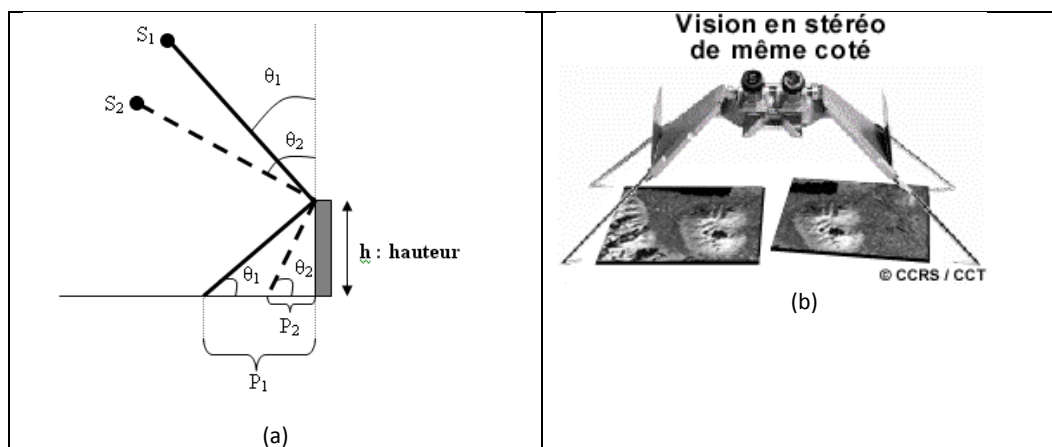


Figure 71 Images stéréoscopiques (du même côté) : a) déplacement du relief différent selon l'angle de visée; la différence de parallaxe est fonction de la hauteur de l'objet; b) disposition des images sous le stéréoscope.

Une autre façon d'obtenir l'information 3-D est d'utiliser l'interférométrie radar. Son étude dépasse les objectifs du cours.

4.5 PROPRIÉTÉS RADIOMÉTRIQUES

Lorsqu'on observe une image radar ce qui est frappant est leur aspect « sel-poivre ». Ce bruit, le chatoiement, est le résultat de l'utilisation d'un rayonnement monochromatique par le radar. La figure 72 explique schématiquement ce bruit. Dans le cas du rayonnement solaire (polychromatique) le flux réfléchi par les objets élémentaires se trouvant à l'intérieur de chaque unité d'échantillonnage s'additionne au niveau du capteur. Pour une surface homogène (ex. un champ agricole) les unités d'échantillonnage (deux dans l'exemple de la figure 72) donneront presque la même réponse. L'image aura alors une teinte homogène peu importe la disposition des objets élémentaires à l'intérieur de l'unité d'échantillonnage. Dans le cas d'une image radar les choses se passent autrement. Chaque objet élémentaire génère des ondes monochromatiques. Ces ondes lorsque ils se rencontrent au niveau de l'antenne créent une onde dont l'amplitude peut être plus grande ou plus petite que la somme de leurs amplitudes individuelles à cause du phénomène d'interférence. Si les ondes arrivent en phase il y a une interférence constructive et l'amplitude de l'onde résultante est plus grande que la somme des amplitudes. Lorsqu'elles arrivent avec

un déphasage, une interférence destructive a lieu et l'amplitude est plus basse que la somme des amplitudes individuelles. À la limite quand les ondes sont en opposition de phase, l'amplitude de l'onde résultante est nulle. Ces différences peuvent être créées par la disposition particulière des objets élémentaires à l'intérieur de l'unité d'échantillonnage. Ainsi des pixels à l'intérieur d'une surface homogène peuvent paraître tantôt brillants tantôt sombres, ce qui explique cette apparence sel-poivre. Des méthodes existent pour réduire ce bruit et donner une meilleure apparence visuelle aux images.

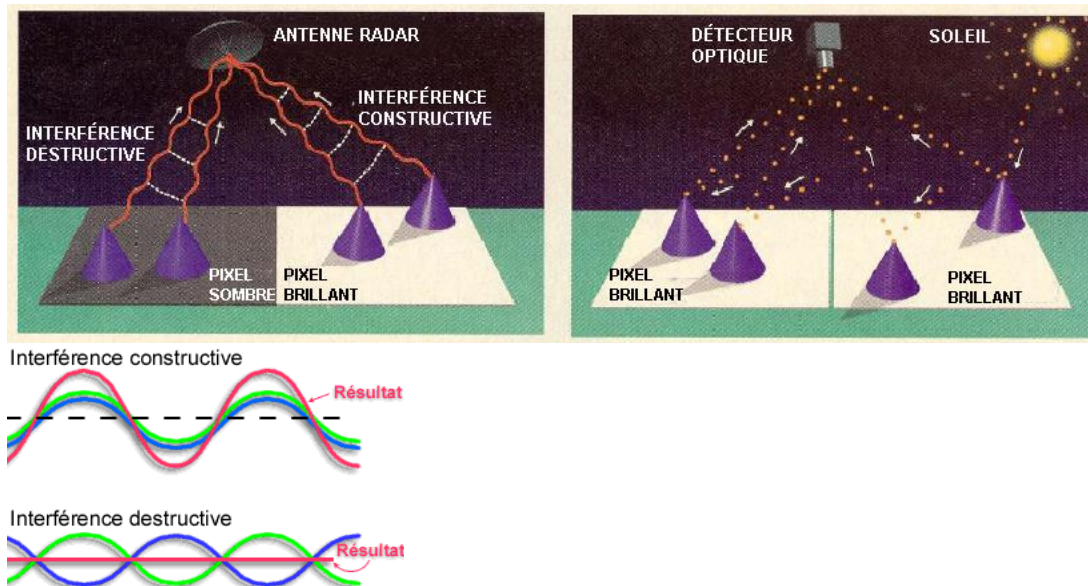


Figure 72 Origine du bruit du chatoiement

Concernant le contenu radiométrique des images, abstraction faite du chatoiement, son interprétation doit se faire sur la base des mécanismes de rétrodiffusion. Ces derniers, tels qu'expliqués précédemment, ne se manifestent pas de la même manière dépendamment des paramètres d'opération du radar (fréquence, polarisation et angle d'incidence) et des conditions du terrain. On peut quand même séparer grossièrement les surfaces en trois catégories selon leurs teintes de gris sur les images radar, fonction des mécanismes de rétrodiffusion : surfaces sombres, surfaces de tonalité intermédiaire, surface brillantes. Le tableau 9 présente quelques exemples typiques dans le cas des images en polarisation parallèle.

Tableau 9 Tonalités d'objets typiques sur les images radar

Type de surface	Ton de gris	Explication physique
Eau calme Pistes d'aéroport Terrain de stationnement	sombre	Réflexion spéculaire
Canopée forestière	gris moyen	Réflexion de volume
Maïs mature (sec) vs. maïs (humide) Sols sec vs. humide	Gris moyen vs. gris pâle	Différences dans la constante diélectrique
Rails de train	Gris pâle	Réflexion diffuse + fort retour par les rails (objets métalliques).
Bâtiments et ponts	Gris pâle	Réflecteurs en coin
Versants abrupts faisant face au faisceau radar	Gris pâle	Forte réflexion à cause de la configuration géométrique
Versants abrupts non exposés au faisceau radar	Très foncé	Ombres radar

La figure 73 compare des images radar en polarisation HH (bande C) aux images panchromatiques (version 1) ayant le même pixel au sol (environ 5 m).

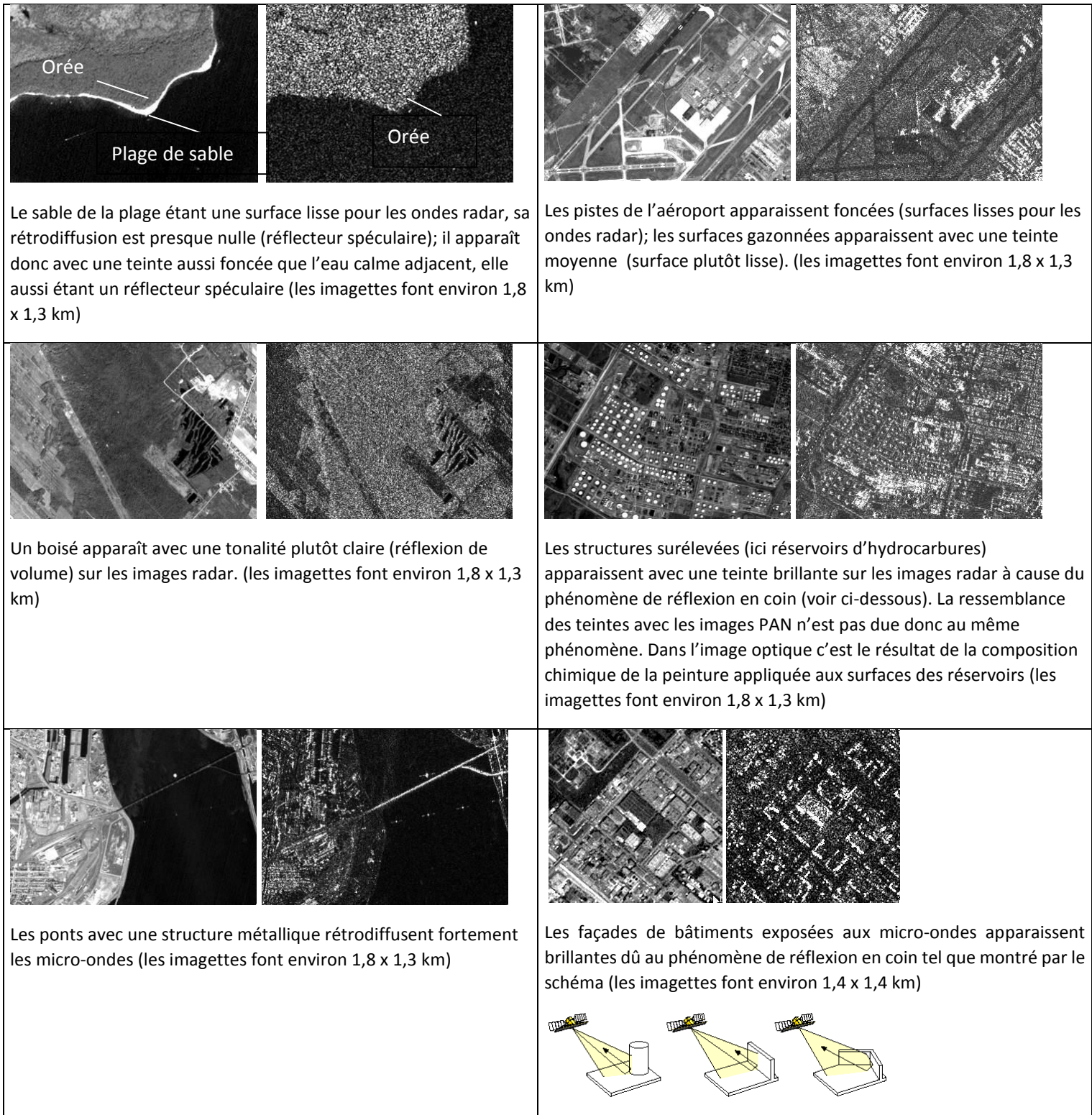


Figure 73 Comparaison des images PAN (version 1) du satellite IRS et des images radar du satellite RADARSAT

Tel que mentionné, l'angle d'illumination a un effet important surtout pour les objets sans structure tridimensionnelle. Ainsi selon cet angle, tantôt la micro-géométrie de la surface tantôt ses propriétés électriques (modulées surtout par la présence de l'eau) deviennent les facteurs primordiaux de définition du coefficient de rétrodiffusion (fig. 74). Comme dans le cas des balayeurs à râteau, il est possible d'utiliser des images multi-angulaires pour différents projets de cartographie et pour le suivi environnemental mais également pour obtenir une vision stéréoscopique du terrain. Les images RADARSAT-1 en mode Standard (pixel au sol de 12,5 m x 12,5 m) montrés sur cette figure (extraits) ont été acquises vers la fin du mois de mai avec une semaine d'intervalle. À gauche : angle d'illumination à pic (environ 25° de la verticale); À droite : angle d'illumination à rasage (environ 47°). Les sols humides sont brillants sur l'image de gauche à cause de la dominance de l'humidité des sols dans le signal radar. Les contrastes entre champs agricoles et boisés sont meilleurs dans les images de droite (dominance de la rugosité de la surface dans le signal radar).

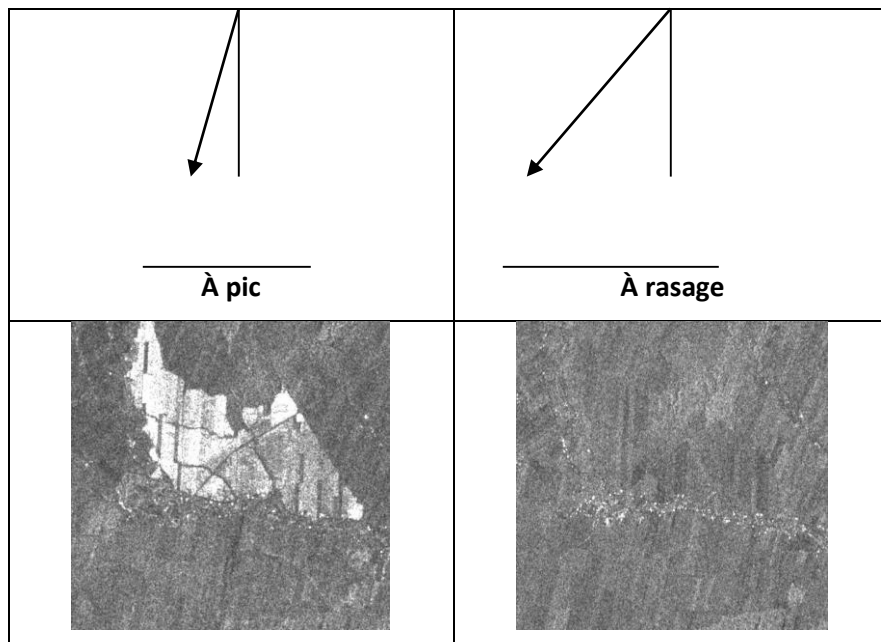


Figure 74 Dominance de l'humidité de sol ou de la rugosité de surface en fonction de l'angle de visée

Des images de plan d'eau présentent aussi des particularités intéressantes (fig. 75). Ici on observe des bateaux dont la structure particulière avec la surface d'eau relativement calme forment des réflecteurs en coin. Les bateaux ressortent par leur brillance. Les images radar étant sensible aux variations du relief du plan d'eau nous donnent des informations intéressantes. Ici la diffusion relativement importante est due aux vaguelettes créées sur la surface d'eau à cause d'un vent relativement faible. Les endroits les plus sombres sont dues au fait que le pétrole déchargée par le bateau au bas et à gauche empêche la formation des vaguelettes et ainsi la surface devient lisse (donc spéculaire).

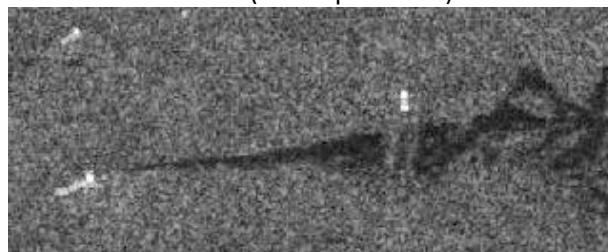
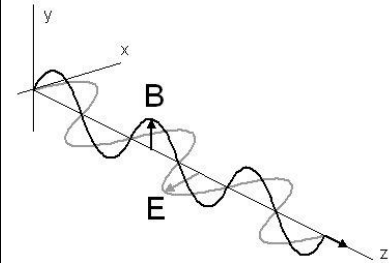


Figure 26

5 ANNEXE 1: AIDE-MÉMOIRE-ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Une onde électromagnétique peut être représentée par deux vecteurs mutuellement perpendiculaires dont la magnitude varie avec le temps : le vecteur E du champ électrique et le vecteur B du champ magnétique. La direction de propagation du RÉM est perpendiculaire au plan défini par ces deux vecteurs (ondes transversales). La figure ci-contre est une illustration d'une telle onde dans un cas simplifié (onde plane)



Pour définir les propriétés de base du RÉM nous n'utiliserons que le champ électrique. Sa connaissance suffit pour connaître aussi le champ magnétique. Par ailleurs les effets photochimiques, photoélectriques et physiologiques de la lumière et du RÉM en général, étudiés en télédétection, sont produits principalement par le champ électrique.

Fonction d'une onde plane

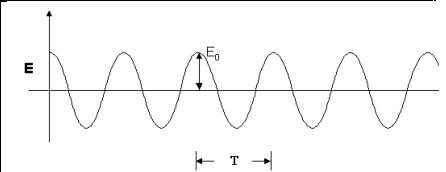
Dans le cas le plus simple, le mouvement oscillatoire du vecteur électrique est décrit par la fonction d'une onde plane : $E = E_0 \cos(p)$. E est l'intensité du vecteur électrique à un instant t ou une distance z depuis le début de l'émission de la source du rayonnement. E_0 est l'amplitude de l'onde, i.e. la valeur maximale (ou minimale) de l'intensité et p est appelé l'angle de phase.

Comme pour tout mouvement périodique, une onde électromagnétique est décrite en termes de cycles. Un cycle est accompli lorsque l'onde retrouve exactement la même valeur après deux passages consécutifs par l'état d'équilibre. La distance parcourue durant un cycle, l'onde se propageant à une vitesse c , est appelée la longueur d'onde, tandis que le temps nécessaire pour accomplir un cycle, l'onde se propageant toujours à une vitesse c , est appelée la période. Ces deux quantités sont illustrées par les graphiques ci-contre :

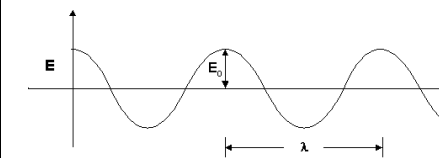
L'angle de phase nous permet de connaître le nombre de cycles accomplis par l'onde à un instant t ou une distance z depuis le début de son émission.

Souvent, au lieu de la période, nous utilisons la fréquence de l'onde (ν) ou nombre de cycles par seconde : $\nu = \frac{1}{T}$. La fréquence est exprimée en Hertz (1 Hz=1/sec) ou en multiples de Hertz. Espace et temps sont liés via la vitesse de propagation du RÉM, c , par la relation : $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$

Contrairement aux autres phénomènes de nature ondulatoire, comme le son, qui nécessitent un support matériel pour se propager, le RÉM peut se propager aussi dans le vide. Sa **vitesse de propagation** dans le vide (peu importe sa fréquence ou l'équivalent sa longueur d'onde) est une constante universelle appelée vitesse de la lumière $c = 2,99792 \times 10^8$ m/sec ou en arrondissant 3×10^8 m/sec.



Variations de l'onde électrique dans le temps à un point fixe dans l'espace



Variations de l'onde électrique dans l'espace à un point fixe dans le temps

Unités de mesure de la longueur d'onde utiles en télédétection

le nanomètre (nm) = 10^{-9} m
 le micromètre (μ m) = 10^{-6} m
 le centimètre (cm) = 10^{-2} m

Unités de mesure de la fréquence utiles en télédétection

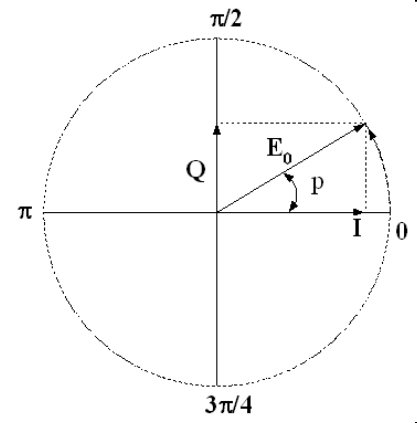
1 Hz = 1 cycle/sec
 1 KHz (Kilo-) = 10^3 cycles/sec
 1 MHz (Mega-) = 10^6 cycles/sec
 1 Ghz (Giga-) = 10^9 cycles/sec

Il est convenable de représenter le mouvement oscillatoire du champ électrique par un cercle de rayon égal à E_0 et où à 360° (ou 2π rad) on fait correspondre la période T . Le graphique illustre ce cercle pour une onde plane donnée par l'équation $E = E_0 \cos(p)$. Si on projette le vecteur électrique sur l'axe des abscisses selon l'angle de phase on obtient un vecteur $I = E_0 \cos p$ et si l'on fait la même chose selon l'axe des ordonnées on obtient un vecteur $Q = E_0 \sin p$, appelé en quadrature de phase. On voit que si l'on mesure ces deux vecteurs I, Q on peut connaître l'amplitude de l'onde :

$$E_0 = \sqrt{I^2 + Q^2} \text{ ainsi que sa phase :}$$

$$p = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right).$$

Ce que nous faisons avec les radars modernes.



Polarisation

Un autre paramètre d'importance en télédétection est la polarisation de l'onde. Par convention c'est l'orientation du vecteur électrique E . Le rayonnement EM émis par une source monochromatique est habituellement constitué d'un ensemble d'ondes monochromatiques émises à des instants légèrement différents. Ces ondes peuvent vibrer dans un plan quelconque. À un instant t depuis le début de mesure un observateur perçoit le résultat de la superposition des tous ces ondes ce qui donne un vecteur E orienté d'une manière quelconque. Pour simplifier les choses on peut dire que le vecteur observé à un moment t peut être considéré comme la somme des deux vecteurs orthogonaux, un horizontal (E_x) et l'autre vertical (E_y).

Si ces deux composantes oscillent en phase le résultat est un vecteur oscillant toujours sur un plan. Nous disons alors que la polarisation de l'onde est plane.

Si ces deux vecteurs ne sont pas en phase l'onde décrit une ellipse ou à la limite un cercle. Nous disons alors que l'onde a une polarisation elliptique ou circulaire. Dans le cas circulaire les deux vecteurs ont la même amplitude.

Une onde sans polarisation définie (plane ou elliptique) est dite de polarisation aléatoire.

