

Dans les coulisses du Supermode de Spot 5

La continuité du service du système Spot sera assurée par le satellite SPOT 5, qui sera lancé en avril 2002. Ce satellite apportera des performances nouvelles issues des dernières technologies, dont le Supermode, un processus d'acquisition très innovant, conçu par les ingénieurs du Cnes¹. Il permet d'offrir des images échantillonnées à 2,5 m, tout en conservant le champ large de 60 x 60 km. Comment a été conçu le Supermode ? Nous nous sommes rendus au département haute résolution du Cnes pour mieux comprendre...



Décidés à améliorer encore la résolution des futurs satellites Spot, les ingénieurs du Cnes, dès le début des années 1990, ont cherché plusieurs solutions performantes. Après avoir éliminé certaines pistes, ils font preuve d'audace, audace désormais autorisée par l'évolution technologique, en repensant la technique "pushbroom" ou "capteur peigne", utilisée depuis Spot 1.

Un peu de technique ...

Depuis toujours la méthode d'observation, adoptée sur les satellites Spot, puis IRS, Adeos, etc. consiste à acquérir les images par ratissage du paysage; celles-ci sont créées, ligne par ligne, le passage d'une ligne sur l'autre provenant du déplacement du satellite sur son orbite. Chaque ligne est le résultat de ce que voit le capteur, en l'occurrence une bar-

rette de CCD² : cette barrette est constituée d'une série de détecteurs élémentaires adjacents qui mesurent chacun une luminance moyenne (rayonnement provenant de la surface au sol vue par chaque détecteur élémentaire : 5 x 5 m, 10 x 10 m ou 20 x 20 m selon les satellites Spot et les modes spectraux). Chaque ligne est en fait, constituée d'une série de chiffres qui représentent sous forme codée, les valeurs des luminances échantillonnées. L'empilement des lignes donne naissance à une image, à la manière d'une grille de mots croisés composée de plusieurs millions de pixels. En réalité une image Spot, c'est une matrice de chiffres. Prenons l'exemple du mode panchromatique de Spot 5. Une barrette de 12 000 détecteurs va recevoir la lumière d'une ligne de paysage (large de 60 km en visée verticale). En 0,75 millisecondes, le satellite se déplace de

5 m et acquiert une première ligne d'information.

Neuf secondes plus tard, le satellite s'est déplacé de 60 km et a enregistré 12 000 lignes ! A chaque pixel, correspond un morceau de paysage de 5 m de côté et pour chacun de ces morceaux, un détecteur a mesuré la quantité de lumière qui en provenait. La valeur attribuée à chacun des pixels carrés est, en fait, une moyenne des différents niveaux d'intensité lumineuse (Spot est capable d'en distinguer 256 !). Donc, pour obtenir une image de résolution 5 m, on prélève l'information du paysage survolé tous les 5 m. Jusqu'ici la taille des détecteurs était exactement égale à la taille d'échantillonnage de la grille.

Mais de nouveaux procédés, sortant de cette logique en sur-échantillonnant l'image, sans modifier pour autant la taille des détecteurs, se sont avérés

■ Le Supermode en trois étapes !

Le procédé Supermode suit trois étapes bien distinctes. A bord du satellite est placée une barrette de détecteurs permettant, pour la bande panchromatique, de prendre une image à 5 m (de résolution 5 m). Sur le même support se trouvent en fait deux lignes identiques (on parle de double barrette) comptant chacune 12 000 photodiodes juxtaposées et décalées d'un demi pixel en ligne et en colonne

Lorsque l'on souhaite utiliser le Supermode, on va programmer le satellite pour qu'il active les deux barrettes. Chaque barrette va donner naissance à une image à 5 m de résolution. Les deux images provenant des deux barrettes sont séparément transmises au sol où elles sont archivées telles quelles car elles sont directement exploitables en tant qu'image à 5 m.

Le traitement Supermode commence alors au sol : tout d'abord, on **entrelace** ces deux grilles pour les positionner parfaitement entres elles afin qu'elles s'imbriquent avec exactement un demi-pixel de décalage. Puis, par **interpolation**, c'est-à-dire en intercalant des valeurs intermédiaires, on peut restituer les pixels manquants

qui sont recalculés grâce à la théorie de Shannon avec une bonne confiance.

Enfin, on effectue un traitement dit de **restauration**. Entièrement automatique, il restitue une image d'échantillonnage 2,5 m. C'est un processus très complexe destiné à

rendre l'image plus nette qui sera effectué par le CAP⁵ de Spot Image à Toulouse. Pour donner un ordre d'idée, l'échantillonnage d'un seul pixel va représenter environ 800 opérations (au lieu de 4 actuellement pour le niveau 1 A), c'est dire son importance !

1^{ère} image à 5 m



© CNES

2^{ème} image à 5 m



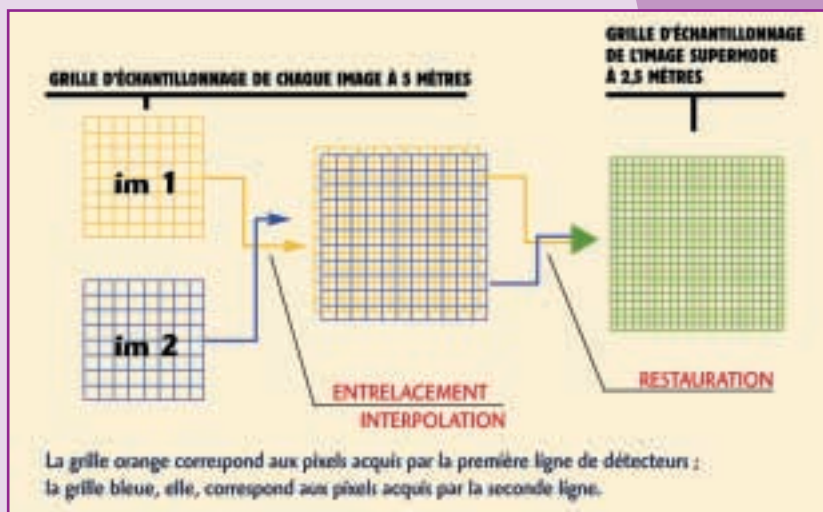
© CNES

Entrelacement interpolation



Restauration

© CNES



■ La fin du repliement de spectre !

Les images Supermode de Spot 5 seront totalement affranchies d'un défaut que certains spécialistes de l'interprétation connaissent bien : le repliement de spectre, comme nous l'explique Christophe Valorge : "La technologie disponible lors de la conception des satellites précédents n'a pas permis de répondre complètement aux critères de Shannon. Ce qui explique que dans certains cas, ils peuvent transmettre de la fausse information, notamment lorsqu'il s'agit d'interpréter des objets proches de la taille d'échantillonnage". Les photointerprètes connaissent ce type d'artefact et savent bien les déceler et s'en affranchir, mais quelquefois celui-ci peut être gênant pour certains traitements, notamment de corrélation ou de ré-échantillonnage. Les images Supermode de Spot 5 corrigeront donc totalement ce type de défaut.



© CNES

techniquement réalisables et scientifiquement révolutionnaires !

De l'Hipermode...

Dès 1991, Jean-Michel Martinuzzi, ingénieur au Cnes, imagine de prélever l'information deux fois plus fréquemment pour obtenir des valeurs supplémentaires caractérisant le paysage tout en gardant les mêmes détecteurs; pour cela, il pense à équiper le plan focal d'une deuxième barrette de détecteurs de 12 000 points, décalée d'un demi-pixel, qui va également prélever deux fois plus souvent l'information réfléchie

par le paysage. Ce procédé révolutionnaire, baptisé Hipermode³, aurait permis d'obtenir quatre fois plus d'informations sur le paysage. Débit d'informations trop élevé, flux énorme de données, l'Hipermode est vite abandonné.

...au Supermode

Christophe Latry et Bernard Rougé, ingénieurs au Cnes rebondissent alors sur cette idée et démontrent qu'une deuxième barrette mise dans le plan focal (décalée d'un demi-pixel dans une direction et de 3,5 pixels dans l'autre direction, pour éviter les chevauchements) est suffisante pour améliorer l'échantillonnage sans doubler la cadence d'acquisition de chaque barrette. On décide alors d'équiper les instruments de Spot 5 d'une double barrette de 12 000 points sur la voie panchromatique qui sera mise en fonctionnement pour l'acquisition en Supermode.

"L'avantage de cet échantillonnage en quinconce est d'obtenir des images « propres » permettant de garantir des traitements aval excellents grâce à de bonnes interpolations, basées sur la théorie du signal de Shannon", explique Christophe Valorge, responsable du département haute résolution au sein de la Division qualité et traitements de l'imagerie spatiale du Cnes, "les images Supermode Spot 5 disposeront d'une résolution meilleure que du 3 m classique selon les premiers

expérimentateurs". Le processus fonctionne parfaitement et la première véritable image Supermode a été obtenue au sol lors d'essais sur les futurs instruments HRG⁴ de Spot 5.

Se baser sur le théorème de Shannon

Christophe Latry et Bernard Rougé, "pères" de ce procédé en ont déposé les brevets. Le Cnes a conduit un programme d'expérimentation des produits Spot 5 à partir de simulation; tant en cartographie, qu'en agriculture ou en gestion de l'aménagement urbain, les études menées ont montré l'importance du compromis haute résolution/champ large. ●

- (1) Centre National d'Etudes Spatiales
- (2) Charge-coupled device
- (3) High performance by mid overlap and deconvolution
- (4) Haute résolution géométrique
- (5) Centre d'Archivage et de Prétraitement

Supermode échantillonné à 2,5 m



© CNES

■ La théorie de Shannon

Claude Elwood Shannon, né en 1916 est un mathématicien qui a élaboré la théorie de l'information. Pour lui, "La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à la fréquence maximale du signal divisée par deux", soit $f_e \geq f_{max}/2$. C'est sur ce principe mathématique que se base le procédé Supermode.

L'exploitation des données Spot 5

De la consultation à la livraison, des évolutions techniques qui améliorent le service vers le client

En 1995, Spot Image intégrait dans ses locaux le CAP (Centre d'Archivage et de Pré traitement) et mettait en service le Centre de Programmation (CPR) prenant ainsi sous sa responsabilité la majeure partie des opérations d'exploitation au sol des données Spot. Avec l'installation d'une station de réception légère en juin 2000, c'est l'ensemble du segment sol commercial qui est maintenant géré par Spot Image.

Parallèlement à ces évolutions, les caractéristiques techniques du satellite Spot 5 ont amené Spot Image à faire évoluer les différents outils existants dans le souci d'optimiser le service vers les utilisateurs.

De la consultation à la programmation

■ Amélioration des délais...

Le catalogue en ligne Sirius (<http://www.spotimage.fr>) permet à tout utilisateur :

- de consulter à ce jour 6 millions de scènes référencées parmi les 10 millions acquises depuis 1986, date de lancement du premier satellite Spot. Cette archive est enrichie quotidiennement par les

acquisitions des trois satellites opérationnels.

- de connaître les produits "sur étagère" disponibles,
- de formuler une requête ou envoyer une demande de devis à Spot Image.

L'arrivée de Spot 5 a conditionné des évolutions techniques du catalogue qui vont permettre de réduire désormais les délais de mise à jour ; en effet, les données reçues à Spot Image ou à la station de Kiruna, en Suède seront consultables pour les utilisateurs du monde entier dans l'heure qui suivra leur acquisition au lieu de quatre actuellement.

Autre exemple, la notation de la couverture nuageuse des images, effectuée jusqu'ici manuellement, sera faite



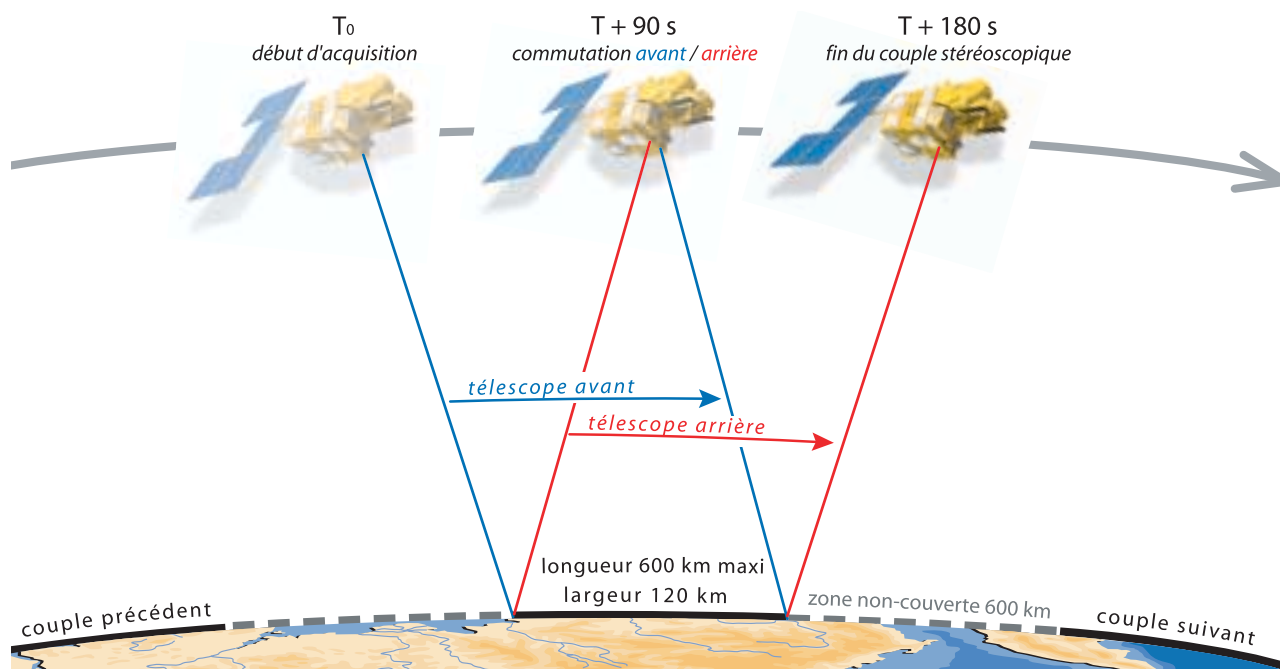
Le CAP

automatiquement par un algorithme augmentant ainsi la précision de l'information.

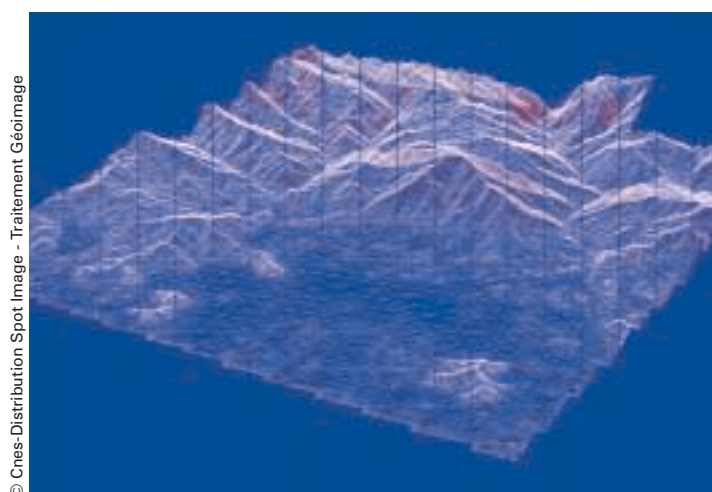
■ ...une capacité d'acquisition accrue

Spot 5, comme Spot 1 à 4, peut transmettre au sol deux images en même

Outre les deux instruments optiques identiques HRG (Haute résolution géométrique), Spot 5 emporte un instrument HRS (Haute résolution stéréoscopique) qui permet de programmer de manière optimale les prises de vue stéréoscopiques sur de très vastes étendues. Ces couples d'images autoriseront la production massive de MNT, modèles numériques de terrain d'excellente qualité ainsi que la production automatisée d'orthoimages qui apportent une vision précise du relief indispensable à de nombreuses applications (simulation aérienne en basse altitude, implantation de réseaux de téléphonie cellulaire etc.)



Principe d'acquisition de l'instrument HRS sur Spot 5



Santiago, Chili - MNT maillé



Santiago, Chili - Vue en 3D

temps. Mais l'atout de Spot 5 est d'enregistrer en plus trois images à son bord, images qui sont lues ensuite lors du passage de Spot 5 dans le cercle de visibilité des stations de Toulouse ou de Kiruna.

Les acquisitions de couples stéréoscopiques par l'instrument HRS seront aussi programmées et couvriront de grandes étendues.

L'équipe de programmation gère toutes ces combinaisons afin d'optimiser cette nouvelle capacité d'acquisition d'images.

Lorsqu'une demande de programmation est définie (période de prise de vue souhaitée, zone à couvrir, bandes

spectrales choisies, plage d'angles de prise de vue, etc.), elle est ingérée dans le centre de programmation (CPR), un puissant logiciel, qui gère l'ensemble des différentes demandes. Pour cela il dispose en particulier de prévisions météorologiques mondiales et quotidiennes et peut donc orienter la programmation des satellites avec la meilleure probabilité d'acquisition. Une fois toutes les contraintes analysées et hiérarchisées, le CPR définit le plan du travail que devra accomplir chaque satellite Spot pour assurer les prises de vues. Le Centre de maintien à poste du CNES (CMP) télécharge ce plan de travail sur l'ordinateur de bord de chaque satellite qui mémorise



Le satellite Spot 5 en test à Intespace
Décembre 2001

© Spot Image/LP

Toulouse - Simulations Spot 5
couleur à 2,5 mètres

Toulouse - Simulations Spot 5
couleur à 5 mètres



© Cnes-Distribution Spot Image

Les produits Supermode de Spot 5, dont la résolution sera de 2,5 m, subiront au CAP un traitement de restauration très sophistiqué demandant environ 2 000 opérations pour chacun des 24 000 x 24 000 points de l'image.

Une image à 2,5 m (576 millions d'octets) représente un volume 16 fois supérieur aux images Spot 1 à 4. Dix heures seraient nécessaires pour la produire si l'on utilisait les mêmes outils que précédemment.

Le CAP a donc été équipé de puissants systèmes de traitement pour effectuer l'ensemble des opérations de "restauration" d'images et pouvoir ainsi produire une image en seulement quelques minutes.

Les clients auront la possibilité de commander également des parties de scènes Spot (1/2, 1/4, 1/8 ou une zone précise sélectionnée sur le catalogue) afin de réduire les volumes de transfert électronique.

■ ■ ■ donc, chaque jour, les ordres de prises de vue qu'il aura à exécuter le lendemain.

De la réception des images à la livraison

■ Un mini CAP pour les stations de réception !

Les satellites transmettent leurs prises de vues au sol soit en temps réel si le satellite est dans le cercle de visibilité d'une station de réception, soit en les enregistrant temporairement à bord. Le

système Spot comprend deux stations principales de réception des données situées l'une en France (Toulouse) et l'autre en Suède (Kiruna). En outre, diverses stations de réception directe (SRD) situées dans le monde ont signé des accords avec Spot Image pour recevoir les données Spot dans leur zone de visibilité.

Dans un souci de standardisation et d'optimisation du système, il a été décidé d'équiper les SRD de "terminaux Spot 5", produits standards dérivés du CAP. Grâce à cet équipement commun, les SRD disposeront de moyens, de for-

mats et de fonctionnements identiques à ceux de Spot Image ce qui va améliorer très fortement les opérations entre les entités :

- mise à jour du catalogue local et du catalogue central Sirius en quasi temps réel,
- dialogue direct avec le CPR pour leurs demandes de programmation,
- produits de base totalement conformes,
- même format d'archive, ...

Ainsi, les SRD joueront un rôle encore plus efficace dans la collecte des données Spot.



Toulouse - Simulations Spot 5
couleur à 10 mètres

■ Validation et production

Dès réception, les données sont transmises électroniquement au CAP, le centre d'archivage et de pré-traitement ; elles sont immédiatement inventoriées et archivées sur un support numérique, et référencées automatiquement dans le catalogue Sirius. Les nouvelles images reçues sont validées par l'équipe de programmation qui prend la décision d'arrêter les tentatives d'acquisition si les images sont conformes à la demande du client. Les commandes sont traitées au CAP qui fabrique les produits de base c'est à dire des produits corrigés radiométriquement ou géométriquement. En raison de la haute résolution des

images Spot 5, le CAP va devoir traiter des flux de données quatre fois plus importants que ceux générés par les images des satellites Spot précédents (panchromatique et multispectral). Des algorithmes sophistiqués de compression à bord vont permettre un débit multiplié par deux pour la transmission au sol ; le CAP devra donc décompresser ces données à la réception et traiter des volumes beaucoup plus importants.

■ Dimap prépare le e-commerce

Afin de préparer la vente en ligne, un nouveau format d'image, Dimap, a été développé pour les produits Spot 5. Plus simple d'utilisation, il met en valeur les informations descriptives

des images (métadonnées) en utilisant le langage XML. Dimap est particulièrement adapté aux échanges d'informations et à la livraison de produits en réseau, en particulier si l'on considère que l'essentiel du B to B (Business to Business) , dans les années à venir, passera par le langage XML. Au-delà des fonctionnalités qu'il apportera aux utilisateurs, Dimap prépare le développement du e-commerce de Spot Image. Grâce à ce format, les clients vont pouvoir obtenir des informations très détaillées sur les images consultées en ligne et même, à terme, télécharger des spatiocartes avec leur descriptif dans le format Dimap/XML. ●

En novembre 2001, la China Remote Sensing Ground Station a été la première à signer un contrat pour la réception des données de Spot 5 ; elle sera équipée d'un terminal Spot 5 qui lui permettra d'automatiser les opérations depuis la réception jusqu'à la production.