

14<sup>ème</sup> CONGRES DE LA SOCIETE INTERNATIONALE DE PHOTOGRAMMETRIE  
HAMBourg 1980

N° de la COMMISSION : III

N° du GROUPE DE TRAVAIL :

Genre d'Exposé : Communication du C.N.E.S.

NOM DE L'AUTEUR : G. BEGNI, M. RAYSSIGUIER

SOMMAIRE : "Qualité radiométrique et géométrique des images fournies par SPOT"

L'exposé présente la qualité radiométrique et géométrique des images fournies par le système SPOT telle qu'elle existe dans les spécifications et telle qu'elle peut être estimée par les bilans. On s'attachera, d'une part, à montrer l'intérêt des spécifications par l'utilisateur des images et d'autre part, à montrer la contribution des sous-systèmes à la tenue des spécifications.

## I. OBJET, RAPPELS SUR LE SYSTEME SPOT

### I.1. Introduction

Le satellite SPOT a pour objet de fournir des images de la surface terrestre à haute résolution dans le domaine visible et proche infra-rouge. Il se fonde sur une technologie jusqu'alors non employée dans le domaine de l'observation de la terre par satellite : l'usage de barrettes de détecteurs. Il permettra par ailleurs des visées obliques. Ces particularités nouvelles font qu'il est intéressant d'étudier en détail les spécifications que les concepteurs du système ont posé pour la réalisation industrielle des différents systèmes, mais également les bilans qui donnent la précision finalement obtenue. Bien entendu, ces bilans ne sont pas définitifs au stade actuel de développement du projet ; ils peuvent provenir soit de calculs théoriques, soit de mesures sur différentes maquettes représentatives du modèle de vol, soit en général, d'une combinaison des deux. Ils permettent notamment de souligner les points durs technologiques (les résultats décrits ici sont caractéristiques de l'avancement du projet en février 1980, des données complémentaires pourront être fournies lors de l'exposé oral au congrès).

Bien que le projet SPOT soit décrit dans d'autres présentations de ce colloque, il nous paraît nécessaire de rappeler brièvement quelques caractéristiques permettant de bien situer les spécifications et performances que nous allons étudier.

Le système SPOT se compose de deux parties principales, un satellite et un segment sol.

### I.2. Le segment bord

Le satellite peut lui-même être décomposé en deux parties : "la plate-forme multimission", étudiée, comme son nom l'indique, pour pouvoir être utilisée avec diverses charges utiles lors de diverses missions, et la "charge utile" constituée de deux instruments identiques et indépendants, nommés HRV (haute résolution visible). L'orbite nominale est circulaire, quasi-polaire, d'altitude moyenne 822 km, d'inclinaison 98,7°, géosynchrone, l'heure locale au noeud ascendant étant 10h30, le cycle orbital étant de 26 jours. La mise en orbite par le lanceur ARIANE est prévue au premier trimestre 1984.

La plate-forme assure une stabilisation 3 axes du satellite à une précision de 0,15 degré, en position, et  $6.10^{-4}$  degrés/seconde en vitesse.

Les deux HRV indépendants sont munis d'un dispositif nommé MCV (miroir de changement de visée) qui permet de dépointer la direction de visée perpendiculairement à l'orbite par pas de  $0,6^\circ$  dans des limites de  $\pm 26^\circ$ . L'objet de ce dispositif est de permettre d'une part, une accessibilité rapide sur des zones éloignées de la trace au sol du satellite, d'autre part, une mission stéréoscopique. Lorsqu'il est positionné en visée verticale, un HRV permet d'effectuer des prises de vue dans trois bandes spectrales et une bande panchromatique de la manière suivante : la bande panchromatique transmet 6 000 points par lignes, distants de 10 mètres au sol, la distance entre les lignes étant de 10 mètres ; les bandes spectrales transmettent chacune 3 000 points par ligne, distants de 20 mètres au sol, la distance entre les lignes étant de 20 mètres. Les données multispectrales sont transmises sur 8 bits ; les données panchromatiques sont transmises en 6 bits ; elles peuvent correspondre, en fait, à une précision radiométrique soit de 6 bits, soit de 8 bits, par suite de l'emploi d'une technique de compression de données. Les bandes spectrales sont définies, en longueur d'onde, dans les domaines  $[0,50 ; 0,59\mu]$   $[0,61 ; 0,69\mu]$  ;  $[0,79 ; 0,90\mu]$  . La bande panchromatique est définie, en longueur d'onde, dans le domaine  $[0,50 ; 0,90\mu]$ .

Une ligne est enregistrée en bloc par un ensemble de quatre barrettes de 1 728 points montées sur un dispositif nommé DIVOLI (diviseur optique de ligne) qui permet optiquement de découper la ligne image en quatre groupes de 1 500 points enregistrés chacun par une barrette. On obtient ainsi la ligne panchromatique de 6 000 points. La ligne de 3 000 points (à résolution moitié) d'une bande spectrale est obtenue en regroupant électroniquement deux détecteurs adjacents.

La technique des barrettes supprime tout problème mécanique que l'on peut rencontrer avec les systèmes à balayage, mais introduit un nouveau problème lié au fait que deux détecteurs adjacents peuvent avoir des caractéristiques de gain différentes et donc conduire à une image lignée dans le sens de la trace (cet effet existe sur les satellites utilisant plusieurs capteurs : 6 pour LANDSAT, 2 pour METEOSAT, mais ici, le problème change d'échelle, puisque l'on a 3 000 ou 6 000 détecteurs indépendants). Une lampe de calibration à bord permet d'obtenir des données de calibration relative le long de la ligne image. En outre, un système utilisant l'éclairage solaire renvoyé par fibres optiques dans le télescope permet la calibration radiométrique absolue du HRV.

### I.3. Le segment sol

Le segment sol se décompose en deux grands ensembles : le segment sol de contrôle et le segment sol image, coordonnés par un centre de mission, en liaison avec un service utilisateur.

Le segment sol de contrôle comprend :

- les stations de servitude qui émettent les télécommandes, reçoivent la télémesure plate-forme et réalisent les mesures de localisation,
- un centre de contrôle qui traite les données de télémesure reçues, élabore les ordres de télécommandes et exploite les données de localisation afin de restituer et prédire les paramètres d'orbite.

Le segment sol image comprend :

- les stations de réception image, chargées de la réception, de la décommutation et de l'enregistrement des données brutes,
- un ensemble d'archivage qui visualise rapidement les données pour première sélection, extrait les données auxiliaires et génère une archive brute annotée ainsi qu'un film permettant au service utilisateurs d'identifier l'image sur catalogue,
- un ensemble de prétraitement qui réalise des produits de différentes qualités, que nous allons lister,
- un ensemble de dissémination des données obtenues.

Le centre de mission, en liaison avec le service utilisateurs qui centralise les différentes demandes, gère l'ensemble du segment sol : il établit la programmation du satellite en cherchant à maximaliser le service rendu compte tenu de toutes les contraintes et définit les priorités nécessaires.

Le service utilisateurs est l'interface entre utilisateurs et système. Il assure la gestion du catalogue utilisateurs, la commande de produits, la distribution des produits standard du segment sol image, la réalisation de produits spéciaux, et enfin des fonctions de conseil formation, voire développement de systèmes spécialisés.

#### I.4. Les produits

Cet exposé étant consacré à l'analyse de qualité des produits standard délivrés par le segment sol image, nous allons décrire brièvement ces derniers. Ils sont répartis en trois "niveaux"; selon la précision recherchée. Ils correspondent à des images de 60 km x 60 km, découpés selon une certaine grille de référence.

##### - produits de niveau 1 :

les corrections sont effectuées uniquement suivant la ligne d'analyse du paysage. Elles sont radiométriques (calibration relative point à point) et géométriques (correction de la rotation de la Terre, de la courbure de la Terre, de l'altitude, de l'angle de visée de l'instrument et des biais de calage des instruments). Pour être homogène avec la mission accessibilité, le délai de réalisation de ces produits est de 48 h.

Il est envisagé de générer un niveau 1a pour lequel seule la correction radiométrique serait effectuée.

##### - produits de niveau 2 :

Les corrections apportées sont bidimensionnelles. Elles permettent la superposabilité de deux images entre elles dans une projection du type "Space Oblique Mercator" (option 1) ou la superposabilité de l'image avec une carte dans des projections UTM ou LAMBERT ou Stéréoscopique Polaire à la demande (option 2). Ces images sont obtenues par recalage avec un certain nombre de points d'appui repérés dans l'image initiale. Ce niveau de traitement n'est appliqué qu'aux images en visée quasi-verticale (mission couverture systématique).

##### - produits de niveau 3 :

Les corrections apportées sont du même type que précédemment, mais comme

elles s'appliquent ici à des images obtenues avec angle de débattement du miroir ou visée oblique, l'introduction de modèles numériques de terrain, MNT, est nécessaire en vue de l'obtention d'orthophotographie qui, quelque soit la date de prise de vue et l'angle d'observation, pour une même zone géographique fournit des produits superposables pour des analyses diachroniques.

Pour l'ensemble de ces produits, les annotations suivantes seront fournies :

- coordonnées géographiques du centre de la scène,
- indication de la direction du Nord vrai,
- marquage sur le pourtour de la scène des latitudes et longitudes,
- date de la prise de vues,
- identification de l'instrument utilisé, de son mode de fonctionnement (multispectral ou panchromatique) de l'angle de visée par rapport au nadir,
- identification du mode de prétraitement effectué.

Tous ces produits sont fournis sur des supports de format compatible avec ceux utilisés pour LANDSAT D, c'est-à-dire des films 241 mm, des bandes magnétiques HDDT, des bandes CCT. L'objectif est d'obtenir un délai de fourniture inférieur à 48 h pour le prétraitement standard de niveau 1 et à 8 jours pour celui de niveau 2.

Sauf indications contraires, c'est à la qualité radiométrique et géométrique de ces produits, dont nous avons présenté la formation à travers l'ensemble du système, que nous allons maintenant nous intéresser.

## II. LA QUALITE IMAGE RADIOMETRIQUE

### II.1. Introduction

L'étude de la qualité image radiométrique porte sur la précision de restitution de la mesure effectuée par le satellite. La première étape est donc de définir cette mesure. Si  $P(\lambda)$  représente la luminance spectrale du paysage observé ( $\text{W.m}^{-2}.\text{st}^{-1}.\mu^{-1}$ ), nous avons vu que la mesure représentait l'intégration en longueur d'onde de cette fonction entre deux limites données. Mais bien entendu, il n'est pas possible de faire en sorte que toutes les longueurs d'onde à l'intérieur de ces limites soient prises en compte de la même manière, et que les longueurs d'onde extérieures à ces limites soient sans influence. La mesure est donc proportionnelle à une quantité que nous avons nommée "luminance équivalente", définie par :

$$L_k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda$$

où l'indice k représente le canal choisi. Pour donner à L une unité physique, il faut définir l'unité de  $s_k(\lambda)$ . Nous avons choisi de poser :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_k(\lambda) d\lambda = 1$$

$L_k$  est alors exprimé dans la même unité que  $P(\lambda)$  donc en  $\text{w.m}^{-2} \text{st}^{-1}.\mu^{-1}$  c'est une sorte de luminance spectrale moyenne dans le canal choisi. Si l'on préfère, pour un paysage  $P(\lambda)$  quelconque, c'est le paysage de luminance spectrale constante ( $\text{en}\lambda$ ) dans la bande pour lequel le système donnerait la même réponse. L'objet de la mesure étant ainsi défini, on écrira que la sortie  $x_k$  du système est proportionnelle à  $L_k$  :

$$x_k = A_k L_k$$

La constante  $A_k$  ne doit dépendre que de la date de prise de vue.

Les bandes spectrales du type  $[\lambda_1, \lambda_2]$  (ex.  $[0,50 ; 0,59\mu]$  pour le premier canal) sont reliées à  $S(\lambda)$  par l'intermédiaire du centrage d'un gabarit imposé.

Par ailleurs, il est parfois commode de définir une "luminance apparente" dans le canal en le supposant rigoureusement borné à  $[\lambda_1, \lambda_2]$  et de sensibilité constante dans cet intervalle. Cette luminance apparente  $L'$  est donc définie par :

$$L' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda$$

On notera, d'après ce qui précède, que la réponse de l'instrument à un paysage caractérisé par la donnée de  $L'$  n'est pas constante (elle dépend de  $P(\lambda)$ ).

On notera enfin qu'il existe, à bord, un moyen d'amplifier globalement le signal pour adapter au mieux sa dynamique. Si l'on désigne arbitrairement par 1 la valeur du gain nominal, les gains suivants sont réalisables :

0,75 - 1 - 1,3 - 1,6 - 2 - 3 - 4

Les spécifications qui suivent sont données à gain 1.

## II.2. Précision (rapport signal / bruit)

Le système SPOT induit deux types de bruit d'origine bien différente sur les images :

- d'une part, il existe un bruit lié à la nature discrète de la lumière (photons) de statistique Poissonnienne, et un bruit dû aux chaînes électroniques, de statistique Gaussienne. La variance du second est indépendante du signal, de sorte que l'écart - type global est de la forme :

$$\sigma = \sqrt{A^2 + BS}$$

A ces bruits il convient d'ajouter le "bruit de quantification" qui doit être interprété comme une imprécision de mesure : une mesure  $nq$  ( $q$  : pas de quantification) correspond à un signal compris entre  $nq$  et  $(n+1)q$  ; il y a donc une distribution d'erreur, lorsque l'on remonte à l'entrée, équirépartie sur l'intervalle  $[0, q]$ , donc de moyenne  $q/2$  et d'écart-type  $q/\sqrt{12}$ .

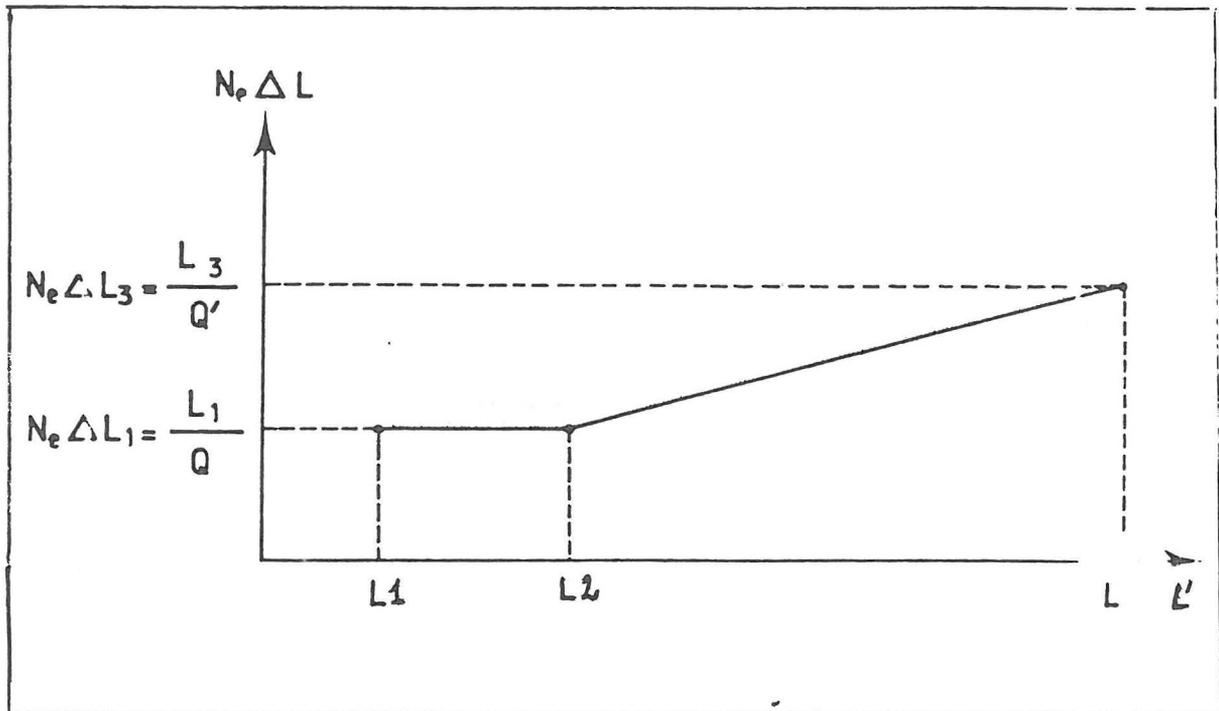
- d'autre part, comme nous l'avons dit, chacun des 3000 ou 6 000 détecteurs qui constituent la ligne image a ses caractéristiques propres de courant d'obscurité et de gain. Ces défauts radiométriques sont bien entendu corrigés au sol ; mais il existe toujours fatalement un résidu qui induit un bruit de "défaut de calibration relative".

Bien entendu, du point de vue de l'utilisateur, il n'y a pas lieu de distinguer ces deux types de bruit (encore que le second soit plus structuré que le premier). Toutefois, dans le souci de pouvoir contrôler dès le départ les deux types de phénomènes, les spécifications ont été établies en faisant la distinction.

Pour cela, on a écrit une spécification sur le bruit en colonne dans l'image brute (dite de niveau 0, qui n'est pas un produit livrable à l'utilisateur). Cette spécification a été calculée de manière à ce que l'écart-type du bruit ramené à l'entrée de l'instrument soit équivalent à une fluctuation de la réflectance du paysage valant  $Ne \Delta \rho = 0,5 \cdot 10^{-2}$ . Pour traduire cela en chiffres caractéristiques du système, il faut faire intervenir des modèles

d'atmosphère tenant compte de l'absorption et de la diffusion de la lumière solaire. Ces modèles ont été développés par le LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique). Il faut, par ailleurs, supposer le signal observé dans les meilleures conditions radiométriques (c'est-à-dire en utilisant les changements de gain) et ramener les valeurs obtenues au gain nominal. Pour réaliser cela de manière concrète, on a fixé un gabarit pour le bruit quadratique moyen à l'aide de 3 valeurs de luminance (du type "luminance apparente", voir § III.3.); en outre, on a fixé une spécification analogue pour les produits de type "Ia", où seules des corrections radiométriques sont appliquées ; la géométrie n'étant pas touchée, les colonnes restent des colonnes. Il s'agit cette fois d'un produit livrable à l'utilisateur.

La figure et le tableau ci-dessous donnent les spécifications.



BANDÉ	L1	C		L2	Q'		L3
	W/M <sup>2</sup> /S <sub>π</sub>	Niv.0	Niv.1	W/M <sup>2</sup> /S <sub>π</sub>	Niv.0	Niv.1	W/M <sup>2</sup> /S <sub>π</sub>
BS1	0,77	10	8,5	16,3	212	200	31,5
BS2	0,32	5	4,2	14,7	230	215	28,4
BS3	0,26	5	3,9	14,2	274	255	28,8
BP (DPCM)	1,67	6	5	64,6	233	220	126,8
BP (6 bits lin.)	1,67	2,4	2,3	64,6	147	144	126,8

On passe de ces spécifications de bruit en colonne aux spécifications générales de bruit pour une surface quelconque d'une image de niveaux I, II ou III en écrivant que le  $Ne\Delta L$  du tableau précédent doit être multiplié par  $(1+\alpha)$ . La constante  $\alpha$  vaut 0,7 mais devra être égale à 0,4 lorsque l'on fait l'estimation sur une petite zone (10 x 10 pixels). L'objet de cette distinction est de ne pas relâcher les contraintes le bruit local (et notamment au li- gnage résiduel) à cause d'effets à basse et moyenne fréquence liés aux variations spatiales du système de calibration relative (lampe interne).

Si l'on étudie les bilans de rapport signal à bruit, on constate les choses suivantes :

— le  $Ne\Delta L$  propre au codeur ( $q/\sqrt{12}$ ) évolue entre 40 % et 70 % de la valeur  $Ne\Delta L_1$  de la figure ci-avant.

— le  $Ne\Delta L$  de l'ensemble détecteur + électronique est assez bien représenté par la formule théorique  $\sqrt{A^2 + B_s}$ . Il évolue entre une valeur de l'ordre de 25 à 40 % du  $Ne\Delta L$  codeur autour de L1 à une valeur de l'ordre de 90 % à 130 % autour de L3.

Il s'ensuit qu'il n'y a aucune difficulté à tenir la spécification de bruit en colonne. (Le lecteur pourra considérer que l'on a, très grossièrement,  $NE\Delta L_3 \approx 2 \times Ne\Delta L_1$ ). La tenue du bilan de niveau 1a ne pose pas de problème lorsque le bilan de niveau 0 est respecté, car il est déduit de ce dernier avec de larges hypothèses sur les effets des troncatures liées au segment sol.

Le contrôle du bilan de bruit global est plus difficile à étudier "sur le papier", car il fait intervenir le résidus de calibration relative, qui dépend de manière très précise des caractéristiques des CCD choisis, de la lampe de calibration, de la méthode utilisée au sol. Une étude expérimentale est nécessaire pour des validations numériques. Toutefois, un calcul mené avec des hypothèses larges tend à montrer que ces spécifications seront bien tenues.

### II.3. Linéarité

Une erreur de non-linéarité dans une image se cumule, théoriquement, du point de vue de l'utilisateur des données, avec le bruit. En effet, l'important est que le rapport des valeurs numériques observées soit égal au rapport des luminances entre les deux points. Toute erreur est donc à reporter, du point de vue de l'utilisateur, dans le bilan global. Toutefois, du point de vue des concepteurs du système, les deux effets ont été découplés dès la spécification générale d'une part, parce que leurs origines sont fort différentes, d'autre part, parce que dans certains cas, il est possible de minimiser l'effet du bruit (calcul de moyennes sur zones homogènes).

Afin de ne pas trop compliquer la spécification, nous avons distingué deux cas :

— le long d'une même colonne (cas du niveau 1a), linéarité (par rapport à la luminance équivalente) pour deux paysages de luminance spectrale quelconque, spatialement homogènes.

— dans une même scène, linéarité entre deux scènes homogènes spatialement et de même luminance spectrale à une constante multiplicative près (pour tous les produits).

La spécification porte sur l'erreur relative quadratique moyenne entre le rapport des luminances à l'entrée de l'instrument et l'estimation qui peut en être faite sur les produits opérationnels. Cette spécification est :

- $10^{-2}$  dans le premier cas
- $0,5 \cdot 10^{-2}$  dans le second cas

En outre, on supposera que les luminances observées sont supérieures ou égales à  $L2/2$  ( $L2$  défini au paragraphe II.2) pour s'affranchir du problème posé par le calcul d'un rapport entre deux quantités trop faibles lorsque celles-ci sont discrétisées.

Ces spécifications sont données par compatibilité avec celles du paragraphe II.2. avec lesquelles, on l'a vu, elles se cumulent en fait. Les bilans montrent que la deuxième spécification concerne directement la linéarité instrumentale, tandis que la première fait intervenir d'autres sources d'erreur (différence entre sensibilité spectrale locale et la fonction spécifiée  $S(\lambda)$ ). Il est très difficile de concevoir un contrôle expérimental de cette spécification, car mesurer des luminances à  $0,5 \cdot 10^{-2}$  est très délicat. On a adopté une méthode indirecte, consistant à vérifier que si  $S1$  et  $S2$  sont deux sources indépendantes éclairant successivement puis simultanément l'appareil, on doit avoir :

$$f(S1 + S2) = f(S1) + f(S2)$$

On peut statistiquement relier l'écart observé sur cette équation à la formulation adoptée pour la spécification. L'expérimentation n'en reste pas moins délicate et l'interprétation des résultats difficile (compte tenu notamment du fait que le critère est statistique alors qu'on ne peut raisonnablement faire qu'un petit nombre d'expériences). Les résultats semblent indiquer que cette spécification est à la limite de ce qui est technologiquement possible, compte tenu de tous les composants (télescope, barrette de détecteurs, électronique d'amplification, conversion analogique-numérique).

II.4. Précision relative entre bandes spectrales, relative multitemporelle, absolue,

La caractéristique de ces opérations est de relier les données numériques à des grandeurs physiques. Cette conversion est réalisée à partir de données auxiliaires fournies en même temps que les données images sur bande magnétique compatible ordinateur.

La précision relative entre bandes spectrales consiste à fournir des coefficients multiplicatifs tels que les données numériques multipliées par ces coefficients soient proportionnelles aux luminances équivalentes du paysage dans les bandes spectrales de l'instrument. Ceci permet à l'utilisateur de recaler les données sur des courbes de luminance spectrale. La précision de cette opération est  $3 \cdot 10^{-2}$ , avec une définition et des restrictions analogues à celles du paragraphe précédent. Pour réaliser ceci, trois méthodes sont en concurrence :

- recaler les données par rapport à la lampe de calibration interne,
- recaler les données par rapport au système de calibration sur le soleil,
- utiliser une calibration sol (supposée invariable en vol).

Les bilans actuels sembleraient indiquer que seule la dernière méthode permet de tenir les spécifications, qui paraissent sévères.

La calibration absolue consiste à calculer la luminance équivalente en unités physiques à l'entrée de l'instrument. On utilise, pour l'élaborer, un dispositif de calibration sur le soleil, dont la luminance spectrale est supposée connue à 5 % près. La spécification pour cette opération est de 10 %. L'incertitude sur le soleil est le principal poste du bilan ; la spécification est assez facile à tenir.

La calibration multitemporelle consiste à calculer le rapport des luminances équivalentes de deux scènes prises à des dates différentes. Ceci ne peut être effectué que par le biais de la calibration absolue. Mais on voit facilement que la luminance solaire, qui sert d'"étalon" en calibration absolue, s'élimine dans cette opération. Il s'ensuit que la spécification, qui est ici de 10 %, est facile à tenir.

L'ensemble de ces spécifications est très important pour les utilisateurs de télédétection par méthodes numériques. Ces derniers ont plutôt tendance à les juger trop lâches (5 % en calibration absolue leur semblerait un bon objectif), cependant que les réalisateurs du système les jugent comme une limite difficile à repousser.

## II.5. Fonction de transfert

La fonction de transfert relative à l'image en sortie de l'instrument ne fait pas l'objet de spécifications impératives compte tenu de la difficulté qu'il y a à maîtriser les barrettes de détecteurs. Un objectif a été affiché : la FTM devrait être supérieure à 0,35 à la fréquence de SHANNON (demi-fréquence d'échantillonnage), compte non tenu de l'effet de filé (celui-ci correspond à la nécessité d'intégrer les charges produites durant le temps d'échantillonnage, ce qui se traduit par un effet de "bougé" le long des colonnes sur la longueur d'un pas d'échantillonnage). Les performances en fonction de transfert sont en général moins bonnes que celles des systèmes à balayage compte tenu de l'emploi de barrettes d'une part, (il y a une certaine interaction entre les détecteurs adjacents), de la haute résolution d'autre part. L'objectif sera donc plus facile à tenir en bandes spectrales qu'en panchromatique, pour lequel les bilans semblent conduire à des valeurs inférieures.

Les essais sont généralement conduits avec des mires rectangulaires (FTM "créneau"). On peut se ramener à la FTM "sinus" à une fréquence donnée par une formule faisant appel aux harmoniques de la FTM créneau, ce qui n'est pas sans poser des problèmes de précision.

Pour compenser les effets de cette FTM plutôt défavorable, surtout pour la bande panchromatique dont l'objectif est plutôt géométrique, il est envisagé au niveau du sol d'effectuer une déconvolution. Celle-ci sera paramétrable (pour pouvoir l'optimiser en fonction de l'aspect des produits opérationnels) ; il existe en outre une spécification sur les "rebondissements radiométriques" visant à limiter ce défaut classique des déconvolutions.

### III. LA QUALITE IMAGE GEOMETRIQUE

#### III.1. Introduction

Le fait de disposer de données discrétisées semble interdire a priori des critères géométriques sur des éléments inférieurs au "pixel". En fait, ceci peut être fait soit directement par des considérations radiométriques, soit par des considérations probabilistes (un repérage conduisant à une probabilité d'erreur nulle de 90 % et une probabilité d'erreur de 1 pixel de 10 % peut légitimement être dits "de précision 0,1 pixel"). Nous n'insisterons pas sur ce point, mais considérerons que l'on peut attribuer un sens à des précisions géométriques de l'ordre du dixième de pixel.

Etudions maintenant les diverses spécifications géométriques du système SPOT. Ces dernières supposent qu'il existe, entre numéros de ligne et de colonne d'une part, et coordonnées géographiques dans le système choisi un couple de relations linéaires. Pour le niveau 1b, il s'agit d'un Space Oblique Mercator adapté, pour les autres niveaux, le système est au choix de l'utilisateur dans une liste limitée.

Les spécifications s'appliquent à des visées latérales, et des scènes de dénivellation limitées (20 mètres pour les niveaux 1 et 2) ou équipées de modèles numériques de terrain connus à 3 m près en niveau 3 (et pour toutes les directions de visée). Bien entendu, les cas non spécifiés peuvent être analysés par des bilans une fois les systèmes bord et sol connus. Ces bilans, à l'heure actuelle, ne sont clairement établis que pour les produits de niveau 1 et certaines spécifications.

#### III.2. Précision de localisation

Pour tout point observé au sol, l'écart quadratique moyen entre position estimée et position réelle devra être inférieur à :

- . 1500 m pour le niveau 1b
- . 50 m pour le niveau 2
- . 5 m (en bande panchromatique) et 10 m (en bandes multispectrales) (niv.3)

Le bilan de niveau 1 fait apparaître les postes d'erreurs suivants :

- . Orbitographie (précision 1000 m max. tangentielle, 500 m dans les autres directions).
- . Attitude (caractéristiques à 3 $\sigma$  données dans l'introduction).
- . Calage du HRV (précision :  $8 \cdot 10^{-4}$  rad. max., stable à  $4 \cdot 10^{-4}$  rad.)
- . Datation (précision : 30 ms max.)

En visée verticale, les trois premières sources d'erreur sont de même ordre de grandeur (500 à 700 m) la quatrième étant bien plus faible. Le bilan global est de l'ordre de la spécification- légèrement plus faible en fait.

En visée oblique, les second et troisième poste croissent, le bilan global est de l'ordre de 1700 m.

### III.3. Altération des longueurs

Pour deux points quelconques observés au sol au cours d'une même image élémentaire, distants de 500 m au moins, l'écart quadratique moyen relatif entre la distance estimée entre ces points et la distance réelle devra être inférieure à  $10^{-2}$  pour les produits de niveau 1b (non spécifié pour les autres niveaux).

Le bilan effectué selon le même découpage que précédemment, fait apparaître une marge importante, le résultat maximum étant de l'ordre de  $8.10^{-4}$ . Il faut noter que ce résultat maximum ne tient pas compte de l'effet de discrétisation de l'image.

### III.4. Anisomorphisme

L'écart quadratique moyen entre les altérations de longueur mesurées autour d'un même point au sol suivant deux directions terrestres orthogonales devra être inférieur en module à  $10^{-3}$  pour des images de niveau 1b (non spécifié pour les autres niveaux). Ici aussi, on suppose que l'on s'est affranchi des effets de discrétisation.

Les bilans montrent que cette spécification semble tenue avec une faible marge.

### III.5. Cohérence locale

Les écarts entre les pas d'échantillonnage réels au sol suivant les deux directions de balayage et les pas d'échantillonnage spécifiés devront être de moyenne nulle et bornée par 0,3 pas d'échantillonnage, ceci dans toutes les bandes et pour tous les niveaux.

Il s'agit là essentiellement d'une spécification sur l'appareil HRV, qui ne pose pas de problème particulier.

### III.6. Superposabilité multispectrale

Un même élément d'image, observé dans les trois bandes spectrales, doit provenir de trois points réels au sol contenus dans un cercle minimal dont le rayon doit être inférieur à 6 m (en moyenne quadratique pour tous les niveaux).

L'écart quadratique moyen entre la position estimée d'un point observé sur une scène multispectrale et la position estimée du même point à partir de l'image panchromatique (dans le même mode de projection) doit être inférieur à 10m pour les produits de niveau 2 et 3.

Il s'agit là essentiellement de spécifications bord liées à l'instrument HRV, qui ne sont pas modifiées par le segment sol tel qu'il est conçu. Elles ne posent pas de problème particulier.

### III.7. Restitution du relief

Les couples stéréoscopiques permettront des précisions de restitution altimétrique par rapport à l'ellipsoïde de référence de 10 m pour l'image panchromatique, et 20 m pour l'image multispectrale (en moyenne quadratique).

Ceci suppose la connaissance des points d'appui dont les 3 coordonnées sont connues par rapport à la même référence avec une précision quadratique moyenne de 3 m. Cette spécification est de contrôle difficile par bilans. Elle a fait l'objet d'une étude de faisabilité et est encore à l'étude.