

## **CORRECTIONS D'ECLAIREMENT ET CALIBRATION ABSOLUE DES IMAGES SPOT; EFFETS DE STEREOADIOMETRIE**

---

Hervé LE MEN

### **I. INTRODUCTION**

La comparaison des radiométries de 2 images saisies à 2 dates différentes, ou de 2 pixels situés dans des positions topographiques différentes sur une même image, doit se faire non pas en terme d'énergie mesurée par le capteur mais en terme de réflectance du sol. En effet, les énergies mesurées dépendent des conditions d'éclairément au sol et ne sont donc pas caractéristiques.

L'éclairément en un point du sol dépend des conditions atmosphériques et de la position du soleil d'une part et de la position topographique du point (pente, exposition...) d'autre part.

La position du soleil et la position topographique du point sont connues, les conditions atmosphériques sont en général inconnues et inaccessibles. La méthode proposée ici essaie d'utiliser la connaissance en tout point du relief pour estimer interactivement l'inconnue atmosphérique

### **II. MODELE ATMOSPHERIQUE**

#### **II.1. Modélisation physique**

Le modèle atmosphérique présenté ici est volontairement simple, voire simpliste. L'objectif étant une estimation interactive, il doit se limiter à un seul paramètre, car l'estimation de plusieurs paramètres serait illusoire.

On modélise l'atmosphère comme un milieu homogène (localement isotrope) et non absorbant. Toute énergie non transmise est donc diffusée. L'indicatrice de diffusion est décomposée de manière simplifiée en 2 hémisphères représentant la diffusion avant et la diffusion arrière. Le rapport entre la diffusion avant et la diffusion arrière dépend de la profondeur optique.

Le sol est considéré comme un diffuseur lambertien (une partie de énergie recue est absorbée, le reste est diffusé de manière isotrope), ce qui est notoirement faux, mais constitue la seule approximation utilisable en l'absence d'autre information.

Notations:

$E_0$  éclairement extra-atmosphérique (constante connue)

$E_i$  éclairement incident au point du sol considéré

$\rho$  réflectance du point

$\rho_m$  réflectance de l'environnement (=réflectance moyenne)

$\theta$  angle zénithal du soleil

$E_p$  éclairement de parcours

$\eta$  coefficient de diffusion avant

$\tau$  profondeur optique de l'atmosphère

$v$  angle de visée

## II.2. Terrain plat

$$\text{Soit } \beta = \exp\left(\frac{\tau}{\cos \theta}\right), \quad \alpha = \int_0^1 x \exp\left(\frac{-\tau}{x}\right) dx$$

$$E_i = \frac{E_0 \cos \theta (\beta + (1-\beta)\eta)}{1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha)}$$

$$E_p = E_0 \cos \theta ((1-\beta)(1-\eta) + \eta(1-\alpha)\rho_m(\beta + (1-\beta)\eta)) / (1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha))$$

$$E_p = \frac{E_0 \cos \theta (1-\beta)(1-\eta) + \eta(1-\alpha)\rho_m(\beta + (1-\beta)\eta)}{(1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha))}$$

$$E = E_p + \rho E_i \exp\left(\frac{-\tau}{\cos v}\right)$$

$$\rho = \frac{(E - E_p) \exp\left(\frac{\tau}{\cos v}\right)}{E_i}$$

## II.3. Influence du relief

Lorsque le terrain n'est pas plat, une partie de éclairement diffus provient non plus de l'atmosphère mais du sol environnant. L'éclairement direct est modifié seulement d'un facteur  $\cos(\theta)$  (soleil, normale). On approxime la partie diffuse, en considérant que tout point voit une demi-sphère ( $4\pi$  stéradians);

cette demi sphère a la luminance atmosphérique pour sa partie au dessus de l'horizontale, et la luminance du sol pour la partie située en dessous.

Si l'on écrit éclairement reçu par le point sous la forme éclairement direct+éclairement diffus), on obtient :

$$\rho = \frac{(E-E_p) \exp \frac{\tau}{\cos V}}{E_i [ (1-D) \cos M / \cos \theta + D (1+\cos N) / 2 + \rho_m (1-\cos N) / 2 ]}$$

avec N : angle entre la normale et la verticale

M : angle entre la normale et la direction du soleil.

D : coefficient de lumière diffuse calculé sur terrain plat

$$= 1 - E_0 \beta \cos \theta / E_i$$

Dans cette expression, tout est maintenant calculé en fonction de  $\tau$ .

### III. MISE EN OEUVRE

Après avoir corrigé géométriquement l'image au niveau 3 (effets géométriques du relief), on dispose d'une image multispectrale (3 canaux) et d'un modèle numérique de terrain au même pas. Ces 2 données sont exactement superposables. Successivement pour chacun des canaux, on va effectuer la correction pour diverses valeurs de  $\tau$ , jusqu'à effacer visuellement l'effet d'ombre. La valeur de  $\tau$  est directement lié à la visibilité au sol (la visibilité diminue quand  $\tau$  augmente), nous utiliserons donc la visibilité qui est un paramètre plus "parlant" que la profondeur optique, ce qui ne change en rien le raisonnement ni le résultat.

Si on sur-estime la visibilité, alors on calculera un éclairement incident sous-évalué sur les parties à l'ombre, et par conséquent on fera une sur-correction qui amènera une image où les parties à l'ombre apparaîtront en plus clair que les parties au soleil. (A la limite, si on prend une atmosphère parfaitement transparente, donc non diffusante, un point à l'ombre ne reçoit aucune lumière ; par conséquent il faut diviser la valeur mesurée en ce point par 0 pour obtenir la réflectance qui sera donc infinie).

Inversement, si on a une atmosphère complètement diffusante, la lumière recue est pratiquement constante en tout point, et la correction effectuée pratiquement nulle: les parties à l'ombre restent sombres comme sur l'image originale.

Entre ces 2 extrêmes, il existe nécessairement une valeur de la visibilité pour laquelle l'effet d'ombre disparaît. En fait, le modèle étant imparfait, la valeur qui efface cet effet d'ombre n'est pas la même partout. On en retire donc seulement un intervalle  $[V_1, V_2]$  de valeurs admissibles.

Cette opération est effectuée pour les 3 canaux.; mais le modèle atmosphérique donne une dépendance entre les longueurs d'onde.

Autrement dit, les seules valeurs de visibilité admissibles sont celles qui sont dans l'intersection de ces 3 intervalles.

En pratique, ceci conduit couramment à une précision de l'ordre du km pour la détermination de la visibilité.

#### IV. CALIBRATION ABSOLUE - VÉRIFICATION AVEC DES MESURES AU SOL

Cette méthode permet une calibration relative pour un canal donné. Le lien entre les 3 canaux nécessite l'utilisation des paramètres de calibration absolue qui permettent de transformer le compte numérique sur les images en énergie et de la comparer à l'énergie solaire extra-atmosphérique. (Ce faisant on effectue une calibration absolue et on obtient une image de réflectance). Ces paramètres sont fournis régulièrement par le CNES.

La comparaison avec des mesures de réflectance au sol, est actuellement réalisée, en collaboration avec l'INA Grignon sur des images de Lorraine (4 images Spot, sur la même zone, prises à des dates et sous des angles différents).

Les causes possibles d'erreur devront être examinées une à une:

- décalages géométriques
- insuffisance du modèle atmosphérique (pas d'absorption ...)
- incertitude dans la détermination de la visibilité
- incertitude dans la détermination des angles de pente du sol.
- insuffisance du modèle d'influence du relief ( influence de l'environnement local)
- incertitude des mesures de terrain
- erreur de manipulation pendant la mise en oeuvre du test
- effet de stéréoradiométrie
- incertitude sur les valeurs des coefficients de calibration fournis par le CNES

#### V. STEREOADIOMETRIE

Nous avons fait l'hypothèse, pour la calibration, que le sol est lambertien. En fait, la réflectance dépend des conditions d'éclairage et de visée et cette dépendance est elle-même variable selon la nature des objets. On peut écrire cette dépendance sous la forme :  $\rho(S,V) = \rho_0 F(S,V)$ . (La fonction de dépendance F dépendant elle-même du corps observé).

Une fois les images calibrées par la méthode précédente, la différence entre deux vues sous des angles différents va mettre en évidence cet effet. Un test a été conduit dans le cadre du programme PEPS en collaboration avec le CNRS (CEPE-Montpellier), sur 2 images saisies respectivement le 2 et le 8 août 1986 avec des angles de visée de 19°2' vers l'Est (oblique) et de 3°6' vers l'Ouest ("verticale") .

Afin d'analyser cet effet, nous avons calculé le rapport des réflectances 100 x "verticale"/"oblique", qui vaudrait 100 pour un corps lambertien. Globalement ce rapport vaut en moyenne 103 dans le vert, 125 dans le rouge et 104 dans l'Infra-rouge, ce qui confirme notre attente, à savoir que la visée "oblique" doit avoir une réflectance plus faible que la visée "verticale", et ce surtout dans le rouge.

Afin d'examiner l'effet de stéréoradiométrie selon la nature des objets, nous avons conduit une classification supervisée sommaire. En résumé les résultats sont les suivants:

- l'eau est un diffuseur plutôt spéculaire; c'est même le seul, aux incertitudes de mesures près.
- pour les autres corps, l'effet de stéréoradiométrie croît en raison inverse de la densité de végétation, pour le vert et le rouge; dans l'infra-rouge, cet effet est très faible mais plus élevé pour les sols nus et la végétation dense que pour la végétation peu dense.

Tout ceci est conforme à note attendue: l'eau se comporte partiellement comme un réflecteur, les autres corps sont en général plutôt des rétro-diffuseurs.

Etant donné la configuration particulière de notre test, l'effet principal peut s'expliquer par un raisonnement simple: si on considère que le sol est composé de 2 types de réflectances lambertiennes ( $r_1$  et  $r_2$ ), la variation du rapport de réflectance devra être proportionnelle à  $r_1 - r_2$ . Deux facteurs macroscopiques interviennent: pour un sol homogène, un effet d'ombre locale de taille faible devant celle du pixel, et pour un sol hétérogène s'ajoute l'effet du aux deux composantes de réflectance. Dans la configuration géométrique de notre essai, ces 2 aspects vont dans le même sens pour le vert et le rouge (réflectance de la végétation inférieure à celle du sol) et dans le sens contraire dans l'infra-rouge. Cette décomposition simpliste permet d'expliquer qualitativement le phénomène observé dans notre cas, mais demande à être confirmé par examen d'images prises sous un plus grand nombre d'angles de visée.

## VI. CONCLUSION

La calibration absolue approchée d'images Spot est réalisable à l'aide d'un modèle numérique de terrain sans mesure particulière de paramètres atmosphériques. Elle doit permettre une amélioration des qualités des raccords de mosaïques d'images, des résultats de classification, et des études multitemporelles.

L'effet de stéréoradiométrie est sensible dans les 3 canaux de Spot, mais surtout dans le rouge où il ne peut pas être négligé lors d'études multitemporelles impliquant des angles de visées différents. Le problème inverse, qui est d'essayer de corriger cet effet pour la comparaison d'images prises sous des angles différents ne semble pas aisément soluble actuellement, ce qui, malheureusement, limite l'intérêt du dépointage pour le suivi temporel précis d'objets peu connus a priori (réflectance bidirectionnelle non modélisable), lorsque les variations de réflectance entre dates ou entre objets sont inférieures à 30%.

Par contre, cet effet qui semble lié principalement à la densité du couvert végétal, pourrait s'expliquer par un effet de "parties vues-parties cachées" et permettrait de donner des informations supplémentaires pour la caractérisation des objets naturels au sol.