L'INTÉGRATION DE L'ESTOMPAGE DANS LES SPATIOCARTES

Jean-Paul DONNAY

I. INTRODUCTION

La technique de fusion discutée ici s'écarte de celles évoquées dans un chapitre précédent, dans la mesure où il s'agit d'effectuer maintenant l'intégration d'une image exogène, qualifiée d'image d'estompage dans la littérature cartographique, dans une spatiocarte. En soi, la technique n'est pas nouvelle : l'estompage est présent dans de nombreuses cartes anciennes, et la fusion numérique de l'estompage avec des images de télédétection a fait l'objet de plusieurs publications (Eyton, 1990; Edwards et Davis, 1994 ; Toutin, 1997). Cependant, il s'agit souvent d'effectuer une fusion entre deux images quantitatives, dont le résultat est visualisé par une variation continue de couleurs (par exemple une image RVB de 24 bits). Cette forme de fusion utilise des algorithmes similaires à ceux présentés dans le chapitre de cet ouvrage relatif aux fusions d'images. Elle peut aussi être rapprochée des modèles d'illumination utilisés en infographie (Foley et al., 1992 ; Salomon, 1999), même si la géométrie de l'image cartographique est plus simple.

La spécificité de la présente application vient de ce que l'estompage doit être intégré dans une image classée, c'est-à-dire exploitant un nombre limité de couleurs utilisées en aplats (images en couleurs indexées généralement sur 8 bits). Les quelques logiciels qui s'efforcent d'effectuer l'opération, appelée parfois « fusion de luminance » (Eastman, 1997), négligent cependant deux aspects essentiels qui conditionnent la qualité des résultats :

- le procédé doit fusionner une image quantitative (l'estompage) avec une image qualitatitve (la spatiocarte classée des modes d'occupation du sol) ;
- l'efficacité de la fusion se mesure pleinement lors de la visualisation tridimensionnelle de l'image classée drapant le modèle numérique de terrain ; or les règles présidant à la vue perspective peuvent interférer avec les spécifications de l' illumination provoquant l'estompage.

L'algorithme présenté ici a fait l'objet d'une première application il y a quelques années (Donnay, 1994) mais il a été affiné depuis lors. Ce chapitre commence par présenter les conditions d'éclairement propres aux images brutes de télédétection, d'une part, et aux modèles d'estompage, d'autre part. Ensuite, le principe de la fusion de l'estompage dans une image classée est discuté, y compris la réalisation de la palette spécifique de couleurs. Plusieurs options de fusion sont aussi présentées. L'adaptation au drapement d'un modèle numérique de terrain par une image classée incorporant l'estompage fait l'objet d'une dernière section.

II. MODÈLES D'ÉCLAIREMENT

A. Éclairement naturel d'une image de télédétection

Les capteurs dits optiques embarqués à bord des satellites sont sensibles à la quantité d'énergie lumineuse réfléchie par la surface terrestre dans une ou plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Dans tous les cas, la seule source d'éclairement de la surface terrestre prise en compte est le rayonnement solaire. Seuls les satellites à défilement, dits aussi à orbite polaire, seront considérés ici (par exemple Landsat, SPOT, etc.). Dans ce cas, la combinaison de l'inclinaison de l'orbite, de l'altitude et de la vitesse du satellite est fixée de telle sorte que la précession de la ligne des nœuds soit égale à 2 [illegible] termes, le satellite est héliosynchrone, c'est-à-dire que le plan de son orbite présente toujours un même angle avec le rayon reliant le Soleil à la Terre sur son orbite propre. Le satellite passe systématiquement au-dessus du même point de la surface terrestre à la même heure, ce qui permet de déterminer précisément la position du Soleil par rapport à ce point, au moment de l'enregistrement de la scène un jour déterminé de [illegible] année.

Cette situation a deux conséquences immédiates sur la radiométrie de l'image enregistrée par le capteur. Tout d'abord, la quantité d'éclairement reçue par une portion de la surface terrestre, telle qu'un pixel, est fonction de la date d'enregistrement (l'heure étant constante pour un point donné), mais aussi du gradient et de l'orientation de la pente de cette portion de territoire. Ces deux paramètres de pente (Fig. 1) correspondent aux angles faits par les projections du vecteur normal au pixel, d'une part avec la verticale du lieu dans le plan vertical contenant ce vecteur, et d'autre part avec la direction du nord dans le plan horizontal de la surface terrestre (assimilée à un plan à l'échelle du pixel). La seconde conséquence vient de ce que l'ombre portée par le relief du territoire est également fonction de la date d'enregistrement

Téléchargé depuis / Downloaded from www.bsglg.be

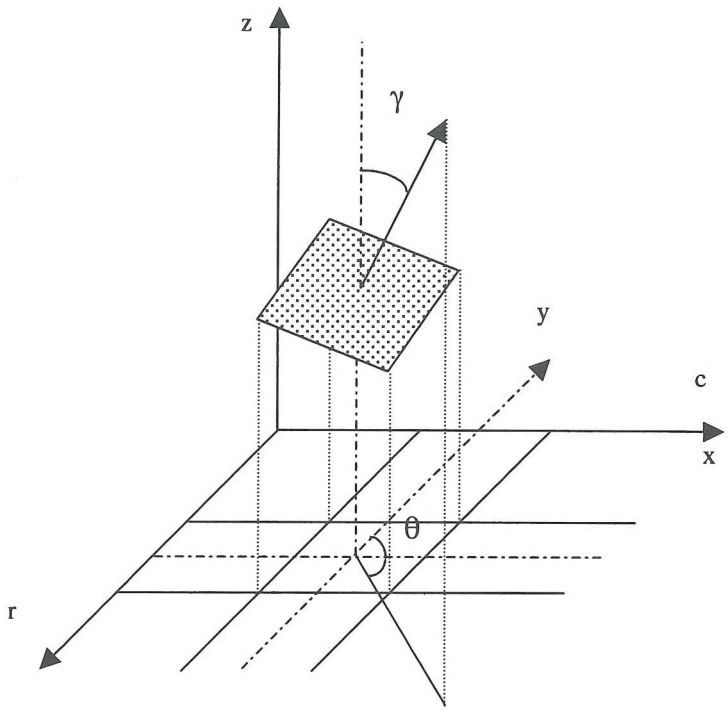


Figure 1. Composante de la pente au niveau du pixel d'une image
r = rangée – c = colonne – γ = gradient – θ = orientation

(hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon), ainsi que des dénivelées du terrain. La variation d'éclairement provoquée par les conditions du terrain (gradient, orientation et dénivelée) et par la date d'enregistrement a fait l'objet de nombreuses analyses afin de corriger la radiométrie des pixels de l'effet du relief (Holben et Justice, 1980 ; Justice et al., 1981 ; Colby, 1991 ; Tahiri, 1991).

Au sein d'une même scène, l'influence de la date sur l'éclairement est identique pour tous les pixels. Par conséquent, la variation d'éclairement entre différentes parties de la scène est uniquement imputable au relief. Ce phénomène est parfaitement perceptible lors de la visualisation d'une composition colorée en couleurs naturelles ou en fausse couleur infrarouge : la luminance varie pour une même affectation au sol selon la morphologie du terrain et l'ombre portée. On peut donc dire que la composition colorée restitue l'effet plastique du relief à travers la variation de luminance des couleurs utilisées. Pourtant, pour une raison physiologique bien connue en photo-interprétation notamment, la perception du relief est inversée pour toutes les scènes où la source lumineuse est située au sud, et plus particulièrement au sud-est. Ceci explique l'inversion de relief caractérisant les compositions colorées couvrant des territoires de l'hémisphère nord (Fig. 2).

Si les compositions colorées admettent une perception (inversée) du modelé du relief en conservant la variation d'éclairement naturel de la scène, il n'en va pas de même avec les images issues d'une classification des modes d'occupation du sol. Dans ce cas, les modalités de la classification, traduites par les comptes numériques des pixels, renvoient à une échelle strictement qualitative (nominale) figurée par une palette comportant un nombre limité de couleurs. Il s'agit typiquement d'une image en couleurs indexées, le plus souvent codée sur un octet (256

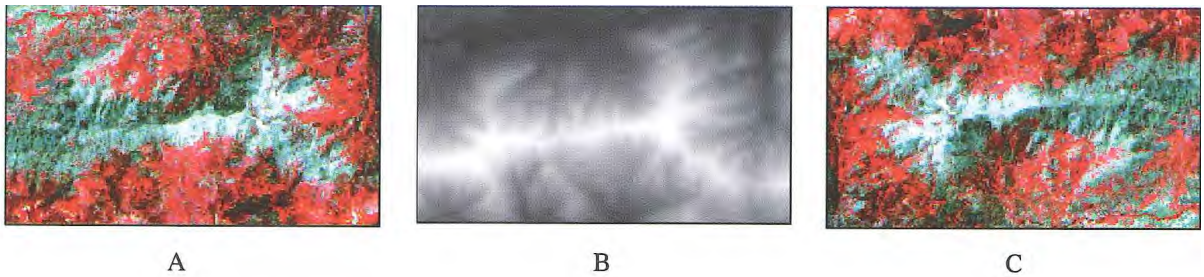


Figure 2. Perception inversée du relief dans une composition colorée (hémisphère nord)
A. Orientation standard. B. Modèle numérique de terrain (sommets en blanc). C. Orientation inversée par simple rotation.

couleurs maximum). Les pixels jointifs présentant la même modalité forment des plages, où s'étendent les couleurs en aplats, et d'où est absente toute notion d'éclairement naturel ou artificiel. Du point de vue de l'interprétation, ceci limite le nombre de points de repère dans l'image et réduit les possibilités de localisation, tandis que du point de vue esthétique, l'image classée perd beaucoup en réalisme, vis-à-vis par exemple d'une composition colorée. Au total, on enregistre donc une perte sérieuse de l'efficacité du message (spatio-) cartographique. On notera dès à présent que, si la perte d'efficacité est déjà sensible dans une visualisation traditionnelle à deux dimensions de l'image classée, la perte d'efficacité est totale si l'on souhaite utiliser l'image classée pour draper un modèle numérique de terrain visualisé en trois dimensions (cf. section V du même chapitre). Il s'ensuit un souhait, dans le premier cas, une nécessité, dans le second, de ré-introduire un effet plastique dans l'image classée.

B. Éclairement artificiel des modèles d'estompage

L'estompage est une technique traditionnelle de cartographie, par laquelle on figure l'effet plastique du relief en éclairant le modèle selon une direction définie et en faisant ainsi apparaître des ombres formant une image monochrome en demi-teintes. On notera qu'à de rares exceptions près, la technique restitue les seules ombres propres, et non les ombres portées. L'estompage n'est pas la seule façon de rendre l'effet plastique du relief — l'usage de hachures constitue un autre exemple (Kanazawa, 1984) — mais ces techniques étaient tombées en désuétude avant l'avènement des modèles numériques de terrain qui en ont facilité la mise en oeuvre (Wheate, 1996).

Selon la direction d'éclairement choisie, on distingue l'estompage de pente, de l'estompage d'ombre (Fig.3). Dans le premier cas, l'éclairement est zénithal. Des pentes de même gradient provoquent le même estompage, quelle que soit leur orientation. Les surfaces planes, par contre, ne sont pas affectées par l'estompage. L'estompage d'ombre est provoqué par un éclairement oblique. Pour éviter la perception d'un relief inversé, on choisit une source d'éclairement située dans le coin supérieur gauche de l'image (gisement de 315°). L'angle d'élévation, quant à lui, est généralement choisi entre 30° et 45°, d'autant plus petit que l'on souhaite provoquer un éclairement rasant, accentuant les contrastes. Comme dans le cas de l'éclairement naturel, on suppose les rayons issus de la source parallèles entre eux (source à l'infini), de sorte que l'estompage est fonction du cosinus de l'angle fait par le vecteur normal au terrain avec le rayon issu de la source. Les pentes les plus assombries sont celles présentant un fort gradient et orientées vers le sud-est, tandis que les surfaces planes sont affectées par l'estompage. Des estompages combinés et des estompages obliques à incidence variable ont aussi été imaginés afin de rendre un modelé plus nature (Keates, 1989 ; Donnay 1995).

Au départ d'un modèle numérique de terrain, avec des paramètres standard d'illumination (45° NW), l'image de l'estompage d'ombre E peut être obtenue par les formules suivantes, appliquées pixel par pixel :

$$\gamma' = \frac{\gamma_x - \gamma_y}{\sqrt{2}}$$

$$E = \frac{1}{2} + \frac{\gamma'}{2} \Big/ \sqrt{\frac{1}{2} + \gamma'^2}$$

avec $E \in [0 - 1]$

où γ_x et γ_y sont les pentes du pixel selon l'abscisse et l'ordonnée, approchées par les sommes pondérées respectivement des colonnes et des lignes précédant et suivant le pixel courant dans une fenêtre de convolution de 3 x 3 pixels (Horn, 1981 cité par Burrough, 1986). De nombreuses variantes sont cependant discutées dans la littérature, en ce compris par exemple la prise en compte des ombres portées du relief (Patterson, 1997 ; Hodgson et Gaile, 1999). Le résultat est le plus souvent exprimé en pourcent (100 % correspondant aux surfaces perpendiculaires

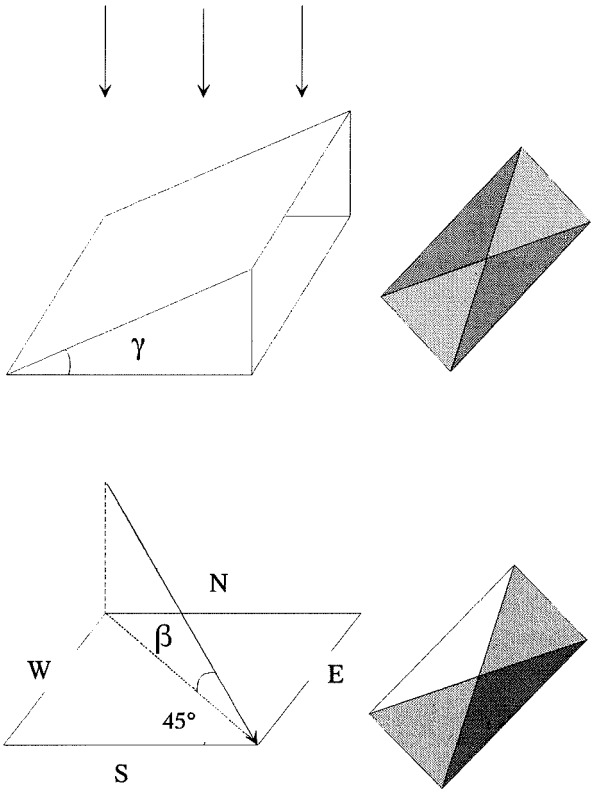


Figure 3. Estompage de pente (en haut) et estompage d'ombre (en bas)
γ : gradient de pente – β : angle d'élévation ∈ [30° - 45°]

aux rayons issus de la source, et 0 % aux surfaces totalement assombries) et les comptes numériques des pixels de l'image d'estompage sont des nombres réels.

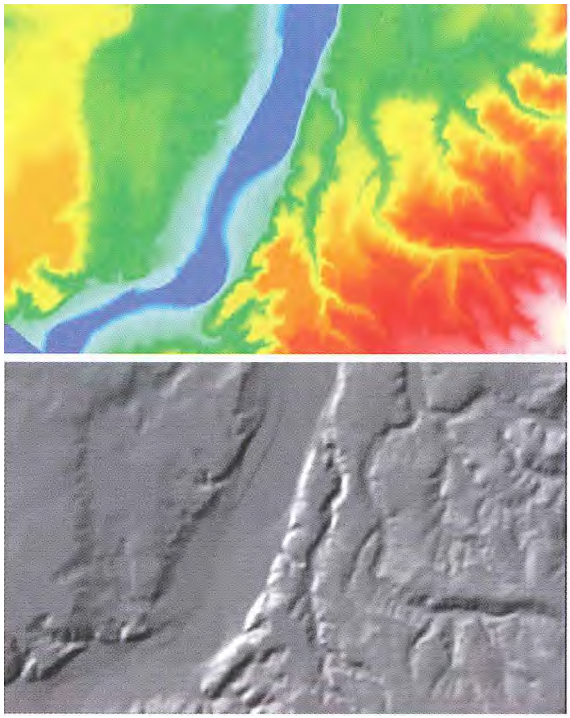


Figure 4. Modèle numérique de terrain et image de l'estompage

III. LE PRINCIPE DE LA FUSION DE L'ESTOMPAGE DANS UNE IMAGE CLASSÉE

A. Conversion RVB - TSI

La variation d'éclairement pouvant se traduire par une variation de luminance des couleurs, on imagine aisément que l'intégration de l'estompage dans une image classée passe par la fusion de l'estompage avec l'intensité des couleurs. Les couleurs de l'image classée étant définies selon le modèle colorimétrique additif RVB, une conversion dans le modèle perceptuel TSI (Teinte, Saturation, Intensité) est requise avant la fusion de l'estompage. Les techniques permettant d'effectuer cette conversion ont été présentées dans un chapitre antérieur. Cependant, le fait que l'image classée soit une image en couleurs indexées implique quelques précautions.

L'image classée n'est pas une image en « vraies couleurs » (RVB 24 bits), par conséquent la conversion vers le modèle TSI ne s'applique pas à l'image elle-même, mais à la palette de couleurs qui lui est associée. Considérons que la palette est constituée d'une table de N lignes, où N vaut le nombre maximum de couleurs définies dans la palette (ainsi $N = 256$ pour une image codée sur un octet) et de 3 colonnes (les composantes R, V et B de chaque couleur codées en entiers). La conversion dans le modèle TSI consiste à créer une nouvelle palette comportant le même nombre de colonnes, mais où ces dernières correspondent aux valeurs de teinte, saturation et intensité de chaque couleur et sont codées en nombres réels. La conversion ne nécessite pas une séparation des couleurs (c'est-à-dire la construction de trois images R, V et B distinctes) et elle est beaucoup plus rapide que si elle était effectuée sur tous les pixels de l'image. À ce stade, les comptes numériques de l'image classée sont inchangés : ils pointent vers les lignes de la palette TSI exactement comme ils indexent les lignes de la palette RVB.

Comme après fusion de l'estompage, il sera nécessaire de ramener l'image dans l'espace colorimétrique RVB, il est indispensable que l'algorithme choisi pour effectuer la conversion soit exempt d'erreurs d'arrondis (voir par exemple Marion, 1997). Il est regrettable de constater que trop de logiciels implémentant la conversion RVB-TSI-RVB n'utilisent que des images 24 bits, tant en RVB qu'en TSI, ce qui introduit toujours une altération lors du retour dans l'espace RVB.

B. Classification de l'estompage

L'image qui résultera de la fusion de l'estompage sera également une image en couleurs indexées. Par conséquent le nombre de couleurs distinctes qu'il est possible d'engendrer par fusion ne peut dépasser le nombre d'entrées de la palette. En d'autres termes, on ne peut envisager autant de variations d'intensité pour chaque couleur que n'en propose le modèle d'estompage. Pour répondre à cette contrainte, la solution la plus simple consiste à classer préalablement l'image d'estompage en un nombre de classes K tel que :

$$KCN$$

où :

- K : nombre de classes de luminance par couleur (identique pour toutes les couleurs) ;
- C : nombre de couleurs effectivement utilisées par l'image classée ;
- N : nombre maximal de couleurs affichées simultanément.

La méthode de classification utilisée doit tenir compte de la distribution des valeurs d'estompage. Si le nombre de pixels est élevé et la distribution proche de la normale, une classification en écarts-types (standardisation) est indiquée. Elle utilise un nombre impair de classes, avec une classe centrée sur la moyenne et des classes extrêmes ouvertes (Fig. 5). L'intervalle des classes est fixé à un demi ou à un écart-type selon le nombre de classes K autorisé sous la contrainte mentionnée ci-dessus.

Les pixels de l'image résultant de la classification de l'estompage ont pour compte numérique le numéro k

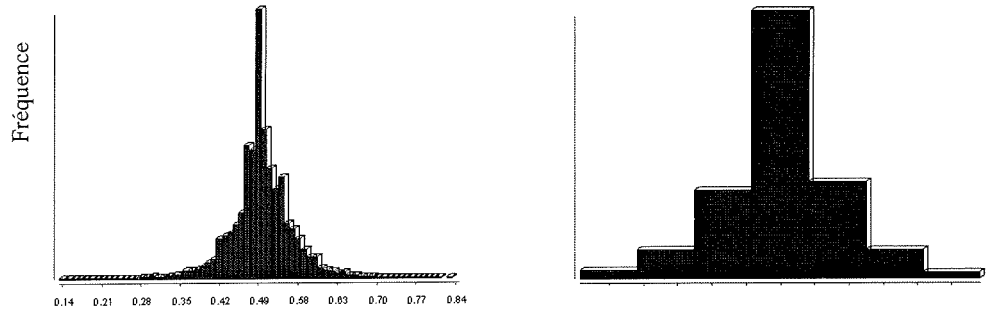


Figure 5. Histogramme de l'image d'estompage (à gauche) et de la classification de l'estompage en 7 classes par standardisation (à droite)

de la classe d'estompage à laquelle ils appartiennent, soit un entier signé compris dans l'intervalle :

$$k \in \left[-\frac{K-1}{2}, +\frac{K-1}{2} \right]$$

Parallèlement, on crée une nouvelle palette TSI admettant cette fois un nombre de couleurs effectivement utilisées égal à [K x C]. À chaque ligne c de la palette originale, correspondent K lignes dans la nouvelle palette, de sorte que la correspondance d'index peut s'écrire :

$$c \Rightarrow c' = K(c-1) + \frac{K+1}{2} + k$$

où :

c : index (numéro de ligne) dans la palette originale, avec $c \in [0, (C-1)]$;

c' : index (numéro de ligne) dans la nouvelle palette TSI, avec $c' \in [0, (KC-1)]$.

Les K lignes de la nouvelle palette TSI présentent des valeurs de teinte et de saturation constantes pour une couleur c de la palette originale, mais une valeur variable d'intensité déterminée par le processus de fusion proprement dit (Fig. 6 et Fig. 7).

Palette RVB originale

#	R	V	B
...	...	...	...
$c-1$	47	7	249
c	114	165	91
$c+1$	253	52	37
...	...	...	...

→

Nouvelle palette TSI

#	T	S	I	
$c'-4$	177	243	$128+3f$	
$c'-3$	72	74	$128-3f$	
$c'-2$	72	74	$128-2f$	
$c'-1$	72	74	$128-1f$	
c'	72	74	$128+0f$	(Intensité inaltérée)
$c'+1$	72	74	$128+1f$	
$c'+2$	72	74	$128+2f$	
$c'+3$	72	74	$128+3f$	
$c'+4$	3	250	$145-3f$	

Figure 6. Exemple de création de la palette TSI
Création de 7 classes ($K = 7$) pour chaque couleur c originale.
kf : facteur d'altération de l'intensité par l'estompage, avec $k \in$ [-3,+3]

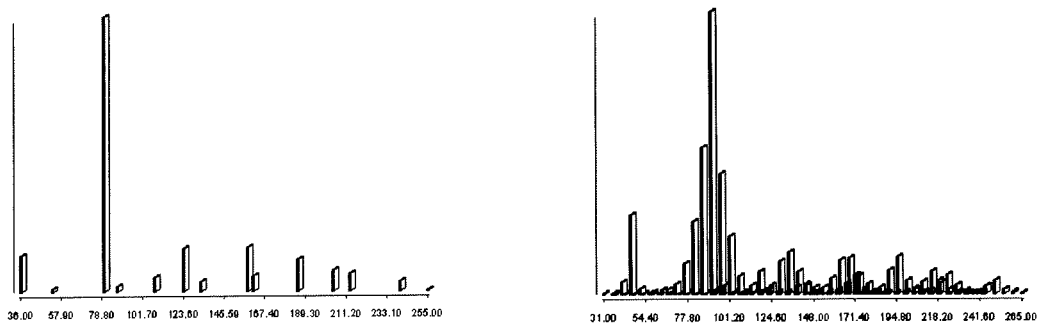


Figure 7. Histogramme de l'intensité de l'image classée, avant (à gauche) et après (à droite) fusion de l'estompage
Les échelles d'abscisse et d'ordonnée de l'histogramme de gauche ont été modifiées pour faciliter la comparaison visuelle avec l'histogramme de droite

C. Assignation des valeurs d'intensité

Le principe de la fusion consiste à modifier la valeur d'intensité de chaque pixel de l'image en fonction de la classe d'estompage à laquelle il appartient, selon la relation :

$$= I + kf$$

où :

I'' : intensité du pixel modifiée par fusion ;
I : intensité originale du pixel ;
k : numéro de classe d'estompage du pixel (entier signé) ;
f : coefficient d'altération des intensités (réel ou entier, positif).

Le coefficient f correspond à la proportion d'intensité ajoutée ou retranchée (selon le signe de k) par une classe d'estompage à l'intensité originale du pixel. Le choix de ce coefficient est arbitraire, mais il dépend de l'intervalle de variation des intensités et est généralement compris, dans la pratique, entre 1 et 5 unités (en % par exemple). Cette transformation appliquée à des couleurs présentant à l'origine une intensité exceptionnellement faible ou élevée risque de faire sortir I' de l'intervalle autorisé ([0 - 100] si l'intervalle est exprimé en %). Dans ce cas, il est nécessaire de tronquer la valeur de l'intensité modifiée au minimum ou au maximum permis par l'intervalle. On constate en outre que lorsque le pixel appartient à la classe moyenne de l'estompage ($k = 0$), l'intensité de sa couleur n'est pas modifiée.

Lorsque le coefficient f est fixé, il est permis de compléter les valeurs d'intensité de la nouvelle palette **TSI** élaborée à l'étape précédente. La mise en oeuvre du processus de fusion se résume alors à la création d'une nouvelle image en couleurs indexées exploitant la nouvelle palette **TSI** (Fig. 8), soit la séquence d'opérations suivantes, appliquée pixel par pixel :

1) Lecture de l'attribut du pixel dans l'image classée des modes d'occupation du sol : c (numéro de couleur dans la palette RGB) ;
2) Lecture de l'attribut du pixel homologue dans l'image classée de l'estompage : k ;
3) Calcul de l'index dans la palette TSI :

$$c' = K(c-1)+[(K+1)/2]+k$$

4) Attribution de l'index c' au pixel homologue de l'image fusionnée.

Enfin, il reste à convertir la palette **TSI** dans l'espace colorimétrique RVB pour permettre une visualisation standard de l'image fusionnée (Fig. 9). Cette conversion de la palette n'affecte évidemment en aucune manière l'image fusionnée proprement dite puisque les numéros d'index sont conservés.

IV. LES OPTIONS DU PROCESSUS DE FUSION

A. Classification locale de l'estompage

Le processus général de fusion de l'estompage présenté à la section précédente peut être raffiné de différentes manières, afin de s'adapter aux conditions du relief et de l'image d'occupation du sol. En ce qui concerne le relief, l'algorithme utilise des statistiques globales de l'image d'estompage afin de classer cette dernière en K catégories. Or, la moyenne et l'écart-type calculés sur toute l'image ne sont pas nécessairement significatifs de l'énergie locale du relief, et la classification grossière de l'estompage risque de faire disparaître des contrastes locaux intéressants.

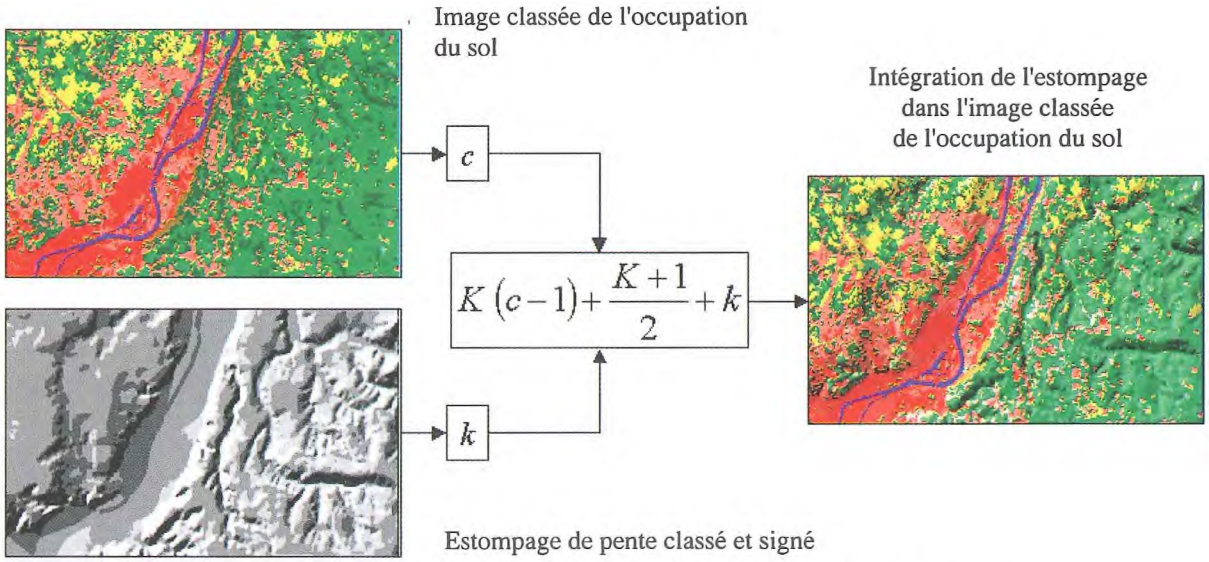
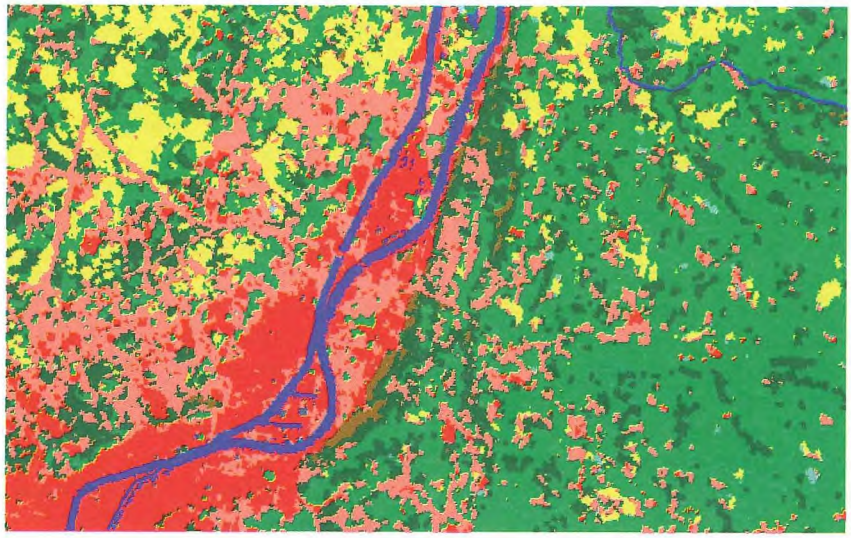
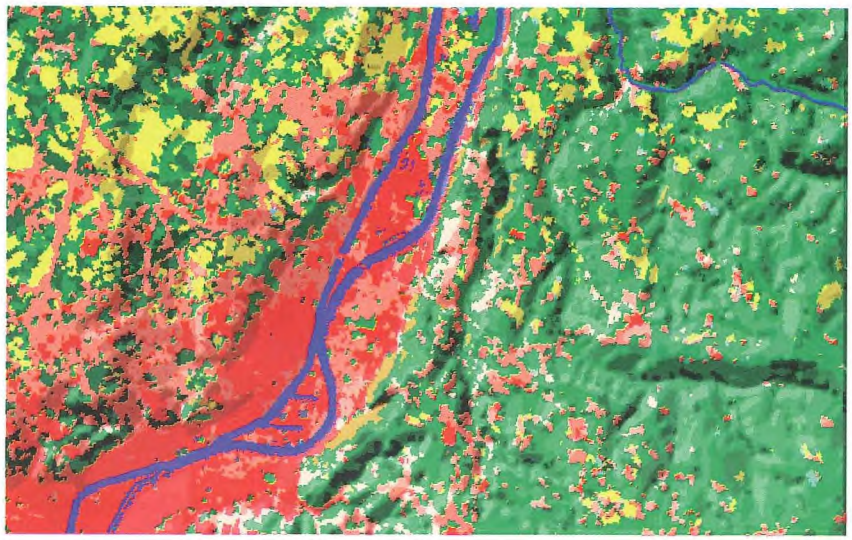


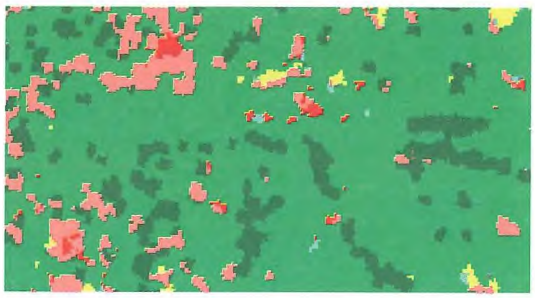
Figure 8. Calcul de l'index des pixels utilisant la nouvelle palette incorporant les classes d'estompage
K, *k* et *c* : voir texte.

A

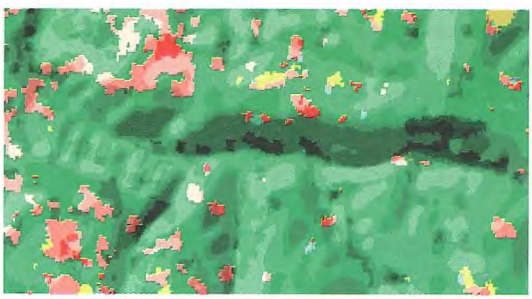


B





C



D

Figure 9. Intégration de l'estompage de pente dans une image d'occupation du sol
A. Image classée avant l'intégration de l'estompage.
B. Image après l'intégration de l'estompage.
C. Extrait de l'image avant l'intégration.
D. Extrait identique, après l'intégration.

Pour conserver l'information locale, la solution courante en traitement d'image consiste à appliquer l'algorithme dans une fenêtre de convolution. Cependant, pour conserver des statistiques cohérentes et éviter des écarts trop importants d'un endroit à l'autre de l'image — ce qui perturberait la perception du modelé du relief — la fenêtre de convolution doit être de grande taille (plusieurs dizaines de pixels de côté). Moyennes et écarts-types sont calculés sur base des valeurs d'estompage des quelques centaines ou milliers de pixels encadrant le pixel courant, et ce dernier est classé dans une classe d'estompage tenant compte de la seule distribution locale des valeurs d'estompage. Il en résulte une image classée de l'estompage qui est exploitée à l'étape (2) du processus de fusion présenté à la section précédente (III.C).

La fenêtre de convolution étant de grande taille, il faut prévoir un traitement différencié des lignes et colonnes entourant l'image d'estompage, là où la fenêtre ne peut s'appliquer dans sa totalité. Deux solutions sont couramment employées :

- soit décaler la position de la fenêtre vis-à-vis du pixel courant (la fenêtre n'est plus centrée sur ce dernier), de sorte que le voisinage soit toujours défini sur un nombre identique de pixels ;
- soit plus simplement recourir aux statistiques globales de l'image pour classer les pixels des lignes et colonnes situées en bordure de l'image.

Il reste que le choix de la taille de la fenêtre est arbitraire et nécessite plusieurs essais avant d'assurer une perception cohérente et suffisamment contrastée du modelé du relief.

Cette classification locale de l'estompage n'est utile que lorsque le relief présente des aspects très différents dans des parties étendues de l'image (par exemple au contact plaine - montagne, ou un plateau incisé par de larges vallées, etc.). À la limite, si une grande partie de l'image est strictement plane (vastes plans d'eau, image côtière), il est nécessaire d'exclure les pixels plans du calcul des statistiques d'estompage. L'opération est aisément réalisée par masquage. La partie de l'image d'estompage conservée après masquage est classée soit de manière globale, soit de manière locale, selon l'allure du relief présent.

B. Estompage différencié par mode d'occupation du sol

Selon le processus standard de fusion d'estompage présenté à la section III, chaque couleur de l'image classée des modes d'occupation du sol est répartie, après fusion, en K classes d'intensité, chaque classe correspondant à un assombrissement ou un éclaircissement par un facteur constant f. Cette solution risque de poser des problèmes si, à l'origine, plusieurs couleurs sont déjà très foncées ou très claires : les premières passeront au noir (intensité nulle) au moindre assombrissement, tandis que les secondes ne pourront présenter un nombre suffisant de paliers d'éclaircissement.

Face à une telle situation, deux solutions sont envisageables, qui toutes deux réduisent l'automatisme de la fusion. La première conserve l'algorithme général de fusion présenté à la section III.C, mais utilise un coefficient f_c variable selon les modes d'occupation du sol. La valeur du facteur est fixée en fonction de l'intensité de la couleur originale, étant d'autant plus petit que l'intensité originale est proche du minimum ou du maximum permis par son intervalle de variation. La modification reste compatible avec une classification tant globale que locale de l'estompage, mais elle requiert une adaptation différente du processus de fusion pour chaque image d'occupation du sol.

La seconde solution consiste à modifier simultanément le nombre de classes d'estompage K_c le coefficient f_c par mode d'occupation du sol. L'intensité de chaque couleur originale (chaque affectation du sol) est dès lors modulée selon les valeurs d'estompage effectivement prises par les pixels relevant de cette affectation. Cela suppose que la conversion entre modèles colorimétriques **RVB** et TSI soit réalisée sur l'image, et non plus seulement sur la palette. Par conséquent cela requiert une séparation préalable de l'image classée des modes d'occupation du sol en trois images R, V et B. La procédure est sensiblement plus lourde puisqu'elle exige une classification des valeurs d'estompage pour chaque type d'occupation du sol et, pratiquement, elle est peu conciliable avec une classification locale. Du point de vue spatial, on peut d'ailleurs considérer que l'adaptation locale de la classification de l'estompage est plus logique que son adaptation par catégorie d'affectations du sol. Du point de vue thématique, pourtant, cette dernière solution peut parfois être justifiée (affectations uniquement présentes sur certains types de pentes). Quoi qu'il en soit, l'approche est sensiblement différente, même si le principe de la fusion consiste toujours à modifier l'intensité des couleurs par des catégories d'estompage. En outre, il faut aussi s'assurer que le nombre total de catégories formées, toutes couleurs confondues, ne dépasse pas le nombre d'entrées permises par la palette de couleurs :

$$\sum_{c=0}^{C} K_c \leq N$$

où :

K_c : nombre de classes de luminance par couleur (différent pour chaque couleur) ;

C : nombre de couleurs effectivement utilisées par l'image classée originale ;

N : nombre maximal de couleurs affichées simultanément.

C. Préservation de certaines affectations du sol

Il est de nombreuses situations où certaines catégories de pixels ne doivent pas être affectées par la fusion de l'estompage. On signalera trois cas fréquemment rencontrés.

- Les plans d'eau : ils devraient normalement être caractérisés par des pentes nulles. Cependant, les méthodes d'interpolation et de rééchantillonnage utilisées pour engendrer le modèle numérique de terrain, et les règles de décision mises en oeuvre par la procédure de classification des modes d'occupation du sol, peuvent conduire à des pentes non nulles au niveau des pixels situés en marge de ces surfaces.
- Les affectations dispersées en pixels isolés ou en plages de taille réduite (par exemple l'habitat dispersé) : la taille réduite des plages, et a fortiori les pixels isolés, ne permettent pas la perception d'une variation continue de l'intensité de leur couleur et, par conséquent, ils tendent à apparaître dans des couleurs distinctes.
- Les affectations disposées de façon linéaire (par exemple le réseau de voirie) : une variation brusque de l'intensité de la couleur peut conduire à la perception de solutions de continuité.

Dans tous les cas, il s'agit de conserver à ces pixels leur couleur originale (y compris l'intensité) dans l'image fusionnée, mais il faut cependant distinguer deux situations. Dans le cas le plus simple, tous les pixels d'une catégorie d'affectation du sol sont concernés. Il suffit de sauvegarder ces pixels dans un masque qui sera superposé à l'image fusionnée (Fig. 10). Le processus de fusion de l'estompage ne portera pas sur la couleur de cette catégorie, mais une entrée sera réservée dans la palette finale, où figureront les valeurs R, V, B de la couleur originale. Les pixels du masque conservant les affectations inaltérées par la fusion auront bien sûr comme attribut le numéro de cette entrée.

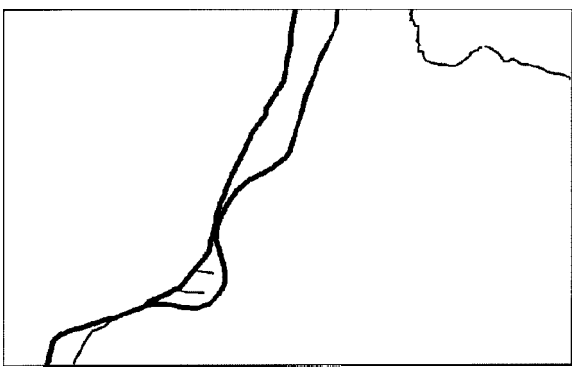


Figure 10. Masque des modes d'affectation en implantation linéaire pour les soustraire au processus de fusion
Ici, les différentes catégories de cours d'eau.

La solution est un peu plus compliquée si la préservation de certains pixels est régie par leur implantation spatiale. Dans ce cas, une partie des pixels relevant d'un mode d'occupation du sol peut être soumise à la fusion de l'estompage (les pixels formant des plages suffisamment étendues), tandis que d'autres pixels de même affectation doivent être maintenus dans leur couleur originale indépendamment de la pente. La séparation sur base de l'implantation spatiale recourt à des fonctions de masquage, de groupement et de tri sur base de la taille des plages constituées. Contrairement au cas précédent, la couleur de l'affectation en question est soumise au processus de fusion (étalement en K classes distinctes d'intensité), et l'attribut des pixels inchangés conservés dans le masque doit pointer vers la classe centrale d'intensité dont l'indice est fixé par $K(c-1) + [(K+1)I$ 2 selon les notations de la section III.

V. ADAPTATION AU DRAPEMENT D'UN MNT

A. Principes de la vue perspective d'un MNT

En théorie, un modèle numérique de terrain devrait pouvoir être considéré comme une surface tridimensionnelle et soumis aux procédures de visualisation 3D. Pourtant, dans la pratique, on ne dispose que d'une valeur d'altitude pour chacun des points d'un territoire limité en extension. Par conséquent, le modèle numérique d'élévation (altitude sans les hauteurs hors sol) est formé par une grille (mode vecteur) ou une image (mode image) à deux dimensions. Les altitudes sont portées par les sommets de la grille ou les pixels de l'image, comme des attributs exprimés dans une unité distincte (au moins en ordre de grandeur) de celle du plan. Les conditions réelles du mode tridimensionnel ne sont pas rencontrées et les procédures de visualisation appliquées à ce mode, souvent qualifié de 2,5D, en sont affectées.

Deux types de vues perspectives sont communément retenues pour mettre en évidence les variations d'altitude d'un territoire (Fig. 11). La perspective axonométrique, ou orthographique, rejette les deux points de fuite à l'infini, de sorte que, pris deux à deux, les côtés du MNT, de forme rectangulaire à l'origine, restent parallèles entre eux et conservent la même échelle après la mise en perspective. L'intérêt pratique, outre la facilité de calcul, est de conserver la possibilité d'effectuer facilement des mesures sur l'image mise en perspective, mais cela se fait au détriment de la perception correcte du relief. Inversement, la véritable vue perspective est plus spectaculaire, mais elle demande de situer précisément les deux points de fuite. Dans l'un et l'autre cas, les paramètres requis pour mettre le modèle en perspective, outre le type de perspective proprement dit, ont pour objectif de situer l'observateur vis-à-vis

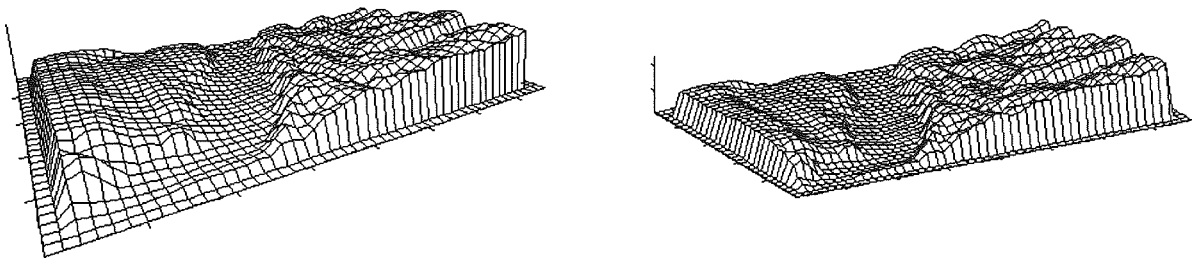


Figure 11. Vue perspective à deux points de fuite (à gauche) et axonométrique (à droite) du MNT

du MNT. Celui-ci ne constituant pas une véritable surface tridimensionnelle, plusieurs solutions sont possibles. Pourtant, il faudra toujours définir un angle de rotation du plan du MNT autour de l'axe vertical (axe des altitudes), au départ d'un centre de rotation fixé soit au centre, soit à l'un des coins du modèle. Cette rotation se traduit par une désorientation géographique de l'image. Les autres paramètres tels que l'angle d'élévation du point de vue au-dessus du modèle, la distance de l'observateur au modèle ou l'exagération des hauteurs, n'interfèrent pas avec la problématique envisagée dans ce chapitre.

La vue en perspective du MNT projette dans le plan de visualisation les lignes et/ou colonnes de la grille, ou les profils passant par les centres des pixels. La procédure peut être totalement vectorielle, mais généralement elle utilise tant des techniques vectorielles (projection) que des techniques matricielles (élimination des lignes cachées).

B. Drapement du MNT

Le drapement consiste à dessiner les profils de la vue perspective du MNT en utilisant, pour chaque segment ou chaque carreau entre quatre segments, la couleur des pixels homologues d'une image géographiquement superposable au MNT. Il est tentant de draper le MNT en perspective par toute une série d'images : carte scannée, image de l'occupation du sol, composition colorée, image de l'estompage, etc. Pourtant, toutes les images ne s'y prêtent pas sans une préparation spécifique. Seule, l'image des altitudes visualisées sous la forme de teintes hypsométriques parvient à maintenir une perception correcte, quoique réduite, du modelé du relief, et ce grâce à la disposition ordonnée des teintes en plages homogènes entre les courbes de niveau.

Les compositions colorées d'images satellite et les images d'estompage sont susceptibles d'effets spectaculaires pour autant que la géométrie de la vue perspective du MNT n'interfère pas avec l'illumination de l'image utilisée pour le drapement. Dans le cas d'une composition colorée, le MNT en perspective devrait être soumis à une rotation telle que la position présumée du Soleil au jour et à l'heure de l'enregistrement des images satellite soit située dans le coin supérieur gauche de l'image perspective. Cette désorientation est facilement effectuée au moment de la construction de la vue perspective, en jouant sur le paramètre de rotation du plan du MNT autour de l'axe des altitudes. Dans le cas d'un drapement par une image d'estompage, c'est cette dernière qui doit être conçue en fonction de la visualisation perspective. L'angle d'illumination engendrant l'estompage est généralement fixé à 315° lors d'une visualisation standard à deux dimensions (cf. § II.B.). Pour le drapement du MNT en perspective, on ajoutera ou retranchera à cet angle, l'angle de rotation du plan du MNT autour de l'axe des altitudes (Fig. 12). Il est également possible de tenir compte de l'angle d'élévation de l'observateur de la vue perspective pour fixer l'angle d'élévation de la source lumineuse éclairant l'image d'estompage, mais ici la relation n'est pas déterminante puisqu'elle ne fait que renforcer ou réduire l'effet de lumière rasante sur le MNT.

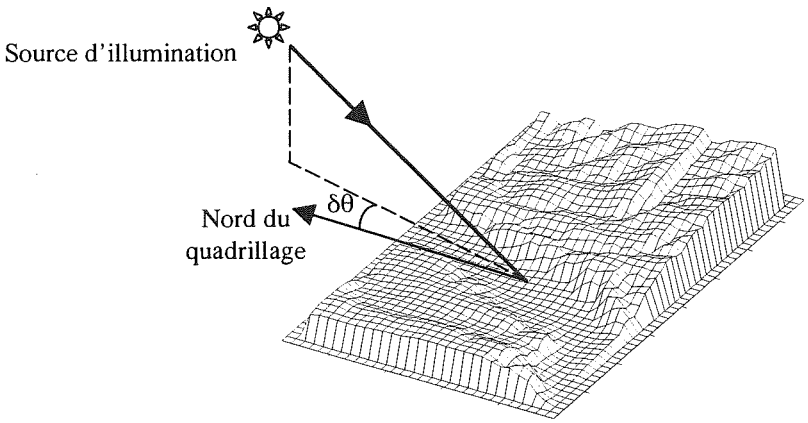
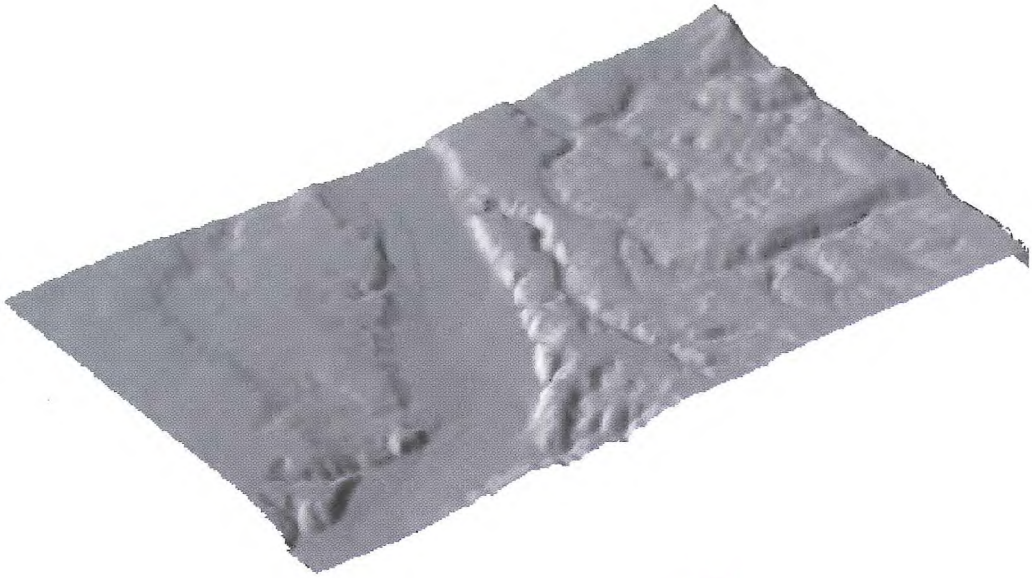


Figure 12. Écart δθ entre la désorientation géographique et l'angle d'illumination du MNT

A



B

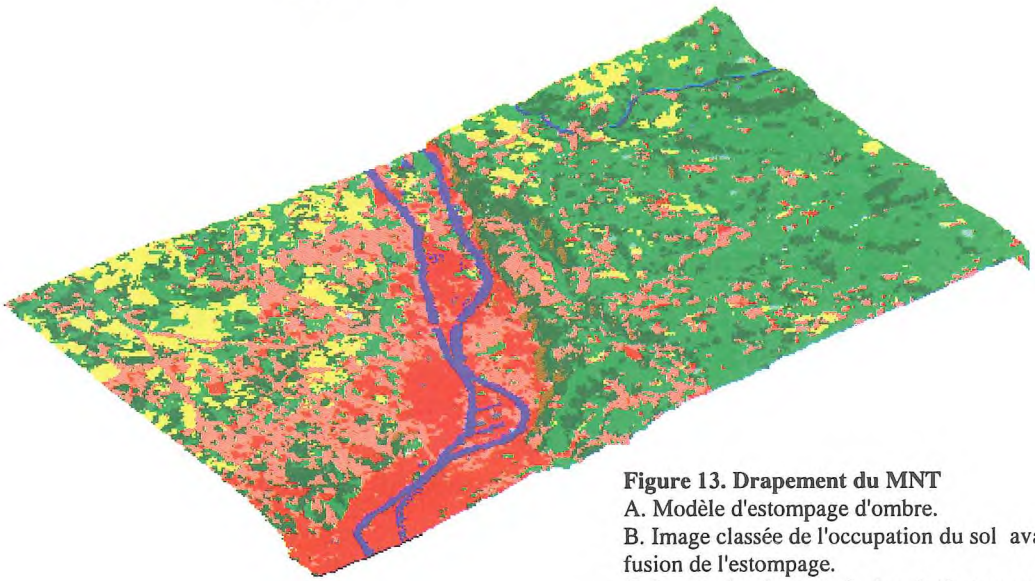
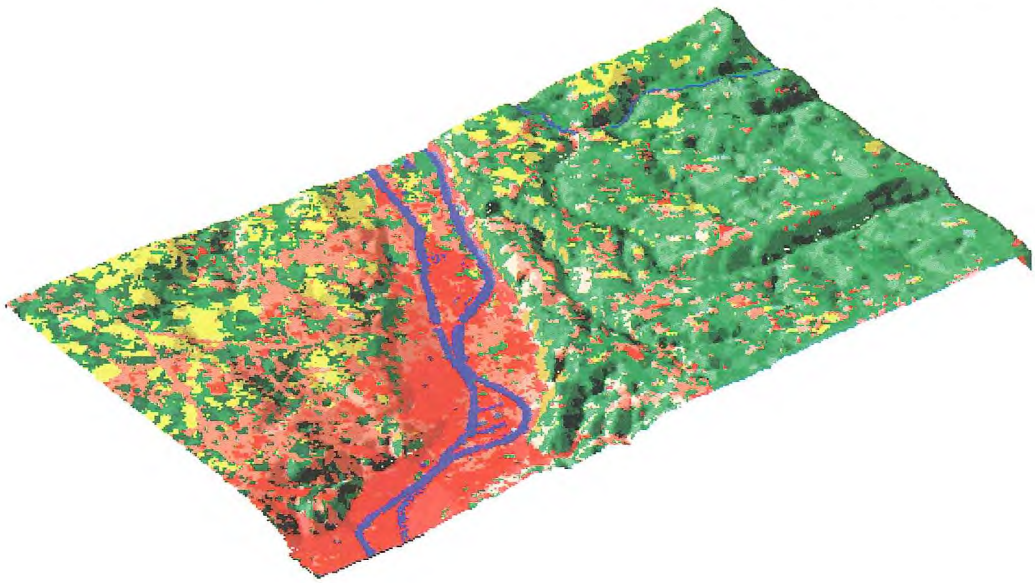


Figure 13. Drapement du MNT
A. Modèle d'estompage d'ombre.
B. Image classée de l'occupation du sol avant fusion de l'estompage.
C. Image classée après fusion de l'estompage.

C



Le drapement du MNT par une image formée par des aplats de couleurs sur de grandes étendues, telles que l'image de l'occupation du sol, a pour conséquence la perte de la perception du relief. Les profils successifs ou les carreaux voisins du MNT étant figurés dans une même couleur, leur allure ne sera plus visible en perspective et la perception du modelé du relief disparaît complètement (Fig. 13 B). Des techniques élémentaires ont été imaginées pour contrer cet effet :

- l'échantillonnage de profils du MNT à pas constant, maintenus écartés les uns des autres dans la vue perspective ;
- l'incrustation avant drapement d'une grille en couleur vive ou en noir, dans l'image utilisée pour draper le MNT.

Ces solutions font perdre une partie importante de l'information de l'image drapée et provoquent une visualisation peu réaliste. La seule solution efficace consiste à fusionner l'image utilisée pour le drapement avec une image d'estompage. Pour engendrer cette dernière, on tiendra compte des paramètres d'orientation propres à la vue perspective, comme exposé au paragraphe précédent (Fig. 13 C).

CONCLUSION

Le processus de fusion d'une image classée de l'occupation du sol avec une image de l'estompage restitue une information sur le relief du territoire, procurant un effet plastique réaliste sur les visualisations en deux dimensions, et indispensable à la perception du relief dans les vues perspectives drapées.

Les méthodes de fusion d'images proposées par plusieurs logiciels s'avèrent mal adaptées au cas présent, où une image qualitative (les modes d'occupation du sol) doit intégrer l'information issue d'une image quantitative (l'estompage). Des traitements effectués par défaut (amélioration de contraste automatique) ou des imprécisions dans les résultats de traitements (conversions RVB-TSI-RVB) empêchent une opération de fusion correcte. De plus, ces traitements n'exploitent pas les facilités offertes par la disponibilité d'une image en couleurs indexées et de sa palette de couleurs.

La méthode décrite ici utilise une combinaison de fonctions élémentaires du traitement d'image, rendant possible l'automatisation totale du processus de fusion. En outre, les traitements les plus complexes sont appliqués aux seules palettes de couleurs, ce qui ne pénalise pas le temps de traitement. Plusieurs options peuvent enfin être sélectionnées de manière à adapter la fusion au relief local du territoire couvert par l'image, et à la nature des modes d'affectation du sol.

BIBLIOGRAPHIE

BURROUGH P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press, Oxford.

COLBY J.D. 1991. Topographic Normalization in Rugged Terrain. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , 57(5), 531-537.

DE BETHUNE S., MULLER F. & DONNAY J.P., 1998. Fusion of Multispectral and Panchromatic Images by Local Mean and Variance Matching Filtering Techniques. Proceedings of the conference Fusion of Earth Data (Ranchin T. & L. Wald, Éds), Sophia-Antipolis, 31-36.

DONNAY J-P., 1994. Spatio-carte des affectations du sol réhaussées d'estompage. *Dessine-moi une carte... quelques explorations cartographiques pour Sylvie Rimbert,* Presses Universitaires de Strasbourg, 68-69.

DONNAY J-P., 1995. *Cartographie topographique.* Série SURFACES, 1, Université de Liège, Liège.

EASTMAN J.R. 1997. Illuminate function. *Idrisi for Windows Modules* (Eastman J.R., Éd.). Clark University, 5-7.

EDWARDS K. & DAVIS P., 1994. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Producing Color Shaded-Relief Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 60(11),* 1369-1374.

EYTON J.R., 1990. Color stereoscopic effect cartography. *Cartographica,* 27-1, 20-29.

FOLEY J.D., VAN DAM A., FEINER S.K. & HUGHES J.F., 1992. *Computer Graphics. Principles and Practice.* Addison-Wesley, Reading (Mass).

HODGSON M.E. & GAILE G.L., 1999. A Cartographic Modeling Approach of Surface Orienation-Related Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,* 65-1, 85-95.

HOLBEN B.N & JUSTICE C.O., 1980. The topographic effects on spectral response from nadir pointing sensors. *Photogrammetric.Engineering.& Remote Sensing,* 46(9), 1191-1200.

HORN B.K., 1981. Hill shading and reflectance map. *Proceedings of IEEE,* 69(1), 14-47.

JUSTICE, C.O., WHARTON S. & HOLBEN B.N., 1981. Using digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. International *Journal of Remote Sensing,* 2(3), 213-230

KANAZAWA K., 1984. Techniques of map drawing and lettering. *Basic Cartography for students and technicians, Vol. 1,* International Cartographic Association, 112-180.

KEATES J.S., 1989. *Cartographic Design and Production.* Harlow, Londres.

MARION A., 1997. *Acquisition et visualisation des images.* Eyrolles, Paris.

PATTERSON T., 1997. A desktop approach to shaded

relief production. *Cartographic Perspectives,* 28 ; voir aussi http://nacis.org/cp/cp28/relief_tp.html

SALOMON D. 1999. *Computer Graphics & Geometric Modeling.* Springer, New York.

TAHIRI D. , 1991. *Interaction des facteurs topographiques sur l'interprétation des images satellitaires : application à la région de Zoumi (Maroc).* Mémoire d'ingénieur agronome, Université Catholique de Louvain, inédit.

TOUTIN T., 1997. Qualitative Aspects of Chromo-Stereoscopy for Depth Perception. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,* 63-2, 93-103.

WHEATE R. 1996. Re-examining the Cartographie Depiction of Topography. *Cartographic Design : Theoretical and Practical Aspects* (Wood C.H. & C.P. Keller, Éds), Wiley, Chichester, 147-155.