Télédétection, 2006, vol. 6, n° 3, p. 233-246
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

TECHNIQUE DE CLONAGE DE PIXELS POUR L'ANALYSE D'OBJETS DE FAIBLE SURFACE À L'AIDE D'UNE IMAGE SATELLITAIRE À MOYENNE RÉSOLUTION SPATIALE : APPLICATION AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN DE LA VALLÉE DE LA PRAHOVA (ROUMANIE)

Abdelkader ABDELLAOUI [1], Nadjia BENBLIDIA [2], Ileana G. PATRU [3], Mihai IELENICZ [3] et André OZER [4]

[1] *Département de géographie, UFR Lettres et Sciences Humaines,*
Université de Paris 12 Val-de-Marne,
61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France.
Téléphone : (33) 1 45 17 11 34 ; courriel : abdellaoui@univ-paris12.fr

[2] *Département d'électronique, Université Saad Dahlab,*
B.P. 270, route de Soumâa, Blida, Algérie.
Téléphone : (213) 25 43 36 33 ; courriel : benblidia@yahoo.com

[3] *Faculté de géographie, Université de Bucarest,*
B-dul Nicolae Balcescu Nr. 1 70 111 Bucuresti, Sector 1, Roumanie.
Téléphone : (40) 21 312 33 74 ; courriel : ileanageorgeta@yahoo.com

[4] *Institut de géologie, Université de Liège,*
Bat B18, Sart Tilman, 4000 Liège, Belgique.
Téléphone : (32) 43 66 54 46 ; courriel : aozer@ulg.ac.be

Soumis le 21 novembre 2005 ; révisé le 3 mars 2006 ; accepté le 29 novembre 2006

Jusqu'à ces dernières années, l'imagerie à faible et à moyenne résolution est utilisée pour la localisation ou le suivi d'objets de grande surface (suivi de la végétation, phénomènes d'érosion, environnements urbains, etc.). Les objets de faible surface (de l'ordre de quelques pixels, voire quelques dizaines de pixels) n'ont pas fait l'objet d'études basées sur des traitements et sur l'interprétation de l'image satellitaire. Pourtant, des anomalies particulières dans un contexte spécifique (foyer d'incendie, par exemple) peuvent être discernées même si elles n'occupent que l'espace de quelques pixels dans une image de faible résolution. Dans cet article, on montre qu'il est possible d'utiliser des images de TM de Landsat ou de HRV de SPOT, moyennant des traitements spécifiques, pour l'étude d'objets de faible surface. La méthode utilisée consiste à reproduire à l'identique, en fonction d'un facteur de reproduction adéquat, chaque pixel de la zone d'étude. Ce clonage permet de dilater la zone d'étude sans passer par une opération d'agrandissement conventionnelle et permet ainsi de contourner la sensation de pixellisation.

Mots clefs **:** glissement de terrain ; image satellitaire ; objet de faible surface ; Roumanie

PIXEL CLONING TECHNIQUE FOR THE ANALYSIS OF SMALL SURFACE OBJECTS USING MEDIUM SPACE RESOLUTION SATELLITE IMAGERY : APPLICATION TO THE PRAHOVA VALLEY (ROMANIA) LANDSLIDES

During the last few years, low and medium resolution satellite imagery has been used for the localization or the follow-up of large area phenomena (vegetation monitoring, erosion phenomena, urban environments, etc.). Small area phenomena (a few pixels, even a few dozen pixels) have not been the subject of studies based on the processing and interpretation of satellite images. However, particular anomalies in a specific context (fire sites, for example) can be distinguished even if they occupy the space of only a few pixels in a low resolution image. We show in this paper that it is possible to use Landsat TM or SPOT HRV images, after applying specific processing procedures, for the study of small area phenomena. The method used consists in reproducing identically, using an adequate factor of reproduction, each pixel of the study zone; this cloning makes it possible to dilate the study zone without using a conventional zoom operation and thus makes it possible to circumvent the sensation of pixellization.

Key words : landslides ; satellite imagery ; small area objects ; Romania

1. INTRODUCTION

De nombreux objets naturels sont de faible surface relativement à l'échelle de l'imagerie satellitaire. Les glissements de terrain par exemple peuvent avoir une superficie d'une dizaine de mètres de largeur, soit à peine un pixel d'une image à moyenne résolution spatiale. Si l'objet est de plus grande surface, le terrain est très désorganisé et il devient alors difficile de mettre en évidence un ensemble suffisamment uniforme de pixels pour le rendre observable. Les bordures des environnements urbains présentent souvent ce même aspect d'hétérogénéité, rendant délicate l'appréciation du tissu urbain périphérique par l'imagerie satellitaire à moyenne et à faible résolution. C'est ainsi que, jusqu'à ces dernières années, ces catégories d'images sont essentiellement utilisées pour l'étude d'objets de grande étendue (végétation, phénomènes d'érosion, environnements urbains, etc.), dont on trouve des exemples dans Achard (1989), Courault et Girard (1988), Lenco (1996), Escadafal *et al.* (1994), Haboudane *et al.* (2002) et Chikaoui *et al.* (2004). Les objets de faible étendue (de l'ordre de quelques pixels, voire de quelques dizaines de pixels) n'ont pas fait l'objet d'étude basée sur le traitement et l'interprétation d'images satellitaires. Pourtant, des anomalies particulières dans un contexte spécifique (les foyers d'incendie, par exemple) peuvent être discernées même si elles n'occupent que l'espace de quelques pixels dans une image à faible résolution (Li *et al.*, 1997). De plus, la compréhension des objets naturels exige souvent d'en connaître une description à différentes dates dans le passé pour lesquelles seule l'imagerie satellitaire à faible ou moyenne résolution est disponible.

Au delà des méthodes d'amélioration (étirements, ACP) ou d'extraction thématique (indices spécifiques, classifications, etc.), un agrandissement peut s'avérer nécessaire et utile pour accéder à des détails peu visibles dans l'image originale. De façon générale, il existe différents contextes d'agrandissement en fonction de la catégorie d'image à traiter (images binaires, en niveaux de gris et en couleurs). La méthode d'agrandissement diffère alors.

Parmi les méthodes d'agrandissement, les méthodes de préservation fréquentielle se réalisent à l'aide d'une interpolation de l'image initiale en exploitant le théorème de Shannon (1948, 1949). Ces méthodes sont basées sur l'hypothèse que l'acquisition de l'image numérique à agrandir est réalisée avec une fréquence d'échantillonnage deux fois supérieure à la plus haute fréquence contenue dans l'image continue (fréquence de Nyquist). L'image agrandie à l'aide de cette dernière méthode présente un effet d'ondulation visuellement gênant (Calle, 1999). De plus, cette méthode exige l'utilisation d'une transformée de Fourier directe pour obtenir le spectre fréquentiel et pouvoir introduire les zéros, puis une transformée de Fourier inverse, pour obtenir le résultat de l'agrandissement. De nombreuses autres méthodes sont proposées pour diminuer l'effet d'ondulation et la complexité des algorithmes ; la transformée B-splyne en est un exemple (Hou and Andrews, 1978 ; Unser *et al.*, 1991). Les méthodes d'agrandissement par préservation fréquentielle sont adaptées lorsque les conditions du théorème de Shannon sont vérifiées ; c'est rarement le cas pour des images naturelles et donc des images satellitaires. Dans ces cas, il faut utiliser des méthodes de préservation structurelles en introduisant de nouvelles fréquences au plan des contours. Ces méthodes sont ainsi peu utilisables pour des images satellitaires car les principaux logiciels dédiés à cette imagerie ne comportent pas de modules utilisant ces méthodes.

Dans cet article, on montre qu'il est possible, pour l'étude d'objets de faible surface, d'utiliser un algorithme de clonage dont l'objectif est de simuler l'amplification de la surface d'un objet localisé (donc de sa réponse relative) et, ainsi, de le rendre plus observable.

Cet algorithme a été appliqué à des images de TM de Landsat et de HRV de SPOT acquises dans le cadre d'un Projet de recherche partagée du Réseau thématique de télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie entre les universités de Paris 12, de Bucarest et de Liège. Les résultats sont présentés ici pour l'image HRV de la vallée de la Prahova, en Roumanie.

2. PERCEPTION D'UN ÉLÉMENT DE PAYSAGE À PARTIR D'UNE IMAGE SATELLITAIRE

2.1. Présentation

Rappelons qu'une image satellitaire est constituée d'une série de bandes et que chaque bande est, en réalité, une vue du territoire imagé dans un intervalle spécifique du spectre électromagnétique. Toutes les bandes d'une même image concernent le même territoire vu au même moment. Chaque bande est également constituée d'un ensemble de pixels, réponse d'une portion élémentaire (élément) du territoire à l'excitation du rayonnement solaire. La taille d'un tel élément dépend, entre autres, de deux facteurs principaux : les propriétés optiques du capteur et la distance terrain-capteur. La réponse enregistrée par le capteur est une combinaison des réponses des divers constituants du pixel. Plus le nombre de ces constituants est élevé, plus cette réponse s'éloigne de celle d'un objet géographique « pur ». Enfin, plus un constituant a une réponse propre élevée, plus la réponse du pixel tend vers celle de ce constituant.

Ainsi la réponse $\boldsymbol{R}$ d'un pixel hétérogène (figure 1) constitué de N éléments sera de la forme :

$$R=\sum_{i=1}^{N} R_i.S_i \qquad (1)$$

où R_i et S_i représentent respectivement la réponse énergétique et la surface relative d'un élément constituant (i) du pixel considéré.

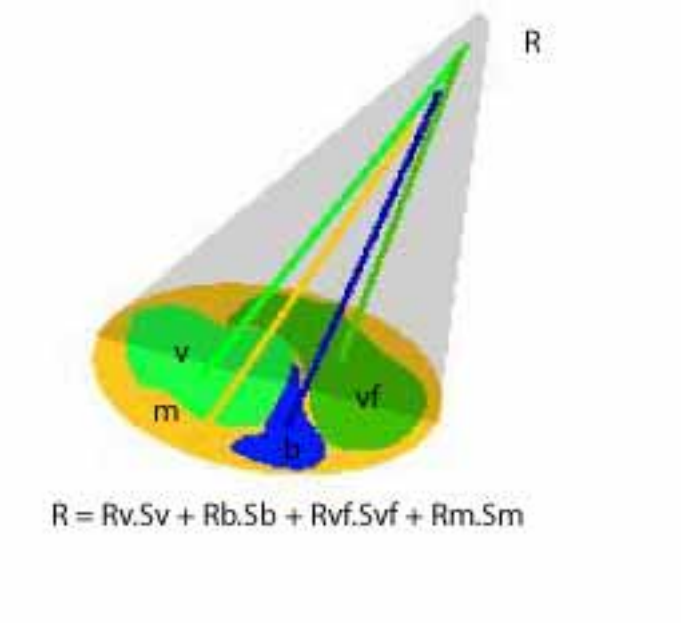


FIGURE 1 : Réponse d'un pixel hétérogène. La réponse d'un pixel hétérogène est la résultante des diverses réponses des objets élémentaires homogènes constituant le pixel. *Heterogeneous pixel response. The response of a heterogeneous pixel is the result of the various responses of the homogeneous elementary objects constituting the pixel.*

La réponse d'un élément particulier d'indice k sera prédominante si :

$$\left|R - R_k \times S_k\right| > seuil \qquad (2)$$

où *seuil* est une valeur limite dépendant, entre autres, de la dynamique de l'image. Dans ce cas, la réponse du pixel sera pratiquement confondue avec celle de l'élément k qui « masque » les autres réponses. C'est ainsi, par exemple, qu'on arrive à observer le tracé d'une route dont la largeur est inférieure à la résolution spatiale de l'image. En effet, le pixel correspondant devient un pixel « route », les contributions relatives des autres constituants du pixel réel étant masquées.

Considérons maintenant le cas de deux pixels (P_1) et (P_2) de réponses respectives (R_1) et (R_2), correspondant à des luminances (L_1) et (L_2). Les deux pixels seront considérés comme différents, donc identifiables, si :

$$\left|L_1 - L_2\right| > \kappa \qquad (3)$$

où κ représente la résolution radiométrique du capteur.

De façon plus concrète, considérons une image, avec une dynamique donnée, et observons cette image dans une échelle de tons de gris (0 à 255). Sur cette image, considérons un ensemble E de k pixels de réponses sensiblement voisines R_p représentant, sur l'image, un objet donné. La perception par l'œil de la figure représentant cet objet dépend de la surface de l'objet, c'est-à-dire de la surface qu'il occupe sur l'image (autrement dit du nombre de pixels qui le représentent) et de l'intensité relative du signal correspondant par rapport à la dynamique de l'image de ces pixels, autrement dit de la valeur du compte numérique. Cette perception Rp peut être modélisée par une fonction de la forme :

$$Rp = f(S, I) \qquad (4)$$

Où *S* représente la surface de l'objet sur l'image et *I* son intensité relative.

Sur la figure 2, on représente un élément de synthèse obtenu avec une valeur de compte numérique initiale de 200 ; cet élément est pratiquement invisible dans un contexte de niveau de gris de 255. Sur cette même figure, on a vectorisé quatre éléments de formes semblables et de niveaux de gris respectifs de 180 et de 120 ; pour chaque niveau de gris, on représente l'élément et son agrandissement par un facteur de 4. On peut constater ici l'influence des deux facteurs, soit ceux de surface et d'intensité, sur la perception des éléments du paysage.

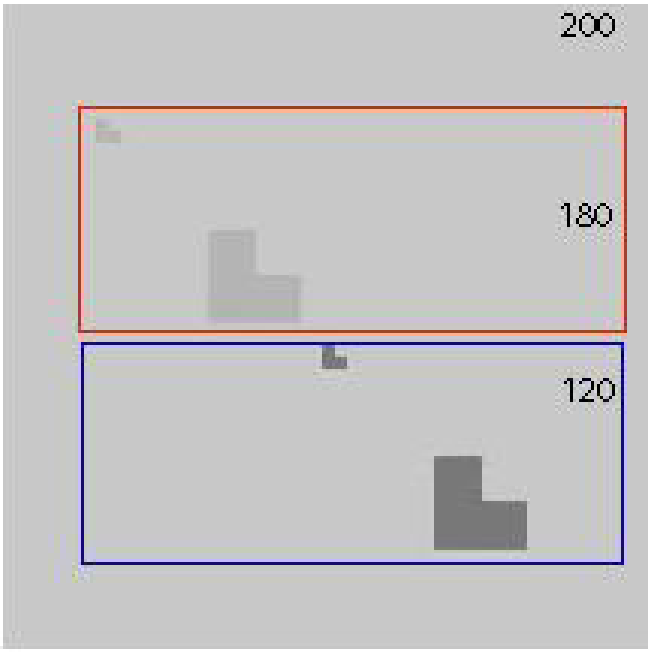


FIGURE 2 : Perception d'un objet. L'étendue et l'intensité conditionnent cette perception. *Perception of an object. The extent and the intensity condition this perception.*

2.2 Concept de clonage

Les outils de traitement d'images satellitaires offrent des modules de transformation de la dynamique et d'agrandissement pour rendre plus observables des objets peu visibles dans l'image initiale. Les résultats sont observés dans une fenêtre particulière, propre au logiciel et cette fenêtre peut être fixe ou ajustable. Dans le cas d'un agrandissement, il est possible de faire apparaître de nouveaux détails (nouveaux objets) avec une bonne résolution d'image en autant que le nombre de pixels correspondant à la fenêtre d'étirement soit supérieur à une limite dépendant habituellement du moyen d'observation utilisé, en fait de la taille de la fenêtre d'observation, Cette situation est illustrée à la figure 3 pour le cas d'IDRISI 32. Dans le cas contraire, on observe l'effet de pixellisation ; sur la figure 3, on en fournit un exemple avec, en (d), l'effet d'un agrandissement d'image sur la même fenêtre d'observation et, en (e), l'effet d'observation d'une sous-image de taille très réduite par rapport à celle de la fenêtre d'observation graphique. Pour les objets de faible surface, on se trouve toujours dans cette situation. Ceci est dû au fait que les moyens d'observation adaptent la résolution d'observation (nombre de pixels / pouce) à la taille de la fenêtre. Si le nombre de pixels est faible par rapport à la taille de la fenêtre, la dimension de chaque pixel est agrandie, mais non avec le même facteur, d'où l'effet de flou.

Dans cet article, on propose de cloner les pixels pour la zone concernant un objet de faible surface. Cette opération consiste à répéter le pixel par le même facteur en ligne et en colonne (figure 4). Un objet de faible surface n'est pas observable dans l'image car il occupe une surface correspondant à un nombre relativement faible de pixels. La réponse résultante est alors noyée dans le fond de l'image (contexte) (figures 5 et 6).

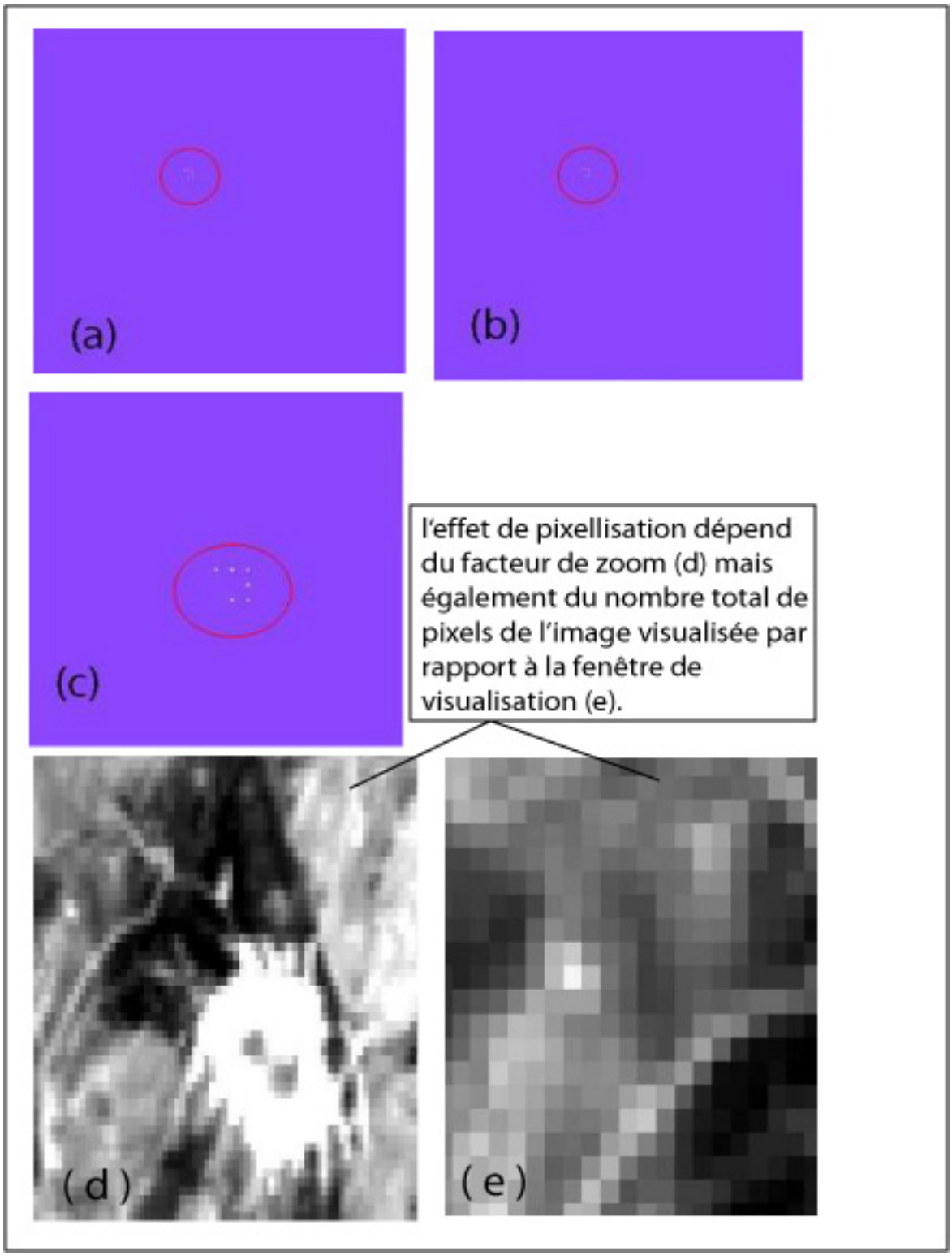


FIGURE 3 : Influence de la fenêtre d'observation : (a) image initiale ; (b) agrandissement par 5 et observation de toute l'image obtenue sur la fenêtre graphique ; (c) observation d'une fenêtre de l'image agrandie sur la même fenêtre graphique ; (d) effet de pixellisation après un agrandissement sur image ; (e) effet de pixellisation sur une extraction de fenêtre : l'effet est dû ici au fait que le nombre de pixels est faible par rapport à la fenêtre graphique. *Graphic window influence : (a) initial image ; (b) enlargement by 5 and observation of all the image obtained on the graphic window ; (c) observation of a window of the enlarged image on the same graphic window ; (d) pixellization effect after an enlargement on the image ;*

(e) pixellization effect on a window extraction : the effect is due to the fact that the number of pixels is low compared to the graphic window.

File Options

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
17	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
18	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
19	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
20	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
21	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
22	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
23	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
24	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
25	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
26	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
27	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63

FIGURE 4 : Stratégie du clonage de pixels. Dans une opération de clonage, chaque pixel de la fenêtre étudiée est dupliqué n fois en ligne et n fois en colonne, n étant le facteur de clonage. *Strategy of the pixel cloning process. In a cloning operation, each pixel of the studied window is duplicated n times in line and n times in column, n being the cloning factor.*

Sur la figure 5, le contexte est à un niveau de gris de 100 / 255. Six objets sont représentés. Les trois objets de la première colonne ont un niveau de gris de 120, proche de celui du contexte, et sont représentés avec des surfaces occupées agrandies par un facteur de 2 et de 4. Agrandir la surface occupée par un objet a consisté à simplement affecter à l'objet un nombre plus grand de pixels à l'aide d'une multiplication par un facteur constant en X et en Y. Le premier objet est à peine observable alors que le troisième se détache bien du contexte. Les trois objets de la seconde colonne ont exactement la même forme et présentent les mêmes surfaces occupées que ceux de la première colonne, mais ils ont un niveau de gris de 150, éloigné de celui du contexte. Ces trois derniers objets se détachent beaucoup mieux du contexte.

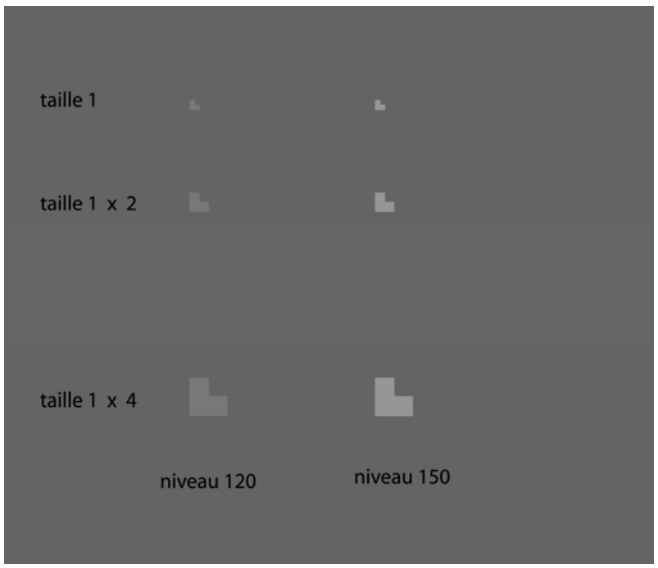


FIGURE 5 : Perception et contexte. La perception d'un objet par rapport à un contexte dépend du contraste de l'objet par rapport à son contexte (dynamique de l'image) mais aussi de la surface relative occupée par l'objet. *Perception process and context. The perception of an object in relation to a context depends on the contrast of the object in relation to its context (image dynamics) but also on the relative area occupied by the object.*

Sur l'image de la figure 6, on a produit deux objets de même forme et cette forme est constituée de deux éléments. Le deuxième objet est une dilatation spatiale par un facteur de 4 du premier. Les niveaux de gris, c'est-à-dire les intensités, sont identiques. La finesse du second élément du deuxième objet est très nette. De ces observations, on tire deux conclusions qui sont exprimées de la façon suivante : 1) pour une intensité donnée de signal, un élément d'image sera d'autant plus visible que sa surface est plus grande ; 2) dilater un objet ou un détail revient à lui affecter plus de pixels pour lui faire occuper une surface plus grande et donc le rendre plus observable. On constate ainsi une amplification uniforme sans distorsion. La surface étant augmentée, l'observation de l'objet l'est également conformément à la formule (4). Cette dilatation est ainsi réalisée sans l'agrandissement conventionnel et donc sans effet indésirable de flou.

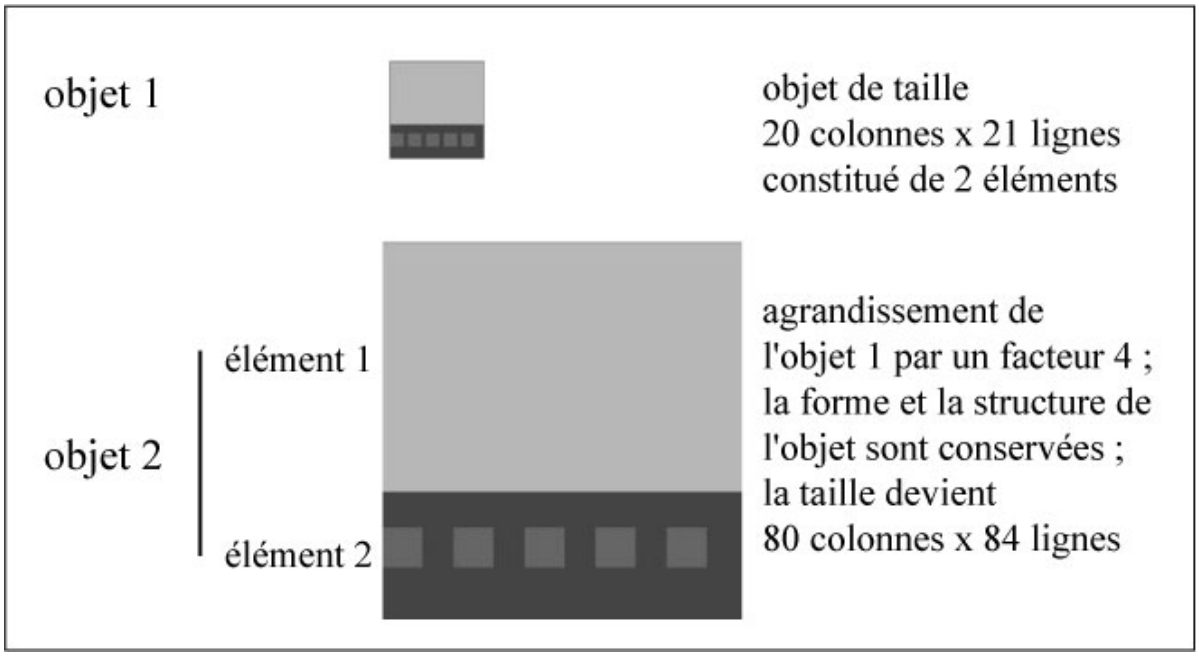


FIGURE 6 : Éléments d'objets dans un sous-contexte. Les objets 1 et 2 ont la même forme et la même structure. L'élément 2 dans l'objet 1 existe, mais est peu observable contrairement au même élément dans l'objet 2. *Image elements in a sub context. Objects 1 and 2 have the same form and the same structure. Element 2 in object 1 exists, but is not easily observable contrary to the same element in object 2.*

2.3. Mode opératoire

Deux méthodes peuvent être utilisées pour en arriver au résultat désiré. La première consiste à programmer un algorithme de clonage pour effectuer les opérations de lecture d'un fichier « image », en format texte ou JPEG, de clonage des pixels avec le choix d'un facteur de clonage et la restitution d'un fichier « clone » sous le même format. L'observation de l'image traitée s'effectue alors à l'aide d'un logiciel conventionnel de traitement d'image. La qualité de l'observation dépend, bien sûr, du logiciel de traitement d'image, comme on peut le constater sur la figure 7, où l'on observe un même résultat de traitement à l'aide d'ENVI et d'ERDAS. La deuxième méthode consiste en l'utilisation de fonctionnalités de logiciels existants. On a utilisé la fonction Expand du logiciel IDRISI qui duplique les pixels et la fenêtre Scroll du logiciel ENVI par laquelle est appliqué un facteur de réduction de la dimension du pixel, et ERDAS pour l'observation de l'image traitée.

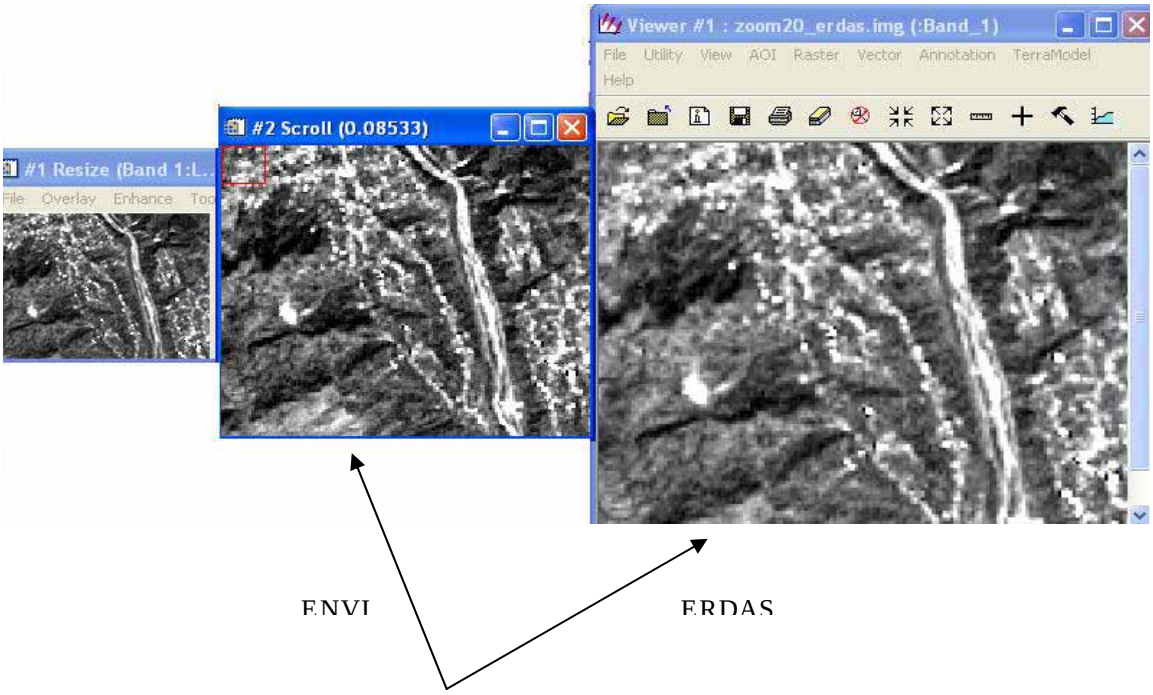


FIGURE 7 : Effet du logiciel de traitement sur l'observation. La qualité de l'observation d'un objet dépend de la fenêtre graphique obtenue par le logiciel utilisé. Un plus faible effet de pixellisation et donc une meilleure observation des objets est obtenue au moyen d'ERDAS par rapport à ENVI à partir d'une image produite par clonage de pixels avec un facteur de 20 d'une image TM. *Effect of the processing software on a display image. The quality of the observation of an object depends on the display window obtained from the software used. A weaker pixellization effect and thus a better observation of the objects are obtained by using ERDAS compared to ENVI using an image produced by pixel cloning with a factor of 20 on a TM image.*

2.4. Validation de la méthode

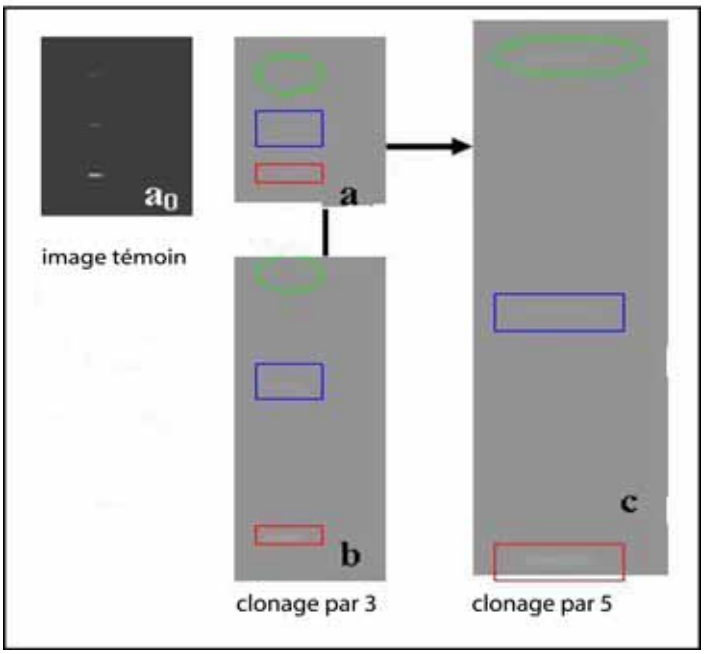
2.4.1. Choix de la zone

La méthode de clonage ne permet pas de déterminer, sur une image, une zone où existe un objet de faible surface d'un intérêt particulier, un glissement de terrain par exemple. Cette méthode est mise au point pour surveiller les espaces pour lesquels existe une probabilité de modification du paysage sur de faibles surfaces (zones sismiques, zones à risques de glissement de terrain, etc.). On part donc d'une zone à risque qui a été dilatée pour mieux observer le changement et donc l'anomalie ou l'incident survenu.

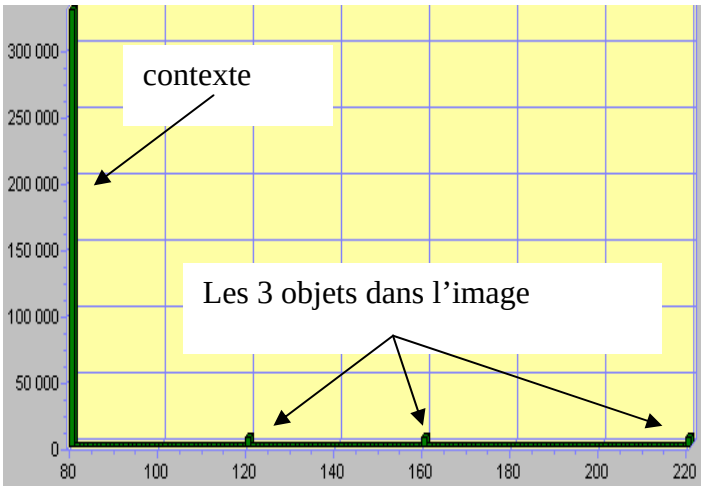
2.4.2. Image de synthèse

La méthode de clonage est d'abord testée sur des images de synthèse créées à partir d'un logiciel de traitement d'images classique, en l'occurrence IDRISI 32. Sur la figure 8, l'image (a) est l'image initiale produite avec une valeur de tons de gris de 146 / 255. Sur cette image ont été créés trois objets linéaires de même longueur et de valeurs de gris respectives de 148 / 255 (mis en évidence par le cercle vert) de 150 / 255 (rectangle bleu) et de 155 / 255 (rectangle rouge). Sur l'image, seul le trait de niveau de gris de valeur de gris de 155 commence à pouvoir être observable. C'est le seul objet de l'image qui permet de vérifier l'équation (2). Les deux autres objets ne sont pas observables à cause de leur trop faible contraste par rapport au contexte. L'image (b) représente un clonage par un facteur de 3. Le trait de valeur de gris de 150 / 255 apparaît déjà, la réponse à l'équation (2) étant vérifiée grâce à une augmentation du terme S, mais non celui de niveau de gris 148. Enfin, sur l'image c, qui représente un clonage par un facteur de 5, les trois niveaux de gris sont maintenant observables. L'image (a_0), qui sert d'image test, n'est constituée que de quatre niveaux de gris bien différents, soit celui du contexte et ceux des trois objets. Sur la figure 9, on montre la forme de l'histogramme d'une telle image, c'est-à-dire un histogramme avec quatre modes : le contexte et les trois valeurs d'intensité de gris correspondant aux trois objets représentés.

Ces résultats sont confirmés pour un objet de forme géométrique différente (figure 10). L'opération de clonage a bien sûr conservé la forme en la rendant plus observable à l'aide d'une

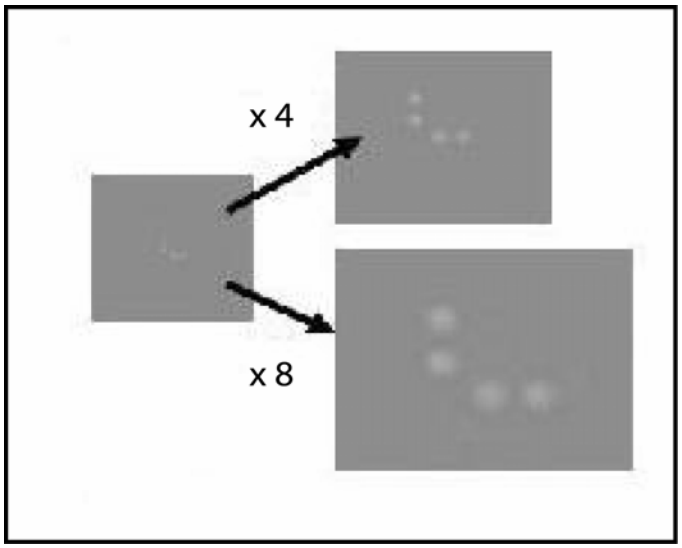


opération d'agrandissement conventionnel sans entraîner l'effet de flou caractéristique.



2.4.3. Images satellitaires et photographies aériennes

Les images de HRV de SPOT et de TM de Landsat sont de résolution spatiale moyenne et ne paraissent donc pas adaptées pour l'étude d'objets de faible surface. Cependant, si l'on désire suivre l'évolution, par exemple d'un phénomène d'extension urbaine en périphérie d'une zone bâtie, elles demeurent le seul média capable de fournir un historique car on ne dispose pas forcément, pour le moment (questions de disponibilité et de coût), d'images de meilleure résolution plus anciennes,



voire éventuellement de photographies aériennes.

Sur la figure 11, on peut comparer les effets visuels de résultats de traitement au moyen d'une opération d'agrandissement conventionnel et d'une opération de clonage à partir d'une image de HRV. On peut constater qu'une opération de clonage par un facteur de 20 donne moins d'effets indésirables de pixellisation qu'un agrandissement conventionnel par un facteur de seulement 4. Sur la figure 12, on présente deux autres exemples d'application de l'opérateur de clonage à deux objets différents ainsi que deux catégories d'images différentes. Dans le premier cas (a), une amplification par un facteur de 10 de la première néo-bande d'une analyse en composantes principales sur une image de TM de l'environnement urbain de la ville de Laghouat, en Algérie, fait apparaître des détails dans la zone quasi uniforme représentant l'ancien stade, terrain abandonné jusque vers la fin des années 1990. En particulier, on peut observer la petite tache blanche à peine perceptible dans l'image de départ et qui correspond à un début d'aménagement sur ce terrain abandonné. Dans la partie bâtie périphérique (mise en évidence par le rectangle vert), l'axe routier est maintenant bien observable. Dans le deuxième cas (b), un clonage par un facteur de 4 à partir d'un extrait de photographie aérienne à l'échelle de 1 : 50 000 sur une zone de volcans de boue dans la région de Buzeau (Roumanie) met en évidence l'hétérogénéité de la surface résultant des différences de réflectances (parties humides et sèches, boues, eau boueuse) et significative de l'activité de la zone de volcan. Or, ces détails n'apparaissant pas dans l'image de départ.

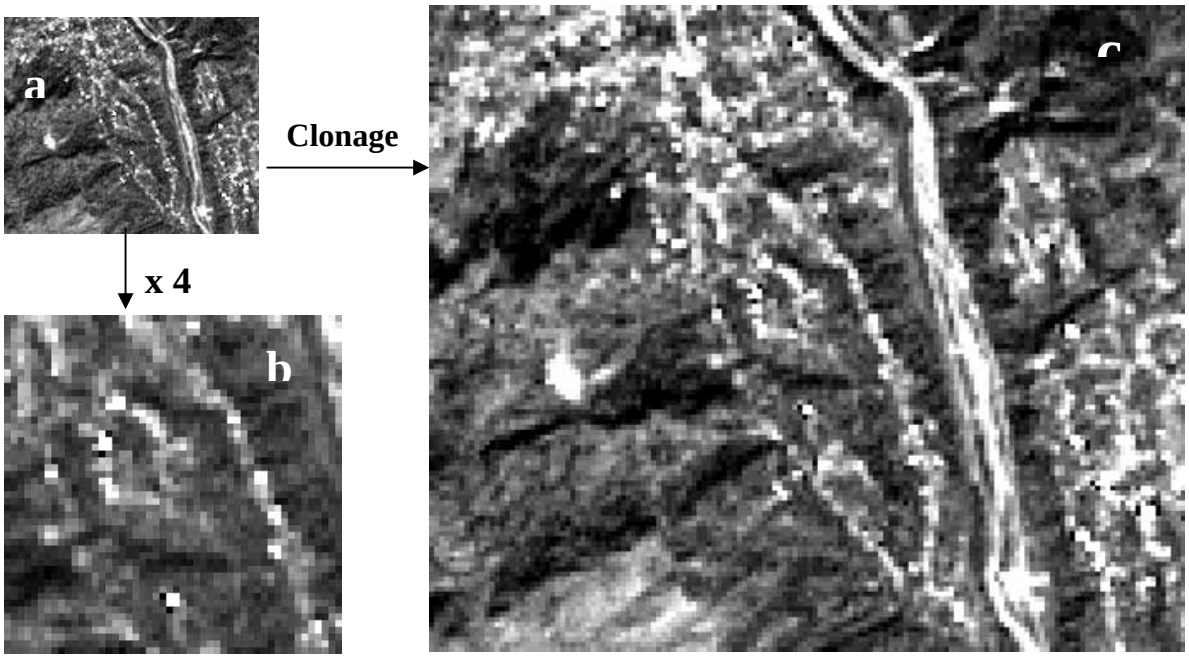


FIGURE 11 : Comparaison des effets d'un agrandissement conventionnel et d'une opération de clonage. Un clonage par un facteur de 20 donne moins d'effet de pixellisation qu'un agrandissement conventionnel par un facteur de 4. *Comparison between the results of the cloning process and a zoom operator. A cloning by a factor of 20 gives less pixellization effect than a conventional enlargement by a factor of 4.*

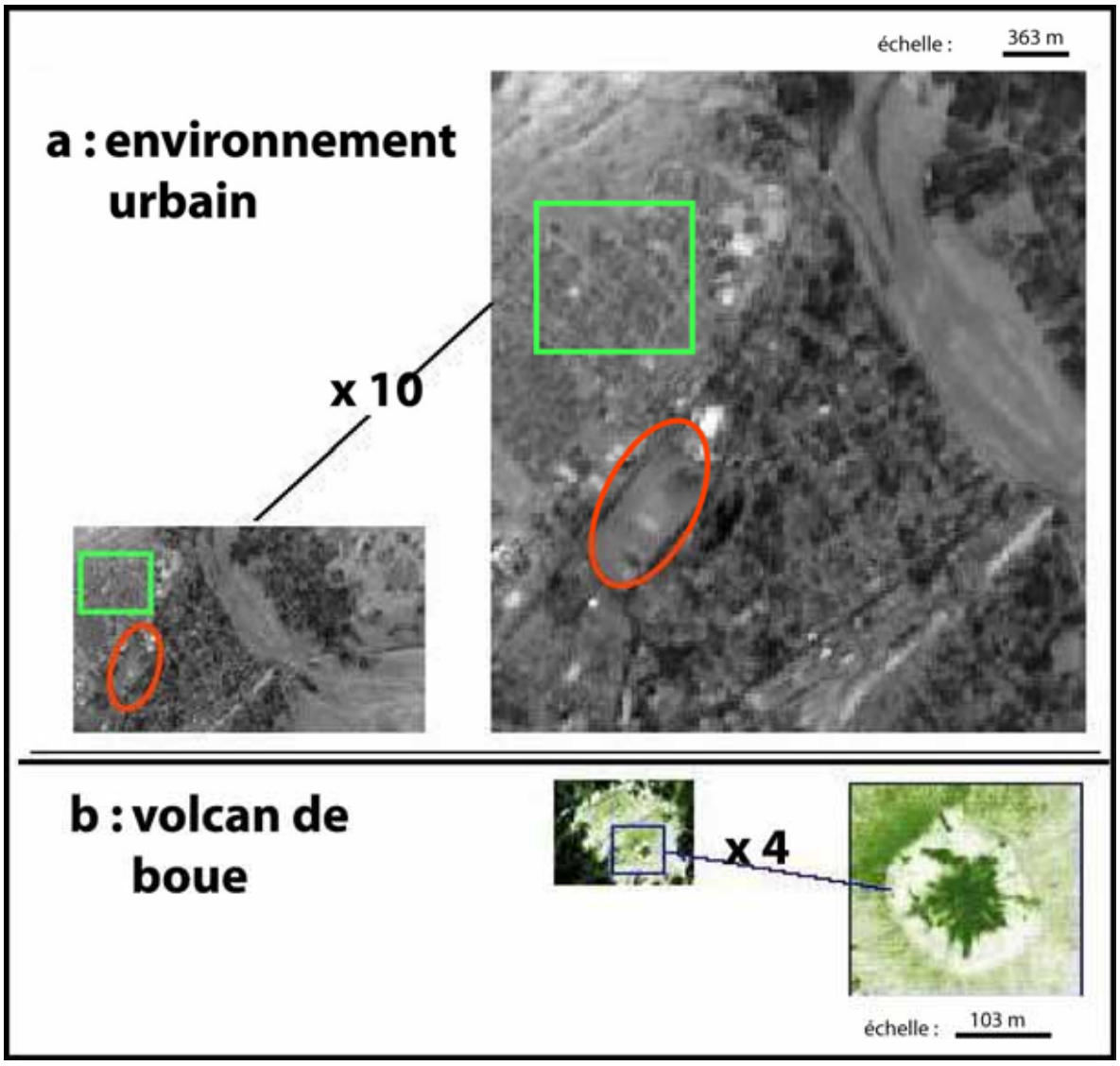


FIGURE 12 : Effet de l'algorithme de clonage sur une image TM de Landsat, dans un environnement urbain, et sur une photographie aérienne, dans une zone de volcan de boue. *Effect of the cloning algorithm on a TM image, in an urban environment, and on an aerial photograph, in a mud volcano area.*

3. PREMIERS RÉSULTATS

La méthode de clonage de pixels a été appliquée à l'analyse du phénomène de glissement de terrain dans la vallée de la Prahova, en Roumanie. Ce phénomène représente un objet de faible surface qui n'est habituellement pas étudié à partir de l'imagerie satellitaire, puisque les méthodes de traitement traditionnelles ne sont pas adaptées pour appréhender sa forme particulière.

Les glissements de terrain peuvent provoquer un certain nombre de situations caractéristiques facilement observables à l'échelle de l'observation directe, mais moins observables sur une photographie aérienne et encore moins sur une image satellitaire à moyenne résolution. Ces glissements de terrain font pourtant partie de la catégorie des processus de versant qui en changent la géomorphologie de façon caractéristique. Un glissement peut se caractériser par :

- des niches d'arrachement ou des crevasses, principales et latérales, avec brusque rupture de pente (pente concave), dans sa partie amont ;
- un bourrelet frontal (ou d'arrivée) à pente convexe dans sa partie aval ; la poussée exercée par le bourrelet se remarque fréquemment par un tracé anormal des cours d'eau en aval ;
- une surface topographique bosselée (ondulations, dissémination de blocs de forte taille, contre pente, etc.)

Les glissements de terrain se traduisent parfois par un aspect ondulé et chaotique du

paysage. Cet aspect est provoqué par l'alternance de micro-dépressions marécageuses avec les bourrelets de glissement. La zone est couverte d'une végétation hydrophile caractéristique des dépressions marécageuses alimentées sans cesse par les nombreuses sources qui débouchent sur le versant. C'est cet aspect de désorganisation spatiale de la surface que l'on veut exploiter pour repérer les glissements de terrain dans une zone d'étude.

L'état de désorganisation spatiale se traduit par un agencement aléatoire des pixels dans la zone de la fenêtre considérée. Une amplification à l'aide d'un algorithme de clonage augmente l'étalement des micro-zones uniformes pour les rendre plus observables.

Sur la figure 13, on présente un clonage par un facteur de 6 (b et c) d'une image du NDVI obtenue à partir d'une image de HRV(X) de SPOT (a). Deux fenêtres sont considérées ici : une fenêtre presque uniforme de végétation (b) et une fenêtre correspondant à une zone de glissement de terrain (c). L'aspect « lisse » et « organisé » de la zone homogène est conservé par le clonage (b). En (c), l'apparence de désorganisation spatiale est très nette. En effet, des groupes de pixels de réponses différentes s'agencent de manière quasi aléatoire. Il est utile de noter ici que l'algorithme de clonage, à son stade actuel de développement, ne permet pas d'affirmer de manière catégorique qu'il s'agit d'une zone de glissement de terrain : l'aspect de désorganisation peut en effet résulter d'autres causes.

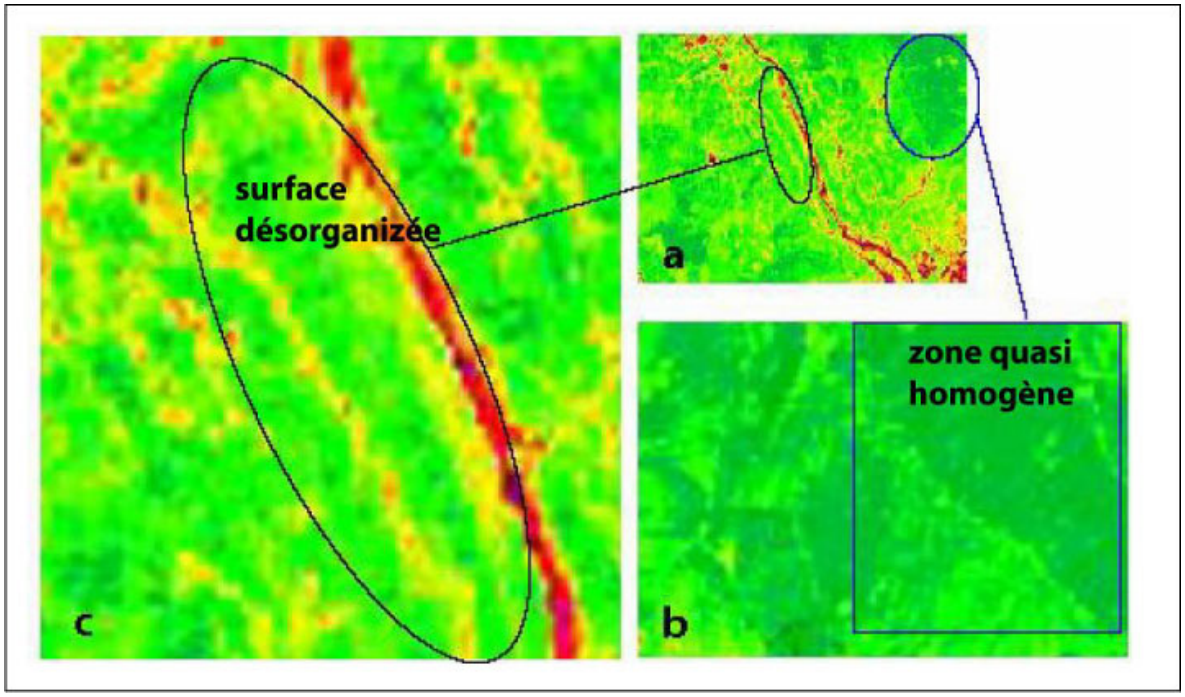


FIGURE 13 : Effet du clonage sur une zone de glissement de terrain. Un clonage par un facteur de 6 de l'image du NDVI d'une image SPOT met en évidence l'état de désorganisation de la surface. *Result of the cloning process over a landslide area. A cloning by a factor of 6 of the NDVI of a SPOT image highlights the state of surface disorganization.*

L'image de la figure 14 est le résultat d'une opération de clonage par un facteur de 8 de la bande XS1 de HRV améliorée par étalement de la dynamique. Cette image apporte une autre information : elle met en évidence des agencements particuliers de pixels le long de lignes presque perpendiculaires à la ligne de front. Il devrait probablement s'agir de sentiers (tracés en guise de raccourcis) empruntés par les habitants de l'agglomération ou d'axes de drainage vers la rivière. Ce résultat serait plus difficilement obtenu à partir d'un agrandissement conventionnel à cause de l'effet inévitable de pixellisation ou de flou dû à l'agrandissement.

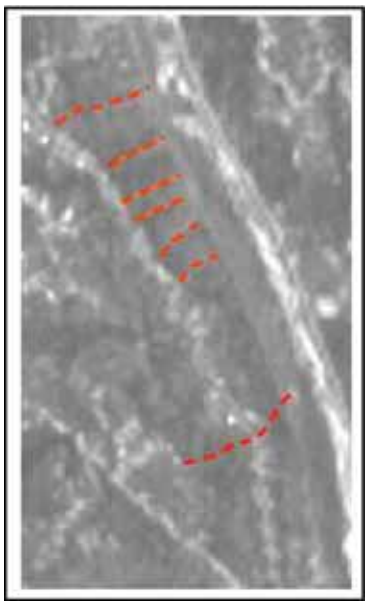


FIGURE 14 : Clonage de pixels avec un facteur de 6 à partir d'une image en bandeXS1 de HRV améliorée par dilatation de la dynamique.
Ce clonage confirme l'aspect désorganisé du paysage. On note en plus la présence de lignes particulières perpendiculaires (en tirets) à la ligne de front : ce sont des chemins, des axes de drainage, etc. *Cloning of pixels with a factor of 6 using an HRV XS1band image improved by dilation of the dynamics. This cloning confirms the disorganized aspect of the landscape. We can also observe the presence of particular perpendicular lines (dashed line) to the front line : these are roads, drainage axes, etc.*

Les phénomènes de faible étendue sont ainsi mis en évidence par le procédé de clonage. Cependant, la perception de certaines organisations particulières de l'espace (par exemple la désorganisation du paysage à la suite de glissements de terrain), peut présenter quelques difficultés d'interprétation. On a alors utilisé un procédé d'amélioration basé sur la colorimétrie en opérant d'abord une conversion de l'image du mode RVB au mode HSV (teinte-saturation-valeur), puis en procédant à un réglage de saturation. À titre d'exemple, sur la figure 15, on montre, une image en représentation RVB (a), son observation en mode HSV (b), un réglage de saturation à + 41 % (c) et à - 41 % (d) ; c'est sur cette dernière image que sont mis en évidence les détails (zone ciblée en rouge). Sur la figure 16, on présente le même site de glissement de terrain, après clonage et traitement à l'aide d'un indice adapté de coloration. On a reporté les orientations privilégiées d'agencements de pixels en fonction de l'indice de coloration. Le résultat confirme l'apparence chaotique de la surface en plus de l'apparition d'ensembles de natures différentes (végétation et surfaces à nu) et d'orientations presque aléatoires, lesquels pourraient confirmer que cet état de surface serait le résultat d'un « incident » naturel, tel un glissement de terrain.

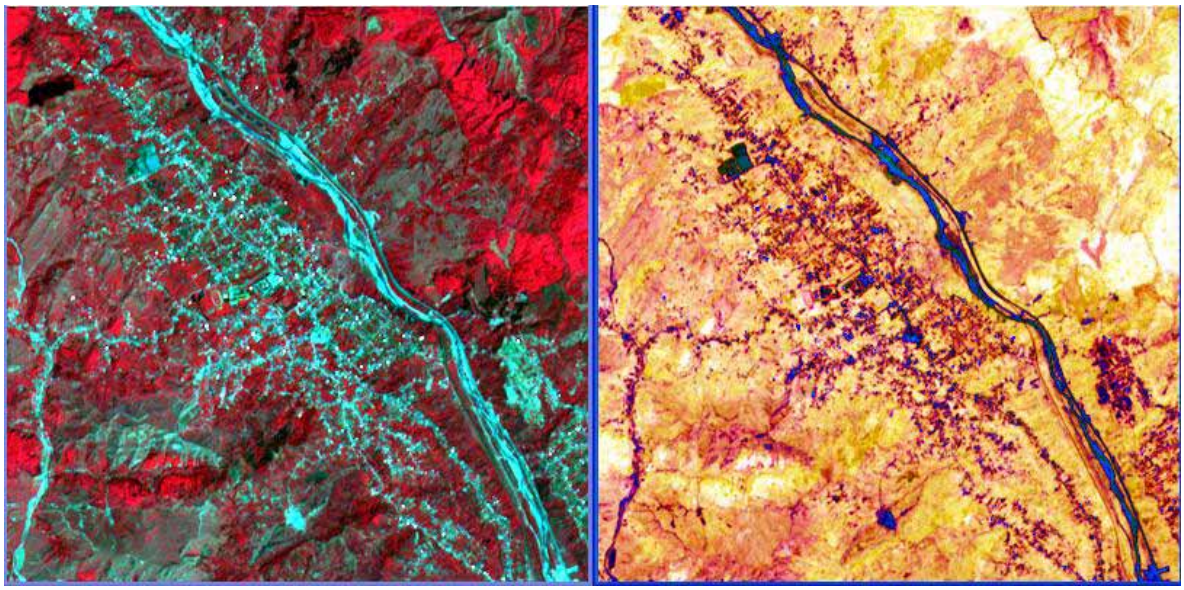


FIGURE 15 : Conversion RGB → HSV. Cette conversion permet de montrer l'espace selon une observation plus conforme à notre perception de la couleur. Un réglage de la saturation permet par la suite de mettre en évidence des détails non facilement observables. *Effect of the image conversion RGB → HSV. This conversion allows to show space according to an observation in conformity with our perception of colour. An adjustment of saturation makes it possible thereafter to highlight details not easily observable.*

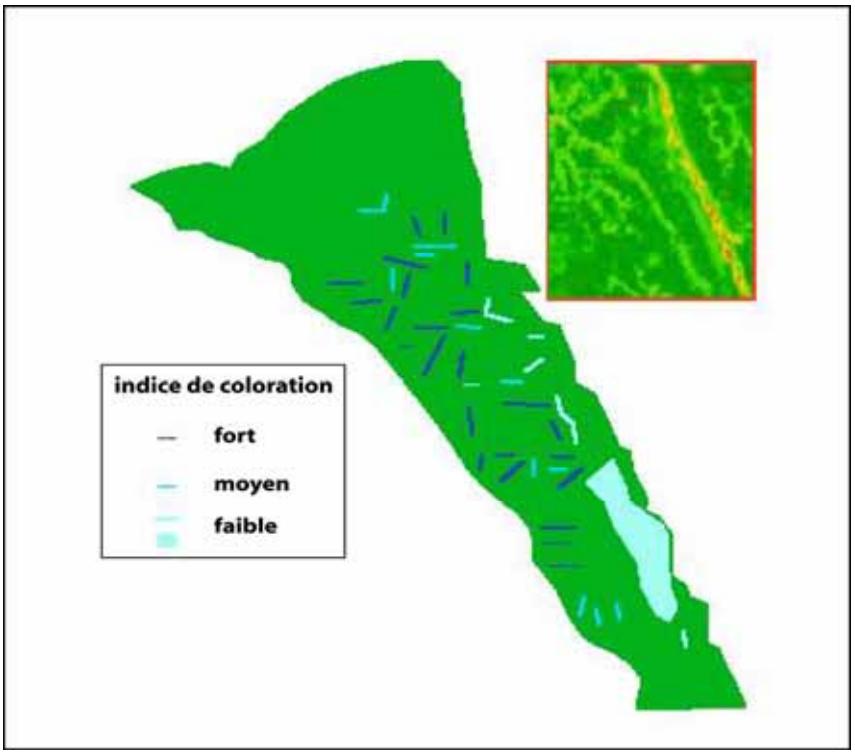


FIGURE 16 : Mise en évidence de l'état de désorganisation de la surface sur une image de coloration améliorée et amplifiée à l'aide de l'algorithme de clonage de pixels par un facteur de 6. *Enhancement of the surface disorganization in an improved coloration image and amplified using the pixel cloning algorithm based on a factor of 6.*

4. CONCLUSION

Les premiers résultats présentés ici montrent que l'algorithme de clonage, qui consiste en une amplification de la surface des objets observés sur une image, peut s'appliquer aussi bien aux bandes primaires d'une image satellitaire qu'à des résultats de traitement de cette image : ACP, indice de végétation, analyse texturale ou autre. Il peut également s'appliquer à d'autres sources de données numérisées dans lesquelles certains détails particuliers restent peu discernables à l'œil. Cet algorithme est appliqué dans le but de mettre en évidence des objets de faible surface, présents mais qui ne sont pas ou peu observables sur les images sources. Il est toutefois nécessaire de noter que les images obtenues ne peuvent pas servir directement pour estimer des surfaces par comptage de pixels, par exemple. Il y aurait lieu d'effectuer une rectification par clonage inverse ou de calculer la nouvelle échelle de l'image produite par le facteur de clonage.

Remerciements

Les images et les photographies aériennes sur la Roumanie utilisées dans cette étude ont été obtenues dans le cadre d'un Projet de recherche partagées du Réseau thématique de télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie que nous tenons à remercier. Ce projet a regroupé les universités de Paris 12, de Bucarest et de Liège.

Références

Achard, F., Loudjani, P. et Viovy, N. (1989) Les possibilités de la télédétection pour l'étude de la végétation. Bulletin de la Société d'Écophysiologie, vol. 13, n° 1, p. 1-10.

Calle, D. (1999) Agrandissement d'images par synthèse de similarités et par induction sur un ensemble. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 280 p.

Courault, D. et Girard, M.C. (1988) Analyse des hétérogénéités intraparcellaires des sols par télédétection. Science du sol, vol. 26, no 1, p. 1-12.

Escadafal, R., Belghith, A. et Benmoussa, H. (1994) Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. P. 252-259, in CNES (réd.) Actes du 6e Symposium International « Mesures Physiques et Signatures Spectrales en Télédétection », 17-24 janvier 1994, Val d'Isère, France, Publication ISPRS / CNES.

Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S. and Mehl, W. (2002) Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, p. 3795-3820.

Hou, H.S. and Andrews, H.C. (1978) Cubic splines for image interpolation and digital filtering. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 26, p. 508-517.

Lenco, M. (1996) Étude par télédétection des écosystèmes des agglomérations françaises ; la cartographie urbaine aujourd'hui. Cahiers du CREPIF (Paris), n° 54, p. 99-114.

Li, Z.H., Cihlar, J., Moreau, L., Huang, F. and Lee, B.(1997) Monitoring fire activities in the boreal ecosystem. Journal of Geophysical Research, vol. 102, n° D24, p. 29611-29624.

Shannon, C.E. (1948) A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, vol. 27, p. 379-123 et 623-656.

Shannon, C.E. (1949) Communication in the presence of noise. Proceedings of the Institute of Radio Engineering, vol. 37, no 1, p. 10-21.

Unser, M., Aldroubi, A. and Eden, M. (1991) Fast b-splyne transform for continuous image representation and interpolation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 13, no 3, p. 277-285.