

AUTOMATISATION DE LA DÉTECTION DES CRATÈRES LUNAIRES SUR DES IMAGES ET MNT PLANÉTAIRES

Pierre RENSON, Nadia PONCELET, Yannick VANDELOISE,
Ralph SCHMIDT et Yves CORNET

Résumé

Cette recherche s'inscrit dans la préparation d'une mission lunaire. Elle a pour objectif d'implémenter, tester et valider une méthode automatique qui détecte les cratères à la surface lunaire à partir de produits planétaires (images et MNT). Dans un tel contexte, l'automatisation du processus est essentielle étant donné que les cratères représentent un risque d'alunissage et des points de repère pour la navigation visuelle. L'automatisation constitue le défi majeur des méthodes de détection car il est difficile de développer des traitements automatiques de haut niveau comparables à la réflexion réalisée lors d'une interprétation visuelle traditionnelle. Notre méthode établit de manière automatique un diagnostic sémantique sur base de la combinaison de plusieurs descripteurs calculés sur les produits planétaires utilisés. Enfin, cette application s'intègre dans un outil d'aide à la décision et d'estimation du risque d'alunissage et de survie d'une mission. Elle a aussi pour but d'alimenter une base de données de points de repère pour la navigation visuelle automatique d'un engin spatial en phase d'alunissage.

Mots-clés

Cratère, détection automatique, approche orientée-objet, filtre de Canny, transformée de Hough, auto-validation, validation

Abstract

This research is part of the preparation of a lunar mission. Its objective is to implement, test and validate an automated method that detects craters on the lunar surface from planetary products (images and DTM). In this context, the automation of the process is essential because the craters represent a landing risk and landmarks for visual navigation. It is also the key challenge because it is difficult to develop high level automatic processing comparable to the thinking carried out in a traditional visual interpretation. Our method automatically establishes a semantic diagnosis based on the combination of crater descriptors computed on the planetary products used. Finally, this application is part of a decision support tool and an assessment system of landing and mission survival risks. It also aims to feed a landmarks database for automatic visual navigation of a lunar landing spacecraft.

Keywords

Craters, automatic detection, object-oriented approach, Canny filter, Hough transform, auto-validation, validation

I. INTRODUCTION

Notre recherche s'inscrit dans le contexte d'une mission exploratoire lunaire. Elle a été menée dans le cadre du projet *LandSAfe* (*Landing Site RiskAnalysis software framework*) initié en mai 2011 par l'Agence Spatiale Européenne. Il a pour but l'analyse des méthodes et l'implémentation d'un logiciel d'évaluation des risques d'alunissage et de survie d'une mission lunaire non habitée en région polaire méridionale (Schmidt *et al.*, 2012).

Les cratères constituent un des aléas pris en considération dans cette évaluation au même titre que la présence de blocs rocheux, ombres portées, pentes

et rugosités excessives et durées d'ensoleillement insuffisante ou d'obscurité trop longue. Par ailleurs, la position des cratères, leur diamètre et d'autres paramètres morphométriques permettent aussi l'alimentation d'une base de données de points de repère (*Landmarks*) exploitée lors de la navigation visuelle en phase d'alunissage et pour l'ajustement de fonctions de distribution fréquence-dimension permettant notamment le calcul de l'âge des surfaces lunaires (Stöffler & Ryder, 2001, Kneissl *et al.*, 2010). Du fait de leur abondance sur les surfaces planétaires, les cratères ont fait l'objet de nombreuses études dans divers domaines des sciences spatiales. Bien que peu nombreux sur notre Terre suite à leur disparition rapide en raison de sa tectonique importante (Moore & Twist,

1995), ils y ont été étudiés au même titre que ceux à la surface d'autres astres et ce, grâce au développement des techniques de télédétection fournissant de nombreux produits d'imagerie et altimétrie dont la résolution spatiale n'a cessé de s'améliorer. Le remplacement des interprétations et restitutions visuelles par des méthodes numériques semi-automatiques constitue un sujet à la mode car ces dernières rendent le processus beaucoup moins fastidieux et plus rapide. Les techniques récentes s'orientent vers la détection de cratères de plus en plus petits (diamètre sub-kilométrique) non recensés dans les bases de données (Bandeira *et al.*, 2012).

Parmi les procédures numériques de détection semi-automatique, nous distinguons les méthodes supervisées et non supervisées. Leur utilisation dépend du type de traitements mis en œuvre et du contexte de travail. Elles s'appliquent soit à des Modèles Numériques de Terrain (MNT), soit à des images.

Les méthodes supervisées proposent une classification utilisant des points d'intérêts (*Points Of Interest- POI*) sélectionnés sur une images (Urbach & Stepinski 2009) ou un MNT (Kim *et al.*, 2004 et 2005) par un opérateur pour entraîner l'apprentissage des descripteurs utilisés par le processus qui est exécuté en trois étapes :

- sélection des cratères qui constituent les POI;
- définition des descripteurs du modèle « cratère » puis apprentissage sur base d'un échantillon d'entraînement construit à partir des POI;
- extraction des structures candidates et classification discriminante binomiale « cratères - non cratères » mettant en jeu une fonction de similarité par comparaison au modèle « cratère » paramétré par l'apprentissage.

Plusieurs techniques tentent d'améliorer l'échantillon d'entraînement (Wang *et al.*, 2010) et l'apprentissage des descripteurs (Ding *et al.*, 2010). Ainsi, de nombreux algorithmes de classification supervisée opérant sur des images panchromatiques produisent des résultats de plus en plus convaincants. L'arbre de décision C4.5 (Urbach & Stepinski 2009) est le plus classique. Ding *et al.* (2010) proposent une variante plus performante de l'arbre de décision, les machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge (*Support Vector Machine - SVM*). D'autres chercheurs ont proposé la méthode du *Boosting* (Ding *et al.*, 2010 et Wang *et al.*, 2010) ou un classifieur bayésien (*Baysien network with LASSO - LBI-BNC*) (Wang *et al.*, 2011). Kim *et al.* (2004 et 2005) utilisent par contre les réseaux de neurones pour traiter un MNT.

Les méthodes non supervisées sont spécifiquement exploitées lors de missions exploratoires des planètes et des satellites naturels terrestres et extraterrestres pour la détection des cratères participant à la navigation

(Cheng *et al.*, 2003 et Mourikis *et al.*, 2009). Par leur relief, ils contribuent également à estimer le risque d'alunissage (Cheng *et al.*, 2001, Jones & Howard, 2006, et Pham *et al.*, 2009). Dans ce contexte, l'automatisation de leur détection est essentielle. Elle l'est aussi lorsque le diamètre des cratères est proche ou inférieur au kilomètre car ils sont d'autant plus nombreux qu'ils sont petits.

Les méthodes non supervisées classiques reconnaissent d'abord les crêtes circulaires des bords de cratères (*rims*) puis les connectent s'ils sont disposés selon une géométrie quasi-circulaire par des algorithmes de bas niveau utilisant des descripteurs de contour et de forme. Sur une image, la détection des contours permet de reconnaître les limites (*edge detection*) des structures. Un contour se marque soit par une variation (gradient) significative d'intensité selon une direction sur une image et par une variation de pente (convexité sommitale de la *rim* p. ex.) sur un MNT. L'extraction des contours utilise deux types d'opérateur passe-haut, les opérateurs « gradient » et « laplacien ». Ils mesurent respectivement la dérivée première et la dérivée seconde. Les filtres spatiaux de Roberts, Prewitt, Sobel, Kirch ou encore Robinson utilisant ces opérateurs sont généralement combinés à un lissage préalable. Trois techniques optimales de lissage ont ainsi vu le jour : les filtres de Canny (Canny, 1986 et Solhaib, 2002), Shen Castan (Salamuniccar & Loncaric, 2010) et Deriche (Deriche, 1987).

Sur un MNT, les techniques utilisées exploitent soit un opérateur de premier ordre (Michael, 2003), soit un opérateur morphométrique tel que la convexité en profil (Bue *et al.*, 2007 Kim *et al.*, 2005 et Wood, 1996). D'autres types de traitements sont également appliqués tels que l'estompage (*hillshading*), la direction d'écoulement (*flow direction*), l'accumulation du flux (*flow accumulation*), la détection des dépression fermées (*sink detection*) et la segmentation par ligne de partage des eaux (*watershed segmentation*) (Li *et al.*, 2005 et Rajput, 2011).

Les techniques de reconnaissance de forme connectent les contours (*edge linking*). Dans notre contexte, la transformée de Hough est la technique la plus populaire aussi bien pour traiter des images (Honda & Azuma, 2000, Leroy *et al.*, 2001, Flores-Méndez, 2003, Sawabe *et al.*, 2006, Troglia *et al.*, 2009 et Meng *et al.*, 2009) que des MNT (Michael, 2003, Magee *et al.*, 2003, Kim *et al.*, 2004 et 2005, Salamuniccar & Loncaric, 2010). Inventée par Paul Hough en 1962, elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que la robotique, l'imagerie médicale, la télédétection... (Maître, 1985 et Dobes *et al.*, 2006). D'autres procédés de ce type sont mentionnés dans la littérature mais très peu sont mis en œuvre de façon opérationnelle comme la Transformée de Radon (Nacereddine *et al.*, 2010), Transformée de

Fourier ainsi que l'algorithme de cohérence radiale (*radial consistency*) développé par Earl *et al.* (2005). Ce dernier traite directement l'image brute sans appliquer préalablement un détecteur de contours.

Ding *et al.* (2010) estiment cependant qu'il n'existe actuellement aucune méthode *non supervisée* strictement automatique fournissant d'aussi bons résultats que les méthodes supervisées. Ceci peut être expliqué par un apprentissage utilisant une Vérité Terrain (VT) et la difficulté d'intégrer une interprétation sémantique dans un processus strictement automatique. Notre recherche consistant à implémenter et intégrer la détection des cratères au sein d'un logiciel d'automatisation de ce processus est essentiel, nous nous sommes donc orientés vers une approche non supervisée qui opère sur toute la surface lunaire en étant le moins sensible aux variations des conditions d'illumination et malgré le fait que les performances de la reconnaissance des cercles sont tributaires de la qualité du détecteur mis en œuvre auparavant (Poncelet & Cornet, 2010). La section suivante de cet article décrit les données. Elle est suivie des sections décrivant les méthodes implémentées puis présentant, validant et discutant leurs résultats en fonction du type de produit utilisé, une image ou un MNT.

II. DONNÉES

Le module DEM du projet *LandSafe* construit des MNT par stéréophotogrammétrie optique et exploite des couples d'images panchromatiques NAC (*Narrow Angle Camera*) et d'images multispectrales WAC (*Wide Angle Camera*). Ces deux types d'images sont enregistrés depuis 2009 par le *Lunar Reconnaissance Orbiter Camera* de la *National Aeronautics and Space Administration*. Un autre MNT produit par lasergrammétrie grâce au *Lunar Orbiter Laser Altimeter* (LOLA) est également utilisé. Tous ces produits sont accessibles sur le serveur *Planetary Data Set* du *Jet Propulsion Laboratory* (<http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/>).

Les images NAC ont une résolution spatiale très fine variant du demi-mètre au mètre. Celle des MNT produits par notre module DEM varie de 1 à 2 m. Celle des WAC est de ~75 mètres. Celle du MNT LOLA varie de 5 mètres pour les zones polaires à 30 mètres. En raison de l'incertitude sur l'orbite, le processus d'acquisition laser est affecté par un biais en élévation pouvant atteindre plusieurs mètres qui, malgré des mesures de distance précises à 10 cm, produit un bruit très marqué par une succession de bandes parallèles à la trace du LRO. Ce MNT LOLA est la référence globale exploitée pour l'orientation absolue des MNT produits par notre module DEM. Toutes les images exploitées pour la détection des cratères sont orthorectifiées par

le module DEM. Idéalement, cette opération rend géométriquement cohérentes toutes les données exploitées. Selon l'application, trois projections cartographiques sont utilisées : les projections sinusoïdale (output du module DEM), stéréographique (conservation des formes pour la détection des cratères, p. ex.) et gnomonique (produits d'illumination, p. ex.). Les paramètres de ces projections sont adaptés aux latitude et longitude de la zone d'intérêt.

III. MÉTHODES

Nous distinguons deux approches méthodologiques selon la donnée utilisée, une image ou un MNT. Une méthode a été développée pour traiter les images (méthode image) et deux pour traiter les MNT (méthodes par estompage et morphométrie). Elles suivent le processus suivant : (1) extraction des contours puis connexion de ceux-ci sur base de leur géométrie circulaire permettant de reconnaître des cercles candidats « cratères », (2) auto-validation des candidats en tant que cratères.

L'implémentation des trois méthodes se différencie aux deux stades. Selon le produit utilisé, différentes informations sont exploitées pour l'extraction des contours en utilisant le Filtre de Canny. Par contre, la reconnaissance des cercles par la Transformée de Hough appliquée au masque des contours est identique pour les 3 méthodes. Un prétraitement particulier est appliqué au MNT pour la méthode par estompage (*hillshading*). Il consiste à illuminer virtuellement le MNT en montrant ainsi des caractéristiques similaires aux images (variation d'intensité due au relief). Les traitements appliqués ensuite sont donc semblables à ceux appliqués aux images.

Enfin, parmi les articles de la littérature, aucun n'aborde de véritables traitements de haut niveau. Les méthodes se limitent aux deux descripteurs de bas niveau, les contours et les formes circulaires. Nous avons ajouté un traitement de niveau supérieur afin de renforcer la robustesse de la détection. Il s'agit de l'auto-validation qui exploite des descripteurs spécifiques aux produits.

A. Extraction des contours et reconnaissance de cercles candidats

Cette première étape consiste en l'application d'un Filtre de Canny suivi d'une Transformée de Hough.

1. Le Filtre Canny (FC)

La procédure dépend du produit traité, les images et des MNT estompés ou bruts.

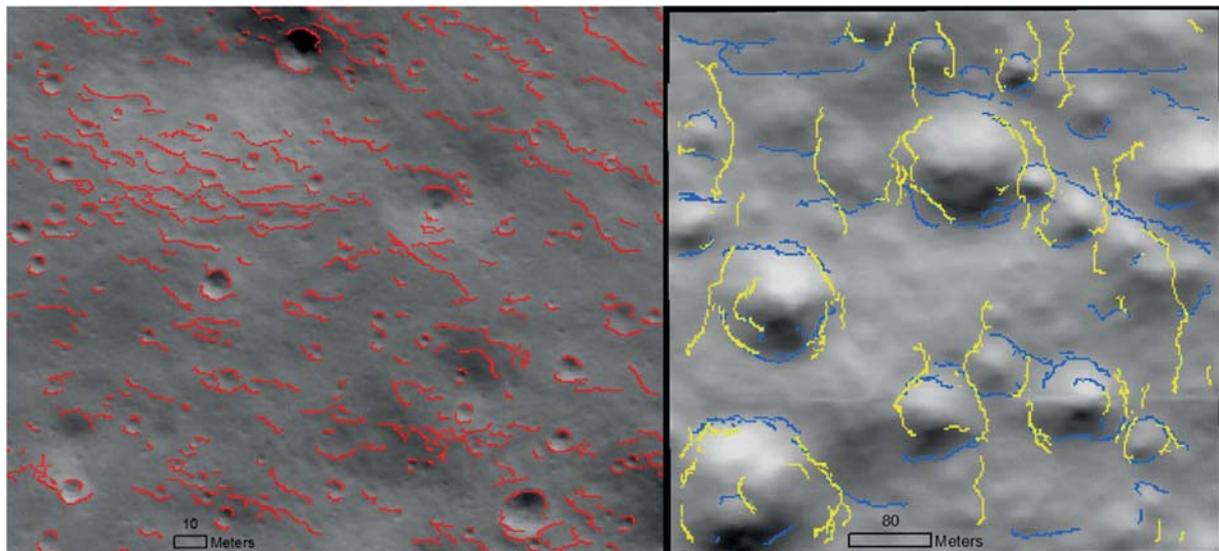


Figure 1. Masque des contours de Canny pour les méthodes image (à gauche) et par estompage (à droite) au terme de la sixième et dernière étape du FC. A gauche, les contours sont ceux des structures circulaires ayant un rayon entre 2,75 (5 pixels de 0,55 cm, résolution de l'orthoimage utilisée) et 5,5 m (10 pixels). A droite, ce sont ceux des structures ayant un rayon entre 20 et 30 m qui résultent de la fusion entre deux masques de contours directionnels, vertical (jaune) et horizontal (bleu).

a. Traitement des images

Parmi les différents détecteurs de contours utilisés en détection des cratères sur les images panchromatiques, le FC semble produire de meilleurs résultats (Knezevic *et al.*, 2008, Troglia *et al.*, 2009) car il vérifie les 3 critères de performance évoqués par Canny (1986): (1) bonne détection, faible taux d'erreur dans la signalisation des contours; (2) bonne localisation, minimisation des distances entre les contours détectés et réels; (3) clarté de la réponse, une seule réponse par contour. Nous l'avons implémenté.

Notre algorithme opère en 6 étapes : (1) lissage gaussien afin de réduire le bruit, (2) filtrage spatiale avec un opérateur « gradient » ou « laplacien », (3) suppression des non-maxima locaux du gradient, (4) extraction des contours candidats en éliminant les limites d'ombre au niveau des maxima locaux du gradient, (5) seuillage des contours candidats par hystérésis, (6) suivi des contours candidats aboutissant au masque des contours de Canny (Figure 1).

L'opérateur préconisé par Canny à la deuxième étape est le « gradient ». Sur les images planétaires, Juneja & Sandhu (2009) constatent qu'il fournit de meilleurs résultats que l'opérateur « laplacien » car il est moins sensible au bruit et plus aux faibles contours. Comme le suggère Negrete (2002), nous avons utilisé l'opérateur de Sobel.

b. Traitement des MNT

Pour la méthode par estompage, nous appliquons la même procédure que pour la méthode *image* car

l'estompage présente des caractéristiques similaires aux images planétaires mais sans ombres portées. Ce traitement est appliqué à deux produits estompés horizontalement et verticalement donnant lieu à deux masques des contours avec des contours verticaux et horizontaux respectivement. Le masque final de Canny résulte de leur union (Figure 1).

Par contre, le détecteur de contours de la méthode morphométrique adapte le FC aux spécificités du MNT brut en utilisant les dérivées secondes partielles dans 4 directions (O-E, SO-NE, S-N et SE-NE) à la place du gradient. En extrayant les minima-locaux de chaque dérivée seconde partielle négative de la surface représentée par le MNT, nous mettons en évidence les convexités en profil localement maximales pour obtenir les contours candidats (Figure 2). Ensuite, un seuillage par hystérésis faisant office de contours directionnels est appliqué à ces minima locaux. Finalement, les contours des structures sur le MNT sont représentés par l'union des 4 contours directionnels.

2. La Transformée de Hough (TH)

Après avoir appliqué le FC, la reconnaissance des cercles candidats dont la circonférence apparente est décrite par les pixels appartenant aux contours de Canny est mise en œuvre en appliquant la TH. Elle est robuste vis-à-vis des discontinuités des structures telles que les *rims* des cratères. La TH est une technique de reconnaissance de formes à partir d'un échantillon de points lui appartenant. A partir de 1972, la TH s'est généralisée pour toute forme définie par son équation analytique (Duda et Hart, 1972 *in* Ballard, 1981).

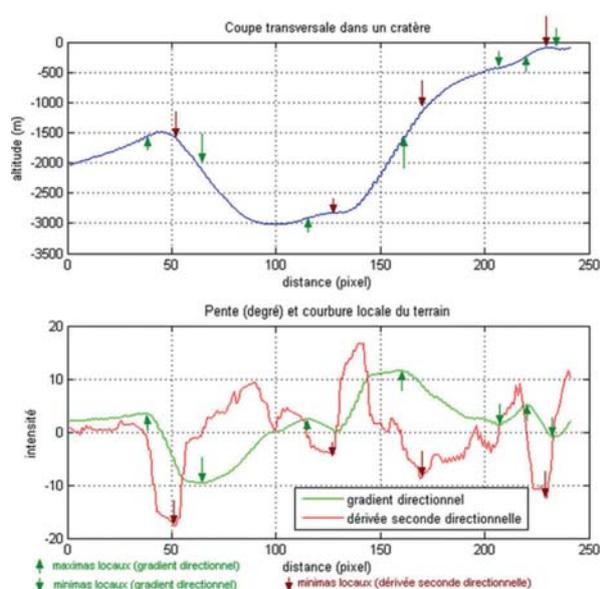


Figure 2. Intensité de la pente (gradient partiel) et de la courbure (dérivée seconde partielle) selon une direction sur une coupe radiale d'un cratère. Ces deux quantités sont calculées sur un extrait du MNT LOLA dégradé spatialement (résolution spatiale de 270 m).

Il s'agit d'un changement d'espace de l'espace image vers l'espace des paramètres de l'équation, appelé « espace de Hough » ou « totaliseur ». Le nombre de dimensions de ce dernier est fonction du nombre de paramètres nécessaires pour la formulation de cette équation, soit 2 pour la droite, 3 pour le cercle, 5 pour l'ellipse...

Nous avons appliqué la TH à 3 paramètres étant donné que la majorité des cratères sont de forme grossièrement circulaire provoquée par l'impact quasi-vertical d'une météorite. En effet, seulement 5 % des cratères lunaires ont une excentricité supérieure à 0,4166 (Bottke *et al.*, 2000). Il s'agit le plus souvent de cratères secondaires de taille réduite provoqués par l'impact de blocs éjectés lors d'un impact de météorite et dont la trajectoire est oblique. Certaines méthodes utilisent comme géométrie de référence une ellipse pour des images non orthorectifiées avec distorsions dues au relief (Kim *et al.*, 2005) ou saisies avec forte obliquité. Certaines déformations peuvent être dues à la projection cartographique utilisée, ce que nous avons évité en exploitant une projection conservant les formes.

Le totaliseur est une matrice à 3 dimensions, les coordonnées images et le rayon du cercle. Il est construit de manière itérative en fonction du rayon et en accumulant les « cercles de contours » pour chaque pixel de l'image (Figure 3) en exploitant l'algorithme suivant :

- Boucle décroissante sur le rayon
- Boucle parcourant les pixels des contours du FC

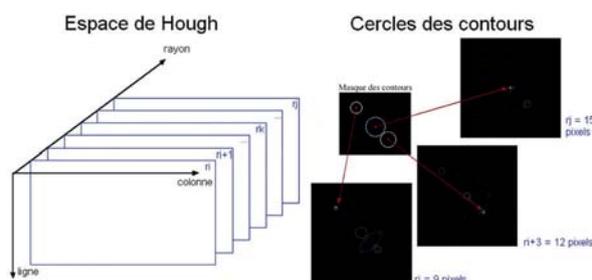


Figure 3. Représentation des 3 dimensions du totaliseur (ligne, colonne et rayon). Les images des « cercles de contours » représentent l'intensité d'accumulation (fréquence) des cercles centrés sur les pixels appartenant aux contours du masque initial. Les valeurs des pics de fréquence ou maxima d'accumulation (flèches rouge) dépendent du nombre de pixels appartenant aux contours dans le masque des contours. Ainsi un cratère de rayon dans l'espace image avec une circonférence apparente complète sur le masque de Canny correspondra à un maximum d'accumulation de dans l'espace du totaliseur

- i. création de cercles dans le totaliseur (« cercles de contours »)
 - ii. accumulation des pixels appartenant à ces cercles dans le totaliseur
- Recherche de maxima locaux sur l'image des « cercles de contours » pour un rayon donné à l'aide d'une fenêtre de convolution de largeur égale au diamètre des cercles recherchés. Sont alors définis la position du centre des cercles dans l'espace image (maximum d'accumulation), leur rayon et le pourcentage de leur circonférence apparente (fréquence du maximum d'accumulation).
 - Suppression des contours dilatés appartenant à la circonférence des cercles détectés dans le masque des contours de Canny.

Nous avons optimisé notre implémentation par dilatation du masque des contours de Canny, suppression progressive des contours dans ce masque et dégradation de la résolution de ce masque.

- a. Optimisation par dilatation du masque des contours de Canny

Les contours du FC ont peu de chance de correspondre parfaitement à un cercle car les cratères sont des formes naturelles soumises à des processus de dégradation morphologique produisant des irrégularités locales des rims. Par ailleurs, certains peuvent avoir une forme elliptique à faible excentricité. Une manière de pallier ces inconvénients est la dilatation des contours pour qu'il soit possible d'ajuster l'équation d'un cercle passant par ces contours dilatés. Cette dilatation est appliquée par traitement morphologique en remplaçant dans une fenêtre de convolution 3x3 la valeur centrale par le maximum. Elle est symétrique et a peu

d'influence sur la localisation des cercles détectés. Par contre, elle peut avoir une influence sur l'acuité du pic de fréquence du totalisateur. En appliquant une largeur de dilatation de $r/5$, avec r , le rayon des cercles, l'opérateur de Hough tolère une excentricité maximale des cratères de 0,575.

b. Optimisation par suppression progressive des contours dans le masque de Canny

Une procédure de suppression progressive dans le masque de Canny des contours des cercles reconnus est mise en place afin de réduire le bruit pour la recherche des maxima dans le totalisateur. Ce procédé permet d'éviter l'utilisation d'un même pixel du contour pour plusieurs cratères de tailles différentes dans le totalisateur, car la recherche des maxima se fait du plus grand au plus petit rayon. De plus, l'opérateur est d'abord sensible aux cratères de forme fraîche (haut taux de circonférence représenté dans le masque de Canny et bonne circularité en plan) et puis aux cratères aux formes les plus altérées.

c. Optimisation par dégradation de la résolution du masque des contours de Canny

Le nombre de calculs impliqués dans la TH est d'autant plus important que la résolution est fine par rapport à les tailles des structures recherchées et que le nombre de paramètres de l'équation analytique recherchée est élevé. Nous avons donc optimisé notre procédure en dégradant le masque des contours de Canny pour les grands cratères de manière à réduire leur taille en pixels tout en conservant leur forme en appliquant un coefficient de réduction identique en ligne et en colonne.

Aucune information du masque de Canny original n'est perdue lors de la dégradation étant donné que cette opération est réalisée par rééchantillonnage au plus proche voisin. Cependant, il y a accroissement de l'incertitude de position et de taille proportionnel au facteur de dégradation. Relativement à la taille des cratères, cette incertitude reste cependant constante.

Les cercles ainsi reconnus sont des structures candidates « cratères » qui sont ultérieurement soumis à une procédure d'auto-validation.

B. Auto-validation des cercles candidats en tant que cratères

L'auto-validation des cercles en tant que cratères est une interprétation sémantique automatique à l'aide de descripteurs géométriques spécifiques au type de produit traité. L'apport de ces descripteurs spécifiques est indispensable, étant donné que la géométrie circulaire des contours n'est pas suffisante pour

qualifier un cercle de « cratère ».

Cette opération consiste à comparer la valeur de chaque descripteur spécifique mesurée sur les cercles candidats à une gamme de valeurs de référence obtenue après paramétrisation. Le non-respect d'une des conditions est suffisant pour ne pas valider le cercle comme cratère. En plus des descripteurs spécifiques, cette opération utilise le taux de circonférence apparente des cercles candidats représentés par les contours de Canny leur appartenant.

La présentation de descripteurs spécifiques à chaque produit et leur paramétrisation font l'objet de sections suivantes.

1. Descripteurs spécifiques au traitement des images et MNT estompé

Les descripteurs spécifiques au traitement des images et du MNT estompé peuvent être mesurés soit directement sur l'image initiale, soit sur un masque intermédiaire construit spécifiquement pour l'auto-validation. Nous distinguons le descripteur des arcs (non utilisé dans la méthode par estompage), le descripteur de « profondeur » du cratère et le descripteur des limites d'ombres portées et « ruptures de pente » positives dans la direction du rayonnement à l'intérieur du cratère.

a. Le descripteur des arcs

Sur ces produits, les cratères se caractérisent par un couple d'arcs à concavité en plan opposée (face ou opposée au soleil) se faisant face et allongés perpendiculairement à la direction du rayonnement (Figure 4). Cette information est exploitée à travers un masque de ces deux types de contours extraits des contours des structures à la 3^{ème} étape du FC. Nous mesurons ce descripteur pour chaque cercle candidat

$$2Arcs_prop = 1 - \frac{BA1}{BA2} \text{ (équation Arc}_1\text{)}$$

$$\text{avec } BA2 > BA1$$

$$BonArc_MauvaiArc_Prop = \frac{BA}{BA + MA} \text{ (équation Arc}_2\text{)}$$

$$\text{avec } BA = BA1 + BA2 \text{ et } MA = MA1 + MA2$$

$$AutreContour_BonArc_Prop = \frac{AutreC}{AutreC + BA} \text{ (équation Arc}_3\text{)}$$

$$\text{avec } BA = BA1 + BA2$$

via les trois équations suivantes :

Les pixels du masque participant à la circonférence du cercle candidat et appartenant aux deux types d'arcs sont qualifiés de Bons Arc (BA) ou Mauvais Arcs (MA) selon leur orientation par rapport au soleil et au centre du cercle candidat (Figure 4). Dans les équations ci-dessus, BA représente le nombre de pixels bien orientés et MA , le nombre de pixels mal orientés et sont respectivement les contours de type 1, concavité en

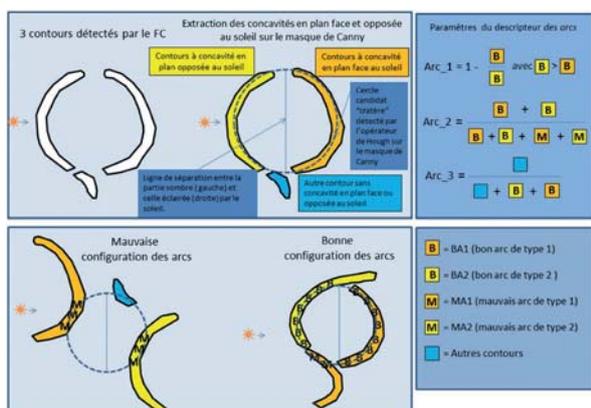


Figure 4. Illustration des paramètres calculés pour le descripteur des arcs spécifique au traitement des images (Arc_1, Arc_2 et Arc_3). En bas de la figure est schématisé, l'ajustement de cercles candidats sur des contours pour lesquelles les paramètres sont en accord et en désaccord avec la signature d'un cratère.

plan face au soleil, et 2, concavité en plan opposée au soleil, ayant une bonne orientation. *Autre C* représente le nombre de pixels appartenant aux autres contours ayant une concavité en plan nulle.

Le premier paramètre, $2Arcs_{Prop}$, permet de vérifier la participation à la circonférence des deux types d'arcs correctement orientés. Le deuxième paramètre, $BonArc_MauvaisArc_{Prop}$, est le rapport entre nombre de pixels appartenant à la circonférence ayant une bonne et une mauvaise orientation. Enfin, le dernier paramètre, $AutreContour_BonArc_{Prop}$, détermine le taux de pixels ayant une concavité nulle (*AutreC*) par rapport aux contours bien agencés et sans concavité (*BA* et *AutreC*) participant à la circonférence.

b. Le descripteur « profondeur » du cratère

Ce descripteur est représenté par une variation d'intensité dans la direction du soleil à l'intérieur de chaque cercle. Le terme « *profondeur* » ne fait donc pas référence à l'altitude et peut être mesuré directement sur l'image ou le MNT estompé en imposant une différence strictement positive entre la moyenne des intensités de la zone éclairée d'adret et de celle des intensités de la zone sombre d'ubac de chaque cercle candidat (Figure 5).

c. Le descripteur limites d'ombres portées et « ruptures de pente » positives dans la direction du rayonnement à l'intérieur du cratère.

Ce descripteur se calcule sur un masque intermédiaire de limites d'ombre portée et des ruptures de pente positives dans la direction du rayonnement solaire. Ces entités sont représentées par des lignes perpendiculaires à la direction du soleil. Il se mesure par la proportion du nombre de pixels sélectionnés dans le masque précédant

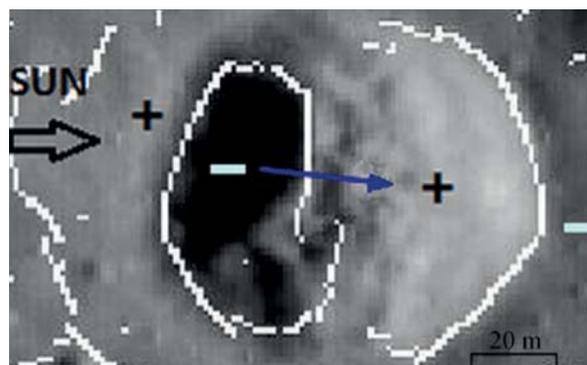


Figure 5. Extrait de l'image NAC M103009475RE centré sur un cratère illustrant deux zones (versants ubac et adret pour les parties respectivement sombre et éclairée). Les signes (positifs et négatifs) représentent l'intensité radiométrique relative entre ces deux zones. Les pixels en blanc correspondent aux contours extraits par le FC sur l'image.

et inclus dans un corridor allongé perpendiculairement au rayonnement solaire à l'intérieur de chaque cercle candidat par rapport au diamètre du cratère. Le terme « rupture de pente » fait donc référence à la variation d'intensité et pas à celle de l'altitude.

2. Descripteurs spécifiques au traitement morphométrique du MNT

L'auto-validation des cercles obtenus par traitement morphométrique du MNT exploite les descripteurs profondeur du cratère en altitude ainsi que convergence des pentes, concavités en profil et profondeur des concavités en profil à l'intérieur du cratère. Notons que la méthode par estompage utilise ces mêmes descripteurs ainsi que ceux spécifiques au traitement des images à l'exception du descripteur des arcs.

a. Le descripteur profondeur du cratère en altitude

La profondeur est calculée sur le MNT par différence entre les altitudes du périmètre et celles du centre du cercle candidat. La première est calculée par agrégation spatiale en prenant la moyenne des altitudes dans un corridor de largeur égale à 2 % du rayon construit sur la circonférence. L'altitude du centre est l'altitude moyenne dans une zone circulaire positionnée au centre de rayon égal à la moitié du rayon du cercle candidat.

b. Le descripteur convergence des pentes à l'intérieur du cratère

La convergence des pentes est calculée à l'intérieur de chaque cercle candidat par la proportion entre les pixels « convergeant » et « non convergeant ». Etant donné que les pentes sont altérées par des imperfections du MNT, nous mesurons la convergence des pentes sur des pentes discrétisées en 4 classes (SO-NE / SE-NO / NE-SO / NO-SE).

c. *Le descripteur concavité en profil à l'intérieur du cratère*

Les cratères sont des dépressions fermées qui présentent des concavités en profil. Pour les décrire, nous utilisons le masque des concavités maximales en profil extraites par le FC adapté au MNT en prenant les maxima locaux des 4 dérivées secondes partielles (Figure 6). Ensuite, nous vérifions la présence de pixels appartenant à une concavité maximale en profil à l'intérieur de chaque cercle candidat en prenant leur proportion fonction de la surface du cercle.

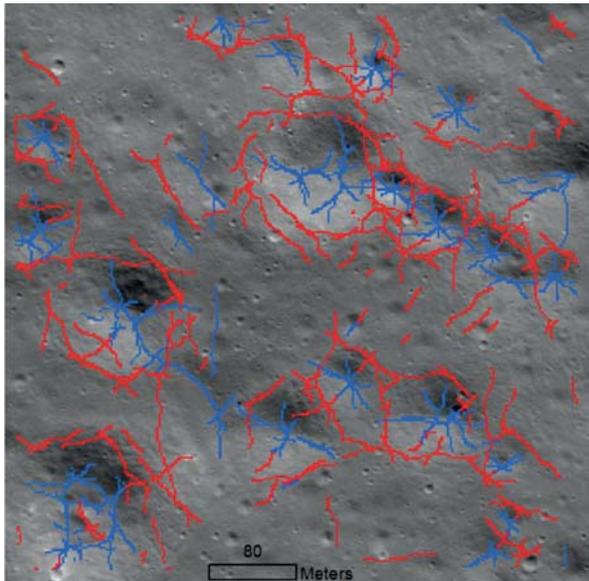


Figure 6. Extraction des convexités (rouge) et des concavités (bleu) en profil sur le MNT LOLA. Les convexités en profil sont détectées par le FC. Deux descripteurs spécifiques au traitement du MNT utilisent les concavités en profil à savoir la concavité en profil à l'intérieur du cratère et la profondeur des concavités en profil à l'intérieur du cratère. Les structures illustrées sont celles exploitées pour les descripteurs des cratères de 15 à 20 m. Le fond de carte est une image NAC.

d. *Le descripteur concavité en profil à l'intérieur du cratère*

La profondeur en altitude des concavités en profil à l'intérieure de chaque cercle candidat est définie par la différence entre l'altitude moyenne du corridor longeant sa circonférence et dont la largeur vaut 2 % du rayon et l'altitude moyenne des pixels appartenant à une concavité en profil à l'intérieur de ces cercles.

3. Paramétrisation des descripteurs spécifiques

La paramétrisation des descripteurs spécifiques est une étape importante de l'auto-validation consistant à fixer des valeurs seuils pour chaque descripteur. Les cratères lunaires sont des dépressions fermées dont l'état de « fraîcheur » et la typicité varient en fonction de leur

âge et mode de formation (Wood, 1973, Pike, 1977 et French, 1998). Chaque cratère se différencie donc au niveau de la morphométrie.

Pour tenir compte de ce facteur auquel les méthodes de détections sont sensibles, nous avons évalué leur forme par trois paramètres : le niveau de circularité en plan de la *rim*, la continuité de la *rim* et son maximum de convexité en profil. Ensuite, nous avons défini différents niveaux de paramétrisation des descripteurs spécifiques. Les premiers niveaux de paramétrisation sont adaptés aux cratères présentant la morphologie la plus « fraîche » et typique mise en évidence par un haut taux de circonférence apparente de la *rim*, une bonne circularité en plan, une nette rupture de pente au pied des versants internes, la bonne convergence des pentes de ce ceux-ci... Les derniers niveaux de paramétrisation ciblent les cratères ayant les formes les moins « fraîches » et typiques.

Les premiers niveaux de paramétrisation traduisent une signature morphologique parfaite des cratères. Au final, nous pouvons associer un niveau de fiabilité de détection à chaque niveau de paramétrisation de 1 (haut niveau de fiabilité) à 4 (faible niveau de fiabilité). Les cratères des premiers niveaux sont détectés avant les cratères des derniers niveaux et leurs contours sont supprimés au fur et à mesure car il est indispensable de privilégier les cercles dont la signature est la plus typique.

IV. RÉSULTATS ET VALIDATION

Une première procédure de validation permet de comparer les performances de la détection pour les 3 méthodes automatiques sur base d'une VT construite visuellement sur la zone de « Kugler » (103.554°E, 53.618°S). Un des produits exploités est une partie de l'image *NACMI26248295RE*. Seuls les cratères entièrement dans la zone couverte par cette partie constituent la VT (Figure 7). La procédure utilise 3 paramètres calculés à partir d'une matrice de confusion (Tableau 1): les taux de concordance (bonne détection ou exactitude), non-détection (erreur) et fausse détection (erreur). Ces taux sont exprimés relativement au nombre d'objets de la VT (exactitude et erreur du producteur) ou du résultat de la détection automatique (exactitude et erreur de l'utilisateur). Les détections correctes (concordance) doivent avoir leur centre inclus dans un cratère de la VT avec une tolérance sur

		Vérité Terrain (VT)	
		0	1
Méthode validée	0	/	Non-détection
	1	Fausse alarme	Concordance

Tableau 1. Matrice de confusion - les chiffres 0 et 1 correspondent respectivement à l'absence et à la présence de cratères.

la localisation du centre de 40 % du rayon. De plus, le rayon du cratère détecté doit être dans l'intervalle 0,6 à 1,4 fois le rayon de la VT.

Une seconde procédure de validation concerne l'incertitude sur la position et le diamètre des cratères détectés par les 3 méthodes. Cette incertitude est mesurée par la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error* - RMSE) et résulte de l'inexactitude (biais) et de l'imprécision respectivement mesurées par l'erreur signée moyenne et l'écart-type de l'erreur signée. Etant donné que la position est définie par un couple de coordonnées, les erreurs signées en X et Y peuvent être combinées pour définir un vecteur-erreur pour chaque observation et l'anisotropie de l'erreur de position peut aussi être quantifiée.

A. Performances de la détection

1. Méthode image

La figure 7 montre l'échantillon de référence (VT) et les cratères détectés par les 3 méthodes. Le tableau 2 présente la matrice de confusion de la méthode image. Les fréquentes fausses-détections sont dues à la présence de contours du FC non assimilables à des *rims* suite au seuillage inadapté du module du gradient ou à la présence d'un relief avec des ruptures de pente nettes au tracé similaire à une *rim*. Au nombre de 480, elles représentent 67,1 % des objets reconnus comme cratères et 54,6 % ou 188,2 % des cratères de la VT selon que l'on conserve ou élimine de la validation les petits cratères non détectables par la procédure automatique. Cette élimination due aux limites de la méthode se justifie car, sur une image, la géométrie circulaire et la concavité opposée du couple d'arcs du modèle « cratère » ne sont pas reconnaissables en dessous d'un rayon de 5 pixels (2,75 m). Les petits cratères peuvent en effet être induits par le bruit qu'un filtre « passe-bas » adapté à la taille des structures analysées a néanmoins tenté d'atténuer. De plus, ils sont aussi marqués par un plus faible contraste nécessitant une diminution de la

valeur du seuil du détecteur de contours (contours à concavité en plan opposée au soleil non détectés par le FC sur la figure 8C). Par ailleurs, les nombreuses fausses détections sont aussi dues à l'absence de petits cratères ou de cratères aux formes moins fraîches dans la VT. Parmi ces derniers, certains ont été détectés par notre procédure (Figure 8E).

Nous observons un grand nombre de non-détections soit 644 cas. Ceci concerne une grande partie des cratères de la VT de un rayon inférieur à la limite de la méthode (2,75 m). En effet, leur fréquence se réduit à 71 cas en éliminant ces petits cratères. Il s'agit généralement de cratères à structure peu marquée ne respectant pas les conditions de paramétrisation de l'auto-validation.

Si les petits cratères sont éliminés de la validation, les concordances de l'utilisateur et du producteur atteignent respectivement à 25,7 et 72,2 %. Les résultats du FC ainsi que l'extraction de leurs concavités en plan opposées montre qu'il est envisageable de descendre sous la limite théorique de rayon minimum. Les figures 8A, 8B et 8F, montrent en effet des cratères de taille inférieure à cette limite, soit 5 pixels, dont deux contours (*rims*) et leur concavité en plan opposées ont été détectés correctement par le FC. Il serait donc possible d'améliorer la concordance pour les petits cratères sans nécessairement augmenter le taux de fausses alarmes mais à condition d'améliorer aussi la qualité de la VT pour ces petits cratères. Néanmoins, sous ce rayon des 5 pixels, l'opérateur de Hough devient trop sensible au bruit du masque de Canny et assimile des contours de Canny à géométrie quasi-carrée à des cercles, même si les descripteurs spécifiques à l'image, en particulier celui des arcs, ont pour rôle d'améliorer la signature du cratère sur les images.

Par l'analyse de l'efficacité de notre procédure pour les grands cratères, on constate que la majorité des cratères de rayon supérieur à 15 mètres présentent une *rim* peu marquée à faible convexité en profil du fait de la faible pente des versants. Cela produit un accroissement possible des non-détections et une réduction concomitante de la concordance

		Vérité terrain (VT)						Nombre de détection	
		0			1				
		/			Tous les cratères		Élimination cratères de rayon $\leq 2,75$ m		
Méthode image	0							644/715 90,1%	644/879 73,3%
	1	480/715 67,1%	480/879 54,6%	480/255 188,2%	235/715 32,9%	235/879 26,7%	184/715 25,7%	184/255 72,2%	
Nombre de cratères dans la VT					879		255		

Tableau 2. Matrice de confusion en valeurs absolues et pourcentages pour la méthode image (image M126248295RE site de « Kugler »). Valeurs surlignées en gris : erreurs (non-détections – fausses détections) et exactitude (concordance) de l'utilisateur. Autres valeurs : erreur et exactitude du producteur. Ces valeurs sont fournies avant et après suppression des petits cratères de la Vérité Terrain (879 cratères de la VT dont 255 plus grands que 2,75 m de rayon)

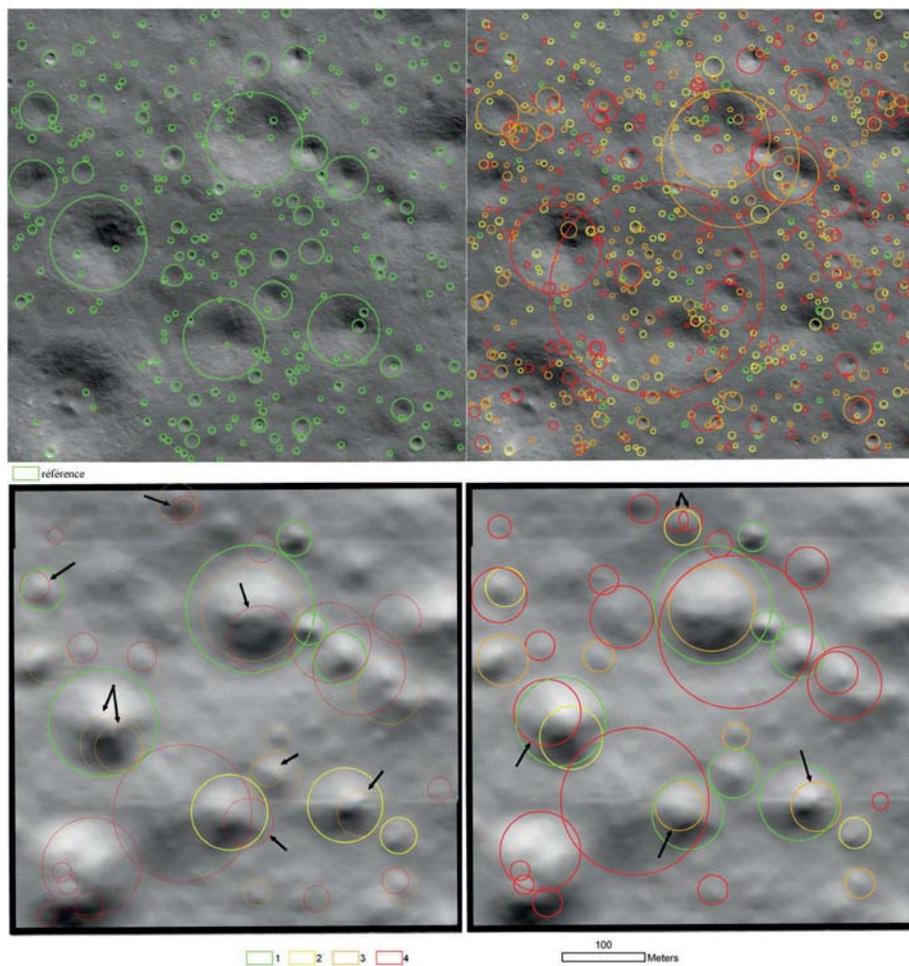


Figure 7. Echantillon de la Vérité Terrain constituant la référence (en haut à gauche), cratères détectés par la méthode image (en haut à droite), la méthode morphométrique (en bas à gauche) et la méthode par estompage (en bas à droite) avec leur niveau de fiabilité en couleur (de 1 = le plus fiable à 4 = le moins fiable). Les deux premiers niveaux sont considérés comme fiables contrairement aux deux autres pour lesquels le risque de fausses détections est plus élevé. En fond de « carte » en haut : extrait de l'image M126248295RE utilisé pour la validation des méthodes (1000 x 1000 pixels, 103,554°E, 53,618°S, résolution spatiale de 0,55 m, élévation et azimuth solaires: 32° et 25°. En fond de « carte » en bas : le MNT (2 m de résolution) illuminé artificiellement du sud vers le nord. Redondances de détections pour les méthodes traitant le MNT (flèches).

ainsi qu'une délimitation moins précise des *rims* se traduisant par des localisations et rayon imprécis. Par ailleurs, le processus de détection applique un lissage plus important pour les grands cratères. Ainsi, des grands cratères à faibles ruptures de pente dans un relief général très prononcé risquent de ne pas être repérés lors du seuillage avec hystérésis lors du FC. C'est le cas de 2 grands cratères (Figure 8G) non-détectés suite à l'absence de l'arc à concavité en plan face au soleil. Ce problème peut être solutionné en abaissant le seuillage avec hystérésis du module du gradient lors du FC mais avec le risque d'augmenter les fausses-détections.

Le taux de concordance a aussi été calculé par niveau de fiabilité. La classification en 4 niveaux fait partie de l'auto-validation. Elle est indispensable car,

contrairement aux méthodes décrites dans la littérature utilisant généralement des images à résolution plus grossière où les imperfections géométriques des cratères sont moins nettes, la très fine résolution des images apporte un très bon niveau de détail des structures rendant la forme des cratères plus complexe et plus variables vis-à-vis d'un modèle idéal traduit par les différents niveaux de fiabilité. Nous constatons ainsi que les cratères présentant un bon état de « fraîcheur » appartiennent aux deux premiers niveaux de fiabilité (Figure 7). Les deux derniers niveaux contiennent plutôt des cratères à la forme moins « fraîche » mais aussi d'autres structures à la morphologie similaire aux cratères. Ceci implique un plus faible taux de concordance pour les niveaux supérieurs et un plus fort taux pour les niveaux inférieurs (Tableau 3).

Fiabilité	Taux de concordance (utilisateur)					
	Méthode « image »		Méthode « morphométrique »		Méthode « par estompage »	
Niveau 1 (très fiable)	42/65	64,6%	5/6	83%	7/8	87%
Niveau 2	81/202	40,1%	2/3	67%	1/4	25%
Niveau 3	45/243	18,5%	2/12	17%	1/7	14%
Niveau 4 (très peu fiable)	16/205	7,8%	0/21	0%	0/21	0%
Total	184/715	25,7%	9/40	22%	9/40	22%

Tableau 3. Taux de concordance calculés en fonction du nombre de cratères détectés (concordance de l'utilisateur) dans chaque niveau de fiabilité pour les 3 méthodes automatiques de détection

La performance de la détection décroît donc avec la fiabilité liée à la « fraîcheurs » et à la typicité des formes.

2. Méthode morphométrique et par estompage

Le MNT exploité par les méthodes morphométriques et par estompage a une résolution de 2 m plus grossière que l'image. La taille des plus petits cratères détectables est donc de 10 m. Pour la validation, nous avons ainsi éliminé de la VT tous les cratères de rayon inférieur à 10 m. Notons que la majorité des cratères de la VT restitués visuellement sur l'image, soit 858 sur 879, ont un rayon inférieur à 10 m. La validation pour les méthodes MNT repose donc sur 21 cas. La faible représentativité de cet échantillon rend donc l'évaluation des performances peu pertinente.

La méthode morphométrique produit de nombreuses fausses détections dues aux faux contours du FC résultant du bruit du MNT et des non-détections moins fréquentes (Tableau 4). Les concordances de l'utilisateur et du producteur atteignent respectivement 21 et 42 %. Les constatations pour la méthode par estompage sont très comparables à la méthode morphométrique.

Pour les 2 méthodes, nous observons des détections redondantes principalement pour les détections à faible fiabilité suite au faible taux de circonférence proche de 0,5 (Figure 7). Elles sont tangentes en un seul point de la rim de la VT et leur rayon est inférieur de celui de

cette VT. Ceci est moins fréquent pour la méthode image grâce au descripteur des arcs qui exige la présence d'un couple de contours d'arcs à concavité en plan se faisant face qui n'est pas utilisé par les méthodes exploitant un MNT. Celles-ci détectent également certains cratères qui ne sont pas repris dans la VT car ils ne sont pas entièrement dans la zone test. Leur taille est généralement grande mais le rayon détecté est plus petit que le rayon réel (Figure 9). Il s'agit là des principales raisons d'un taux de fausses détections relativement élevé.

Certains cratères n'ont pas été reconnus par les méthodes morphométriques et par estompage car leur signature morphologique n'est pas typique. La convexité en profil de leur rim est trop faible par rapport aux autres cratères. Ainsi, la rim de certains cratères n'apparaît pas dans le résultat le FC adapté au MNT (Figure 9). C'est une des raisons majeures de la valeur du taux de non-détections.

Comme pour la méthode image, les deux méthodes exploitant un MNT montrent un taux de concordance de l'utilisateur qui décroît avec la fiabilité (Tableau 3). Une correction de la paramétrisation des descripteurs pour les deux derniers niveaux se justifierait donc.

		Vérité terrain (VT)				Nombre de détections
		0		1		
Méthode morphométrique	0			12/42 28,6%	12/21 57,1%	42
	1	33/42 78,6%	33/21 157,1%	9/42 21,4%	9/21 42,9%	
Nombre de cratères dans la VT		21				
Méthode par estompage	0			12/40 30,0%	12/21 57,1%	40
	1	31/40 77,5%	31/21 147,6%	9/40 22,5%	9/21 42,9%	
Nombre de cratères dans la VT		21				

Tableau 4. Matrices de confusion obtenues pour les méthodes traitant un MNT (morphométrie et estompage). En gris : erreurs et concordance de l'utilisateur. Autres valeurs : erreurs et concordance du producteur. Seuls, les cratères de plus de 10 m, seuil minimum de détection, sont conservés.

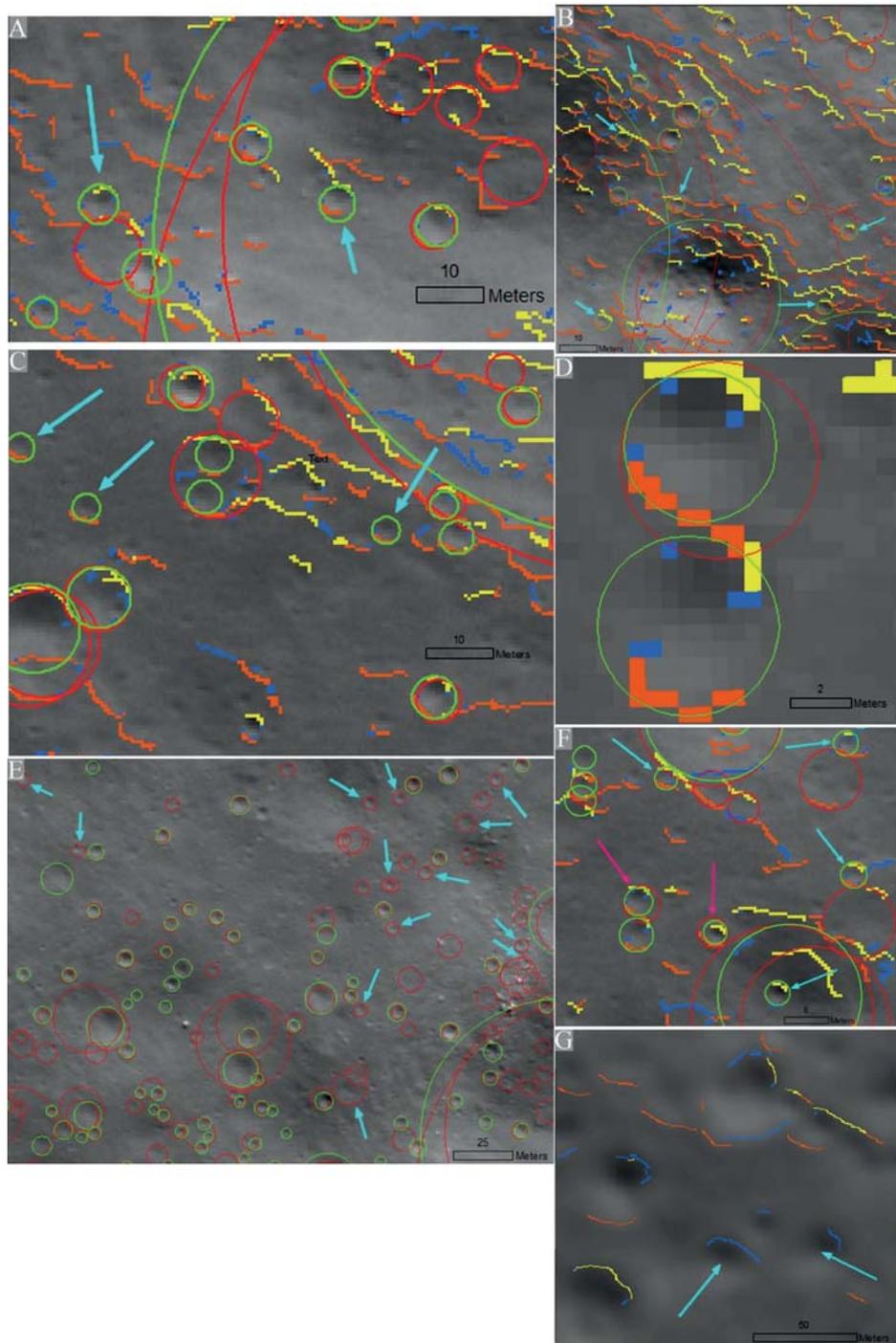


Figure 8. Résultats de la détection par la méthode image. Cratères détectés (cercles rouges); cratères de la VT (cercles verts); contours extraits par le FC avec concavité en plan exposée au soleil (orange) et opposée au soleil (jaune) correspondant parfois à de plus petits cratères, contours non concaves en plan des plus petits cratères (bleu). Notons que, sur cette figure, les cratères sous 2,75 m de rayon n'ont pas été éliminés de l'échantillon de référence (cercles verts).

- A et B.** Cratères faisant partie de la VT non détectés à cause d'un rayon inférieur à la limite (2,75 m) et dont la paire de concavités en plan opposées existe dans le masque des contours (flèches cyan).
- C.** Cratères faisant partie de la VT pour lesquelles le contour à concavité en plan opposée au soleil n'a pas été reconnu par le FC (flèches cyan).
- D.** Influence de deux cratères de la VT alignés dans la direction du soleil et influençant l'extraction de la courbure en plan des contours de Canny.
- E.** Structures détectées mais absentes de la VT et alors qu'il s'agit de cratères (flèches cyan).
- F.** Détections qui surestiment le rayon avec un décentrement de la localisation (flèches roses).

B. Incertitude sur la position et le diamètre

Etant donné le petit nombre (21) de cratères exploitables pour valider les méthodes utilisant un MNT, nous avons comparé, pour la méthode image uniquement, les coordonnées du centre et le diamètre des cratères concordant à la VT avec ceux des cratères de cette VT. Concernant la position, on constate un biais positif sur les deux composantes mais plus important en ordonnée (Tableau 5). Cela traduit une position estimée par la procédure automatique décalée vers le sud-sud-ouest par rapport à la référence. Cependant, ce biais de ~ 28 cm est très faible. Par contre, l'imprécision est plus importante, elle est de l'ordre du mètre. C'est elle qui contribue de façon déterminante à l'incertitude. Elle traduit une dispersion importante du vecteur-erreur. Elle est plus importante en abscisse qu'en ordonnée. Ces constatations peuvent aisément être interprétées comme le résultat de l'influence de la position du soleil. Il se trouve au nord-nord-est. La figure 10 met clairement en évidence cette dispersion du vecteur-erreur mais aussi l'effet de la taille de la structure reconnue sur l'incertitude de position. Sur le graphique de gauche représentant les erreurs en mètres, on constate que les grandes structures sont affectées de plus fortes erreurs. Par contre, sur le graphique de droite réalisé à partir des erreurs normalisées par le rayon, la dispersion est équivalente pour les structures de toutes tailles. Bien entendu, cette analyse rend uniquement compte d'une incertitude relative puisque la position des cratères détectés automatiquement a été comparée à celle de cratères restitués visuellement sur la même image. Or l'orientation absolue de la procédure photogrammétrique a été réalisée par rapport au MNT LOLA et son résultat produit une incertitude sur la position dans un référentiel global lunaire qui n'a pas été prise en considération.

Concernant le diamètre, il est, en moyenne, peu biaisé et précis (Tableau 5). Evidemment, les faibles valeurs absolues de biais et imprécision sont fortement influencées par la petite dimension de la majorité des cratères, l'incertitude sur la taille des grands cratères étant en général plus importante. Nous constatons de manière générale une surestimation du diamètre qui peut être justifié par l'ordre de détection dans le processus de reconnaissance de Hough du plus grand aux plus petits cratères. A la figure 8F, le diamètre de deux cratères sous les 2,75 m de rayon ont ainsi été surestimés avec une localisation décentrée.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les trois méthodes implémentées suivent le processus classique des méthodes de reconnaissance d'objets sur les images et MNT qui sont l'extraction de descripteurs de bas niveau et l'interprétation sémantique via un traitement de plus haut niveau. L'auto-validation permet d'apporter un diagnostic sémantique quasi-automatique et suffisamment robuste pour reconnaître les objets « cratères » sur les produits exploités à partir de plusieurs descripteurs de bas niveau.

Pour l'approche image, la difficulté majeure était de trouver des descripteurs les moins sensibles aux conditions d'illumination car les contrastes et donc l'extraction des contours de Canny en dépendent considérablement. Nous avons solutionné ce problème en adaptant le seuillage du module du gradient à la dynamique des images. Par contre, certains descripteurs spécifiques à cette approche image et leur paramétrisation restent partiellement influencés par les conditions d'illumination. Les méthodes d'extraction

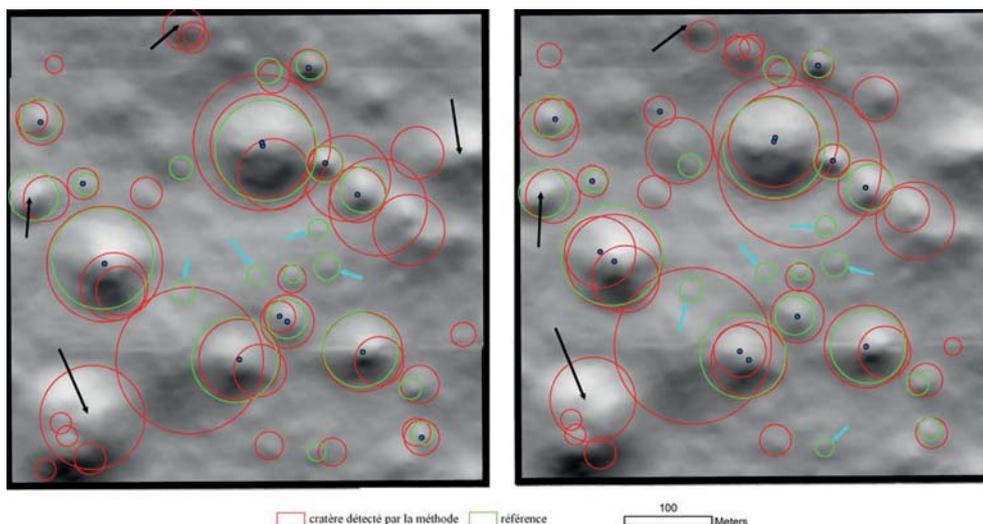


Figure 9. Cratères détectés par la méthode morphométrique (gauche) et par estompage (droite). En vert, les cratères de la VT. En rouge, les cratères détectés par chaque méthode et de rayon supérieur à 10 m. Les points bleus représentent la position des concordances (cratères détectés appariés à la VT). Les flèches noires indiquent le centre de cratères situés au bord de la zone influençant les méthodes. Les flèches cyans indiquent les cratères dont les rims n'ont pas été détectées par le FC.

N=235	X (m)	Y (m)	Diamètre (m)
Erreur signée moyenne (inexactitude - biais)	0,025	0,278	0,083
Écart-type de l'erreur signée (imprécision)	1,097	0,843	0,692
RMSe (incertitude)	1,095	0,886	0,696

Tableau 5. Imprécision, inexactitude et incertitude de position et du diamètre pour les 235 cratères reconnus correctement par la méthode image.

des descripteurs spécifiques aux MNT exploitent des paramètres morphométriques sensibles au relief local. Ainsi, certaines structures de cratères peu marquées dans un relief général accidenté risquent de ne pas être détectées.

Au terme de la validation des méthodes, nous avons constaté une meilleure qualité de détection pour la méthode image que pour les deux méthodes MNT dont les performances sont équivalentes. Cependant, nous sommes convaincus que la méthode par estompage produirait de meilleurs résultats pour tous types de relief grâce au contrôle des hauteurs et directions de la source d'illumination virtuelle. Nous observons un bon taux de concordance de 72 % pour la méthode image. Par contre, il est seulement de 43 % pour les autres méthodes avec cependant un trop faible nombre d'observations et de nombreuses détections multiples. En contrepartie, pour toutes les méthodes, il existe de nombreuses fausses détections appartenant surtout aux niveaux de faible fiabilité. Les diamètres et positions sont par contre estimés par la méthode image de façon assez certaine, mais l'incertitude sur ces paramètres dépend de la taille des cratères.

La paramétrisation des descripteurs *spécifiques* permet d'estimer la fiabilité de chaque détection ce qui constitue une information essentielle dans le cadre d'une mission exploratoire améliorant la validité de l'évaluation

des risques d'alunissage et la qualité des données utilisées pour la navigation visuelle. Il est néanmoins recommandé d'envisager une étude de sensibilité des descripteurs afin d'optimiser l'auto-validation pour chaque niveau de paramétrisation en tenant compte des conditions d'illumination pour l'approche image. Il est en effet difficile de construire une paramétrisation valable sur toute la surface lunaire à partir d'une zone d'essai relativement restreinte.

Pour améliorer les performances de l'approche image, nous envisageons une stratégie multi-images qui consiste à combiner des images avec deux directions solaires orthogonales dans la mesure des possibilités offertes par les archives. La signature des (plus grands) cratères serait renforcée en augmentant la circonférence apparente des cratères décrite par le FC. De plus, la méthode deviendrait opérationnelle pour les cratères sous les 2,75 m en rayon. Cette stratégie multi-image est cependant dépendante des performances de la procédure photogrammétrique du module DEM du projet LandSAfe et notamment de l'orientation absolue n'assurant pas nécessairement une cohérence géométrique suffisante que pour exploiter la résolution très fine des images NAC de LROC. Il serait aussi intéressant d'envisager une stratégie multi-source combinant les approches image et MNT, mais avec les mêmes restrictions.

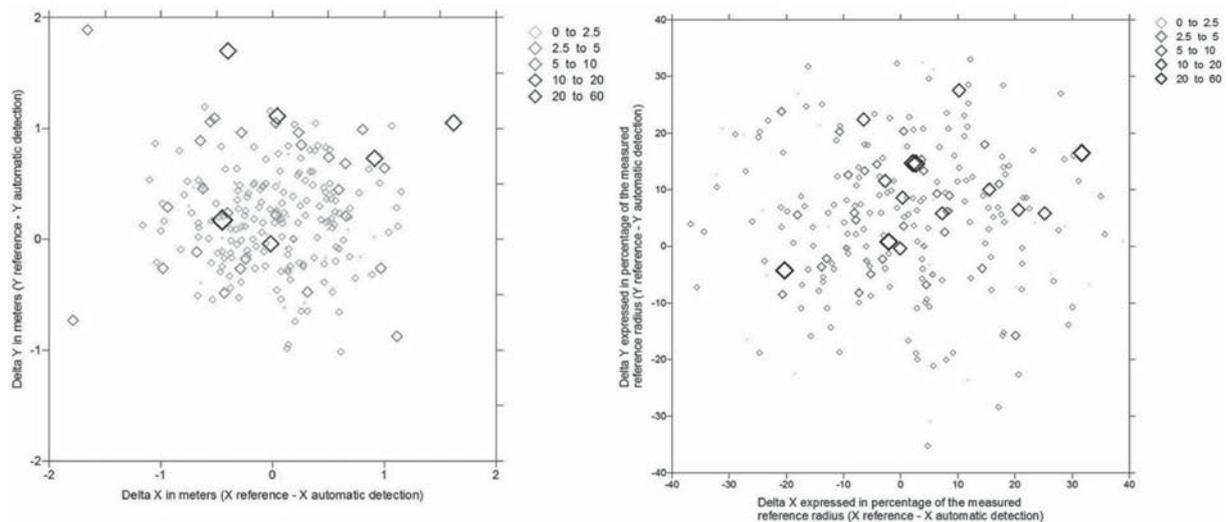


Figure 10. Différence en position planimétrique entre les cratères détectés (235 concordances) et leurs homologues de la VT pour la méthode image. La taille du symbole correspond à 5 classes de rayon. A gauche : vecteurs-erreur en mètres. A droite : vecteurs-erreur exprimés relativement au rayon du cratère. Notons qu'un faible nombre de concordances est en dehors de la figure de gauche (delta x ou y compris entre 2 et 12 m).

BIBLIOGRAPHIE

- Ballard D.H., (1981). Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 13/2, 111–122.
- Bandeira L., Ding W. & Stepinski T.F., (2012). Detection of sub-kilometer craters in high resolution planetary images using shape and texture features. *Advances in Space Research*, 49/1, 64–74.
- Bottke W.F., Love S.G., Tytell D. & Glotch T., (2000). Interpreting the Elliptical Crater Populations on Mars, Venus and the Moon. *Icarus*, 145/1, 108–121.
- Bue B.D. & Stepinski B.D. & Stepinski T.F., (2007). Machine detection of martian impact craters from digital topography data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45/1, 265–274.
- Canny J., (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Analysis and Machine Intelligence*, 8/6, 679–698.
- Cheng Y., Johnson A.E., Mattheis L.H. & Wolf A.A., (2001). Passive Imaging Based Hazard Avoidance for Spacecraft Safe Landing. *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001*, June 18–22, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada.
- Cheng Y., Johnson A.E., Mattheis L.H. & Clark. F.O., (2003). Optical landmark detection for spacecraft navigation. *Proceedings of the 13th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*.
- Deriche R., (1987). Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. *Int. J. Computer Vision*, 1, 167–187.
- Ding W., Stepinski T.F., Bandeira L., Vilalta R., Wu Y., Lu Z. & Cao T., (2010). Automatic Detection of Craters in Planetary Images: An Embedded Framework Using Feature Selection and Boosting. *CIKM '10 Proceedings of the 19th ACM international conference on Information and knowledge management*, 749–758.
- Dobes M., Martinek J., Skoupil D., Dobešová Z. & Pospíšil J., (2006). Human eye localization using the modified Hough transform. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 117/10, 468–473.
- Earl J., Chicarro A., Koeberl C., Marchetti P.G. & Milnes M., (2005). Automatic Recognition of Crater-like Structures in Terrestrial and Planetary Images. *36th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, League City, Texas, abstract no.1319.
- Flores-Méndez A., (2003). Crater Marking and Classification Using Computer. *Computer Science*, 2905, 79–86.
- French B.M., (1998). *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 p.
- Honda R. & Azuma R., (2000). Crater Extraction and Classification System for Lunar Images. *Mem. Fac. Sci. Kochi Univ.*, 21, 13–22.
- Jones B.M. & Howard A., (2006). An imaging technique for safe spacecraft landing and autonomous hazard avoidance. Second IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2006. SMC-IT 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/SMC-IT.2006.15>.
- Juneja M. & Sandhu P. S., (2009). Performance Evaluation of Edge Detection Techniques for Images in Spatial Domain. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 1/5, 1793–8201.
- Kim J.R., Muller J.P & Morley J.G., (2004). Quality assessment of automated crater detection on Mars. *XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, 12–23 July, unpaginated CD-ROM.
- Kim J.R., Muller J.P., Gasselt S., Morley J.G., Neukum G. & HRSC CoI Team, (2005). Automated Crater Detection, A new Tool for Mars Cartography and Chronology. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71/10, 1205–1217.
- Kneissl T., Van Gasslet S., Neukum G., (2010). Map projection independent crater size-frequency determination in GIS environments—New software tool for ArcGIS. *Planetary and Space Science*, 59/11–12, 1243–1254.
- Knezevic H., Salamuniccar G. & Loncaric S., (2008). Crater Detection Algorithms Based on Prewitt, Abdou, Argyle, Macleod, Derivative-of-Gaussian and Canny Gradient Edge Detectors. *39th Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science XXXIX, March 10–14, League City, Texas. LPI Contribution No. 1391.
- Leroy B., Medioni G., Johnson E. & Mattheis L., (2001). Crater detection for autonomous landing on asteroids. *Image and Vision Computing*, 19/11, 787–792.
- Li Z., Zhu Q. & Gold C., (2005). *Digital terrain modeling*. CRC PRESS. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 323 p.
- Magee M., Chapman C.R., Dellenback S.W., Enke B., Merline W.J. & Rigney M.P., (2003). Automated identification of Martian craters using image processing. *34th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, March 17–21, 2003, League City, Texas, abstract no.1756.
- Maître H., (1985). Un panorama de la transformation de Hough. *Traitement du Signal*, 2/4, 305–317.
- Meng D., Yunfeng C. & Qingxian W., (2009). Method of Passive Image Based Crater Autonomous Detection. *Chinese Journal of Aeronautics*, 22/3, 301–306.
- Michael G.G., (2003). Coordinate registration by automated crater recognition. *Planetary and Space Science*, 51/9–10, 563–568.

- Moore E.M. & Twist R.J., (1995). *Tectonics*. Freeman 1ère édition, 415 p.
- Mourikis A.I., Trawny N., Roumeliotis S.I., Johnson, A.E., Ansar A. & Matthies L., (2009). Vision-Aided Inertial Navigation for Spacecraft Entry, Descent, and Landing. *IEEE Transactions on Robotics*, 25/2, 264-280.
- Nacereddine N., Tabbone S., Ziou D. & Hamami L., (2010). Un descripteur efficace pour la reconnaissance des symboles graphiques basé sur la transformée de Radon. *Colloque International Francophone sur l'Écrit et le Document – CIFED*, 201-216.
- Negrete V., (2002). *Crater Image Classification using Classical Methods and Ontologies*, M. Sc. Thesis, University of Houston.
- Pham B.V., Lacroix S., Devy M., Drieux M. & Philippe C., (2009). Visual landmark constellation matching for spacecraft pinpoint landing. *American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA Guidance Navigation and Control Conference*, Chicago (USA), Rapport LAAS N°09743, 13 p.
- Pike R. J., (1977). Size dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon, in *Impact and Explosion Cratering. Planetary and terrestrial implications; Proceedings of the Symposium on Planetary Cratering Mechanics*, Flagstaff, Ariz (A78-44030 19-91) New York, Pergamon Press, Inc., 489-509.
- Poncelet N. & Cornet Y., (2010). Transformée de Hough et détection des linéaments sur images satellitaires et Modèles Numériques de Terrain. *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, 54, 145-156.
- Rajput T., (2011). *Satellite-derived digital topography-based crater boundary detection and attribute measurements by segmentation and moments measure techniques*. Thèse Enschede, Pays-Bas : université de Twente, 57 p.
- Salamuniccar G. & Loncaric S., (2010). Method for Crater Detection From Martian Digital Topography Data Using Gradient Value/Orientation, Morphometry, Vote Analysis, Slip Tuning, and Calibration. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 48/5, 2317-2329.
- Sawabe Y., Matsunaga T. & Rokugawa S., (2006). Automated detection and classification of lunar craters, using multiple approaches. *Advances in Space Research*, 37/1, 21-27.
- Schmidt R., Bostelmann J., Cornet Y., Heipke C., Philippe C., Poncelet N., de Rosa D. & Vandeloise Y., (2012). LandSAFE: Landing site risk analysis software framework. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B4, 505-510.
- Solhaib K., (2002). Canny's Edge Detector: Implementation. <http://suraj.lums.edu.pk> (consulté le 20.10.2011).
- Stöffler D. & Ryder G., (2001). Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units. Chronological standard for the inner Solar System. *Space Science Reviews* 96, 9-54.
- Troglio G., Benediktsson J.A., Moser G., Serpico S.B. & Le Moigne J., (2009). Automatic Extraction of Planetary Image Features. *Third IEEE international Conference on Space Mission Challenges for Information Technology*, 211-215.
- Urbach E. R. & Stepinski T. F., (2009). Automatic detection of sub-km craters in high resolution planetary images. *Planetary and Space Science*, 57/7, 880-887.
- Wang J., Ding W., Fradkin B., Pham C.H., Sherman P., Tran B.D., Wang D., Yang Y. & Stepinski T.F., (2010). Effective classification for crater detection: A case study on Mars. *Cognitive Informatics (ICCI), 2010 9th IEEE International Conference on*.
- Wang Y., Ding W., Yu K., Wang H. & Wu X., (2011). Crater Detection Using Bayesian Classifiers and LASSO. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems, Guilin, Guangxi, China*, <http://kdl.cs.umb.edu/w/publications/>.
- Wood J., (1996). *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. Ph.D thesis, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK, 185 p.
- Wood C.A., (1973). Central peak heights and crater origins. *Icarus* 20/4, 503-506.

Coordonnées des auteurs :

Pierre RENSON,
Nadia PONCELET, et Yves CORNET
Université de Liège,
Département de Géographie,
Allée du 6 août, 17 (B5a), 4000 Liège, Belgique
ycornet@ulg.ac.be

Yannick VANDELOISE
Spacebel s.a.,
Rue des Chasseurs Ardennais, Liège Science Park,
4031 Angleur, Belgique
yannick.vandeloise@spacebel.be

Ralph SCHMIDT
Leibniz Universität Hannover
Institute of Photogrammetry and GeoInformation,
Nienburger Str. 1, 30167, Hannover, Germany
schmidt@ipi.uni-hannover.de