

NUMERO SPECIAL

"Revue de l'Industrie Minérale - Les Techniques"

Imagerie et contrôle optique dans l'industrie minérale.

AVANT PROPOS

Objectifs de ce dossier

Eric PIRARD

L'idée de rassembler au sein d'un même [dossier](#) un ensemble de techniques apparentées au domaine de l'imagerie numérique et du contrôle optique dans l'industrie minérale est relativement peu banale. Nous sommes habitués à entendre parler d'imagerie numérique dans ce qu'il est convenu d'appeler les *nouvelles technologies* ou le *e-business*, mais loin du NASDAQ et de ses soubresauts, on peut s'interroger sur la pénétration réelle de telles technologies dans le monde de l'industrie de base. Comment l'immatériel et le logiciel peuvent-ils contribuer à une meilleure connaissance de nos ressources matérielles ? Comment peuvent-ils participer à une meilleure valorisation de ces ressources.

La lecture de ce dossier des Techniques de la SIM devrait permettre à chaque industriel de mieux appréhender les potentialités offertes par ces technologies, de mieux évaluer les perspectives de développement qui se profilent à l'horizon des prochaines années, de mieux comprendre les contraintes liées à l'innovation.

Le lecteur sera peut-être surpris de retrouver côte à côte des techniques aussi différentes que la télédétection, la géophysique ou le contrôle en ligne. Pourtant, dans la perspective « imagerie et contrôle optique » la filiation entre toutes ces technologies nous est apparue comme essentielle.

Qu'il s'agisse de couvrir l'ensemble d'une concession ou d'explorer les propriétés microscopiques de la matière, les techniques d'imagerie ont fondamentalement recours aux mêmes outils.

C'est pourquoi, après une nécessaire introduction à quelques principes de base de l'imagerie numérique, ce numéro passe en revue un ensemble de techniques et leurs applications depuis le stade de l'exploration des ressources minérales, jusqu'au stade du contrôle de qualité en laboratoire en passant par l'abattage, le transport, la préparation et le tri des matières minérales les plus diverses.

Loin d'être exhaustif, ce dossier se veut avant tout introductif et pratique. L'objectif est d'initier le lecteur aux principes de base de chaque technologie, de lui faire percevoir les potentialités et de le guider dans le choix des techniques pertinentes. Face à une évolution technologique soutenue dans chacun des domaines couverts par ce numéro, les auteurs se sont efforcés de privilégier les techniques réellement disponibles sur le marché au jour d'aujourd'hui et ils ont choisi d'éviter autant que possible de se faire l'écho de recherches certes prometteuses mais qui en sont encore à leurs balbutiements.

Les références de quelques fabricants et celles des équipes de recherche impliquées dans le domaine devraient permettre à chacun de trouver la meilleure réponse à ses besoins.

En conclusion de ce préambule, je voudrais très sincèrement remercier ceux et celles qui ont cru en ce numéro et ont accepté de donner de leur plume pour qu'il devienne réalité.

L'industrie minérale apparaît souvent comme une industrie traditionnelle aux yeux des acteurs extérieurs. Elle peut donner l'image d'une industrie peu stimulante pour l'innovation en électronique ou en informatique. Assimilée à une industrie lourde où les contraintes techniques sont très sévères elle invite aussi à beaucoup de circonspection lorsqu'il s'agit d'aménager un espace pour les technologies nouvelles au sein des lignes de production.

Pourtant, l'industrie minérale ne peut se passer de l'innovation technologique. Puisant ses ressources dans le sous-sol, elle est confrontée à des fluctuations de qualité inhérentes aux phénomènes naturels. Mieux intégrer les fluctuations grâce à une meilleure connaissance du gisement, mieux contrôler les variations de qualité grâce à un contrôle permanent de ce qui entre en usine, mieux maîtriser le produit final grâce à des techniques de tri performantes, voici quelques-uns des objectifs majeurs auxquels elle doit faire face. Les techniques d'imagerie et de contrôle optique peuvent contribuer au même titre que d'autres à atteindre ces objectifs.

Il ne serait pas correct d'affirmer que l'industrie minérale est un secteur qui donne le ton en matière de contrôle optique. Au contraire, la grande majorité des applications, trouve un champ d'expression privilégié dans les industries de la fine mécanique, de l'assemblage électronique, de la construction automobile, de la production alimentaire ou de l'habillement. On peut même dire que c'est en fin de chaîne que les techniques de vision sont généralement les plus abondantes : comptages, détection de défauts, mesure des tolérances dimensionnelles ou esthétiques sur les produits finis, contrôle des emballages, du marquage, etc.

Il y a à cela plusieurs raisons dont les principales sont sans doute :

- la valeur ajoutée plus grande des produits en fin de chaîne qui peut justifier l'amortissement de machines de contrôle plus coûteuses.
- les débits de matière plus faibles offrant plus de flexibilité pour la mise en œuvre de mesures « intelligentes ».
- le caractère techniquement moins hostile des lignes situées en aval du processus industriel.

Sans vouloir renier ces réalités, il nous apparaît manifeste que ces barrières ne sont pas immuables et que de plus en plus de perspectives s'ouvrent pour les processus industriels situés en amont. L'explosion de la puissance des processeurs informatiques, leur large diffusion et leur robustesse accrue permettent d'envisager aujourd'hui des applications impensables il y a encore cinq ans. Rien, bien au contraire, ne permet de préjuger d'une stagnation de cette montée en puissance des technologies nouvelles dans tous les secteurs industriels. Pour maintenir son avantage compétitif, l'industrie minérale européenne, se doit d'être attentive à cette tendance. Elle doit participer à la création de nouvelles activités économiques capables de mettre en valeur ce savoir faire. Elle doit briser la résistance psychologique qui veut que la pierre et l'électron soient incompatibles.

L'industrie minérale est une industrie exigeante, où les problèmes sont complexes et rarement reproductibles d'une installation à l'autre. Il n'existe d'ailleurs pas deux carrières identiques. Mais, au delà des problèmes purement techniques, c'est sans doute dans une difficulté de dialogue entre les ingénieurs du monde minéral et les concepteurs du monde électronique qu'il faut rechercher les freins à l'innovation. On ne résout bien que les problèmes que l'on conçoit bien, et les innombrables applications de contrôle de qualité sur les composants électroniques sont là pour en témoigner. Il revient aux laboratoires de recherche et aux organismes de formation de multiplier les métissages entre l'électronique et les sciences minérales pour favoriser l'éclosion d'activités nouvelles.

Section 1

Introduction générale aux techniques d'imagerie.

Introduction générale aux techniques d'imagerie

p.

Eric Pirard (MICA)

Eric PIRARD est ingénieur géologue (1984) de l'Université de Liège et possède un doctorat en sciences appliquées de la même université. Après un début de carrière dans le domaine de la gîtologie et de la microscopie des minerais, il a consacré l'essentiel de ses activités de recherche à la diffusion des techniques quantitatives en géologie appliquée : en particulier la géostatistique et la morphologie mathématique. Il est professeur de géologie des ressources minérales à l'Université de Liège et président du département « Géoressources, Géotechnologies et Matériaux de Construction ».



Introduction générale aux techniques d'imagerie

Eric PIRARD

1 L'image numérique.

Dans le vocabulaire courant, la notion d'image fait avant tout référence à une propriété perceptible par l'œil humain dans son environnement tridimensionnel, mais ramenée à un document bi-dimensionnel par le support photographique.

Pour le scientifique, la notion d'image s'étend à toute propriété mesurable de la matière et la dimensionnalité de l'image n'est pas limitée. On appellera cependant « signal » toute mesure d'une propriété dans un espace unidimensionnel qu'il s'agisse du temps ou de la distance (Fig. I_1.).

La notion d'image suppose également une forte densité voire une acquisition systématique des mesures, faute de quoi il serait nécessaire de procéder à des interpolations très intenses pour combler le manque d'information en de nombreux endroits. Les résultats interpolés d'une campagne d'analyse géochimiques fournissent bien entendu une image du gisement (Fig. I_2.), mais l'importance de l'interpolation est souvent telle que cela aura peu de sens de mettre en œuvre des techniques d'imagerie proprement dite sur les résultats. Une situation hybride est celle de la radiométrie aéroportée, pour laquelle des mesures très denses sont effectuées le long des lignes de vol de l'avion, mais qui ne fournit aucune information entre les lignes de vol. Dans ce dernier cas, il ne faudra pas perdre de vue que les modèles d'interpolation utilisés auront un impact très significatif sur tous les processus de traitement des données. La filiation entre l'ensemble des méthodes d'analyse spatiale, notamment celles issues de la géostatistique, et les techniques d'imagerie proprement dite est évidente, mais ne sera pas abordée ici.

Une image est dite numérique lorsqu'elle est formée de pixels (« picture elements ») qui sont autant de mesures ponctuelles et quantifiées de la propriété étudiée. Ces pixels peuvent être le résultat d'une mesure directe par caméra ou être issus d'un calcul d'inversion des données brutes.

Si la toute grande majorité des techniques aujourd'hui disponibles fournissent une image de l'espace bi-dimensionnel (Fig. I_3.), certaines permettent cependant d'accéder à une information tridimensionnelle (Fig. I_4.) et de plus en plus nombreuses sont les techniques multispectrales ou multidonnées qui permettent d'associer à un même point de l'image un ensemble de mesures plutôt qu'une mesure unique (Fig. I_5.).

2 Acquisition et numérisation d'une image

2.1 Emetteurs

Le principe de base en imagerie est d'enregistrer l'interaction entre un rayonnement électromagnétique connu et un matériau. Ce principe est étendu, en géophysique et en microscopie notamment, à des sollicitations diverses telles que des ondes sismiques, des champs gravimétriques ou encore des palpeurs mécaniques. La maîtrise du couple émetteur - capteur est fondamentale pour assurer la qualité de la mesure et partant pour garantir la fiabilité des interprétations.

On peut distinguer les méthodes d'imagerie passive qui exploitent les propriétés d'un émetteur naturel, des méthodes d'imagerie active qui se réfèrent à des émetteurs artificiels. Les exemples les plus évidents de ces deux alternatives sont d'une part les techniques de télédétection visible et infrarouge qui mesurent l'interaction entre le rayonnement solaire et la surface du globe (Fig. I_5.) et d'autre part les techniques d'imagerie pour le contrôle en ligne qui intègrent une parfaite maîtrise de l'éclairage (lasers, lampes, etc.).

Quel que soit le mode d'interaction entre le matériau et le signal émis, la mesure sera relative à la différence d'intensité entre l'émetteur et le capteur. Pour rappel, un rayonnement électromagnétique donnera lieu à plusieurs formes d'interaction dont l'intensité sera tributaire tant du matériau que de la longueur d'onde du rayonnement. La réflexion, la réfraction et l'absorption sont des propriétés optiques fondamentales reliées en une équation unique par le biais des indices de réfraction du matériau. Cette équation ignore cependant d'autres comportements générés par des défauts de surface ou de constitution présents dans tous les matériaux tels que la diffusion et la diffraction (Fig. I_6.). Enfin, l'excitation électronique ou moléculaire suffisamment énergétique génère des ré-émissions (rétrodiffusions, fluorescence,...) qui pourront également être exploitées en imagerie (Fig. I_7.).

Utiliser un instrument imageant, c'est avant tout comprendre les mécanismes physiques qui président à la formation de l'image et en particulier les principes d'interaction émetteur - matériau à quelque échelle que ce soit.

2.2 Capteurs

Les capteurs électroniques ont pour mission de convertir un rayonnement électro-magnétique, une sollicitation mécanique ou un bombardement électronique en un signal électrique qui pourra être échantillonné et numérisé. Quelle que soit la nature de ces capteurs, diodes semi-conductrices ou électro-aimants, ils disposent de caractéristiques intrinsèques qui limiteront la qualité du signal obtenu. Parmi les principales caractéristiques, il convient de s'inquiéter :

- de la sensibilité
- de la dynamique
- de la résolution spectrale
- de la résolution spatiale
- du rapport signal / bruit
- du temps d'intégration (fréquence d'échantillonnage)

La toute grande majorité des capteurs sont des capteurs uniques dans le sens où ils ne sont capables de traiter qu'une seule sollicitation par cycle. Si cette sollicitation provient d'une région suffisamment limitée de l'espace on pourra parler alors de capteur ponctuel. Ce mode de fonctionnement est notamment celui de spectrophotomètres ou de colorimètres qui par le biais d'une optique adéquate mesurent les propriétés d'un seul point de la surface. Pour générer une image au départ de capteurs ponctuels, il convient de procéder soit à un balayage du faisceau incident, soit à un déplacement de l'échantillon, soit à un balayage du point de focalisation du capteur. Toutes les variantes existent dans l'instrumentation. A titre d'exemple, le microscope électronique à balayage procède par déviation du faisceau d'électrons incidents sur le matériau, tandis que des systèmes de balayage laser aéroportés ou des systèmes imageurs hyperspectraux utilisent le principe d'un miroir tournant.

Les capteurs CCD (charge coupled devices) ou CMOS, qui sont particulièrement importants pour l'imagerie visible et infrarouge, ont l'avantage de pouvoir être miniaturisés et disposés en grand nombre dans des architectures en barrettes ou en matrices. Le nombre de capteurs qui peuvent ainsi être intégrés sur un même dispositif dépend de la nature électronique du capteur (Si, PbTe, InGaAs,...). Cela peut aller de quelques centaines pour des capteurs dans l'infrarouge thermique à plusieurs milliers dans le visible (Tab. I_1.). Grâce à ce type d'architecture, une image complète peut-être acquise sans aucun mouvement (CCD matriciel), en procédant au déplacement du capteur (scanner à plat) ou en déplaçant le matériau lui-même (camera linéaires au-dessus d'un convoyeur).

Un principe particulier d'imagerie est celui de la tomographie. Qu'il s'agisse d'une tomographie géophysique ou d'une tomographie RX en laboratoire, fondamentalement le principe est celui d'exploiter un ensemble d'images acquises par un détecteur linéaire (ou une ligne de détecteurs ponctuels) pour reconstruire une information bi-dimensionnelle. La tomographie RX procède par la rotation du système émetteur – capteur autour de l'échantillon, tandis que la tomographie géophysique fait en quelque sorte varier la géométrie de l'émetteur et du récepteur.

Les principes d'imagerie multispectrale, hyperspectrale ou multimodale ne sont que des variantes de ces méthodes d'imagerie de base. Elles sont conçues de façon à permettre la mesure simultanée ou séquentielle de plusieurs propriétés en un même point. La multispectralité suppose la dissociation du rayonnement entrant en plusieurs composantes par le biais de filtres ou de prismes, tandis que la multimodalité signifie l'intégration au sein d'un même instrument de plusieurs principes de mesure.

Chaque technologie imageante présente ses avantages et ses inconvénients en termes de résolution, de cadence, d'acquisition et de coûts. Il convient d'adopter la technologie la plus adéquate pour chaque problème posé, faute de quoi l'information pertinente ne sera pas capturée par le système d'imagerie. Trop peu d'opérateurs sont conscients du fait qu'aucun traitement d'images ne sera jamais à même de créer une information qui ne figure pas dans l'image originelle. Le recours à des procédures sophistiquées de filtres d'images est souvent un pis-aller qu'une bonne connaissance des méthodes d'acquisition aurait permis d'éviter.

2.3 Calibrage des images

Dès l'instant où un système d'imagerie, même conçu au départ d'une simple caméra vidéographique, est utilisé comme un système de mesure, il est indispensable de veiller à son calibrage. L'objectif du calibrage est d'assurer la meilleure représentation numérique possible de l'objet imagé et en particulier la reproductibilité de l'image quelles que soient les fluctuations de l'environnement d'acquisition. En particulier, le processus d'acquisition de l'image doit être autant que possible indépendant des fluctuations de l'émetteur et du capteur.

Malgré la grande diversité des technologies et des échelles de mesure, il est possible de dégager quelques points communs aux techniques de calibrage. La première est l'utilisation de standards de référence dimensionnels et spectraux.

Aucune instrumentation, en particulier en optique, ne peut s'affranchir des risques de déformation. Cela est d'autant plus vrai si il y a un mouvement du faisceau ou de l'échantillon relativement au capteur. Pour compenser les déformations géométriques de l'image et pouvoir exploiter la grille des pixels comme un véritable instrument métrologique, il convient de pouvoir assigner une dimension exacte aux écarts interpixels horizontaux (Δx ou a_0) et verticaux (Δy ou a_{90}) quelle que soit leur position dans l'image. Ce calibrage s'effectue de deux manières :

- la première est l'anamorphose géométrique (*warping*) de l'image qui a pour but d'uniformiser les écarts en tout point de l'image. Elle est réalisée en prenant l'image d'un objet de géométrie connue (ex. un disque) et en imposant aux pixels un champ de déplacements tel que la forme soit exactement reconstituée. En télédétection, étant donné qu'il est impossible de disposer un objet de géométrie connue dans la scène, ce sont les mesures topographiques effectuées sur le terrain (bornes géodésiques ; cartes topographiques) qui font office de référence.
- La seconde, éventuellement couplée à la première, consiste à prendre la mesure en écarts interpixels d'une ligne (mire) de dimension connue.

Le calibrage spectral s'intéresse à l'intensité du signal émis par le capteur. En se référant à l'utilisation d'un même échantillon standard, il est possible dans bien des cas de régler les conditions d'acquisition (intensité de l'émetteur, temps d'intégration du capteur, amplification et seuil d'intensité (*offset*) avant numérisation) afin d'obtenir une valeur d'intensité prédéterminée. L'aberration spectrale éventuelle de l'instrument pourra être compensée en répétant cette opération en chaque point de l'image. Une telle correction n'est pas toujours possible, en particulier avec des capteurs matriciels, il convient alors de se référer à une procédure de correction numérique appelée aussi « correction de fond » ou « correction de blanc ». Enfin, il faut être conscient que tout instrument électronique est sensible à différentes formes de bruit temporel. Plus précisément, l'intensité d'une mesure est sujette à une fluctuation quasi instantanée (bruit quantique) et à des dérives à plus long terme des mesures (bruit thermique). C'est la raison pour laquelle de nombreux capteurs incorporent la possibilité de faire des moyennes d'une séquence d'images plutôt que de se fier à la prise d'une image unique. Ceci n'est bien entendu possible que dans la mesure où les objets présents dans la scène ne sont soumis à aucun mouvement.

2.3.1 Archivage des images numériques

Quelle que soit la procédure d'acquisition de l'image, les systèmes de numérisation vont convertir l'information imagée en une matrice de pixels et la stocker en mémoire.

Selon la dynamique des intensités mesurées par le capteur, la valeur d'un pixel peut se contenter de 8 bits (256 niveaux d'intensité) ou au contraire recourir à 10 bits (1024 niveaux), 12 bits (4096 niveaux) ou plus. Ces niveaux sont généralement appelés teintes de gris dans le jargon de l'imagerie numérique.

Fondamentalement, un fichier image est une séquence de pixels lus de la gauche vers la droite et libellés ligne après ligne. C'est ainsi que sont conçus les formats de fichiers dits « bitmap » ou matriciels. Parmi ceux-ci, les fichiers TIF et BMP sont les plus courants. Ils se distinguent essentiellement par la nature de l'information additionnelle présente dans l'entête (*header*) du fichier. Malheureusement, il n'existe pas un seul type de fichier TIF. Certains d'entre eux commencent en haut à gauche, d'autres en bas à gauche, d'autres encore contiennent des informations dimensionnelles ou de localisation spatiale (GEOTIFF) et d'autres pas. Mais, plus grave, parmi les fichiers TIF certains adoptent une forme de dégradation de l'information en raison du souci de compression de données trop volumineuses. Les fichiers TIF proposent ainsi des conventions de compression LZW, CCITT3, Huffman, etc. qui ne sont pas toujours explicites et qui le plus souvent dégradent le contenu de l'image. Il est conseillé de ne recourir à aucune forme de compression d'images lorsque celle-ci sert de support à une analyse et d'utiliser des formats explicitement comprimés telles que les différentes versions de JPG lorsqu'on souhaite transférer un document à distance dans un but de visualisation et non d'analyse (Fig. I_8.).

3 Le traitement numérique des images

Malgré tout le soin apporté à l'acquisition des images, il est inévitable que les mesures soient imparfaites. Elles peuvent être soit bruitées, soit sous-exposées, soit encore contenir des observations qui ne feront pas l'objet d'une mesure ultérieure et doivent par conséquent être éliminées. Pour faire face à ces objectifs, une très large gamme d'outils sont disponibles. Seuls les plus élémentaires sont brièvement présentés ici.

3.1 Anamorphoses d'histogrammes.

Les plus simples de tous les opérateurs d'images sont ceux qui procèdent à des corrections numériques des pixels d'une image en leur appliquant une loi arithmétique élémentaire. La nature de la loi est en général déduite de l'allure de la distribution expérimentale (histogramme) des teintes de gris dans l'image avec l'intention d'aboutir à une forme de distribution prédéterminée. Les techniques les plus courantes reviennent à normaliser la distribution des pixels ou à l'égaliser (répartir les pixels de manière égale sur toutes les teintes de gris). Plus simple encore, le retournement de l'histogramme qui engendre le négatif de l'image originelle ou encore la prise du logarithme qui aura tendance à mieux faire ressortir les détails dans les zones sombres de l'image. Ces techniques dites de rehaussement d'images sont peu utiles dans les systèmes de contrôle totalement automatiques mais elles peuvent contribuer à une meilleure perception du contenu de l'image dans toutes les tâches de surveillance (Fig. I_9.).

3.2 Opérations entre images

Les opérateurs précédents appliquaient des transformations arithmétiques à chaque pixel individuel. De façon totalement similaire, il est loisible d'utiliser des formules arithmétiques qui combinent entre eux les pixels de deux (ou plusieurs) images. L'exemple le plus simple de tous est la moyenne de deux (ou plusieurs) images consécutives telle qu'elle est implémentée dans un filtre temporel. Cette technique permet de réduire sensiblement le bruit et est particulièrement utile dans de très mauvaises conditions d'éclairage, lorsqu'il est indispensable d'amplifier très fortement le signal de la caméra. Mais, d'autres applications des opérateurs inter-images, concernent le masquage d'images ou la détection de présence. Étant donné leur simplicité, de telles opérations peuvent parfois être embarquées dans des caméras intelligentes et être intégrés dans des systèmes de surveillance automatique peu coûteux (Fig. I_10.).

3.3 Filtrages linéaires et non-linéaires

Le principe de filtrage de données, quelle que soit leur origine, contient implicitement l'idée que certaines valeurs doivent être corrigées ou éliminées relativement aux autres. La comparaison, si elle peut se faire dans l'absolu sur l'ensemble des pixels de l'image, peut aussi se faire dans un voisinage restreint de l'espace. Ce principe est à la base des opérations de voisinage qui sont propres au monde de l'imagerie.

Parmi les filtres d'images on distingue ceux qui transforment la valeur d'un pixel en fonction d'une combinaison linéaire de celles des pixels voisins, de ceux qui procèdent à une transformation non-linéaire, le plus souvent logique, d'un pixel relativement à ses voisins. Les premiers forment la famille des convolutions ou filtres linéaires, les seconds forment la famille des filtres non-linéaires dont notamment les opérateurs de morphologie mathématique.

Le principe du filtrage par convolution repose sur l'idée que tout pixel est exprimé comme résultat d'une combinaison linéaire (moyenne pondérée) des pixels qui lui sont voisins. Pratiquement, la diversité des filtres qui peuvent être conçus au départ de ce principe reposera sur deux paramètres de base que sont : la taille du voisinage et la valeur des coefficients de pondération. Ceux-ci sont définis par le biais du noyau (kernel) de convolution (Fig. I_11.).

Les filtres de convolution les plus simples, permettent de bien appréhender le principe d'un filtrage sur le voisinage. Ainsi, l'utilisation d'un noyau de convolution unitaire ($\forall \lambda_i=1$) correspond, après normalisation, à un filtre de moyenne arithmétique mobile. Ce dernier est un filtre passe-bas dans le sens où il atténue les fortes variations d'intensité dans l'image et privilégie les variations progressives. En pratique cependant, le filtrage se fait au dépens de la netteté des contours et le résultat est très proche de l'effet optique de défocalisation d'une image (Fig. I_12.). Ce qui est, sauf exception, inacceptable.

Un autre exemple de convolution linéaire a trait à la notion de gradient. En effet, l'utilisation de coefficients négatifs dans le noyau de convolution permet de calculer des dérivées discrètes bi-dimensionnelles qui auront pour effet de rehausser les transitions d'intensité (Fig. I_13.). Lorsque les coefficients sont choisis de manière à privilégier les gradients dans une direction donnée, l'effet visuel est très proche de celui d'un éclairage rasant de la scène, ce qui a pour effet de renforcer la perception de structures.

Le recours à des opérateurs logiques permet d'introduire le principe de filtres de voisinages non-linéaires. Quoique plus lourds en temps de calcul que leurs analogues linéaires, les filtres non-linéaires ouvrent des perspectives intéressantes pour les applications. Ils constituent le langage de base d'une discipline connue sous le nom de morphologie mathématique et dont les fondements théoriques ont été développés depuis les années '70 par l'équipe de Jean Serra à l'Ecole des Mines de Paris.

Fondamentalement, on distinguera la famille des filtres médians, construite autour de la notion de médiane d'une série de valeurs et les filtres d'érosion et de dilatation qui font respectivement appel à la notion de minimum et de maximum. Plutôt que de jouer sur différentes variantes de formulations mathématiques non-linéaires, c'est ici la géométrie du voisinage qui prend toute son importance. Ce voisinage, appelé dans ce cas élément structurant, agit comme un outil géométrique de référence à la lumière duquel la structure de l'image est interrogée (Fig.I_14.).

Selon les applications ou les résultats souhaités, la géométrie de l'élément structurant pourra être adaptée. Ainsi, l'érosion d'une image représentant des fibres par un élément structurant de 10 pixels alignés selon une horizontale a pour effet d'éliminer de l'image toute fibre claire qui n'atteint pas cette longueur dans la direction horizontale (Fig.I_15.). L'érosion par une boule de 10 pixels élimine quant à elle tous les objets clairs de l'image qui ne peuvent contenir une telle boule (Fig.I_16.).

Il est manifeste que l'efficacité des filtres non-linéaires va de pair avec une dégradation parfois très significative de l'image qu'il faut pouvoir maîtriser ou compenser. Il est intéressant pour cela de combiner les opérateurs et d'utiliser par exemple des combinaisons d'érosions et de dilatations. La morphologie mathématique définit de cette manière des opérations connues sous le nom d'ouvertures et de fermetures qui sont d'un grand intérêt pratique, notamment dans la perspective de l'analyse granulométrique d'un matériau ou de son réseau poreux (Fig.I_16.).

La notion de filtrage d'une image ne se limite pas au domaine spatial. Selon les besoins, il est possible de procéder à des transformations d'images dans le domaine spectral ou dans le domaine fréquentiel. La rareté des applications pratiques de ces filtres dans les problèmes d'évaluation et de caractérisation des ressources minérales, fait qu'ils ne seront pas présentés ici.

4 La segmentation des images

Les techniques présentées dans les deux paragraphes précédents sont largement suffisantes pour comprendre les principes de l'imagerie numérique utilisée en télésurveillance, en géophysique, en contrôle visuel de la qualité et dans toute autre application où l'utilisateur conserve un rôle de décision et d'interprétation. Dans la mesure où une des finalités recherchée de la vision industrielle est de pouvoir se substituer aux tâches de contrôle visuel humain, il est nécessaire de pousser plus loin le traitement de l'information. Plus précisément, il convient de traduire en critères quantitatifs et programmables l'expérience visuelle de l'opérateur. L'échec de certaines tentatives de contrôle automatique provient souvent du fait que ces critères ne sont pas toujours énoncés ou énonçables sous une forme claire et rigoureuse.

En règle générale, les procédures d'inspection peuvent être décomposées en deux étapes : la première consiste à isoler de la scène les objets d'intérêt, la seconde consiste à évaluer les propriétés des objets ainsi isolés. Si on considère la surveillance d'une bande transporteuse chargée de granulats, on peut accepter en première approximation l'idée qu'il faut tout d'abord isoler visuellement les granulats de l'ensemble de l'installation (courroie, poulies,...), qu'il faut éventuellement isoler visuellement un granulat parmi d'autres (ex. le plus gros élément) et qu'ensuite seulement on peut chercher à évaluer les propriétés des granulats (ex. propriété, taille,...).

Sauf exception, la grande majorité des applications d'automatisation en imagerie, débutera par une opération de segmentation ou de partition de l'image qui aura pour objectif d'isoler le ou les objets à mesurer. Ces objets peuvent être des détails sans importance dont il conviendra de se débarrasser (ex. les rebords de la benne d'un camion) ou au contraire peuvent représenter une des classes d'objets sur lesquels portera la mesure (ex. les granulats inférieurs à 15mm).

Fondamentalement, les critères de partition de l'image peuvent être de nature spectrale, de nature spatiale ou, le plus souvent, obéir à une combinaison de ces critères.

Quelques exemples de segmentations spectrales :

- isoler les sulfures dans un marbre (= rechercher les pixels qui ont une brillance supérieure à la matrice.)
- Isoler un diamant dans le minerai kimberlitique (= isoler les pixels qui ont une intensité de fluorescence supérieure à un seuil donné.)
- Identifier les granulats issus d'un niveau de grès ferrugineux (= isoler les pixels qui ont une couleur plus rouge qu'un seuil donné.)

Quelques exemples de segmentations spatiales :

- isoler les pores de plus de 20µm dans une micrographie (= rechercher les amas de plus de N pixels de diamètre.)
- isoler les défauts qui traversent une dalle de part en part (= rechercher les amas contigus de pixels qui touchent au moins deux bords d'image.)

Quelques exemples de segmentations combinées :

- isoler les failles avec un pendage de plus de 45° dans une tomographie géophysique (= rechercher les gradients d'intensité significatifs et conserver ceux qui ont une orientation à plus de 45°)
- isoler dans un granite les biotites de taille supérieure à 2 mm (= identifier les pixels de couleur brune et ne retenir que les amas de plus de 2mm de diamètre)

Les quelques exemples cités ci-dessus suffisent à souligner l'importance de l'étape de segmentation. Car, ce qui peut paraître extrêmement trivial pour un œil humain, se traduit parfois en un enchaînement de procédures complexes au cœur de la machine. En particulier, les capacités d'adaptation de l'œil en fonction de l'environnement sont extrêmement difficiles à reproduire. Ainsi, l'herbe nous paraît verte à toute heure de la journée. Or, en fonction de l'ensoleillement, il est évident que cette couleur ne cesse de se modifier. Si nous voulons reproduire une telle opération avec un système d'imagerie il convient de ne pas se référer à une couleur verte dans l'absolu, mais plutôt de comparer le vert de l'herbe et celui de la forêt environnante. De la robustesse des procédures utilisées dépendra le succès de la méthode.

La méthode la plus intuitive et la plus utilisée pour la classification spectrale des pixels est le seuillage ou autrement dit la sélection des pixels qui dépassent une certaine intensité, voire sont compris dans un intervalle d'intensité. Le résultat du seuillage sera une image binaire dans le sens où seuls subsistent après l'opération deux catégories de pixels : ceux qui satisfont le critère de brillance et ceux qui ne le satisfont pas (Fig.I_17.). Remarquons que cette méthode ne tolère aucun écart statistique au seuil fixé et qu'il est très rare que notre œil procède de la sorte (Fig.I_18.). Autre inconvénient de la méthode, le seuil est fixé dans l'absolu par l'opérateur et ne peut être adapté à chaque image fournie par le système. Pour pouvoir développer une auto-adaptation du seuil, il faut nécessairement procéder à l'analyse de l'histogramme des teintes de gris dans l'image. C'est le principe poursuivi par la plupart des techniques de seuillage automatique, lesquelles recherchent l'existence de deux (ou plusieurs) pics pour ensuite classer chaque pixel en fonction de sa probabilité d'appartenance à l'une ou l'autre des populations d'intensité. L'avantage de ces méthodes est de pouvoir s'adapter à des fluctuations d'intensité moyenne de la scène, tout comme l'œil, mais il est très rare qu'elles donnent satisfaction sans devoir être combinées avec des critères spatiaux.

Lorsque les images sont colorées, multispectrales ou multimodales, les mêmes techniques de classification peuvent être utilisées sur chaque image indépendante et le résultat final peut provenir de la recombinaison des différents canaux (le ET logique sur les différentes images binaires permet d'isoler les pixels qui respectent les critères énoncés pour CHACUN des canaux). Cette approche simpliste consiste cependant à ignorer les possibilités de corrélation entre les canaux or celles-ci sont présentes dans la toute grande majorité des applications. En d'autres termes les techniques de seuillage multiple ne peuvent diviser un espace spectral qu'en prismes rectangulaires (boîtes à chaussures) parallèles aux axes d'intensité (Fig. I_19.). Pour pouvoir subdiviser l'espace spectral en d'autres géométries, il faut nécessairement utiliser des techniques de classification multivariées.

Une première application des techniques multivariées consiste à calculer les composantes principales d'une série d'images multispectrales. Cette opération revient en quelque sorte à modéliser la répartition spectrale des pixels par un ellipsoïde (un hyperellipsoïde... si l'image à plus de trois composantes spectrales !) et à se choisir un nouveau système d'axe qui soit parallèle aux axes principaux de l'image. Pratiquement, c'est un peu comme-ci notre méthode de seuillage boîte à chaussures était maintenant capable de faire tourner la boîte dans la direction la plus adéquate... mais sans pour autant pouvoir la déformer.

Le seuillage multiple agit comme un système sans tolérance. Pour incorporer l'idée d'une fluctuation statistique de la couleur ou plus généralement de la signature spectrale, il est utile de se référer à la probabilité bien connue d'appartenance à une population gaussienne (95,5% de chances d'appartenir à $[\mu \pm 2\sigma]$ avec μ : l'intensité moyenne et σ : l'écart-type des intensités). Dans un espace à deux variables, la distribution bi-gaussienne correspond à une région elliptique présentant des densités d'occurrence plus élevées au centre qu'en périphérie, à l'image de la distribution gaussienne univariée. La généralisation multivariée de cette distribution sera baptisée multigaussienne et on peut concevoir que moyennant connaissance des intensités moyennes, des variances et des covariances dans chaque canal spectral, il sera possible de définir pour tout point de l'espace spectral une probabilité d'appartenance à 95,5 % par exemple à la multigaussienne. Le seul prérequis étant bien sûr que les paramètres statistiques soient préalablement calculés ce qui en fait une méthode dite supervisée.

Pratiquement, l'opérateur devra désigner dans la scène des régions caractéristiques des objets qu'il souhaite segmenter et ce n'est qu'après cette phase d'apprentissage que la procédure multivariée pourra réaliser la

classification de l'ensemble des pixels de la scène. A titre d'exemple, un apprentissage pourra requérir la désignation d'une série de régions de 20x20 pixels pour chaque objet (soit un total de 1600 pixels si il y a quatre objets à distinguer) et la classification se chargera de traiter chaque pixel de l'image (1.000.000 pixels par exemple) en fonction de sa *plus forte ressemblance* aux pixels désignés par l'opérateur.

La notion de ressemblance ne se traduit pas nécessairement par des probabilités d'appartenance à une distribution (multi)gaussienne. Ainsi, un concept tel que celui « de plus proche voisin » exploite la notion de proximité spectrale en définissant qu'un pixel non classé sera attribué à la classe qui est la mieux représentée parmi les k pixels les plus proches dans l'espace spectral. Ces concepts sont beaucoup plus simples qu'il n'y paraît en première lecture. Ils se retrouvent dans l'ensemble de la littérature statistique et dans tous les problèmes d'intelligence artificielle, qu'il s'agisse ou non d'imagerie.

La classification spectrale d'une image aboutit à une image binaire ou une série d'images binaires selon le nombre d'objets présents dans l'image. Ces images sont rarement l'aboutissement de la procédure de segmentation car soit elles présentent encore des ambiguïtés (un même pixel a été repris dans plusieurs classes), soit des critères spatiaux doivent compléter l'opération.

Nous avons vu que des opérateurs de base tels que l'érosion étaient capables de dégrader l'image en fonction des paramètres de taille ou d'orientation de l'élément structurant utilisé. Malheureusement, l'érosion affecte par définition tous les objets d'une image et les objets qui résistent ne présentent plus leur profil originel. Il existe deux remèdes à ce problème, chacun d'eux possède des avantages et des inconvénients.

Le premier consiste à appliquer l'opération duale de l'érosion, soit la dilatation, en utilisant le même élément structurant¹. On définit ainsi la notion d'ouverture. De telle manière, les objets présents dans l'image reprennent leur taille (au sens du diamètre inscrit) mais pas leur forme... ce qui peut être gênant dans le cas d'objets très allongés ou très rugueux.

La seconde méthode consiste à appliquer une propagation des résultats de l'érosion dans l'image originelle avant érosion. Ceci peut se concevoir aisément en imaginant que l'image binaire originelle est constituée d'une série d'îles plus ou moins contiguës et que l'image érodée correspond à des foyers d'incendie capables de se propager à l'entière d'une île mais incapables de franchir les zones immergées (Fig.I_20.). La notion de propagation est extrêmement riche pour les développements en analyse d'image et elle a donné lieu à une série d'outils dérivés capables de résoudre les problèmes suivants :

- Elimination des particules qui touchent le bord d'une image et ne peuvent dès lors faire l'objet d'une mesure correcte.
- Recherche des trous ou des particules incluses dans une phase.
- Identification des régions situées à une distance de propagation donnée d'une anomalie magnétique ou d'une faille.
- Délimitation automatique des bassins versants dans un modèle numérique de terrain par propagation (inondation) au départ de points sources.

¹ Pour être correct, si l'élément structurant est asymétrique, il doit en réalité être transposé.

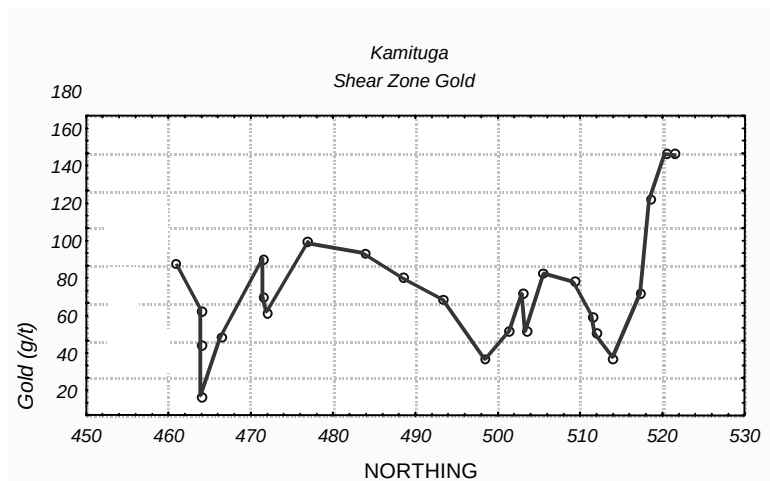


Fig. I_1. L'évolution d'une teneur le long d'une galerie ou d'une tranchée ne concerne qu'une seule dimension spatiale. A ce titre, les données constitueront un signal plutôt qu'une image.

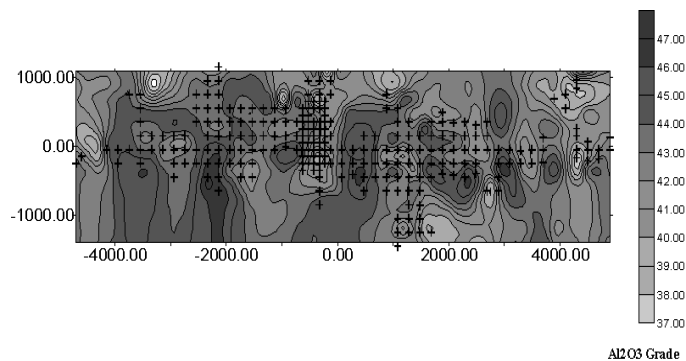


Fig. I_2. La cartographie de la distribution de l'aluminium dans ce gisement de bauxite résulte d'un échantillonnage géochimique suivi d'une interpolation intense des données. Le recours aux outils issus de l'imagerie sera peu justifiable sur ce type de données.

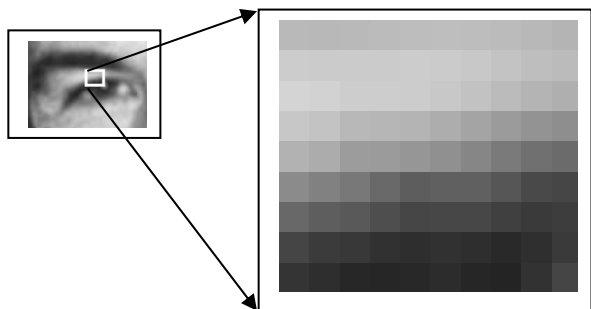


Fig. I_3. Une caméra vidéographique conventionnelle fournit toutes les 40ms une mesure de radiance de chacun des 390.000 pixels qui forment son image.



Fig. I_4. Le microscope mécanique à balayage fournit une série de profils qui forment l'image d'un segment de scie diamantée. Le niveau de gris est ici une cote topographique.

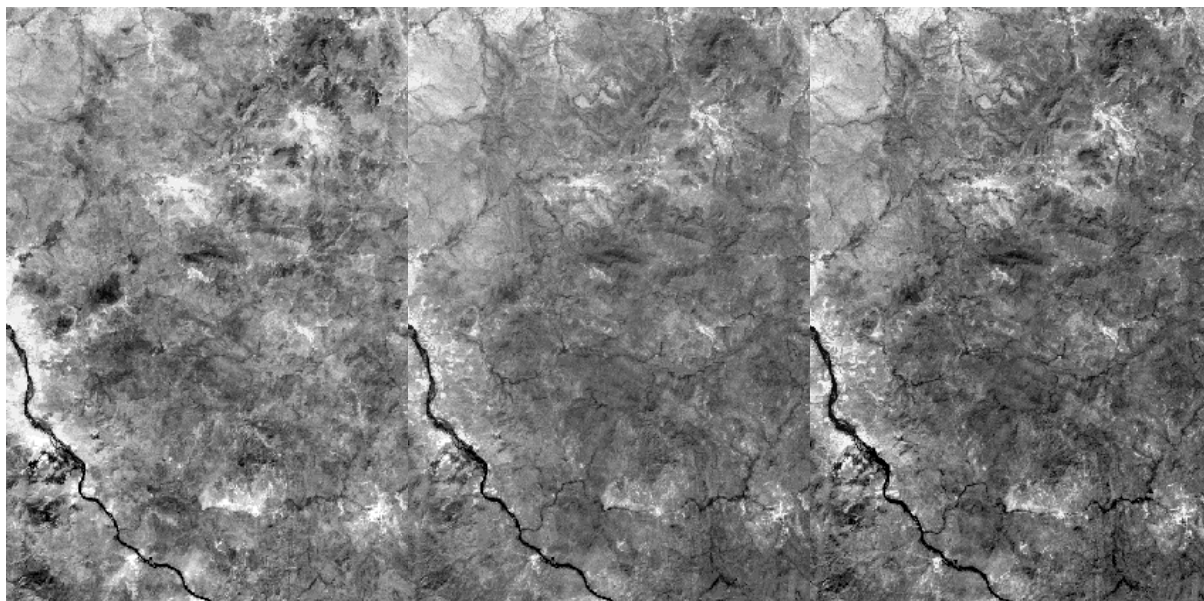


Fig. I_5. Grâce à l'utilisation de filtres de différentes longueurs d'ondes, le capteur embarqué sur le satellite ASTER fournit quatorze images simultanées d'une même scène. Ici, les composantes rouges, vertes et bleues d'une scène de l'Ouest du Mali (doc. NASA).

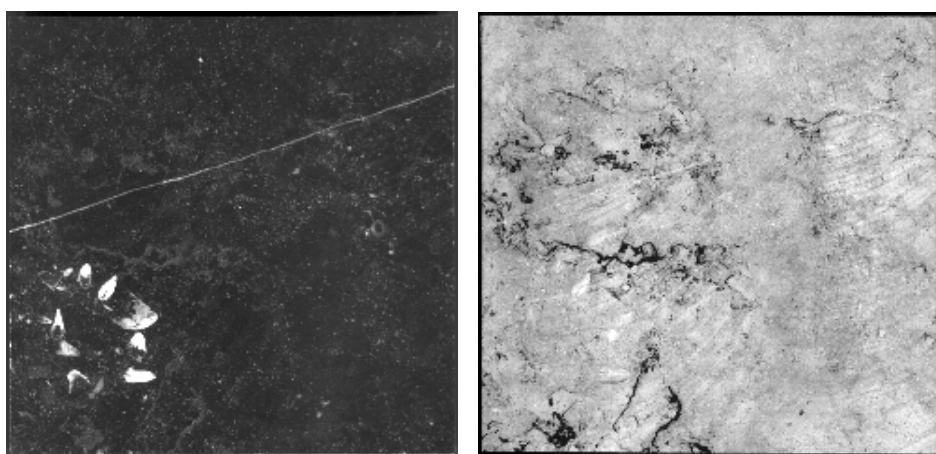


Fig. I_6. Un même objet comme ici une dalle de marbre polie peut se révéler sous un jour très différent selon qu'il est imagé en incidence normale (composante diffuse dominante) ou en incidence rasante (composante spéculaire dominante).

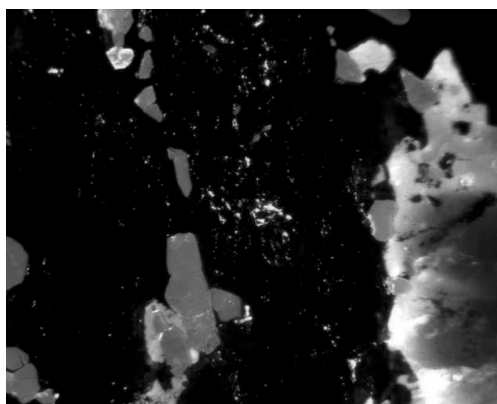


Fig. I_7. La cathodoluminescence est l'émission de lumière visible générée par un bombardement électronique. Elle peut révéler des propriétés cristallographiques de certains minéraux comme les carbonates ou dans ce cas-ci les phosphates.

	Vidéo standard capteur matriciel	Vidéo scientifique capteur matriciel	Vidéo scientifique capteur linéaire
Nombre de cellules	768 x 512	1340 x 1024	2048
Nombre max. de cellules (1)	Id.	5000 x 5000	14000
Dimension des cellules	12 μm	6 μm	6 μm
Dynamique	256 niveaux de gris (8 bits)	1000 à 4000 niveaux (10-12 bits)	1000 à 4000 niveaux 10-12 bits
Temps d'intégration (obturateur électronique)	Fixe (40 msec)	Réglable (1 msec – 1 h)	N.A.
Nature du signal analogique	CCIR (PAL)	<i>Non standard</i>	<i>Non standard</i>

Tab. I_1. Tableau comparatif des capteurs CCD matriciels et linéaires. (1) ces valeurs sont données à titre indicatif de la technologie actuelle pour des capteurs en silicium, mais ils correspondent à des capteurs très exceptionnels sur le marché.

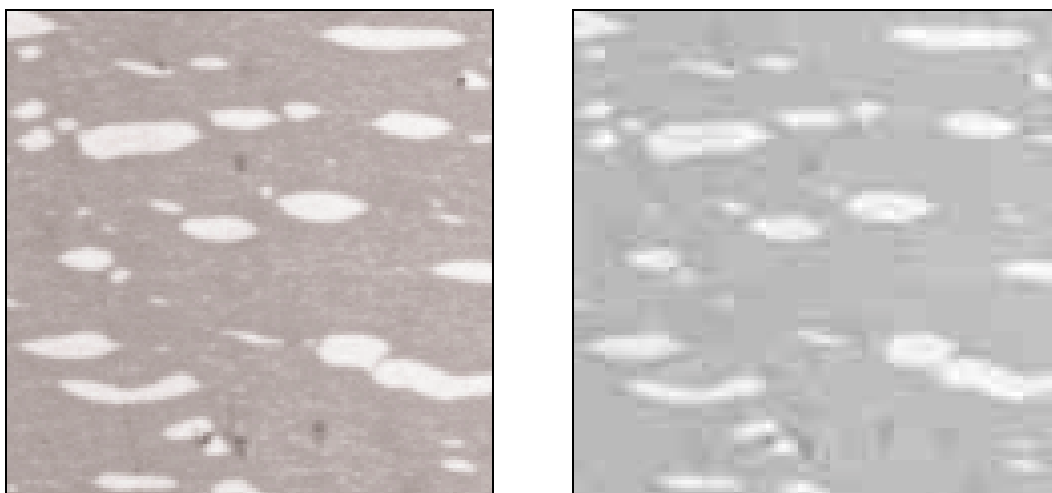


Fig. I_8. L'image de gauche a été sauvée en format TIF (58,9 kb) et conserve les détails de la scène originelle. L'image de droite sauvée en JPG (0,81 kb) a souffert de la compression. Le contour net des grains et les fines inclusions sont irrémédiablement perdus.

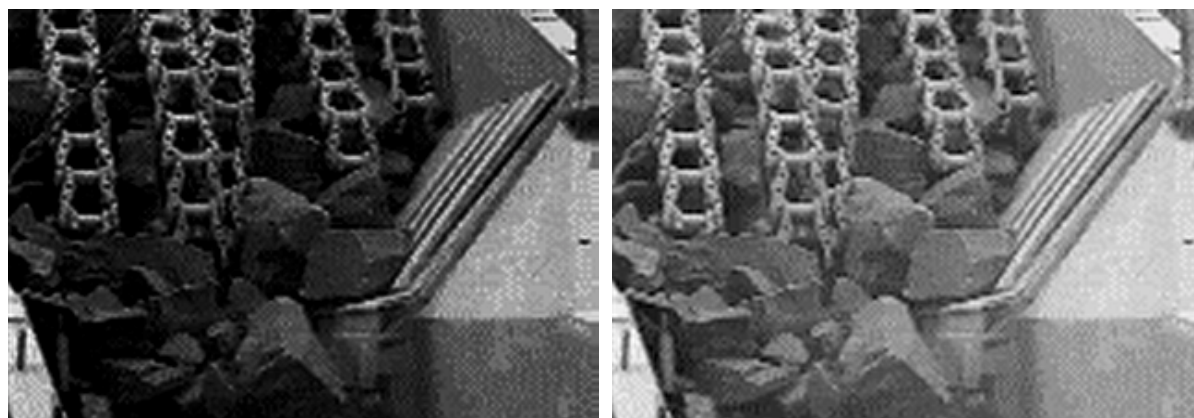


Fig. I_9. Le logarithme des intensités prises par la caméra permet de rehausser la perception des détails par l'opérateur humain. Une telle loi (correction gamma) est souvent incorporée d'origine dans le contrôle électronique de la caméra. (Doc. Fragscan)



Fig. I_10. Une application simple des opérateurs arithmétiques entre images est la détection de présence. Une caméra vidéo qui surveille en permanence un chantier peut avertir de la présence d'un élément mobile dans la scène en quantifiant la différence entre deux images successives. (Doc. Fragscan)

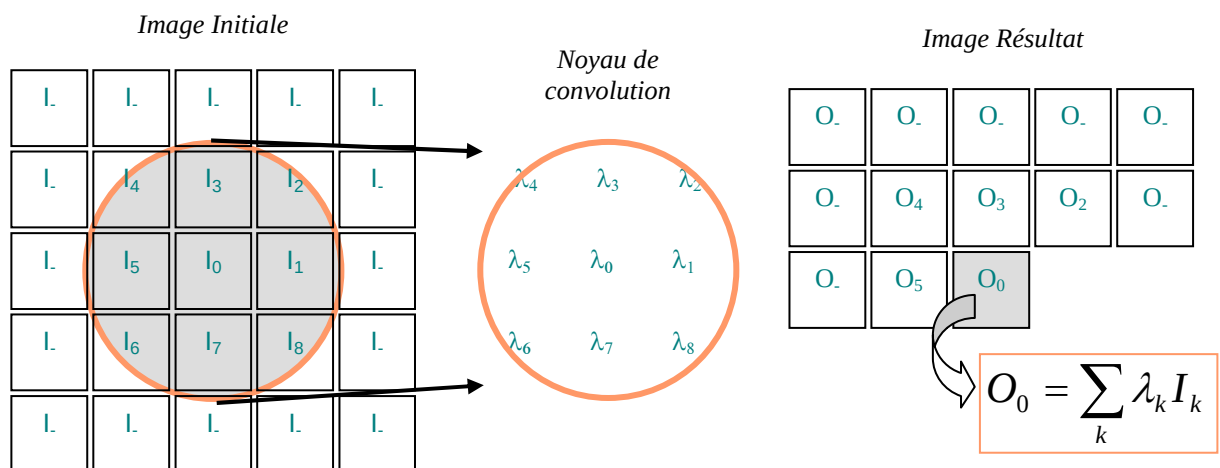


Fig. I_11. Une image initiale formée de ses pixels I_n est transformée par un filtre de convolution défini par ses poids λ_i en une image résultante formée par les pixels O_n .

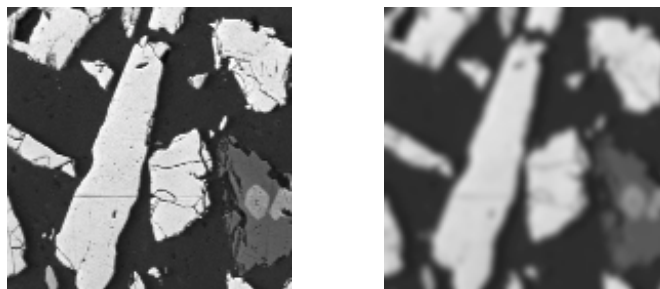


Fig. I_12. L'application d'une convolution avec des poids $\lambda_i=1$ correspond à la notion de « moyenne mobile ». Celle-ci engendre un lissage qui élimine les fractures et stries de polissage mais aux dépens de la netteté des contours dans ce concentré de sulfures.

<i>Moyenne mobile</i>	Gradient vertical de Sobel	Laplacien (dérivée seconde)																											
<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<table><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1	<table><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>-2</td><td>4</td><td>-2</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	-1	-2	-1	-2	4	-2	-1	-2	-1
1	1	1																											
1	1	1																											
1	1	1																											
1	2	1																											
0	0	0																											
-1	-2	-1																											
-1	-2	-1																											
-2	4	-2																											
-1	-2	-1																											

Fig. I_13. Les principaux noyaux de convolution disponibles dans les logiciels de traitement d'images sont d'expression très simples. Il s'agit soit de filtres de lissage, soit de filtres de rehaussement de contours (gradients).

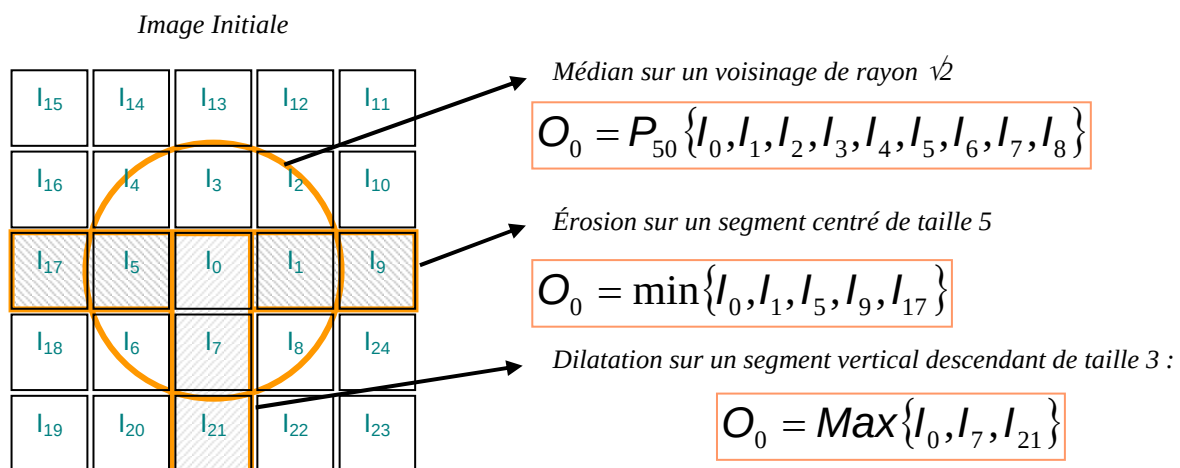


Fig.I_14. Les opérateurs de Morphologie Mathématique font référence à la notion de géométrie de voisinage (élément structurant). Selon le type d'opérateur choisi le pixel résultant (O_0) prendra la valeur du minimum, du maximum ou de la médiane des valeurs appartenant au voisinage considéré.

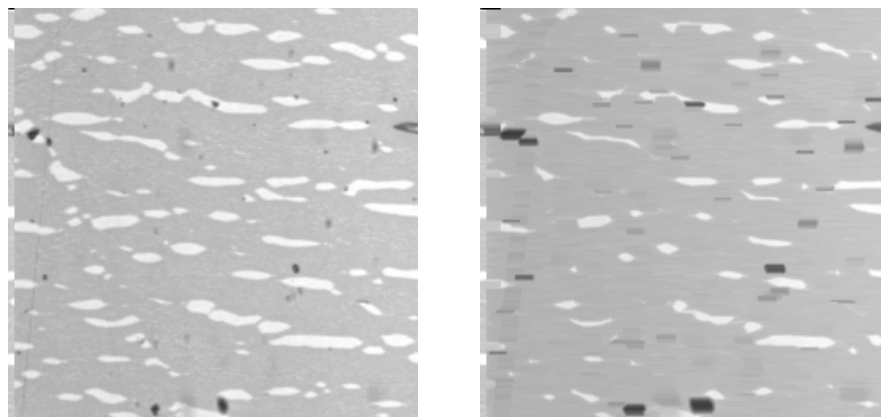


Fig.I_15. L'image d'un minéral d'ilménite contenant des exsolutions d'hématite avant et après érosion par un segment horizontal de la taille de 10 pixels. Seules les exsolutions de taille supérieure résistent à l'opération.



Fig.I_16. L'image de la microporosité d'une roche réservoir (craie) avant et après érosion par un carré de 10 pixels. Seules les porosités de taille supérieure résistent à l'opération. L'opération d'ouverture s'obtient en appliquant une dilatation au résultat de l'érosion.

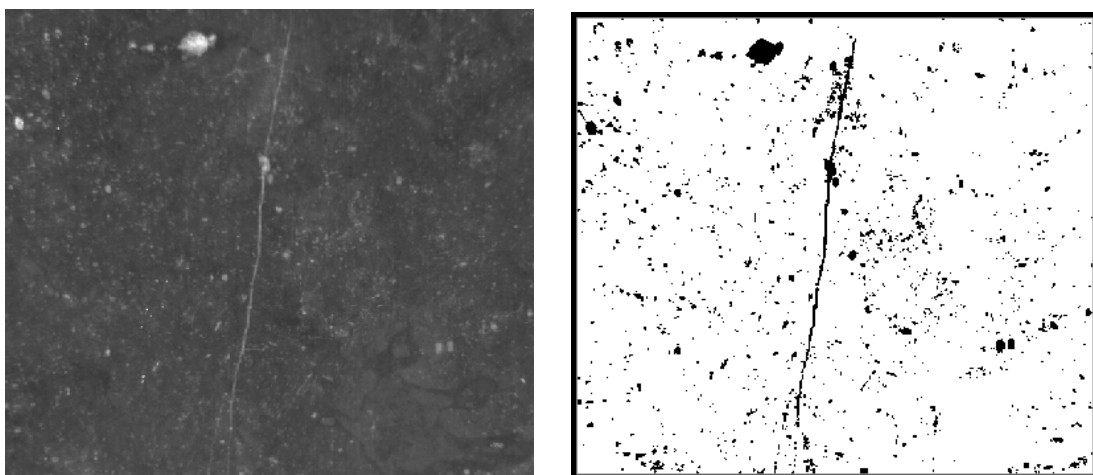


Fig.I_17. Le seuillage d'une image est l'opération qui consiste à ne conserver dans une image binaire (Vrai / Faux) que les pixels satisfaisant un critère d'intensité. Les crinoïdes et géodes de calcite se distinguent de la dalle calcaire par une brillance de 95 niveaux de gris ou plus.

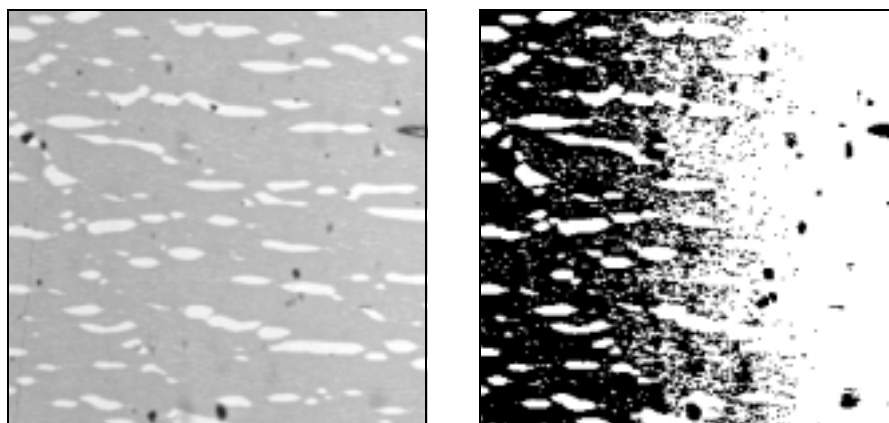


Fig.I_18. D'apparence simple pour l'œil, la distinction entre ilménite et hématite dans cette image ne peut s'opérer par seuillage en raison d'un éclairage trop inégal de la scène. L'œil humain procède par une appréciation relative à un voisinage plutôt que par des valeurs d'intensité absolues.

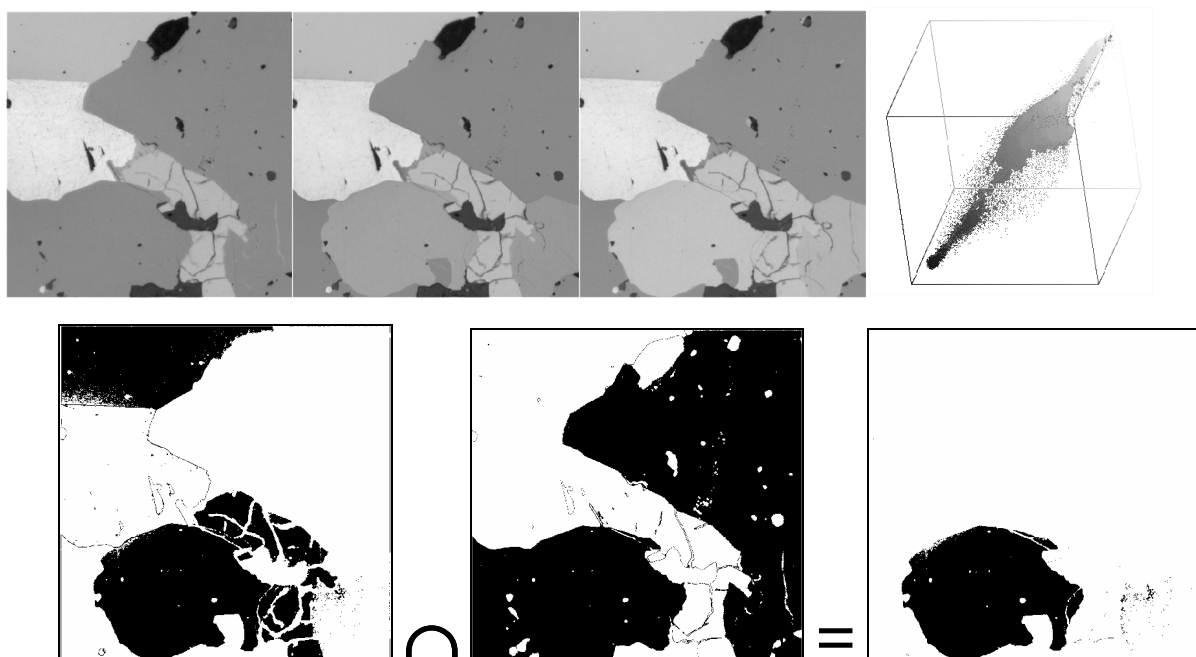


Fig. I_19. Une image colorée peut être perçue comme un ensemble de trois images bleue, verte et rouge. A chaque point de l'image correspond un triplet d'intensités qui peut être représenté dans l'espace couleur (R,G,B). En procédant au seuillage sur chaque image individuelle et en recombinaison des résultats par un ET logique il n'est possible de sélectionner que des groupes de pixels inclus dans des « boîtes » parallèles aux axes de l'espace (R,G,B). Une telle approche ne peut donner de résultat que dans des situations de couleur bien contrastées comme ici la bornite (orange) dans un minerai de cuivre stratiforme.



Fig. I_20. En appliquant une opération d'érosion à l'image obtenue par seuillage (B), seules les régions pertinentes sont conservées (C). La propagation de l'érodé (C) dans l'image seuillée (B) permet de reconstruire le contour exact de ces régions (D).

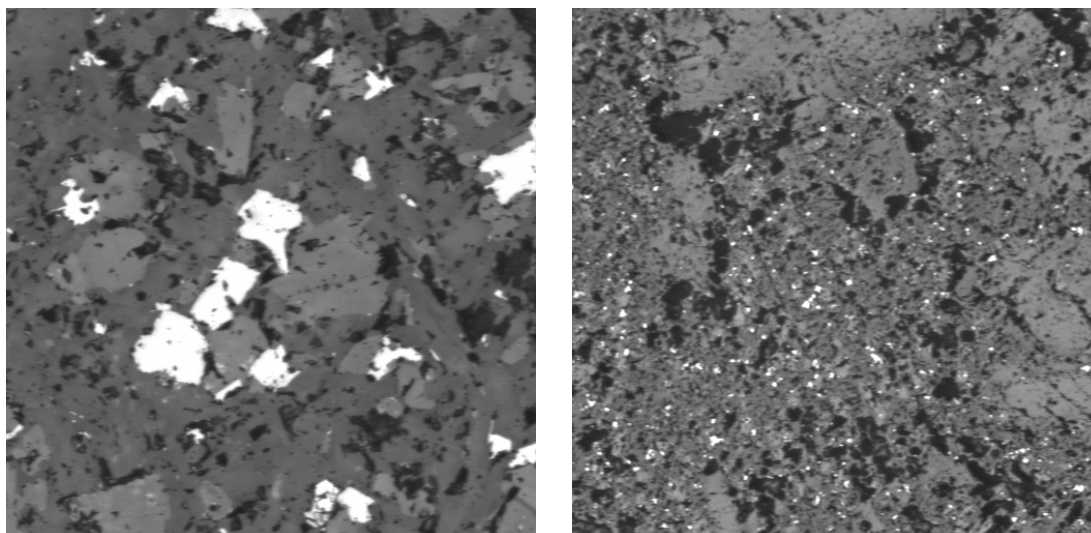


Fig. I_21. La proportion en volume de cristaux de magnétite dans une lave de l'Etna peut s'obtenir en dénombrant les pixels les plus réfléchants. Cette proportion sera cependant fortement dépendante de l'échelle d'observation comme en témoigne l'image de droite prise au même endroit à un grossissement huit fois moindre.

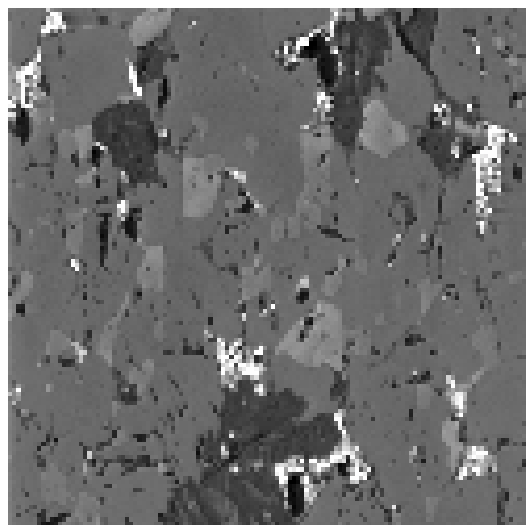
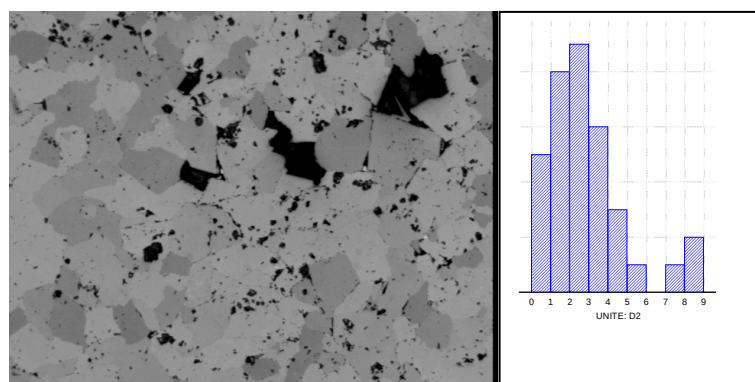


Fig. I_22. Cette image en lumière réfléchie illustre la diversité minéralogique des scories d'époque ottomane accumulées dans la région de Küre (Turquie). Grâce à l'analyse d'une cinquantaine d'images de ce type, une estimation statistique de la composition minéralogique de la scorie a pu être obtenue (Tab. I_1)

Analyse chimique (% pds)		Analyse modale (% vol)	
<i>FeO</i>	59.7 %	<i>Fayalite</i>	71 %
<i>SiO₂</i>	23.5 %	<i>Wüstite</i>	11 %
<i>Al₂O₃</i>	11.6 %	<i>Glass</i>	8 %
<i>S</i>	1.8 %	<i>Hercynite</i>	5 %
<i>Cu</i>	0.76 %	<i>Pyrrhotite</i>	3.15 %
<i>Co</i>	0.38 %	<i>Sulfures Cu</i>	0.85 %

Tableau I_1. Ce tableau porte en regard l'analyse chimique et l'analyse modale de la scorie de Küre. Outre son rôle essentiel dans la validation des résultats de l'analyse d'images, l'analyse chimique couplée à quelques analyses à la microsonde permet d'établir que la fayalite contient près de 85 % du Co, ce qui rend la scorie impropre à toute tentative de valorisation.



	Porosité (%)
Min.	0,03
Max.	8,77
Moyenne	2,81
Ecart Type	1.8

Figure I_23. La porosité d'une dolomie est nettement perceptible dans l'image en lumière réfléchie. La mesure de la proportion de surface de cette porosité indique une tendance centrale de 2.81 % après l'analyse de plusieurs dizaines de sections.

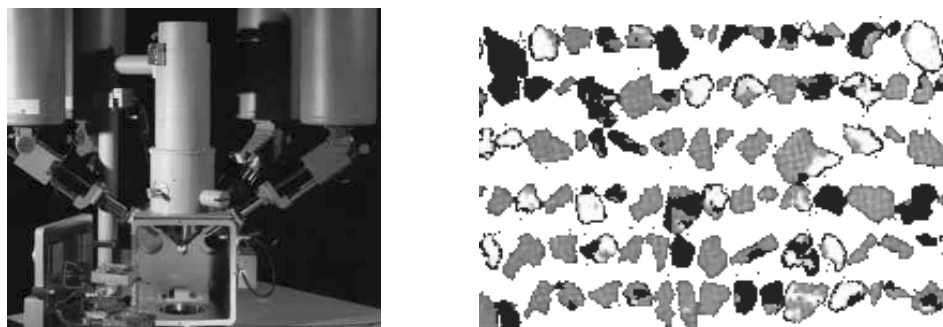


Figure I_24. Le QEMSCAN commercialisé par LEO sous licence du CSIRO permet de combiner les analyses modales effectuées sur les grains d'un minéral pour dresser des tables de libération très utiles dans l'optimisation de la maille de broyage. (doc. <http://www.qemscan.com>)

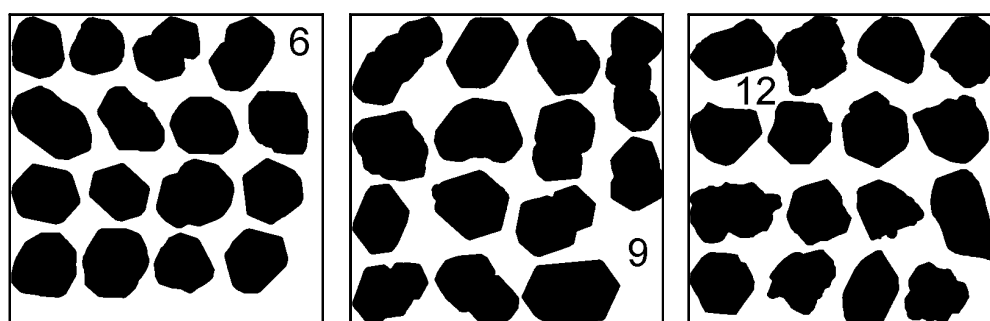


Figure I_25. Les diamants synthétiques sont triés par l'intermédiaire d'une table vibrante. Un contrôle par analyse d'images des ombres portées permet d'évaluer la taille (Diamètre moyen - D_b) et la forme (Allongement-El et Emoussé - W_v) de chaque grain. Le tableau Tab. I_2 reprend les statistiques pour les trois lots représentés en images.

	Lot 6		Lot 9		Lot 12	
	μ	IC(μ)	μ	IC(μ)	μ	IC(μ)
Db	426.5	11.69	435.6	14.59	445.7	12.03
El	1.236	0.063	1.536	0.129	1.252	0.086
Wv	61.67	2.59	58.19	3.05	47.48	3.10

Tableau I_2. Les statistiques relatives aux mesures de taille et de forme permettent de mieux comprendre les mécanismes de tri mis en jeu dans une table à secousse pour diamants.

(μ = moyenne arithmétique ; IC(μ) = intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne arithmétique).