A^{2}SI

Groupe Structures Discrètes et Imagerie

Rapport d'activités 1995-1999

ESIEE, le 23 novembre 1999

Membres de l'équipe :

Membres permanents

- **Gilles Bertrand**, professeur
- **Michel Couprie**, professeur associé
- **Laurent Perroton**, professeur assistant

Doctorants

- **Jean-Christophe Everat** (de 1994 à 1997)
- **Zouina Aktouf** (de 1994 à 1997)
- **Marcos C. Andrade** (de 1995 à 1998)
- **Petr Dokládal** (depuis 1996)
- **Chistophe Lohou** (depuis 1997)
- **Francisco Nivando Bezerra** (depuis 1998)

Table des matières

1 Nos thèmes de recherche et développement **3**

2 Résultats des travaux de recherche **4**

Ordres et topologie numérique . . . 4
Points simples et homotopie . . . 5
Algorithmes de squelettisation 3D . . . 6
Points P-simples et algorithmes de squelettisation 3D parallèles . . . 7
Surfaces discrètes . . . 8
Un algorithme de fermeture de trous 3D . . . 9
Topologie des images en niveaux de gris . . . 10
Amincissement et restauration de crêtes dans les images en niveaux de gris . . . 11
Ligne de partage des eaux et h-minima . . . 12

3 Développements et applications **13**

Quantification automatique du myocarde . . . 13
Analyse d'images microscopiques de matériaux . . . 14
Analyse de séquences d'images pour l'étude de la déformation de matériaux soumis à des chocs . . . 15
Reconnaissance de bactéries sur des images de microscopie en épifluorescence . . . 16
Analyse d'images médicales : aide au diagnostic du "syndrôme des cils immobiles" . . . 17
Reconnaissance d'empreintes digitales . . . 18

4 Formation doctorale **19**

Thèses soutenues . . . 19
Thèses en cours . . . 19
Diplôme d'Études Approfondies . . . 19
Jurys de thèse . . . 19

5 Participation à la vie scientifique **20**

Appartenance à des comités . . . 20
Journaux scientifiques . . . 20
Conférences invitées . . . 20
Cours invités . . . 20
Expertise . . . 21
Échanges internationaux . . . 21
Animation scientifique . . . 21

6 Coopérations **22**

7 Contrats **22**

8 Publications **23**

Revues . . . 23
Actes de congrès . . . 23
Rapports de thèses . . . 24

1. NOS THÈMES DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Analyser une image, c'est en extraire des caractéristiques ou bien reconnaître des formes qui y sont présentes. Le domaine de l'analyse d'images couvre des secteurs multiples et variés : imagerie bio-médicale, imagerie satellitaire, analyse de matériaux, inspection automatique, vision robotique... Ce domaine connaît ainsi, depuis plusieurs décennies, un grand développement tant du point de vue de ses applications que du point de vue des méthodes utilisées.

L'approche avec laquelle nous abordons l'analyse d'images est est une approche typiquement informatique, basée sur des structures discrètes. Plus précisément, nous étudions l'apport des notions de topologie discrète pour concevoir des algorithmes de traitement et d'analyse d'images. Les notions fondamentales de topologie telles que les notions de voisinage, de continuité nous semblent en effet constituer un paradigme qui trouve toute sa pertinence dans le traitement de données spatiales.

Ainsi, une partie de notre travail concerne l'étude des transformations qui préservent la topologie d'une image. A cet effet nous avons proposé des nouvelles caractérisations de la notion de point simple, un point simple d'un objet est un point dont la suppression ne modifie pas la topologie de cet objet. A partir de cette notion de point simple, nous avons proposé plusieurs algorithmes de "squelettisation d'un objet". Nous avons également proposé un cadre qui permet d'enlever "en parallèle" des points simples.

Une autre partie de notre travail consiste à étudier des transformations qui modifient de facon sélective la topologie d'un objet ou d'une image. Un exemple d'une telle transformation est la "fermeture de trous" dans un objet 3D (au sens où un tore plein possède un trou). Nous avons proposé un algorithme qui effectue une telle transformation et qui permet ainsi de réaliser un "filtrage topologique" d'un objet.

Nous avons également travaillé à l'introduction de notions topologiques pour l'analyse des images numériques (en niveaux de gris). Notre approche consiste à définir l'équivalence topologique entre deux images numériques à partir de l'équivalence topologique entre les images binaires que constituent les coupes (ou seuils) de l'image numérique aux différents niveaux. Dans ce cadre, nous avons proposé plusieurs nouveaux algorithmes ainsi qu'une méthode de segmentation sans paramètre.

Nous avons appliqué ces différentes méthodes à l'analyse d'images microscopiques de matériaux et de cellules biologiques, ainsi qu'à des problèmes d'imagerie médicale 2D et 3D.

2. RÉSULTATS DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Ordres et topologie numérique

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Michel Couprie, Christophe Lohou.

Dans l'approche classique introduite par A. Rosenfeld et dénommée "topologie numérique" (digital topology), les éléments de $\mathcal{Z}^n$ sont liés par des relations d'adjacence (par exemple la 4- ou la 8-adjacence dans $\mathcal{Z}^2$). Ces relations correspondent à une structure de graphe, elles permettent de définir des notions de nature topologique comme les notions de connexité, de bord, de courbe simple. Cependant, il n'y a aucun moyen évident de construire une topologie au sens habituel du terme, à partir de ces notions.

Une approche différente a été introduite par E. Khalimsky sous le nom de "connected ordered topological spaces (COTS)", dans cette approche on considère un espace $\mathcal{H}^n$ associé à $\mathcal{Z}^n$, dans lequel le plus petit voisinage associé à un point de $\mathcal{H}^n$ diffère d'un point à l'autre (Fig 1(b)). Ceci permet de définir une topologie associée à $\mathcal{Z}^n$. L'approche basée sur les complexes cellulaires, qui sont des ensembles d'éléments de différentes dimensions appelés cellules, permet également de définir une topologie. Dans ces deux derniers cas, la topologie obtenue est une ***topologie d'Alexandroff***, c'est-à-dire une topologie telle que toute intersection (finie ou non) d'ouverts est un ouvert. On peut montrer que la donnée d'une topologie d'Alexandroff est équivalente à la donnée d'une structure d'***ordre***, c'est-à-dire d'une relation réflexive, transitive et antisymétrique.

Nous proposons dans le cadre des ordres un "modèle" des notions issues du cadre de la topologie numérique. A tout objet (sous-ensemble) de $\mathcal{Z}^n$, nous associons un objet dans l'ordre $\mathcal{H}^n$ (voir Fig. 1). Il est alors possible "d'interpréter" un objet de $\mathcal{Z}^n$ dans un espace qui possède de bien meilleures propriétés. Nous validons ce modèle en considérant les notions fondamentales de point simple et de surface[36].

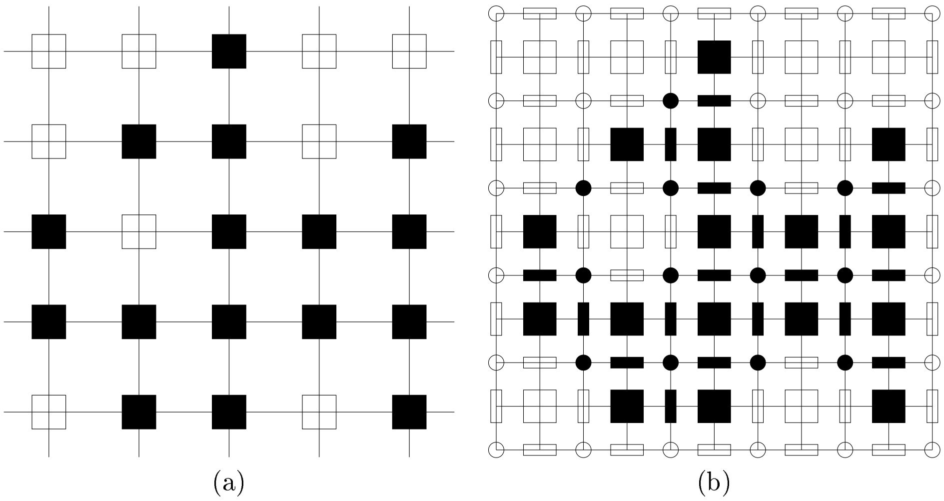


Fig. 1. (a) : Un sous-ensemble X de $\mathcal{Z}^2$ (carrés noirs). (b) : Un sous-ensemble de $\mathcal{H}^2$ associé à X. Le voisinage d'un carré est constitué de lui-même et des huit éléments plus petits qui l'entourent ; le voisinage d'un rectangle est constitué de lui-même et des deux disques qui l'entourent ; le voisinage d'un disque se compose uniquement de ce disque.

Points simples et homotopie

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Michel Couprie, Christophe Lohou.

Un point simple est un point d'un objet dont l'enlèvement ne modifie pas la topologie de l'objet (voir Fig. 2). Cette notion est à la base de tous les algorithmes permettant d'analyser une image selon des critères topologiques. Nous avons proposé dans un travail antérieur une condition nécessaire et suffisante permettant de caractériser les points simples dans une maille cubique 3D, dans le cadre de la topologie numérique. Plus concise et plus facile à évaluer que les caractérisations précédentes, cette caractérisation nécessite uniquement la recherche de deux nombres de composantes connexes que nous avons appelés nombres topologiques. Outre la caractérisation des points simples, les nombres topologiques permettent d'effectuer une classification des points selon leurs caractéristiques topologiques locales. Ainsi, il est possible de détecter les points qui ont localement les mêmes caractéristiques topologiques que des points de courbes, de surfaces, des points d'intersection de surfaces, de courbes... Nous avons également proposé plusieurs façons de calculer ces deux nombres topologiques ; par exemple, nous avons montré qu'on peut calculer ces deux nombres en détectant la présence de certaines configurations dans le voisinage du point considéré[5].

D'autre part, dans le cadre des ordres, nous avons introduit les nouvelles notions de point unipolaire et de point libre, qui sont des éléments "inessentiels" du point de vue de la topologie. Nous avons également introduit une définition discrète de l'homotopie et une généralisation de la notion de point simple[35] : un point est considéré comme simple si son voisinage, privé de lui-même, se rétracte en un seul point (voir Fig. 3). Il découle de ces notions des algorithmes parallèles de squelettisation particulièrement élégants et efficaces (voir la section "Algorithmes de squelettisation 3D").

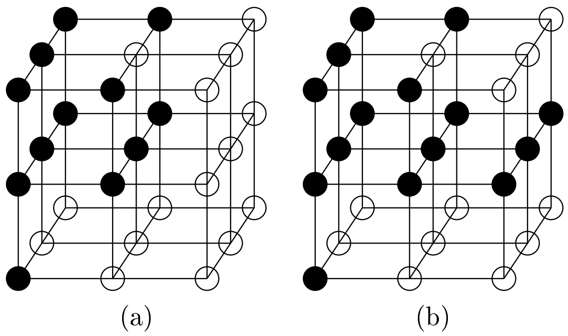


Fig. 2. (a) : Le point central est simple, (b) : le point central n'est pas simple : s'il est retiré, un trou est localement créé. Si l'on retire ce point de l'objet (qui peut s'étendre au delà du voisinage 3x3x3 montré ici) ceci aura pour effet, soit de créer un trou dans l'objet, soit de supprimer une cavité de l'objet (voir aussi la section "Un algorithme de fermeture de trous 3D").

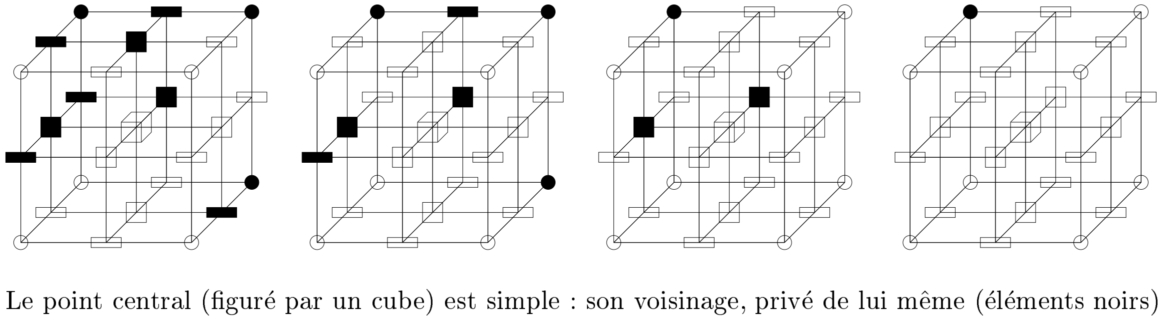


Fig. 3. Le point central (figuré par un cube) est simple : son voisinage, privé de lui même (éléments noirs) peut se rétracter en un point.

Algorithmes de squelettisation 3D

Personnes impliquées : Zouina Aktouf, Gilles Bertrand, Christophe Lohou.

Un algorithme de squelettisation réduit un objet sans changer sa topologie. Pour cela on enlève des points de l'objet qui sont simples et qui satisfont certaines conditions dites "géométriques". En 3 dimensions le choix des conditions géométriques permet de réduire l'objet en des surfaces (on a alors un squelette surfacique) ou bien en des courbes (on a un squelette curviligne). Contrairement au cas 2D, il n'existe que peu d'algorithmes de squelettisation en 3D. Certains sont des algorithmes non valides[3] (ils changent, dans certaines configurations, la topologie de l'objet), d'autres s'appuient sur une condition suffisante mais pas nécessaire pour caractériser les points simples ; il s'ensuit que le squelette obtenu contient des points inutiles.

Nous proposons plusieurs algorithmes parallèles de squelettisation 3D qui s'appuient sur les deux nombres topologiques présentés ci-dessus. Ces deux nombres permettent de détecter les points simples et de disposer de conditions géométriques conduisant à un squelette surfacique ou curviligne. Par exemple, nous avons proposé un algorithme qui utilise une décomposition en sous-mailles de la maille cubique initiale[43].

Dans le cadre des ordres (voir la section "Ordres et topologie numérique"), nous avons proposé des algorithmes de squelettisation parallèles particulièrement simples et efficaces, assurant de plus un parfait centrage du squelette par rapport à l'objet original. Des conditions caractéristiques d'extrémités de courbes ou de bords de surfaces permettent d'obtenir des squelettes curvilignes ou surfaciques (Fig. 4).

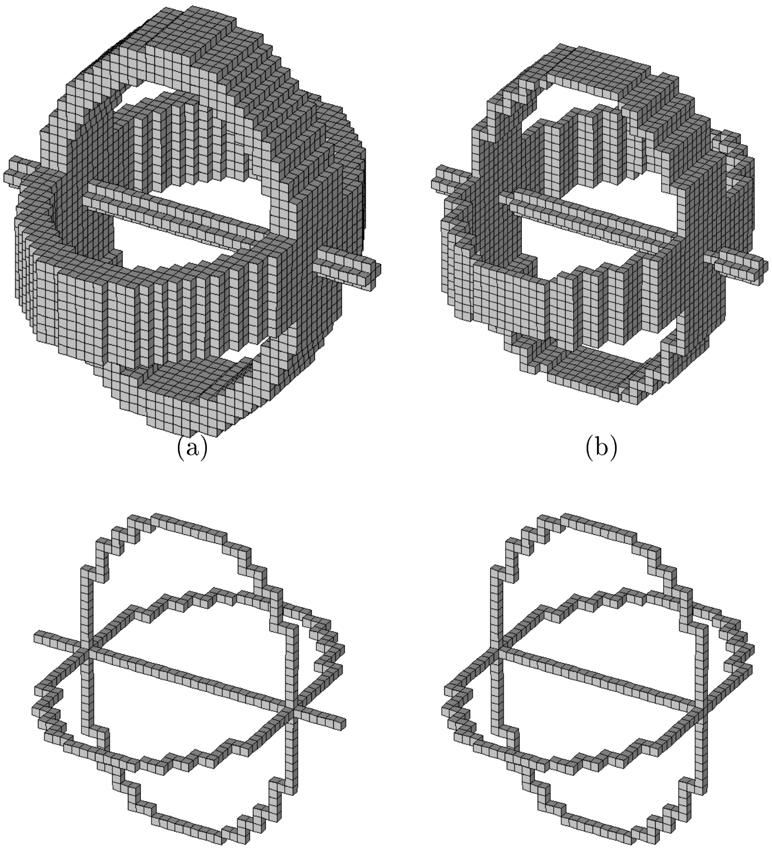


Fig. 4. (a) : Objet original, (b) : squelette surfacique, (c) : squelette curviligne, (d) : noyau homotopique.

Points P-simples et algorithmes de squelettisation 3D parallèles

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Laurent Perroton.

Par définition, on peut enlever un point simple sans modifier la topologie d'un objet. Cependant la suppression en parallèle de points simples peut changer la topologie d'un objet (Fig. 5). En 2 dimensions, certaines approches ont été proposées pour résoudre ce problème : l'une des plus utilisées consiste à classer les points dans quatre catégories, les points de type nord, sud, est, ou ouest. A chaque itération, seuls les points d'un type donné peuvent être candidats pour la suppression. Cependant cette approche n'est plus valable dans un espace à trois dimensions, comme le montre la Fig. 5 : en effet, on doit maintenant considérer les six directions nord, sud, est, ouest, haut, bas, et les points x et y sont tous deux du type haut.

A travers la notion de point P-simple, nous proposons une stratégie générale pour enlever des points en parallèle sans changer la topologie. Cette notion de point P-simple correspond a une notion d'homotopie forte : un ensemble Y est fortement homotope à un ensemble X, si Y est inclus dans X et si pour tout Z, tel que Y inclus dans Z et Z inclus dans X, Z est homotope à X. Dans ce cas $P = X \setminus Y$ est constitué de points dits P-simples (voir Fig. 6).

Nous avons proposé une caractérisation des points P-simples qui peut être effectuée en un temps linéaire. Le problème que nous avons résolu était à priori exponentiel, ce résultat est donc tout à fait inespéré[2,13].

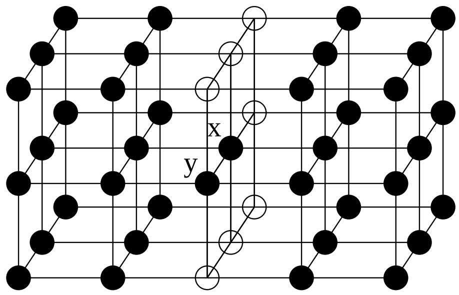


Fig. 5. Un objet composé de deux parallélépipèdes "reliés" par deux points x et y : les points x et y sont tous deux simples, cependant ils ne peuvent être supprimés en parallèle sans changer la topologie.

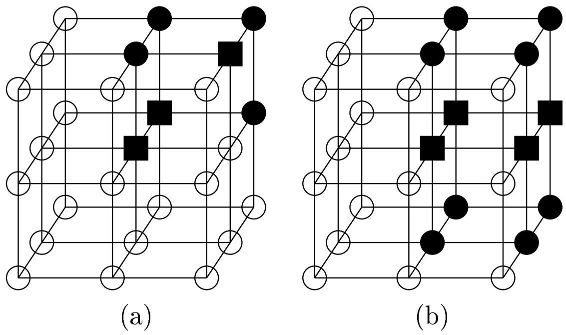


Fig. 6. Les disques noirs représentent les points de $Y = X \setminus P$, et les carrés noirs les points de P. (a) : Le point central est P-simple, (b) : le point central x n'est pas P-simple, car en enlevant certains points de P, on peut rendre x non simple.

Surfaces discrètes

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Michel Couprie, Rémy Malgouyres, Laurent Perroton.

Nous avons utilisé la notion d'homotopie forte pour proposer de nouvelles approches des surfaces simples dans une maille cubique. Soit X un sous-ensemble de $\mathcal{Z}^3$, tel que le complémentaire de X soit composé de deux composantes connexes A et B. On dira que X est une *surface forte* si $X \cup A$ et $X \cup B$ sont respectivement fortement homotopes à A et B. Cette classe de surfaces discrètes généralise les notions de surfaces discrètes proposées dans la littérature[29,30,7].

Nous avons étudié les propriétés structurales des différentes classes de surfaces discrètes[25]. Dans le continu, une surface "simple" est caractérisée par le fait que le voisinage de chaque point est homéomorphe à un disque du plan Euclidien. Une caractérisation similaire pour le discret consiste à exiger que le voisinage d'un point forme une courbe fermée simple (propriété de cycle), cependant les notions usuelles de voisinage dans $\mathcal{Z}^3$ ne permettent pas une telle caractérisation, même pour les plans discrets. Nous avons introduit une relation d'adjacence entre points de $\mathcal{Z}^3$ basée sur la notion d'homotopie, que nous avons nommée *relation de simplicité* : deux points x et y appartenant à un objet X sont liés par la relation de simplicité, si ces deux points sont non simples pour X et si en ôtant l'un de X, on rend l'autre simple. Cette relation nous a permis de montrer que les surfaces fortes (et donc les autres classes de surfaces) possèdent la propriété structurale de cycle évoquée ci-dessus.

En nous basant sur la relation de simplicité et sur la propriété de cycle, nous avons introduit une nouvelle définition de surface discrète, baptisée surface de simplicité, qui elle-même généralise la notion de surface forte[32]. Nous avons montré que ces surfaces sont des variétés combinatoires (Fig. 7).

Nous avons également travaillé sur des algorithmes de suivi de surfaces et sur leur parallélisation[4].

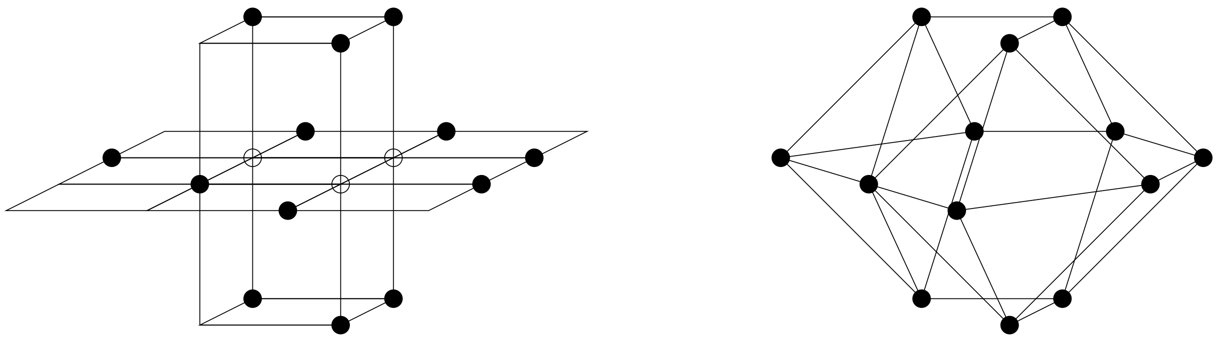


Fig. 7. Une surface de simplicité X et le graphe de la relation de simplicité pour les points de X, ce graphe permet d'extraire la structure combinatoire de la surface.

Un algorithme de fermeture de trous 3D

Personnes impliquées : Zouina Aktouf, Gilles Bertrand, Laurent Perroton.

Un trou dans un objet en 3D n'est pas une région de l'espace, comme on peut s'en convaincre en considérant un tore plein, qui est un objet comportant un unique trou (voir aussi les exemples de la Fig. 8). Intuitivement, la présence d'un trou dans un objet peut être caractérisée par l'existence d'un chemin fermé inclus dans l'objet, et ne pouvant être transformé de façon continue en un point unique, tout en restant dans l'objet.

Fermer des trous dans des objets 3D n'est donc pas un problème trivial, en particulier il n'est pas possible d'utiliser, comme en 2D, des algorithmes de recherche de composantes connexes.

En se basant sur les études que nous avons faites sur la topologie de $\mathcal{Z}^3$, nous proposons une méthode pour fermer des trous dans un objet 3D. Cette méthode permet de plus de contrôler par un paramètre la "taille" des trous à fermer (Fig. 8). Elle peut être implantée en un temps linéaire. A notre connaissance, il s'agit de la première méthode pour résoudre ce problème[15].

L'idée de base de la méthode consiste à plonger l'objet X dont on veut fermer les trous, dans un autre objet Y connexe et sans trou, tel qu'un cube par exemple. On amincit itérativement Y en enlevant des points n'appartenant pas à l'objet X, et en s'assurant que l'enlèvement du point ne crée pas de trou. Ce test est effectué à l'aide des nombres topologiques (voir ci-dessus). Afin d'obtenir un résultat bien "centré" sur l'objet X, on guide le processus d'amincissement par une transformation de distance.

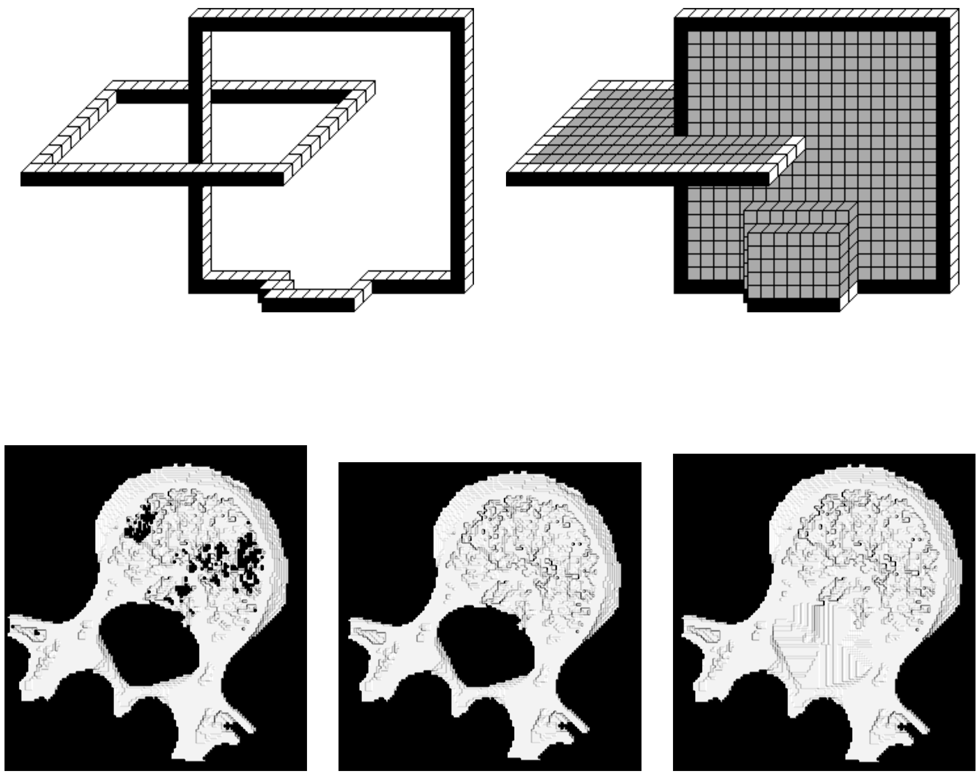


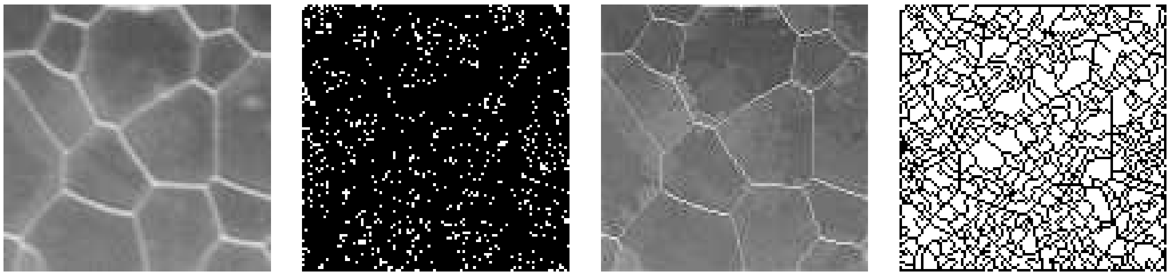
Fig. 8. Illustration d'un algorithme de fermeture de trous dans des objets 3D.

Topologie des images en niveaux de gris

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Michel Couprie, Jean-Christophe Everat.

Nous avons étendu les notions de topologie des images binaires 2D à des images en niveaux de gris 2D, c'est-à-dire à des fonctions dont le domaine est $\mathcal{Z}^2$ (ce travail peut se généraliser aisément aux fonctions dont le domaine est $\mathcal{Z}^3$). Pour cela nous considérons les différentes “coupes” d'une fonction : soit f une image 2D en niveaux de gris, i.e. une fonction de $\mathcal{Z}^2$ dans $\mathcal{Z}$, nous appelons *coupe de f au niveau k* le sous-ensemble de $\mathcal{Z}^2$: $f_k = \{x \in \mathcal{Z}^2, f(x) \geq k\}$. Nous dirons qu'une transformation “préserve la topologie” de f si cette transformation “préserve la topologie” (au sens binaire) de toutes les coupes $f_k, k \in \mathcal{Z}$. Les notions de *point destructible* et de *point constructible* généralisent, dans ce cadre, la notion usuelle de point simple. Plus généralement, nous avons montré que tout point d'une image en niveau de gris peut être caractérisé localement par son “type topologique” : il existe onze catégories de points dans cette classification.

On obtient un *noyau homotopique* d'une image, en sélectionnant un point destructible, en abaissant la valeur de ce point jusqu'à une valeur où il n'est plus destructible, et en répètant ces opérations jusqu'à stabilité (Fig. 9). Nous avons proposé plusieurs notions de noyau homotopique, et défini des opérateurs de filtrage sur de tels noyaux. Ceci nous a permis de segmenter des images en niveaux de gris sans utiliser le moindre paramètre (Fig. 10). Les premiers résultats de cette nouvelle approche de la segmentation semblent ainsi très prometteurs[6,42].



(a) (b) (c) (d)

Fig. 9. (a) : Image originale. (b) : En blanc, les minima régionaux de (a). (c) : Un noyau homotopique de (a). (d) : En blanc, les minima régionaux de (c).

(a) (b) (c)

Fig. 10. Segmentation d'une image IRM a l'aide de transformations - sans paramètres - basées sur des critères topologiques. L'image (b) corrspond à un noyau homotopique filtré obtenu à partir de l'image (a). L'image (c) est obtenue en effectuant une “propagation” de (b) dans l'image de départ.

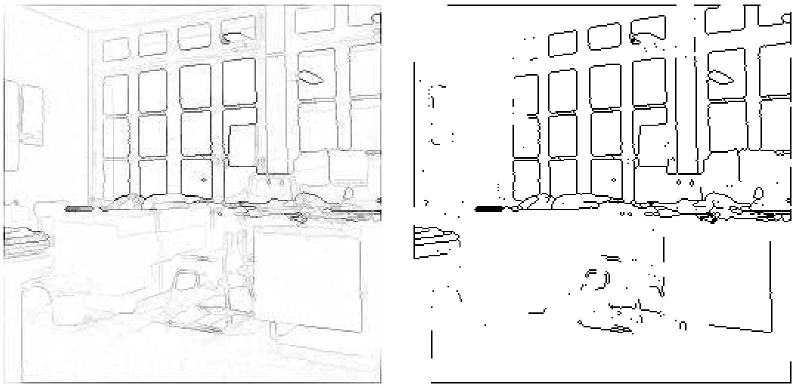
Amincissement et restauration de crêtes dans les images en niveaux de gris

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Francisco Nivando Bezerra, Michel Couprie.

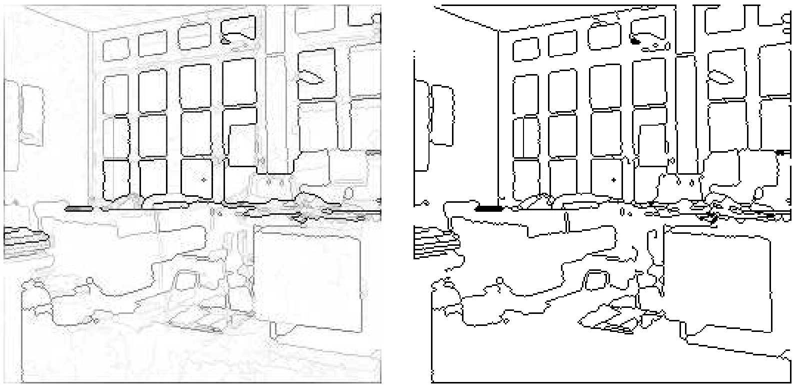
L'amincissement et la squelettisation sont des applications importantes, en traitement d'image, des notions topologiques. De très nombreux algorithmes d'amincissement pour les images binaires ont été proposés. Cependant, l'utilisation de tels algorithmes suppose une segmentation préalable de l'image, ce qui implique une perte d'information.

Nous proposons un algorithme de squelettisation agissant directement sur une image en niveaux de gris. Cet algorithme garantit la préservation de la topologie des coupes de l'image. Nous proposons également une méthode pour "filtrer" de tels squelettes, c'est-à-dire pour simplifier sélectivement la topologie en se basant sur un critère de contraste local (voir également les sections "Topologie des images en niveaux de gris" et "Reconnaissance d'empreintes digitales").

D'autre part, lorsque l'on rencontre dans des images des objets allongés et minces, il est fréquent que de tels objets soient "coupés" par l'effet du bruit, et l'on souhaiterait pouvoir reconnecter ces objets. Si l'on considère une image comme un relief topographique, un objet "filiforme" peut être vu comme une ligne de crête, et la reconnection de cet objet se ramène à la détection et au réhaussement de cols étroits dans la ligne de crête. Dans le cadre de la topologie des coupes, nous proposons une méthode efficace et rigoureusement définie pour accomplir ce travail. Cette méthode s'applique en particulier à des images de gradient, qui par nature sont constituées de lignes minces correspondant aux contours des objets de l'image originale (Fig. 11)[40].



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 11. (a) : Une image de gradient, inversée et amincie. (b) : Image (a) seuillée au niveau 58. (c) : Après la restauration des crêtes appliquée à (a). (d) : Image (c) seuillée au niveau 58.

Ligne de partage des eaux et h-minima

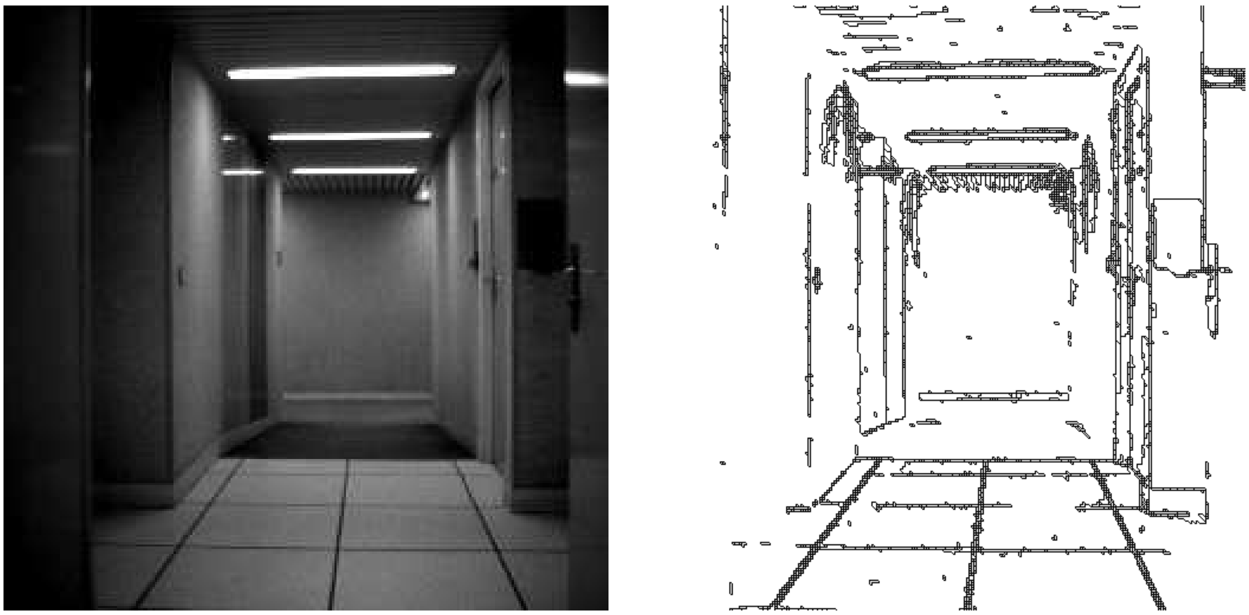
Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Michel Couprie, Petr Dokládal.

Nous avons proposé une approche originale de la notion de ligne de partage des eaux, notion classique issue du cadre de la morphologie mathématique ayant de nombreuses applications en segmentation d'images. Notre approche est basée sur l'introduction d'une topologie "mono-dimensionnelle" pour les fonctions de $\mathcal{Z}^2$ dans $\mathcal{Z}$, et plus généralement pour les graphes valués. Ceci nous permet de définir précisément, du point de vue topologique, une transformation de ligne de partage des eaux. De plus, nous avons proposé un algorithme efficace pour opérer cette transformation, et donné des exemples d'applications à la segmentation d'images en niveaux de gris[26].

L'opérateur h-minima est également un outil issu du cadre de la morphologie mathématique. Il permet de filtrer une image en niveaux de gris à partir d'un critère basé sur la "profondeur" des minima régionaux : si un minimum a une profondeur inférieure à un seuil h, alors il est éliminé, sinon il est retenu et peut servir de marqueur pour une étape ultérieure de segmentation.

L'application directe de l'opérateur h-minima est limité aux cas où l'on souhaite segmenter l'image en deux classes de pixels (objet/fond), l'objet et le fond pouvant être constitués de plusieurs composantes connexes. Pour appliquer cet opérateur à un problème de segmentation multi-classes, où les régions à segmenter peuvent éventuellement se toucher les unes les autres, on passe classiquement par une image de gradient. Toutefois, les gradients discrets sont délicats à utiliser, en particulier des détails fins de l'image originale peuvent être perdus.

Nous avons proposé un opérateur h-minima agissant sur un graphe valué, qui permet la résolution directe de problèmes de segmentation multi-classes, sans passer par un gradient[39]. Ceci nous permet de segmenter des structures fines qui seraient perdues avec l'utilisation de l'approche classique (Fig. 12).



(a) (b)

Fig. 12. (a) : Image originale. (b) : Application de notre opérateur h-minima.

3. DÉVELOPPEMENTS ET APPLICATIONS

Quantification automatique du myocarde

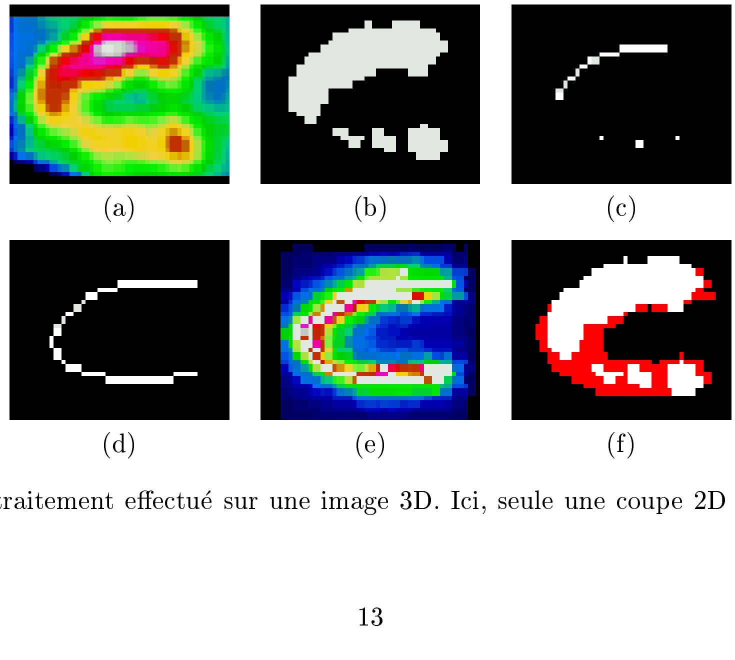
Personnes impliquées : Zouina Aktouf, Gilles Bertrand, Didier Scellier (Sopha Médical)

Une substance radioactive (traceur) est injectée par voie intraveineuse à un patient. A l'aide d'une caméra à scintillation, et par l'utilisation de techniques de reconstruction, on peut obtenir une image tri-dimensionelle composée de voxels (éléments de volume) dans laquelle la "luminosité" de chaque voxel représente la concentration du traceur dans l'élément de volume correspondant. Dans le cas du cœur, le traceur radioactif a la particularité de se fixer forterment dans les zones viables du myocarde. Notre but est d'obtenir des informations quantitatives sur les parties saines et pathologiques, ce qui implique une segmentation du myocarde dans son intégralité.

La figure Fig. 13 illustre la séquence des traitements réalisés : l'image originale (a) est d'abord segmentée grossièrement par un simple seuillage (b). Un squelette 3D (c) est ensuite obtenu à partir de (b). Lorsque le myocarde présente un défaut, le squelette peut être déconnecté ou présenter des trous. Pour reconstituer l'allure supposée de l'organe, le squelette est complété conformément à un modèle en forme de balle de fusil tronquée (d). Un algorithme basé sur la logique floue utilise le squelette ainsi complété ainsi que l'image originale pour créer une nouvelle image dont le niveau de gris d'un point représente son degré d'appartenance au myocarde (e). L'image des degrés d'appartenance peut être segmentée simplement par des seuils locaux (f). Le myocarde peut ensuite être sectorisé, et un pourcentage d'activité dans les secteurs, exprimé en fonction du secteur le plus fixant, peut être calculé.

Notre contribution principale fut de proposer et d'implanter un nouvel algorithme de squelettisation adapté à cette application. En particulier, notre algorithme permet l'élimination de certaines "barbules", ou branches non significatives, dans le squelette. Il est nécessaire de filtrer ces barbules, car leur présence fausse la reconstruction du myocarde. Une seconde spécificité de notre algorithme concerne la préservation de la topologie des coupes 2D. L'algorithme de segmentation floue s'applique sur une série de coupes 2D, et doit nécessairement travailler sur des squelettes qui préservent à la fois la topologie 3D de l'objet ainsi que la topologie des coupes 2D.

Cette étude a fait l'objet d'un contrat avec la société Sopha Médical.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

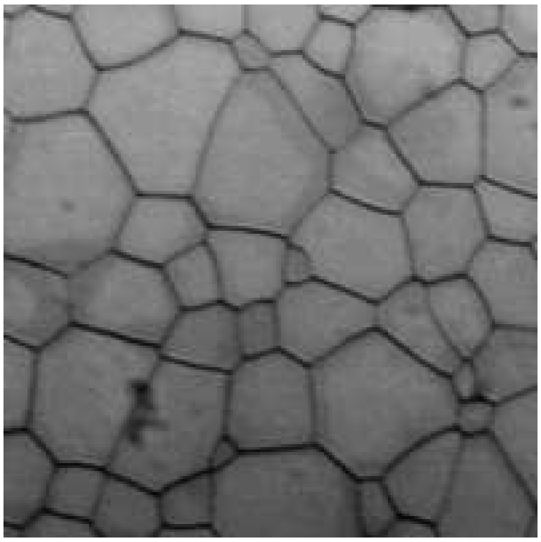
Fig. 13. Illustration du traitement effectué sur une image 3D. Ici, seule une coupe 2D est présentée pour chaque étape.

Analyse d'images microscopiques de matériaux

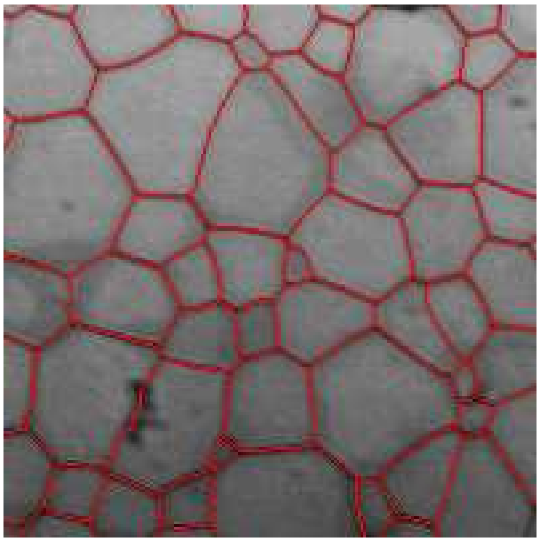
Personnes impliquées : Arnaldo de Albuquerque Araujo, Marcos C. Andrade, Gilles Bertrand, Michel Couprie, Laurent Letellier (LETI, CEA), Régis Vinciguerra (stagiaire de fin d'études ESIEE, majeure Informatique).

Dans les centrales nucléaires destinées à la production d'électricité, le principal "carburant" utilisé est l'oxyde d'uranium, conditionné sous la forme de pastilles de céramique. Ces pastilles sont obtenues par compression d'une poudre constituée de grains d'oxyde, la céramique conserve donc une structure hétérogène qui peut être mise en évidence par microscopie : voir Fig. 14(a) une portion d'une coupe d'une de ces pastilles (la taille d'un grain est de l'ordre de 10 μm). Le comportement du carburant lors du fonctionnement du réacteur dépend, entre autres facteurs, de la taille des grains d'oxyde et de la porosité des pastilles (taille des joints, présence d'alvéoles). Pour étudier ces paramètres qui sont par nature tri-dimensionels, des méthodes ont été mises au point qui permettent de partir d'une mesure de caractéristiques statistiques bi-dimensionnelles, pouvant être obtenues à partir d'images de coupes comme celle de la Fig. 14(a).

Le principal problème est pour nous de partitionner l'image en ses différents grains : nous appelons cette opération une *segmentation*. Bien que réalisée facilement par l'œil et le cerveau humain, la segmentation d'une image peut poser des problèmes difficiles, souvent dus à la présence de bruit et à la discrétisation des données. Nous avons contribué à l'analyse de telles images en proposant de nouvelles méthodes de segmentation basées sur des notions de topologie en niveaux de gris[6,40], et en implémentant de manière efficace des méthodes issues du cadre de la morphologie mathématique[26]. Une "bonne" segmentation de l'image initiale, obtenue grâce à l'une de nos méthodes, est présentée Fig. 14(b). Nous avons réalisé pour le LETI-CEA une étude portant sur l'analyse de telles images, qui a donné lieu à un contrat.



(a)



(b)

Fig. 14. Segmentation d'une micrographie de céramique d'oxyde d'uranium. (a) : image originale, (b) : segmentation de (a), en surimpression avec l'image originale.

Analyse de séquences d'images pour l'étude de la déformation de matériaux soumis à des chocs

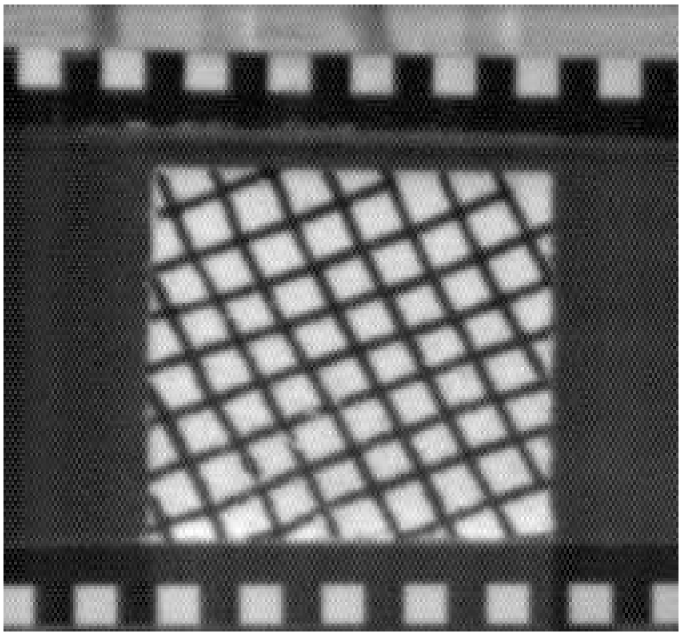
Personnes impliquées : Amina Alaoui (CERMMO, École Nationale des Ponts et Chaussées), Hicham Alaoui (stagiaire de DEA de l'UMLV), Michel Couprie

---

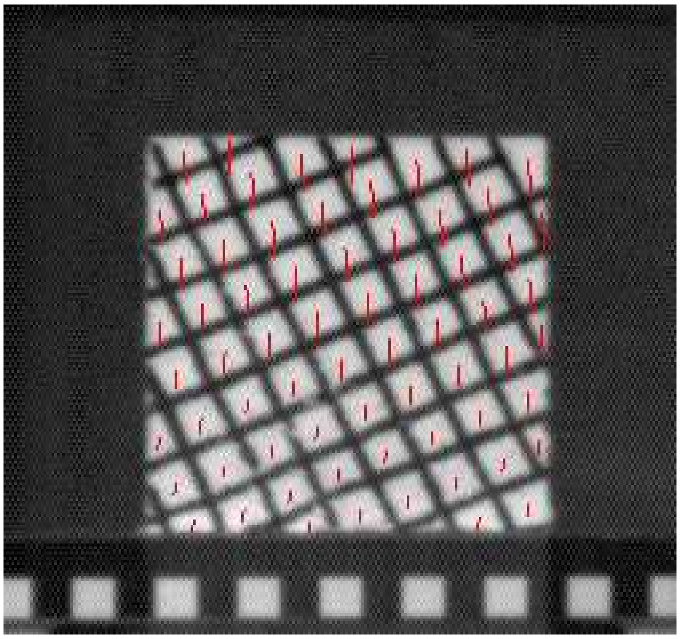
Lors d'un accident de la circulation, une grande partie de l'énergie du choc peut être absorbée par des matériaux déformables placés dans les carosseries ou dans les casques. Ces matériaux sont en général des mousses de polymères. Le laboratoire CERMMO de l'École Nationale des Ponts et Chaussées réalise une étude des déformations de ces matériaux sous l'effet de chocs, dans le but de sélectionner les compositions et les dimensions les mieux adaptées aux différentes conditions d'utilisation.

Les expériences réalisées dans un premier temps consistent à placer un échantillon du matériau, de forme approximativement cubique, dans un puits de chute et à laisser tomber sur celui-ci un poids. En faisant varier la hauteur de la chute, on peut obtenir des vitesses différentes au moment du choc. Le matériau est filmé durant le choc au moyen d'une caméra rapide (jusqu'à 10000 images/seconde). Pour faciliter le traitement par analyse d'images, une grille est peinte sur l'échantillon, et des mires sont disposées au-dessus et en-dessous de celui-ci (Fig. 15(a)). La séquence d'image obtenue lors d'une expérience doit être traitée afin d'obtenir les trajectoires, en deux dimensions, de points situés sur la face marquée de l'échantillon : ces points sont les isobarycentres des régions claires du marquage.

La première étape du traitement consiste en une extraction des régions claires du marquage et des mires. La mesure des mires permet d'obtenir la taille réelle représentée par un pixel de l'image. Les isobarycentres des régions claires du marquage sont alors calculés. Dans une seconde étape, les points (isobarycentres) obtenus à partir de la n-ième image doivent être mis en correspondance avec les points issus de la $n+1$-ième, afin de pouvoir reconstituer les trajectoires (Fig. 15(b)). Une des difficultés majeures vient de ce que, les dimensions de l'échantillon diminuant avec l'écrasement, certaines régions claires peuvent disparaître au cours de la séquence. Les étapes suivantes sont consacrées au calcul, à l'analyse et à l'affichage des résultats : trajectoires individuelles, champ des vecteurs de déplacements, courbes isovaleurs des déformations en x, en y et en module.



(a)



(b)

Fig. 15. Analyse de séquences d'images. (a) : un échantillon de mousse de polymère, quelques millisecondes après le début du choc, (b) : les trajectoires des barycentres des régions claires, en surimpression avec l'image de l'échantillon avant le début du choc.

Reconnaissance de bactéries sur des images de microscopie en épifluorescence

Personnes impliquées : Michel Couprie, Jean-Marie Mouchel (CERGRENE, École Nationale des Ponts et Chaussées).

Étudiants associés : Sébastien Colas, Pierre Yvonnet (4^{e} année ESIEE, majeure Informatique).

Ce sujet nous a été proposé par Jean-Marie Mouchel du CERGRENE (ENPC) qui travaille sur la qualité des eaux de la Seine et nous a fourni une grande variété d'images de bactéries dans des échantillons d'eau de Seine.

Différents produits marqueurs de tout ou parties de bactéries peuvent être ajoutés à des solutions contenant des bactéries (eaux naturelles, industries agro-alimentaires....), certains produits sont même spécifiques de certains types de bactéries. Une fois les bactéries "marquées", elles peuvent être observées et dénombrées sous un microscope à épifluorescence (Fig. 16). La procédure est fastidieuse et fatigante pour les yeux. De plus, il est très difficile d'évaluer la taille des bactéries observées. Les techniques alternatives à la microscopie sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre dans tous les milieux.

Notre but est ici de tester et d'améliorer un algorithme robuste destiné à reconnaître les bactéries sur les images produites en épifluorescence. L'algorithme doit pouvoir être appliqué automatiquement à toutes sortes d'images sans que l'opérateur ait à introduire des paramètres différents pour chaque image. En effet, les images peuvent être plus ou moins encombrées de traces de particules qui ne sont pas des bactéries et qu'il faut éliminer. Il arrive également que des bactéries soient englobées dans un gel : dans un tel cas les procédures classiques de traitement d'image, basées sur un seuillage, fonctionnent très mal.

Nous avons développé une chaîne de traitement automatique de ce type d'images. Un des objectifs était de vérifier l'application de nos algorithmes à un nombre d'images suffisant pour être représentatif de toutes les situations rencontrées. Un groupe d'étudiants de l'ESIEE a été associé à ce développement dans le cadre d'un projet interne.

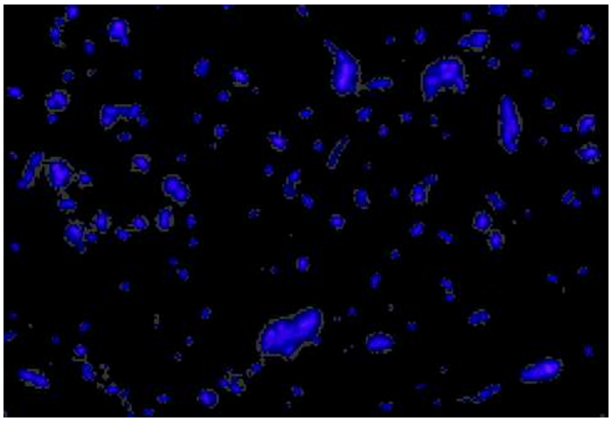


Fig. 16. Bactéries sur une image de microscopie en épifluorescence.

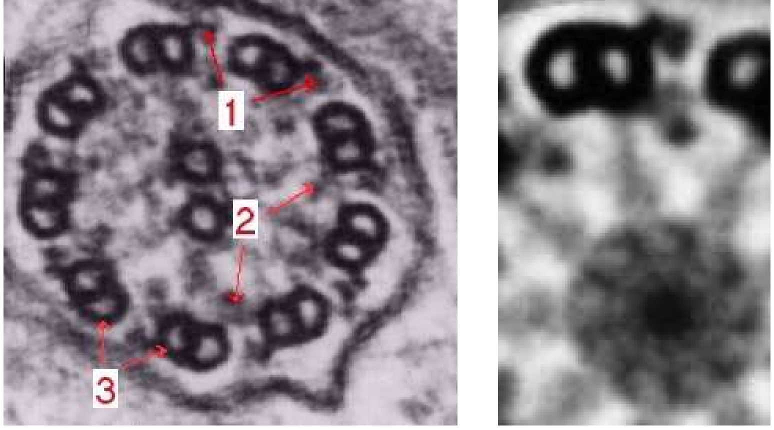
Analyse d'images médicales : aide au diagnostic du "syndrôme des cils immobiles"

Personnes impliquées : Michel Couprie, Estelle Escudier (Hôpitaux de Paris), Qosai Kanafani (stagiaire de DEA de l'UMLV).

Cette étude nous été proposée par le Dr. Estelle Escudier, qui travaille au service d'histologie de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris).

Certaines cellules sont pourvues d'un long cil (ou flagelle) qui est responsable de leur mobilité. Cette image (Fig. 17(a)), obtenue par micrographie électronique, montre une coupe transversale d'un cil. Les médecins et biologistes ont montré que la mobilité du cil est lié à la présence de structures moléculaires appelées bras dynéiques. On distingue les bras externes (1) et les bras internes (2), qui sont "accrochés" à des structures formant un "8" : il s'agit, vues en coupe, de paires de cylindres appelés microtubules (3). Pour aider à la détection de ces bras, on peut profiter de la symétrie de la cellule pour superposer et moyenner les parties analogues de l'image et ainsi renforcer le rapport signal/bruit.

La première étape de l'analyse consiste à repérer les positions des centres des microtubules. Nous avons mis au point plusieurs méthodes pour résoudre ce problème, le but recherché étant la robustesse : en effet, parmi les centaines d'images que nous avons traitées, on a pu constater une grande variabilité des formes et des paramètres quantitatifs (taille, luminosité, contraste ...). Grâce aux positions obtenues, il est possible d'identifier les paramètres de transformations affines linéaires (à peu de chose près, des rotations) permettant de superposer les microtubules. L'image obtenue (Fig. 17(b)) est beaucoup plus lisible que l'image originale, car les bras dynéiques sont bien localisés par rapport aux microtubules et se renforcent, alors que le bruit ne l'est pas et se trouve donc atténué par le moyennage. Ce résultat peut être visuellement exploité par des experts, en vue de diagnostiquer une maladie, le syndrôme des cils immobiles, qui intervient lorsque les bras sont absents ou atrophiés.



(a) (b)

Fig. 17. (a) : coupe transversale d'un cil, (b) : résultat du traitement.

Reconnaissance d'empreintes digitales

Personnes impliquées : Gilles Bertrand, Francisco Bezerra, Michel Couprie. Étudiants associés : Julien Bourgeois, Alexandre Duverger, Johann Desemery, Jérôme Leclerq, Fabrice Mano-Martins, Huynh Hue Quan (3^e année ESIEE).

Le but de cette étude est de pouvoir comparer une empreinte digitale aquise au moyen d'un capteur miniaturisé (SAGEM) à des modèles stockés dans une base de données, afin de permettre un contrôle d'accès (à un local, à un compte informatique, etc). La comparaison est basée sur la recherche et la mise en correspondance de points caractéristiques appelés *minuties* : les plus nombreuses consistent en des "fourches" dans les parties noires ou blanches de l'image (Fig. 18(a)). Les modèles stockés consistent en des graphes ayant pour sommets les minuties, enrichis d'informations (distances, angles) permettant la mise en correspondance.

La chaîne de traitement se décompose en quatre étapes principales : i) extraction d'un squelette en niveaux de gris (Fig. 18(b), voir également la section "Amincissement et restauration de crêtes dans les images en niveaux de gris") ; ii) extraction des minuties correspondant aux fourches significatives du squelette (Fig. 18(c)) ; iii) construction du graphe "image" (Fig. 18(d)) ; iv) tentative de mise en correspondance du graphe image avec les graphes modèles.

Un prototype réalisé par des étudiants ESIEE implémente ces fonctions, et donne des résultats encourageants sur la base de test que nous avons constituée (une centaine d'empreintes provenant de dix personnes).

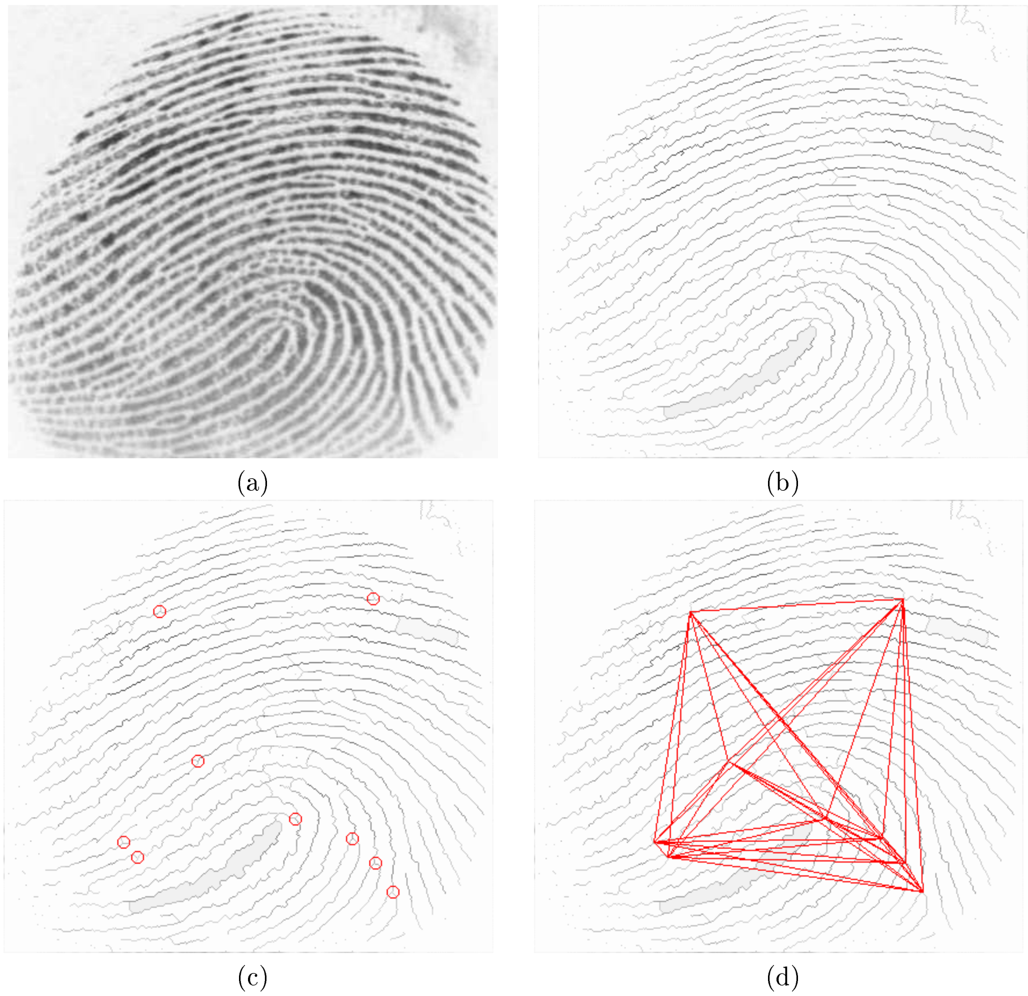


Fig. 18. (a) : Image originale. (b) : Squelette filtré, correspondant aux parties sombres. (c) : Les principales minuties extraites de (b). (d) : Graphe des couples de minuties. Les sommets et les arcs de ce graphe sont valués par des informations géométriques (distances, angles, ...)

4. FORMATION DOCTORALE

Thèses soutenues

- Jean-Christophe Everat, "Topologie des coupes et segmentation d'images par extraction de minima", thèse soutenue le 11/12/1997. Jury : I. Bloch, rapporteur, S. Philipp, rapporteur, J. Serra, président, G. Bertrand, directeur de thèse, C. Ronse, examinateur, F. Solliec, examinateur.
- Zouina Aktouf, "Opérateurs topologiques pour images binaires 3D", thèse soutenue le 19/12/1997. Jury : J.Y. Boire, rapporteur, J.M. Chassery, rapporteur, G. Bertrand, directeur de thèse, G. Malandain, examinateur, A. Mérigot, examinateur, L. Perroton, examinateur.
- Marcos C. Andrade, "Méthode topologique de segmentation d'images par attributs", thèse en co-tutelle avec l'Université de Belo Horizonte (Brésil), soutenue le 29 mai 1998. Jury : A. de Albuquerque Araújo, directeur de thèse, G. Bertrand, co-directeur de thèse, G.J.F. Banon, examinateur, N.J. Leite, examinateur, F.S. Lameiras, examinateur, M.F.M. Campos, examinateur.

Thèses en cours

- Francisco Nivando Bezerra, en thèse depuis septembre 1998. Sujet "Application de la topologie discrète pour l'analyse d'images en niveaux de gris".
- Petr Dokládal, en thèse depuis 1995, en co-tutelle avec l'université de Brno (République Tchèque). Sujet "Analyse topologique des images médicales".
- Chistophe Lohou, en thèse depuis octobre 1997. Sujet "Contribution à l'analyse topologique des images binaires".

Diplôme d'Études Approfondies

Nous avons participé aux enseignements dans deux DEA en co-habilitation :

- Information Scientifique et Technique (jusqu'en 1998, co-habilitation Paris VII, CNAM, ESIEE, Aix-Marseille III, INSTN, UMLV, AUPELF-UREF)
- Informatique Fondamentale et Applications (co-habilitation ENPC, ESIEE, UMLV, Paris VII)

Jurys de thèse

Nous avons participé à de nombreux jurys de thèse, à l'ENST, l'ENSMP, et dans les universités de Paris VI, Paris VII, Grenoble, Caen, Clermont-Ferrand, Strasbourg, Lyon, Marne-la-Vallée.

5. PARTICIPATION À LA VIE SCIENTIFIQUE

Appartenance à des comités

Nous faisons partie de comités de programme de plusieurs conférences internationales :

- Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI'99), ESIEE, Marne-la-Vallée
- SPIE Vision Geometry '99, Denver, Colorado, USA
- International Workshop on Parallel Image Analysis (IWPIA'99) Madras, Inde
- SIBGRAPI'99, Campinas, Brésil
- International Workshop on Combinatorial Image Analysis (IWCIA'2000), Caen, France
- SPIE Vision Geometry '2000, San Diego, California, USA
- Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI'2000), Upsala, Suède

Journaux scientifiques

Nous participons de façon régulière à l'évaluation d'articles pour des journaux, citons :

- Pattern Recognition Letters
- Computer Graphics, Vision and Image Processing
- Journal of Mathematical Imaging and Vision
- Theoretical Computer Science

Conférences invitées

- Gilles Bertrand, "P-simple points and 3D parallel thinning algorithms", IWPIA, Hiroshima, Japon, 1997.
- Gilles Bertrand, "Algorithmes et opérateurs topologiques pour l'analyse d'images binaires", (UMLV 1995, LIAFA 1996, Univ. Caen 1997, ETCA 1998).
- Michel Couprie, "Topologie des coupes et applications à l'analyse d'images en niveaux de gris ", ETCA, France, 1998.
- Michel Couprie, "Une ligne de partage des eaux topologique", Université de Campinas, Brésil, 1997.
- Michel Couprie, "Une ligne de partage des eaux topologique", Université de Belo Horizonte, Brésil, 1997.
- Laurent Perroton, "Case study : A 3D holes closing algorithm", Université de Belo Horizonte, Brésil, 1998.
- Gilles Bertrand, "New notions for discrete topology", Discrete Tomography Workshop, Thionville, France, 1999.

Cours invités

- Michel Couprie, "La topologie discrète pour le traitement des images en niveaux de gris", Université de Campinas, Brésil, 1997.
- Michel Couprie, "La topologie discrète pour le traitement des images en niveaux de gris", Université de Belo Horizonte, Brésil, 1997.
- Laurent Perroton, "Parallel processing for imaging", Université de Belo Horizonte, Brésil, 1998.

Expertise

- Expertise pour la National Foundation of Science (NFS - USA).
- Expertise pour le ministère de la recherche.
- Expertise pour la société S.A. Calcul Mathématique.

Échanges internationaux

Nous participons depuis de nombreuses années à des échanges dans le cadre d'un projet Franco-Brésilien financé par le CAPES-COFECUB :

- Année sabbatique de Arnaldo de Albuquerque Araújo à l'ESIEE (1994-1995).
- Thèse de Marcos C. Andrade en co-tutelle avec l'Université de Belo Horizonte et l'ESIEE (1995-1998).
- Séjour de Laurent Perroton à Belo-Horizonte , 2 semaines en 1998.
- Séjour de Michel Couprie à Campinas et Belo-Horizonte (Brésil), 15 jours en octobre 1997.
- Séjour de Gilles Bertrand à Belo-Horizonte (Brésil), 2 semaines en mai 1998.
- Séjour de Neucimar J. Leite à l'ESIEE en juin 1998 (3 semaines).
- Séjour de Arnaldo de Albuquerque Araújo à l'ESIEE en mai 1998 (2 semaines).
- Début de la thèse de Francisco Nivando Bezerra à l'ESIEE, septembre 1998.
- Séjour de Marcos C. Andrade à l'ESIEE en mars 1999 (3 semaines).

Animation scientifique

- Organisation du groupe de travail "Géométrie et topologie discrète" au niveau national. Séminaire bi-mensuel.
- Organisation les 17, 18 et 19 avril 1999 de la huitième conférence "Discrete Geometry for Computer Imagery" (DGCI). Nous avons accueilli 80 participants, les actes sont publiés par Springer Verlag dans la série "Lecture Notes in Computer Science".

6. COOPÉRATIONS

- CERGRENE (École Nationale des Ponts et Chaussées) : Jean-Marie Mouchel ; reconnaissance de bactéries pour l'analyse de la qualité des eaux fluviales.
- CERMMO, (École Nationale des Ponts et Chaussées) : Amina Alaoui ; analyse de séquences d'images pour l'étude de la déformation de matériaux soumis à des chocs.
- Hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris) : Estelle Escudier ; analyse d'images médicales, aide au diagnostic.
- INRIA (Sophia-Antipolis) : Grégoire Malandain ; topologie discrète et analyse d'images.
- Institut Gaspard Monge (Université de Marne-la-Vallée) : Didier Arquès, Sylvain Michelin ; imagerie.
- ISMRA (Caen) : Rémy Malgouyres ; surfaces discrètes.
- LETI (CEA) : Laurent Letellier ; analyse d'images de matériaux.
- LIAFA (Université Paris VI) : Maurice Nivat ; Géométrie discrète.
- Sopha Médical : Didier Scellier ; analyse d'images médicales.
- Université de Campinas (Brésil) : Neucimar Jerônimo Leite ; analyse d'images.
- Université de Clermont-Ferrand : Jean-Yves Boire ; analyse d'images médicales.
- Université Fédérale du Minas Gerais (Belo Horizonte, Brésil) : Arnaldo de Albuquerque Araujo ; analyse d'images de matériaux.

7. CONTRATS

- Sopha Médical : analyse d'images du myocarde, 1997. Voir la section "Quantification automatique du myocarde".
- CEA : analyse d'images microscopiques de coupes de pastilles de combustible nucléaire, 1998. Voir la section "Analyse d'images microscopiques de matériaux".
- Participation à un contrat avec OCE Industrie : compression d'images grand format par circuit reconfigurable, 1999.
- Initialisation du projet MARA, 1999. Ce projet impliquant Thomson-CSF, l'université de Rouen et l'université de Marne-la-Vallée, a pour but l'étude et la réalisation d'un système d'aide à la maintenance par des techniques de réalité virtuelle augmentée.

8. PUBLICATIONS

Revues

1. G. Bertrand : “A parallel thinning algorithm for medial surfaces”, *Pattern Rec. Letters*, No. 16, pp. 979-96, 1995.
2. G.Bertrand : “On P-simple points”, *Comptes Rendus Acad. des Sciences, Série Math.*, Vol. I, No. 321, pp. 1077-1084, 1995.
3. G. Bertrand and G. Malandain : “A note on “building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms” *CVGIP : Graphical Models and Image Processing*, Vol. 57, No. 6, pp. 537-538, 1995.
4. L. Perroton : “A new 26-connected objects surface tracking algorithm and its related PRAM version”, *International Journal on Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, No. Special issue, pp. 231-246, 1995.
5. G. Bertrand : “A Boolean characterization of three-dimensional simple points”, *Pattern Rec. Letters*, No. 17, pp. 115-124, 1996.
6. G. Bertrand, J. C. Everat and M. Couprie : “Image segmentation through operators based upon topology”, *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 6, No. 4, pp. 395-405, 1997.
7. R. Malgouyres, G. Bertrand : “A new local property of strong n-surfaces”, *Pattern Rec. Letters*, No. 20, pp. 417-428, 1999.
8. G. Bertrand, R. Malgouyres : “Some topological properties of surfaces in Z^3”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, No. 11, pp. 207-221, 1999.
9. M.C. de Andrade, G. Bertrand, A.A. de Araujo : “An attribute-based image segmentation method”, *Materials Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 145-151, 1999
10. Z. Aktouf, G. Bertrand, L. Perroton : “A three-dimensional holes closing algorithm”, submitted to *Pattern Rec. Letters.*
11. R. Malgouyres, G. Bertrand : “Complete local characterization of strong 26-surfaces”, *Int. Journal on Pattern Rec. and Artif. Int.*, accepted for publication.
12. M. Couprie, F.N. Bezerra, G. Bertrand : “Grayscale image processing using topological operators”, selected for publication in *Journal of Electronic Imaging.*

Actes de congrès

13. G. Bertrand : “P-simple points : a solution for parallel thinning”, *5th Conf. on Discrete Geometry*, pp. 233-242, 1995.
14. G. Bertrand : “Sufficient conditions for 3D parallel thinning algorithms”, *SPIE Vision Geometry IV*, Vol. 2573, pp. 52-60, 1995.
15. Z. Aktouf, G. Bertrand, L. Perroton : “A three-dimensional holes closing algorithm”, *Discrete geometry for computer imagery, Springer Verlag*, Vol. 1176, pp. 36-48, 1996.
16. A. de Albuquerque Araújo, G. Bertrand : “Enhancement of paintings infrared photographies using mathematical morphology and topological processing”, *SPIE Applications of digital image processing* , Vol. 2847, pp. 677-685, 1996.
17. G. Bertrand, J.C. Everat, M. Couprie : “ Topological approach to image segmentation”, *SPIE Vision Geometry V*, Vol. 2826, pp. 65-76, 1996.
18. G. Bertrand, R. Malgouyres : “Some topological properties of discrete surfaces”, *Discrete geometry for computer imagery, Springer Verlag*, Vol. 1176, pp. 325-336, 1996.
19. J.C. Everat, G. Bertrand : “New topological operators for image segmentation”, *IEEE Int. Conf. on Image Proc.*, Vol. III/III, pp. 45-48, 1996.
20. M.C. de Andrade, G. Bertrand, J.C. Everat, A.A. Araújo : “Segmentation of ceramical micrographies by flooding simulation : a catchment basins merging algorith”, *IX SIBGRAPI*, 1996.
21. P. Dokládal : “Greyscale 2D-Image Topology using Graphs”, *Proc. Telekomunikace ’96*, Université Technique de Brno, 1996.

22. M.C. de Andrade, G. Bertrand, A.A. Araújo : "Segmentation of microscopic images by flooding simulation : a catchment basins merging algorith", *SPIE Nonlinear Image Proc. VIII*, 1997.
23. G. Bertrand : "P-simple points and 3D parallel thinning algorithms", *5th International Workshop on Parallel Image Analysis*, Hiroshima, pp. 179-191, 1997.
24. J.C. Everat, G. Bertrand, M. Couprie : "Reconstruction operators for image segmentation", *Proceedings of 3rd International Workshop on Visual Form, IAPR*, 1997.
25. G. Bertrand, M. Couprie : "Some structural properties of surfaces", *Discrete geometry for computer imagery, Springer Verlag*, Vol. 1347, pp. 113-124, 1997.
26. M. Couprie, G. Bertrand : "Topological Grayscale Watershed Transformation", *SPIE Vision Geometry VI Proceedings*, Vol. 3168, pp. 136-146, 1997.
27. L. Perroton, Z. Aktouf : "Parallelization of an Efficient 3D Thinning Algorithm", *SPIE Proceedings (Parallel and Distributed Methods for Image Processing)*, Vol. 3166, pp. 128-134, 1997.
28. D. Scellier, J.Y. Boire, J. Maublant, Z. Aktouf, G. Bertrand : "3-dimensional homotopic skeleton for the treatment and analysis of the left ventricule in ERIM spect", *16e Col. GRETSI Trait. Signal et Images*, 1997.
29. G. Bertrand, R. Malgouyres : "Local property of strong surfaces", *SPIE Vision Geometry VI.*, Vol. 3168, pp. 318-327, 1997.
30. R. Malgouyres, G. Bertrand : "Complete local characterization of strong 26-surfaces", *Int. Work. on Par. Im. An.*, pp. 192-201, 1997.
31. P. Dokládal : "Topology Operators for Image Segmentation", *Proc. ECSAP '97*, Prague, juin 1997,
32. M. Couprie, G. Bertrand : "Simplicity surfaces : a new definition of surfaces in Z3", *SPIE Vision Geometry VII.*, Vol. 3454, pp. 40-51, 1998.
33. P. Dokládal and G. Bertrand : "Adjacency Graphs and Image Segmentation : Study of Application", Proc. BIOSIGNAL '98, Université Technique de Brno, 1998.
34. W.N. Matta, A. de Albuquerque Araújo, M.C. de Andrade, G. Bertrand : "Segmentation of Boron Carbide Microscopic Images which present twins", Proc. EUSIPCO Signal Processing IX, Vol. IV, pp. 2505-2508, 1998.
35. G. Bertrand : "New notions for discrete topology", *Discrete geometry for computer imagery, Springer Verlag*, Vol. 1568, pp. 216-226, 1999.
36. G. Bertrand, M. Couprie : "A model for digital topology", *Discrete geometry for computer imagery, Springer Verlag*, Vol. 1568, pp. 227-239, 1999.
37. P. Dokládal, C. Lohou, L. Perroton and Gilles Bertrand : "Liver Blood Vessels extraction by a 3-D topological approach", Proc. MICCAI '99, Cambrigde, september 1999.
38. P. Dokládal, C. Lohou, L. Perroton, G. Bertrand : "A new thinning algorithm and its application to the extraction of blood vessels", *Procs. of Biomedsim'99*, pp. 32-37, ESIEE Noisy-le-Grand, France, 1999.
39. P. Dokládal, G. Bertrand : "Application of h-minima to multiclass images using graphs", *Procs. of 2nd. workshop on Graph-based Representations*, 1999.
40. M. Couprie, F. Nivando Bezerra and G. Bertrand : "Grayscale image processing using topological operators", *SPIE Vision Geometry VIII.*, Vol. 3811, pp. 261-272, 1999.
41. C. Lohou, G. Bertrand : "Poset approach to 3D parallel thinning", *SPIE Vision Geometry VIII.*, Vol. 3811, pp. 45-56, 1999.

Rapports de thèses

42. J.C. Everat : "Topologie des coupes et segmentation d'images par extraction de minima", thèse de doctorat de l'Université Denis Diderot (Paris VII), 1997.
43. Z. Aktouf : "Opérateurs Topologiques pour Images Binaires 3D", thèse de doctorat de l'Université Paris Sud, 1997.
44. M.C. Andrade : "Méthode topologique de segmentation d'images par attributs", thèse de doctorat de l'Université de Belo Horizonte, Brésil, 1998.