

Université Paul Sabatier – Toulouse 3 École Doctorale Informatique et Télécommunications

# Classification d'objets de révolutions : application aux poteries sigillées

# THÈSE

présenté et soutenu publiquement le XX décembre 2008

pour l'obtention du grade de

## Docteur de l'Université Paul Sabatier (Spécialité Informatique)

par

Chaouki Maiza

Composition du jury

Président :Le président du juryRapporteurs :Le rapporteur 1<br/>Le rapporteur 2Examinateurs :L'examinateur 1<br/>L'examinateur 2

## Remerciements

# Table des matières

Introduction			1		
1	Etat de l'art : archéologie et poterie				
	1.1	Ceran	nic Vessel	Classification	9
			a)	Acquisition 3D :	10
			b)	Représentation des données :	10
		1.1.1	Outil int	ceractif de consultation de poteries	10
		1.1.2	Outil d'e	étude morphologique de céramiques	11
			a)	Extraction de caractéristiques et segmentation :	12
			b)	Stockage de données :	13
			c)	Requêtes :	14
		1.1.3	Remarqu	1es	15
	1.2	Le pro	ojet STIT	СН	16
		1.2.1	Estimati	ion de l'axe de rotation et du profil	16
			a)	Le profil est une spline linéaire :	16
			b)	Le profil est une courbe algébrique plane :	17
			c)	Approche des surfaces de révolution par des sphères :	18
		1.2.2	Approch	e bayésienne pour la reconstruction de poteries	18
			a)	Alignement de fragments et estimation géométrique :	19
			b)	Algorithme de recherche pour l'assemblage de poteries : .	19
		1.2.3	Remarqu	1es	20
	1.3	Les m	éthodes d	'optimisation	20
		1.3.1	Estimati	on du profil	21
		1.3.2	Estimati	ion de l'axe de rotation	22
			a)	Position initiale de l'axe de rotation :	22
			b)	Estimation robuste de l'axe de rotation :	23
			c)	Raffinement itératif de l'axe estimé :	23

		1.3.3	Remarques	24
	1.4	Comp	uter Aided Classification of Ceramics	24
		1.4.1	Première étape	24
			a) Hypothèses et limitations :	24
			b) Acquisition 3D :	25
			c) Méthode de reconstruction :	26
		1.4.2	Deuxième étape	27
			a) Segmentation automatique du profil :	27
			b) Caractérisation d'un profil :	28
		1.4.3	Troisième étape	29
			a) Acquisition 3D :	29
			b) Obtention des caractéristiques :	29
		1.4.4	Troisième étape	30
			a) Acquisition 3D :	31
			b) Reconstruction par assemblage :	31
			c) Limitations :	32
		1.4.5	Remarques	32
	1.5	Le pro	ojet SIDRAC	33
		1.5.1	Orientation	33
		1.5.2	Estimation de l'axe de rotation	34
		1.5.3	Extraction du profil	34
		1.5.4	Remarques	34
	1.6	Fragment Reconstructor		
		1.6.1	Remarques	36
	1.7	Conclu	$usion \ldots \ldots$	38
2	Eta	t de l'a	art : moteurs de recherche et comparaison de formes 3D	41
	2.1	Les m	oteurs de recherche d'objets 3D	41
		2.1.1	Requêtes textuelles	43
		2.1.2	Requêtes par sélection d'un objet	44
		2.1.3	Requêtes par esquisses $(2D/3D)$	46
		2.1.4	Requêtes par images 2D	47
		2.1.5	Raffinement de requêtes	48
		2.1.6	Remarques	49
	2.2	Les m	éthodes de comparaison de formes	49

		2.2.1	Lexique des termes spécifiques	50
		2.2.2	Critères de comparaison	50
			a) La représentation de la forme :	50
			b) Les propriétés de la mesure de similarité :	51
			c) L'efficacité :	51
			d) Les capacités de discrimination :	52
			e) La capacité à réaliser des mises en correspondance partielles :	52
			f) La robustesse et la sensibilité :	52
			g) La nécessité de normaliser la position et l'orientation des	
			$objets: \ldots \ldots$	52
		2.2.3	Méthodes de mise en correspondance de formes	52
			a) Caractéristiques :	53
			b) Graphes :	56
			c) Autres méthodes :	57
		2.2.4	Mises en correspondances partielles	59
		2.2.5	Remarques	61
3	Dor	mées u	Itilisées	63
J	3.1	1 Typologie de référence		
	3.2	Mailla	ges 3D	64
	3.3	Profils	$des poteries \ldots \ldots$	66
		3.3.1	Présence de bords sur les fragments	67
		3.3.2	Absence de bords sur les fragments	67
			a) Rainures :	68
			b) Épaisseur :	68
			c) Troisième voie :	69
	3.4	Limita	tions	69
4	Solı	ution 2	D	71
Ť.	4.1	1 Appariement d'un tesson et d'une forme modèle		
		4.1.1	Représentation des profils	72
			a) Profil d'un objet modèle	73
			b) Profil d'un fragment	74
		4.1.2	Positionnement relatif "tesson - objet modèle"	74
		4.1.3	Distance "tesson - objet modèle"	75
		-	<b>9</b>	-

		4.1.4	Résultats	•	76	
	4.2	Indexa	ation par description morphologique	•	77	
		4.2.1	Segmentation	•	77	
		4.2.2	Étiquetage des primitives principales	•	77	
		4.2.3	Mise en correspondance	•	79	
		4.2.4	Résultats	•	79	
	4.3	Conclu	usion	•	80	
5	Sol	ution 3	BD		81	
	5.1	Introd	uction	•	81	
	5.2	Repères Mobiles et Joint Invariants			82	
		5.2.1	Signature	•	83	
		5.2.2	Comparaison de signatures	•	84	
	5.3	Proces	ssus de mises en correspondances partielles	•	85	
		5.3.1	Extraction des points caractéristiques	•	85	
			a) Profil élargi :	•	86	
		5.3.2	Génération de la signature	•	86	
		5.3.3	Comparaison de signatures	•	87	
	5.4	Interfa	ace utilisateur de l'application internet $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	•	87	
	5.5	Conclu	usion	•	88	
Conclusion et perspectives						
A	nnex	e 1			95	
B	Bibliographie					

# Introduction

Ces dernières années, la chute du prix des outils de numérisation tridimensionnelle, la montée en puissance des cartes graphiques et la maîtrise par un plus grand nombre de personnes des logiciels de modélisation 3D, ont entraîné une grande augmentation du nombre d'applications manipulant des modèles géométriques tridimensionnels, et ce dans des domaines divers. Dans un premier temps, les modèles tridimensionnels ont été développés pour l'industrie de la fabrication des pièces mécaniques et ensuite pour les jeux vidéo. Mais, ce fort développement constaté traduit un besoin accru d'utilisation de données 3D dans des disciplines diverses et non directement issues de l'informatique. Parmi celles-ci, nous pouvons citer la médecine, l'archéologie, la paléoanthropologie, ou encore la conservation du patrimoine. Dans ces dernières disciplines, la numérisation des objets issus de fouille ou faisant partie du patrimoine, permet de les mesurer, les étudier et même en obtenir des coupes virtuelles, tout cela sans les dégrader. La numérisation est effectuée une seule fois et les objets peuvent ensuite être examinés sans être manipulés. ce qui améliore leur transmission, fut-elle virtuelle, en toute sécurité<sup>1</sup>.Les données tridimensionnelles constituent d'évidence un apport considérable à la diffusion d'informations qui étaient précédemment représentées uniquement par des dessins ou des photographies en deux dimensions, ce qui ne permettait d'appréhender un objet que partiellement.

Le nombre croissant de modèles tridimensionnels a créé un nouveau besoin : la classification des objets 3D afin de pouvoir facilement les identifier, les retrouver et les réutiliser. L'accès aux modèles 3D se doit d'être simplifié, soit par le biais de catalogues dans lesquels les objets ont subi un pré-classement, soit grâce à des moteurs de recherche dédiés à l'identification de formes 3D. De tels moteurs de recherche doivent disposer d'outils efficaces et robustes de mise en correspondance des objets 3D qui déterminent le degré de similarité entre deux formes. Il doivent aussi pouvoir réaliser une mise en correspondance partielle entre des formes modèles<sup>2</sup> et des modèles représentant des parties ou des fragments d'objets (par exemple entre une céramique retrouvée entière et un tesson issu d'un site de fouille).

Les travaux, que nous présentons dans ce mémoire, ont été initiés dans le cadre du projet SIAMA<sup>3</sup> [Sablayrolles 05], suite à une ACI (Action Concertée Incitative) du CNRS sur la préservation du patrimoine, en collaboration avec des céramologues et des archéologues<sup>4</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Tout au long de ce mémoire, nous utiliserons indifféremment les termes "modèle", "objet" ou "forme" pour désigner un modèle 2D ou 3D, correspondant au résultat d'une numérisation, ou obtenu grâce à un outil de modélisation.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Forme modèle : forme type caractérisée à partir d'objets réels ou virtuels entiers

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Système d'Imagerie et d'Analyse pour le Mobilier Archéologique

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Équipe UTAH - UMR 5608



FIG. 1 - (a) Le Dragendorff 27 dessiné à l'aide d'un conformateur (à gauche), (b) Un conformateur (à droite)

L'objectif principal de cette étude étant la réalisation d'un outil de mise en correspondance partielle de formes de révolution. Une telle forme est entièrement définie par la donnée de son axe de rotation et de son profil. Les céramiques, et en particulier les poteries sigillées que nous avons étudiées, sont considérées comme étant des objets de révolution, malgré une nécessaire approximation due au mode de fabrication de ces poteries produites au début de notre ère. Les archéologues tirent parti de cette définition pour représenter les poteries grâce à un dessin en deux dimensions avec une normalisation bien établie, voir Figure 1a. Le pot est représenté en coupe, la moitié gauche, montrant une section qui permet d'évaluer l'épaisseur de la pâte, qui dégage le contour du profil interne et du profil externe, et met en valeur la surface intérieure du vase. La moitié droite, montre le seul profil externe et la surface extérieure du vase. La ligne de séparation entre les deux côtés correspond à l'axe de rotation de la poterie.

Les vestiges en céramique constituent en archéologie un fossile privilégié : ce sont des produits de consommation courante, donc très nombreux et très largement répandus. Ils sont aussi, de par leur nature, imputrescibles et résistent donc mieux à la corrosion (et à l'érosion de l'histoire) que des matériaux comme le bois, les graines, le cuir ou encore les étoffes. Leur faible valeur marchande les protège, bien plus que le métal, du pillage et des récupérateurs que sont les collectionneurs ou les vendeurs d'antiquités.

En raison de leur survie au cours du temps, de leur grand nombre et de leur importante diffusion (très large pour certaines catégories de poteries fabriquées à grande échelle), les tessons de céramique sont utilisés notamment comme marqueurs chronologiques. L'évolution des techniques (apparition du tour, amélioration des modes de cuisson), modification des formes (liées souvent aux pratiques alimentaires), évolution des décors (phénomènes de mode, changement d'empereur, etc.) permet d'associer ces éléments distinctifs à des périodes particulières de l'histoire et ainsi de dater les niveaux archéologiques par la présence de tessons céramiques caractéristiques dans la stratigraphie. À cette fin se sont constituées, depuis le XIXe siècle, des typologies formelles qui ont acquis, au fur et à mesure de l'accumulation des données et des comparaisons, une valeur chronologique de plus en plus fine, et qui servent désormais par conséquent de références. La céramique sigillée, produite pendant les deux premiers siècles de notre ère dans la Gaule romaine méridionale, occupe, dans ce domaine, une place privilégiée.

Lors de fouilles archéologiques, seul un petit nombre de poteries sont trouvées intactes. A contrario, de grandes quantités de fragments sont amassées. Le traitement de ces fragments est très coûteux en temps [Marty 04b]. Les archéologues doivent les étiqueter, les dessiner à l'aide de conformateurs (voir Figure 1b) et en prendre différentes mesures. Puis, ils doivent déterminer leur classification et pour cela trouver le type de poterie d'où proviennent ces fragments en consultant de volumineux catalogues, contenant des représentations en deux dimensions telles que présentées sur la Figure 2.

Le principe de reconnaissance d'un fragment issu d'un chantier de fouille se fait par la comparaison entre la forme du fragment et celle des typologies de références qui sont aussi en deux dimensions (Figure 2). Les éléments de décor peuvent également être utilisés comme critères de reconnaissance ou comme indices chronologiques. Les motifs utilisés par les décorateurs pour la préparation, à l'aide de poinçons (Figure 3a) ou de moules en creux (Figure 3b) permettent d'identifier le style du décorateur ou la signature du potier. Là encore, la reconnaissance s'effectue au moyen d'index en deux dimensions, que ce soit pour l'identification d'un élément du décor (soit une impression de poinçon) ou pour celle d'une composition de plusieurs éléments combinant la répétition d'un ou de plusieurs poinçons associés.

Dans le cadre du projet SIAMA, les poteries sigillées gallo-romaines produites à La Graufesenque (Aveyron) et à Montans (Tarn) constituent nos objets de références permettant de tester nos méthodes de mise en correspondance de formes de révolution.

La céramique sigillée doit son nom à l'utilisation de fours à tubulures qui évite aux poteries, empilées pour la cuisson, d'être directement en contact avec les flammes du foyer et assure une meilleure diffusion de la chaleur dans l'espace de cuisson (Figure 4). Le résultat de cette cuisson, homogène à 900°, est une céramique à la glaçure rouge caractéristique. La chaleur uniforme permet la vitrification de la fine pellicule d'argile de surface et l'atmosphère donne la couleur rouge, par oxydation des petites particules de fer contenues dans l'argile [Bémont 86].

Cette technologie, a permis à la poterie sigillée d'être produite à une cadence semiindustrielle, vu que ces fours pouvaient contenir jusqu'à 40 000 pièces [Martin 96]. La production se caractérise en effet par : une sectorisation de la chaîne opératoire, une standardisation des produits, une rentabilisation des outils en vue d'accroître la quantité produite et la domination des nécessités du commerce sur l'ensemble du processus (Figure 5). L'aire de diffusion de cette céramique couvrait alors à cette époque l'ensemble du monde romain.

Cette situation historique, au-delà de l'intérêt qu'elle présente pour l'étude de l'histoire économique de l'antiquité, offre en matière de recherche archéologique, un certain nombre d'avantages. Diffusée en masse durant les deux premiers siècles de notre ère, la céramique sigillée de la Gaule méridionale constitue une référence omniprésente dans tout le monde romain. Le caractère standardisé de la production permet de discerner de façon claire et précise l'évolution typologique des formes, jusque dans les détails. Sa large diffusion, qui a répandu la céramique sigillée sur les sites les plus variés, tant d'un point de vue géographique que typologique, a permis de retrouver ces objets à toutes sortes de niveaux



FIG. 2 – Planche récapitulative de poteries sigillées. Les exemplaires en couleur sont ceux qui ont été numérisés.



FIG. 3 – (a) Poinçons destinés à la fabrication des moules pour les vases décorés (à gauche), (b) Moules en creux d'un vase de forme Dragendorff 29 (à droite)

archéologiques en présence de toutes sortes de fossiles directeurs<sup>5</sup>. La datation s'en est trouvée affinée : les tessons de céramique sigillée des ateliers de Gaule méridionale se datent généralement à trente ou quarante près, parfois seulement à une ou deux décennies dans le cas de céramiques décorées. Cette céramique constitue donc un des fossiles directeurs les plus utilisés et les plus précis sur les sites romains du monde méditerranéen pour les deux premiers siècles de notre ère [Dragendorff 95, Déchelette 04, Knorr 19].

Dans ce mémoire, nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, un tour d'horizon des travaux connexes, dont la problématique est proche de la notre, et en relation avec l'archéologie et les céramiques. Il nous est apparu, suite à cette étude, que les précédents recherches ont eu pour cadre deux problématiques principales. La première concerne la classification des poteries et de leurs tessons, avec en particulier l'étude de l'orientation des fragments et de l'extraction de différentes caractéristiques des poteries, comme le profil. La deuxième s'intéresse à la reconstruction de poteries à partir de fragments, soit en alignant les axes de rotations, soit en repositionnant les fractures correspondantes.

Suite à ce premier tour d'horizon, nous nous sommes intéressés aux moteurs de recherches d'objets 3D qui organisent des collections d'objets tridimensionnels sous forme de bases de données, afin d'en faciliter la recherche et par là même l'accès. Nous avons complété notre étude par un état de l'art sur les méthodes de comparaison de formes tridimensionnelles. L'objectif de ces méthodes étant de permettre aux précédents moteurs d'effectuer des recherches efficaces dans leurs bases de données, en utilisant des techniques robustes, discriminantes et à faibles coûts en termes de temps de calcul.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le type de céramique que nous avons étudié, ses spécificités et ses typologies de référence. Ensuite, nous présentons les types de données que nous avons utilisés pour représenter les céramiques et leurs profils. Et enfin, nous posons des hypothèses concernant les objets que nous avons à mettre en correspondance, tout en discutant les limites de nos représentations.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Fossile directeur : fossile qu'on retrouve toujours dans certaines assises géologiques et jamais dans d'autres, et qui permet de les reconnaître nettement, voire de les dater. Expression qui sert de métaphore dans d'autres domaines de la recherche.



FIG. 4 – Coupe du grand four à tubulures de la Graufesenque



FIG. 5 – Standardisation et production de masse : poteries sigillées du musée de Millau, Aveyron

Nous présentons ensuite, dans la première partie du quatrième chapitre, une méthode d'appariement basée sur l'analyse des profils de formes modèles et des tessons de céramiques sigillées. Cette méthode se base tout d'abord sur un calcul de distance effectué entre les profils des fragments et ceux des formes modèles. Pour cela, les profils sont représentés par des surfaces implicites. Ensuite, cette méthode utilise une technique de positionnement relatif des profils des fragments par rapport à ceux des formes modèles, en se basant sur les algorithmes génétiques.

Dans la seconde partie du quatrième chapitre, nous détaillons une approche de segmentation de profils de céramiques, équivalente à leur description morphologique faites par des archéologues. Cette segmentation nous permet d'obtenir les primitives principales des poteries (appelées base, panse et bord). La recherche d'un appariement entre un tesson et une forme modèle se fait alors en deux étapes. La première étape est morphologique, et se base sur les primitives principales, afin de sélectionner un sous-ensemble d'objets de la base de données, pouvant être appariés avec le dit fragment. La seconde étape est géométrique, et est réalisée par la méthode d'appariement décrite dans la première partie de ce chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous décrivons une méthode de mise en correspondance partielle entre des formes modèles et des tessons de céramiques sigillées, qui utilise la surface 3D des objets à classifier. Nous générons pour chaque objet une signature invariante par rototranslation et basée sur une ensemble d'invariants issus de l'utilisation combinée de la théorie des *Repères Mobiles* et des *Joint Invariants*. La comparaison de ces signatures par distance euclidienne permet alors de proposer une classification des modèles, qu'ils soient complets (entiers) ou non.

Nous terminons, ce mémoire par une conclusion et une discussion autour de l'apport des différentes méthodes proposées. Nous proposons également de possibles améliorations et des perspectives pouvant s'appliquer au delà du domaine archéologique.

1

# Etat de l'art : archéologie et poterie

Les travaux concernant les fragments de céramiques archéologiques se sont concentrés principalement autour des deux problématiques suivantes :

- La classification relative des poteries et de leurs tessons : en particulier l'étude de l'orientation des fragments et de l'extraction de différentes caractéristiques des poteries, tel que le profil.
- La reconstruction de poteries à partir de fragments : soit en alignant les axes de rotations, soit en repositionnant les fractures correspondantes.

Les études effectuées au sein de plusieurs équipes dans divers laboratoires s'intéressent pour la plupart à ces différentes problématiques. C'est pourquoi nous avons choisi, d'organiser la présentation des travaux existants non pas par thèmes de recherches, mais par projets de recherches, ce qui permet de présenter une vue d'ensemble de chacun des projets, tout en montrant l'évolution des choix et des approches. Ainsi, nous avons pu dégager pour chacun d'entre eux certains concepts et idées concernant le problème de l'appariement entre tessons et modèles de formes.

## **1.1** Ceramic Vessel Classification

Le projet 3D Knowledge<sup>6</sup> est développé en association entre le PRISM (Partnership for Research In Spatial Modeling), et l'ARI (Archaeological Research Institute), au sein de l'université d'Arizona. Le but de ce projet est de développer des stratégies pour acquérir, modéliser et classer des informations sur les poteries. Des travaux sur les choix de stockage et les algorithmes de recherche d'informations ont pour but de permettre une intégration au sein d'une interface de visualisation et de gestion des données [Rowe 01].

L'idée initiale est de créer un modèle de représentation des données extensible, pour une bibliothèque numérique de données 3D, qui capture des modèles 3D, les catalogues, et permet la recherche, la récupération et l'analyse interactive des données.

Ces travaux sont testés sur de la poterie en céramique des tribus Hohokam du sudouest des États-Unis (Phoenix en Arizona) et produits durant la période : 1250 - 1450 ap. J.-C.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>http://prism.asu.edu/research/3dk/index.php

#### a) Acquisition 3D :

Deux scanners laser à plateau rotatif sont utilisés :

- Un Cyberware<sup>7</sup> Modèle 15 : petit et portable, utilisé pour des objets de petite taille.
- Un Cyberware Modèle 3030RGB/MS : grand et fixe permet l'acquisition d'objets de grande taille.

Une numérisation horizontale de l'objet est effectuée avec un pas de rotation prédéfini, suivi de la numérisation du dessus et du dessous de l'objet. Le tout est ensuite fusionné pour obtenir un fichier contenant un nuage de points.

#### b) Représentation des données :

La numérisation, si elle est le seul outil permettant d'obtenir facilement et rapidement un modèle 3D réellement identique à un objet existant, possède un réel inconvénient car elle génère des centaines de milliers de coordonnées sous la forme d'un nuage de points, rendant difficile l'extraction des caractéristiques de l'objet. Ce nuage est dans un premier temps structuré afin d'obtenir une collection de triangles (maillage triangulaire) qu'il est possible de parcourir et de visualiser. En intégrant le fait qu'un nuage de points peut avoir plusieurs triangulations représentant approximativement la même surface, la triangulation correspondant en fait à une primitive de modélisation dans un processus plus complet de modélisation. Il est ensuite nécessaire de séparer les informations de surface et de volume. Pour les récipients en céramique ce processus conduit alors à rechercher la courbe du profil qui est ici représentée à l'aide de NURBS et de *Chain Code*<sup>8</sup>.

A l'aide d'un plan perpendiculaire au plan correspondant à la base d'un pot, les points d'intersection entre ce plan et le maillage triangulaire d'une céramique sont extraits, ordonnés et représentés avec un *Chain Code*. Ces points sont ensuite connectés pour former le profil. Le *Chain Code* est approché par une courbe NURBS à l'aide d'une approximation au sens des moindres carrés. Les NURBS sont employées ici car elles facilitent le calcul des courbures et des caractéristiques essentielles du profil.

Les données sont aussi représentées en tant que *Filet Polygonal* composé de triplets (liste de points, liste de côtés, liste de facettes).

Deux outils ont été développés dans le cadre de ce projet. Le premier, présenté dans la Section 1.1.1, ayant pour but d'analyser automatiquement l'uniformité et la standardisation des céramiques, comme décrit par Rice [Rice 96]. Le second, dans la Section 1.1.2, ayant pour but de mettre à disposition une base de données de céramiques permettant de rechercher une poterie selon un ensemble de critères prédéfinis.

### 1.1.1 Outil interactif de consultation de poteries

Le développement d'un outil interactif pour étudier l'uniformité et la symétrie des poteries est présenté dans [Simon 02]. Cet outil permet de visualiser chaque céramique sous la forme d'un maillage 3D, d'une surface adaptée au maillage ou d'une surface lissée,

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>www.cyberware.com

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>*Chain Code* est un codage utilisé pour représenter les contours dans une image. Il est basé sur le codage directionnel de Freeman [Freeman 70]. Ici, il correspond à une suite de points ordonnés.



FIG. 1.1 – Quelques images de l'interface utilisateur de l'outil interactif d'étude de poteries.

représentée par des NURBS [Farin 96]. L'utilisateur génère les profils directement à partir du maillage 3D en choisissant un plan de coupe passant par l'axe de rotation de la poterie. La courbure associée au profil peut aussi être tracée afin de mieux mettre en évidence des points caractéristiques du profil. La valence de la NURBS est contrôlable afin de diminuer le bruit ou bien d'accroître le lissage sur le pot entier ou sur une zone précise.

Enfin, il y a la possibilité de reconstruire entièrement le modèle correspondant à un pot, à partir de la donnée d'un profil et d'un axe de rotation. L'utilisateur peut ensuite superposer le pot original, pour voir les zones de non-uniformité, ou le degré de non-similarité entre le pot et le modèle obtenu à partir d'un des profils. Il est possible alors, à partir du pot complet, d'obtenir toutes ses mesures : hauteur, diamètre minimal et maximal, volume, points d'inflexions, etc. Voir Figure 1.1.

## 1.1.2 Outil d'étude morphologique de céramiques

La création d'une base de données de poteries, dans le but de permettre la recherche d'un objet, à partir d'informations textuelles, ou bien à partir d'une esquisse en deux dimensions du profil, ou encore grâce à un fichier de données correspondant à une poterie numérisée, est présentée dans [Schurmans 01]. Nous allons détailler son fonctionnement dans les paragraphes suivants.



FIG. 1.2 – Classification des caractéristiques.

#### a) Extraction de caractéristiques et segmentation :

Cette étape consiste à extraire les caractéristiques appropriées (*Features*) à chaque objet, afin qu'elles puissent ensuite être analysées. Pour une poterie, les caractéristiques sont séparées en blocs de base (CPP : *Cognitive Pattern Primitives*) : Point, Courbe, Surface et Volume (voir Figure 1.2), dont voici quelques exemples :

- 1. Points caractéristiques, voir Figure 1.3 :
  - **EP** Limites de parties : points sur les bords du récipient, haut et bas. Ce sont le premier point, le dernier point et soit le point milieu du *Chain Code* si c'est une base convexe, soit les deux limites de la base si elle est plate ou concave (voir Figure 1.4).
  - **VT** Points de tangente verticale : points de courbures maximales ou minimales.

**IP** Points d'inflexion : points où la courbure change de sens.

**CP** Coin : points de changement brutal de courbure, souvent au niveau d'une carène.



FIG. 1.3 – Points caractéristiques du profil.

- 2. Courbes caractéristiques : à partir d'un profil, une courbure signée est visualisée. Elle permet d'évaluer la symétrie d'une poterie [Bae 99, Farin 96].
- 3. Régions caractéristiques : une segmentation de surface peut être obtenue en utilisant la courbure absolue et l'algorithme du partage des eaux [Pulla 01, Pulla 02]. Les points de courbure absolue minimale sont considérés comme des puits. Et au fur et

à mesure de la montée de l'eau par ces puits les régions adjacentes sont fusionnées jusqu'à avoir des zones bien distinctes telles que : goulot, corps et base du pot [Mangan 99].

**Orifice** : l'ouverture minimale du récipient.

Goulot : le cou du récipient.

**Corps** : la forme du récipient entre goulot et base.

**Base** : le bas du récipient, pouvant être convexe, plat, concave ou une combinaison des trois, voir Figure 1.4.



FIG. 1.4 – Quatre types de bases : (a) Convexe. (b) Plate. (c) Concave. (d) Composite.

On peut ajouter le fait d'extraire des informations supplémentaires directement à partir du maillage triangulaire. Dans cette optique, une technique d'extraction de caractéristiques de formes a été développée et est appelée *Crest Lines*<sup>9</sup> qui servira ultérieurement à la comparaison d'objets, voir Figure 1.5.



FIG. 1.5 – Exemple de Crest Lines issu de [Stylianou 02].

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Des lignes 3D sur une surface, qui donnent une représentation géométrique des propriétés physiques importantes des objets comme les rainures ou les motifs sur l'extérieur des pots.

Chapitre 1. Etat de l'art : archéologie et poterie



FIG. 1.6 – Interface utilisateur de recherche.

#### b) Stockage de données :

Après l'extraction d'une série de caractéristiques, les informations obtenues doivent être organisées pour faciliter leur stockage et leur interrogation. Un système d'archivage et d'indexation basé sur les différentes caractéristiques et permettant l'identification et la description des poteries a ainsi été développé. Les données sont décomposées en CPPs, qui sont combinés avec une grammaire de formes et une algèbre associée pour décrire les caractéristiques des formes. Ces données sont alors organisées à l'aide d'un schéma XML<sup>10</sup> qui facilite leur utilisation ainsi que leur échange sur internet. Ces données au format XML sont organisées pour différentier les informations générales (provenance, période) et les mesures (hauteur, largeur du bec), des informations 3D (résultats de la modélisation, caractéristiques archéologiques).

#### c) Requêtes :

L'interface utilisateur, Figure  $1.6^{11}$ , est associée à un processus de recherche d'informations, qui permet à l'utilisateur de rechercher une poterie grâce à des d'informations textuelles, ou grâce à l'esquisse en deux dimensions d'un profil. La possibilité de combiner ces informations représente la force de cette interface [Razdan 01].

Les caractéristiques définies par les CPPs sont extraites de la requête et envoyés au serveur. Un outil de dessin permet de réaliser une esquisse du pot que l'on recherche tandis qu'un CGI<sup>12</sup> est chargé de relier les informations aux bases de données associées. Les résultats sont alors retournés au client sous la forme d'un fichier contenant les 5 meilleurs résultats ainsi que les modèles 3D associées. Ainsi, l'utilisateur peut choisir d'afficher et de manipuler chacun des 5 modèles sans repasser par le serveur.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>eXtentible Markup Language (XML) 1.0, http://www.w3.org/TR/REC-xml

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>http://149.169.226.249/kdi/potvqi/

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Common Gateway Interface.

**Comparaisons de courbes** L'algorithme proposé dans [Femiani 04] est celui qui est utilisé pour déterminer les meilleures courbes correspondant à la requête. Cet algorithme consiste à vérifier la congruence entre 2 courbures en utilisant la distance D :

$$D = \sqrt{\frac{w_1}{3} (l_1 + l_2)^2 + \frac{w_2}{(N_1)^2} min \sum_{i=0}^{N_1} \left[\kappa_{1_i} - \kappa_{2_{(i+a)}}\right]}$$

où  $\kappa_{1_i}$  et  $\kappa_{2_{(i+a)}}$  sont les courbures échantillonnées à intervalles discrets  $N_1$  et  $N_2$  (utilisé plus bas) fois sur 2 courbes  $x_1$  et  $x_2$  respectivement.  $l_1$  et  $l_2$  sont les Arc Length respectifs des courbes.  $w_1$  est le poids attribué à la différence de longueur de courbes et  $w_2$  est le poids attribué à la différence de forme.  $N_1$  et  $N_2$  le nombre d'échantillons sur les courbes, et  $a \in [0, (N_2 - N_1)]$ .

On peut alors calculer un pourcentage de similarité entre les deux courbes suivant la formule :

$$Permatch = \left(1 - \frac{D}{D_{max}}\right) * 100$$

où :

$$D_{max} = \sqrt{\frac{w_1}{3} (l_2)^2 + \frac{w_2}{N_1^2} max \left(\sum_{i=0}^{N_1} (\kappa_{1_i})^2, min_a \sum_{i=0}^{N_2} (\kappa_{2_{(i+a)}})^2\right)}$$

Il existe trois combinaisons de poids menant à des mesures différentes :

 $w_1=0.0$  et  $w_2=1.0 \Rightarrow partial match :$  pour savoir si une des courbes est une partie de l'autre, on note alors la position de la meilleure solution.

 $w_1=0.5$  et  $w_2=0.5 \Longrightarrow best match$ : pour avoir une mesure de similarité entre 2 courbes (voire vérifier qu'elles sont identiques).

 $w_1=0.0$  et  $w_2=1.0 =>$  shape match : on met les courbes à la même échelle pour voir si l'une des deux ne correspond pas à l'autre mais à une échelle différente.

## 1.1.3 Remarques

Les recherches effectuées dans le cadre du projet *Ceramic Vessel Classification* sont très complètes du point de vue visualisation, extraction et analyse de caractéristiques, recherche et interaction dans une base de données d'objets classifiés. Parmi les idées intéressantes à retenir :

- La segmentation des formes à partir de points caractéristiques.
- Les interfaces utilisateurs adaptées au besoin des archéologues (non spécialistes des outils informatiques).

– Les algorithmes de comparaison de courbes.

Les principaux défauts de ces projets sont :

 Le fait de ne considérer que des pots entiers : l'idée de retrouver l'appartenance d'un fragment n'est nullement évoquée, bien que l'algorithme de mise en correspondance de courbes ne semble pas l'interdire.  La simplification importante des maillages et des profils utilisés : les profils dont nous disposons n'ont pu être comparés aux leurs (avec leur outil) car nos profils contenaient trop de points.

## 1.2 Le projet STITCH

Ce projet est développé dans le SHAPE Laboratory de l'université de Brown<sup>13</sup> où toutes les recherches sont effectuées sur différentes poteries et des tessons issus des fouilles du grand temple de Petra en Jordanie [Joukowsky 99]. Les objets sont numérisés soit par un scanner médical (pour les tests), soit par un ShapeGrabber<sup>14</sup> (pour la base de données). Les données en entrée sont donc, un nuage non ordonné de points 3D et les normales associées.

Ce projet présente plusieurs méthodes d'estimation du couple axe/profil, ainsi qu'une technique de reconstruction de poteries.

## 1.2.1 Estimation de l'axe de rotation et du profil

Plusieurs méthodes, faibles en terme de coût de calcul, sont utilisées pour déterminer l'axe de rotation et le profil d'un fragment de poterie [Willis 01].

Les céramiques sont considérées comme des surfaces axialement symétriques qui sont un cas particulier des *Simple Homogeneous Generalized Cylinder* [Zerroug 99], représentant une coupe circulaire évoluant le long d'un axe. Elles sont paramétrées comme suit :

$$X(r(z), \theta, z) = (r(z)\cos\theta, r(z)\sin\theta, z)$$

L'axe de rotation étant l'axe des z, r(z) représentant le profil et  $\theta$  prenant toutes les valeurs entre 0 et  $2\pi$ . r(z) est une spline linéaire ou une courbe algébrique plane.

L'axe de rotation est représenté par le modèle paramétrique classique d'une droite :  $l = \overrightarrow{v}t + q_0$  où  $q_0$  est un point de coordonnées x, y, z et  $\overrightarrow{v}$  est un vecteur unitaire, dans la direction de l'axe de rotation, représenté par deux angles car donné en coordonnées polaires. Pour le profil, r(z), deux cas sont considérés :

#### a) Le profil est une spline linéaire :

La surface 3D du pot est alors approchée par des cônes de *frustums*, voir Figure 1.7, de telle sorte que :

$$r\left(z\right) = \bigcup_{i=1}^{L} c_i z + w_i$$

où l'axe des z est partitionné en L intervalles avec  $(c_i, w_i)$  qui spécifie le segment de ligne du  $i^{me}$  intervalle. À partir de ce partitionnement, et en considérant qu'il y a  $N_i$  points par

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>http://www.lems.brown.edu/vision/extra/SHAPE

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>www.shapegrabber.com

intervalle, la fonction objectif à minimiser est la suivante :

$$E = \sum_{i=1}^{L} \sum_{j=1}^{N_i} \left| [z_{ij} - z_i] \sin \theta_i - \left[ r_{ij} - \left( r_1 + \sum_{q=1}^{i} \tan \left( \theta_q \right) (z_{q+1} - z_j) \right) \right] \cos \theta_i \right|^2$$

où  $(z_{ij}, r_{ij})$  sont les composantes en z et en r du  $l^{eme}$  point et les  $\theta_i$  sont les angles entre segments de droites. Cette fonction objectif amène à une minimisation non linéaire en  $(r_1, \theta_1, \dots, \theta_L)$ .



FIG. 1.7 – Un modèle avec deux segments de droites.

#### b) Le profil est une courbe algébrique plane :

La surface du pot est alors une surface algébrique, contrainte à être axialement symétrique. Le profil est représenté par une courbe de degré n comme ceci :

$$f_n(r, z) = \sum_{0 \le j+k \le n; \, j,k \ge 0} a_{jk} r^j z^k = 0$$

En utilisant l'algorithme Gradient-1 de Tasdizen [Tasdizen 00], pour un profil de degré n, il y a  $p = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$  inconnues.  $f_n(r, z)$  peut être représenté par un vecteur d'inconnues  $Z = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{10} & a_{01} \dots & a_{n0} & a_{(n-1)1} \dots & a_{0n} \end{bmatrix}^t$  et un vecteur monomial  $Y = \begin{bmatrix} 1 & r & z \dots & r^n & r^{(n-1)} & z \dots & z^n \end{bmatrix}^t$ , d'où :

$$f_n\left(r,z\right) = Y^t Z$$

Sachant que chaque sommet *i* possède une normale associée  $\overrightarrow{n_i}$  ayant une composante  $n_i^p$  dans le plan (r, z). La fonction d'énergie utilisée pour l'estimation de la courbe du profil, qui est une version modifiée de celle définie par Tasdizen est la suivante :

$$e_{grad} = \sum_{i=1}^{m} \left( f_n \left( r_i, z_i \right)^2 + \mu \| n_i^p - \nabla f_n \left( r_i, z_i \right) \|^2 \right)$$

où  $\mu$  est un paramètre, dépendant du bruit présent dans les normales mesurées, forçant  $f_n(r, z)$  à avoir un gradient proche de  $n_i^p$ , et

$$\nabla f(r_i, z_i) = \nabla Y^t Z = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial r} \\ \frac{\partial Y}{\partial z} \end{bmatrix}_{2 \times p} \begin{bmatrix} a_{00} \dots a_{0n} \end{bmatrix}_{p \times 1}^t$$

Minimiser  $e_{grad}$  revient à un problème de somme des moindres carrés, problème qui possède une solution matricielle connue.

La fonction objectif étant fortement non-linéaire, l'initialisation (un axe de rotation présumé) doit être assez proche du résultat pour éviter de sélectionner un résultat correspondant à un minimum local [Willis 03]. Cette initialisation est donc effectuée grâce à une estimation au sens des moindres carrés en coordonnées de Plücker, comme celle faite par Pottmann dans son livre [Pottmann 99].

#### c) Approche des surfaces de révolution par des sphères :

Une autre approche présentée par [Cao 02], est une approche robuste et faible en coût, pour trouver à partir d'un fragment de poterie l'axe de rotation, le profil, et les limites de confiance associées (un intervalle d'erreur) en utilisant une méthode de *Bootstrap*.

Cette approche s'inspire de l'étude du contact entre les surfaces de révolution et les sphères. Elle suggère que, pour chaque point du profil, le centre de la sphère de courbure correspondant au cercle parallèle appartient à l'axe de rotation.

Alors, pour *m* points 3D  $p_i$  ainsi que leurs normales associées  $n_i$ , l'axe de rotation étant défini par le modèle paramétrique d'une droite  $L = \vec{v}t + p_0$  où  $p_0.\vec{v} = 0$  et  $\|\vec{v}\| = 1$ . La courbure parallèle  $\kappa_{\pi,i} = \frac{\|n_i \times v\|}{\|(p_i - p_0) \times v\|}$  permet d'obtenir le centre de la  $i^{me}$  sphère de courbure tel que :  $c_i = p_i - \frac{1}{\kappa_{\pi,i}} n_i$ .

Tous les centres devant appartenir à L, il faut chercher à minimiser la fonction énergie suivante :

$$f(p_0, v) = \sum_{i=1}^{m} ||(c_i - p_0) \times \overrightarrow{v}||^2$$

minimisation qui est effectuée par une somme des moindres carrés pondérée après le passage en coordonnées de Plücker comme expliqué en [Pottmann 99]. A la seule différence qu'ici est utilisé en plus le fait que les normales des surfaces du même cercle de révolution se croisent obligatoirement au même point.

Après avoir trouvé l'axe, on effectue un calcul de la distance entre les points de la surface et l'axe de rotation, afin d'obtenir le profil. Et en dernier un *Bootstrap* [Efron 93] permet d'obtenir les limites de confiance en ce qui concerne l'axe et le profil, Figure 1.8.

### 1.2.2 Approche bayésienne pour la reconstruction de poteries

Une solution bayésienne est proposée pour résoudre le problème de la reconstruction des poteries à partir de fragments, en utilisant l'approche de la Section c) pour réaliser l'estimation de l'axe de rotation et du profil des fragments [Willis 04a, Willis 04b]. Des méthodes mathématiques, pour mesurer les fragments 3D puis les alignements géométriques des fragments, sont présentées.



FIG. 1.8 – Un fragment et son profil associé avec 95% de limite de confiance.

Les courbes extérieures de fragmentation, sont extraites en imposant que les jointures entre fragments soient en T ou en Y, voir Figure 1.9. La forme des jointures ayant été déduite d'une étude des propriétés des fractures des céramiques, voir [McBride 03].



FIG. 1.9 – Jointures entre fragments.

#### a) Alignement de fragments et estimation géométrique :

Après avoir estimé les axes et les profils de rotation de tous les tessons, un ensemble de points sont sélectionnés sur la courbe de fragmentation, les côtés cassés, de chaque tesson. Ce nombre est variable à cause de l'utilisation d'une technique de résolution multiéchelles. Par la suite, les fragments seront alignés entre-eux deux par deux en déterminant les transformations nécessaires. Les tests sont d'abord effectués avec une petite résolution, et à chaque fois ce sont les meilleurs alignements qui passent à l'étape de test suivante avec une résolution plus importante.

La fonction utilisée pour calculer l'erreur d'un alignement de deux fragments d'après leurs courbe de cassure est la somme des fonctions de coûts, dus aux transformations nécessaires, à l'estimation du couple axe-profil pour cet alignement et au non recouvrement des surfaces. Cette fonction sera donc minimisée pour chaque jointure entre deux fragments.

## b) Algorithme de recherche pour l'assemblage de poteries :

- 1. Estimation du couple axe-profil et extraction de la courbe de fragmentation pour tous les fragments.
- 2. Estimation de tous les alignements possibles.
- 3. Minimisation de l'erreur des meilleurs alignements de fragments, puis assimilation de chaque groupe à un nouveau fragment.
- 4. Fusion encore une fois des fragments ensembles. S'arrêter là, ou revenir à l'étape numéro 3.

## 1.2.3 Remarques

Ce projet utilise également le fait que le couple axe/profil permet de caractériser entièrement une céramique. Le but étant de reconstruire une poterie à partir de l'assemblage des ses fragments, voir Figure 1.10. Nous retenons l'idée d'avoir à étudier différentes approches pour extraire le couple axe/profil, chacune d'elles ayant des arguments en sa faveur :

- La technique algébrique permet de traiter les profils multivalués.

- L'approche par surface de révolution est plus robuste.

Cette étude montre bien la difficulté d'extraire le profil d'un tesson.



FIG. 1.10 - Un exemple de reconstruction d'une poterie à partir de 10 fragments et le profil résultant.

## 1.3 Les méthodes d'optimisation

Le travail réalisé à l'Institute of Information Theory and Automation, IITA, vise à obtenir certaines caractéristiques inhérentes aux poteries comme le calcul du diamètre [Halíř 96], ou l'estimation du profil [Halíř 97]. L'obtention de ce dernier étant assez lié à l'estimation de son axe de rotation, une méthode automatique et multi-étapes a été développée à cette fin [Halíř 99].

Les fragments sont assimilés à des morceaux d'objets de révolution, ils sont alors caractérisés par deux propriétés géométriques représentées sur la Figure 1.11 :

- **Propriété 1** Les normales de la surface d'un pot/fragment passent toutes par l'axe de rotation de l'objet.
- **Propriété 2** L'intersection entre un pot et un plan perpendiculaire à l'axe de rotation forme (approximativement) un cercle, tandis que celle du même plan et d'un fragment provenant du pot forme un arc de cercle tel que les deux centres coïncident en un point de l'axe de rotation.

L'approche est testée conjointement sur des modèles numériques, et des fragments archéologiques réels dont l'acquisition est faite par un *Range Finder* formé d'un laser et d'une caméra CCD comme celui de [Pajdla 95]. Le *Range Finder* permet d'obtenir une carte de profondeur (*depth map*) appelée aussi *Range Image* qui est en fait une image codant la profondeur de chaque pixel par son intensité lumineuse.

#### Hypothèses et limitations :

 L'obligation d'orienter les fragments avant l'acquisition, ce qui signifie l'introduction d'informations a priori, informations qui ne peuvent être apportées que par des archéologues connaissant bien les poteries en question.



FIG. 1.11 – Modèle d'un objet de révolution O avec a comme axe de rotation et son fragment F. (a) Les normales  $n_i$  passent par l'axe a. (b) Un plan p perpendiculaire à l'axe a intersecte l'objet O en un cercle c et le fragment F en un arc de cercle c'. Les deux cercles partagent le même centre C appartenant à l'axe a.

## 1.3.1 Estimation du profil

L'article [Halíř 97], propose une technique d'estimation du profil d'un fragment se basant sur la deuxième propriété d'un objet de révolution, voir Figure 1.11, d'après les étapes suivantes :

- 1. Positionnement manuel du fragment.
- 2. Acquisition d'une carte de profondeur (depth map).
- 3. Approximation des intersections entre le fragment et des plans  $P_i$  perpendiculaires à a (l'axe de rotation) par des cercles  $c_i$ .
- 4. Visualisation des résultats : si les cercles  $c_i$  sont bien concentriques Figure 1.12(a) c'est que le fragment est bien orienté sinon Figure 1.12(b) il faut déplacer le fragment, retour à l'étape 1 (étape très subjective vu qu'elle se base sur l'estimation humaine de la concentricité des cercles).
- 5. Acquisition des différents diamètres, avec la méthode décrite en [Halíř 96], que l'on combine pour obtenir le profil.

L'étape 5 se base sur le fait que les centres  $C_i$  des différents cercles  $c_i$  appartiennent tous à l'axe de rotation a. Cela est rarement le cas, car les poteries ne sont pas des surfaces de révolution parfaites, soit l'axe a est approché assez grossièrement par une droite passant par tous les centres  $C_i$ , soit a est approché par la méthode définie en [Halíř 99], méthode qui est expliquée dans la section suivante.



FIG. 1.12 – Approximation des arcs de cercles. Intersections pour des fragments bien (a) et mal (b) orientés.

## **1.3.2** Estimation de l'axe de rotation

L'article [Halíř 99] présente une méthode automatique et multi-étapes d'estimation de l'axe de rotation d'un fragment, Figure 1.13. C'est une forme d'optimisation qui permet d'obtenir un résultat acceptable très rapidement. Et s'il n'est pas jugé assez précis, les étapes ultérieures permettent d'affiner cette estimation afin qu'elle approche le plus possible l'axe de rotation du pot. Concrètement, la *Range Image* est segmentée afin d'obtenir les points de la surface extérieure, suivi de l'estimation des normales à la surface grâce à la technique basée sur une transformée de Hough [Yacoub 97]. Et finalement, application de l'algorithme suivant :

- 1. Estimation d'un axe initial.
- 2. Estimation robuste basée sur les M-estimateurs.
- 3. Raffinement itératif de l'estimation par une adaptation robuste de cercles et de lignes.

#### a) Position initiale de l'axe de rotation :

Cette initialisation exploite la première propriété d'une surface de révolution. L'axe est considéré comme la droite a qui minimise la somme des moindres carrés des distances euclidiennes avec les normales  $n_i$  comme suit :

$$\min_{a} \sum_{i=0}^{M} d^2\left(n_i, a\right)$$

où M est le nombre de normales traitées.

#### b) Estimation robuste de l'axe de rotation :

Les M-estimateurs [Press 93] sont utilisés ici avec une fonction de poids telle que la fonction de Huber ou la Bi-poids de Tukey en appliquant l'algorithme suivant :

- 1. Initialiser l'algorithme avec les paramètres ci-dessus.
- 2. Fixer le résidu d'erreurs à :  $r_i = d(n_i, a)$ .
- 3. Estimer  $\hat{\sigma}$  la déviation standard des résidus  $r_i$  avec :

$$\hat{\sigma} = c_1 median_i |r_i|$$

4. Calculer les poids  $w(r_i)$  associés aux résidus avec une des deux fonctions suivantes :

$$w(r_i) = \begin{cases} 1 \quad si \quad |r_i| \le c_2 \hat{\sigma} \\ \frac{c_2 \hat{\sigma}}{|r_i|} \quad sinon \end{cases}$$

qui est la fonction de Huber, ou bien la bi-poids de Tuckey

$$w\left(r_{i}\right) = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{|r_{i}|}{c_{3}\hat{\sigma}}\right)^{2}\right]^{2} & si \ |r_{i}| \leq c_{3}\hat{\sigma} \\ 0 & sinon \end{cases}$$

5. Trouver une nouvelle estimation de l'axe  $\tilde{a}$  qui minimise l'équation :

$$\min\sum_{i} w\left(r_i^{(k-1)}\right) r_i^2$$

où k indique le numéro de l'itération.

6. Tester la convergence : si  $\|\tilde{a} - a\| > \epsilon$  alors  $a = \tilde{a}$  et revenir à l'étape 2.

Les constantes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  valent respectivement 1.4826, 1.345, 4.6851, et ne sont pas justifiées dans [Halíř 99].

#### c) Raffinement itératif de l'axe estimé :

Cette étape exploite la deuxième propriété d'une surface de révolution, Figure 1.11.

- 1. Obtention d'une première estimation de l'axe de rotation avec l'algorithme de la Section b).
- 2. Générer un ensemble de plans perpendiculaires à l'axe a.
- 3. Pour chaque plan  $P_i$ :
  - (a) Rechercher l'intersection entre  $P_i$  et le fragment.
  - (b) Approcher l'intersection par le cercle  $c_i$  approprié.
  - (c) Estimer le centre  $C_i$  du cercle  $c_i$ .
- 4. Trouver une nouvelle estimation de l'axe  $\tilde{a}$  comme étant la droite qui approche le mieux les centres  $C_i$ .
- 5. Tester la convergence : si  $\|\tilde{a} a\| > \epsilon$  alors  $a = \tilde{a}$  et retour à l'étape 2.



FIG. 1.13 – Estimation d'un axe de rotation : réalisation pratique.

### 1.3.3 Remarques

Les recherches menées au sein de l'IITA ont donné lieu à une technique robuste et performante pour estimer axe de rotation. Le temps annoncé est de une minute pour l'estimation complète sur un ordinateur équipé d'un processeur 486.

Leurs points négatifs sont :

- L'utilisation de constantes qui ne sont pas justifiées.
- La nécessité d'intervenir plusieurs fois manuellement, pour orienter l'objet et obtenir le profil.
- Le fait d'avoir effectué très peu de tests (un objet de synthèse et un seul objet réel).

## **1.4** Computer Aided Classification of Ceramics

Les chercheurs du Pattern Recognition and Image Processing, PRIP, de Vienne, cherchent à reconstruire des poteries à partir de leurs profils. Leur première approche a été d'utiliser un graphe pour représenter la base de données qui stocke les objets étudiés, et une mesure de similarité associée pour y effectuer des recherches [Sablatnig 97b]. Ce graphe contient des informations qui sont séparées en deux classes, les caractéristiques de forme, et les propriétés du matériau, comme l'indique la Figure 1.14. Le profil, une des caractéristiques de la forme, est ici segmenté en trois primitives : bord, corps et base. Chaque primitive pouvant elle même être composée de plusieurs sous-parties.



FIG. 1.14 – Représentation d'un fragment dans le graphe.

## 1.4.1 Première étape

### a) Hypothèses et limitations :

- Dans ce projet la symétrie par rotation du pot est assumée.
- Le profil est une courbe fermée résultant de l'intersection entre le pot/fragment et un plan vertical, passant par l'axe de rotation.
- Le profil est généré directement grâce au système d'acquisition.
- Le fragment est orienté et placé correctement (à la main) avec l'aide d'un expert.
- La segmentation est faite manuellement avec l'aide des archéologues.

### b) Acquisition 3D :

Après avoir orienté le fragment conformément à l'expertise d'un archéologue, il est placé au centre du système d'acquisition illustré par la Figure 1.15 et qui est décrit dans [Sablatnig 98]. La forme 3D de l'objet est ensuite estimée avec la méthode *Shape from Structured Light* qui se base sur une triangulation active, comme expliquée en [Boyer 87]. Une *Range Image* est obtenue, et est ensuite appliquée à la surface (comme une texture) pour produire un modèle 3D réaliste du fragment, voir Figure 1.16. Les deux caméras et les deux lasers permettent d'obtenir le profil entier<sup>15</sup> du fragment, voir Figure 1.17.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Profil intérieur et extérieur.



FIG. 1.15 – Système d'acquisition utilisant les deux lasers.



FIG. 1.16 – Range Image et modèle 3D réaliste.



FIG. 1.17 – Acquisition 2D du profil : (a) Lasers 1 vu par la Caméra 1, (b) Image fusionnée des 2 caméras, (c) Lasers 2 vu par la Caméra 2.

#### c) Méthode de reconstruction :

Le travail effectué en [Halíř 96] montre que le profil peut être généré dans une certaine direction à partir du modèle 3D obtenu précédemment, à condition de posséder l'épaisseur du fragment. Cela n'étant possible qu'en  $registrant^{16}$  les deux surfaces du fragment, interne et externe. D'où l'utilisation du système des deux lasers pour obtenir le profil du

 $<sup>^{16}</sup>$ Ce terme décrit la technique consistant à mettre en correspondance spatiale deux surfaces en se basant sur l'épaisseur de l'objet, voir Figure 1.22.

fragment. Ce profil est alors segmenté puis décrit dans un Langage de Description, qui à l'origine avait été développé pour résoudre des problèmes d'inspection visuelle automatique [Sablatnig 97a], et qui a été étendu afin de pouvoir être appliqué au problème de la classification 3D. Formellement ce langage est représenté par un graphe comportant des arcs et des noeuds, qui permettent d'identifier un objet ou une primitive d'un objet.

La recherche d'un fragment dans la base de données de pots revient donc à repérer les différentes primitives du profil avec l'aide d'un archéologue, et essayer de les apparier avec les primitives correspondantes des profils déjà stockés (eux aussi ayant été préalablement segmentés avec l'aide d'un archéologue), tout en recherchant des correspondances en utilisant les autres propriétés du fragment. La Figure 1.18 montre que cette méthode doit permettre également de reconstruire un objet en retrouvant uniquement certaines de ses parties (primitives).

Pour faciliter ce travail, des étiquettes uniques sont attribuées à chaque profil ainsi qu'à chacune de ses primitives.



FIG. 1.18 – Classification et reconstruction.

## 1.4.2 Deuxième étape

### a) Segmentation automatique du profil :

Cette étape correspond au développement d'une méthode qui segmente le profil en plusieurs parties, dans [Kampel 01], afin de délimiter les primitives les unes des autres, voir Figure 1.19. Cette segmentation s'appuie sur des règles mathématiques définies à partir de l'étude du rayon de courbure [Rosenfeld 97], et des informations des archéologues sur ces pots.

Cette technique transforme le profil en une courbe paramétrique, calcule les courbures, et en se basant sur les changements locaux de courbures segmente le profil en plusieurs intervalles. Ensuite, le profil est reconstruit en utilisant quatre algorithmes d'approximation et autant d'interpolation d'une B-Spline sur chaque intervalle, avant de choisir à chaque fois la méthode produisant le moins d'erreurs possible, voir Figure 1.20.



FIG. 1.19 – Profil complet, bord, corps.



FIG. 1.20 – Segmentation automatique d'un profil en 8 intervalles.

Le projet s'est donc affranchi d'une contrainte importante qui était l'obligation d'effectuer la segmentation des profils sous la surveillance d'un archéologue, bien que son aide soit toujours nécessaire pour positionner correctement le fragment avant toute numérisation.

#### b) Caractérisation d'un profil :

Les points délimitant les segments de profils sont en fait détectés par la dérivée première du profil [Adler 01]. Ils permettent d'ailleurs de décrire ce dernier comme on le voit sur la Figure 1.21 avec :



FIG. 1.21 – Caractérisation d'un profil par ses points d'importance.
- **IP** Point d'inflexion : point où la courbure change de sens.
- **MA** Maximum local : point de tangente verticale ayant la plus grande valeur en x du voisinage.
- **MI** Minimum local : point de tangente verticale ayant la plus petite valeur en x du voisinage.
- **OP** Point à l'orifice : point d'intersection entre le profil et le plan de l'orifice.
- **CP** Coin : point où la direction de la courbure change brutalement, souvent au niveau d'une carène.
- **BP** Point à la base : point d'intersection entre le profil et le plan de la base.
- **RP** Point de l'axe de rotation : point d'intersection entre le profil et l'axe de rotation.

Un fragment n'est pas représenté uniquement par les informations concernant son profil. Différentes mesures viennent se rajouter comme les diamètres du bord et à la carène, la hauteur de l'objet, ainsi que des proportions entre les différentes caractéristiques.

#### 1.4.3 Troisième étape

L'équipe du PRIP ayant remarqué que le calcul des mesures d'un pot/fragment dépend de son orientation. L'article [Mara 02] propose deux techniques pour l'estimation de l'axe de rotation soit par une approche de *plane fitting* soit par une méthode inspirée de la transformée de Hough [Yacoub 97].

#### a) Acquisition 3D :

L'installation présentée par la Figure 1.17 a été abandonnée, à cause des multiples opérations manuelles que nécessite l'utilisation des deux Lasers. L'acquisition du modèle se fait grâce à une méthode améliorée du *Shape from Structured Light* de [Kampel 99], avec acquisition des deux surfaces du fragment, l'extérieur et l'intérieur. Une *registration* des deux surfaces est ensuite effectuée comme expliqué dans [Sablatnig 02], voir Figure 1.22, puis le résultat est stocké en tant que fichier VRML, contenant la liste des points 3D (appelés sommets), leur couleur, ainsi que la liste des facettes triangulaires (appelés patchs) comme dans la Figure 1.23.

#### b) Obtention des caractéristiques :

L'axe de rotation : Il est estimé en utilisant une méthode inspirée de la transformée de Hough et qui est décrite dans [Yacoub 97]. Cette méthode fonctionne dans la plupart des cas, sauf quand le fragment possède un morceau de la base du pot. Il faut alors utiliser une méthode d'adaptation de plans, voir Figure 1.24, qui approche l'intersection de la base d'un fragment et d'un plan horizontal par un cercle (ou un arc de cercle). L'axe de rotation est alors défini comme étant la droite perpendiculaire au plan horizontal correspondant à la base et passant par le centre du cercle estimé.



FIG. 1.22 – Registration de surfaces.



FIG. 1.23 - (a) Listes de sommets et de faces, (b) Modèle 3D du fragment au format VRML.

#### Le profil :

- 1. L'axe de rotation est transformé de façon à être parallèle à l'axe de z.
- 2. Calcul de la largeur du fragment.
- 3. Extraction de plusieurs profils à partir des intersections entre le fragment et un certain nombre de plans verticaux (dont le nombre dépend de l'étape 2) passant par l'axe de rotation, voir Figure 1.25.
- 4. Calcul de la hauteur de tous les profils et sélection du plus long : le plus grand  $z_{max} z_{min}$ .
- 5. Stockage du profil sous la forme de deux listes, une pour les distances de paires de points consécutifs et une autre pour les angles consécutifs entre les segments formés par les paires de points.

Cette étape permet de s'affranchir de la présence d'un archéologue puisque le fragment est orienté automatiquement à partir de la détection de son axe, ce qui permet d'obtenir le profil qui en suite sera segmenté sans aucune intervention extérieure.



FIG. 1.24 – Fragments avec une base ou un bord.



FIG. 1.25 – Essais d'extraction de profils.

### 1.4.4 Troisième étape

Cette nouvelle phase s'attaque à de nouveaux problèmes, à savoir, la reconstruction automatiques de poteries à partir d'assemblage de tessons [Kampel 04b].

#### a) Acquisition 3D :

La numérisation de tessons se fait en utilisant un scanner 3D Minolta<sup>17</sup> Vivid-910. Tirant parti du fait que les fragments sont simplement représentés par leurs surfaces internes et externes, Figure 1.22, ils ont construit un dispositif qui permet de numériser plusieurs fragments en même temps. Il s'agit en fait, d'un cadre qui s'adapte sur le plateau rotatif est permet de numériser jusqu'à 6 segments à la fois, voir Figure 1.26. Il suffit alors de prendre deux prises de vues avec une rotation de 180° entre les deux.

#### b) Reconstruction par assemblage :

Cette technique permet de correctement aligner deux fragments appartenant à une même poterie. Pour se faire, les fragments sont pré-alignés en faisant correspondre leur axe de rotation. Les fragments ne peuvent plus se déplacer que suivant deux degrés de liberté : la rotation  $R_Z$  autour de l'axe des z (confondu avec l'axe de rotation), et la translation  $T_Z$  le long de l'axe des z, voir Figure 1.27.

 $<sup>^{17}</sup>$ www.minolta-3d.com/, nous utilisons le même scanner.



FIG. 1.26 – Numérisation de plusieurs profils en même temps.



FIG. 1.27 – Pré-alignement de fragments (gauche) et alignement des courbes de fractures (droite).

Un des fragments est fixé comme étant la référence, avant de rechercher les paramètres  $R_Z$  et  $T_Z$  permettant le meilleur alignement possible des deux fragments.

#### Estimation de la translation $T_Z$

- 1. Les fragments possédant un bord ou une base sont alignés sur le même plan.
- 2. Les fragments sont alignés comme s'ils contenaient un bord ou une base et c'est l'alignement qui conduit à la plus petite distance entre les courbes de fractures des fragments qui est conservée.
- Estimation de la rotation  $R_Z$  en cherchant la valeur qui minimisera la distance entre les courbes de fractures des fragments, voir Figure 1.27.

#### c) Limitations :

- Les fragments ne doivent pas être trop plats ni trop petits afin que leurs profils puissent être extraits.
- Les fragments doivent obligatoirement avoir des parties communes de profil. Deux fragments adjacents l'un au dessus de l'autre ne peuvent être assemblés.
- Deux fragments appartenant uniquement à la panse de la poterie sont rarement bien alignés.

# 1.4.5 Remarques

Ce projet du PRIP est bien documenté ce qui nous permet de comprendre les moindres détails. Le plus important étant le fait de suivre une évolution de pensée, souvent accompagnée d'une évolution du matériel utilisé. Nous voulions souligner quelques points :

- C'est une méthode automatique du début à la fin.
- La base de données est décrite dans un langage permettant de faciliter les appariements [Sablatnig 97a].
- L'aspect classification est très présent, il est même renforcé par la segmentation automatique.
- Beaucoup d'idées nous ont été inspirées par ces travaux (l'extraction du plus long profil, etc.).

Les quelques défauts sont :

- La robustesse : la chaîne de traitements (extraction du profil) n'obtient qu'un peu plus de 50% de réussite, voir [Kampel 03]. Problèmes sûrement dûs à l'accumulation d'erreurs : à l'acquisition, puis à la *registration* ce qui donne un axe peu précis (la méthode qui extrait l'axe n'étant pas la plus robuste) d'où le profil bruité.
- Pas de mesure de comparaison précise entre les fragments. Tout repose sur le langage de graphes et une pondération des branches de ce graphe.
- La reconstruction d'une poterie ne fonctionne que si les fragments respectent un certain nombre d'hypothèses.

# 1.5 Le projet SIDRAC

Ce projet de l'université de Grenade<sup>18</sup> a pour but de créer un outil assistant les archéologues à la documentation des objets trouvés sur un site de fouilles archéologiques. Et pour satisfaire ce but, ils ont proposé une méthode semi-automatique pour l'extraction de profils de tessons.

### Hypothèses et limitations :

- Cette approche ne prend en compte que les fragments contenant un bord supérieur.
- Il n'y a pas eu de numérisation d'objet réel. Les objets de tests ont tous été créés sous 3DS MAX.
- L'archéologue doit/peut intervenir à toutes les étapes de la documentation.

# 1.5.1 Orientation

Le but est d'orienter correctement les tessons en trouvant le plan qui contient le bord supérieur. Ils utilisent pour se faire une approche flexible basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques. L'expert délimite la zone d'initialisation de l'algorithme génétique, sur le bord, pour éviter les zones d'irrégularités. Ensuite, cette zone d'initialisation est

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>Interactive System for Drawing and Reconstruction of Archaeological Ceramics



FIG. 1.28 – Processus d'extraction semi-automatique du couple axe/profil.

divisée en trois parties : extrême gauche, centre et extrême droite par l'algorithme des k plus proches voisins.

L'algorithme génétique est basé sur des individus (chromosomes) composés de trois gènes représentant chacun un point d'une des trois zones du bord supérieur. Ces trois points définissent alors le plan recherché.

La fitness utilisée pour faire converger l'algorithme est :

$$G_{c} = 100 * \frac{|R_{c} - L_{c}|}{N_{b}} + P_{c}$$

où  $R_c$  et  $L_c$  représentent respectivement le nombre de points au dessus et en dessous du plan c,  $N_b$  est le nombre de points appartenant à c et  $P_c$  est le nombre de points ayant une distance au plan inférieur à une limite  $\epsilon$  et étant donc considérés comme appartenant au plan c.

### 1.5.2 Estimation de l'axe de rotation

Une fois le tesson correctement orienté, l'expert choisit un plan horizontal, dont l'intersection avec le fragment donne les arcs de cercles les plus longs et les plus représentatifs. Le cercle équivalent à l'arc de cercle externe est trouvé à partir d'une estimation au sens des moindres carrés, initialisée par un cercle se trouvant entre les deux arcs de cercles précédemment sélectionnés. L'axe de rotation est alors, simplement, l'axe horizontal passant par le centre de ce cercle.

#### 1.5.3 Extraction du profil

L'expert dessine une courbe 3D sur la surface du tesson, correctement orienté, comme s'il dessinait le profil directement sur le maillage. Cette courbe est ensuite plaquée sur un plan passant par l'axe de rotation pour obtenir la courbe du profil.

Finalement, un dessin contenant le profil, l'axe de rotation, différentes mesures et le fragment (avec une fausse perspective) est généré, voir Figure 1.29. L'expert peut aussi agir sur le dessin en 2D, sur l'éclairage ou sur les emplacements des mesures.



FIG. 1.29 – Présentation du résultat.

#### 1.5.4 Remarques

Cette approche imite parfaitement la démarche des archéologues sur un chantier de fouille et permet d'après ses auteurs un gain de 60% de temps par rapport à l'approche manuelle. Ce pourcentage ne prend toute fois pas en compte le temps nécessaire à la numérisation des tessons.

Il est dommage que cette approche n'ait pas été testée sur des objets réels afin d'estimer la robustesse de l'extraction du couple axe/profil par rapport à une approche manuelle.

# **1.6** Fragment Reconstructor

Ce projet, de l'université d'Athènes, a pour but le développement d'un outil permettant la visualisation, la manipulation et la reconstruction des objets à partir de fragments, un peu comme avec un puzzle 3D [Papaioannou 01]. Bien que ce projet ne s'intéresse pas directement aux poteries, et de fait, il n'y a pas de section concernant les objets de révolution, nous allons quand même nous intéresser à la partie concernant la reconstruction.

La procédure utilisée se divise en trois étapes mises en oeuvre dans trois modules pour pouvoir être utilisées séparément :

1. Pré-traitement : le nuage de points issu de la numérisation est transformé en polygones (triangles), puis partitionné en faces qui sont des zones correspondant à des facettes de même orientation (polygones) basées sur la distribution de normales, comme indiqué dans l'article [Papaioannou 00b], voir Figure 1.30. Ensuite, détection des faces  $R_k$  que l'on essaiera d'apparier en utilisant une mesure de régularité  $B_{R_k}$  de la surface définie par :

$$B_{R_{k}} = \frac{1}{N_{depth}} \sum_{\substack{(u,v) \mid \\ d_{R_{k}}(u,v) \neq \infty}} \left| \bigtriangledown^{2} d_{R_{k}}(u,v) \right|$$

où  $d_{R_k}(u, v)$  représente la carte d'élévation (*elevation map*) de la face  $R_k$ ,  $N_{depth}$  est le nombre de valeurs non-infinies dans  $d_{R_k}(u, v)$  et  $\bigtriangledown^2 d_{R_k}(u, v)$  représente l'opérateur d'images nommé Laplacien.

2. Reconstruction hors-ligne : toutes les combinaisons possibles pour chaque face sont essayées tout en effectuant un calcul d'erreur d'appariement [Papaioannou 02]. Les



FIG. 1.30 – Pré-traitement. Objet original (gauche). Segmentation en faces (milieu). Détection de faces correspondant aux zones de fracture (droite).

fragments sont positionnés de façon à ce que les deux faces cassées soient face à face. L'erreur évaluée est la différence point à point des courbures de surfaces échantillonnées uniformément. Les fragments ayant 5 degrés de liberté, 3 en rotation et 2 en translation, voir Figure 1.31, l'erreur doit alors être minimisée par rapport au placement des fragments en utilisant une mesure de recherche globale. Pour ce système la méthode choisie est celle du Recuit Simulé amélioré<sup>19</sup> de [Siarry 97]. Les résultats obtenus pour toutes les paires sont stockés par ordre d'erreur décroissante.



FIG. 1.31 – Les degrés de liberté.

- Toutes les paires ne passent pas les tests, cela étant dû à des incompatibilités de matériaux, de structure ou à des contraintes ajoutées par l'utilisateur.
- 3. Reconstruction interactive : c'est l'étape où l'utilisateur peut manipuler les fragments et leurs imposer différentes contraintes, comme obliger deux fragments à faire partie du même objet, ou au contraire à ne pas appartenir au même objet. Ces contraintes seront appliquées avant de lancer un algorithme génétique qui sélectionne et compose les paires qui minimisent l'erreur totale en appliquant les quatre règles ci-dessous, comme expliqué dans [Papaioannou 00a] :
  - (a) Un fragment peut être lié à autant d'autres fragments qu'il possède de faces marquées.
  - (b) Le lien entre deux fragments est unique.
  - (c) Les paires de fragments les mieux notées sont celles qui produisent le moins d'erreurs d'appariements.
  - (d) Certains fragments doivent être isolés parce qu'ils n'appartiennent à aucune reconstruction valide.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup>Enhanced Simulated Annealing, ESA.

Ensuite, une méthode rapide, combinant la première approche de mise en correspondance de surface avec un appariement des courbes, a été développée [Papaioannou 03]. Avec l'introduction d'une nouvelle notion sur les fragments voir Figure 1.32 :

**Externe** qui caractérise un fragment qui a au moins une face adjacente à une face fracturée et appartenant à une surface intacte.

Interne qui caractérise tous les autres fragments.



FIG. 1.32 – Nouvelle notion géométrique.

D'où l'algorithme d'assemblage automatique de la page suivante.



FIG. 1.33 – Extraction de courbes.

# 1.6.1 Remarques

- Les tests effectués lors du début du projet étaient tous réalisés sur des données artificielles, mais le développement du matériel d'acquisition numérique a permis de valider récemment l'approche choisie sur des données réelles.
- La méthode a très rarement des objets mal reconstruits, l'introduction de contraintes sur les appariements rend ce phénomène encore plus rare.
- Bien que cette approche ne tire aucun profit du fait d'avoir des objets de révolution, la méthode réussit à reconstruire certains objets très facilement.

Le seul point négatif de cette approche est le fait qu'elle ne puisse apparemment pas être utilisée dans un problème strict de classification, tel que celui qui est à l'origine de notre étude.

# Algorithme 1.1 Mise en correspondance par courbes et surfaces

#### Segmentation

Pour tous les fragments  $Obj_k$ ,  $k = 1...N_{obj}$ :

Étape 1 : Segmenter  $Obj_k$  en faces adjacentes.

Étape 2 : Détecter les faces fracturée  $R_k$ ,  $m = 1..N_{k,faces}$ .

#### Appariement

Pour chaque paire de fragments  $(Obj_k, Obj_l), k, l = 1...N_{Obj}, k \neq l$ :

Pour chaque paire de faces cassées  $(R_{k,m}, R_{l,n}), m = 1...N_{k,faces}, n = 1...N_{l,faces}$ :

Si  $(Obj_k \text{ est interne pour } R_{k,m})$  OU  $(Obj_l \text{ est interne pour } R_{l,n})$ :

Estimer la position relative de la transformation  $M_{m,n}$  entre  $R_{k,m}$  et  $R_{l,n}$  en utilisant la méthode précédente.

#### Sinon

Étape 1 : Extraire les lignes frontières de  $R_{k,m}$  et  $R_{l,n}$ .

Étape 2 : Filtrer et ré-échantillonner les lignes frontières pour obtenir les courbes  $B_{k,m}$  et  $B_{l,n}$ , voir Figure 1.33.

Étape 3 : Calculer les signatures  $\nu_{k,m}$  et  $\nu_{l,n}$  des courbes  $B_{k,m}$  et  $B_{l,n}$ .

Étape 4 : Détecter toutes les  $N_{seg}$  paires de segments similaires de  $B_{k,m}$  et  $B_{l,n}$ , basées sur  $\nu_{k,m}$  et  $\nu_{l,n}$ .

Étape 5 : Trouver les transformations  $M_{m,n}^i$ ,  $i = 1...N_{seg}$  qui alignent les segments de chaque paire i.

Étape 6 : Écarter les  $M_{m,n}^i$  qui mènent à une erreur trop importante, relativement aux autres transformations, pour la mise en correspondance de segments.

Étape 7 : Pour tous les  $M_{m,n}^i$  restant, estimer la pénétration de surfaces entre  $Obj_k$  et  $Obj_l$ .

Étape 8 : Écarter les  $M_{m,n}^i$  qui mènent à une intersection entre objets trop importante. Étape 9 : Pour tous les  $M_{m,n}^i$  restants, calculer l'erreur d'appariement de surfaces.

Étape 10 : Fixer comme transformation optimale la  $M_{m,n}^i$  qui génère l'erreur minimale.

#### Assemblage

Étape 1 : Optimiser les combinaisons de faces pour le calcul d'erreur de mise en correspondance de surfaces.

Étape 2 : Placer les fragments dans l'espace afin qu'ils forment l'objet final.



FIG. 1.34 – Exemples.

# 1.7 Conclusion

Nous avons présenté plusieurs approches concernant plus ou moins spécifiquement notre problématique d'appariement entre fragments et formes modèles. La plupart des projets présentent des techniques pour extraire le profil et l'axe de rotation des poteries. Toutefois, les approches utilisées sont assez différentes : un modèle algébrique de surface [Willis 03], les sphères de courbures [Cao 02], la transformée de Hough [Yacoub 97, Kampel 03], une optimisation multi-étapes à base de L-estimateurs, [Halíř 99, Halíř 97]. Et même une approche semi-automatique utilisant les algorithmes génétiques et imitant les actions des archéologues [Melero 03].

Nous devons aussi noter le fait que ces méthodes donnent des résultat différents d'après la forme des fragments. Les profils de tessons très plats ou de petite taille (dans le sens de la hauteur) sont rarement obtenus avec ces méthodes. Les profils obtenus sur les autres tessons ne sont pas non plus sûrs, comme l'indique [Kampel 03] qui annonce que l'extraction du profil avec leur méthode n'obtient qu'un peu plus de 50% de réussite, ce qui pousse certains à fournir des limites de confiance aux profils obtenus [Cao 02]. Nous signalons aussi que certaines méthodes considèrent que le profil est la courbe fermée résultant de l'intersection entre un plan vertical passant par l'axe de rotation de la poterie et le maillage de la poterie, tandis que d'autres ne prennent en compte que la courbe extérieure du profil. Nous avons choisi la première représentation pour notre part car la deuxième nous parait moins riche en informations (perte de la largeur du profil et des rainures dues à l'utilisation d'un tour de potier lors de la fabrication notamment).

Une fois le profil et l'axe de rotation estimés, ils sont stockés dans une base de données. Ils sont utilisés soit pour reconstruire des poteries à partir de plusieurs fragments : par association de fragments deux par deux et suivant leur axe de rotation, suivie par une recherche du meilleur placement [Kampel 04a], ou en utilisant une approche bayésienne pour reconstruire l'objet à partir de plusieurs fragments [Willis 04a, Willis 04b].

Les profils peuvent aussi servir à effectuer des appariements avec une base d'objets modèles. Sablatnig et al. qui représentent leur base de données sous la forme d'un graphe [Kampel 01] où chaque profil est segmenté en ces primitives (base, panse et bord), réalisent des appariements en appliquant une mesure de similarité sur leur graphe. Le projet 3D Knowledge est le seul à permettre une recherche à partir d'esquisses de profil [Razdan 01]. Mais les courbes représentant leurs profils sont excessivement simplifiées.

Nous avons retiré beaucoup d'idées de ces précédentes études :

- Une poterie, de type objet de révolution, est normalement caractérisée par son couple axe/profil.
- Les poteries n'étant pas parfaites, vu la technique de fabrication utilisée, les algorithmes d'estimation du couple axe/profil ne fournissent pas des mesures exactes.
- Une segmentation des profils est un atout pour accélérer le processus d'appariement.

 $\mathbf{2}$ 

# Etat de l'art : moteurs de recherche et comparaison de formes 3D

Une partie importante de notre étude est de doter notre outil d'appariement d'une base de données d'images tridimensionnelles, afin de faciliter l'accès aux objets stockées à la communauté des archéologues et des chercheurs en archéologie. Il faut également permettre des requêtes diverses comme la recherche à partir de critères (lieu, date de découverte, etc.) et la visualisation interactive d'un objet particulier. Afin de satisfaire ce besoin, nous présentons, dans ce chapitre, un état de l'art centré sur les moteurs de recherche d'objets 3D, en nous concentrant sur les différentes méthodes utilisées et en classant ces outils selon les requêtes possibles.

# 2.1 Les moteurs de recherche d'objets 3D

De nombreux sites internet permettent d'accéder à des modèles 3D. La principale manière d'accéder à un objet présent dans ces catalogues est la simple consultation en ligne, i.e. parcours de la base de données, voir Figure 2.1.

Pour cela, les modèles 3D ont été classés manuellement en différents groupes, ce qui implique plusieurs constatations majeures :

- L'utilisateur doit connaître la classe de l'objet qu'il recherche.
- Le classement est souvent sujet à discussion (un objet pouvant se classer légitimement dans plusieurs groupes).
- Beaucoup d'objets ne peuvent pas être classés et se retrouvent de fait dans un même groupe où se retrouvent un peu n'importe quel type d'objets.
- Chaque ajout d'objet requiert une classification manuelle, ce qui peut être problématique en cas d'ajout d'un grand nombre d'objets.

C'est dans ce contexte que les chercheurs éprouvent l'intérêt de faciliter l'accès à ce type de données, notamment en rendant ces modèles plus accessibles, soit dans des catalogues pré-classés, soit grâce à des moteurs de recherche dédiés aux formes 3D (comme *google* ou *exalead* très utilisés pour les recherches sur internet à partir de mots-clés).

Un moteur de recherche de modèles 3D appartient à la catégorie des moteurs de recherche spécialisés. Un tel moteur rassemble un sous-ensemble de données concernant un



FIG. 2.1 – Exemple de consultation de modèles sur le site http://www.amazing3d.com/.

domaine spécifique et le rend plus accessible grâce à une interface utilisateur proposant une formulation des requêtes appropriée. Des exemples de moteurs de recherche spécialisés sont par exemple *CiteSeer*<sup>20</sup>, un moteur de recherche pour les articles scientifiques [Bollacker 98], *Deadliner*, pour des annonces de conférences et d'ateliers [Krüger 00], ou encore google scholar.

Puisqu'il est en pratique impossible de télécharger la totalité des pages web pour déterminer, pour chacune d'entre-elles, si elle contient des données appropriées, les moteurs de recherche spécialisés emploient typiquement une technique de fouille de données dite *focalisée* [Chakrabarti 99].

Un avantage important d'un moteur de recherche spécialisé est qu'il peut fournir une interface de requêtes, spécifique pour chaque domaine. Le site de la "World Wide Protein Data Bank"<sup>21</sup> en est un exemple, il met gratuitement à disposition les coordonnées 3D de près de 29.000 molécules de protéines et permet l'interrogation de sa base de données grâce à des mots clés en relation avec les protéines.

Nous avons classé les différentes approches que nous avons étudiées en sélectionnant celles mettant à notre disposition des modèles 3D, et en nous basant sur le système de requêtes proposé, ainsi que sur les possibilités d'interaction avec l'utilisateur.

Certains sites indexent différentes collections d'objets 3D et permettent des requêtes textuelles sur la base de données, en plus de la simple exploration des dossiers, afin de faciliter la recherche des modèles, voir Figure 2.2.

D'autres sites permettent d'effectuer des recherches basées sur une forme 3D. Mais tous n'autorisent pas autant de liberté dans les possibilités d'interaction :

- Autoriser des comparaisons avec n'importe quelle donnée descriptive, et pas seulement la forme des objets contenus dans la base de données.
- Permettre d'interroger la base de données à partir d'esquisses fournies par l'utilisateur (2D ou 3D).
- Mettre sa base de tests en libre accès.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>http://citeseer.ist.psu.edu

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup>http://www.wwpdb.org/



FIG. 2.2 – Exemple de requête textuelle sur le site du "National Design Repository".

Parmi les catalogues les plus connus il faut signaler le "Princeton Shape Benchmark"<sup>22</sup> qui s'est imposé comme un référentiel pour les méthodes de comparaison d'objets tridimensionnels ayant un maillage quelconque (soupes de polygones) [Shilane 04]. On peut aussi citer "Large Geometric Models Archive"<sup>23</sup> qui disposent d'une dizaine d'objets ayant un nombre important de triangles. Le but étant de mettre à disposition des chercheurs des modèles volumineux permettant de mieux tester les limites de leurs algorithmes.

Nous présentons par la suite un certain nombre de moteurs de comparaisons de formes 3D. Le but étant de présenter l'ensemble le plus complet possible de types de requêtes possibles et d'indiquer quelques exemples pour chaque catégorie.

## 2.1.1 Requêtes textuelles

- CADlib<sup>24</sup> Près de 8000 Objets 3D de CAO. Chaque modèle dispose d'une description, d'un nom de fichier et d'un identifiant. L'interrogation de la base de données s'effectue par mots clés sur ces éléments.
- MeshNose<sup>25</sup> Moteur de recherche de modèles 3D qui interroge plusieurs catalogues de sites en ligne. La recherche textuelle proposée se base sur le texte descriptif disponible sur la page web correspondant au modèle 3D.
- National Design Repository <sup>26</sup> Site de l'université de Drexel de Philadephie entreposant quelques 10 000 modèles 3D de pièces mécaniques (CAO). En plus de l'exploration hiérarchique de répertoires, la recherche s'effectue par mots clés (désignant les catégories), par taille de modèles, ou enfin par type de fichiers (une quinzaine dont STEP, IGES, ACIS, AutoCAD, VRML), voir Figure 2.2.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup>http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup>http://www.cc.gatech.edu/projects/large\_models/

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup>http://www.cadlib.co.uk

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup>http://web.archive.org/web/20030622052315/http://www.deepfx.com/meshnose/

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup>http://www.designrepository.org



FIG. 2.3 – Exemple de requête par sélection d'un objet sur le site de "Ogden IV".

## Limitations

Il apparaît clairement que l'utilisation des requêtes textuelles seules n'est pas suffisamment efficace et cela a même été démontré en pratique dans [Min 04]. Il faudrait que tous les objets 3D soient documentés et caractérisés manuellement pour aboutir à une recherche produisant un résultat correct. C'est pourquoi la solution idéale à ce problème serait une recherche basée sur le contenu au lieu du contenant : sur la forme en elle-même et non les informations qui référencent cette forme.

# 2.1.2 Requêtes par sélection d'un objet

Dans les outils cités ici, l'utilisateur doit commencer par une requête textuelle ou bien naviguer dans la base de données pour sélectionner un objet similaire à celui qu'il recherche, voir Figure 2.3.

- ShapeSifter <sup>27</sup> Site de l'université de Heriot-Watt d'Édinbourgh où l'utilisateur peut choisir parmi une liste importante de caractéristiques de formes, telles que : la superficie, la longueur de la diagonale de la boîte englobante et du volume de l'enveloppe convexe. L'outil exécute alors une recherche en imposant des conditions sur ces caractéristiques [Corney 02]. La recherche s'effectue dans une base de données d'objets de CAO avec une centaine de blocs en forme de "L" et plusieurs variantes obtenues par transformations géométriques (environ 20 autres modèles).
- **Ogden IV** <sup>28</sup> L'utilisateur peut sélectionner la méthode à employer pour effectuer la recherche d'une forme (à l'aide de descripteurs invariants par rotation). L'algorithme utilise donc la forme et la couleur de l'objet cherché. La recherche s'effectuant dans une base de données de 1100 modèles VRML [Suzuki 01, Suzuki 00] ou bien sur la base de donnée du "Princeton Shape Benchmark".
- **3D Shape Retrieval Engine**<sup>29</sup> Site de l'université d'Utrecht des Pays Bas où l'utilisateur peut sélectionner une méthode parmi les trois méthodes de mise en correspondance (courbure gaussienne, variation de normales ou points médians) et une

 $<sup>^{27} \</sup>rm http://www.shapesearch.net/index.html$ 

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup>http://www.nime.ac.jp/%7Emotofumi/Ogden/

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup>http://www.cs.uu.nl/centers/give/multimedia/3Drecog/3Dmatching.html



FIG. 2.4 – Exemple de requête par image du "Online 3D search Engine".

des trois bases de données d'essai : une base de données de 133 modèles rassemblés depuis internet par Osada [Osada 01], une base de données de 684 modèles collectés par les auteurs sur internet [Tangelder 03], et la base de données de "ShapeSifter".

- 3D Search <sup>30</sup> Outil disponible sur le site de l'institut d'informatique et de télématique de Grèce (ITI), où l'utilisateur choisit d'effectuer la recherche dans une des trois bases de données disponibles : celle du ITI, celle du "Princeton Shape Benchmark" et celle du "3D Shape Retrieval Engine". La méthode d'appariement utilisée est basée sur les Generalized Radon Transforms [Kolonias 05].
- CCCC <sup>31</sup> Site de l'université de Constance en Allemagne où l'utilisateur peut décider de la base de données dans laquelle la recherche va être effectuée (parmi les 6 proposées se trouve la base de donnée MPEG7 de 227 objets, celle du "Princeton Shape Benchmark" ou celle de Constance de 1800 objets). L'utilisateur décide aussi de la caractéristique de bas niveau qui va être testée (points de contrôles, aire de surfaces, boîte englobante, volume, ratio volume/surface) ainsi que de la mesure de comparaison qui va être utilisée. Les caractéristiques bas niveau étant extraites des formes 3D et rendues invariantes par une analyse en composantes principale (PCA) [Vranic 01b, Vranic 01a]. On peut utiliser un fichier VRML ou un élément de la base de données pour effectuer une recherche.

#### Limitations

Ces outils effectuent une vraie recherche basée sur la forme des objets. Par contre, il n'est pas toujours évident de savoir quel descripteur de bas niveaux choisir afin d'obtenir les meilleurs résultats.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup>http://3d-search.iti.gr

 $<sup>^{31}{\</sup>rm Content-based}$  Classification of 3D-models by Capturing spatial Characteristics, http://merkur01.inf.uni-konstanz.de/CCCC/



Chapitre 2. Etat de l'art : moteurs de recherche et comparaison de formes 3D

FIG. 2.5 – Exemple de requête par esquisse avec le "Princeton Search Engine".

# 2.1.3 Requêtes par esquisses (2D/3D)

Ces sites permettent de réaliser une esquisse en deux dimensions de la forme que l'on recherche, voir Figure 2.5.

- Purdue <sup>32</sup> Moteur de recherche d'objets de CAO se basant sur une voxelisation puis une squelettisation des objets avant comparaison. L'utilisateur peut parcourir la base de données ou effectuer la recherche à partir d'une esquisse en 2D, qui est à son tour squelettisée [Iyer 05b].
- 3D Knowledge <sup>33</sup> Moteur de recherche d'objets en céramique où l'utilisateur peut dessiner le contour 2D d'un récipient pour interroger la base de données des modèles 3D [Rowe 01, Schurmans 01]. De plus, cette base de données contient des informations sémantiques portant sur la topologie des céramiques mais qui ne peuvent pas être interrogés directement.
- **3D Object Retrieval System**  $^{34}$  Site, de l'université nationale de Taiwan, muni d'une

 $<sup>^{32} \</sup>rm https://engineering.purdue.edu/PRECISE/dess.html$ 

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup>http://3dk.asu.edu/

 $<sup>^{34}\</sup>mathrm{http://3d.csie.ntu.edu.tw/~dynamic/cgi-bin/DatabaseII_v1.8/index.html}$ 

base de données contenant 11 000 modèles 3D. La mise en correspondance se fait en utilisant le *LightField descriptor* [Chen 03], descripteur qui se base sur les projections 2D orthogonales des modèles 3D. Ces images 2D sont ensuite représentées par les moments de Zernike et les descripteurs de Fourier. L'utilisateur peut, au choix, effectuer ses recherche à partir :

- De mots clés.
- D'un fichier représentant un objet en 3D (dans plusieurs formats : OBJ, WRL, 3DS, DXF).
- D'un objet de la base de données.
- D'un à deux croquis 2D.
- D'une combinaison entre des mots clés et un à deux croquis 2D.
- The Princeton Search Engine <sup>35</sup> Site indexant près 36 000 objets 3D présents sur internet [Funkhouser 03]. La comparaison de formes utilise les harmoniques sphériques qui sont des descripteurs de formes invariants par rotations) [Kazhdan 03]. L'utilisateur peut au choix effectuer une recherche à partir :
  - De mots clés.
  - D'un fichier au format VRML (ou bien PLY, OBJ, DXF, UG, OFF et POV s'ils contiennent la géométrie de l'objet).
  - D'un objet de la base de données.
  - D'une à trois esquisses 2D.
  - D'une esquisse 3D.
  - D'une combinaison entre des mots clés et une, deux ou trois esquisses 2D.
  - D'une combinaison entre des mots clés et une esquisse 3D.

Chacune de ces interactions donne lieu à un algorithme particulier de recherche dans la base de données.

#### Remarques

Le fait de pouvoir interroger la base de données de différentes façons, surtout avec des esquisses ou des objets 3D, fait que ces outils sont très complets et s'adaptent à différents cas de figures.

## 2.1.4 Requêtes par images 2D

**Online 3D search Engine** <sup>36</sup> Site de l'université de Lille qui utilise la méthode Adaptative Views Clustering basée sur des vues 2D, de façon semblable à "3D Object Retrieval System" en ajustant le nombre d'images nécessaires à chaque objet par un processus bayésien [Ansary 05]. Cet outil permet d'interroger la base de données avec une image 2D, voir Figure 2.4, ou à partir d'un objet 3D de la base de données. La recherche s'effectue sur la base de données du "Princeton Shape Benchmark".

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup>http://shape.cs.princeton.edu/search.html

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup>http://www-rech.enic.fr/3dretrieval/



FIG. 2.6 – Exemple de raffinement de requête sur "georgle".

### Limitations

Cet outil est très pratique si on possède une image de l'objet que l'on recherche. Le problème est qu'on doit s'assurer que cette image contienne bien des détails assez discriminants pour représenter cette forme.

# 2.1.5 Raffinement de requêtes

Ces outils utilisent des schémas de "rétroaction pertinente" (*Relevant Feedback*) qui consistent à marquer certains résultats obtenus comme bon, ou a contrario à marquer certains résultats obtenus comme mauvais, après quoi le calcul de mise en correspondance est renouvelé, en tenant compte des retours, voir Figure 2.6. Ce système permet de réaliser des appariements sémantiques en plus d'appariements purrement géométriques. Généra-lement les meilleurs résultats sont obtenus durant les 4 premières itérations, au-delà les améliorations de résultats sont moindres.

- **3D Model Retrieval** <sup>37</sup> Moteur de recherche utilisant des caractéristiques telles que le ratio volume-surface, les moments invariants, et les coefficients des transformées de Fourier. Les performances sont aussi améliorées par une phase d'apprentissage où un humain annote les différents objets pour leur associer leurs classes correspondantes [Zhang 01b, Zhang 01a].
- **Elad et al** présentent une approche basée sur les moments d'ordres supérieurs avec la *Weighted Euclidean Metric* comme fonction de distance et un schéma de rétroaction

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup>http://amp.ece.cmu.edu/projects/3DModelRetrieval/

pertinente dans un contexte de SVM (Support Vector Machine) [Elad 02]. Les tests ont été réalisés sur une base de données de 1000 objets au format VRML.

georgle <sup>38</sup> Moteur de recherche utilisant une amélioration de la "Sphere Projection", combinée avec les *Model's Betti numbers* comme signature de forme, et avec un schéma de rétroaction pertinente utilisant le *Fisher's Linear Discriminant* (FLD) [Leifman 04, Leifman 05]. Les tests ont été effectués sur une base de données de 1850 objets collectés sur internet. Les meilleurs résultats sont obtenus durant les 2 premières itérations. L'utilisation du FLD fournit de meilleurs résultats que les SVM ou les *Space Wrapping*.

#### Remarques

L'ajout d'un schéma de rétroaction pertinente à un moteur de recherche d'objets 3D permet d'obtenir des résultats plus précis et d'améliorer le nombre d'objets qui ressemble effectivement à l'objet requête.

### 2.1.6 Remarques

Si l'on veut valoriser des collections d'objets 3D, et plus précisément en ce qui nous concerne des objets archéologiques (céramiques), nous devons mettre en place une base de données associée à un outil d'interrogation qui permet à l'utilisateur de facilement étayer sa requête : obtention de caractéristiques, recherches d'après différents critères, visualisation 2D ou 3D, etc.

Nous remarquons que les outils les plus agréables pour l'utilisateur sont ceux qui permettent de réaliser des esquisses, ce qui est une manière très intuitive de représenter les formes.

Nous notons également que les outils les plus précis sont ceux qui utilisent un schéma de rétroaction pertinente.

Quant aux outils proposant de nombreuses méthodes et options de comparaisons, leur intérêt technologique est évident, mais n'allant pas toujours dans le sens de leur intérêt pratique, ce qui ne correspond pas à ce que nous souhaitons pour notre approche.

Enfin, il faut signaler, que ces moteurs de recherche ne fonctionnent que pour des objets complets.

# 2.2 Les méthodes de comparaison de formes

Le problème de la comparaison de formes tridimensionnelles a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Les preuves en sont la multiplication d'études ayant pour but de dresser un état de l'art de ces méthodes [Loncaric 98, Veltkamp 01, Shilane 04, Icke 04, Zhang 04, Tangelder 04, Funkhouser 04a, Iyer 05a, Veltkamp 06], ainsi que la création d'une compétition départageant ces méthodes sur différents types d'objets<sup>39</sup>. Ces algorithmes ont comme but d'être utilisés dans des outils de recherche de modèles 3D.

 $<sup>^{38}</sup>$ http://132.68.60.21/gl

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup>Depuis 2006, http://www.aimatshape.net/event/SHREC/

Ces outils, voir Section 2.1, doivent pouvoir retrouver un objet dans une base de données, hiérarchiser une base de données en classes distinctes.

Dans le cadre de la mise en place d'une base de données d'objets tridimensionnels archéologiques pour le projet SIAMA, nous devons disposer d'une méthode de comparaison de formes pouvant :

- Générer des classes de poteries par rapport à leurs caractéristiques géométriques et/ou structurelles (et non pas une classification basée uniquement sur l'usage des objets).
- Retrouver un objet dans la base de données à partir de différentes requêtes (mots clés, caractéristiques morphologiques, objets complets, etc.).
- Retrouver un objet à partir d'un objet incomplet (mise en correspondance par parties).

Afin d'avoir un aperçu des différentes méthodes existantes, nous avons poursuivi notre étude par un état de l'art sur les méthodes de comparaison d'objets 3D, en nous concentrant sur celles qui pourraient satisfaire des besoins identiques aux nôtres : les comparaisons partielles d'objets.

## 2.2.1 Lexique des termes spécifiques

- Mise en correspondance (*Matching*) Processus qui détermine le degré de similarité de deux formes. Ce processus est souvent réalisé grâce à un calcul de distance en des signatures représentant les objets.
- **Indexation** (*Indexing*) Processus qui construit une structure de données permettant d'accélérer le parcours de la base de données.
- **Comparaison de formes (***Retrieval***)** Processus de recherche et de mise à disposition du résultat d'une requête. Les deux étapes précédentes font souvent partie de ce dernier processus.
- Mise en correspondance partielle (*Partial Matching*) Processus qui détermine le degré de similarité d'une forme complète et d'une partie d'une forme.

La communauté des chercheurs a longtemps plus ou moins confondu ou assimilé ces trois domaines, au point de penser qu'il s'agissait en fait d'une seule et même étape. Maintenant, ces trois thèmes sont clairement différenciés et se développent indépendamment les uns des autres<sup>40</sup>.

### 2.2.2 Critères de comparaison

Les différentes méthodes de comparaison de formes doivent être évaluées par rapport aux exigences particulières des moteurs de recherche d'objets 3D. Les exigences que nous avons retenues sont citées ci-dessous :

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup>Il nous arrivera, cependant, dans ce document de parler d'appariements ou comparaisons de formes au lieu de mises en correspondances.

#### a) La représentation de la forme :

Une caractéristique importante d'une méthode de comparaison d'objets 3D est le modèle utilisé pour la représentation de la forme : contours 2D (silhouette/profil), surface 3D (maillage définissant l'enveloppe extérieure), volume 3D. En ce qui concerne le format de fichier utilisé, la plupart des méthodes travaillent sur des fichiers VRML, PLY, OBJ ou OFF qui ne contiennent souvent que la géométrie des objets sous la forme d'un maillage triangulaire.

#### b) Les propriétés de la mesure de similarité :

Une mesure de similarité d peut être formalisée par une fonction définie à partir d'une paire de descripteurs et indiquant le degré de leur ressemblance. D'où :

$$d : S * S \to \Re^+ \cup \{0\}$$

La fonction d peut posséder certaines des propriétés suivantes :

- 1. Identité :  $\forall x \in S, d(x, x) = 0$
- 2. Positivité :  $\forall x \neq y \in S, d(x, y) > 0$
- 3. Symétrie :  $\forall x, y \in S, d(x, y) = d(y, x)$
- 4. Inégalité triangulaire :  $\forall x, y, z \in S, d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$
- 5. Invariance par transformation : pour G un groupe de transformations  $\forall x, y \in S, g \in G, d(g(x), g(y)) = d(x, y)$

La propriété d'identité indique qu'une forme doit être complètement similaire à ellemême. Quand à la propriété de positivité, elle exige que deux formes différentes ne puissent être considérées comme des formes totalement similaires. C'est une propriété très forte pour un descripteur de forme, mais elle n'est que rarement satisfaite (les descripteurs de forme ayant tous une certaine tolérance).

La symétrie n'est pas toujours souhaitée comme critère.

Les mesures de similarités pour les mises en correspondance partielle, attribuant une distance faible à d(x, y) si une partie de x correspond à une partie de y, n'obéissent pas à la propriété d'inégalité triangulaire.

L'invariance par transformation doit être satisfaite si l'on cherche un descripteur de forme indépendant du placement de l'objet, de son orientation et de sa mise à l'échelle.

Toutes ces propriétés permettent de caractériser les mesures de similarité comme ceci :

**Une métrique** si elle possède les propriétés (1), (2), (3) et (4).

Une pseudo-métrique si elle possède les propriétés (1), (3) et (4).

**Une semi-métrique** si elle possède les propriétés (1), (2) et (3).

Si une mesure de similarité est une pseudo-métrique, la relation d'inégalité triangulaire peut-être appliquée pour améliorer l'efficacité de l'algorithme de comparaison formes [Barros 96, Vleugels 99].

#### c) L'efficacité :

Il est inefficace de tester séquentiellement l'objet de la requête avec toute la base de données, surtout si elle contient un grand nombre d'éléments. Pour que la comparaison de formes soit rapide, il faut que la structure d'indexation puisse être parcourue rapidement et que le temps de calcul d'un descripteur de forme soit compatible avec une utilisation interactive.

#### d) Les capacités de discrimination :

Un descripteur de forme doit capturer les caractéristiques qui permettent de distinguer correctement les objets entre eux.

#### e) La capacité à réaliser des mises en correspondance partielles :

Ce genre d'appariement peut simplifier le problème de mise en correspondance des formes complètes. Un objet complet pourrait être utilisé lors d'une requête après qu'une partie de cet objet soit désignée comme zone d'intérêt, possédant un poids plus important lors de la phase de calcul de distance [Funkhouser 04b]. Le but étant d'arriver à retrouver une forme à partir d'une de ces parties.

#### f) La robustesse et la sensibilité :

Il est souhaitable de posséder un descripteur de forme insensible au bruit et robuste face aux dégénérescences topologiques des modèles 3D, ce qui est souvent le cas pour des objets numérisés.

#### g) La nécessité de normaliser la position et l'orientation des objets :

Vu que tous les descripteurs de forme ne sont pas invariants par transformation affine (rotation, translation, mise à l'échelle), une ou plusieurs procédures de normalisation, décrites ci-après, peuvent s'avérer nécessaires. Elles dépendent du centre de masse des modèles.

Afin de normaliser la taille d'un objet 3D, la distance moyenne entre les points sur sa surface et son centre de masse doit être calibrée. Cette méthode est moins sensible au bruit que les boîtes englobantes.

Pour normaliser un modèle 3D en translation, il suffit de déplacer son centre de masse à l'origine.

Enfin, la normalisation pour la rotation s'effectue, soit par analyse en composantes principales (PCA), par un PCA continue [Vranic 03], ou par un PCA pondéré (CPCA) [Vranic 04]. L'un des problèmes liés à l'emploi d'un PCA et de ses améliorations est qu'il ne fonctionne ni sur des objets sphériques ni sur les objets cylindriques.

La normalisation de la position et de l'orientation des objets se dit aussi normalisation de la pose.

Notons que la normalisation de la pose n'est pas compatible avec une comparaison partielle de formes. Ce type de méthodes doivent donc être basées sur des signatures invariantes par rotation.

### 2.2.3 Méthodes de mise en correspondance de formes

En nous appuyant sur les représentations des descripteurs de forme et sur les derniers états de l'art : [Tangelder 04, Veltkamp 06], nous classons les méthodes de mise en correspondance de formes en trois grandes catégories :

- 1. Les méthodes basées sur les caractéristiques.
- 2. Les méthodes basées sur les graphes.
- 3. Les autres méthodes.

#### a) Caractéristiques :

Dans le contexte de mise en correspondance d'objets 3D, les caractéristiques indiquent des propriétés géométriques et topologiques. Pour différencier des formes 3D, il suffit alors de mesurer ces caractéristiques et de les comparer entre-elles.

Ces méthodes sont divisées en quatre catégories d'après le type de caractéristiques utilisées :

- Caractéristiques globales.
- Distributions de caractéristiques globales.
- Cartes spatiales.
- Caractéristiques locales.

Les trois premières approches représentent les valeurs des caractéristiques par un vecteur à d dimensions où la recherche des k plus proches voisins est obtenue en comparant les caractéristiques dans cet espace à d dimensions.

Au contraire, les caractéristiques locales décrivent la forme 3D autour d'un ensemble de points de la surface, ce qui amène à utiliser plusieurs descripteurs au lieu d'en avoir un seul.

**Caractéristiques globales** Les propriétés globales caractérisent la forme globale d'un modèle 3D. Des exemples de ces caractéristiques sont les *Extended Gaussian Image*, les moments d'une surface, le volume du modèle, le ratio entre la surface et le volume, la transformée de Fourier du volume ou bien l'enveloppe externe de la forme.

- Zhang et Chen [Zhang 01a] décrivent des méthodes pour calculer efficacement une dizaine de caractéristiques, telles que : le volume, l'aire, les moments et les coefficients de la transformée de Fourier. Comparer deux objets reviens à calculer la distance euclidienne entre leurs caractéristiques.
- **Corney et al.** [Corney 02] introduisent des données basées sur l'enveloppe convexe telles que : le *froissage (crumpliness)* qui est le ratio entre la surface de l'objet et la surface de son enveloppe, l'*empaquetage (packing)* qui est le pourcentage de volume de l'enveloppe restant inoccupé, et la *densité (compactness)* qui est le ratio entre la surface cubique de l'enveloppe et le volume carré de l'enveloppe.

Kazhdan et al. [Kazhdan 04] présentent un descripteur utilisant la *reflective symmetry*, une fonction 2D associant une mesure à chaque droite passant par le centre de masse du modèle. Les plans de symétrie et d'anti-symétrie peuvent en être extraits. Cette méthode permet d'améliorer les performances de certains descripteurs de forme, tel que celles utilisant les harmoniques sphériques [Kazhdan 03].

Ces méthodes ne sont pas discriminantes pour les détails, mais elles s'implantent facilement. Ainsi, elles permettent la mise en place de schémas de rétroaction pertinente :

- **Zhang et Chen** [Zhang 01b], ont utilisé des caractéristiques telles que le ratio volumesurface, les moments invariants, et les coefficients des transformées de Fourier. Ils ont aussi amélioré leurs performances par une phase d'apprentissage où un humain annote les différents objets avec leurs classes correspondantes.
- **Elad et al.** [Elad 02] utilisent une approche basée sur les moments d'ordres supérieurs avec une technique de rétroaction pertinente dans un contexte de SVM (*Support Vector Machine*) avec la *Weighted Euclidean Metric* comme fonction de poids.
- Leifman et al. [Leifman 04, Leifman 05] utilisent une amélioration de la "Sphere Projection" (avec variation du rayon pour capturer les informations locales), combinée avec les *Model's Betti numbers* (pour capturer la topologie) comme signature de forme, couplée avec un schéma de rétroaction pertinente utilisant le *Fisher's Linear Discriminant* (FLD).

**Distributions de caractéristiques globales** Les distributions de caractéristiques globales représentent la signature d'un modèle 3D par une distribution de probabilités, échantillonnée à partir d'une fonction mesurant des propriétés géométriques de la forme 3D.

- **Osada et al.** [Osada 02] introduisent et comparent des distributions de formes mesurant des propriétés basées sur les distances, les angles, les aires et les volumes entre des points aléatoirement choisis à la surface des objets. Une pseudo-métrique est utilisée pour le calcul de distance. La distribution de distances D2, un histogramme des distances euclidiennes entre des paires de points choisis aléatoirement sur la surface du modèle 3D, s'est révélée la plus efficace.
- **Ohbuchi et al.** [Ohbuchi 02] utilisent des histogrammes de formes qui dépendent des axes principaux d'inertie des modèles. Cette méthode ne fonctionne bien que pour des objets de révolutions de type "pièces de jeux d'échec".
- **Ip et al.** [Ip 02] appliquent la distribution de formes D2 dans un contexte de CAO. Mais cette approche ne fonctionne que sur les modèles volumiques.
- **Ohbuchi et al.** [Ohbuchi 03a] ont examiné une autre extension de la distribution de formes D2 appelée Absolute Angle Distance Histogram qui est plus performante que D2, mais pour un coût en termes de temps de calcul une fois et demi supérieur. Une autre amélioration de cette méthode, utilisant une approche par multirésolution basée sur des Alpha Shapes, est encore plus performante mais également encore plus lente [Ohbuchi 03b].

Ces méthodes sont discriminantes pour de larges catégories de formes et peuvent être associées à des cartes spatiales (*spatial maps*) mais ces méthodes ne prennent pas en compte les détails (nécessité de moments d'ordre supérieurs), et elles ne permettent pas les mises en correspondance partielles.

**Cartes spatiales** Ce type de représentation des formes 3D est intéressante dans le sens où elle capture la localisation spatiale d'un objet.

- Ankerst et al. [Ankerst 99] utilisent des histogrammes de formes construits en utilisant des boules concentriques (*concentric shells*) et/ou des sections de boules (*sectors*) autour des centres des masses des modèles 3D, ainsi qu'une distance quadratique pour évaluer la ressemblance entre les histogrammes.
- Vranic et al. [Vranic 01b] décrivent une surface en associant à chaque rayon, lancé depuis l'origine du repère, une valeur égale à la distance au dernier point d'intersection entre le modèle et le rayon. Puis, ils calculent les harmoniques sphériques pour cette fonction appelée Spherical Extent Function. Leur méthode requiert une normalisation de la pose de l'objet pour obtenir une invariance par rotation.
- Yu et al. [Yu 03] proposent un descripteur similaire où la dissimilarité est calculée à l'aide d'une distance euclidienne sur les transformées de Fourier des descripteurs de forme. Leur méthode requiert également une normalisation de la pose pour obtenir une invariance par rotation.
- Kazhdan et al. [Kazhdan 03] présentent une approche générale basée sur les harmoniques sphériques pour transformer un descripteur de forme, nécessitant une normalisation de la pose, en un descripteur indépendant de la rotation. Leur méthode s'applique à un descripteur défini comme une collection de fonctions sphériques ou une fonction définie sur une grille de voxels. Cette approche offre une alternative à l'obligation de normalisation des objets, normalisation faite par PCA, pour obtenir une signature de forme invariante par rotation. Leurs expériences, ont montré que les performances de descripteurs de forme ainsi modifiés sont meilleures que celles des mêmes descripteurs avec normalisation des objets. Cette approche généralise l'algorithme proposé dans [Funkhouser 03], qui réalise des harmoniques sphériques à partir d'une grille de voxels.
- Novotni et Klein [Novotni 03] présentent une méthode pour calculer les descripteurs 3D de Zernike à partir de voxels, comme extension naturelle des descripteurs basés sur les harmoniques sphériques. Ce descripteur de forme ne nécessite pas de normalisation puisqu'il est invariant par rotation, et ce par construction (les harmoniques sphériques et les moments de Zernike sont invariants par rotation).
- Vranic [Vranic 03] constate que les grilles de voxels font perdre les détails trop fins des formes, et présente des tests de méthodes dont les objets sont normalisés par un PCA continu. Ces tests sont en contradiction avec les résultats de [Funkhouser 03]. Pour Vranic, les méthodes travaillant sur des objets normalisés obtiennent de meilleurs résultats que ces mêmes méthodes transformées en méthodes indépendantes par rotation.
- Kriegel et al. [Kriegel 03b, Kriegel 03a] explore la similarité pour des grilles de voxels. Leur carte spatiale est obtenue par partitionnement de la grille en cellules disjointes

correspondant aux pics de l'histogramme. Cette méthode requiert une normalisation de la pose.

Ces méthodes ne sont généralement pas invariantes par rotation, sauf en cas d'utilisation d'harmoniques sphériques, et elles ne font pas de mise en correspondance partielle parce qu'elles n'encodent pas les relations entre les parties d'un objet. Elles ne donnent pas non plus de retour sur les scores obtenus.

**Caractéristiques locales** Ces méthodes décrivent la forme 3D autour d'un échantillonnage de points de la surface de l'objet. Moins efficaces que les méthodes précédentes, elles ne bénéficient pas d'algorithmes permettant une indexation efficace et leur mesure de similarité ne respecte pas la propriété de l'inégalité triangulaire. Ce qui a retenu notre attention, c'est que les mises en correspondances partielles semblent possibles mais il n'y a pas encore de résultats validant ceci.

- Shum et al. [Shum 96] utilisent un système de coordonnées sphériques pour projeter les courbures de la surface d'un objet 3D sur une sphère, puis calculent une distance entre deux distributions de courbures. Cette méthode ne fonctionne que sur des objets de genus zéro.
- Chua et Jarvis [Chua 97] calculent des signatures de points qui accumulent des informations à propos de la surface le long d'une courbe 3D autour d'un point. Johnson et Herbert [Johnson 99], appliquent les "imagettes de spin" (*Spin Images*) qui sont les histogrammes 2D des emplacements de la surface autour de tout point de la surface de l'objet. Ces méthodes sont très difficiles à appliquer à la mise en correspondance des formes 3D, à cause de la complexité de leur représentation, en plus de l'ambigüité sur la manière de définir une mesure de dissimilarité satisfaisant l'inégalité triangulaire.
- Zaharia et Prêteux [Zaharia 01] décrivent le 3D Shape Spectrum Descriptor, un histogramme d'index de formes calculé sur le maillage entier. Cet index, introduit par Koendering [Koendering 90], définit une fonction des deux courbures principales sur les surfaces continues. Malheureusement, cette méthode nécessite une phase de pré-traitement pour les maillages topologiquement incorrects ou non orientables.
- Körtgen et al. [Körtgen 03] appliquent les 3D Shape Contexts qui sont des descripteurs semi-locaux centrés sur un point de la surface de l'objet et qui représentent l'extension naturelle des 2D Shape Contexts [Belongie 02]. Comparées aux précédentes méthodes présentées dans ce chapitre, les 3D Shape Contexts sont moins efficaces, ne possèdent pas d'indexation directe et leur mesure de dissimilarité n'assure pas la propriété d'inégalité triangulaire.

**Remarques à propos des méthodes basées sur des caractéristiques :** L'avantage des méthodes présentées dans cette section est qu'elles s'appliquent à tous les types de représentations de données. Les descripteurs de forme sont généralement robustes, rapides à calculer et leur indexation est généralement évidente (sauf pour les méthodes utilisant des caractéristiques locales). Par contre, les descripteurs doivent être indépendants par

rotations, de construction, ou bien cela entraine l'obligation de normaliser la pose des objets par un PCA (pour s'affranchir des rotations).

Les méthodes utilisant les caractéristiques locales sont les seules à pouvoir réaliser des appariement partiels même s'il n'y a pas encore de résultats prouvant ceci.

#### b) Graphes :

En général, les méthodes basées sur les caractéristiques (présentées dans la section a)) ne prennent en compte que la géométrie des objets. Au contraire, les méthodes basées sur les graphes essayent d'extraire du sens à partir d'une forme 3D en étudiant les connexions entre ses différentes parties. On divise ces méthodes en trois catégories :

- Graphes modèles.
- Squelettes.
- Graphes de Reeb.

**Calcul de distance** Un calcul efficace des distances sur un graphe n'est pas possible : le calcul de l'*edit distance* est un problème NP-difficile [Zuckerberger 02] et trouver le sous-graphe commun maximal est NP-complet [Garey 79].

Une solution polynomiale peut être obtenue pour un graphe dirigé acyclique comme les *Shock Graphs*. Sebastian et al. [Sebastian 01], décrivent une approche pour calculer une pseudo-métrique entre *Shock Graphs*. Cette approche, impliquant une recherche exhaustive du chemin de déformation optimale entre deux formes 2D, a des temps de calculs trop importants, en plus du fait que cette méthode ne s'applique pas directement à la 3D.

Les graphes modèles Ils nécessitent des modèles solides de CAO (B-rep ou CSG) à part la méthode de [Zuckerberger 02, Tal 06], qui s'applique aux formes naturelles définies par des maillages. Leur méthode consiste à découper l'objet en composantes significatives qui sont assimilées à une sphère, un cylindre, un cône ou à un plan. En suite, un graphe attribué représentant cette décomposition est construit en tenant compte des rapports de taille entre les parties. La signature obtenue est compacte, invariable aux transformations affines et ne nécessite pas de normalisation. La comparaison des graphes est réalisée grâce à un isomorphisme de correction d'erreurs par sous-graphes très coûteux en temps de calcul [Messmer 95].

Les squelettes et les graphes de Reeb Les méthodes utilisant les squelettes et les graphes de Reeb s'appliquant uniquement sur des modèles volumiques, nous ne les avons pas incluses dans cet état de l'art. Le lecteur souhaitant en prendre connaissance pourra se référer à [Biasotti 03] pour plus d'informations.

**Remarques à propos des méthodes basées sur des graphes :** Avec les graphes, la propriété d'inégalité triangulaire n'est pas applicable en pratique, d'où l'utilisation d'une mise en correspondance simplement approximative. Ces méthodes ne sont pas très discriminantes parce qu'elles ne tiennent compte que de la topologie des objets, il faut alors les combiner à d'autres méthodes. Elles ne sont pas très robustes mais ne nécessitent pas de normalisation et leur structure est adaptée à la mise en oeuvre de mises en correspondance partielles.

#### c) Autres méthodes :

Dans cette partie, nous avons regroupé des méthodes qui ne travaillent ni sur les vecteurs de caractéristiques ni sur des graphes. Ces méthodes recouvrent plusieurs types de techniques qui sont organisées autour :

- Des vues.
- De l'erreur volumique.
- Des nuages de points pondérés.
- Des déformations.

**Vues** L'idée principale de cette approche est que deux modèles 3D sont équivalents s'ils sont similaires depuis tous les points de vues possibles.

- Löffler [Löffler 00] utilise un nombre fixé d'images binaires comme descripteur d'un modèle 3D, ce descripteur étant comparé à d'autres images ou à des esquisses 2D.
- **Cyr et Kimia** [Cyr 01] considèrent qu'un descripteur consiste en un certain nombre de vues 2D, ce nombre est variable car obtenu par regroupement de l'ensemble des vues en cluster, chaque cluster étant représenté par un *Shock Graph*.
- Macrim et al. [Macrim 02] présentent une utilisation des *Shock Graphs* avec une indexation efficace et une signature se basant sur la topologie des objets.
- **Funkhouser et al.** [Funkhouser 03] appliquent la similarité à base de vues en développant une interface permettant la saisie d'esquisses 2D qui sont comparées à 13 images correspondant aux contours de l'objet 3D sous 13 vues différentes (13, le nombre de vues est fixé pour tous les objets).
- Chen et al. [Chen 03] utilisent des *LightField descriptors* et encodent leurs images grâce aux moments de Zernike et aux descripteurs de Fourier. La base de données est organisée de façon à avoir une bonne indexation. Cette méthode ne nécessite pas de normalisation. Elle obtient les meilleurs résultats parmi celles présentées dans l'état de l'art, mais pour des coûts plus élevés.
- Filali et al. [Ansary 05] utilisent la méthode Adaptative Views Clustering basée sur des vues 2D, de façon semblable à Chen et al. [Chen 03] en ajustant le nombre d'images nécessaires à chaque objet par un processus bayésien. Ils obtiennent ainsi d'aussi bons résultats que Chen avec une signature plus compacte mais aussi un coût supérieur.

Remarques à propos des méthodes basées sur les vues : Ces deux dernières méthodes tiennent pour l'instant leurs promesses : prouver qu'une collection d'images 2D est la meilleure représentation possible pour un objet 3D. Il reste maintenant à diminuer les coûts de calculs de leurs descripteurs ainsi que la taille de ces descripteurs.

#### Erreur volumétrique

- Novotni et Klein [Novotni 01] décrivent une approche basée sur le calcul d'une erreur volumétrique entre un objet et une séquence d'enveloppes convexes pour l'autre objet. Le défaut de cette méthode est d'avoir une mesure de dissimilarité non symétrique et qui n'assure pas la propriété d'inégalité triangulaire.
- Sánchez-Cruz et Bribiesca [Sánchez-Cruz 03] présentent une méthode associant d'une part l'erreur volumétrique entre deux grilles de voxels, et d'autre part la distance de transport (qui mesure le nombre de voxels qui doivent être déplacés et la distance qu'ils ont à parcourir pour transformer une forme en une autre). Le nombre de voxels nécessaire étant important cette méthode est assez coûteuse en temps de calculs.

Remarques à propos des méthodes basées sur l'erreur volumétrique : On a le choix avec ces approches entre un calcul de distance rapide mais sans la propriété d'inégalité triangulaire et de symétrie, ou un calcul de distance plus lent mais utilisant une pseudo-métrique.

#### Nuage de points pondérés

- Dey et al. [Dey 03] présentent une méthode permettant d'obtenir un descripteur de forme à partir d'un ensemble de points. L'objet est décomposé en composantes, représentées par un point (le centre des masses de la composante) pondéré par son volume. La mise en correspondance est effectuée grâce à une mesure n'obéissant pas à la propriété d'inégalité triangulaire.
- **Tangelder et VeltKamp** [Tangelder 03] utilisent comme descripteur de forme un ensemble de points attribués, constitué par les points qui ont une courbure élevée. Une mesure sur cette courbure représente le poids. Ils comparent les ensembles de points en utilisant une variante de la distance du voyageur de commerce qui assure l'inégalité triangulaire.
- Shamir et al. [Shamir 03] proposent un descripteur de forme consistant en une hiérarchie de nuages de points pondérés, représentant des approximations de formes sphériques. Ils utilisent cette approximation par multirésolution pour implanter un algorithme qui aligne et compare simultanément les formes.

Remarques à propos des méthodes basées sur les nuages de points pondérés : Tangelder et VeltKamp sont les seuls à utiliser une pseudo-métrique [Giannopoulos 02].

**Déformations** De nombreuses méthodes comparent des paires de formes 2D en mesurant la quantité de déformations, nécessaire pour superposer exactement ces formes. Ces méthodes sont naturellement paramétrées grâce à la longueur d'arc de leurs contours, malheureusement, cette paramétrisation n'est pas directement transposable à la 3D. Ainsi, les méthodes utilisant les déformations pour la récupération de formes [Terzopoulos 91] ou l'évolution de formes [DeCarlo 98] sont difficilement applicables au problème de mise en correspondance d'objets 3D. **Remarques à propos des méthodes basées sur les déformations :** Les méthodes de déformation sont suffisamment rapides pour la 2D mais sont trop lente pour la 3D ce qui les rend inutilisables en l'état.

## 2.2.4 Mises en correspondances partielles

Ces dernières années, les recherches dans le domaine des comparaisons partielles d'objets ont le vent en poupe [Funkhouser 04b, Suzuki 05, Tal 06, Funkhouser 06, Mitra 06, Gal 06, Bespalov 06, Huang 06, Ruggeri 08, Shalom 08, Stavropoulos 08]. Elles ont même donné lieu à une session spéciale lors de la compétition de comparaison de formes de 2007 [Marini 07].

Cependant, il y a, dans la littérature, une confusion autour de ce que représente le terme *Partial Matching*. En effet, la plupart des méthodes qui déclarent faire des comparaisons partielles de formes tridimensionnelles se cantonnent à des comparaisons entre objets complets ayant des parties similaires. Citons, par exemple, l'approche de [Funkhouser 04b] où l'utilisateur sélectionne une région de son objet requête pour retrouver tous les objets de la base de données qui ont une partie semblable à cette région là. Tous les objets sont représentés par une *voxélisation* et une transformée des distances euclidiennes. Du coup, la similarité entre deux objets est la somme d'une part du produit cartésien de la *voxélisation* du second objet avec la transformée du premier objet, le tout en mettant un poids plus important pour la région sélectionnée, voir Figure 2.7.



FIG. 2.7 – Exemple de recherche avec zones d'intérêts.

D'autres méthodes, pensent que ce terme désigne le fait de réaliser des comparaisons d'objets complets en utilisant des parties d'objets. Suzuki propose une méthode qui segmente chaque objet de sa base de données en milliers de parties suivant les courbures des objets (quelle que soit la taille de l'objet initial). Ainsi, pour retrouver un objet, cette méthode effectue des comparaisons entre toutes ces parties [Suzuki 05], voir Figure 2.8.



FIG. 2.8 – Exemple de recherche depuis des parties d'objets.

Ces approches ne peuvent pas en l'état réaliser des appariements partiels comme ceux qui nous intéressent, à savoir des appariements entre des objets complets et des objets incomplets (cassés) ou des parties d'objets. Les méthodes utilisant des caractéristiques locales et celles utilisant les graphes permettent, en principe, de réaliser ce genre de comparaisons partielles.

#### 2.2.5 Remarques

Après étude des méthodes de comparaison de formes tridimensionnelles, nous avons noté que :

- Les méthodes basées sur les caractéristiques sont les plus rapides.
- Les méthodes utilisant les vues donnent les meilleurs résultats.
- Un certain nombre de méthodes sont des adaptations d'approches 2D à la 3D.
- Les approches basées sur les caractéristiques locales et les graphes devraient permettre de réaliser des appariements partiels, mais aucun résultat ne le prouve pour l'instant.
- Aucune méthode n'est spécifique aux objets de révolution.
- Une méthode de comparaisons partielle de forme doit obligatoirement se baser sur des représentations invariantes par rototranslation. En effet, une normalisation de la pose rendrait les comparaisons impossibles.

3

# Données utilisées

Dans le cadre du projet SIAMA, deux campagnes de numérisation ont été menées sur les site du musée de Millau en Aveyron et de Montans dans le Tarn, musées disposants de très belles collections de poteries sigillées (fabriquées à la Graufesenque et Montans). Ceci nous a permis d'obtenir la numérisation d'une cinquantaine d'objets, voir Figure 2 du Chapitre : Introduction.

Nous avons souhaité disposer d'objets assez représentatifs des poteries sigillées retrouvées sur les sites de fouilles, et couvrant un assez large éventail de formes, comme on peut le voir Figure 3.1 qui représente les objets de la première vague de numérisation (douze formes, dont certaines avec des représentants de tailles différentes). Certaines céramiques ont une forme géométrique simple : cylindrique (Dragendorff 22), hémisphérique (Ritterling 8), tronconique (Dragendorff 33), etc. D'autres ont des formes géométriques composées, duplicata d'éléments de base ou adjonction d'éléments différents : bilobée hémisphérique (Dragendorff 27), hémisphérique et cylindrique (Dragendorff 24/25), tronconique et mouluré (Ritterling 5), cylindrique et hémisphérique (Vernhet A3), etc.

Nom typologique	Dessin	Photo	Nom typologique	Dessin	Photo
Formes simples			Formes composées		
Drag. 22		9	Drag. 27		9
Ritt.8	$\Box$		Ritt. 5	$\mathbf{\nabla}$	
Drag. 33			Drag. 24/25		
Formes décorées					-
Drag. 30			Drag. 35/36		
			VeA3	X	
Drag. 11	Y	Y	L	•	
			VeC3	T	8

FIG. 3.1 – Tableau récapitulatif de la première campagne de numérisation.

# 3.1 Typologie de référence

La typologie actuellement utilisée par les archéologues et les céramologues est une synthèse, présentée sous forme de dessins normalisés en deux dimensions, d'une série d'études et de classifications [Dragendorff 95, Déchelette 04, Knorr 19] qui ont été ponctuellement complétés par [Bémont 86]. À partir de cette typologie, une nomenclature des formes (voir Annexe 5.5) et une norme de description morphologique des céramiques ont été mises en place [Marty 04a]. Cette normalisation a été appliquée sur le chantier-école de la domus de Coupéré, à Saint Bertrand des Comminges, pour décrire morphologiquement les poteries et fragments retrouvés.

A titre d'exemple, on présente à la page suivante, la description morphologique d'une coupelle Drag. 27b, faite par un archéologue. Le profil de la coupelle est segmenté en ses primitives principales, à savoir : le bord, la panse et la base. Chacune des primitives principales étant décrite de manière détaillée. La description morphologique est identique à celles des autres objets appartement à la même catégorie Drag. 27b, seules les dimensions sont propres au spécimen étudié.

Les archéologues nous ont fourni les descriptions morphologiques de tous les objets de la base de données. Descriptions qui peuvent nous aider à segmenter automatiquement les profils des poteries.

# 3.2 Maillages 3D

Les numérisations ayant été effectuées par un ingénieur de l'équipe UTAH, certains choix techniques nous ont été imposés, tels que : le type des fichiers (Wavefront OBJ pour les maillages 3D et IGES pour les profils), et la précision de numérisation. Le scanner utilisé est le Minolta VIVID-910, qui est un scanner laser à triangulation active, possédant un plateau rotatif asservi. Les différents objets, fragments et pots entiers, ont été numérisés en procédant comme suit :

- 1. L'objet est posé à l'envers sur le plateau rotatif de façon à ce que le scanner puisse numériser toute sa surface extérieure, grâce à des pas de rotation de 90°.
- 2. L'objet est posé normalement (à l'endroit) sur le plateau rotatif de façon à ce que le scanner puisse numériser toute sa surface intérieure, grâce à des pas de rotation de 90°.
- 3. L'objet est posé de façon à ce que le scanner puisse numériser sa base.
- 4. L'objet est posé de façon à ce que le scanner puisse numériser son plan d'ouverture supérieur.

Ces prises de vues sont effectuées avec "Polygon Editing Tool", logiciel livré avec le scanner et servant à commander le plateau rotatif. Ces prises de vues sont ensuite *registrées* et fusionnées deux par deux avec le logiciel "RapidForm". Les *registrations* successives rendent le maillage désordonné, ce dernier est alors regénéré en conservant la géométrie, avant d'exporter l'objet dans un fichier OBJ. Les maillages contiennent en moyenne 350 000 sommets et les fichiers font environ 30Mo.


Algorithme 3.1 Description morphologique du Dragendorff 27

Drag. 27 b : Coupelle à panse bilobée sur pied annulaire.

Hauteur : 4 cm.

Diamètre d'ouverture : 8 cm.

Diamètre plan de pose : 4 cm.

- 1- Fond externe plat.
- 2- Face interne du pied, convergent, orientée à 2 et d'une hauteur de 1 cm.
- 3- Face inférieure du pied, plat, large de 1,5 mm et d'un diamètre extérieur de 4 cm.

4- Face externe du pied :

- 4.1- Profil droit dans sa partie inférieure.
- 4.2- Gorge à environ 4,5 mm du plan de pose.
- 4.3- Puis profil convergent.
- 5- Liaison pied/panse convexe et d'un diamètre de 1,85 cm.
- 6- Panse (paroi externe) :
  - 6.1- Profil convexe (bandeau large d'environ 2,1 cm).
  - 6.2- Sillon marquant la rupture de profil, créant un diamètre d'environ 6,4 cm.
  - 6.3- Profil convexe (bandeau large d'environ 1,4 cm).
- 7-Lèvre triangulaire à méplat supérieur, épaissie à l'intérieur, diamètre extérieur maximal de 8,2 cm et diamètre intérieur de 7,5 cm.
- 8-Gorge en «v» à 3 mm du plan d'ouverture.
- 9-Panse (paroi interne) :
  - 9.1- Profil concave (bandeau large d'environ 1,4 cm).
  - 9.2- Rupture de profil : arête d'un diamètre d'environs 5,7 cm.
  - 9.3- Profil concave, transition panse intérieure/fond douce.
- 10- Fond légèrement concave puis convexe avec présence d'une estampille au centre.



FIG. 3.2 – Nuage de points triangulés du Ritterling 5 (750 000 facettes triangulaires et 375 000 sommets).

### 3.3 Profils des poteries

Nous avons vu, dans le Chapitre 1, que la connaissance de l'axe de rotation et du profil d'un pot suffisaient pour le décrire entièrement, sous réserve qu'il soit régulier. Nous avons aussi cité quelques méthodes automatiques ou semi-automatiques permettant d'obtenir ces deux caractéristiques.

Contrairement à certaines méthodes, nous utiliserons la courbe intérieur et la courbe extérieur du profil dans nos approches du Chapitre 4.

Les profils des poteries sont extraits directement grâce au logiciel Maya. Cette étape, consistant à effectuer une coupe verticale passant par l'axe de rotation des poteries, est réalisée avec l'aide d'un céramologue qui indique la meilleur zone pour effectuer la coupe. Les profils issus de ces coupes sont alors exportés en tant que courbes B-Splines de degré 3 dans des fichiers IGES. Les profils contiennent en moyenne 2000 points de contrôles pour une B-Spline.

Les profils des tessons ne sont pas aussi facilement extractibles que les profils des pots complets. En fait, la principale difficulté est de réussir à orienter les tessons pour ensuite effectuer une coupe verticale et ainsi obtenir le profil le plus représentatif. C'est pour cela que la plupart des méthodes essayent en premier d'extraire, quand c'est possible, l'axe de rotation du fragment afin de l'orienter pour pouvoir ensuite obtenir son profil. Mais, ce n'est pas la seule façon d'orienter une poterie. Nous allons nous appuyer sur certaines informations connues a priori pour orienter les fragments et obtenir leurs profils associés, pour éviter d'avoir recours au calcul de l'axe de rotation.



FIG. 3.3 – Le Dragendorff 27 avec différents profils possibles.

### 3.3.1 Présence de bords sur les fragments

Il faut déterminer une technique permettant de bien placer le fragment dans l'espace pour qu'il ait une orientation correcte (identique à la position qu'il avait avant que l'objet ne soit cassé) : s'il possède un bord supérieur on positionne l'objet afin que ce bord soit parallèle au plan (x, y) et que son axe de rotation soit parallèle à l'axe des z. Et pareillement pour les tessons qui possèdent un bord inférieur.

Ensuite, on effectue plusieurs coupes verticales avec des plans passant par l'axe des z, et on ne garde que le profil le plus représentatif du fragment, donc le profil le plus long.

### 3.3.2 Absence de bords sur les fragments

Dans ce cas, il est nécessaire de calculer un axe passant par le centre de gravité ou centre géodésique du fragment, puis on fixe un pas de rotation selon lequel on générera des plans de coupes qui nous permettront d'avoir un échantillonnage de profils, voir Figure 3.4. Ensuite, on doit déterminer le profil le plus probable parmi tous ceux obtenus grâce aux techniques suivantes :



FIG. 3.4 – Les plans de coupes multiples.

### a) Rainures :

Lorsque les fragments possèdent des rainures résultant de leur mode de fabrication, extérieures sur les vases tournés ou intérieures sur les vases moulés, on peut essayer de détecter ces rainures à partir des courbures des profils, que nous avons précédemment calculés. Ces rainures nous permettent de limiter le nombre de profils possibles, voire de trouver directement la bonne orientation du fragment, Figure 3.5.



FIG. 3.5 – Rainures.

### b) Épaisseur :

Les nomenclatures de sigillées montrent que les parois d'une poterie peuvent être classées comme épaissies ou amincies, et elles peuvent également posséder une carène. L'épaisseur de la matière peut ainsi, selon le cas, être plus importante à la base du profil si c'est un objet dont la panse a été classée comme paroi amincie, ou l'inverse, si la panse est classée comme paroi épaissie par rapport à sa base. On peut alors détecter automatiquement deux orientations possibles pour un fragment en testant son épaisseur en différents endroits, de façon à déterminer l'amincissement dans une direction particulière, comme c'est le cas dans la Figure 3.6.



FIG. 3.6 – Largeur d'un profil.

### c) Troisième voie :

Quand on n'a aucune information nous permettant de déterminer la bonne orientation du fragment (ni rainures, ni épaisseurs différentes), nous sommes alors dans l'obligation de déterminer l'axe de rotation du fragment à partir de l'extraction de paramètres géométriques. Ceci nous permet alors d'orienter le fragment et d'en extraire le profil, comme cela est effectué par les méthodes présentées au Chapitre 1.

## 3.4 Limitations

Pour pouvoir réaliser des appariements entre des formes modèles et des fragments de poteries, nous avons dû poser certaines hypothèses :

- On considère le profil comme étant un contour fermé (courbe extérieure et intérieure).
- On ne va traiter que les pots lisses, sans motifs ou décors externes (pour éviter les profils bruités).
- On ne gère pas la base de données, mais uniquement une collection de fichiers contenant les maillages ou les profils.
- On utilisera directement les maillages et les profils sans lissage ou traitement particulier (on ne veut pas dégrader la qualité des objets étudiés).

4

## Solution 2D

En nous inspirant des différentes approches présentées dans le Chapitre 1, nous proposons un approche utilisant les profils pour classifier des tessons de poteries par rapport à un ensemble d'objets modèles<sup>41</sup>.

Nous présentons, Section 4.1, une approche originale qui se base sur l'utilisation des algorithmes génétiques et des surfaces implicites pour réaliser des mises en correspondances entre formes modèles et fragments à partir de leurs profils.

Puis, Section 4.2, nous proposons une organisation spécifique de notre base de données de poteries complètes, tirant partie des descriptions morphologiques des poteries, afin d'accélérer le parcours de la base de données. Pour cela nous segmentons nos profils en leurs primitives principales (à savoir base, panse et bord), et nous effectuons des appariements basés sur ces primitives avant de recourir à une comparaison purement géométrique comme celle de la Section 4.1. Les appariements des primitives principales nous permettent de sélectionner un nombre restreint de poteries parmi toutes celles de la base de données.

### 4.1 Appariement d'un tesson et d'une forme modèle

Nous allons présenter une approche qui fournit le meilleur appariement possible, ou dans la plupart des cas, la forme modèle qui présente les meilleurs probabilités de correspondance avec un fragment.

Notre approche est basée sur l'exploration de l'espace de solutions constitué par tous les positionnements possible d'un tesson par rapport à une forme modèle, voir Figure 4.1. Pour réaliser cette exploration, nous avons besoin d'une mesure pour évaluer la distance entre un tesson, dans un positionnement donné par rapport à un objet modèle, et l'objet modèle. Ensuite, nous utilisons les algorithmes génétiques pour déterminer un positionnement optimal du tesson. Cette recherche utilise la mesure de distance pour évaluer la qualité de l'appariement.

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup>Les deux parties de ce chapitre ont fait l'objet de publications internationales, [Maiza 05, Maiza 06].



FIG. 4.1 – Déplacement d'un fragment par rapport à un objet modèle.

### 4.1.1 Représentation des profils

Comme présenté dans le Chapitre 3, les profils sont extraits sous forme de courbes B-Splines que nous échantillonnons pour avoir un vecteur de points 2D. Nous pouvons donc varier la précision de notre contour en jouant sur le nombre d'échantillons.

Pour comparer des profils, nous devons disposer d'une mesure de distance fournissant le degré d'appariement entre deux d'entre eux. Plusieurs approches purement analytiques existent dans la littérature, mais la comparaison de ces techniques ne fait pas l'objet des travaux présentés dans ce mémoire. Nous avons préférés utiliser une approche nous permettant de disposer d'un champ de distances (potentiels) pour chacun de nos profils.

Nous avons choisi de nous baser sur des travaux précédemment effectués au sein de l'équipe VORTEX et concernant les surfaces implicites, voir Figure 4.2.

Une surface implicite est une surface représentée par une fonction f(x, y, z) qui peut situer n'importe quel point de l'espace par rapport au volume défini par cette surface. On sait si le point est sur la surface, à l'intérieur ou à l'extérieur du volume défini par la fonction implicite. Dès lors, notre distance "tesson - objet modèle" va être basée sur l'utilisation de ces fonctions, et cela en ayant une représentation différente des profils selon que ce sont ceux des formes modèles ou ceux des fragments.



FIG. 4.2 – Exemples de surfaces implicites issus de [Alexe 04].



FIG. 4.3 – Profil entier  $\rightarrow$  Squelette  $\rightarrow$  Surface implicite.

#### a) Profil d'un objet modèle

Nous allons représenter un profil d'une forme modèle par sa fonction implicite associée, et pour cela nous allons utiliser une technique, développée par Mme Ileana Anca Alexe-Pham<sup>42</sup>, qui calcule la fonction implicite représentant une forme 3D, extrapolée à partir d'un contour 2D. Pour appliquer cette technique et obtenir la fonction implicite qui nous permettra ensuite d'évaluer l'appartenance d'un point au profil ainsi représenté, trois étapes sont nécessaires, voir Figure 4.3 :

- 1. Effectuer un triangulation de Delauney de la surface délimitée par le profil.
- 2. Calculer le squelette en utilisant une Chordal Axis Transformation [Prasad 97].
- 3. Générer la fonction implicite correspondante.

Cette technique nous permet de disposer d'une fonction implicite qui peut être vue comme une extrapolation en 3D du profil de la forme modèle dont les frontières épousent le profil initial. L'avantage de disposer d'une fonction implicite est la possibilité d'appliquer la fonction en un point de l'espace et d'en déduire ensuite si ce point est hors, dans ou sur la surface définie par la fonction :

- -f(p) < 0 si le point est en dehors du volume.
- -f(p) = 0 si le point est sur la surface.
- -f(p) > 0 si le point est à l'intérieur du volume.

En fait, la fonction implicite définit un champ de potentiels et pour une valeur donnée du champ, on obtient une surface implicite qui limite un volume. Les valeurs obtenues lorsqu'on applique la fonction à un point de l'espace permettent de décider de la position relative de ce point par rapport au champ de potentiels (voir Figure 4.4 qui montre par des différences de couleurs les différents volumes obtenus (leur projection dans le plan sécant), relativement aux valeurs choisies dans le champ de potentiels<sup>43</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup>Ancienne doctorante dans l'équipe VORTEX dont le sujet porté sur la modélisation de formes complexes à partir d'esquisses 2D.

 $<sup>^{43}</sup>$ Code des couleurs : f(p) == 0.0rouge, 0. < f(p) < 0.5orange, 0.5 < f(p) < 1.jaune, 1. < f(p) < 1.5vert, 1.5 < f(p) < 2.cyan, 2. < f(p) < 2.5bleu, 2.5 < f(p)magenta.



FIG. 4.4 – Champ de potentiels pour le profil du Dragendorff 27.

### b) Profil d'un fragment

Nous gardons la représentation de départ pour ces profils, à savoir un vecteur de points en deux dimensions représentant un contour fermé.

### 4.1.2 Positionnement relatif "tesson - objet modèle"

Pour calculer la distance entre un fragment et un objet modèle, la première tâche à effectuer est le positionnement du fragment relativement à l'objet modèle. Dans le Chapitre 1, nous avons vu que le calcul de l'axe de rotation permet de restreindre les choix de l'orientation d'un fragment. On sait l'orienter verticalement, mais si les caractéristiques ne sont pas déterminantes on ne pourra pas en déduire automatiquement la position du haut et du bas du fragment et plusieurs essais seront nécessaires.

Par contre, la détermination de l'orientation d'un fragment, même si elle peut se faire de façon non ambiguë, ne suffit pas à le positionner relativement à une forme modèle.

Nous avons choisi d'utiliser une technique basée sur les algorithmes génétiques pour déterminer le meilleur positionnement possible pour un fragment par rapport à une forme modèle. Même si les algorithmes génétiques ne permettent pas d'obtenir un optimum global, ils ont déjà prouvés leurs efficacité dans la résolution de problèmes d'optimisation. Ils permettent aussi une certaine flexibilité dans le traitement de données issues de numérisations d'objets archéologiques [Melero 03, Reynoso 01].

Dans notre cas, les algorithmes génétiques permettent de rechercher les positionnements de tessons qui minimisent le critère de distance entre le tesson et l'objet modèle. Le principe en est le suivant :

Algorithme 4.1 Appariement entre un tesson et des formes modèles.
Pour un profil de tesson
<b>Pour</b> chaque profil d'objet candidat de la base de données
Créer une population ( $n$ tessons positionnés par rapport à l'objet modèle)
<b>Tant que</b> (le score moyen évolue) <b>ou</b> (erreur $> \min$ )
Évaluation du score des $n$ positions
Évolution de la population de fragments (sélection, croisements, mutations)
Fin Tant que
Fin Pour
Fin Pour

La population de l'algorithme génétique est un ensemble de chromosomes, chacun d'eux représentant un point en deux dimensions (un gène par dimension : (x, y)). Cette population est initialisée avec des individus appartenant au squelette de la surface implicite et avec des points choisis aléatoirement sur le plan 2D du profil.

Une opération de croisement consiste à échanger les gènes de deux chromosomes, par exemple : (x1, y1) et (x2, y2) deviennent (x1, y2) et (x2, y1). Une opération de mutation se fait sur un seul gène, par exemple, (x, y) devient (nouveauX, y). Ces deux opérateurs sont appliqués selon une probabilité qui leur est propre.

Le score (*fitness*) est la distance entre le profil du fragment et le profil de l'objet modèle à une position fixée.

Cette technique permet de tester un grand nombre de configurations "tesson - objet modèle" afin de converger vers une solution représentant un bon positionnement.

### 4.1.3 Distance "tesson - objet modèle"

L'évaluation de la distance "tesson - objet modèle" s'effectue à l'aide de deux tests complémentaires pour obtenir une probabilité de mise en correspondance entre un fragment et une poterie complet de la base de données.

- 1. On teste un échantillonnage régulier de points du profil du fragment, relativement à la surface implicite de l'objet modèle, pour estimer la distribution des points : à l'intérieur, à l'extérieur ou bien sur la surface implicite.
- 2. On teste des points qui appartiennent à la surface délimitée par le profil du fragment. En fait, un échantillonnage stochastique des points de cette surface est effectué afin de calculer le nombre de points : à l'intérieur, à l'extérieur ou bien sur la surface implicite ici aussi.

Pour chacun des deux tests, le résultat sera donc une suite de trois pourcentages. La fusion des deux résultats nous permettant d'obtenir une estimation de la correspondance pour le couple testé.

Le premier test, qui compare la courbe du profil d'un fragment à un objet modèle, permet de déterminer les zones où deux profils diffèrent. Ce test permet donc de repérer deux profils représentant un même pot à une zone près, donc les pots dont le profil a évolué au cours du temps.



FIG. 4.5 - Résultat pour deux mauvais placements (fragment de pied et fragment de panse placés sur le bord supérieur) et un bon placement (fragment de bord supérieur placé sur le bord supérieur).

Le deuxième test, quant à lui, compare le recouvrement réel des surfaces entre elles. La surface implicite et la surface délimitée par le profil du fragment.

### 4.1.4 Résultats

Nous avons mis en oeuvre cette approche dans un programme JAVA ou l'utilisateur choisi la forme modèle et le tesson à apparier avant de lancer l'algorithme génétique qui essayera de trouver le meilleur positionnement entre ces deux objets.

N'ayant pas en notre possession de profils de fragments, nous en avons créer en partitionnant le profil d'une coupelle Dragendorff 27 en trois parties, voir Figure 4.5.

Nous avons effectué plusieurs tests pour chacun de nos tessons (une soixantaine), et ils ont tous obtenus les meilleurs positionnements avec l'objet modèle dont ils étaient issus.

Le Tableau 4.1, indique les résultats de positionnements entre ces trois tesson et leur pot d'origine avec une population de 100 individus. La probabilité de croisement étant fixée à 0.8 et la probabilité de mutation à 0.1. L'erreur, donnée en millimètres, représente la distance entre le positionnement trouvé et la solution idéale (placement manuel du fragment). Les dimensions du profile entier sont de 45mm de large et 40mm de de haut.

Tesson	Bon placement	Placement moyen	Mauvais placement
Supérieur	30%	60% (er < 2)	10% (er > 4.5)
Inférieur	60%	40% (er < 0.5)	
Central	60%	40% (er < 0.5)	

TAB. 4.1 – Quelques résultats de placements.

Nous remarquons que pour les tessons Supérieur et Central les 40% de résultats moyens sont à peine à 0.5 millimètres de la meilleure solution. L'erreur vaut alors 1% de la taille

de l'objet, du coup, nous pouvons considérer que tout les positionnements sont corrects pour ces deux fragments.

Pour le fragment *Supérieur*, 90% des résultats sont des placements avec moins de 6% d'erreur par rapport à la taille de la coupelle. Cependant, ce profil ayant une forme allongée et fine comparée aux deux autres objets (le *Central* est épais, le *Inférieur* a une forme complexe), il obtient des scores élevées même quand il est placé à de mauvaises positions.

Nous obtenons, généralement, les meilleurs résultats entre la 9ème et la 20ème itérations de notre algorithme génétique, ce qui équivaut à des temps de calculs entre 1 à 2 minutes pour un couple "tesson - objet modèle".

### 4.2 Indexation par description morphologique

Pour réussir à accélérer le parcours de la base de données, dans le cadre d'un processus complet de comparaisons de poteries (et de tesson) utilisant l'approche présentée à la section précédente, nous proposons de changer l'ancienne structuration de notre base de données basée sur l'usage des poteries par une nouvelle structuration basée sur les descriptions morphologiques et les caractéristiques géométriques des poteries. La mise en correspondance d'un tesson est d'une forme modèle s'effectue alors en deux étapes. La première étape se basant sur les primitives principales afin de sélectionner un sousensemble d'objets candidats à l'appariement. La deuxième étape est simplement effectuée par l'approche de la Section 4.1 de ce chapitre.

### 4.2.1 Segmentation

La courbure est une caractéristique importante d'une courbe. Elle est très utile pour l'analyse et la classification des formes. Dans l'espace 3D, la courbure est positive par définition, toutefois, nous pouvons obtenir une courbure signée  $\kappa(u)$  pour une courbe plane en utilisant :

$$\kappa(u) = \frac{\ddot{x}(u)\,\dot{y}(u) - \ddot{y}(u)\,\dot{x}(u)}{\left[\left(\dot{x}(u)\right)^2 + \left(\dot{y}(u)\right)^2\right]^{3/2}}$$

où  $\dot{y}(u)$  représente la dérivée par rapport au paramètre u et  $\ddot{y}(u)$  la dérivée seconde.

La Figure 4.6 représente une sur-segmentation due au bruit de nos profils. Nous avons alors effectué un lissage de nos profils en utilisant l'approche de [Farin 96]. Ensuite, nous segmentons nos profils en détectant les points d'inflexions et les extrema de courbure, voir Figure 4.7.

### 4.2.2 Étiquetage des primitives principales

Une fois que le profil est segmenté d'après sa courbure signée, ces parties de profils sont agrégé ensemble afin d'obtenir les trois primitives principales (base, bord et panse) de la poterie. Chaque primitive principale est ensuite étiqueté en respectant les conventions de descriptions présentés Annexe 1.



FIG. 4.6 – La sur-segmentation du profil du Dragendorff 35.



FIG. 4.7 – Le profil du Dragendorff 22 après segmentation.



FIG. 4.8 – Le profil du Dragendorff 22 segmenté et étiqueté.

Pour l'instant cette partie n'est pas entièrement automatique et l'utilisateur peut intervenir afin de finaliser le découpage du profil en ses primitives principales mais surtout pour fournir les étiquettes du profil, voir Figure 4.8 pour un exemple de segmentation pertinente pour un archéologue.

### 4.2.3 Mise en correspondance

Lors d'un d'interrogation de notre base de données avec un tesson (ou une poterie complète), nous ne sommes plus obligé de parcourir toute la base de données et d'effectuer des essais d'appariements avec tous les objets. Les profils des objets requêtes sont tout d'abord segmentés en primitives principales puis étiquetés. Le mise en correspondance s'effectue alors en deux étapes :

- 1. On parcourt la base de données est effectué afin de sélectionner les objets qui ont les mêmes primitives principales.
- 2. On recherche le meilleur appariement géométrique entre notre objet requête et les objets sélectionnés à l'étape 1 avec l'approche de la Section 4.1 de ce chapitre.

### 4.2.4 Résultats

Nous avons mis en oeuvre cette approche dans un programme JAVA/JAVA3D. Nous avons segmenté les profils de nos poteries puis nous les avons étiquetés. Les étiquettes des segmentations sont stockées dans une base de données MySql afin de permettre l'interrogation basée sur les labels avant d'effectuer les appariements géométriques.

Le peu d'objets, complets ou non, de notre base de données ne permet pas de se rendre compte du gain de temps possible quand on doit classifier un grand nombre de fragments de poteries.



FIG. 4.9 – Segementation du maillage du Dragendorff 27.

Le profil segmenté et étiqueté peut servir à segmenter le maillage tridimensionnel d'une poterie. En effet, à partir des limites des primitives principales nous pouvons tracer des plans passant par ces points et faire ainsi apparaître ces partie directement sur le maillage, voir Figure 4.9.

### 4.3 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre un processus de mise en correspondance de tessons de poteries sigillés avec des objets modèles basées sur l'utilisation des profils. Ce processus se déroule en deux étapes.

Une première étape, morphologique, consistant à segmenter le profil en étudiant sa courbure signée, puis à retraiter cette segmentation afin d'en extraire les primitives principale de la poterie (la base, la panse et le bord). Ensuite, ces primitives sont étiquetées en respectant les conventions de description de la sigillée. Ces étiquettes vont alors servir à extraire les poteries potentiellement candidates à un appariement avec les tessons-requêtes.

Une deuxième étape, géométrique, permet de donner les probabilités de positionnements d'un tesson par rapport à une forme modèle grâce à une approche originale se basant sur l'utilisation des surfaces implicites, pour disposer d'une mesure de distances, et des algorithmes génétiques, pour trouver le meilleur positionnement possible.

Vu la taille de la base de données et le manque de vrai tessons issus des fouilles, les résultats bien que bons nous permettent uniquement de prouver une faisabilité de l'approche. Il est dommage, en effet, que les données des quelques projets qui faisaient de la classification de fragments dans le Chapitre 1 ne soient pas accessibles pour effectuer des comparaisons.

Enfin, il ne faut pas oublier que pour que ce genre de méthode fonctionne, il est impératif de correctement orienter le tesson et de disposer de son profil le plus représentatif.

5

## Solution 3D

Nous avons montré, au chapitre précédent et dans le chapitre 1, qu'il était possible de classifier des fragments de poteries avec une approche en deux dimensions, basée sur l'utilisation des profils. Nous proposons, dans ce chapitre, une méthode réalisant des comparaisons de formes partielles, entre des tessons de céramique et des poteries complètes, en utilisant directement les maillages 3D issus de la numérisation de nos objets avec le scanner Minolta. Ainsi, on s'affranchit des étapes d'orientation des fragments et d'extraction de leurs profils. Cela va aussi nous permettre de traiter les tessons de petite taille (dans le sens de la hauteur, qui correspondraient à des profils très courts), ainsi que des tessons qui ne contiennent pas nécessairement un bord supérieur ou une base qui permettrait de les orienter.

### 5.1 Introduction

D'après notre étude des différentes méthodes de comparaison de formes 3D, à la Section 2.2 du Chapitre 2, il ressort que :

- La plupart des méthodes qui cherchent à réaliser des comparaisons de formes partielles d'objets 3D définissent cette notion de comparaison partielle d'une façon qui ne correspond pas exactement à la définition que nous en donnons. En effet, les précédentes méthodes comparent entre eux des objets complets pour y retrouver des parties communes, tandis que nous voudrions comparer des objets complets avec des objets incomplets (comme les tessons issus de fouilles).
- Certaines méthodes, telles que celles basées sur les caractéristiques locales et les graphes, devraient pouvoir effectuer des comparaisons partielles, mais aucun résultat ne le démontre.
- La signature d'une méthode de mises en correspondances partielles de formes doit obligatoirement être invariable par rototranslation, vu que ce genre de signature est incompatible avec une normalisation de la pose des objets.
- Aucune des méthodes étudiées n'est spécifique aux objets de révolution, et aucune ne tire parti du fait que ces objets particuliers pourraient être traités avec des outils spécifiques.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de baser notre approche sur une méthode, utilisant des caractéristiques locales, qui permet d'effectuer des comparaisons de formes partielles et complètes en deux dimensions, en la généralisant à la 3D et aux objets de révolution.

Nous avons ainsi pu générer des signatures invariantes par rototranslation pour chacun de nos objets. Cette invariance en plus de nous éviter de normaliser la pose de nos objets est cohérente avec les mouvements que les archéologues exécutent lorsqu'ils effectuent les appariements de façon manuelle. Ces signatures seront à même de nous permettre de réaliser les comparaisons partielles que nous souhaitons effectuer.

Nous avons pour cela utilisé une signature issue de l'association de deux approches : la théorie améliorée des *Repères Mobiles*<sup>44</sup> [Cartan 35] et celle des *Joint Invariants*<sup>45</sup> [Olver 05]. Cette association permet de générer un groupe d'invariant qui définissent une signature invariable, pour un groupe de transformations donné, et peu sensible au bruit. La signature que nous utiliserons a été mathématiquement prouvée pour des surfaces continues [Olver 01]. Nous devons l'adapter aux maillages que nous utilisons et tirer profit du fait de travailler sur des objets de révolution.

Les signatures issues de l'association des théories des *Repères Mobiles* et des *Joint Invariants* ont obtenu de très bons résultats en 2D [Calabi 98, Faugeras 94]. Mais le passage à la troisième dimension augmente énormément les temps de calcul nécessaires pour appliquer une telle approche. Cela est dû au fait que les signatures générées, avec cette approche, sont de de grande taille. Ainsi, la phase de comparaison des signatures, dont le temps de calcul croît exponentiellement avec l'augmentation de la taille des signatures, peut devenir assez prohibitive. Ce problème de taille de signature est amplifié ici par le fait d'utiliser des maillages contenant un très grand nombre de points. Nous verrons, dans la suite de ce chapitre, comment parvenir à des signatures plus compactes et obtenir ainsi des temps de calculs plus acceptables.

Dans la suite du chapitre, nous allons introduire la façon dont nous associons la théorie des *Repères Mobiles* et l'utilisation des *Joint Invariants* pour obtenir une signature invariante par rototranslation et comment nous obtenons une telle signature à partir des maillages dont nous disposons.

Puis, nous présenterons les différentes améliorations que nous proposons, afin d'optimiser les processus de génération des signatures et leur comparaison en tirant parti des formes de révolutions.

Enfin, nous présenterons brièvement l'interface utilisateur d'une application internet que nous avons développée et déployée, pour rendre la base de données que nous avons créée accessible à tous les archéologues ou les chercheurs intéressés, d'une façon identique à ce que proposent les moteurs de recherche présentés à la Section 2.1 du Chapitre 2.

### 5.2 Repères Mobiles et Joint Invariants

La théorie classique des Repères Mobiles [Cartan 35] a été récemment étendue [Olver 01], afin de fournir une méthode permettant l'obtention d'un ensemble minimal d'invariants,

 $<sup>^{44}</sup>Moving \ Frames$ 

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup>Des invariants qui dépendent de plus d'un point à la fois, voir section 5.2.

caractérisant une courbe ou une surface par rapport à un groupe de transformations donné. Ces invariants sont fonctionnellement indépendants et génèrent tous les autres invariants pour ce groupe de transformations. Nous assumons par la suite que notre groupe de transformations est celui des rotations et des translations dans l'espace  $R^3$ . En effet, c'est ce type de mouvements que l'on utilise lorsqu'on essaye d'appréhender la forme d'un objet (quand on le tourne dans ses mains).

Les courbures gaussiennes et moyennes sont les invariants classiquement utilisés pour décrire une surface dans l'espace tridimensionnel. En effet, ces courbures et leurs dérivées par rapport au repère de Frénet permettent de paramétrer une signature qui détermine entièrement une surface par rototranslation. Ce qui signifie que deux surfaces sont équivalentes par rototranslation si et seulement si leurs deux signatures sont égales. Cependant, cette signature n'est pas utilisée dans la pratique parce que les dérivées du troisième ordre (les dérivées des courbures) amplifient trop le bruit pour rester fiables. D'où l'idée d'exploiter les qualités des *Joint Invariants*. Ce sont des invariants qui dépendent de plus d'un point à la fois et permettent de construire des signatures d'ordre moins élevé (qui dépendent de dérivées d'ordre moins élevé) et par la même occasion, des signatures moins sensibles au bruit.

La théorie des Repères Mobiles nous permet de déterminer l'ensemble des *Joint Inva*riants d'ordre zéro. Puis, les *Joint Differential Invariants* (ordre  $\geq = 1$ ) sont obtenus par dérivation des *Joint Invariants*, en utilisant des opérateurs de dérivation qui dépendent uniquement du groupe de transformations considéré. En faisant varier le nombre de points dont dépendent les invariants, on peut alors contrôler l'ordre des invariants : le nombre de points dont dépendent les invariants croît inversement proportionnellement à l'ordre de la signature.

En particulier,

- Avec 1 point, les invariants sont : les courbures gaussiennes et moyennes, et leurs dérivées. Ce qui fait une signature d'ordre 2 et 3.
- Avec un minimum de 3 points, les invariants sont : les distances inter-points (3) et leurs dérivées (4 au lieu de 6 parce que deux des dérivées sont linéairement dépendantes des quatre autres) par rapport à deux opérateurs de dérivation. Ce qui fait une signature d'ordre 0 et 1.
- Avec un minimum de 7 points, les invariants sont : les distances inter-points (au minimum 21). Ce qui fait une signature d'ordre 0 uniquement.

La première signature est, comme dit plus haut, trop sensible au bruit du fait qu'elle utilise les dérviées des courbures. Quant à la troisième signature, elle consomme trois fois plus d'espace mémoire que la deuxième signature, et de plus, la taille des signatures rend la phase de comparaison de signatures beaucoup plus lente. Pour ces raisons, nous avons choisi la deuxième option : un point 7D de signature pour chaque groupe de trois points de la surface de l'objet.

### 5.2.1 Signature

La théorie présentée dans [Olver 01] a été développée pour des surfaces continues. En l'adaptant au cas discret, la signature invariante par rototranslations d'un objet 3D, est obtenue comme suit :



FIG. 5.1 – Le triplet et les normales associées.

Soient  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  trois points de la surface d'un objet 3D et  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  leurs normales associées, voir Figure 5.1. Les invariants d'ordre zéro sont les trois distances inter-points :  $I_k(p_1, p_2, p_3)$  où k = 1, 2, 3:

$$I_1 = ||p_2 - p_1||, I_2 = ||p_3 - p_2|| et I_3 = ||p_3 - p_1||$$

Les invariants d'ordre un sont :

$$J_k\left(p_1, p_2, p_3\right) = \frac{\left(n_t \wedge r\right) \cdot n_k}{n_t \cdot n_k} \quad et \quad \tilde{J}_k\left(p_1, p_2, p_3\right) = \frac{r \cdot n_k}{n_t \cdot n_k}$$

où

$$r = \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|}$$
 et  $k = 1, 2, 3$ 

 $n_t$  représente la normale du plan passant par ces 3 points (voir Figure 5.1).

$$n_t = \frac{(p_2 - p_1) \land (p_3 - p_1)}{\|(p_2 - p_1) \land (p_3 - p_1)\|}$$

On prouve algébriquement que  $J_3$  et  $\tilde{J}_3$  sont fonctionnellement dépendants de  $J_1$ ,  $J_2$  et  $\tilde{J}_1$ ,  $\tilde{J}_2$  respectivement, nous écartons de ce fait les fonctions  $J_3$  et  $\tilde{J}_3$  de la signature.

Nous pouvons donc associé à chaque triplet de points de la surface  $(p_1, p_2, p_3)$  un point de la signature donné par le 7-uplet  $(I_1, I_2, I_3, J_1, J_2, \tilde{J}_1, \tilde{J}_2)$  (un point dans un espace à 7 dimensions). Une fois les signatures générées, pour vérifier que deux objets ont une partie semblable par rototranslation, il suffit de rechercher des intersections dans leurs signatures, i.e. des points communs dans les signatures. Si leurs signatures s'intersectent dans l'espace à 7 dimensions, cela implique que les deux objets ont une partie commune. Inversement, si les signatures ne s'intersectent pas, les objets n'ont aucune partie en commun.

### 5.2.2 Comparaison de signatures

Une fois les signatures des objets générées, vérifier que deux objets ont une partie commune se fait en cherchant les intersections de leurs signatures. Si les signatures s'intersectent dans l'espace 7D cela implique que les 2 objets ont une partie semblable. Le nombre d'intersections par rapport à la taille des signatures donne une information sur la taille de la partie semblable. A contrario, si les signatures ne s'intersectent pas dans l'espace 7D les deux objets ne peuvent avoir de parties semblables.



FIG. 5.2 – Exemple de maxima de courbures sur un Ritterling 5.

Le calcul d'intersection est effectué en calculant la distance euclidienne de tous les points des signatures, pris deux à deux.

Un intérêt de cette signature est qu'elle permet de comparer tous les objets entre eux, que ce soient des fragments ou des objets complets. Ceci est dû au fait que la comparaison de deux signatures donne une information sur la quantité de parties semblables. Toutefois, la comparaison ne donne pas d'informations sur l'emplacement des parties semblables.

### 5.3 Processus de mises en correspondances partielles

L'approche évidente pour obtenir la signature de chaque objet serait de générer un point de signature (un 7-uplet) pour chaque triplet de points du maillage. Cependant, ceci est inconcevable pour des maillages tels que les nôtres (environ 350 000 sommets).

Notre approche consiste à restreindre les calculs à un sous-ensemble de points caractéristiques, ce qui nous ramène à une signature qui sera sous-échantillonnée. Par la suite, on compare deux signatures en évaluant les distances euclidiennes entre leurs points (entre deux 7-uplets).

L'algorithme de mise en correspondance partielle se divise donc en trois étapes : détection des points caractéristiques, génération des signatures, et enfin, comparaison des signatures. La phase de comparaison des signatures est de loin la plus consommatrice en termes de temps de calculs.

### 5.3.1 Extraction des points caractéristiques

Les points caractéristiques peuvent être constitué par tout ensemble de points qui sont *caractérisables* sur la surface des objets 3D. Ils peuvent ainsi correspondre à des propriétés géométriques de la surface (maxima de courbures, ombilics, les lignes de crêtes [Thirion 96]). Les conditions qu'ils doivent vérifier sont la robustesse au bruit et l'invariance par rototranslation. Nous choisissons comme points caractéristiques les maxima locaux de courbures gaussiennes et moyennes de la surface. Les courbures sont calculées

### Chapitre 5. Solution 3D



FIG. 5.3 – Le profil élargi.

comme expliqué dans [Meyer 02]. Une fois que l'on a obtenu les courbures, les premiers maxima locaux sont choisis comme points caractéristiques, voir Figure 5.2. Nous avons effectué des tests avec 50, 100 et 200 maxima, nous sommes donc ainsi passés de 350 000 possibles points caractéristiques à un maximum de 200 points nécessaires lors de la détermination des points caractéristiques.

#### a) Profil élargi :

Les poteries sont considérées comme étant des formes de révolution, formes qui sont entièrement définies par la donnée d'un axe de révolution et d'un profil. Ce qui signifie que tous les points caractéristiques sont normalement sur le profil, et qu'on n'a nul besoin de rechercher les maxima de courbures sur l'objet entier. Dans la pratique, on se rend compte que les méthodes essayant de trouver un profil représentatif d'une poterie ne permettent pas encore de s'assurer de l'unicité de ce dernier. C'est pourquoi nous avons décidé d'effectuer nos recherches de maximum de courbure sur un profil élargi de la poterie comme dans la Figure 5.3. Nous avons testé différentes largeurs : moitié, tiers, quart et un cinquième de diamètre. D'après nos tests la largeur d'un cinquième du diamètre de la poterie apparaît comme suffisante pour s'assurer que les points caractéristiques essentiels d'un objet ont été sélectionnés. Cela nous permet d'améliorer la qualité de nos points caractéristiques sans surcoûts de calculs.

### 5.3.2 Génération de la signature

Les signatures des objets sont calculées selon la définition de la section 5.2.1. Pour chaque triplet de points caractéristiques, un point de la signature est généré et stocké. Afin d'accélérer la génération des signatures et d'améliorer leur qualité, on impose une limite sur la distance maximale entre les points d'un même triplet. En effet, il est peu probable que deux points très éloignés l'un de l'autre appartiennent à une zone de chevauchement entre un fragment et une poterie. Nous avons fixé cette limite à un tiers de la taille totale d'une poterie ce qui nous permet de réduire grandement le nombre de points de la signature tout en permettant d'obtenir les même résultats de mises en correspondance, voir Tableau 5.1. Bien sûr une telle limite gagnerait à être fixée par rapport à la taille moyenne des fragments, mais vu le nombre dont nous disposons actuellement nous n'avons pu effectuer les calculs nécessaires pour déterminer et valider une telle moyenne.

Nom Poterie	Nb pt caractéristiques	Nb après réduction	%de gain
Faux Drag. 27	0	0	0
Drag. 27b	0	0	0
Ritt. 5	0	0	0

TAB. 5.1 – Évolution de la taille des signatures.

### 5.3.3 Comparaison de signatures

Une fois que les signatures sont générées, pour comparer deux objets nous vérifions si leurs signatures se croisent. Puisque nous n'avons pas affaire à des signatures continues mais à des échantillons de celles-ci, nous ne pouvons déterminer une intersection proprement dite. Nous allons donc chercher des points des deux signatures qui sont suffisamment proches (distance euclidienne) pour pouvoir raisonnablement estimer qu'ils sont issus du même triplet de points. Dans la pratique, nous avons fixé un seuil arbitrairement, puis nous recherchons tous les couples de points des deux signatures dont la distance est en dessous de ce seuil.

Les résultats de la comparaison d'un fragment avec tous les objets de la base de données correspondent à un classement de tous ses scores de correspondances (nombre d'intersections divisé par le nombre de points de la signature).

### 5.4 Interface utilisateur de l'application internet

Les signatures ont été générées pour toutes les poteries de notre base de données, en suivant les étapes décrites dans la section précédente.

Vu que nous ne possédions pas de tessons numérisés, nous nous sommes muni d'un vase Dragendorff 27 moderne (produit commercial acheté dans la boutique du musée). Nous avons numérisé la poterie avant de la brisée et de numériser trois de ses fragments, voir Figure 5.4. Les trois tessons ont bien été reconnus comme appartenant aux Faux Drag. 27 (c'est l'objet avec lequel ils obtenaient les meilleurs scores d'appariements). Cependant le manque de fragments ne nous permet pas d'effectuer des tests exhaustifs.

Notre base de données continuant à être enrichie en poteries complètes, nous avons comparé tout nos objets entre eux et enregistré les résultats. Les temps ne permettent pas d'effectuer des recherches en temps réel sur l'ensemble de la base de données, voir Tableau 5.2. C'est pour cela qu'un site internet a été mis en place à l'adresse : http ://se-manticarchaeo.online.fr/. Les score de correspondance des poteries de la base de données y sont stockés afin de permettre la visualisation et la manipulation des potteries les plus proches d'une autre poterie ou d'un fragment donné, voir Figure 5.5.

Chapitre 5. Solution 3D



FIG. 5.4 – Les trois tessons.

Nom Poterie	Tesson B	Tesson H	Tesson P	FD 27	D 27b	R 5
Tesson Bas	0	0	0	0	0	0
Tesson Haut	0	0	0	0	0	0
Tesson Panse	0	0	0	0	0	0
Faux Drag. 27	0	0	0	0	0	0
Drag. 27b	0	0	0	0	0	0
Ritt. 5	0	0	0	0	0	0

TAB. 5.2 – Évolution des temps de calculs.

### 5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, un algorithme de mise en correspondance partielle basé sur les caractéristiques locales et fonctionnant sur des maillages tridimensionnels (ayant un grand nombre de points) de poteries considérées comme étant des formes de révolution. Notre approche se déroule en trois étapes : la première est l'extraction des points caractéristiques à partir des profils élargis des poteries dont nous disposons. La seconde est la génération de signatures invariantes par rototranslation à partir de ces points caractéristiques. La troisième est la comparaison des signatures des objets (notamment entre des poteries complètes et des fragments de poteries).

La nouveauté de notre approche repose sur l'utilisation d'une signature basée sur un ensemble d'invariants, obtenus grâce à la théorie des Repères Mobiles, moins sensibles au bruit que les invariants communément utilisés. Elle repose également sur les différentes améliorations dans l'extraction des points caractéristiques et la génération des signatures avec pour but de diminuer les coûts mémoires et les temps de calculs généralement prohibitifs lors de l'utilisation d'une telle signature.

Cet algorithme, ne permet pas actuellement de traiter les soupes de polygones, en raison de la difficulté d'estimer les courbures sur de telles données. Si cette difficulté pouvait être outrepassée, notre approche pourrait s'appliquer à de plus grand nombres de résultats de numérisations que l'on trouve en particulier sur internet.

Nous n'avons pu comparer notre algorithme à d'autres méthodes de comparaison de formes et cela est principalement dû aux raisons énoncés en début de chapitre ainsi qu'au



FIG. 5.5 – Un aperçu du site internet.

manque d'une base de données modèle contenant uniquement des poteries et des fragments (sur le modèle de ce qu'est devenu le Princeton Shape Benchmark)

Nous devons également continuer le développement de notre base de données, et en particulier, augmenter et diversifier le nombre de fragments. Les trois premiers dont nous avons pu disposer appartiennent à un même objet, ce qui limite grandement les tests que nous pouvons effectuer.

## Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire, nous avons essayé d'apporter une solution informatique à un problème archéologique qui est la classification des tessons de poteries issus des sites de fouilles. Pour se faire nous avons pris la poterie sigillée, fabriquée en Gaule méridionale (sud-ouest de la France) durant les deux premiers siècles de notre ère, comme matériaux d'étude.

Nous avons proposé une première solution basée sur une comparaison géométrique des profils avec une méthode originale combinant les surfaces implicites et les algorithmes génétiques afin de trouver le meilleur appariement entre un fragment et une forme modèle.

Les résultats obtenus avec nos fragments de test et les profils de nos objets modèles sont satisfaisants. Nous obtenons les meilleurs scores quand on compare les fragments à leur objet d'origine et ce score est amélioré jusqu'à trouver le bon positionnement du fragment par rapport à l'objet modèle. Certains profils ne donnent pas entière satisfaction, il s'agit de profils de formes effilées qui obtiennent de très bons scores, même mal positionnés, car ils se glissent à l'intérieur des profils des objets modèles.

Ensuite, afin de tirer partie des descriptions morphologiques des sigillées et de leurs nomenclatures. Nous avons proposé de réorganiser notre base de données avec un impact sur les actions à effectuer avant une comparaison géométrique des profils. En nous inspirant des descriptions morphologiques fournies par les archéologues nous avons présenté un algorithme semi-automatique de segmentations des profils de poteries se basant sur les changement de courbures. Grâce à ces segmentations nous améliorons le parcours de la base de données en réalisant des appariements basés sur les primitives principales des poteries (à savoir la base, la panse et le bord) avant de chercher des appariements purement géométriques.

Ces approches basées sur l'utilisation des profils sont assez rapides et donnent de bons résultats pour peu que l'on aient des profils de fragments qui soient corrects. Justement, il n'y a pas pour l'instant de méthodes qui nous assurent l'obtention du profil le plus représentatif d'un tesson, comme on peut le voir Chapitre 1. Il y a même des tessons pour lesquels aucune méthode ne fonctionne correctement (ceux qui ont une petite taille en hauteur ou qui sont trop plats).

C'est pour cela que nous avons proposé une méthode de comparaison de formes tridimensionnelles utilisant des caractéristiques locales maillages issus des numérisations avec le scanner 3D. Cette méthode s'apparente à de la comparaison partielle de formes vu que l'on compare un objet complet avec une partie d'un objet. Notre méthode génère une signature, invariable par rototranslation, pour chacun de nos objets. Signature qui est construite à partir d'invariants obtenus par l'association de la théorie des Repères Mobiles et de la théorie des *Joint Invariants*. Finalement, réaliser des mises en correspondances entre des tessons et des poteries complètes reviens à mesurer la distance euclidienne entre leurs deux signatures.

Grâce à différentes améliorations nous avons réussi à réduire la taille des signatures et par la même occasion le temps de comparaison entre deux signatures. Les premiers résultats confirment la faisabilité théorique. Mais les temps de calculs restent trop important pour la phase de comparaison des signatures par rapport aux méthodes de comparaisons de formes complètes.

Nous avons, au travers de ces différentes approches, présentés des solutions pour aider les archéologues dans une des tâches les plus répétitives et les plus consommatrices de temps sur un chantier de fouilles. Cependant, ce travail peut encore être amélioré et nous proposons certaines pistes allant dans ce sens :

- Tester d'autres métriques de distance et les comparer avec notre solution empirique à base de surfaces implicites.
- Tester des méthodes de placements de profils autres que les algorithmes génétiques (méta-heuristiques ou CSP).
- Tester notre approche avec toutes les résolutions différentes permises par le scanner et ses logiciels associés pour réussir à enchaîner sur une approche multi-résolutions au niveau de la base de données et estimer quelle sont les résolutions qui sont trop imprécises voire trop précises.
- Améliorer notre processus d'étiquetage des primitives principales pour l'automatiser entièrement.
- Accélérer notre algorithme de comparaison de signature 3D.
- Utiliser les données issues de fouilles qui sont répertoriées en même temps que les objets (type de terre, lieu et date, etc.).
- Reconstruire des pots ou toute autre opération que l'on pourrait automatiser et qui éviterait aux archéologues de passer beaucoup de temps à effectuer des opérations de routine.

D'autres améliorations moins spécifiques à notre approches peuvent aussi être étudiées :

- L'amélioration du processus de numérisation le temps nécessaire à l'obtention d'un objet complet est de l'ordre de 30 minutes sur une machine puissante. On voit des solutions se développer pour numériser une soixantaine d'objets par heures sous certaines conditions [?].
- Réaliser un *Benchmarks* de comparaison Un *Benchmark*, dans notre contexte, est un système composé d'une base de données d'objets 3D avec les structures et les algorithmes nécessaires pour effectuer des tests et réaliser des comparaisons sur l'efficacité, la rapidité et la robustesse des méthodes de comparaison de formes. Il en existe pour les maillages triangulaires, mais aucun n'est actuellement disponible pour les objets de révolution, les volumes ou les fichiers de CAO.

Enfin, nous avons trouvé que l'interdisciplinarité : informatique (image) et archéologie peut donner lieu à un domaine de recherche très vaste et enrichissant en connaissances pour les deux groupes participants. Par contre, les contraintes fortes du projet telles que la gestion des numérisations par des personnes dont ce n'est pas le seul métier, la difficulté d'accès aux matériaux archéologiques ont pesés sur nos phases de développements et de tests.

# Annexe 1

### 2.1. NOMENCLATURE DES FORMES

Les définitions ont été empruntées à Hélène BALFET, sauf pour l'écuelle et le plat creux où l'expression « fortement évasée» d'Hélène Balfet a été remplacée par « peu évasé » pour marquer la différence entre assiette et écuelle et entre plat et plat creux. Dessins Marie-Laure MARAVAL

FORME OUVERTE : On désigne ainsi un récipient qui ne présente pas de constriction de diamètre et dont le diamètre maximal coïncide avec l'ouverture (sans tenir compte d'un éventuel renflement de la lèvre).

FORME FERMÉE : On désigne ainsi un récipient présentant au-dessus du diamètre maximal du corps un diamètre inférieur à celui-ci, coïncidant ou non avec l'ouverture. (Il reste dans cette catégorie si, au-dessus de ce diamètre minimal, existe une encolure largement évasée).

ASSIETTE : Récipient ouvert à parois fortement évasées, dont le diamètre à l'ouverture (inférieur ou égal à 23/24 cm environ) est égal ou supérieur à cinq fois la hauteur. PLAT : Récipient ouvert à parois fortement évasées de même proportion que l'assiette, dont le diamètre à

PLAT : Recipient ouvert a parois fortement evasees de meme proportion que i assiette, dont l'ouverture est plus grand que 24 cm.

**COUPELLE** : Récipient ouvert de même proportion que l'écuelle, dont le diamètre à l'ouverture est inférieur ou égal à 11 cm.

ÉCUELLE : Récipient ouvert à parois peu évasées dont le diamètre à l'ouverture (compris entre 12 et 22/23 cm) est compris entre deux fois et demie et cinq fois la hauteur.

**PLAT CREUX** : Récipient ouvert à parois peu évasées de même proportion que l'écuelle, dont le diamètre à l'ouverture est plus grand que 23 cm.

**BOL** : Récipient ouvert à parois faiblement évasées, dont le diamètre à l'ouverture (inférieur ou égal à 18 cm) est compris entre une fois et demie et deux fois et demie la hauteur.

**JATTE** : Récipient ouvert à parois faiblement évasées de même proportion que le bol, dont le diamètre à l'ouverture est compris entre 19 et 40 cm.

COUPE : Écuelle, bol ou jatte muni d'un pied.

**GOBELET** : Récipient ouvert à parois verticales ou faiblement évasées, dont le diamètre à l'ouverture (compris entre 6 et 12 cm environ) est égal ou inférieur à une fois et demie la hauteur.

**POT** : Récipient fermé, muni ou non d'un col, et dont le diamètre minimal est supérieur ou égal à un tiers du diamètre maximal. ( « Marmite » si sa fonction est de cuire les aliments).

**JARRE** : La jarre se distingue du pot par une plus grande taille moyenne et une plus grande profondeur comprise entre deux fois et trois fois le diamètre à l'ouverture.

**BOUTEILLE** : Récipient fermé, généralement muni d'un goulot, dont le diamètre minimal est inférieur ou égal au tiers du diamètre maximal.

FLACON : Récipient fermé de même proportion que la bouteille et dont la hauteur est inférieure ou égale à 12 cm.

PICHET : Pot de dimension petite à moyenne, muni d'une anse, avec ou sans bec verseur.

COUVERCLE : Pièce destinée à couvrir l'ouverture d'un récipient pour le fermer.

MORTIER : Bol ou jatte dans laquelle on écrase à l'aide d'un pilon.

PASSOIRE : Pot percé de trous à sa partie inférieure pour laisser passer les liquides.

**PLAQUE** : Récipient ouvert à fond plat, dont le bord est égal ou inférieur au dixième du diamètre à l'ouverture ou éventuellement inexistant.

**POÊLE** : Assiette ou plaque munies d'une queue. **URNE** : Terme réservé à un usage funéraire.

VASE : Terme générique.

Manuel pour le chantier-école de Coupéré - 2003











23

### Fiche de structuration de la rubrique «Description / Observations» pour la céramique

## Caractères morphologiques 1°) Taille approximative des fragments Grand : > à 25 $cm^2$ Moyen : > < 5 et 25 $cm^2$ Petit : $< 5 \text{ cm}^2$ 2°) Partie du vase aménagement pour verser > bord aoulot co système de préhension épaulement -- carène ----panse base 3°) Inclinaison (facultatif) 1/41/4 5°) Vacuoles droit gauche 9 С

4°) Description morphologique Cf. : « Convention de description »

### Caractères techniques

### 1°) Aspect de la pâte

Fine Moyenne Grossière Feuilletée Mousseuse

### 2°) Qualité de la pâte

### a) Dureté de la pâte

Dure Tendre Pulvérulente

### b) Qualité de la cuisson

Mal cuite Surcuite

### 3°) Couleur de la pâte

### **Description approximative**

- Rouge, rouge brun, brun, beige, beige rosé, orangé, grise, gris clair ...
- Pour les pâtes mixtes, différencier le cœur et les parois (paroi interne et/ou paroi externe).

### 4°) Dégraissant

a) Couleur Blanc Brillant Brun Gris Jaune Noir Rouge

a) Taille

Moyennes

Grosses

Petites

Gros Moyen Petit Invisible

b) Taille

### c) Densité

Importante Moyenne Faible

### b) <u>Densité</u>

Importante Moyenne Faible

### 2.2. MÉTHODE DE DESCRIPTION DE LA CÉRAMIQUE

Les informations ci-dessous servent à expliciter la fiche de la structuration des rubiques et les tableaux de convention de description.

### 2.2.2. RUBRIQUE « DESCRIPTION / OBSERVATIONS »

#### 2.2.2.1. Caractères morphologiques

#### 1°) Taille approximative des fragments

#### 2°) Partie du vase (voir fiche)

#### 3°) Inclinaison

Cette observation peut parfois aider à l'identification ou à la comparaison entre deux fragments similaires (elle n'est possible que si le tesson a pu être orienté). On positionne le fragment, d'une part, orienté de façon à utiliser sa section (présentée comme pour le dessin côté gauche, celui de la coupe), d'autre part, en faisant passer « son axe d'inclinaison » abstrait par le centre c du demi-cercle. L'inclinaison s'inscrit donc dans un des 8 secteurs :

*Dans le 1/4 gauche se déterminent :* Bord divergent Panse divergente depuis la base Profil divergent de pied ... *Dans le 1/4 droit :* Bord concave Couvercle Profil convergent de pied Epaulement

### 4°) Description morphologique

Les bords : La lèvre est l'extrémité du bord.

Les bases : La base est le terme générique qui recouvre les différents types de fonds.

- Face externe du pied : partie généralement proche de la verticale, tournée vers l'extérieur du vase.
- *Face inférieure du pied* : partie proche de l'horizontale ou absolument horizontale (coïncidant dans ce cas avec le plan de pose) tourné vers le bas.
- Face interne du pied : partie généralement proche de la verticale, tournée vers le fond interne du vase.
- Fond externe : partie de l'extérieur du vase délimitée par le périmètre externe du pied.
- Fond interne : partie de l'intérieur du vase délimitée par le périmètre interne du pied.
- Plan de pose : partie du pied (ou du bas du vase) par laquelle le vase touche la surface sur laquelle il est posé.
- Profil convergent : le profil de la face externe ou interne du pied converge vers l'axe central du vase.
- Profil droit : le profil de la face externe ou interne du pied est droit par rapport à l'axe central du vase.
- Profil divergent : le profil de la face externe ou interne du pied diverge par rapport à l'axe central du vase.

•Le pied annulaire est composé d'un anneau en relief sous le fond externe, le plan de pose étant sa base.

#### Les panses :

• Paroi amincie : amincissement de bas en haut ou/et de l'intérieur vers l'extérieur, indépendamment de son épaisseur absolue.

• Paroi épaissie : épaississement de bas en haut ou/et de l'intérieur vers l'extérieur, indépendamment de son épaisseur absolue.

• Carène : inflexion anguleuse de la courbe de la paroi, marquée ou non par une arête ; point limite où la paroi change d'orientation.

#### Les systèmes de préhension :

• Anse : appendice de forme allongé fixé à un récipient par ses deux extrémités.

• Oreille de préhension : appendice de forme aplatie, perforé ou non, fixé au corps d'un récipient.

• *Bouton* : petit appendice, plus ou moins renflé et plus ou moins dégagé de la paroi à laquelle il est fixé, en vue de faciliter la préhension.

- Manche : appendice de forme allongée, fixé à un récipient par l'une de ses extrémités.
- Anneau de préhension : on utilise les définitions appropriées aux bases pour le décrire.

#### Les aménagements pour verser :

• *le goulo*t : aménagement d'un canal fermé constituant une ouverture distincte de l'encolure, faisant communiquer le corps d'un récipient avec l'extérieur ;

• le bec : inflexion plus ou moins élargie et accusée de la lèvre, formant un canal ouvert :

-soit le bec à lèvre pincée

-soit le bec à lèvre tréflée

#### 2.2.2.2. Caractères techniques

L'observation se fait sur la tranche et sur une cassure fraîche, sous une lumière constante (à l'aide de la lampe-loupe).

#### 1°) Aspect de la pâte

La gamme d'évaluation de l'aspect de la pâte peut-être déclinée à l'infini (très grossier, moyennement grossier, grossier, etc.). Seules trois valeurs ont été conservées (grossier, moyen et fin) et deux précisions significatives « feuilletée » et « mousseuse ». La pratique fait apparaître parfois une certaine relativité des termes, une granulométrie « moyenne » pour une sigillée, correspond, à grosseur égale, à un aspect « fin » pour de l'amphore.

#### 2°) Qualité de la pâte

On évalue ici seulement si la pâte est dure, tendre ou pulvérulente.

En ce qui concerne la qualité de la cuisson, on ne prend en note que les cas extrêmes où la pâte serait mal cuite ou surcuite. Cette dernière éventualité peut être soit l'indice d'un incident au moment de la cuisson, soit la marque de l'usage, soit le stigmate d'un incendie.

#### 3°) Couleur de la pâte

On donne donc une valeur approximative (« rouge, rouge brun, brun, beige, beige rosé, orangée, grise, gris clair, etc. »). Pour les pâtes mixtes, on différencie le cœur et les parois (paroi interne et/ou paroi externe).

#### 4°) Dégraissant

Le dégraissant est un élément inclus à l'argile pure, qui évite un fendillement de la pâte lors de la cuisson.

#### La couleur

On indique la ou les couleurs (parmi la liste établie), y compris pour le mica par exemple facilement identifiable à l'œil mais désigné par le terme « brillant ». On ne peut pas, sans binoculaire, identifier la chamotte à coup sûr : cette argile cuite concassée de taille déterminée peut être confondue avec d'autres inclusions de couleur rouge, nous n'utilisons donc pas ce terme dans nos descriptions.

#### La taille

L'appréciation de la taille s'effectue au jugé, selon les critères : petit, moyen et gros. Le dégraissant toujours présent dans la pâte (pour qu'elle n'éclate pas) est mentionné « invisible » quand on ne peut pas l'observer.

#### La densité

La proportion s'évalue en pourcentage par rapport à l'aspect de la pâte.

- Faible : moins de 15%
- Moyenne : de 15 à 30%
- Important : plus de 30%

### 5°) Vacuoles

Il s'agit de vides constitués en cours de cuisson traduisant un malaxage insuffisant de la pâte. Les vacuoles éventuelles se décrivent en taille et en densité de la même manière que le dégraissant. Elles ne sont décrites que si elle sont observables.

BORDS			
Bord droit	Bord convergent	Bord divergent	Bord Convexe
Bord concave	Bord à gorge supérieure	Bord à gorge interne	
		LÈVRES	
Lèvre ronde	Lèvre plate	Lèvre en amande	Lèvre biseautée vers l'extérieur
Lèvre biseautée vers l'intérieure	Lèvre triangulaire à méplat inférieur	Lèvre triangulaire à méplat supérieur	Lèvre épaissie vers l'intérieur
Lèvre épaissie vers l'extérieur	Lèvre épaissie des deux cotés	Lèvre amincie	Lèvre en bandeau
	RAPPO	ORTS BORD / LÈVRE	
Déjetée	Rentrante	Rabattue	Retombante
	EXEMPLES D'A	ASSOCIATION BORD / LEVR	E
Bord convergent à lèvre plate	Bord droit à lèvre déjetée (ronde, en amande, plate)	Bord divergent à lèvre en amande	Bord convergent à lèvre ronde rentrante
Bord divergent à lèvre en amande épaissie ver l'extérieur	Bord convergent à lèvre retroussé à l'extérieur et lèvre ronde	Bord divergent à lèvre amincie	Bord convergent à lèvre plate bideauté à l'intérieur
Bord concave à lèvre en amande	Bord convexe à lèvre ronde	Bord divergent à lèvre ronde épaissie vers l'extérieur	Bord convergent à lèvre déjetée plate
Bord divergent à lèvre ronde retombante	Bord convergent mouluré à lèvre ronde	Bord droit à gorge intérieure et lèvre plate	Bord convergent à gorge supérieure et lèvre ronde
Bord droit à lèvre ronde et gorge externe	Bord convergent à lèvre déjetée en amande	Bord convergent à lèvre en bandeau	Bord convexe à lèvre ronde retombante plaquée contre la paroi
Panse globulaire, bord convergent, lèvre en amande rabattue à l'horizontal	Panse globulaire, bord déjerée horizontale avec baguette sur le méplat supérieur	Bord convergent, lèvre ronde déjetée et méplats supérieur et inférieur horizontaux	Bord convergent, lèvre en quart de cercle déjetée et méplat supériur incliné à l'intérieur

### 2.2.4. TABLEAU DE CONVENTION DE DESCRIPTION DE LA CÉRAMIQUE
BASES					
Face externe du pied		Face inférieure du pied	Ý	Face interne du pied	
Fond externe		Fond interne		Plan de pose	
Face externe du pied convergent		Face externe du pied divergent		Face externe du pied droit	
Pied annulaire		Fond plat		Fond plat à talon	
Pied annulaire ambryonnaire		Fond plat convexe		Fond plat concave	
Pied polypodes		Pied balustre	YE	Fond à gorge interne et ressaut externe formant un pied annulaire	

PANSES							
Panse globulaire		Panse carénée	$\sum$	Panse ovoïde	$\bigcirc$	Panse bilobée	$\overline{\bigcirc}$
Panse cylindrique		Panse hémisphérique		Panse tronconique			
Paroi épaissie		Paroi amincie		Profil de panse convergent		Profil de panse divergent	
Carène	~						

## Bibliographie

- [Adler 01] K. Adler, M. Kampel, R. Kastler, M. Penz, R. Sablatnig & K. Hlavackova-Schindler. Computer Aided Classification of Ceramics - Achievements and Problems. In W. Börner & L. Dollhofer, editeurs, Proc. of 6th Intl. Workshop on Archaeology and Computers, pages 3–12, Vienna, Austria, 2001.
- [Alexe 04] A. Alexe, V. Gaildrat & L. Barthe. Interactive modelling from sketches using spherical implicit functions. In AFRIGRAPH '04 : Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa, pages 25–34. ACM Press, 2004.
- [Ankerst 99] M. Ankerst, G. Kastenmüller, H.-P. Kriegel & T. Seidl. 3D Shape Histograms for Similarity Search and Classification in Spatial Databases. In SSD '99 : Proceedings of the 6th International Symposium on Advances in Spatial Databases, pages 207–226, London, UK, 1999. Springer-Verlag.
- [Ansary 05] T. Filali Ansary, M. Daoudi & J.-P. Vandeborre. 3D Model Retrieval Based on Adaptive Views Clustering. In S. Singh, M. Singh, C. Apté & P. Perner, editeurs, Third International Conference on Advances in Pattern Recognition, ICAPR 2005, volume 3687 of Lecture Notes in Computer Science, pages 473–483. Springer, Aug 22-25 2005.
- [Bae 99] M. Bae. Curvature and Analysis of Archaeological Shapes. PhD thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, 1999.
- [Barros 96] Julio E. Barros, James C. French, Worthy N. Martin, Patrick M. Kelly & T. Michael Cannon. Using the Triangle Inequality to Reduce the Number of Comparisons Required for Similarity-Based Retrieval. In Storage and Retrieval for Image and Video Databases (SPIE), pages 392–403, 1996.
- [Belongie 02] S. Belongie, J. Malik & J. Puzicha. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 24, no. 4, pages 509–522, 2002.
- [Bémont 86] C. Bémont & J.-P. Jacob. La terre sigillée gallo-romaine : Lieux de production du haut empire : implantations, produits, relations. Documents d'Archéologie Française, 6, Paris, 1986.
- [Bespalov 06] D. Bespalov, W. C. Regli & A Shokoufandeh. Local feature extraction and matching partial objects. Computer-Aided Design, vol. 38, no. 9, pages 1020–1037, 2006.

[Biasotti 03]	S. Biasotti, S. Marini, M. Mortara & G. Patane. An Overview on Pro- perties and Efficacy of Topological Skeletons in Shape Modeling. In SMI '03 : Proceedings of the Shape Modeling International 2003, page 297, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
[Bollacker 98]	K. Bollacker, S. Lawrence & C. Lee Giles. <i>CiteSeer : An Autonomous Web Agent for Automatic Retrieval and Identification of Interesting Publica-</i> <i>tions.</i> In Katia P. Sycara & Michael Wooldridge, editeurs, Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents, pages 116–123, New York, 1998. ACM Press.
[Boyer 87]	K. L. Boyer & A. C. Kak. <i>Color-encoded structured light for rapid active ranging</i> . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 9, no. 1, pages 14–28, 1987.
[Calabi 98]	Eugenio Calabi, Peter J. Olver, Chehrzad Shakiban & Steven Haker. Dif- ferential and Numerically Invariant Signature Curves Applied to Object Recognition. Int. J. Computer Vision, vol. 26, pages 107–135, 1998.
[Cao 02]	Y. Cao & D. Mumford. <i>Geometric Structure Estimation of Axially Sym-</i> <i>metric Pots from Small Fragments</i> . In Signal Processing, Pattern Recogni- tion, and Applications, IASTED International Conference, Crete, Greece, June 26 wednesday 2002.
[Cartan 35]	É. Cartan. La méthode du repére mobile, la théorie des groupes continue, et les espaces généralisés. Hermann, 1935.
[Chakrabarti 99	[9] S. Chakrabarti, M. van den Berg & B. Dom. Focused crawling : a new approach to topic-specific Web resource discovery. Computer Networks (Amsterdam, Netherlands : 1999), vol. 31, no. 11–16, pages 1623–1640, 1999.
[Chen 03]	DY. Chen, XP. Tian, YT. Shen & M. Ouhyoung. On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval. Comput. Graph. Forum, vol. 22, no. 3, pages 223–232, 2003.
[Chua 97]	C.S. Chua & R. Jarvis. <i>Point Signatures : A New Representation for 3D Object Recognition</i> . Int. J. Comput. Vision, vol. 25, no. 1, pages 63–85, 1997.
[Corney 02]	J.R. Corney, H.J. Rea, D.E.R. Clark, J. Pritchard, M. Breaks & R. Ma- cLeod. <i>Coarse Filters for Shape Matching.</i> IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 22, no. 3, pages 65–74, 2002.
[Cyr 01]	C.M. Cyr & B.B. Kimia. <i>3D Object Recognition Using Shape Similarity-Based Aspect Graph.</i> In International Conference on Computer Vision (ICCV'01), volume 1, page 254, July 07 - 14 2001.
[DeCarlo 98]	D. DeCarlo & D. Metaxas. Shape Evolution With Structural and Topolo- gical Changes Using Blending. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 20, no. 11, pages 1186–1205, 1998.
[Déchelette 04]	J. Déchelette. Les vases céramiques ornés de la gaule romaine, volume 2. Paris : Picard et fils, 1904.

[Dey 03]	T. K. Dey, J. Giesen & S. Goswami. Shape Segmentation and Matching with Flow Discretization. In F.K.H.A. Dehne, J. Sack & M.H.M. Smid, editeurs, Algorithms and Data Structures, 8th International Workshop, WADS, volume 2748 of Lecture Notes in Computer Science, pages 25–36.
[Dragondorff 0]	Springer, Jul 2003. 5] H. Dragondorff, Torra sigillata, oin boitrag zur geschichte der grieschi
[Diagendom 9	schen und römischen keramik. Numeéro 96. Bonner Jahrbücher, 1895.
[Efron 93]	B. Efron & R.J. Tibshirani. An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall, Inc, 1993.
[Elad 02]	M. Elad, A. Tal & S. Ar. <i>Content based retrieval of VRML objects : an iterative and interactive approach.</i> In Proceedings of the sixth Eurographics workshop on Multimedia 2001, pages 97–118, New York, NY, USA, 2002. Springer-Verlag New York, Inc.
[Farin 96]	G.E. Farin. Curve and surface for computer aided geometric design. Academic Press, Boston, fourth edition edition, 1996.
[Faugeras 94]	Olivier D. Faugeras. Cartan's Moving Frame Method and Its Application to the Geometry and Evolution of Curves in the Euclidean, Affine and Projective Planes. In Proceedings of the Second Joint European - US Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision, pages 11– 46, London, UK, 1994. Springer-Verlag.
[Femiani 04]	J.C. Femiani, A. Razdan & G. Farin. <i>Curve Shapes : Comparison and Alignment.</i> submitted to TPAMI, November 2004.
[Freeman 70]	H. Freeman. <i>Boundary Encoding and Processing</i> . In B.S Lipkin & A. Rosenfeld, editeurs, Picture Processing and Psychopictorics, pages 241–266. New York : Academic, 1970.
[Funkhouser 03	B] T. Funkhouser, P. Min, M. Kazhdan, J. Chen, A. Halderman, D. Dobkin & D. Jacobs. A Search Engine for 3D Models. ACM Transactions on Graphics, vol. 22, no. 1, pages 83–105, January 2003.
[Funkhouser 04	<ul> <li>[4a] T. Funkhouser &amp; M. Kazhdan. Shape-based retrieval and analysis of 3D models. In GRAPH '04 : Proceedings of the conference on SIGGRAPH 2004 course notes, page 16, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.</li> </ul>
[Funkhouser 04	[4b] T. Funkhouser, M. Kazhdan, P. Shilane, P. Min, W. Kiefer, A. Tal, S. Rusinkiewicz & D. Dobkin. <i>Modeling by Example</i> . ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2004), August 2004.
[Funkhouser 06	[5] Thomas Funkhouser & Philip Shilane. Partial Matching of 3D Shapes with Priority-Driven Search. In Symposium on Geometry Processing, pages 131–142, June 2006.
[Gal 06]	Ran Gal & Daniel Cohen-Or. Salient geometric features for partial shape matching and similarity. ACM Transactions on Graphics, vol. 25, no. 1, pages 130–150, 2006.
[Garey 79]	M.R. Garey & D.S. Johnson. Computers and intractability : A guide to the theory of np-completeness. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1979.

[Giannopoulos 02] P. Giannopoulos & R.C. Veltkamp. A Pseudo-Metric for Weighted Point Sets. In A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen & P. Johansen, editeurs, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision ECCV (3), volume 2352, pages 715–730, Copenhagen, Denmark, May 28-31 2002. Springer. [Halíř 96] R. Halíř & C. Menard. Diameter Estimation for Archaeological pottery using Active Vision. In editor Axel Pinz, editeur, Proc. of the 20th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (OAGM/AAPR), pages 251–261, Schloss Seggau, Leibnitz, Austria, May 9-10 1996. [Halíř 97] R. Halíř & J. Flusser. Estimation of Profiles of Sherds of Archaeological Pottery. In T. Pajdla, editeur, Proc. of Czech Pattern Recognition Workshop '97, pages 126–130, Praha, Czech Republic, February 1997. Czech Pattern Recognition Society. www.utia.cas.cz/library/prace/970209.ps. [Halíř 99] An automatic estimation of the axis of rotation of frag-R. Halíř. ments of archaeological pottery : A multi-step model-based approach. In V. Skala, editeur, Proc. of the 7th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media (WSCG'99), 1999. [Huang 06] Q.X. Huang, S. Flöry, N. Gelfand, M. Hofer & H. Pottmann. Reassembling fractured objects by geometric matching. ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 25, no. 3, pages 569–578, 2006. [Icke 04]I. Icke. Content Based 3D Shape Retrieval, A Survey of State of the Art. Computer science phd program 2nd exam part 1, CUNY, The Graduate Center, New York, November 2004. [Ip 02] C.Y. Ip, D. Lapadat, L. Sieger & W.C. Regli. Using shape distributions to compare solid models. In SMA '02 : Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications, pages 273–280, New York, NY, USA, 2002. ACM Press. [Iyer 05a] N. Iyer, S. Jayanti, K. Lou, Y. Kalyanaraman & K. Ramani. Three Dimensional Shape Searching : State-of-the-Art Review and Future Trends. Computer-Aided Design, vol. 37, no. 5, pages 509–530, April 2005. [Iver 05b] N. Iver, S. Javanti & K. Ramani. An Engineering Shape Benchmark for 3D models. In ETC2005/CIE-85612 Proceedings of ASME IDETC/CIE 2005, 25th Computers and Information in Engineering (CIE) Conference, Sep 24-28 2005. [Johnson 99] A. Johnson & M. Hebert. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 5, pages 433 – 449, May 1999. [Joukowsky 99] M.S. Joukowsky. Petra great temple - volume 1 : Brown university excavations 1993-1997. Petra Exploration Fund, Providence, RI, USA, 1999.

106

- [Kampel 99] M. Kampel & R. Sablatnig. On 3d Modelling of Archaeological Sherds. In N. Sarris & M.G. Strinzis, editeurs, Proc. of Intl. Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three Dimensional Imaging, pages 95–98, Santorini, Greece, 1999.
- [Kampel 01] M. Kampel, R. Sablatnig & E. Costa. Classification of Archaeological Fragments using Profile Primitives. In Stefan Scherer, editeur, Computer Vision, Computer Graphics and Photogrammetry - A Common Viewpoint, Proc. of the 25th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (ÖAGM), volume 147 of Schriftenreihe der OCG, pages 151–158, Oldenburg, Wien, München, 2001.
- [Kampel 03] M. Kampel & R. Sablatnig. An Automated Pottery Archival and Reconstruction System. Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 14, no. 3, pages 111–120, July 2003. www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jissue/104540298.
- [Kampel 04a] M. Kampel & R. Sablatnig. 3D Puzzling of Archeological Fragments. In Danijel Skocaj, editeur, Proc. of 9th Computer Vision Winter Workshop, pages 31–40, Piran, Slovenia, 2004. Slovenian Pattern Recognition Society.
- [Kampel 04b] Martin Kampel & Robert Sablatnig. On 3D Mosaicing of Rotationally Symmetric Ceramic Fragments. In J. Kittler, M. Petrou & M. Nixon, editeurs, Proc. of 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UK, volume 2, pages 265–268. IEEE Computer Society, 2004.
- [Kazhdan 03] M. Kazhdan, T. Funkhouser & S. Rusinkiewicz. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors. In Symposium on Geometry Processing, June 2003.
- [Kazhdan 04] M. Kazhdan, T. Funkhouser & S. Rusinkiewicz. Symmetry Descriptors and 3D Shape Matching. In Symposium on Geometry Processing, July 2004.
- [Knorr 19] R. Knorr. Töpfer und fabriken verzierter terra sigillata des ersten jahrhnderts. Stuttgart, 1919.

[Koendering 90] J. Koendering. Solid shape. The MIT press, 1990.

- [Kolonias 05] I. Kolonias, D. Tzovaras, S. Malasiotis & M.G. Strintzis. Fast Content-Based Search of VRML Models Based on Shape Descriptors. In Proceedings of the IEEE Transactions on Multimedia, volume 7, pages 114 – 126, February 2005.
- [Kriegel 03a] H.-P. Kriegel, S. Brecheisen, P. Krüger, M. Pfeifle & M. Schubert. Using sets of feature vectors for similarity search on voxelized CAD objects. In SIGMOD '03 : Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pages 587–598, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- [Kriegel 03b] H.-P. Kriegel, P. Krüger, Z. Mashael, M. Pfeifle, M. Pütke & T. Seidl. Effective Similarity Search on Voxelized CAD Objects. In DASFAA '03 : Proceedings of the Eighth International Conference on Database Systems

	for Advanced Applications, page 27, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.		
[Krüger 00]	A. Krüger, C.L. Giles, F. Coetzee, E. Glover, G. Flake, S. Lawrence & C. Omlin. <i>DEADLINER : Building a New Niche Search Engine</i> . In Ninth International Conference on Information and Knowledge Management, CIKM 2000, Washington, DC, November 6–11 2000.		
[Körtgen 03]	M. Körtgen, GJ. Park, M. Novotni & R. Klein. "3D Shape Matching with 3D Shape Contexts". In in proceedings of The 7th Central European Seminar on Computer Graphics, Washington, DC, USA, Apr 2003.		
[Leifman 04]	G. Leifman, R. Meir & A. Tal. <i>Relevance Feedback for 3D Shape Retrieval</i> . In The 5th Israel-Korea Bi-National Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics, pages 15–19, October 2004.		
[Leifman 05]	G. Leifman, R. Meir & A. Tal. Semantic-Oriented 3D Shape Retrieval using Relevance Feedback. The Visual Computer, vol. 21, no. 8 - 10, pages 865–875, September 2005.		
[Loncaric 98]	S. Loncaric. A survey of shape analysis techniques. Pattern Recognition, vol. 31, no. 8, pages 983–1001, 1998.		
[Löffler 00]	J. Löffler. Content-based Retrieval of 3D Models in Distributed Web Da- tabases by Visual Shape Information. In IV '00 : Proceedings of the Inter- national Conference on Information Visualisation, page 82, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.		
[Macrim 02]	D. Macrim, A. Shokoufandeh, S.J. Dickinson, K. Siddiqi & S. Zucker. <i>View-based 3-D object recognition using shock graphs.</i> In ICPR02, pages III : 24–28, 2002.		
[Maiza 05]	<ul> <li>C. Maiza &amp; V. Gaildrat. Automatic Classification of Archaeological Potsherds. In Dimitri Pléménos, editeur, The 8th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence, 3IA'2005, Limoges, France, pages 135–147, Dimitri Pléménos, MSI Laboratory, Faculté des sciences, 83 rue d'Isle, 87000 LIMOGES, FRANCE, 11-12 may 2005. Dimitri Pléménos, General Chair of the Conference.</li> </ul>		
[Maiza 06]	Chaouki Maiza & Véronique Gaildrat. SemanticArchaeo : A Symbo- lic Approach of Pottery Classification. In Marinos Ioannides, David Arnold, Franco Niccolucci & Katerina Mania, editeurs, Virtual Rea- lity, Archaeology and Cultural Heritage, Nicosia, Cyprus, pages 227–233, http://www.epoch-net.org, october 2006. EPOCH Publication.		
[Mangan 99]	A.P. Mangan & R.T. Whitaker. <i>Partitioning 3D Surface Meshes using Watershed Segmentation</i> . In IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, numéro 5 in 4, pages 308–321, 1999.		
[Mara 02]	H. Mara, M. Kampel & R. Sablatnig. <i>Preprocessing of 3D-Data for Classi-</i> <i>fication of Archaeological Fragments in an Automated System.</i> In F. Leberl & F. Fraundorfer, editeurs, Vision with Non-Traditional Sensors, Proc. of the 26th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition		

(ÖAGM), volume 160 of *Schriftenreihe der OCG*, pages 257–264, 2002. www.prip.tuwien.ac.at/ sab/papers/oagm2002b.pdf.

- [Marini 07] Simone Marini, Laura Paraboschi & Silvia Biasotti. SHape REtrieval Contest 2007 : Partial Matching Track. in SHREC2007 : 3D Shape Retrieval Contest, 2007.
- [Martin 96] T. Martin. Céramiques sigillées et potiers gallo-romains de montans. édition Archéosite, 1996.
- [Marty 04a] M.-T. Marty & M.-L Maraval. Manuel pour l'enregistrement du mobilier archéologique. Unité Toulousaine d'Archéologie et d'histoire, UTAH, Université Toulouse-Le Mirail, 1998-2004. Chantier-école de Coupéré.
- [Marty 04b] M.-T. Marty & M.-L Maraval. Manuel pour les méthodes de fouille et mode d'enregistrement des données. Unité Toulousaine d'Archéologie et d'histoire, UTAH, Université Toulouse-Le Mirail, 1998-2004. Chantierécole de Coupéré.
- [McBride 03] C.J. McBride & B.B. Kimia. Archaeological fragment reassembly using curve-matching. Division of Engineering, September 2003.
- [Melero 03] F.J. Melero, J.C. Torres & A. Leon. On the Interactive 3D Reconstruction of Iberian Vessels. In F. Niccolucci D. Arnold A. Chalmers, editeur, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, VAST'03, November 5-7 2003.
- [Messmer 95] B.T. Messmer. *Efficient Graph Matching Algorithms*. PhD thesis, University of Bern, Switzerland, 1995.
- [Meyer 02] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schr & A. Barr. Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds. In VisMath, Berlin, Germany, 2002.
- [Min 04] P. Min, M. Kazhdan & T. Funkhouser. A Comparison of Text and Shape Matching for Retrieval of Online 3D Models. In European Conference on Digital Libraries, September 2004.
- [Mitra 06] Niloy J. Mitra, Leonidas Guibas, Joachim Giesen & Mark Pauly. *Pro*babilistic fingerprints for shapes. In SGP '06 : Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing, pages 121–130, 2006.
- [Novotni 01] M. Novotni & R. Klein. A Geometric Approach to 3D Object Comparison. In International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI 2001), pages 167–175. IEEE Computer Society, May 7-11 2001.
- [Novotni 03] M. Novotni & R. Klein. 3D zernike descriptors for content based shape retrieval. In SM '03 : Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications, pages 216–225, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- [Ohbuchi 02] R. Ohbuchi, T. Otagiri, M. Ibato & T. Takei. Shape-Similarity Search of Three-Dimensional Models Using Parameterized Statistics. In PG '02 : Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and

Applications, page 265, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.

- [Ohbuchi 03a] R. Ohbuchi, T. Minamitani & T. Takei. Shape-Similarity Search of 3D Models by using Enhanced Shape Functions. In TPCG '03 : Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics 2003, page 97, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [Ohbuchi 03b] R. Ohbuchi & T. Takei. Shape-Similarity Comparison of 3D Models Using Alpha Shapes. In PG '03 : Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, page 293, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [Olver 01] P.J. Olver. *Joint invariant signatures*. Found. Comput. Math. 1, 2001.
- [Olver 05] P.J. Olver. Computer algebra and geometric algebra with applications, volume 3519 of *Lecture Notes in Computer Science*, chapitre A Survey of Moving Frames, pages 105–138. Springer Berlin / Heidelberg, 2005.
- [Osada 01]
   R. Osada, T. Funkhouser, B. Chazelle & D. Dobkin. Matching 3D Models with Shape Distributions. In SMI '01 : Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications, page 154, Washington, DC, USA, May 2001. IEEE Computer Society.
- [Osada 02] R. Osada, T. Funkhouser, B. Chazelle & D. Dobkin. Shape Distributions. ACM Transactions on Graphics, vol. 21, no. 4, pages 807–832, October 2002.
- [Pajdla 95] T. Pajdla. Laser plane range finder the implementation at the CVL. K335-95-98, Czech Technical University, Prague, October 1995. citeseer.ist.psu.edu/pajdla95laser.html.
- [Papaioannou 00a] G. Papaioannou, E.A. Karabassi & T. Theoharis. Automatic Reconstruction of Archaeological Finds - A Graphics Approach. In Proc. of the 4th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence (3IA'00), pages 117–125, 2000.
- [Papaioannou 00b] G. Papaioannou, E.A. Karabassi & T. Theoharis. Segmentation and Surface Characterization of Arbitrary 3D Meshes for Object Reconstruction and Recognition. In IEEE Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition ?2000, pages 734–737, 2000. cgi.di.uoa.gr/georgep/papers/characterisation.pdf.
- [Papaioannou 01] G. Papaioannou, E.A. Karabassi & T. Theoharis. Virtual Archaeologist : Assembling the Past. IEEE transactions on Computer Graphics and Applications, vol. 21, no. 2, pages 53–59, March/April 2001.
- [Papaioannou 02] G. Papaioannou, E.A. Karabassi & T. Theoharis. Reconstruction of Three-Dimensional Objects through Matching of their Parts. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 1, pages 114–124, 2002.
- [Papaioannou 03] G. Papaioannou & T. Theoharis. Fast Fragment Assemblage Using Boundary Line and Surface Matching. In IEEE ICPR/ACVA proceedings, pages 103–112, 2003.

[Pottmann 99]	H. Pottmann, M. Peternell & B. Ravani. An introduction to line geometry with applications. Computer-Aided Design, 1999.		
[Prasad 97]	L. Prasad. Morphological Analysis of Shapes. CNLS Newsletter, 139 : 1–18, July 1997.		
[Press 93]	W.H. Press. Numerical recipes in c : The art of scientific computing. Cambridge University Press, 2nd edition edition, 1993.		
[Pulla 01]	S. Pulla. Curvature based segmentation for 3-dimensional meshes. PhD thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, 2001.		
[Pulla 02]	S. Pulla, A. Razdan & G. Farin. Improved curvature estimation for water- shed segmentation of 3-dimensional meshes. IEEE Transactions on Visua- lization and Computer Graphics, 2002.		
[Razdan 01]	A. Razdan, D. Liu, M. Bae, M. Zhu, G. Farin, A. Simon & M. Henderson. Using Geometric Modeling for Archiving and Searching 3D Archaeological Vessels. In CISST, Las Vegas, June 25–28 2001.		
[Reynoso 01]	C. Reynoso & E. Jezierski. <i>Genetic algorithm solver for archaeology</i> . In 29th Conference of CAA : Pushing the Envelope. BAR International Series no. 1016, 2001.		
[Rice 96]	P.M. Rice. <i>Recent Ceramic Analysis : 2. Composition, Production, and Theory.</i> Journal of Archaeological Research, vol. 1, no. 4, pages 165–202, 1996.		
[Rosenfeld 97]	A. Rosenfeld & A. Nakamura. <i>Local Deformations Of Digital Curves</i> . Pattern Recognition Letters, vol. 18, no. 7, pages 613–620, 1997.		
[Rowe 01]	J. Rowe. A Model Digital Library for 3D Pottery Data. In Coalition for Networked Information (CNI) Spring 2001 Meeting, April 8 - 10 2001.		
[Ruggeri 08]	M.R. Ruggeri & D. Saupe. <i>Isometry-invariant matching of point set sur-faces</i> . In Proceedings of the Eurographics 2008 Workshop on 3D Object Retrieval (EGW3DOR 08), april 2008.		
[Sablatnig 97a]	R. Sablatnig. A Highly Adaptable Concept for Visual Inspection. PhD thesis, Vienna University of Technology, Inst. of Computer Aided Automation, Pattern Recognition and Image Processing Group, 1997. www.prip.tuwien.ac.at/ sab/papers/tr46.pdf.		
[Sablatnig 97b]	R. Sablatnig & C. Menard. <i>3D Reconstruction of Archaeological Pottery Using Profile Primitives</i> . In N. Sarris & M.G. Strintzis, editeurs, Proc. of Intl. Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three-Dimensional Imaging, pages 93–96, Rhodes, Greece, September 1997.		
[Sablatnig 98]	R. Sablatnig, C. Menard & W.G. Kropatsch. <i>Classification of Archaeological Fragments Using a Description Language</i> . In S. Theodoridis, I. Pitas, A. Stouraitis & N. Kalouptsidis, editeurs, Signal Processing IX, Theories and Applications, volume II, pages 1097–1100, Rhodes, Greece, 1998. EURASIP.		

- [Sablatnig 02] R. Sablatnig & M. Kampel. Model-based Registration of Front- and Backviews. Computer Vision and Image Understanding, vol. 87, no. 1–3, pages 90–103, July 2002.
- [Sablayrolles 05] R. Sablayrolles, C. Maiza, M.-L. Maraval, V. Gaildrat & G. Baroin. Système d'Imagerie et d'Analyse du Mobilier Archéologique (SIAMA), Rapport Final. Rapport technique, IRIT-UPS, 2005.
- [Sánchez-Cruz 03] H. Sánchez-Cruz & E. Bribiesca. A method of optimum transformation of 3D objects used as a measure of shape dissimilarity. Image Vision Comput., vol. 21, no. 12, pages 1027–1036, 2003.
- [Schurmans 01] U. Schurmans, A. Razdan, A. Simon, P. McCartney, M. Marzke, D. Van Alfen, G. Jones, J. Rowe, G. Farin, D. Collins, M. Zhu, D. Liu, M. Bae, T. Tasdizen, J. Tarel & D. Cooper. Advances in Geometric Modeling and Feature Extraction on Pots, Rocks and Bones for Representation and Query via the Internet. In Proc. of the 28th Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA'01, April 25 - 29 2001.
- [Sebastian 01] T.B. Sebastian, P.N. Klein & B.B. Kimia. *Recognition of Shapes by Editing Shock Graphs*. In ICCV, pages 755–762, 2001.
- [Shalom 08] S. Shalom, L. Shapira, A. Shamir & D. Cohen-Or. Part Analogies in Sets of Objects. In Proceedings of the Eurographics 2008 Workshop on 3D Object Retrieval (EGW3DOR 08), pages 33–40, april 2008.
- [Shamir 03] A. Shamir, A. Sotzio & D. Cohen-Or. Enhanced Hierarchical Shape Matching for Shape Transformation. International Journal for Shape Modeling IJSM, vol. 9, no. 2, 2003.
- [Shilane 04] P. Shilane, P. Min, M. Kazhdan & T. Funkhouser. The Princeton Shape Benchmark. In SMI '04 : Proceedings of the Shape Modeling International 2004 (SMI'04), June 2004.
- [Shum 96] H.-Y. Shum, M. Hebert & K. Ikeuchi. On 3D Shape Similarity. In CVPR '96 : Proceedings of the 1996 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '96), page 526, Washington, DC, USA, 1996. IEEE Computer Society.
- [Siarry 97] P. Siarry, G. Berthiau, F. Durdin & J. Haussy. Enhanced Simulated Annealing for Globally Minimizing Functions of Many-Continuous Variables. ACM Transactions on Mathematical Softwares, vol. 23, no. 2, pages 209– 228, 1997.
- [Simon 02] A. Simon. Advances in 3D Knowledge and Ceramic Vessel Morphology. Rapport technique, PRISM / Archaeological Research Institute, October 01 2002.
- [Stavropoulos 08] G. Stavropoulos, K. Moustakas, D. Tzovaras & M.G. Strintzis. A Novel Approach for Range Image to 3D Model Partial Matching. In Proceedings of the Eurographics 2008 Workshop on 3D Object Retrieval (EGW3DOR 08), april 2008.

[Stylianou 02]	G. Stylianou & G. Farin. <i>Shape Feature Extraction</i> . In B. Hamann Springer-Verlag G.Farin H. Hagen, editeur, In Geometric and Hierarchical Methods in Scientific Visualisation, 2002.
[Suzuki 00]	M.T. Suzuki, T. Kato & N. Otsu. A similarity retrieval of 3D polygonal models using rotation invariant shape descriptors. In Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, volume 4, pages 2946–2952, 2000.
[Suzuki 01]	M.T. Suzuki. A Web-based Retrieval System for 3D Polygonal Models. In Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference (IFSA/NAFIPS2001), volume 4, pages 2271 – 2276, Vancouver, Jul 2001.
[Suzuki 05]	M.T. Suzuki, Y. Yaginuma & Y. Shimizu. A Partial Shape Matching Technique for 3D Model Retrieval Systems. SIGGRAPH 2005 POSTER (The 32nd International Conference on Computer Graphics and Interac- tive Techniques), July 2005.
[Tal 06]	A. Tal & E. Zuckerberger. "Mesh Retrieval by Components". In International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 2006.
[Tangelder 03]	J.W.H. Tangelder & R.C. Veltkamp. <i>Polyhedral Model Retrieval Using Weighted Point Sets.</i> Int. J. Image Graphics, vol. 3, no. 1, page 209, 2003.
[Tangelder 04]	J. Tangelder & R. Veltkamp. A Survey of Content Based 3D Shape Re- trieval Methods. In SMI '04 : Proceedings of the Shape Modeling Interna- tional 2004 (SMI'04), pages 145–156, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
[Tasdizen 00]	T. Tasdizen, JP. Tarel & D. Cooper. <i>Improving the stability of algebraic curves for applications</i> . In IEEE Transactions on Image Processing, pages 405–416, March 2000.
[Terzopoulos 91	] D. Terzopoulos & D. Metaxas. <i>Dynamic 3D Models with Local and Global Deformations : Deformable Superquadrics</i> . IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 13, no. 7, pages 703–714, 1991.
[Thirion 96]	Jean-Philippe Thirion. New feature points based on geometric invariants for 3D image registration. Int. J. Comput. Vision, vol. 18, no. 2, pages 121–137, 1996.
[Veltkamp 01]	R.C. Veltkamp. Shape matching : similarity measures and algorithms. Rapport technique, Institute of Information and Computer Science, Utrecht University, Nederland, 2001. citeseer.ist.psu.edu/veltkamp01shape.html.
[Veltkamp 06]	R.C. Veltkamp, F. Wiering & R. Typke. Encyclopedia of multimedia, chapitre Content Based 3D Shape Retrieval. Springer, borko furht edition, 2006.
[Vleugels 99]	J. Vleugels & R.C. Veltkamp. <i>Efficient Image Retrieval through Vantage Objects.</i> In VISUAL '99 : Proceedings of the Third International Conference on Visual Information and Information Systems, pages 575–584, London, UK, 1999. Springer-Verlag.

[Vranic 01a]	D. V. Vranic & D. Saupe. A Feature Vector Approach for Retrieval of 3D Objects in the Context of MPEG-7. In V. Giagourta & M.G. Strintzis, editeurs, In Proceedings of the International Conference on Augmented, Virtual Environments and Three-Dimensional Imaging (ICAV3D 2001), pages 37–40, Mykonos, Greece, May 2001.
[Vranic 01b]	D. V. Vranic, D. Saupe. & J. Richter. <i>Tools for 3D-object retrieval : Karhunen-Loeve transform and spherical harmonics</i> . In Proceedings of the 2001 IEEE Fourth Workshop on Multimedia Signal Processing, pages 293–298, Cannes, France, May 2001.
[Vranic 03]	D.V. Vranic. An improvement of rotation invariant 3D-shape based on functions on concentric spheres. In Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP 2003, volume 3, pages 757–60, Sept 2003.
[Vranic 04]	D. V. Vranic. <i>3D Model Retrieval</i> . PhD thesis, University of Leipzig, 2004.
[Willis 01]	A. Willis, X. Orriols, S. Velipasalar, D. Cooper & X. Binefa. <i>Extracting Axially Symmetric 3D Geometry from Limited 3D Range Data</i> . Shape-tr-2001-01, lems-192, SHAPE Lab, Brown University, Providence, RI, 2001. www.lems.brown.edu/vision/publications/index.html.
[Willis 03]	A. Willis, X. Orriols & D. Cooper. Accurately Estimating Sherd 3D Surface Geometry with Application to Pot Reconstruction. In CVPR Workshop : ACVA, June 2003.
[Willis 04a]	A. Willis & D. Cooper. Alignment of Multiple Non-overlapping Axially Symmetric 3D Datasets. In ICPR, volume IV, pages pp. 96–99, August 2004.
[Willis 04b]	A. Willis & D. Cooper. <i>Bayesian Assembly of 3D Axially Symmetric Shapes from Fragments</i> . In CVPR, volume I, pages pp. 82–89, June 2004.
[Yacoub 97]	S.B. Yacoub & C. Menard. Robust axis determination for rotational sym- metric objects out of range data. In W. Burger & eds M. Burge, editeurs, 21th Workshop of the Oeagm, pages 197–202, Hallstatt, Austria, May 1997.
[Yu 03]	<ul> <li>M. Yu, I. Atmosukarto, W.K. Leow, Z. Huang &amp; R. Xu. "3D Model Retrieval With Morphing-Based Geometric and Topological Feature Maps".</li> <li>In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '03), volume 2, page 656, 2003.</li> </ul>
[Zaharia 01]	T. Zaharia & FJ. Preteux. <i>3D-shape-based retrieval within the MPEG-7 framework</i> . In Edward R. Dougherty & Jaakko T. Astola, editeurs, Proc. SPIE Nonlinear Image Processing and Pattern Analysis XII, volume 4304, pages 133–145, may 2001.
[Zerroug 99]	M. Zerroug & R. Nevatia. <i>Part-Based 3D Descriptions of Complex Objects from a Single Image</i> . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 9, pages 835–848, September 1999.

[Zhang 01a]	C. Zhang & T. Chen. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in
	mesh representation. In Proceedings of the 2001 International Conference
	on Image Processing (ICIP 2001), volume 13, pages 935–938, Oct 7-10 2001.
[Zhang 01b]	C. Zhang & T. Chen. Indexing and retrieval of 3D models aided by active learning. In Proceedings of the 9th ACM International Conference on Multimedia 2001, pages 615–616, Oct 2001.

- [Zhang 04] D. Zhang & G. Lu. *Review of shape representation and description techniques.* Pattern Recognition, vol. 37, no. 1, pages 1–19, 2004.
- [Zuckerberger 02] E. Zuckerberger, A. Tal & S. Shlafman. Polyhedral Surface Decomposition with Applications. Computers & Graphics, vol. 26, no. 5, pages 733–743, October 2002.

## Résumé

Le résumé en français

Mots-clés: Mots clé

## Abstract

Abstract in english

Keywords: Keywords