



HAL
open science

Mes contributions au traitement de la géométrie 3D

Frédéric Payan

► **To cite this version:**

Frédéric Payan. Mes contributions au traitement de la géométrie 3D. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Côte D'Azur, 2023. tel-04318462

HAL Id: tel-04318462

<https://hal.science/tel-04318462>

Submitted on 1 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR
ÉCOLE DOCTORALE STIC
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA
COMMUNICATION

MES CONTRIBUTIONS AU TRAITEMENT DE LA GÉOMÉTRIE 3D

par
Frédéric PAYAN

au sein de l'équipe Mediacoding/SIS du Laboratoire I3S

Soutenue le 17 novembre 2023 devant le jury composé de :

Pierre ALLIEZ	Directeur de recherche - INRIA	(Examinateur)
Marc ANTONINI	Directeur de recherche - CNRS	(Garant)
Raphaëlle CHAINE	Professeur - Université Lyon 1	(Rapporteuse)
Mohamed DAOUDI	Professeur - IMT Nord Europe	(Rapporteur)
Dominique DOUGUET	Chargé de recherche - INSERM	(Examinatrice)
William PUECH	Professeur - Université Montpellier	(Rapporteur)

Frédéric PAYAN : *Mes contributions au traitement de la géométrie 3D* , Habilitation à diriger les recherches , © 1^{er} décembre 2023

TABLE DES MATIÈRES

1	AVANT-PROPOS	1
I	RAPPORT D'ACTIVITÉS	3
2	SYNTHÈSE CARRIÈRE	5
2.1	Etat civil	5
2.2	Chronologie	5
2.3	Responsabilités collectives	6
2.4	Primes et avancements	6
3	SYNTHÈSE DE MON ACTIVITÉ D'ENSEIGNEMENT	7
4	SYNTHÈSE DE MON ACTIVITÉ DE RECHERCHE	11
4.1	Encadrement de doctorants (4)	12
4.2	Encadrement de post-doctorants (2)	13
4.3	Encadrement de stagiaires 4ème ou 5ème année (18)	13
4.4	Projets de recherche	13
4.5	Collaborations industrielles	15
4.6	Organisation de conférences et comité de programme	15
4.7	Animation scientifique	16
4.8	Expertise nationale	16
4.9	Participation à des jurys de thèse	16
4.10	Participation à des comités de sélection	16
4.11	Invitations Conférences et Ecole d'été	16
5	PRÉSENTATION DE MES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE	17
5.1	Compression géométrique de maillages surfaciques	17
5.2	Compression pour maillages surfaciques animés	17
5.3	Remaillage semi-régulier de surfaces	18
5.4	Numérisation 3D	18
5.5	Traitement de nuages de points 3D massifs	19
5.6	Traitement des maillages volumiques spécifiques aux géosciences	23
5.7	Codage interactif pour la navigation dans des scènes 3D	24
5.8	Recherche de similarité géométrique entre structures 3D moléculaires	24
6	LISTE COMPLÈTE DE MES PUBLICATIONS	27
II	FOCUS SUR... LA GÉNÉRATION DE MAILLAGES SEMI-RÉGULIERS	35
7	REMAILLAGE SEMI-RÉGULIER	39
7.1	Introduction	39
7.2	Contribution au domaine : un remailleur basé Voronoï	42

7.3	Résultats	44
7.4	Conclusion du chapitre	45
8	RECONSTRUCTION 3D SEMI-RÉGULIÈRE	47
8.1	Introduction	47
8.2	Méthodologie	48
8.3	Résultats	49
8.4	Conclusion du chapitre	51
III FOCUS SUR... LE RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE SURFACES		53
9	RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE MAILLAGES SURFACIQUES	57
9.1	Introduction	57
9.2	Principe général du lancer de fléchettes	58
9.3	Algorithme proposé	60
9.4	Résultats	60
9.5	Conclusion du chapitre	66
10	RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE NUAGES DE POINTS 3D	67
10.1	Introduction	67
10.2	Des graphes locaux interconnectés pour structurer les nuages	68
10.3	Technique de ré-échantillonnage basée sur cette structure	71
10.4	Conclusion du chapitre	76
IV FOCUS SUR... MES PROJETS EN COURS		79
11	TRAITEMENT DES MAILLAGES VOLUMIQUES SPÉCIFIQUES AUX GÉO-SCIENCES	83
11.1	Introduction	83
11.2	Méthodologie HEXASHRINK	86
11.3	HEXASHRINK dans un contexte de compression	89
11.4	HEXASHRINK dans un contexte de simulation à précision variable	92
11.5	Conclusion du chapitre	95
12	SIMILARITÉ GÉOMÉTRIQUE ENTRE STRUCTURES MOLÉCULAIRES 3D	97
12.1	Introduction	97
12.2	Méthodologie SENSAAAS	100
12.3	Expérimentations	102
12.4	Conclusion du chapitre	103
13	BILAN ET PERSPECTIVES	105
13.1	Stockage des données numériques : une "infobésité" galopante	106
13.2	l'ADN : une alternative raisonnable aux supports actuels	107
13.3	Les limites et les solutions actuelles du stockage sur ADN	108
13.4	Stocker les nuages dans l'ADN	109
13.5	SENSAAAS au service du stockage sur ADN	110

LISTE DES ACRONYMES

AMR	analyse multirésolution
CAO	conception assistée par ordinateur
DDP	distribution en disques de Poisson
DV	diagramme de Voronoï
DVC	diagramme de Voronoï centroïdal
IR	irrégulier
LOD	level of detail
MV	maillage volumique
POI	<i>pixels of interest</i>
SPMR	spectre de puissance moyen radial
SR	semi-régulier
REQM	racine de l'erreur quadratique moyenne
WC	<i>water cut</i>

AVANT-PROPOS

Après l'obtention d'un Doctorat en Automatique, Traitement du Signal et des Images à l'Université de Nice - Sophia Antipolis en 2004, une année comme demi-ATER au sein de cette même université, et une année de postdoc à l'Université Joseph Fourier de Grenoble au laboratoire LMC (devenu depuis Laboratoire Jean Kuntzmann, UMR5224), je suis devenu Maître de conférences de l'Université de Nice - Sophia Antipolis (devenu depuis Université Côte d'Azur). En septembre 2006, j'ai intégré le laboratoire I3S (UMR7271) et fut rattaché au Département Réseaux & Télécoms de l'IUT Nice Côte d'Azur.

Ce mémoire, structuré en plusieurs parties, a vocation à présenter le bilan de mes travaux de recherche depuis cette date, en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. La première partie reprend mon rapport d'activités depuis 2006. J'y présente mon parcours et synthétise mes différentes activités administratives (Chapitre 2), pédagogiques (Chapitre 3) et scientifiques (Chapitre 4). Sont énumérés notamment les projets auxquels j'ai participé et les étudiants que j'ai encadrés. Cette partie contient aussi un chapitre qui reprend chronologiquement et de manière quasi-exhaustive l'ensemble de mes contributions depuis le début de ma carrière (Chapitre 5) et se conclut avec ma liste de publications (Chapitre 6).

La deuxième partie, divisée en deux chapitres, se focalise sur une thématique de recherche importante durant ma carrière et commune à plusieurs projets, à savoir la génération de maillages semi-réguliers. Le chapitre 7 traite du remaillage semi-régulier de surfaces. Le chapitre 8 aborde la reconstruction 3D semi-régulière.

La troisième partie, aussi divisée en deux chapitres, se focalise sur une autre thématique importante durant ma carrière abordée lors de deux thèses : l'échantillonnage de surfaces. Le chapitre 9 traite du ré-échantillonnage de maillages surfaciques. Le chapitre 10 met en exergue le ré-échantillonnage de nuages de points 3D.

La quatrième partie présente mes travaux les plus récents, dans deux domaines distincts. Le chapitre 11 évoque le traitement de maillages volumiques en géosciences. Le chapitre 12 aborde la recherche de similarité géométrique entre structures moléculaires 3D.

Le dernier chapitre présente un bref bilan de mon activité de recherche, puis expose mon projet de recherche pour les prochaines années.

Première partie

RAPPORT D'ACTIVITÉS

SYNTHÈSE CARRIÈRE

2.1 ETAT CIVIL

Nom & Prénom	PAYAN Frédéric (47 ans)
Université	Université Côte d'Azur (UCA)
MCF depuis	Septembre 2006
Grade	Hors Classe depuis 2019 (Echelon 5)
Page web	www.i3s.unice.fr/~fpayan/
Email	frederic.payan@univ-cotedazur.fr
Téléphone	04 89 15 43 22

Enseignement	IUT Nice-Côte d'Azur (UCA) Département R&T (Réseaux & Télécoms) - Sophia Antipolis
---------------------	---

Recherche	Laboratoire I3S (Informatique Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis) - UMR7271 UCA-CNRS
------------------	---

2.2 CHRONOLOGIE

2019	Avancement de grade (MCF Hors classe)
2006-...	Maître de conférence (Section 61) Université de Nice - Sophia Antipolis (UNS devenu UCA) , rattaché à l'IUT Nice Côte d'Azur, Département Réseaux & Télécoms). Recherche au Laboratoire I3S, Pôle SIS, Equipe <i>Mediacoding</i> .
2005-2006	Post-doctorant CNRS au laboratoire LJK (UMR5224), anciennement LMC, Université Joseph Fourier, Grenoble.
2004-2005	ATER à l'IUT Nice Côte d'Azur, Département Réseaux & Télécoms.
2004	Doctorat UNS réalisé à l'I3S sous la direction de M. Antonini. <i>Optimisation du compromis débit-distorsion pour la compression géométrique de maillages surfaciques triangulaires</i> . Soutenu le 2 décembre 2004 devant le jury composé de : - Michel Barlaud, PU, Nice-Sophia Antipolis, Président

- Riccardo Leonardi, PU, Brescia (Italie), Rapporteur
- Francis Schmitt, PU, ENST Paris, Rapporteur
- Rémy Prost, PU, INSA Lyon, Rapporteur
- Pierre Alliez, CR INRIA Sophia Antipolis, Examineur
- Marc Antonini, DR CNRS, Directeur de thèse.

2000-2004 **Vacations UNS en Informatique, traitement d'image et du signal.**
 2000 **DEA en Vision, Image et Signal (ARAVIS), UNS.**

2.3 RESPONSABILITÉS COLLECTIVES

2.3.1 Mandats nationaux

2018 - 2019 **Membre CNU 61**

- Participation session PEDR en juin 2019.
- Participation session de qualification MCF en janvier 2019.

2011-2015 **Membre CNU 61**

- Participation session « suivi de carrière » en septembre 2015.
- Participation session de promotion MCF / CRCT en mai 2012.

2.3.2 Responsabilités et mandats au laboratoire I3S

2022 - ... **Membre Elu du Conseil de laboratoire.**

2016 - 2021 **Membre nommé du Conseil de laboratoire.**

2014 - 2019 **Membre de la Commission « Web - Communication ».**

2.3.3 Responsabilités et mandats à l'IUT Nice Côte d'Azur

2023 - ... **Directeur d'Etudes du BUT3 / Licence Professionnelle MI-ASSR**
 parcours Cloud & Cybersécurité (alternance, 42 étudiants).

2019 - 2023 **Responsable Licence Professionnelle MI-ASSR** (alternance, 42 étudiants, 2 parcours ASUR et Cyberdef).

2016 - 2019 **Direction Etudes 1ère année** du DUT R&T.

2008-2016 **Direction Etudes 2ème année** du DUT R&T.

2008-2016 **Responsable Poursuite d'Etudes** du Département R&T.

2007 - ... **Membre du Conseil** de Département R&T.

2.4 PRIMES ET AVANCEMENTS

2021 **Obtention de la PEDR**

2019 **Avancement de grade (MCF Hors classe)**

2017 **Obtention de la PEDR**

SYNTHÈSE DE MON ACTIVITÉ D'ENSEIGNEMENT

J'ai effectué mes premiers enseignements en 2000, dès le début de ma thèse, sous la forme de vacations à l'Université de Nice - Sophia Antipolis. Jusqu'en 2004, j'ai pu enseigner le traitement du signal et des images, et la programmation dans diverses composantes (UFR Sciences, Polytech, IUT) et à différents niveaux (Bac +1 et bac +5). De 2004 à 2005, j'ai obtenu un demi-poste d'ATER à l'IUT Nice Côte d'Azur, au Département Réseaux & Télécoms où j'ai enseigné le traitement du signal dans différents modules de DUT.

Depuis mon recrutement comme MCF et mon rattachement dans le même département, j'enseigne en DUT et en LP de nombreux matières liées au traitement du signal et aux télécommunications. Les principales thématiques abordées sont : le traitement du signal, les transmissions numériques, les réseaux cellulaires, le codage et la compression de données. Je suis le responsable pédagogique de toutes les matières dans lesquelles j'interviens. J'ai créé tous les supports de cours, de TD et de TP de ces matières.

Je me suis investi dès ma titularisation dans la vie collective de mon département d'enseignement, qui manquait de volontaires pour les tâches administratives. J'ai été successivement **Directeur d'Études 2ème année** du DUT R&T (2008 à 2016), **Directeur d'Études 1ère année** (2016 à 2019), et **Responsable de la Licence Professionnelle MI-ASSR** (2 parcours ASUR/CYBER) entre 2019 et 2023. J'ai été aussi **Responsable Poursuite d'Études** du Département de 2008 à 2016. Avec l'évolution de l'offre de formation de l'IUT, je suis depuis Février **Directeur d'Études du BUT3 R&T et de la Licence Professionnelle MI-ASSR** parcours Cloud & Cyber-sécurité (incluse dans le BUT3).

J'enseigne aussi régulièrement à une promotion d'étudiants malaisiens qui viennent étudier en France, dans le cadre d'un accord franco-malaisien passé entre l'IUT et le Malaysia-France University (Université de Kuala-Lumpur). Enfin, j'effectue régulièrement (2015, 2016, 2019, 2020, 2023) des vacations au Département Réseaux & Télécoms de l'IUT de Kourou, en Guyane. J'y enseigne durant une semaine l'intégralité du module "Réseaux Cellulaires", car aucun enseignant sur place n'a les compétences nécessaires pour assurer ce module.

Matières enseignées depuis 2021 (nouveau PPN)

Niveau	Matière	Effectif CM	TD	TP
BUT1 RT	R106 - Architecture des systèmes numériques et informatiques	~70	~28	~14
BUT1 RT	R205 - Signaux et systèmes pour les transmissions	~70	~28	~14
BUT1 RT	R206 - Numérisation de l'information	~70	~28	~14
BUT1 RT	SAE22 - Mesurer et caractériser un signal ou un système	~70		~14
BUT2 RT	R305 - Chaîne de transmissions numériques	~42	~28	~14
BUT2 RT	SAE31 - Mettre en œuvre un système de transmission	~28		~14
BUT2 RT	R404 - Réseaux cellulaires	~42	~28	~14

Matières enseignées de 2013 à 2021 (ancien PPN)

Niveau	Matière	Effectif CM	TD	TP
DUT1 RT	Initiation à la mesure du signal	~70	~28	~14
DUT1 RT	Acquisition et codage de l'information	~70	~28	~14
DUT1 RT	Principe des transmissions radio	~70	~28	~14
DUT1 RT	Chaîne de transmission numérique	~70	~28	
DUT1 RT	Adaptation et méthodologie pour la réussite Universitaire		~28	~14
DUT2 RT	Réseaux cellulaires	~50	~28	~14
DUT2 RT	Automatisation des tâches d'administration			~14
LP RT	Téléphonie Mobile	~16	~16	~16
LP RT	Codage et compression de données multimédia	~16	~16	~16

Matières enseignées de 2006 à 2013 (ancien ancien PPN)

Niveau	Matière	Effectif CM	TD	TP
DUT1 RT	Signaux et systèmes	~70	~28	~14
DUT1 RT	Chaîne de transmission numérique			~14
DUT1 RT	Téléphonie			~14
DUT2 RT	Réseaux cellulaires	~50	~28	~14
LP RT	Téléphonie Mobile	~16	~16	~16

LP RT	Codage et compression de données multimédia	~16	~16	~16
-------	---	-----	-----	-----

SYNTHÈSE DE MON ACTIVITÉ DE RECHERCHE

Depuis le début de ma carrière, ma recherche est principalement dédiée au *traitement de la géométrie 3D : analyse multirésolution, compression et simplification de maillages surfaciques (statiques et dynamiques) et volumiques, remaillage, ré-échantillonnage de surfaces ou de nuages de points 3D, reconstruction 3D, recalage, etc.*

Beaucoup de mes travaux ont été menés en collaboration avec Marc Antonini, notamment lors de la **supervision de 4 thèses** (Aymen Kammoun [[Kam11](#)], de 2007 à 2011; Jean-Luc Peyrot [[Pey14](#)], de 2011 à 2014; Arnaud Bletterer [[Ble18](#)], de 2014 à 2018; Lauriane Bouard [[Bou21](#)] de 2018 à 2021). Certaines contributions ont aussi été obtenues lors de stages.

Une majorité de ces travaux a été aussi menée en collaboration avec des chercheurs extérieurs dans le cadre de nombreux projets auxquels j'ai participé : Basile Sauvage (MCF, Icube, Strasbourg), Franck Hétroy (MCF, LJK, Grenoble), Cédric Gérot (MCF, LIS, Grenoble), Céline Roudet (MCF, Lezi, Dijon), Olivier Auberton (MCF HDR, Lezi), Frédéric Truchetet (PU, Lezi), Vincent Daval (PhD, Lezi), Laurent Duval (IR, R&D IFPEN), Sébastien Schneider (IR, R&D IFPEN), Thomas Maugey (CR INRIA Bretagne Atlantique), Dominique Douguet (IPMC)... Durant ces projets, j'ai aussi eu l'occasion de collaborer avec deux entreprises (Noomeo, fabricant de scanners 3D et Cintoo, développeur de solutions pour la gestion de données 3D massives), avec l'IFPEN (Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles, établissement public national à caractère industriel et commercial), ainsi qu'avec le Centre Hospitalier Universitaire de Nice.

Depuis le début de ma carrière, j'ai publié **1 chapitre d'ouvrage** [[PA10](#)], **10 articles de revues internationales** indexés JCR [[PA06](#); [PA05a](#); [BPA20](#); [DP20](#); [Pey+19](#); [PPA16b](#); [PA07](#); [PPA15](#); [KPA12](#); [PRS15](#)], communiqué dans **34 conférences internationales** (parmi lesquels Eurographics, SGP, IEEE SMI, IEEE ICASSP, IEEE ICIP, EUSIPCO...) et **16 conférences nationales** (principalement GRETSI et CORESA). J'ai aussi publié 2 articles dans un workshop pédagogique [[FP14](#); [MP14](#)]. Enfin, j'ai participé au dépôt de **2 brevets internationaux** [[Ant+17](#); [HF+14](#)].

Tout ceci est détaillé dans la suite de ce chapitre.

4.1 ENCADREMENT DE DOCTORANTS (4)

2018 - 2021 Lauriane BOUARD

Titre Progressive Compression of large evolutionary volume meshes for geosciences.

Taux 33%. Directeur de thèse : Marc Antonini (I3S); coencadrant : Laurent Duval (IFPEN).

Publications - 1 revue internationale (indexées JCR) avec comité de lecture
- 2 conférences internationales avec actes et comité de lecture
- 2 conférences nationales avec actes et comité de lecture

Devenir R&D chez EDF.

2014 - 2018 Arnaud BLETTERER

Titre Une approche basée graphes pour la modélisation et le traitement de nuages de points massifs issus d'acquisitions de LiDARs terrestres.

Taux 75%. Directeur de thèse : Marc Antonini (I3S).

Publications - 1 revue internationale (indexées JCR) avec comité de lecture
- 4 conférences internationales avec actes et comité de lecture
- 3 conférences nationales avec actes et comité de lecture

Devenir Ingénieur R&D chez Quantificare (Sophia Antipolis).

2011 - 2014 Jean-Luc PEYROT

Titre Optimisation de la chaîne de numérisation 3D : de la surface au maillage semi-régulier.

Taux 75%. Directeur de thèse : Marc Antonini (I3S).

Publications - 2 revues internationales (indexées JCR) avec comité de lecture
- 4 conférences internationales avec actes et comité de lecture
- 4 conférences nationales avec actes et comité de lecture

Devenir Post-doctorant IFPEN (2015-2016).

2007 - 2011 Aymen KAMMOUN

Titre Contributions au domaine de l'analyse multirésolution de maillages surfaciques semi-réguliers. Application à la compression géométrique.

Taux 75%. Directeur de thèse : Marc Antonini (I3S).

Publications - 1 revue internationale (indexées JCR) avec comité de lecture
- 5 conférences internationales avec actes et comité de lecture
- 2 conférences nationales avec actes et comité de lecture

Devenir Ingénieur ColibriWithUs, Paris.

4.2 ENCADREMENT DE POST-DOCTORANTS (2)

- 2019 – 2020 Co-encadrement de Thomas FISICHELLA, Ingénieur de recherche dans le cadre du Projet SUGAR. Taux d'encadrement : 50%.
- 2015 - 2016 Co-encadrement de Jean-Luc PEYROT. Collaboration avec l'IFPEN. Taux d'encadrement : 30%.

4.3 ENCADREMENT DE STAGIAIRES 4ÈME OU 5ÈME ANNÉE (18)

J'ai encadré 5 stages de 4ème année Ingénieur, et 13 de 5ème année (Master ou Ingénieur) depuis 2006.

4.4 PROJETS DE RECHERCHE

- 2022** **Projet UCA - CSI : SenSaaS-Bioisostere** (*Matching Shapes for Ligand-Based Drug Design*) - Budget : 10k€.
- Rôle Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 2.
- Sujet L'objectif est de continuer à développer le logiciel SENSaaS (voir plus bas). Collaboration avec Dominique Douguet (IPMC, UCA-CNRS).
-
- 2020 - ...** **Projet de Maturation SATT Sud-Est : SUGAR 2** - Budget : 70k€
- Rôle Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 3.
- Sujet Suite du projet de prématuration IDEX UCAjedi SUGAR.
-
- 2019 – 2020** **Projet de Prématuration IDEX UCAjedi (ANR-15-IDEX-01) : SUGAR** (*SUTuring Guided by Augmented Reality*) - Budget : 52,5k€
- Rôle Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 4.
- Sujet L'objectif était de proposer une solution de réalité augmentée dédiée à la suture des plaies pour aider le praticien dans la réalisation de ce geste. Collaboration avec le CHU de Nice. Encadrement d'un post-doctorant.
-
- 2019 - 2021** **Projet IDEX UCAjedi (ANR-15-IDEX-01) : SenSaaS** (*Sensitive surface as a shape*) - Budget : 24k€.
- Financement de stages de Master en binômes interdisciplinaires.
- Rôle Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 2.
- Sujet L'objectif était de développer un algorithme de recherche de similarité géométrique entre structures 3D moléculaires. Collaboration avec Dominique Douguet (IPMC, UCA-CNRS).

Publications relatives	1 revue internationale [DP20], 1 conférence nationale [DP21], 1 rapport de recherche en accès libre [DP19].
2018	Projet Fondation UCA : ASUR (Augmented Reality for SURgical Suturing) - Budget : 8k€
Rôle	Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 3.
Sujet	L'objectif était de développer une application de réalité augmentée qui offre au chirurgien une cartographie 3D personnalisée des structures anatomiques en temps réel. Collaboration avec un praticien du Centre Hospitalier Universitaire de Nice.
2016 - 2018	Projet exploratoire du GDR ISIS : Icon3D (Interactive coding of 3D scenes) - Budget : 7k€.
Rôle	Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 4.
Sujet	L'objectif était d'étendre une méthode de codage interactif pour vidéos multi-vues aux objets 3D pour la navigation dans des environnements 3D. Collaboration avec Thomas Maugey (CR INRIA Rennes Bretagne Atlantique).
Publications relatives	2 conférences internationales [Nas+19b][Mah+19], et 1 conférence nationale [Nas+19a].
2014-...	Projet collaboratif avec l'IFPEN (Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles).
Rôle	Collaboration active avec notamment Laurent Duval (IR, R&D), durant un contrat post-doctoral (2015-2016) et un encadrement de thèse (Lauriane Bouard, 2018-2021).
Sujet	Traitement de maillages volumiques spécifiques aux géosciences.
Publications relatives	1 brevet international [Ant+17], 1 article dans une revue internationale [Pey+19], 3 communications dans des conférences internationales [Pey+16, Bou+19a, Bou+19b], et 3 communications dans des conférences nationales [Pay+17, Bou+18, Bou+21].
2012 - 2015	Projets exploratoire région PACA : Scan3D - Budget : 38k€.
Rôle	Co-Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 4.
Sujet	L'objectif de ce projet était d'améliorer la qualité de service de bout en bout d'une chaîne de numérisation 3D, en simplifiant radicalement la création et la manipulation de modèles numériques 3D.
2011 - 2014	Projet collaboratif : Creactive 3D
Rôle	Collaborateur. Nombre de personnes impliquées : 6.

Sujet Projet collaboratif entre 2 laboratoires CNRS (Lezi et I3S) et 1 entreprise (Noomeo). Durant ce projet, j'ai collaboré avec Olivier Aubreton (MCF HDR Lezi), Frédéric Truchetet (PU Lezi) et Vincent Daval (PhD, Lezi). La thèse de Jean-Luc Peyrot que j'ai codirigée s'intégrait dans ce projet.

2010 - 2011 **Projet jeunes chercheurs GDR ISIS : CTAM-3D** (Compression et transmission adaptatives de maillages 3D) - Budget : 4k€.

Rôle Collaborateur. Nombre de personnes impliquées : 3.

Sujet Collaboration avec Basile Sauvage (MCF, Icube, Strasbourg) et Céline Roudet (MCF, Lezi, Dijon) qui a conduit à l'élaboration d'un cours pour une école thématique en 2013, à la publication d'un *survey* pour *Computer Graphics Forum* [PRS15], et une invitation à la conférence *Eurographics* [PRS16] pour une présentation STAR.

2007 - 2009 **Projet jeunes chercheurs GDR ISIS : AMOA-3D** (Analyse Multirésolution d'Objets 3D Animés) - Budget : 4k€.

Rôle Porteur du projet. Nombre de personnes impliquées : 4.

Sujet Collaboration avec Basile Sauvage (MCF, Icube, Strasbourg), Franck Hétroy (MCF, LJK, Grenoble) et Cédric Gérot (MCF, LIS, Grenoble) sur la décomposition multi-échelle de maillages surfaciques dynamiques.

4.5 COLLABORATIONS INDUSTRIELLES

2014 - 2018 **Collaboration avec l'entreprise Cintoo** sur la thématique « reconstruction de surfaces à partir de nuages de points denses », notamment durant la thèse d'Arnaud Bletterer, et le dépôt d'un brevet international [HF+14].

2011 - 2014 **Collaboration avec l'entreprise Noomeo** sur la thématique « reconstruction semi-régulière de surfaces » dans le cadre du projet CreActive 3D et de la thèse de Jean-Luc Peyrot.

4.6 ORGANISATION DE CONFÉRENCES ET COMITÉ DE PROGRAMME

2021 **Co-organisateur JFIG 2021** (Journées Françaises d'Informatique Graphique 2021), Novembre 2021, Sophia Antipolis, France.

2021 **Co-organisateur du Colloque CORESA 2021** (COmpression et REpresentation des Signaux Audiovisuels), Novembre 2021, Sophia Antipolis, France.

Je suis aussi **Membre du Comité de Programme du Colloque CORESA** (COmpression et REpresentation des Signaux Audiovisuels) depuis 2017, et **Membre**

du Comité de Programme de la conférence internationale 3DIA (3D Imaging & Applications) pour Electronic Imaging depuis 2016.

4.7 ANIMATION SCIENTIFIQUE

J'ai été **co-responsable de l'Action de Recherche Maillages et animations 3D pour le GDR ISIS** de 2009 à 2015. Dans ce contexte, j'ai organisé **5 colloques** (*De l'acquisition à la compression des objets 3D*). J'ai aussi participé en 2012 à l'**organisation scientifique** de la 7ème **École d'Été annuelle en traitement du signal et des images** du GRETSI.

4.8 EXPERTISE NATIONALE

J'ai effectué **2 expertises CIFRE pour l'ANRT** (Association nationale de la recherche et de la technologie) en 2018 et 2020. J'ai opéré **3 expertises scientifique pour l'ANR** : en 2016 et 2017 pour le Programme ASTRID (Accompagnement spécifique des travaux de recherches et d'innovation défense), en 2013 pour le Programme CONTINT (Contenus numériques et interactions).

4.9 PARTICIPATION À DES JURYS DE THÈSE

- 2014 **Examineur** pour la thèse de Vincent Daval, dirigée par Olivier Aubreton et Frédéric Truchetet : *Chaîne 3D Interactive*. Laboratoire LE2I, Université de Bourgogne, Le Creusot.
- 2014 **Examineur** pour la thèse de Vincent Vidal, dirigée par Florent Dupont et Christian Wolf : *Développement de modèles graphiques probabilistes pour analyser et remailler les maillages triangulaires 2-variétés*. Laboratoire LIRIS, INSA, Lyon.

4.10 PARTICIPATION À DES COMITÉS DE SÉLECTION

- 2014 **Poste de MCF n°0524(27)**, Université de Lorraine, Laboratoire LORIA.
- 2014 **Poste de MCF n°2758(27)**, Université d'Aix Marseille, Laboratoire LSIS.

4.11 INVITATIONS CONFÉRENCES ET ECOLE D'ÉTÉ

- 2016 **Invited talk Eurographics, State of the art report**. Présentation de [PRS15].
- 2013 **Dispense d'un cours à l'École Analyse Multirésolution pour l'image**, avec Céline Roudet (Lezi) et Basile Sauvage (iCube).

PRÉSENTATION DE MES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE

Ce chapitre retrace de manière chronologique et quasi exhaustive mes thématiques de recherche depuis 2006. Pour chaque thématique abordée, j'explique le contexte dans lequel s'est effectuée cette recherche (encadrement de thèse, projet...), la motivation, les principales contributions, et les publications relatives.

Certaines thématiques seront approfondies dans les chapitres suivants.

5.1 COMPRESSION GÉOMÉTRIQUE DE MAILLAGES SURFACIQUES

J'ai travaillé sur cette thématique durant la thèse d'Ayemen Kammoun [Kam11] (2007-2011), dans la continuité de mon travail de thèse. Notre contribution a été une méthode pour optimiser deux transformées en ondelettes pour maillages surfaciques. L'objectif était d'adapter l'analyse multirésolution aux caractéristiques du maillage d'entrée, afin d'améliorer le codage de la géométrie. Notre algorithme détermine à chaque niveau de résolution un opérateur de prédiction P minimisant la norme L_1 des coefficients d'ondelettes. L'opérateur de mise à jour (*update*) U est ensuite recalculé afin de prendre en compte les modifications apportées à P . Grâce à cet algorithme, nous augmentons les performances des compresseurs géométriques pour maillages semi-réguliers [KPA11b; KPA11c; KPA12].

5.2 COMPRESSION POUR MAILLAGES SURFACIQUES ANIMÉS

J'ai étudié la compression de maillages surfaciques animés durant la thèse d'Ayemen Kammoun, mais aussi dans le cadre du projet AMOA3D (2007-2009, voir plus haut). Ce travail s'est fait dans la continuité du travail effectué durant mon année d'ATER, année durant laquelle j'ai développé une méthode de compression pour maillages animés basée sur un schéma d'analyse temporelle [PA07]. Notre contribution a été une approche originale pour compresser les maillages animés, combinant un remailleur semi-régulier, un schéma d'analyse spatio-temporelle et une allocation binaire [PKA08; KPA09]. Dans ce contexte, j'ai aussi collaboré avec des chercheurs du groupe ARTEMIS de l'Institut Télécoms SudParis, à savoir Khaled Mamou (PhD), Titus Zaharia (MCF) et Françoise Prêteux (PU), pour proposer deux optimisations de FAMC (standard de compression pour maillages 3D animés intégré dans MPEG-4) [Mam+08].

5.3 REMAILLAGE SEMI-RÉGULIER DE SURFACES

J'ai abordé cette thématique pour la première fois durant la thèse d'Ayemen Kamoun. Ma première contribution a été un remaillieur semi-régulier pour maillages triangulaires (Figure 1) basé sur un partitionnement de Voronoï construit progressivement [KPA10; KPA11a]. Cette technique a ensuite été optimisée, puis brevetée [HF+14].

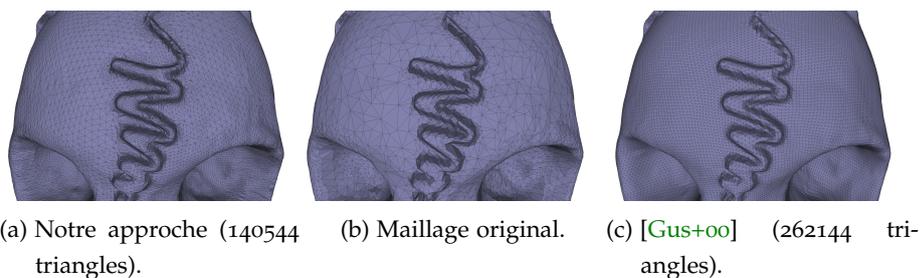


FIGURE 1 – SKULL (b) remaillé avec notre approche (a), et avec [Gus+00] (c).

Ma deuxième contribution a été la publication d'un *survey* sur le remaillage semi-régulier dans le journal *Computer Graphics Forum* [PRS15] dans le cadre du projet CTAM3D (2010-2011, voir plus haut). Ce *survey* nous a permis d'être invité à une session STAR à *Eurographics* en 2016 [PRS16].

5.4 NUMÉRISATION 3D

J'ai abordé cette thématique durant le projet CREACTIVE 3D, projet collaboratif entre mon équipe de recherche, le laboratoire Lezi et la société Noomeo, fabricant français de scanners 3D (2011-2014) : voir plus haut. L'objectif du projet était de simplifier la longue et fastidieuse chaîne de création de maillages semi-réguliers à partir d'objets physiques scannés : acquisition physique (création d'un nuage de points dense), nettoyage (suppression des points redondants et du bruit inhérent au processus d'acquisition), maillage (création d'un maillage triangulaire irrégulier), remaillage semi-régulier.

5.4.1 Ré-échantillonnage de surfaces

Ma première contribution durant ce projet, obtenue durant la thèse de Jean-Luc Peyrot, a été une technique de ré-échantillonnage de maillages triangulaires prenant en compte les saillances des objets afin d'assurer une bonne distribution des échantillons le long de celles-ci (Figure 2) [PPA13b; PPA13c; PPA15; PPA16a].

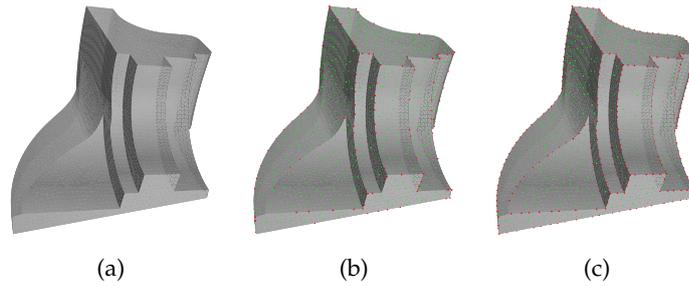


FIGURE 2 – Ré-échantillonnage de FANDISK (a) à l’aide d’une distribution en disques de Poisson naïve (b), et avec notre méthode (c).

Ma deuxième contribution a été une technique de simplification de surfaces pour objets de type conception assistée par ordinateur (CAO) [PPA14a; PPA13d]. En combinant la technique d’échantillonnage introduite auparavant avec un partitionnement de Voronoï contraint pour préserver les saillances, nous produisons des maillages simplifiés qui présentent à la fois une bonne qualité spectrale et une fidélité géométrique à la surface initiale (Figure 3).

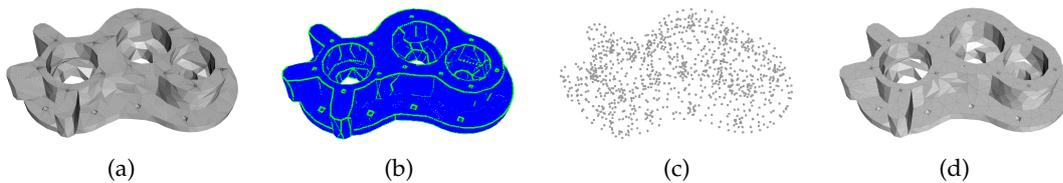


FIGURE 3 – Simplification d’objets 3D de type CAO [PPA14a; PPA13d].

5.4.2 Reconstruction 3D semi-régulière

Ma troisième contribution au domaine de la numérisation 3D fut une technique de reconstruction 3D permettant de générer des maillages semi-réguliers directement à partir d’images stéréoscopiques (Figure 4) [Pey+14; PPA14b; PPA16b]. L’intérêt d’avoir choisi ce type de données était d’intégrer notre algorithme dans le scanner à vision stéréoscopique développé par la société *Noomeo*.

5.5 TRAITEMENT DE NUAGES DE POINTS 3D MASSIFS

J’ai commencé à travailler sur les nuages de points 3D durant la thèse d’Arnaud Bletterer [Ble18] (2014-2018). Nous nous sommes intéressés aux nuages de points 3D générés à l’aide de lidars, données utilisées par la société Cintoo partenaire de

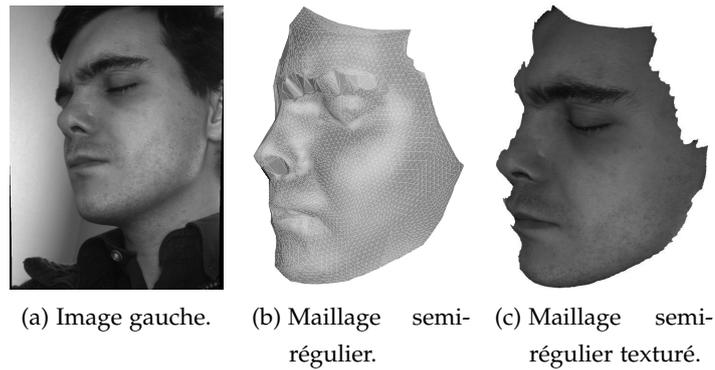


FIGURE 4 – Reconstruction 3D semi-régulière d'un visage [PPA16b].

cette thèse. L'objectif était de développer un ensemble d'outils permettant de visualiser des nuages de points gigantesques (jusqu'à plusieurs milliards de points) qui peuvent largement dépasser les capacités des machines standards. L'idée de départ a été de traiter non pas les nuages de points dans l'espace 3D, mais plutôt les cartes de profondeur associées, générées durant l'acquisition. Cela a un double avantage : i) on utilise les cartes de profondeur comme des domaines de paramétrisation 2D des points 3D, simplifiant ainsi la navigation sur la surface sous-jacente aux nuages ; ii) on peut traiter les points 3D carte après carte, réduisant l'empreinte mémoire.

5.5.1 Compression de nuages de points 3D

Nous avons d'abord étudié la possibilité de compresser un nuage de points en traitant la carte de profondeur associée [BPA16]. L'intérêt est de pouvoir appliquer des méthodes de compression d'images 2D standard (Figure 5).

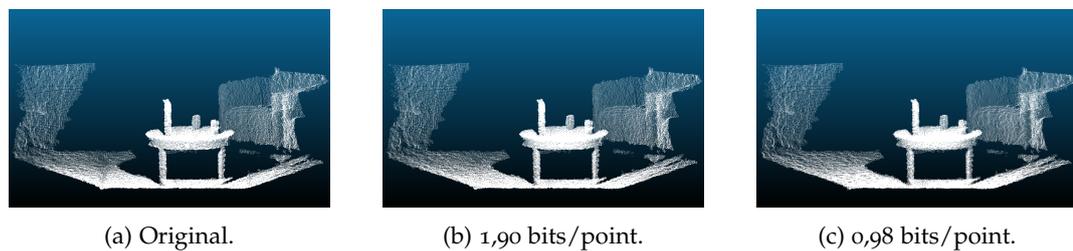


FIGURE 5 – Nuage de points 3D compressé *via* JPEG2000 [Jpe][BPA16].

5.5.2 Reconstruction 3D à partir d'une carte de profondeur

Nous avons ensuite exploré la possibilité de travailler sur les cartes de profondeur dans un contexte de reconstruction 3D, en partenariat avec Cintoo. Nous avons développé une méthode qui commence par générer un diagramme de Voronoï de la surface sous-jacente à un nuage de points en travaillant sur la carte de profondeur associée [Ble+17]. A partir de ce diagramme, la surface est obtenue de manière classique, par triangulation duale, puis par projection 3D (Figure 6).

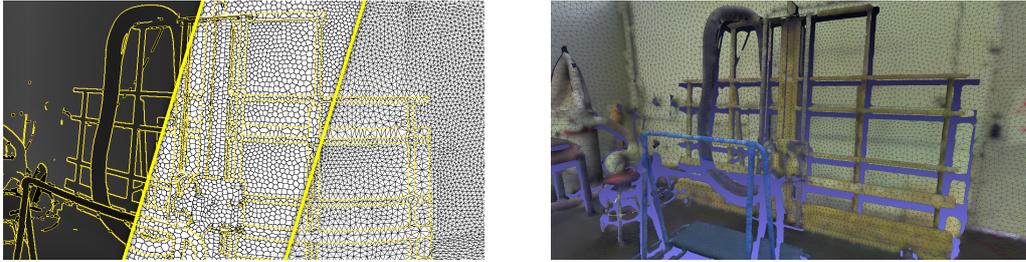


FIGURE 6 – Reconstruction de surfaces à partir d'une carte de profondeur [Ble+17].

5.5.3 Structuration de nuages de points 3D à l'aide de graphes locaux

Pour généraliser cette approche à des nuages 3D obtenus par fusion de plusieurs acquisitions, nous avons ensuite proposé une structure originale [BPA19b; BPA20] s'appuyant sur les cartes de profondeur (voir Figure 7). Notre structure est un ensemble de graphes locaux, chaque graphe étant construit à partir d'une carte de profondeur. Les graphes sont interconnectés *via* les zones de recouvrement. Ainsi nous obtenons une structure globalement cohérente et on peut traiter la surface sous-jacente au fil de l'eau, graphe par graphe.

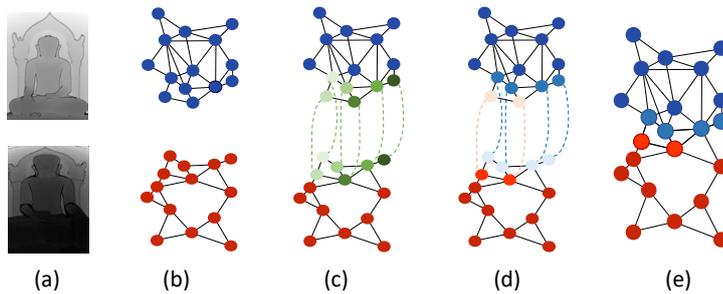


FIGURE 7 – Stratégie proposée dans [BPA20] pour structurer un nuage de points 3D à partir de plusieurs cartes de profondeur.

5.5.4 Ré-échantillonnage out-of-core de nuages de points 3D

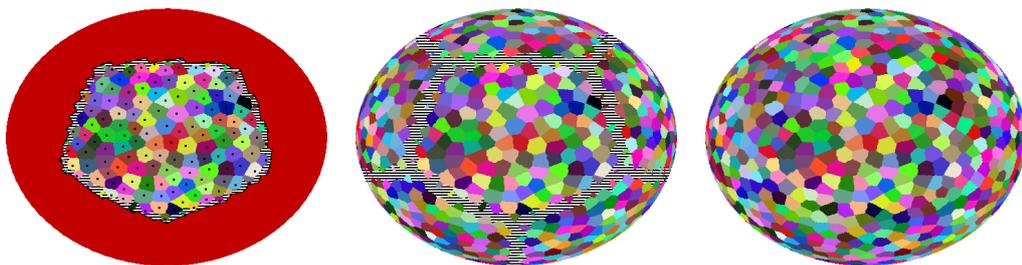
Nous avons ensuite développé un algorithme de génération de distribution en disques de Poisson basé sur cette structure, permettant de ré-échantillonner au fil de l'eau des nuages constitués de plusieurs milliards de points [Ble+18a ; Ble+18b ; BPA19a ; BPA20]. Cette application est particulièrement intéressante pour la simplification et la visualisation de scènes 3D étendues : le ré-échantillonnage nous permet de réduire drastiquement le nombre de points tout en contrôlant la qualité visuelle des données numérisées (Figure 8).



FIGURE 8 – Ré-échantillonnage (155 millions de points) d'un site de 40 000m² [BPA20]. Données initiales : 5,3 milliards de points.

5.5.5 Partitionnement de nuages de points 3D

En utilisant notre structure basée graphes, nous avons aussi développé un algorithme générant des diagrammes de Voronoï sur la surface sous-jacente des nuages de points [BPA22]. Le principe général (voir Figure 9) est de construire un diagramme de Voronoï partiel par graphe local, de les fusionner et ensuite de les mettre à jour dans les zones communes. Des diagrammes de Voronoï centroïdaux peuvent également être obtenus par relaxation.



(a) Diagramme de Voronoï partiel. (b) Fusion de tous les diagrammes partiels. (c) Mise à jour dans les zones communes.

FIGURE 9 – Calcul d'un diagramme de Voronoï global à partir d'un ensemble de graphes locaux interconnectés [BPA22].

5.6 TRAITEMENT DES MAILLAGES VOLUMIQUES SPÉCIFIQUES AUX GÉOSCIENCES

Je travaille sur cette thématique depuis 2014, en collaboration avec l'IFPEN (voir plus haut). En géosciences, les maillages, bien que hexaédriques et réguliers de part leur topologie, sont difficiles à traiter car ils peuvent contenir des discontinuités géométriques (pour modéliser les failles), des cellules potentiellement inactives (pour modéliser par exemple des grottes), mais aussi de nombreuses propriétés physiques associées aux cellules (température, type de roche, porosité, etc.). Aucune méthode de compression de l'état de l'art n'était adaptée à ces maillages spécifiques. De plus, la décomposition multi-échelle est particulièrement délicate.

5.6.1 Décomposition multi-échelle de maillages volumiques spécifiques aux géosciences

Entre 2015 et 2016, nous avons développé HEXASHRINK, une méthode de décomposition multi-échelle prenant en compte toutes les spécificités des maillages volumiques propres aux géosciences (Figure 10) [Pey+16; Pay+17; Bou+18; Pey+19]. Cette décomposition associe plusieurs transformées en ondelettes, chacune étant capable de gérer un type de données constituant les maillages. Notre décomposition est imbriquée et parfaitement réversible. Une des fonctions d'HEXASHRINK a fait l'objet d'un brevet international [Ant+17].

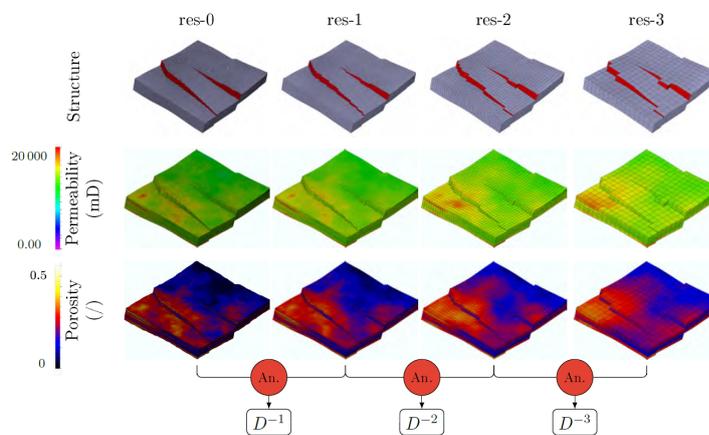


FIGURE 10 – Décomposition HEXASHRINK [Bou21].

5.6.2 Simulation sur des données à précision variable

Durant la thèse de Lauriane Bouard [Bou21] (2018-2021), nous avons étudié la possibilité de faire tourner des simulations sur des maillages décomposés avec HEXASHRINK. En combinant HEXASHRINK à un codeur progressif de type *zerotree*,

nous avons montré qu'il était possible de faire tourner des simulations d'écoulements sous-terrains au travers de maillages hexaédriques partiellement décodés produisant des résultats similaires à ce que nous aurions obtenu sur le maillage original [Bou+19a ; Bou+19b ; Bou+21].

5.7 CODAGE INTERACTIF POUR LA NAVIGATION DANS DES SCÈNES 3D

Entre 2016 et 2018, j'ai collaboré avec Thomas Maugey et Aline Roumy, respectivement CR et DR au Centre Inria Rennes - Bretagne Atlantique, dans le cadre du projet exploratoire ICON3D financé par le GDR ISIS. Le thème du projet était le codage interactif pour la navigation dans des scènes 3D. Dans ce contexte, les objets 3D sont généralement texturés. Pour obtenir ce rendu, on plaque des morceaux de texture issus de ce que l'on appelle un atlas de texture 2D (voir Figure 11).

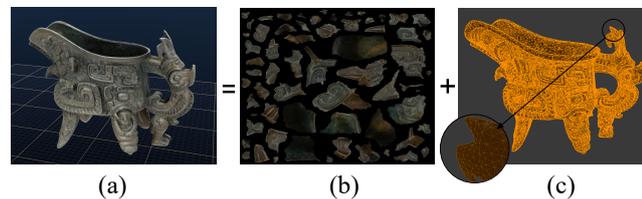


FIGURE 11 – Exemple de modèles 3D réaliste, obtenu en "plaquant" une information de texture sur un maillage triangulaire [Nas+19b].

Un atlas est souvent compressé avec un codeur d'images 2D conventionnel, sans tenir compte des informations géométriques et topologiques. Durant ce projet, nous avons proposé une méthode de compression pour atlas de texture [Nas+19a ; Nas+19b], basé sur HEVC. L'idée est de considérer la topologie du maillage pour prédire spatialement l'information de texture 2D avant l'encodage, plutôt que d'appliquer naïvement la prédiction par blocs 2D proposé par HEVC sur l'atlas de texture. Ainsi nous prédisons mieux la texture, et nous améliorons les performances du codeur intra de HEVC (voir Figure 12). Nous avons aussi montré [MB+19] qu'en adaptant le parcours parmi les triangles du maillage, il était possible de ne transmettre que les informations nécessaires d'un point de vue donné (voir Figure 13), autorisant ainsi l'accès aléatoire aux données pour un surcoût binaire raisonnable.

5.8 RECHERCHE DE SIMILARITÉ GÉOMÉTRIQUE ENTRE STRUCTURES 3D MO-LÉCULAIRES

Depuis 2018, je collabore avec Dominique Douguet, chemo-informaticienne à l'IPMC (UCA-CNRS), pour développer des nouvelles méthodes de recherche de

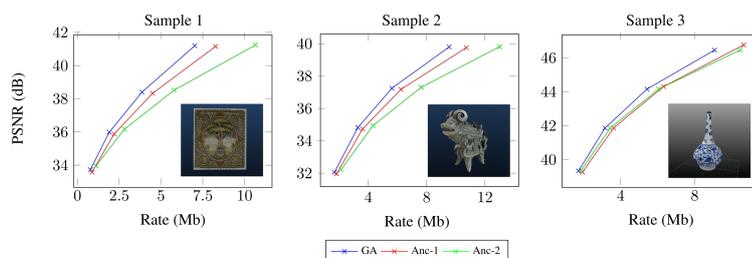


FIGURE 12 – Courbes débit-PSNR de l’algorithme proposé (GA) vs deux configurations de référence [Nas+19b].



FIGURE 13 – Ce que l’on voit d’un point de vue donné (au centre), et les blocs de texture correspondant dans l’atlas (droite) [MB+19].

similarité géométrique entre structures moléculaires. L’idée de départ était de s’inspirer des méthodes de recalage de nuages de points 3D pour retrouver des similitudes entre surfaces moléculaires. Lors du projet interdisciplinaire SENSaaS, financé par l’IDEX UCAjedi, nous avons développé un algorithme complet (voir Figure 14) [DP20; DP21; DPG21] capable de trouver des structures moléculaires 3D qui se ressemblent géométriquement, aussi chimiquement. Le code est disponible sur [GitHub](#).

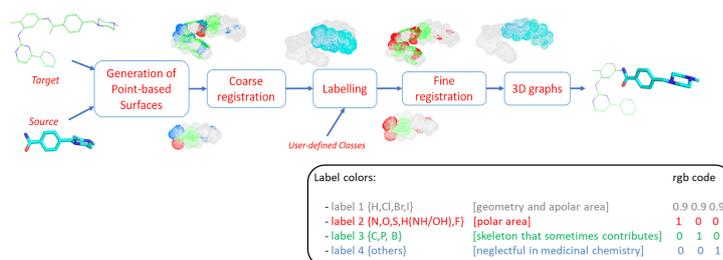


FIGURE 14 – Vue d’ensemble de notre algorithme SENSaaS [DP20].

LISTE COMPLÈTE DE MES PUBLICATIONS

ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LECTURE (10)

- [BPA20] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « A local graph-based structure for processing gigantic aggregated 3D point clouds ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* (déc. 2020), p. 1-1 (cf. p. 11, 21, 22, 55, 67, 110).
- [DP20] D. DOUGUET et F. PAYAN. « SenSaaS : Shape-based Alignment by Registration of Colored Point-based Surfaces ». In : *Mol. Inf.* (juin 2020) (cf. p. 11, 25, 81, 97, 111).
- [Pey+19] J.-L. PEYROT, L. DUVAL, F. PAYAN, L. BOUARD, L. CHIZAT, S. SCHNEIDER et M. ANTONINI. « HexaShrink, an exact scalable framework for hexahedral meshes with attributes and discontinuities : multiresolution rendering and storage of geoscience models ». In : *Computat. Geosci.* 23.4 (août 2019), p. 723-743 (cf. p. 11, 23, 81, 83, 88).
- [PPA16b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « From stereoscopic images to semi-regular meshes ». In : *Signal Process. Image Comm.* 40 (jan. 2016), p. 97-110 (cf. p. 11, 19, 20, 47).
- [PRS15] F. PAYAN, C. ROUDET et B. SAUVAGE. « Semi-Regular Triangle Remeshing : A Comprehensive Study ». In : *Comput. Graph. Forum* 34.1 (2015), p. 86-102 (cf. p. 11, 18, 40).
- [PPA15] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Direct Blue Noise resampling of meshes of arbitrary topology ». In : *Vis. Comput.* 31.10 (oct. 2015), p. 1365-1381 (cf. p. 11, 18, 55, 57, 60, 62).
- [KPA12] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Sparsity-based optimization of two lifting-based wavelet transforms for semi-regular mesh compression ». In : *Comput. Graph.* 36.4 (mars 2012), p. 272-282 (cf. p. 11, 17, 40).
- [PA07] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Temporal Wavelet-based Geometry Coder for 3D Animated models ». In : *Comput. Graph.* 31.1 (jan. 2007), p. 77-88 (cf. p. 11, 17).

[PA06] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Mean Square Error Approximation for Wavelet-based Semiregular Mesh Compression ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 12.4 (mai 2006), p. 649-657 (cf. p. 11).

[PA05a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « An Efficient Bit Allocation for Compressing Normal Meshes with an Error-driven Quantization ». In : *Comput. Aided Geomet. Des.* 22.5 (juill. 2005), p. 466-486 (cf. p. 11, 37, 41).

ARTICLES DANS DES REVUES NATIONALES À COMITÉ DE LECTURE (1)

[RP11] C. ROUDET et F. PAYAN. « Remaillage semi-régulier pour les maillages surfaciques triangulaires : un état de l'art ». In : *Rev. Elec. Franc. Info. Graph.* 5.1 (2011), p. 27-40.

CHAPITRES D'OUVRAGES (1)

[PA10] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Compression of Surface Meshes ». In : *Biomedical Diagnostics and Clinical Technologies : Applying High-Performance Cluster and Grid Computing*. IGI Global Publishing (Eds. : M. Pereira and M. Freire), juill. 2010 (cf. p. 11).

BREVETS (2)

[Ant+17] M. ANTONINI, F. PAYAN, S. SCHNEIDER, L. DUVAL et J.-L. PEYROT. « Method of exploitation of hydrocarbons of an underground formation by means of optimized scaling ». Brev. 20170344676. 2017 (cf. p. 11, 23, 81, 88).

[HF+14] L. HIDD FONTELES, A. MEFTAH, M. ANTONINI et F. PAYAN. « Method, System and Computer Program Product for 3D objects graphical representation ». Brev. 4152728.3-1502. 2014 (cf. p. 11, 15, 18, 46).

CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC ACTES ET COMITÉ DE LECTURE (34)

[BPA22] A. BLETERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Graph-based Computation of Voronoi Diagrams on Large-scale Point-based Surfaces ». In : *Proc. Eurographics Conf. Short papers*. Reims, France, avr. 2022 (cf. p. 22, 76, 77, 110).

[Bou+19a] L. BOUARD, L. DUVAL, C. PREUX, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Lossless progressive compression of meshes for upscaling and upgridding in

- reservoir simulation with HexaShrink ». In : *Proc. EAGE Conf. Tech. Exhib.* London, UK, juin 2019 (cf. p. 24, 81).
- [Bou+19b] L. BOUARD, L. DUVAL, C. PREUX, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Refinable-precision in mesh compression for upscaling and upgridding in reservoir simulation with HexaShrink ». In : *Ring Meeting*. Nancy, France, sept. 2019 (cf. p. 24, 81).
- [MB+19] N. MAHMOUDIAN BIDGOLI, T. MAUGEY, A. ROUMY, F. NASIRI et F. PAYAN. « A Geometry-aware compression of 3D mesh texture with random access ». In : *Proc. Pict. Coding Symp.* Ningbo, China, nov. 2019, p. 1-5 (cf. p. 24, 25).
- [Nas+19b] F. NASIRI, N. MAHMOUDIAN BIDGOLI, F. PAYAN et T. MAUGEY. « A Geometry-aware framework for compressing 3D mesh textures ». In : *Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* Brighton, England, mai 2019 (cf. p. 24, 25).
- [Ble+18a] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « Out-of-core Resampling of Gigantic Point Clouds ». In : *Proc. Eurographics Symp. Geom. Process.* Paris, France, 2018 (cf. p. 22).
- [Ble+18b] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « Towards the reconstruction of wide historical sites : A local graph-based representation to resample gigantic acquisitions ». In : *Eurographics Workshop on Graph. and Cult. Herit.* Vienna, Austria, nov. 2018, p. 1 -9 (cf. p. 22).
- [BPA16] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Point cloud compression using depth-maps ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San Francisco, USA, fév. 2016 (cf. p. 20).
- [PPA16a] F. PAYAN, J.-L. PEYROT et M. ANTONINI. « Blue noise Sampling of surfaces from stereoscopic images ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San Francisco, USA, fév. 2016 (cf. p. 18).
- [PRS16] F. PAYAN, C. ROUDET et B. SAUVAGE. « Semi-regular Triangle Remeshing : a Comprehensive Study ». In : *Proc. Eurographics Conf. State of The Art Report (STAR)*. Lisboa, Portugal, mai 2016 (cf. p. 18, 39).
- [Pey+16] J.-L. PEYROT, L. DUVAL, S. SCHNEIDER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Hexashrink : Multiresolution Compression of Large Structured Hexahedral Meshes with Discontinuities in Geosciences ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Phoenix, USA, sept. 2016, p. 1101-1105 (cf. p. 23, 81).
- [PPA14a] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Aliasing-free simplification of surface meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Paris, France, oct. 2014, p. 4677-4681 (cf. p. 19, 62, 65).

- [Pey+14] J.-L. PEYROT, F. PAYAN, N. RUCHAUD et M. ANTONINI. « Stereo reconstruction of semiregular meshes, and multiresolution analysis for automatic detection of dents on surfaces ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Paris, France, oct. 2014, p. 5417-5421 (cf. p. 19).
- [PPA13c] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Feature-preserving direct blue noise sampling for surface meshes ». In : *Proc. Eurographics Conf. Short papers.* Girona, Spain, mai 2013, p. 9-12 (cf. p. 18).
- [KPA11c] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Optimized butterfly-based lifting scheme for semi-regular meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Brussels, Belgium, sept. 2011, p. 1269-1272 (cf. p. 17).
- [KPA10] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Adaptive Semi-Regular Remeshing : A Voronoi-Based Approach ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2010, p. 5 (cf. p. 18, 39).
- [Mef+10] A. MEFTAH, A. ROQUEL, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Measuring Errors for Massive Triangle Meshes ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2010, p. 5.
- [Roq+10] A. ROQUEL, A. MEFTAH, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Measuring Errors for Huge Semi-regular Meshes ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San Diego, USA, jan. 2010.
- [KPA09] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Bit allocation for Spatio-temporal Wavelet Coding of Animated Semi-regular Meshes ». In : *Int. MultiMed. Modeling Conf.* France, jan. 2009 (cf. p. 17).
- [PMA09] F. PAYAN, F. MÉRIAUX et M. ANTONINI. « View-Dependent Geometry Coding Of 3D Scenes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Cairo, Egypt, nov. 2009.
- [Mam+08] K. MAMOU, T. ZAHARIA, F. PRÊTEUX, A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Two Optimizations of the MPEG-4 FAMC standard for Enhanced Compression of Animated 3D Meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Cairo, Egypt, 2008 (cf. p. 17).
- [PKA08] F. PAYAN, A. KAMMOUN et M. ANTONINI. « Remeshing and Spatio-Temporal Wavelet Filtering for 3D Animations ». In : *Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* Las Vegas, USA, avr. 2008 (cf. p. 17).
- [BCAP07] Y. BOULFANI-CUISINAUD, M. ANTONINI et F. PAYAN. « Motion-Based Mesh Clustering For MCDWT Compression Of 3D Animated Meshes ». In : *Proc. Eur. Sig. Image Proc. Conf.* Poznan, Poland, sept. 2007, p. 2105-2109.

- [BCPA07] Y. BOULFANI-CUISINAUD, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Temporal wavelet-based compression of 3D animated meshes using motion-based clustering ». In : *Proc. TAIMA*. Tunisia, mai 2007.
- [PHB07] F. PAYAN, S. HAHMANN et G.-P. BONNEAU. « Deforming surface simplification based on dynamic geometry sampling ». In : *Proc. Shape Modeling International*. Lyon, France, juin 2007, p. 71-80.
- [BCPA06] Y. BOULFANI-CUISINAUD, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Model-based Quality Control for the Compression of 3D Mesh Sequences with Fixed Connectivity ». In : *IEEE ISCCSP*. Morocco, mars 2006.
- [PA05b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « MSE Approximation for Model-based Compression of Multiresolution Semiregular Meshes ». In : *Proc. Eur. Sig. Image Proc. Conf.* Antalya, Turkey, sept. 2005 (cf. p. 37).
- [PA05c] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Wavelet-based Compression of 3D Mesh Sequences ». In : *ACIDCA-ICMI*. Tozeur, Tunisia, nov. 2005.
- [PBCA05] F. PAYAN, Y. BOULFANI-CUISINAUD et M. ANTONINI. « Temporal Lifting Scheme for the Compression of Animated Sequences of Meshes ». In : *IEEE Int. Work. Very Low Bitrate Vid. Coding*. Italy, sept. 2005.
- [PA04] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Model-based Bit Allocation for Normal Mesh Compression ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2004, p. 327-330.
- [PA03a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « 3D multiresolution context-based coding for geometry compression ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* T. 1. Barcelona, Spain, sept. 2003, p. 785-788.
- [PA03b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Weighted bit allocation for multiresolution 3D mesh geometry compression ». In : *Proc. SPIE Vis. Communic. Image Process.* Lugano, Switzerland, 2003.
- [PA02a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « 3D Mesh Wavelet Coding Using Efficient Model-based Bit Allocation ». In : *Proc. IEEE Int. Symp. 3D Data Proc. Vis. Transm.* Italy, juin 2002.
- [PA02b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Multiresolution 3D Mesh Compression ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* T. 2. Rochester, USA, sept. 2002, p. 245-248.

CONFÉRENCES NATIONALES AVEC ACTES ET COMITÉ DE LECTURE (16)

- [Bou+21] L. BOUARD, L. DUVAL, F. PAYAN, C. PREUX et M. ANTONINI. « Étude comparative de l'impact d'un codage à précision variable sur des don-

- nées de simulation en géosciences ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Sophia Antipolis, France, nov. 2021 (cf. p. 24, 81).
- [DP21] D. DOUGUET et F. PAYAN. « Recalage de nuages de points 3D pour la comparaison de molécules pharmacologiques ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Sophia Antipolis, France, nov. 2021 (cf. p. 25, 81).
- [Qui+21] F. QUILICHINI, T. FISICHELLA, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Recalage de deux nuages de points 3D au rapport d'échelle non uniforme ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Sophia Antipolis, France, nov. 2021.
- [BPA19a] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Rééchantillonnage des nuages de points gigantesques produits lors de la numérisation 3D de monuments ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019 (cf. p. 22).
- [BPA19b] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Structuration de nuages de points issus d'acquisitions LiDAR multiples à l'aide de graphes locaux connectés ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019 (cf. p. 21).
- [Nas+19a] F. NASIRI, N. M. BIDGOLI, F. PAYAN et T. MAUGEY. « Codage d'atlas de textures avec prédiction guidée par la topologie des maillages ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019, p. 1-4 (cf. p. 24).
- [Bou+18] L. BOUARD, L. DUVAL, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Décomposition multi-échelles de maillages 3D hexaédriques dans le domaine des géosciences. Étude des performances en compression sans pertes. » In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Poitiers, France, nov. 2018 (cf. p. 23, 81).
- [Ble+17] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « De la carte de profondeur au maillage surfacique : reconstruction de scènes 3D complexes. » In : *Proc. GRETSI*. Juan les Pins, France, sept. 2017 (cf. p. 21).
- [Pay+17] F. PAYAN, J.-L. PEYROT, S. SCHNEIDER, L. DUVAL et M. ANTONINI. « Décomposition progressive de maillages hexaédriques avec discontinuités : application aux modèles géologiques ». In : *Proc. GRETSI*. Juan les Pins, France, sept. 2017 (cf. p. 23, 81).
- [PPA14b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Reconstruction semi-régulière de surfaces par stéréoscopie ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Reims, France, nov. 2014 (cf. p. 19).

- [Bat+13] V. BATICLE, F. PAYAN, R. GUILLAUME, M. ANTONINI et P. SCHIAVONE. « Recomposition de données non-structurées nano-lithographiques ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Le Creusot, France, nov. 2013.
- [PPA13a] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Amélioration d'un outil d'analyse différentielle de surfaces échantillonnées ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Le Creusot, France, nov. 2013.
- [PPA13b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Échantillonnage de maillages surfaciques basé sur la distribution en disques de Poisson et préservant les caractéristiques géométriques ». In : *Proc. Colloque ORASIS, journ. franc. des jeunes chercheurs en vision par ordi*. Cluny, France, juin 2013 (cf. p. 18).
- [PPA13d] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Simplification de maillages CAO avec échantillonnage anti-aliasing ». In : *Proc. GRETSI*. Brest, France, sept. 2013 (cf. p. 19).
- [KPA11a] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Approche adaptative basée Voronoï pour le remaillage semi-régulier ». In : *Proc. GRETSI*. Bordeaux, France, sept. 2011 (cf. p. 18).
- [KPA11b] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Optimisation du schéma lifting basé Butterfly pour les maillages semi-réguliers ». In : *Proc. Colloque ORASIS, journ. franc. des jeunes chercheurs en vision par ordi*. Praz-sur-Arly, France, juin 2011 (cf. p. 17).

COMMUNICATIONS DANS DES WORKSHOPS PÉDAGOGIQUES (2)

- [FP14] N. FORTINO et F. PAYAN. « Une pédagogie interactive en R&T grâce aux boîtiers de vote électronique ». In : *Proc. Workshop pédagogique Réseaux & Télécoms*. Saint Denis, France, nov. 2014 (cf. p. 11).
- [MP14] P. MATHIEU et F. PAYAN. « GSTREAMER un cadre pour manipuler les objets multimédia ». In : *Proc. Workshop pédagogique Réseaux & Télécoms*. Saint Denis, France, 2014 (cf. p. 11).

AUTRE COMMUNICATIONS (3)

- [DPG21] D. DOUGUET, F. PAYAN et L. GRANDMOUGIN. « SenSaaS : Shape-based Alignment by Registration of Colored Point-based Surfaces ». 22th GGMM and 10th SFCi. Poster. Sept. 2021 (cf. p. 25, 81).

THÈSE (1)

- [Pay04] F. PAYAN. « Rate-distortion optimization for geometry compression of triangular meshes ». Thèse de doct. Université Nice Sophia Antipolis, déc. 2004 (cf. p. 37).

THÈSES ENCADRÉES (4)

- [Bou21] L. BOUARD. « Refinable resolution and precision for volume mesh compression and simulation in geosciences ». Thèse de doct. Université Côte d'Azur, mars 2021 (cf. p. 11, 23, 83).
- [Ble18] A. BLETTERER. « Une approche basée graphes pour la modélisation et le traitement de nuages de points massifs issus d'acquisitions de LiDARs terrestres ». Thèse de doct. Université Côte d'Azur, déc. 2018 (cf. p. 11, 19, 67).
- [Pey14] J.-L. PEYROT. « Optimisation de la chaîne de numérisation 3D : de la surface au maillage semi-régulier ». Thèse de doct. Université Nice Sophia Antipolis, déc. 2014 (cf. p. 11, 47, 57, 62, 65).
- [Kam11] A. KAMMOUN. « Contributions dans le domaine de l'analyse multi-résolution de maillages surfaciques semi-réguliers. Application à la compression géométrique ». Thèse de doct. Université de Nice Sophia Antipolis, déc. 2011 (cf. p. 11, 17, 39).

Deuxième partie

FOCUS SUR... LA GÉNÉRATION DE MAILLAGES
SEMI-RÉGULIERS

INTRODUCTION

Durant mon doctorat (2000-2004), j'ai travaillé sur la compression de maillages surfaciques [Pay04]. Fort de l'expertise des membres de l'équipe en compression basée ondelettes, j'ai développé ma propre méthode de compression géométrique pour maillages semi-réguliers (SRs) [PA05a; PA05b], qui surpassait les méthodes concurrentes de l'époque. Les maillages SRs sont généralement créés par remaillage à partir de maillages irréguliers. Les performances des codeurs pour maillages SRs sont donc intrinsèquement liées à celles des remailleurs. Si l'erreur de remaillage est trop importante, le meilleur des codeurs pour maillages SRs ne pourra compenser cet handicap. A l'époque, le seul remailleur diffusé s'appelait *Trireme* [Gus07]. Lors de ma prise de fonction comme MCF au sein de l'équipe Mediacoding, et dans le cadre du doctorat d'Aymen Kammoun, **nous avons donc développé notre propre technique de remaillage SR**. Cette contribution est présentée dans le chapitre 7.

En 2010, l'équipe Mediacoding a été contacté par Olivier Aubreton et Olivier Laligant, respectivement MCF et PU au Lezi. Ils souhaitaient développer une technique de numérisation 3D "intelligente". Leur motivation était de développer un système de numérisation 3D qui ne capture non pas un maximum de points comme tous les systèmes classiques, mais uniquement des points aux endroits pertinents, pour optimiser le compromis nombre de points/fidélité géométrique, ou encore tel que leur compression soit facilitée par la suite pour optimiser le compromis débit/fidélité. Cette rencontre a donné naissance au projet collaboratif CreActive 3D (2011-2014) entre l'I3S et le Lezi, rejoint ensuite par la société Noomeo qui fabriquait des scanners 3D à vision stéréoscopique.

Inspirés par les performances des compresseurs pour maillages SRs bien supérieures à celles des compresseurs pour maillages irréguliers, nous avons développé dans le cadre de ce projet et du doctorat du thèse de Jean-Luc Peyrot un algorithme de numérisation 3D produisant des maillages SRs directement à partir des images stéréoscopiques fournies par le scanner Noomeo. Ma deuxième contribution dans le domaine de la génération de maillages SR fut donc une **technique de reconstruction 3D semi-régulière**. Cette contribution est présentée dans le chapitre 8.

REMAILLAGE SEMI-RÉGULIER

Ce chapitre est inspiré du survey [PRS16] que j'ai co-écrit avec Céline Roudet et Basile Sauvage, de l'article [KPA10] que j'ai co-écrit avec Aymen Kammoun et Marc Antonini, ainsi que du manuscrit d'Aymen Kammoun[Kam11].

Il est organisé de la manière suivante : la section 7.1 présente les maillages semi-réguliers, et détaille le principe général du remaillage semi-régulier. La section 7.2 présente le remailleur que nous avons proposé. La section 7.3 montre quelques résultats attestant de son intérêt, et nous concluons dans la section 7.4.

7.1 INTRODUCTION

Un maillage semi-régulier (SR) est une représentation intéressante en raison de ses propriétés inhérentes de scalabilité et de compacité. Il offre une structure régulière par morceaux, contrairement à un maillage irrégulier (IR). La régularité d'un maillage fait référence à la connectivité de ses éléments. Un maillage triangulaire est dit SR si les triangles peuvent être fusionnés par quatre (triangles rouges sur la figure 15) jusqu'à un maillage basse résolution. Par conséquent, tous les sommets sont réguliers (*i.e.* ont une valence de 6) sauf ceux du maillage basse résolution. Une façon pratique de construire un maillage SR consiste à raffiner un maillage par subdivision quaternaire (1 vers 4), d'où le terme maillage à "connectivité de subdivision" parfois utilisé pour les maillages SRs.

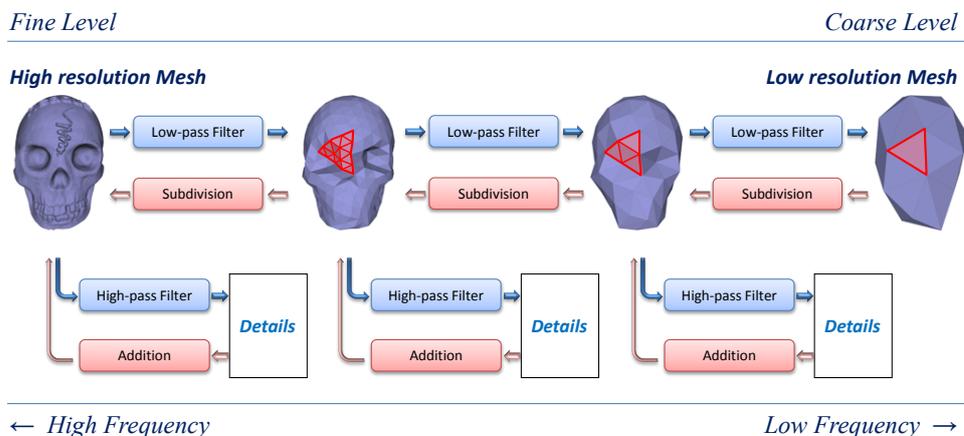


FIGURE 15 – Analyse multirésolution (AMR) d'un maillage semi-régulier (SR).

Analyse multirésolution de surfaces L'intérêt pour ces maillages a été renforcé à la fin des années 90 lorsque il a été démontré la grande efficacité des ondelettes en traitement du signal [Mal99]. En effet, bien que des transformées en ondelettes aient été développées pour les maillages IRs [Kob+98; Bon98; GSS99; VP04; Roy+05], les maillages SRs sont plus adaptés à l'analyse multirésolution (AMR) de surfaces, justifiant de nombreux travaux dans le domaine [SS95; Dah+95; Cer+96; LDW97; KS00; KSS00; Bero4; LQSo4; KPA12].

La semi-régularité d'un maillage convient parfaitement à une AMR de la géométrie. Comme le montre la figure 15, un maillage SR peut être analysé récursivement à l'aide :

- d'un filtre passe-bas produisant un maillage de résolution inférieure ;
- d'un filtre passe-haut produisant un ensemble de détails qui caractérise la différence géométrique entre deux résolutions successives.

En répétant cette analyse, le maillage est décomposé en un maillage basse résolution (représentant les basses fréquences) et une série de détails (chacun représentant une bande de fréquences). Le processus inverse à l'analyse est appelé *synthèse* (figure 15, de droite à gauche). À chaque niveau :

- une subdivision est appliquée pour obtenir un maillage plus résolue ;
- les détails sont ajoutés pour obtenir les hautes fréquences.

Une base d'ondelettes [Mal99] sous-tend ce schéma d'AMR : les détails sont les coefficients d'ondelettes, tandis que les positions des sommets sont les coefficients d'échelle.

Remaillage de surfaces L'utilisation effective des maillages SRs dépend de leur disponibilité. Le problème est qu'un maillage surfacique est rarement SR. Un maillage SR est la plupart du temps généré par *remaillage*, à partir d'un maillage IR. Les algorithmes suivent toujours la même structure, décrite par la figure 16 : i) une approximation grossière du maillage IR est calculée, et constitue le maillage de base. Le maillage SR est ensuite construit itérativement à partir du maillage de base, en alternant raffinement (par subdivision) et ajustement géométrique sur le maillage IR. L'étape d'ajustement, qui utilise souvent une paramétrisation [SPRo6] du maillage IR sur le maillage de base, consiste à positionner les sommets insérés par raffinement sur la surface modélisée par le maillage IR.

Objectifs La plupart des applications tirent parti de la capacité des maillages SRs à représenter des données 3D à différentes résolutions. Il est donc possible de naviguer efficacement entre les résolutions pour la visualisation [Cer+96] ou pour éditer, animer ou appliquer des effets spéciaux de manière interactive [ZSS97; Bie+02; SHBo7]. Dans ce cas, la *fidélité géométrique*, qui est le principal objectif de tout remaillageur [All+08; PRS15; Kha+22], est souhaitable à tous les niveaux de résolution.

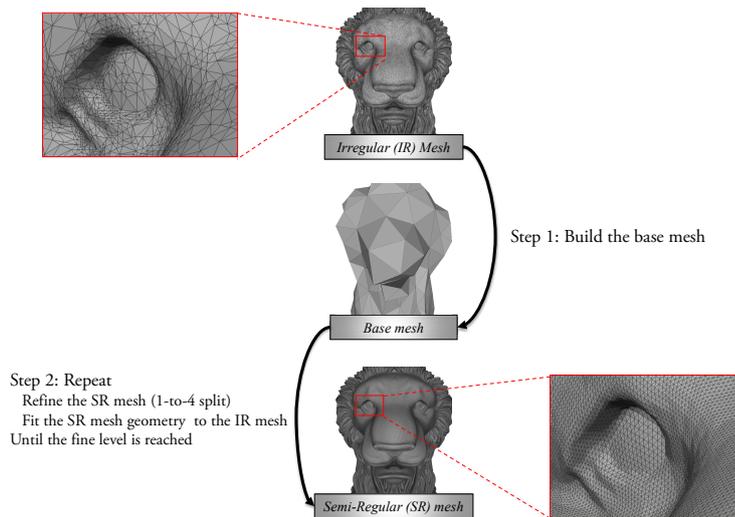


FIGURE 16 – Principe général du remaillage SR.

La *compacité* est le deuxième objectif, très important notamment pour la compression géométrique [KSS00; LMH00; KGO3; LCB03; Afx; PA05a; Sim+04; Den+10] et la transmission progressive [Cer+96; Lab+00]. Outre sa structure multi-échelle permettant l'AMR qui facilite la compression, les maillages SRs ont une autre propriété intéressante : la connectivité est entièrement définie par le maillage basse résolution. Ainsi, la connectivité des niveaux plus fins est implicite et n'a pas besoin d'être encodée. Comme la construction de maillages SRs repose souvent sur une paramétrisation du maillage original sur le maillage de base, certaines applications comme le morphing [Lee+99; Mic+01] et le transfert de textures ou de détails [PSS01; Bie+02], font appel à cette paramétrisation. La plupart des applications utilisant des maillages SRs font partie d'un pipeline de traitement qui se termine par une étape de rendu. Il est donc aussi important de contrôler la *qualité des triangles* (*i.e.*, forme et taille des triangles) ce qui est le troisième objectif majeur de tout remailleur.

Historique du remaillage SR L'intérêt pour le remaillage SR est apparu au milieu des années 1990 avec les travaux de Lounsbery *et al.* qui ont proposé une technique d'AMR pour maillages surfaciques [LDW97] basé sur un schéma de subdivision linéaire. Les maillages surfaciques étant majoritairement de connectivité irrégulière, le remaillage SR s'est imposé comme une évidence pour exploiter pleinement les prometteuses transformées en ondelettes pour surfaces. Au cours d'une première période allant de 1995 à 2000, les travaux sur le remaillage SR se sont principalement concentrés sur la conception des maillages de base et de correspondances locales entre le maillage de base et le maillage IR. Les principaux objectifs étaient la gestion des genres, des bords pour les surfaces ouvertes et les formes complexes

[Eck+95; Lee+98; Gio99], ainsi que la compacité de la représentation [Gus+00; LMH00] afin d’en faciliter la compression. L’ajustement des sommets SRs sur la surface lors du raffinement utilisait des paramétrisations locales, obtenues par projection des sommets supprimés du maillage IR sur les triangles du maillage de base. Ces approches généraient des maillages SRs présentant des artefacts le long des frontières des patches associés aux triangles du maillage de base, principalement dus au manque de régularité des paramétrisations lorsque l’on passe d’un triangle de base à l’autre. De 2001 à 2010, la plupart des chercheurs se sont donc focalisés sur l’obtention de paramétrisations lisses et à faible distorsion [HLG01; KLS03; FSK04; Gus07]. A partir de 2010, l’attention s’est plus portée sur la fidélité géométrique alors que l’optimisation de la paramétrisation influençait surtout la qualité des triangles. Malheureusement, une paramétrisation lisse ne fait pas tout, et peut même entraver l’échantillonnage des détails hautes fréquences et notamment des arêtes saillantes. Pour s’affranchir des paramétrisations, quelques travaux ont proposé un ré-échantillonnage direct du maillage IR dans \mathbb{R}^3 [DMS10; CJL11].

7.2 CONTRIBUTION AU DOMAINE : UN REMAILLEUR BASÉ VORONOÏ

Le remailleur SR que nous avons développé appartient à cette dernière famille de méthodes travaillant directement dans l’espace 3D. L’originalité de notre méthode réside dans le fait que nous utilisons un diagramme de Voronoï centroïdal (DVC) pour obtenir le maillage de base mais aussi durant le raffinement.

Considérant un espace $\Omega \subseteq \mathbb{R}^a$, et un ensemble de sites $S \in \Omega$, un diagramme de Voronoï (DV) est l’ensemble de *cellules* (ou *régions*) couvrant Ω tel que chaque cellule C_i contient l’ensemble des points $x \in \Omega$ plus proches de s_i que de tout autre site selon une distance d donnée (Figure 17a) :

$$C_i = \{x \in \Omega | d(x, s_i) < d(x, s_j), \forall s_j \in S, j \neq i\}.$$

La triangulation duale d’un DV (Figure 17b) est appelée *triangulation de Delaunay* [Del34]. En 2D, il est démontré que le cercle circonscrit à chacun de ses triangles ne contient aucun autre site.

Un diagramme de Voronoï centroïdal (DVC) est tel que chaque site s_i correspond au *centroïde* (ou centre de masse, ou barycentre) de sa cellule (Figure 18) :

$$s_i = \frac{\int_{C_i} x \rho(x) dx}{\int_{C_i} \rho(x) dx},$$

où $\rho(x)$ est une fonction de masse (ou de densité). La méthode la plus connue pour obtenir un DVC est la *relaxation de Lloyd* [Llo82]. À partir d’un ensemble initial de sites, deux étapes sont alternées jusqu’à convergence : i) calcul du DV à partir de

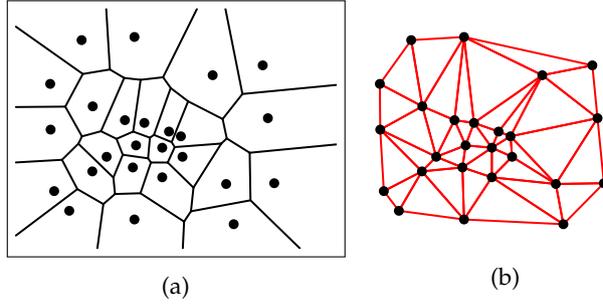


FIGURE 17 – Diagramme de Voronoï (DV) d’un espace 2D calculé à partir de sites donnés (a), et sa triangulation duale, dite de Delaunay (b).

la position actuelle des sites ; ii) pour chaque cellule générée à l’étape précédente, repositionnement du site sur le centroïde.

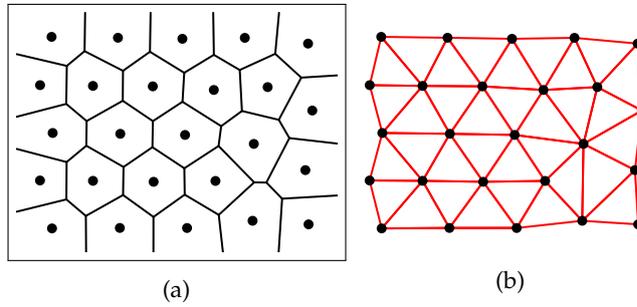


FIGURE 18 – Diagramme de Voronoï centroïdal (DVC) d’un espace 2D obtenu par relaxation de Lloyd (a), et sa triangulation de Delaunay (b).

Dans notre contexte, Ω est la surface par morceaux définie par le maillage IR (noté M_{i_r}) que nous souhaitons remailler. Nous construisons des DVs discrets [VCPo8], et le partitionnement se fait sur l’ensemble des sommets V_{i_r} définissant M_{i_r} . Concernant la distance d , nous avons retenu la distance Euclidienne, suffisamment précise si M_{i_r} est échantillonné de manière dense. Si ce n’est pas le cas, M_{i_r} est préalablement subdivisé à l’aide du schéma *butterfly* [DLG90].

Notre remaillieur fonctionne de la manière suivante :

1. **Construction du maillage de base** - Un DVC parcimonieux des sommets V_{i_r} est calculé à partir d’un ensemble de sites S^0 . Pour initialiser la position des sites S^0 , nous avons choisi une stratégie de simplification progressive. A chaque sommet v_{i_r} est associé un poids $w(v_{i_r})$ qui dépend de sa courbure $\kappa(v_{i_r})$ [Mey+02] et de sa fonction de masse $\rho(v_{i_r})$:

$$w(v_{i_r}) = 0.5 \frac{\rho(v_{i_r})}{\max_{v_k \in V_{i_r}} \rho(v_k)} + 0.5 \frac{\kappa(v_{i_r})}{\max_{v_k \in V_{i_r}} \kappa(v_k)},$$

où $\rho(v_{i_r})$ est l’aire de la cellule duale de v_{i_r} [VCPo8]. Cela permet d’obtenir un maillage SR le plus anisotrope possible même si les triangles constituant

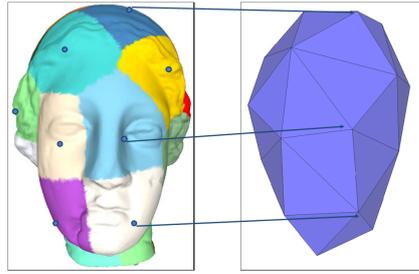


FIGURE 19 – Création du maillage de base M_{sr}^0 par triangulation d'un **DVC** de M_{ir} .

M_{ir} ont de fortes disparités en taille et en forme. Les sommets sont décimés, en commençant par celui qui a le poids le plus faible, jusqu'à obtenir le nombre souhaité de sites. La relaxation est ensuite appliquée pour obtenir le **DVC**, à son tour triangulé pour obtenir M_{sr}^0 (voir Figure 19).

2. **Subdivision** des triangles de M_{sr}^0 (Figure 20b). Chaque sommet ajouté est reporté sur la surface originale à l'aide d'une paramétrisation (MAPS, [Lee+98]) et positionné sur le sommet v_{ir} le plus proche;
3. **Ajustement géométrique** - Calcul d'un nouveau **DVC** à partir de S^1 , constitué de S^0 et des sommets ajoutés par subdivision, puis triangulation duale pour obtenir M_{sr}^1 (Figure 20c);
4. les étapes 2 et 3 sont répétées N fois pour obtenir le maillage **SR** $M_{sr} = M_{sr}^N$.

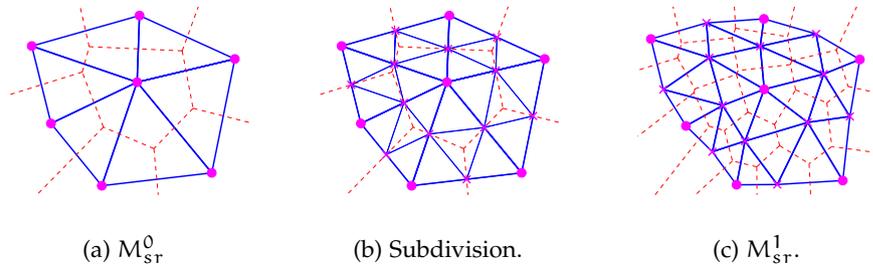


FIGURE 20 – Stratégie proposée pour obtenir un maillage **SR**.

7.3 RÉSULTATS

En subdivisant systématiquement tous les triangles à chaque itération, nous obtenons des maillages **SR** *uniformes* de qualité très satisfaisante (Figures 21a et 21b). Cependant, la subdivision systématique de tous les triangles à chaque itération n'est pas forcément pertinente, notamment dans les zones planes où l'ajout de nouveaux sommets n'améliorera pas significativement la fidélité géométrique. Nous

avons donc aussi développé une approche *adaptive* qui à chaque itération rajoute des sommets par subdivision uniquement là où cela est nécessaire pour améliorer localement la fidélité géométrique. La Figure 22 atteste de l'intérêt de cette méthode : on y voit SKULL remaillé respectivement avec notre approche adaptative et [Gus+00], une méthode uniforme de l'état de l'art. L'objet remaillé avec notre approche possède plus de triangles dans la région de la cicatrice. Ainsi nous obtenons une qualité visuelle similaire pour un nombre de triangles bien plus faible.

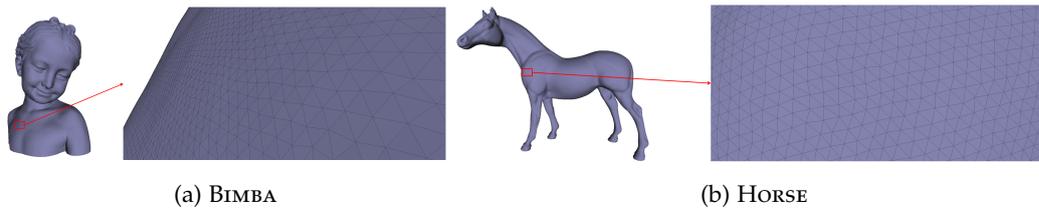


FIGURE 21 – 2 modèles remaillés uniformément avec notre approche.

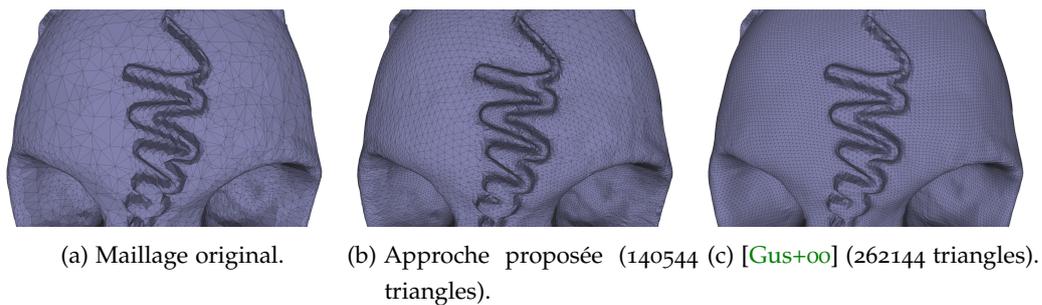


FIGURE 22 – SKULL remaillé avec notre schéma adaptatif et avec [Gus+00].

Pour valider définitivement notre approche, la figure 23 montre l'évolution de l'erreur de remaillage - en fonction du nombre de résolution - pour RABBIT, et HORSE, remaillés avec notre méthode ou les principaux remaillieurs de l'état de l'art [Lee+98 ; Gus+00 ; Gus07]. Notre approche rivalise, voire surpasse, les méthodes de l'art quel que soit le niveau de résolution, et *in fine*, nécessite toujours moins de triangles pour une erreur de remaillage souvent plus faible.

7.4 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre résume ma contribution dans le domaine du remaillage semi-régulier (SR) de maillages triangulaires. L'originalité provient de la construction d'un diagramme de Voronoï centroïdal (DVC) des sommets du maillage irrégulier de manière progressive à partir du maillage de base, lui-même obtenu à partir d'un DVC,

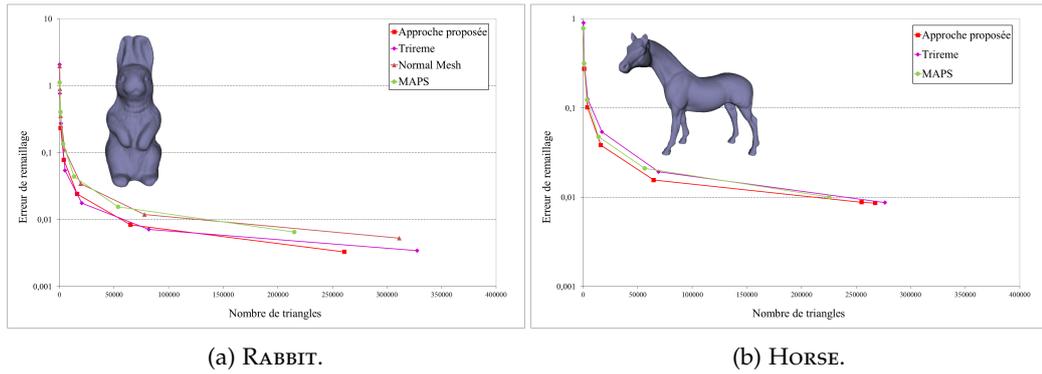


FIGURE 23 – Erreur de remaillage en fonction du nombre de résolutions pour RABBIT, et HORSE.

ce qui n’avait jamais été proposé malgré l’efficacité reconnue des DVs dans le domaine du remaillage [All+08]. L’algorithme est globalement simple, et les maillages produits par notre remailleur ont l’avantage de tirer profit de toutes les fonctionnalités des maillages SRs, notamment la scalabilité, tout en ayant une qualité de triangles élevée de part l’utilisation de DVCs. Enfin, l’ajout d’un seuil de subdivision permet en plus de créer des maillages SRs adaptatifs, possédant des sommets uniquement où cela est nécessaire pour augmenter la fidélité géométrique.

De nombreuses améliorations sont possibles, notamment au niveau de la gestion des bords et des arêtes saillantes. En l’état, notre algorithme ne gère aucune de ces singularités. Ultérieurement à ces travaux, une version plus avancée de ce remailleur a été développée dans le cadre de la création de la *startup* Cintoo, et a fait l’objet d’un brevet [HF+14], dont je suis co-inventeur.

RECONSTRUCTION 3D SEMI-RÉGULIÈRE

Ce chapitre est inspiré de l'article [PPA16b] que j'ai co-écrit avec Jean-Luc Peyrot et Marc Antonini, et du manuscrit de thèse de Jean-Luc [Pey14].

Il est organisé de la manière suivante : la section 8.1 explique le processus que l'on doit suivre pour obtenir une représentation semi-régulière de la surface d'un objet physique. La section 8.2 présente la méthode de reconstruction semi-régulière que nous avons développée et détaille les étapes essentielles de notre algorithme. Les résultats expérimentaux sont présentés dans la section 8.3. Enfin, la section 8.4 résume la contribution et propose quelques pistes d'amélioration.

8.1 INTRODUCTION

Si l'on souhaite obtenir un maillage semi-régulier (SR) d'un objet physique spécifique, le processus à suivre est le suivant (Figure 24, partie haute) : numérisation (création d'un nuage de points 3D dense), nettoyage (suppression des points redondants et du bruit inhérent à la numérisation), création d'un maillage triangulaire (irrégulier) et enfin remaillage SR. Un utilisateur lambda qui souhaite manipuler des représentations SRs de surfaces scannées va donc devoir passer par toutes ces étapes, qui sont généralement indépendantes et non automatisées. Ce long et fastidieux cheminement peut décourager cet utilisateur et d'une manière générale freine la démocratisation des maillages SRs.

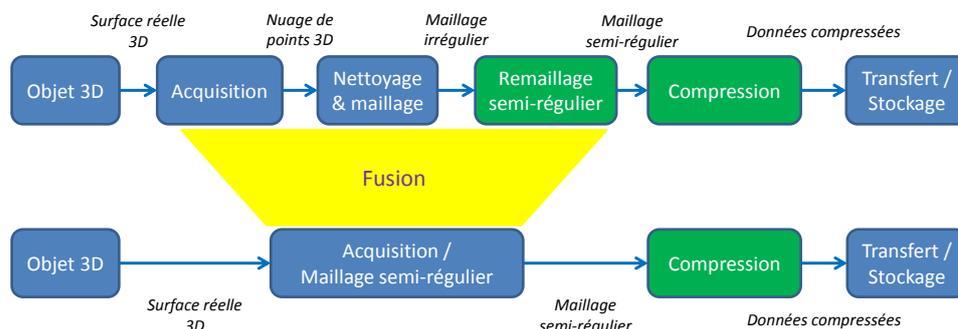


FIGURE 24 – Processus pour obtenir un maillage semi-régulier (SR) à partir d'un objet physique : chaîne classique (en haut) et méthode proposée (en bas).

Notre objectif durant la thèse de Jean-Luc Peyrot était de simplifier ce processus en proposant un système de numérisation 3D qui fournit directement des maillages SRs en sortie (Figure 24, partie basse). Ayant à disposition durant ce projet d'un scanner 3D à vision stéréoscopique, nous avons choisi de construire le maillage SR directement à partir d'une paire d'images stéréoscopiques produites par le scanner, utilisées comme un domaine de paramétrisation 2D. Notre approche peut être incluse dans n'importe quel scanner de ce type, et la sortie du scanner ne nécessitera aucun post-traitement contrairement à l'approche "classique". A ma connaissance, c'est la seule technique de reconstruction 3D [Ber+14] produisant directement des maillages SRs.

8.2 MÉTHODOLOGIE

Les principales étapes de notre technique de reconstruction SR directe sont les suivantes :

1. **Appariement des images** - Identique à l'approche stéréo classique, cette étape définit les *points d'intérêt* (POIs, pour *pixels of interest*), autrement dit les points communs aux deux images à partir desquels on peut calculer des points 3D;
2. **Classification des POIs** - Bien que facultative, cette étape permet de préserver par la suite les saillances des objets scannés, caractéristiques essentielles notamment pour les objets de type conception assistée par ordinateur (CAO). Grâce à une technique de squelettisation [ZS84] appliquée sur les POIs à forte courbure [PLL12] (Figure 25), les POIs sont classifiés en trois catégories : *Coin*, *Arête* ou *Lisse*.

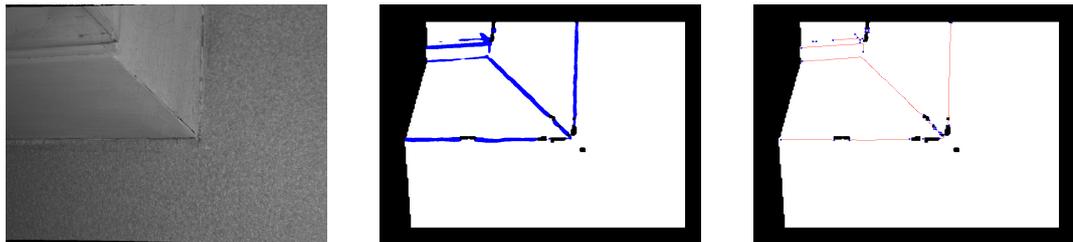


FIGURE 25 – Classification des POIs. De gauche à droite : une des images stéréoscopiques, POIs à forte courbure en bleu, et classification finale : en bleu les *coins*, et en rouge les *arêtes*.

3. **Création du maillage de base M_{sr}^0** - Nous avons adapté la technique de remaillage SR basée DVC présentée au chapitre précédent, à ceci près :
 - le DVC est calculé dans l'espace 2D défini par les POIs (Figure 26a). Ainsi nous profitons de la connectivité implicite des images, information in-

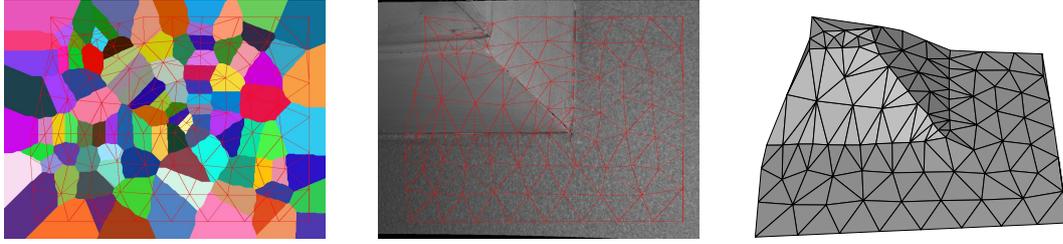


FIGURE 26 – Création du maillage de base M_{sr}^0 (à droite) à partir d'un DVC (à gauche) calculé dans l'espace de paramétrisation 2D défini par les images stéréoscopiques (au milieu).

existante si nous traitons le nuage de points 3D fourni par les scanners classiques ;

- les sites initiaux S^0 sont positionnés sur la surface scannée à l'aide d'un lancer de fléchettes¹ [Cli+09] parmi les POIs.
- Le calcul du DVC est contraint par la classification des POIs afin de préserver les saillances de l'objet scannée dès le maillage de base (Figure 26c).

4. **Raffinement géométrique** Le maillage de base M_{sr}^0 est subdivisé plusieurs fois dans le domaine de paramétrisation 2D (selon le principe présenté Figure 27). Puis, un plongement dans l'espace 3D produit le maillage M_{sr} final.

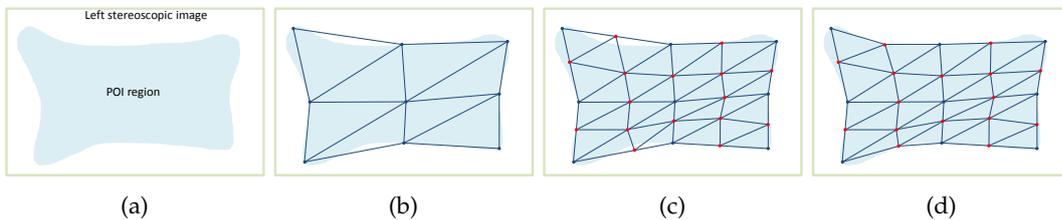


FIGURE 27 – Raffinement du maillage de base dans l'espace 2D. (a) *pixels of interest* (POI); (b) maillage 2D de base; (c) subdivision; (d) repositionnement des sommets ajoutés en dehors de la région des POIs.

8.3 RÉSULTATS

La figure 28 montre une reconstruction SR du visage de Jean-Luc Peyrot obtenue avec notre méthode. Avec seulement 43k sommets, la résolution 5 (Figure 28f) est déjà une bonne approximation du nuage 3D de 250k points (figure 28h) produit par le scanner. La figure 28g montre le maillage SR texturé avec les valeurs de

1. Pour plus de détails sur le lancer de fléchettes, voir Section 9.2 du chapitre 9 (page 58).

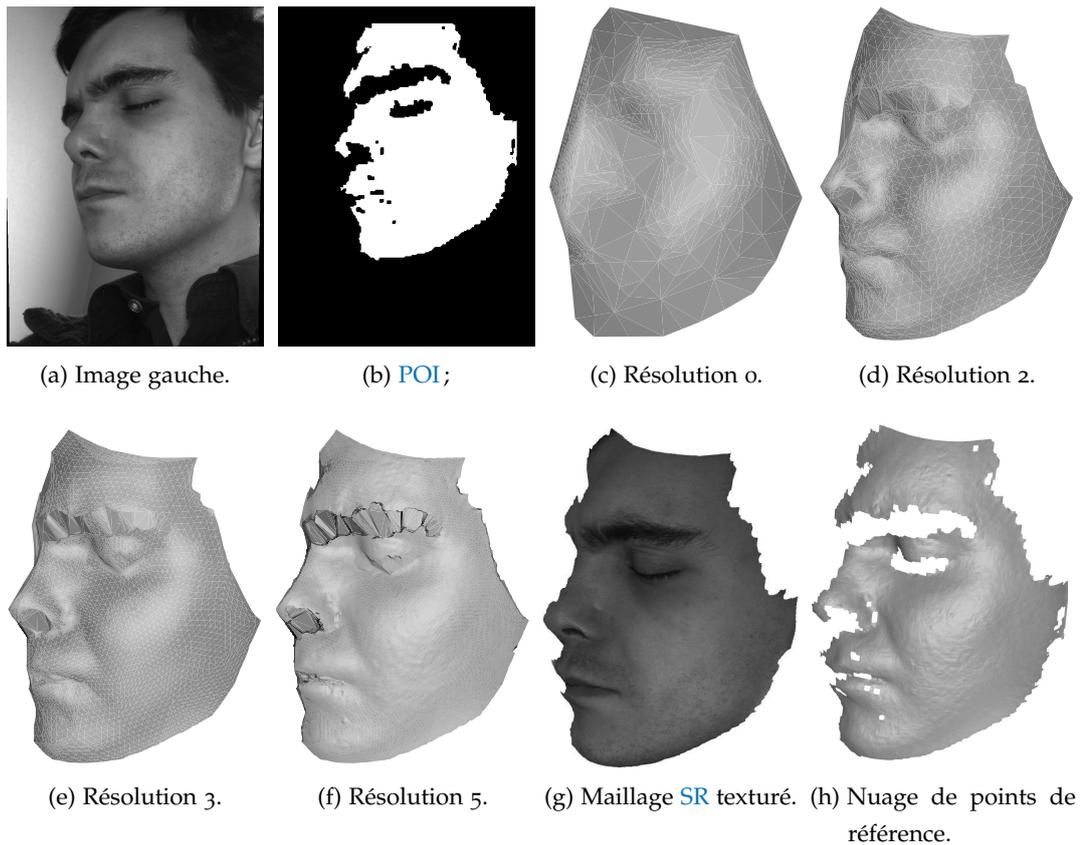


FIGURE 28 – Reconstruction SR d'un visage.

niveaux de gris fournies par l'image stéréoscopique. Le maillage SR étant généré à partir des images, cette texturation est directe.

La figure 29 montre une autre reconstruction SR (~4600 sommets). Il s'agit cette fois d'un modèle exhibant des saillances : les arêtes sont préservées et le rendu final (Figure 29e) est satisfaisant. Concernant la complexité, les temps de calcul sont raisonnables (entre 5 secondes et 30 secondes selon les objets), la plus grande partie étant consacrée à la construction du maillage de base.

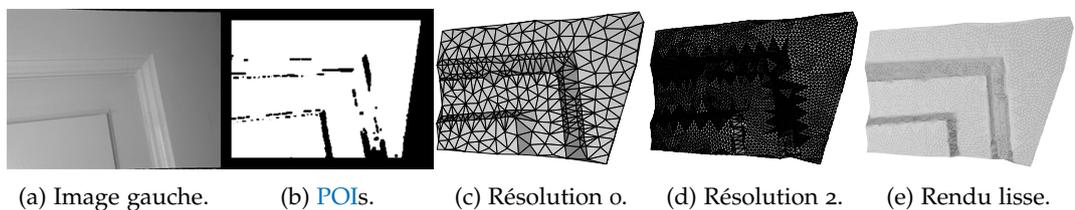


FIGURE 29 – Reconstruction SR d'une surface saillante.

Par ailleurs, nous avons comparé la fidélité géométrique de nos reconstructions SRs directes avec des maillages SRs issus de la chaîne classique (Figure 24, partie haute). Pour la chaîne classique, le nuage de points 3D fourni par le scanner est triangulé (\Rightarrow maillage irrégulier M_{ori}), puis remaillé avec *SmartMesh* [Cin] (version optimisée de notre remailleur SR présenté au chapitre précédent). La Figure 30 présente la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) ($M_{\text{ori}} \rightarrow M_{\text{sr}}$) en fonction du nombre de résolutions pour les deux approches. Notre méthode directe est toujours meilleure à faible résolution car elle préserve les caractéristiques géométriques dès la création du maillage de base. L'approche classique devient meilleure à plus haute résolution, car *SmartMesh* optimise la position des sommets directement sur M_{ori} . Notre méthode est aussi "pénalisée" car elle rajoute des points sur les saillances à toutes les résolutions, au détriment des autres régions de l'objet 3D. Par contre, en terme de temps de calcul, la reconstruction directe nécessite moins d'une minute sur tous les objets testés. A titre de comparaison, *SmartMesh* requiert à lui seul plusieurs minutes (entre 2 et 7 minutes).

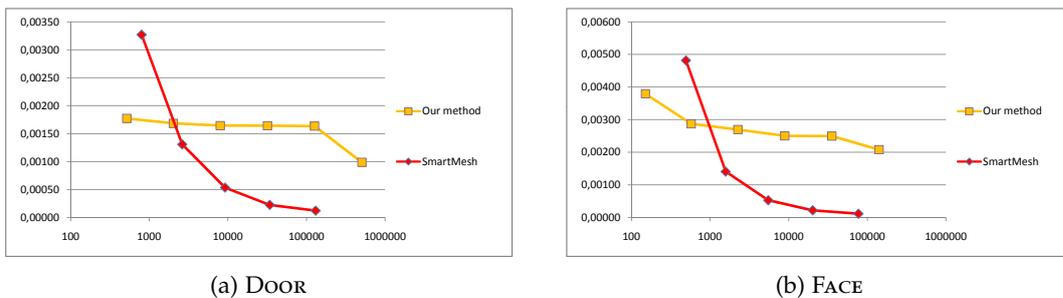


FIGURE 30 – REQM entre le maillage original et le maillage SR ($M_{\text{ori}} \rightarrow M_{\text{sr}}$) au fur et à mesure des résolutions.

8.4 CONCLUSION DU CHAPITRE

J'ai présenté dans ce chapitre une alternative au fastidieux processus de création de maillages semi-réguliers (SRs) à partir d'objets physiques. Notre approche génère des maillages SRs directement à partir des images fournies par un scanner à vision stéréoscopique. L'idée clé est de considérer ces images comme un domaine de paramétrisation 2D de la surface à numériser, et de traiter les données dans ce domaine autant que possible avant de projeter la surface reconstruite dans l'espace 3D.

De nombreuses améliorations sont possibles. Si le temps nous l'avait permis, nous aurions pu optimiser le positionnement des sommets SRs tout au long du raffinement, de manière similaire à notre remailleur SR présenté au Chapitre 7. Cela améliorerait la qualité des triangles produits et la fidélité géométrique. Aussi,

l'algorithme présenté ici ne gère qu'une seule acquisition. Étendre notre méthode à plusieurs paires d'images permettrait de créer un maillage [SR](#) couvrant l'ensemble de la surface d'un objet scanné. Pour arriver à cela, nous aurions pu nous inspirer des techniques de *mosaicing* très répandues en photogrammétrie ou de recalage multi-vues d'une manière générale [[Pie+11](#)], pour fusionner les régions de points d'intérêt avant de lancer la reconstruction.

Troisième partie

FOCUS SUR... LE RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE
SURFACES

INTRODUCTION

Dans le chapitre 8, j'ai présenté l'algorithme de reconstruction 3D semi-régulière proposé durant la thèse de Jean-Luc Peyrot (2011-2014). La motivation était de faciliter l'accès aux maillages semi-réguliers, mais aussi de développer un système d'acquisition capturant des points 3D aux endroits optimaux d'un point de vue compression. En effet, sans utiliser une connectivité semi-régulière, comment savoir où capturer des points de manière optimale, mais aussi combien ?

Ces questionnements nous ont amenées à étudier la problématique de l'échantillonnage de surfaces. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux distributions présentant des caractéristiques de bruit bleu. Ces distributions ont fait l'objet d'une attention considérable dans de nombreux domaines lors de la décennie précédente, car elles évitent notamment le phénomène de crénelage (ou *aliasing* en anglais) géométrique. Dans ce contexte, nous avons développé une **méthode de ré-échantillonnage en Disques de Poisson pour maillages surfaciques** [PPA15]. Ce fut ma première contribution au domaine du ré-échantillonnage de surfaces. Cette contribution est présentée dans le chapitre 9.

J'ai ensuite travaillé sur le ré-échantillonnage de surfaces définies par des nuages de points 3D lors de la thèse d'Arnaud Bletterer (2014-2018). Cette thèse était cofinancée par la région Sud et l'entreprise Cintoos qui souhaitait développer un visualiseur de nuages de points 3D accessible depuis un navigateur web. L'obstacle majeur pour mettre en place une visualisation client-serveur via le web était la taille des nuages 3D concernés, qui pouvait atteindre plusieurs milliard de points. Comment les transmettre et les afficher rapidement ? Comment permettre une navigation fluide ? Les lidars actuels génèrent des nuages avec un niveau de détails très élevé : selon les applications visées et/ou les terminaux de visualisation, ces nuages de points peuvent être considérés comme sur-échantillonnés. De plus, lorsque plusieurs acquisitions sont agrégées pour obtenir le nuage d'une scène étendue, celui-ci est de surcroît mal-échantillonné, avec une densité de points localement très variable, notamment dans les zones de recouvrement.

Ré-échantillonner ces nuages pour améliorer la distribution des points 3D sur la surface numérisée tout en réduisant leur nombre nous a semblé particulièrement pertinent dans un contexte de visualisation. Une **méthode de ré-échantillonnage en Disques de Poisson pour nuages de points 3D** fut donc ma deuxième contribution au domaine de l'échantillonnage [BPA20]. Cette contribution est présentée dans le chapitre 10.

RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE MAILLAGES SURFACIQUES

Le contenu de ce chapitre est inspiré de l'article [PPA15] que j'ai co-écrit avec Jean-Luc Peyrot et Marc Antonini, et du manuscrit de thèse de Jean-Luc [Pey14].

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : la section 9.1 introduit la notion de (ré-)échantillonnage de surfaces, de bruit bleu et de disques de Poisson, ainsi que les motivations qui nous ont poussés à développer cette méthode de ré-échantillonnage pour surfaces. la section 9.2 introduit le lancer de fléchettes, technique sur laquelle s'appuie notre contribution. La section 9.3 détaille notre ré-échantillonneur, et la section 9.4 présente des résultats expérimentaux pour valider notre méthode. Enfin, la section 9.5 résume notre contribution et présente les trois applications dans lesquelles notre échantillonneur a été utilisé ou étendu.

9.1 INTRODUCTION

Compte tenu de leur capacité à éviter le crénelage (ou *aliasing* en anglais) [Cro77], les distributions présentant des caractéristiques de bruit bleu [HSD13] ont fait l'objet d'une attention considérable dans de nombreux domaines de l'informatique graphique : imagerie, rendu, traitement de la géométrie, simulations numériques, etc. Ces distributions impliquent une répartition uniforme des échantillons sur la surface, tout en assurant une répartition irrégulière. Une distribution en disques de Poisson (DDP) [LD08] est une distribution présentant des caractéristiques de bruit bleu : une distance minimale est assurée entre les échantillons (voir Figure 31), mais aucune contrainte positionne ces derniers sur une grille régulière.

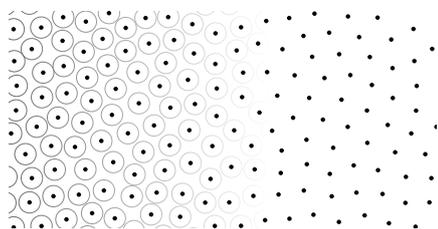


FIGURE 31 – Distribution en disques de Poisson (DDP) d'un domaine planaire 2D.

Les méthodes d'échantillonnage de type "bruit bleu" pour surfaces peuvent être classifiées en trois catégories. Les méthodes basées paramétrisation [AMD02; Li+08;

[Li+10] effectuent l'échantillonnage dans un domaine de paramétrisation planaire. N'importe quelle technique d'échantillonnage 2D peut ainsi être utilisée. Ces méthodes surmontent le problème relatif au calcul des géodésiques inhérents aux surfaces, mais les motifs générés peuvent souffrir de distorsion au moment du plongement 3D, notamment pour les surfaces à topologie complexe.

Les *approches directes* [FZo8; Cli+09; Bow+10; Gen+11; CCS12] effectuent l'échantillonnage directement sur la surface. La plupart se base sur le lancer de fléchettes (*dart throwing*), technique développée initialement pour les domaines plans [DW85; DHo6]. Sans surprise, ces méthodes produisent des distributions avec d'excellentes caractéristiques de bruit bleu, mais au détriment des temps de calcul selon la précision exigée lors du calcul des distances, géodésiques notamment. De nombreuses méthodes multi-échelles [WCE07; Cli+09; CCS12] ont été proposées pour accélérer le processus, ou pour permettre une parallélisation [Bow+10].

Les *approches basées relaxation* [CG12; Che+12; Xu+12] sont des extensions d'approches pour domaines plans [BSD09; SHD11; Xu+11]. Ces méthodes, inspirées de la technique bien connue de relaxation [Llo82], sont plus rapides et moins complexes que les méthodes directes. Le contrôle du nombre final d'échantillons est également plus simple. Le principal inconvénient est qu'elles ont tendance par nature à converger vers un pavage hexagonal, et donc une grille régulière, ce qui est contraire aux propriétés de bruit bleu.

Motivation et contributions Notre objectif était de développer une solution capable de générer des DDP sur n'importe quel maillage triangulaire, quels que soient son genre et sa complexité, et de surcroît simple d'utilisation pour un utilisateur lambda (ne nécessitant pas le réglage de multiples paramètres d'entrée). Pour atteindre ces objectifs, nous avons développé une méthode directe, à savoir un lancer de fléchettes, intégrant une fonctionnalité permettant de conserver du mieux possible les arêtes saillantes du maillage d'entrée s'il en possède. Peu de techniques d'échantillonnage permettent cela [ÖAG10; Gen+11; Che+13]. De plus, pour que notre algorithme soit simple d'utilisation, nous avons choisi que le seul paramètre à fixer par l'utilisateur serait le nombre d'échantillons souhaité.

9.2 PRINCIPE GÉNÉRAL DU LANCER DE FLÉCHETTES

Le principe général du lancer de fléchettes est le suivant (Figure 32) :

1. considérant le domaine Ω à échantillonner et un rayon R , un échantillon est "lancé" aléatoirement sur Ω : il devient *candidat* à la distribution finale ;
2. un disque de rayon R est modélisé autour de ce candidat ;

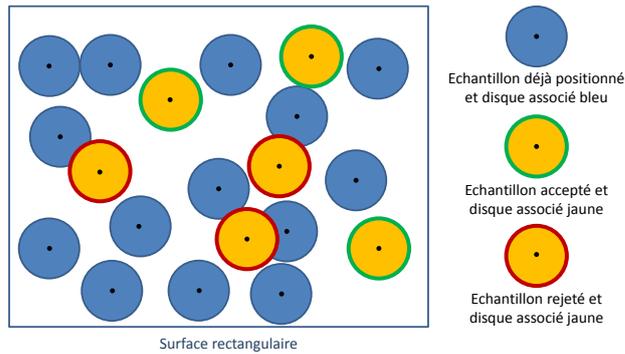


FIGURE 32 – Principe du lancer de fléchettes sur un domaine 2D.

3. si ce disque ne chevauche pas de disques d'échantillons déjà retenus pour la distribution finale, ce *candidat* est retenu (il respecte une distance minimale $2R$ entre les échantillons). Sinon, il est écarté.
4. Ce processus est itéré jusqu'à ce que plus aucun échantillon ne puisse être lancé sur le domaine sans violer la distance minimale (échantillonnage *maximal*), ou jusqu'à ce que le nombre d'échantillons souhaité soit atteint.

Pour générer des distributions *adaptatives*, il suffit de faire varier la valeur des rayons en incorporant une fonction de densité. Par exemple, pour mieux approximer une surface, un poids inversement proportionnel aux valeurs de courbures permet d'obtenir une densité d'échantillons plus importante dans les zones à forte courbure (voir Figure 33).

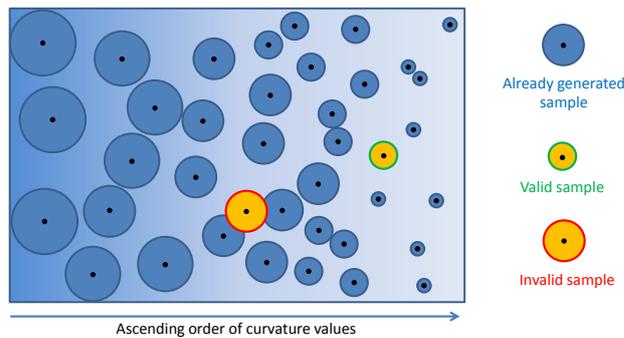


FIGURE 33 – Lancer de fléchettes adaptatif, avec prise en compte de la courbure.

Lors d'un lancer sur une surface, il est naturel d'utiliser des géodésiques lors du calcul du rayon (une distance euclidienne peut introduire des biais dans les zones à forte courbure). Le disque devient alors un *patch* circulaire calculé sur la surface. Le calcul des géodésiques est l'un des problèmes récurrents des algorithmes de lancer, car il faut trouver un compromis entre temps et précision.

9.3 ALGORITHME PROPOSÉ

On considère en entrée un maillage surfacique triangulaire M de genre quelconque, fermé ou non, ainsi que le nombre d'échantillons souhaité N . Désirant traiter tout objet 3D quelle que soit sa complexité et/ou la présence d'arêtes, le calcul des géodésiques doit être précis. Pour réduire les temps d'exécution, nous avons opté pour une *discrétisation* de la surface du maillage d'entrée M . La discrétisation est obtenue par subdivisions quaternaires successives de M . Le maillage M_{sub} ainsi obtenu sert de structure de données pour échantillonner M . Les spécificités de notre approche sont les suivantes :

- les échantillons candidats sont sélectionnés parmi une liste L contenant initialement tous les sommets de M_{sub} (en vert Figure 34);
- la surface des patches est calculée par croissance de région le long des arêtes de M_{sub} (Figure 34a), inspirée par l'algorithme de Dijkstra [Dij59];
- lorsque un candidat est retenu, l'ensemble des sommets de M_{sub} couverts par son patch est retiré de la liste L , le candidat inclus (voir figure 34b);
- la détection d'intersection des patches est simple : si au cours de la croissance d'un patch donné, on rencontre un sommet non présent dans L , alors ce patch intersecte un patch déjà positionné : le candidat est invalidé (Figure 34c).
- La précision est relative à la densité du maillage : plus M_{sub} est dense, plus les mesures sont précises, au détriment du temps d'exécution. Pour ne pas ralentir inutilement notre algorithme en travaillant sur un maillage excessivement subdivisé, notre algorithme évalue la densité du maillage d'entrée M , et calcule le nombre nécessaire de subdivisions pour atteindre la "bonne résolution" pour M_{sub} [PPA15].
- Pour s'assurer un bon échantillonnage des arêtes saillantes malgré l'aspect aléatoire du lancer, les coins et les arêtes saillantes sont échantillonnés en priorité, grâce à une classification préalable des sommets (Figure 35).

9.4 RÉSULTATS

Pour analyser la qualité d'une distribution sur une surface, un spectre de puissance est généralement calculé sous forme de périodogramme 2D (Figure 36 à gauche). A partir de ce spectre, deux courbes sont calculées [Bow+10] : le spectre de puissance moyen radial (SPMR) (RAPS en anglais pour *Radially Averaged Power Spectrum*), et l'anisotropie. Le SPMR permet d'évaluer la distribution radiale des distances entre les échantillons. L'anisotropie évalue l'uniformité radiale de l'échantillonnage sur le domaine. La distribution idéale d'un bruit bleu présente

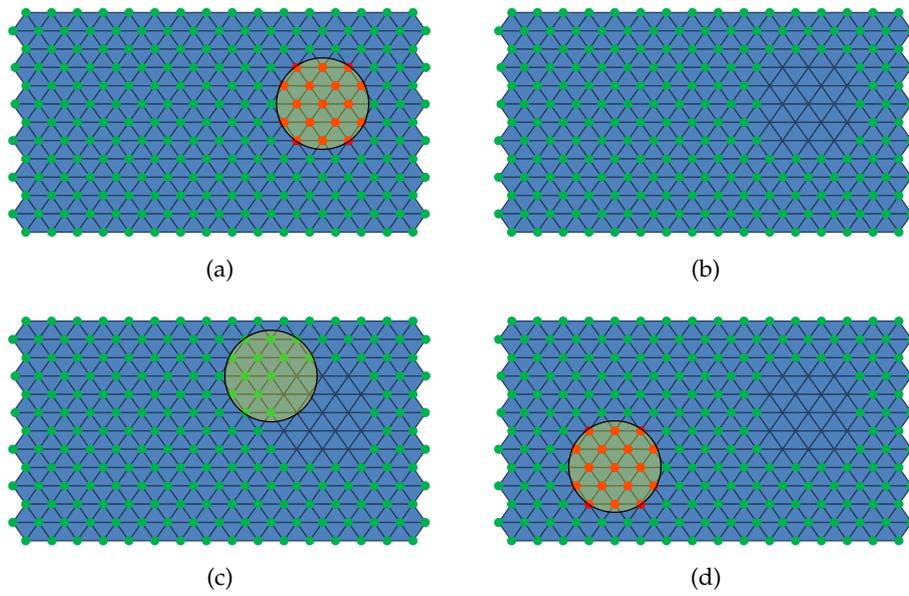


FIGURE 34 – Principe général du lancer de fléchettes proposé. Les sommets verts correspondent aux sommets de M_{sub} encore présents dans la liste L . a) Un échantillon est tiré aléatoirement et son patch est modélisé. b) Il n’y a pas d’intersection de disques : l’échantillon est validé et les sommets couverts par le disque sont retirés de L ; c) un nouvel échantillon est choisi, mais invalidé car son disque ne couvre pas uniquement des sommets appartenant à L ; d) un nouvel échantillon est choisi et validé.

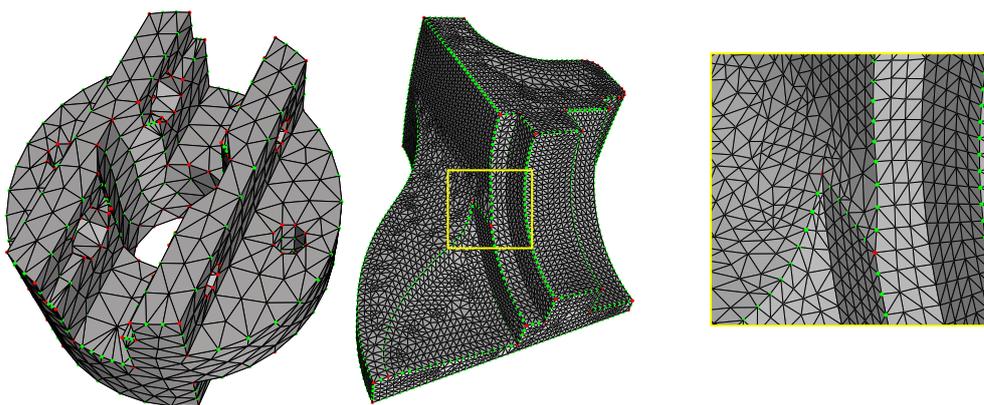


FIGURE 35 – En vert et rouge respectivement les sommets estampillés *Arêtes* et *Coins*.

un **SPMR** similaire à une fonction échelon (voir figure 36 au milieu) : nulle jusqu'à une fréquence donnée, qui correspond à la distance minimale entre les échantillons, puis constante (non nulle) au-delà. L'anisotropie idéale est constante, et très faible (figure 36 à droite). Toutes les distributions présentées ici sont analysées avec une version améliorée de l'outil de Wei *et al.* [WW11] que nous avons développée [PPA15].

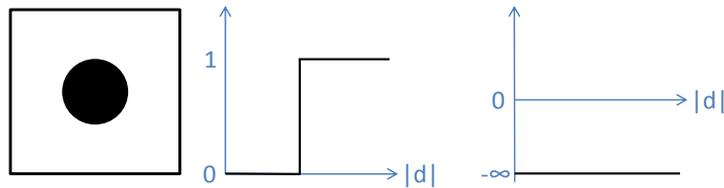
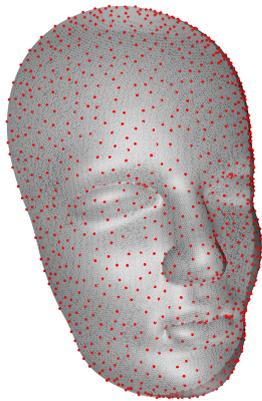


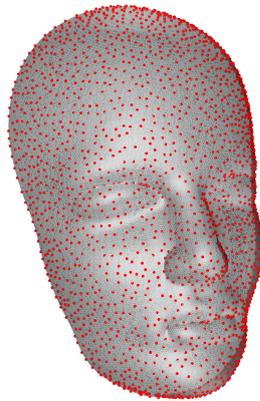
FIGURE 36 – De gauche à droite : périodogramme 2D, spectre de puissance moyen radial (**SPMR**) et anisotropie d'une distribution "bruit bleu".

La Figure 37 (en haut) présente trois distributions obtenues sur **MASK** à des densités différentes. L'analyse confirme qu'elles présentent des caractéristiques typiques d'un bruit bleu. La figure 38 met en avant l'intérêt de prendre en compte la classification des sommets durant le lancer pour des objets de type **CAO** : les coins et les arêtes de **FANDISK** sont bien mieux échantillonnés, sans pour autant atténuer la qualité des distributions (périodogrammes et courbes similaires). Cette fonctionnalité est intéressante pour des objets particulièrement complexes. Pour preuve, la Figure 39 montre que notre approche donne des résultats plus satisfaisants que deux méthodes de référence - [CCS12] et [WW11] - sur **AXLE**, de genre 10 et présentant de nombreuses saillances. On observe notamment que le **SPMR** des deux méthodes de référence présente de fortes oscillations autour de la distance minimale visée. Pire, [CCS12] ne respecte pas la notion de distance minimale (présence de pics entre 0 et la distance minimale visée).

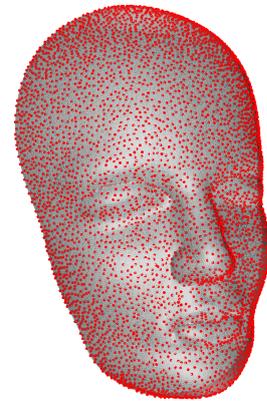
La capacité de notre lancer à bien échantillonner les saillances et à calculer des géodésiques de manière précise nous a incités à l'intégrer dans un algorithme de simplification pour objets de type **CAO** [PPA14a]. Combiné à un partitionnement de Voronoï des échantillons contraint par une heuristique contrôlant l'alignement des arêtes de la triangulation finale avec les saillances du maillage original (voir Figure 40), nous sommes capables de produire des maillages simplifiés très satisfaisants d'un point de vue géométrique (Figure 41). Une analyse plus approfondie présentée dans [Pey14] montre que notre technique de simplification est une alternative intéressante à des méthodes de référence telles que [VCP08] proposée par Valette *et al.* car elle est plus efficace pour des objets complexes tant au niveau visuel qu'au niveau géométrique (**AXLE** par exemple, Figure 41f).



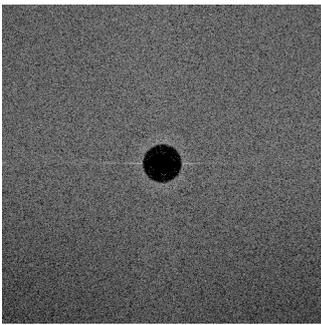
(a) 1k échantillons.



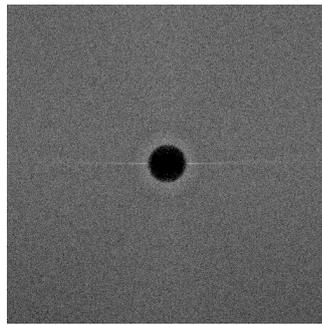
(b) 2k échantillons.



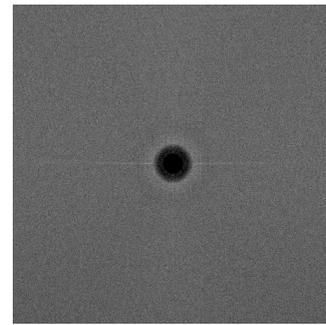
(c) 5k échantillons.



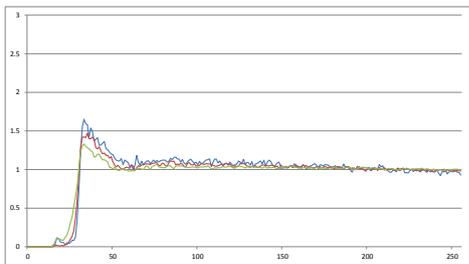
(d) Périodogramme pour 1k.



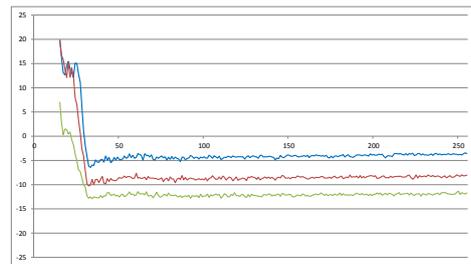
(e) Périodogramme pour 2k.



(f) Périodogramme pour 5k.



(g) SPMRs.



(h) Anisotropie.

FIGURE 37 – Distributions générées pour 3 densités d'échantillons visées : 1k (courbes bleues), 2k (courbes rouges) et 5k (courbes vertes)

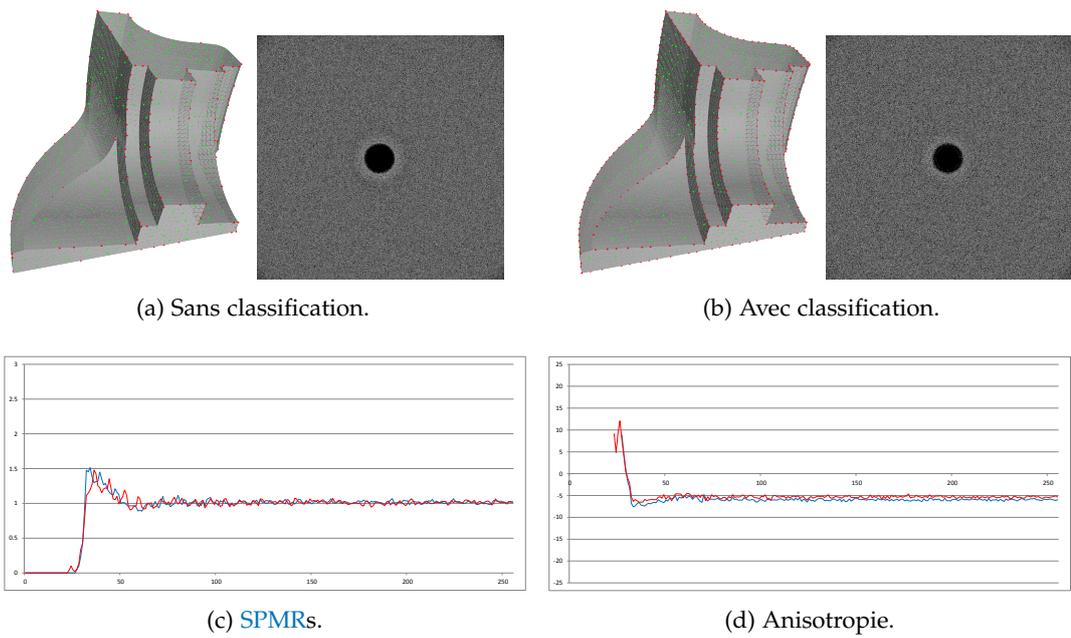


FIGURE 38 – Distributions obtenus sur FANDISK, avec en rouge les échantillons positionnés sur des arêtes saillantes.

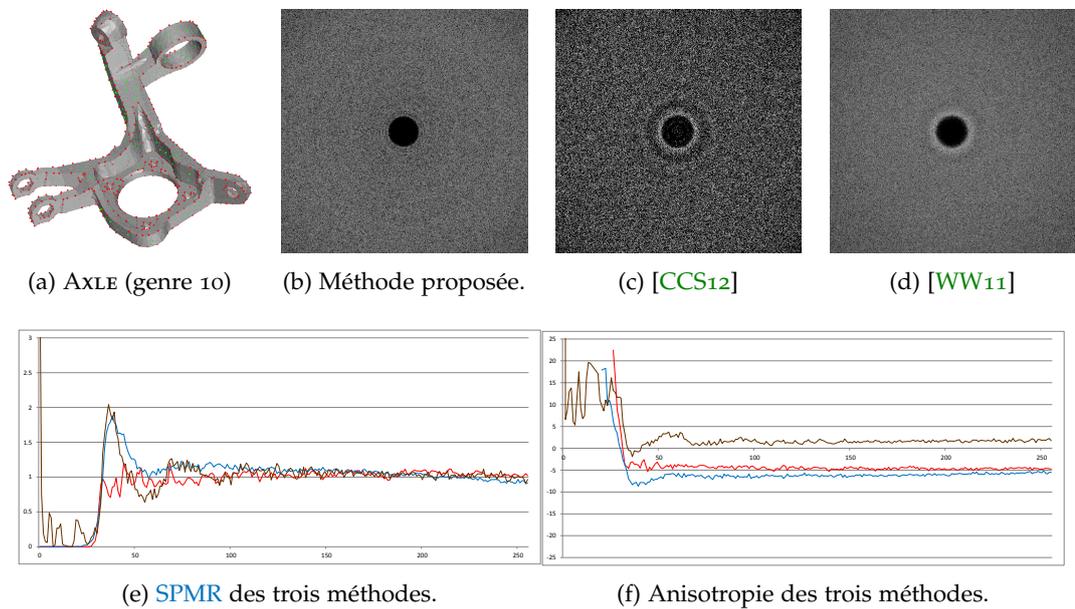


FIGURE 39 – Comparaison avec deux méthodes de l'état de l'art, [CCS12] et [WW11]. Les courbes respectivement rouges, marrons, et bleues sont relatives à notre méthode, [CCS12] et [WW11].

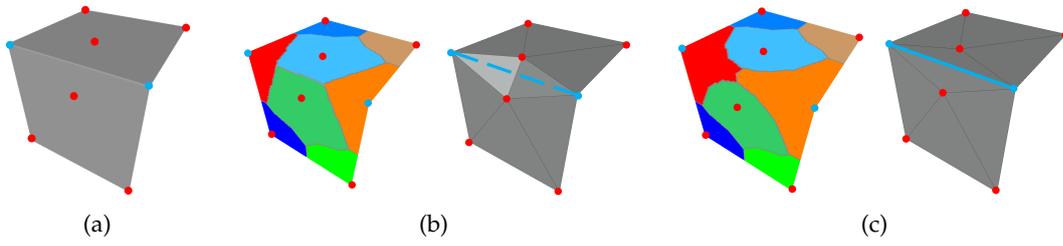


FIGURE 40 – Heuristique proposée pour préserver les saillances d’une surface (a) lors de la triangulation des échantillons [PPA14a]. (b) et (c) Partition/-triangulation obtenues sans et avec heuristique.

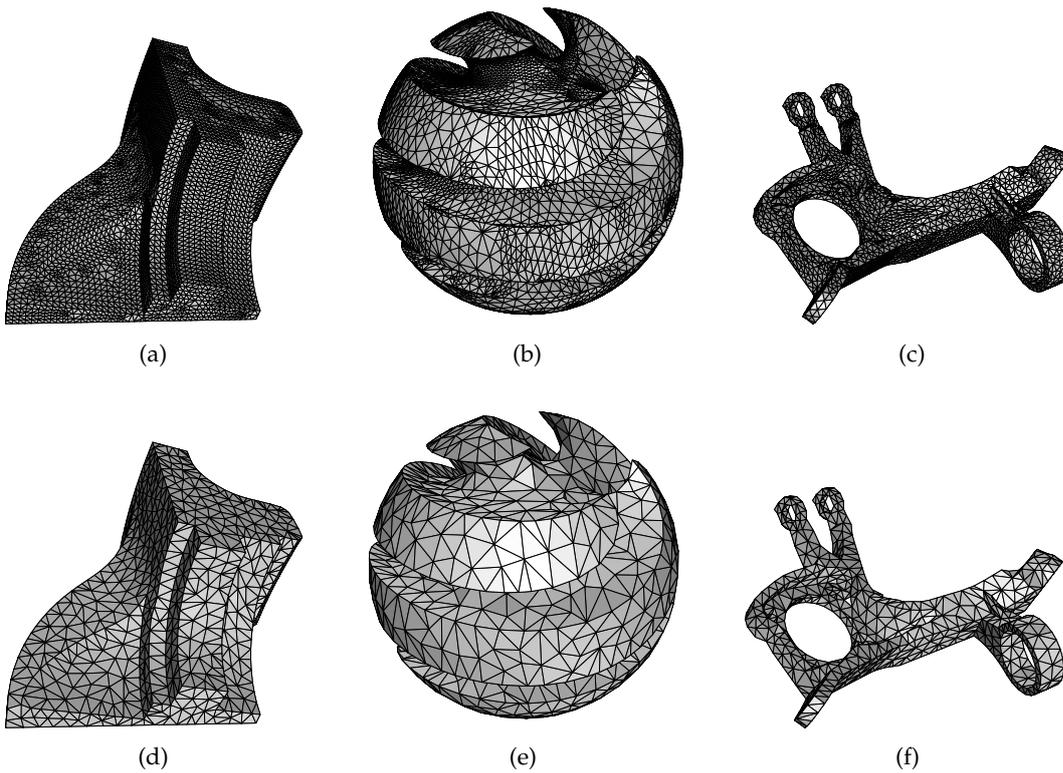


FIGURE 41 – Trois maillages simplifiés avec notre approche [Pey14]. Haut/bas : original/simplifié

9.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre présente notre technique pour générer des distributions en Disques de Poisson sur des maillages surfaciques. Travaillant dans l'espace 3D et capable de maintenir des échantillons sur les saillances des objets, notre algorithme ré-échantillonne efficacement (propriétés de bruit bleu) n'importe quel type de maillages triangulaires, quelles que soient la topologie et la complexité, même en présence d'arêtes vives sur les objets. Il est plus précis et plus rapide que les méthodes incrémentales de l'époque.

Cette technique de lancer de fléchettes a pu être utilisée dans d'autres contextes. En effet, le lancer se fait sur une version subdivisée M_{sub} du domaine Ω que l'on souhaite échantillonner (voir Figure 34) : elle est donc facilement généralisable à tout domaine Ω qui peut être modélisé à l'aide d'un *graphe*. Cette technique a été notamment réutilisée dans notre algorithme de reconstruction 3D présentée au chapitre 8, le graphe structurant les images stéréoscopiques. Nous l'avons aussi étendue à des ensembles de graphes connectés, ce qui a permis de développer la technique de ré-échantillonnage pour nuages de points 3D massifs présentée dans le chapitre suivant.

RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DE NUAGES DE POINTS 3D

Le contenu de ce chapitre est inspiré de l'article [BPA20] que j'ai co-écrit avec Arnaud Bletterer et Marc Antonini, et du manuscrit de thèse d'Arnaud [Ble18].

Le chapitre est organisé de la manière suivante : la section 10.1 introduit la problématique du traitement de nuages de points 3D générés à partir de plusieurs acquisitions. La section 10.2 présente la structure de données proposée. La section 10.3 présente l'algorithme de ré-échantillonnage basé sur cette structure. La section 10.4 conclut le chapitre et propose des perspectives.

10.1 INTRODUCTION

Les points 3D collectés par une caméra de profondeur ou un lidar peuvent être considérés comme des données *structurées* car les cartes de profondeur fournies par ces dispositifs apportent une connectivité implicite entre les points. Le traitement d'un unique nuage 3D est donc relativement facile, comparable au traitement d'une image 2D. Pour capturer une scène à grande échelle, celle-ci doit être scannée depuis plusieurs points de vue. Les nuages 3D obtenus sont ensuite agrégés pour obtenir le nuage de points complet. L'agrégation produit inévitablement une donnée *non structurée*, compliquant son traitement en raison de la perte de connectivité et de régularité d'échantillonnage.

Pour surmonter ce problème, une approche répandue consiste à partitionner l'espace 3D ambiant avec une structure imbriquée, de sorte que les points soient contenus dans des cellules 3D. Ces cellules peuvent être des sphères englobantes [RL00; DVSo3], des voxels [RH10; LZZ13], ou encore des cubes pour les nombreuses approches proposant des *octrees* [PK05; SK06; Hor+13; EBN13; TCF16].

L'avantage de ces méthodes est d'offrir une structure aux nuages de points, puisque l'incidence entre cellules 3D est connue. Bien qu'efficaces pour la compression ou la visualisation par exemple, ces structures peuvent être inappropriées pour certains traitements car elles structurent l'espace 3D ambiant et non pas la *surface sous-jacente* décrite par les points 3D. Cela peut être aussi problématique pour des scènes composées de plusieurs éléments non connexes, car ces structures sont incapables de distinguer les points voisins dans l'espace et les points voisins *sur* la surface.

En 2018, un graphe a été proposé pour structurer un nuage de points 3D [Che+18]. Le graphe a l'avantage d'offrir des informations d'incidence aux points 3D eux-mêmes. Cependant, au regard des nuages 3D issus de capteurs de résolutions de plus en plus élevées, parfois à partir de centaines d'acquisitions, la solution proposée dans [Che+18] n'est pas idéale car l'implémentation disponible ne supporte pas le passage à l'échelle.

Motivation et contributions Ce chapitre propose une alternative à [Che+18]. Notre motivation était de bénéficier de la capacité des graphes à décrire la topologie d'une surface discrétisée tout en étant capable de gérer n'importe quel nuage, quels que soient sa taille et le nombre d'acquisitions qu'il a nécessité. La Figure 42 schématise notre solution. Contrairement à [Che+18] qui crée un unique graphe pour un nuage entier, notre structure consiste en un ensemble fini de *graphes locaux* (Figure 42(b)) construits à partir des cartes de profondeur générées lors de l'acquisition (Figure 42(a)). Utilisé tel quel, un ensemble de graphes indépendants serait inefficace et redondant en raison des recouvrements d'acquisitions voisines. C'est pourquoi notre structure interconnecte les graphes locaux *via* les zones de recouvrement (points en nuance de vert, Figure 42(c)), puis établit des priorités pour les calculs dans ces zones (Figure 42(d)). Ainsi nous obtenons une structure "par morceaux" globalement cohérente et non redondante (Figure 42(e)) de la surface globale.

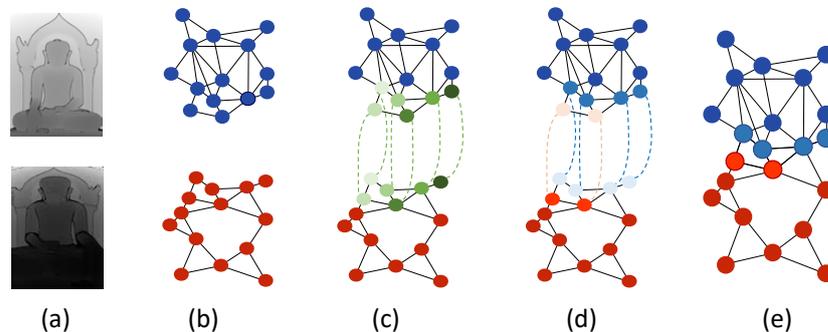


FIGURE 42 – Vue d'ensemble de la solution proposée pour structurer un nuage de points à partir d'un ensemble de graphes.

10.2 DES GRAPHES LOCAUX INTERCONNECTÉS POUR STRUCTURER LES NUAGES

Considérons une scène ou un objet scanné depuis N points de vue connus. Cette procédure fournit N cartes de profondeur ainsi que l'ensemble des paramètres nécessaires pour générer les N nuages de points 3D et pour ensuite les recaler dans un repère global. De tels ensembles sont par exemple les données fournies par les

lidars. Ils peuvent également être générés synthétiquement à partir de modèles 3D [Pie+11].

- Construction des graphes** Considérant chaque carte de profondeur D_i ($i \in \{0, 1, \dots, N\}$) acquise comme un domaine de paramétrisation 2D, un graphe local $G_i = (V_i, E_i)$ est construit afin de structurer une partie du nuage de points (Figure 43a). Un sommet $v \in V_i$ est créé pour chaque pixel non nul $d \in D_i$, relié aux sommets de son voisinage direct (figure 43b), et les coordonnées (x, y, z) du point 3D correspondant p lui sont affectées. Les arêtes à cheval sur les fortes variations de profondeur sont détectées (en rouge sur Figure 43c) et retirées pour obtenir un graphe local conforme à la topologie de la surface numérisée (Figure 43d). En appliquant cette procédure sur chaque carte, on obtient N graphes locaux $\{G_1, G_2, \dots, G_N\}$ décrivant le nuage de points depuis différents points de vue.

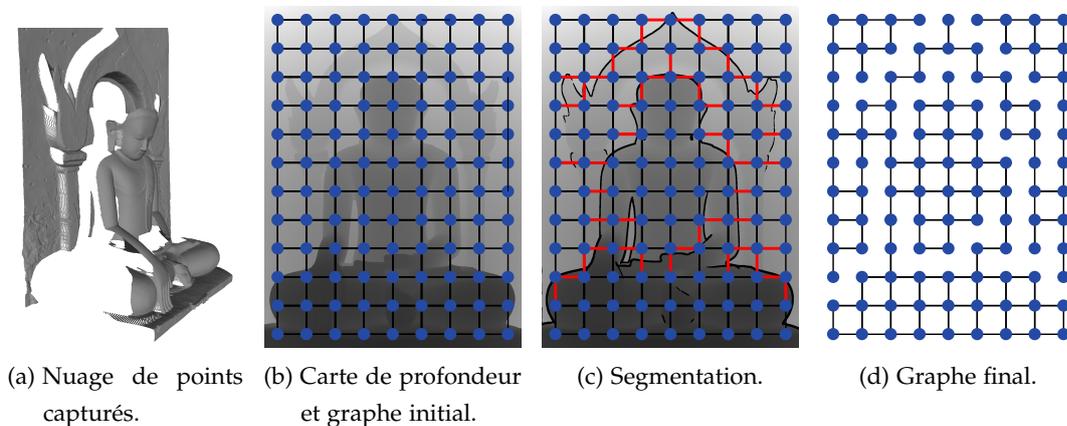


FIGURE 43 – Calcul d'un graphe à partir d'une carte de profondeur.

Une acquisition pouvant représenter à elle seule des centaines de millions de points, un graphe local peut dépasser la capacité de la RAM. Notre algorithme intègre donc la possibilité de diviser les cartes de profondeur en *tuiles chevauchantes* (Figure 44) avant de structurer le nuage de points. Ces tuiles sont ensuite considérées comme des cartes de profondeur classiques.

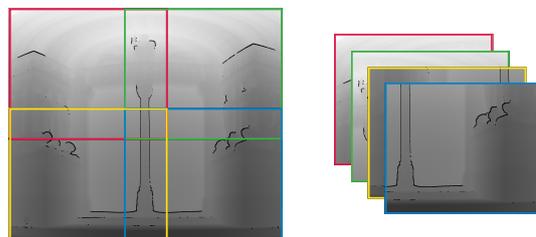


FIGURE 44 – Division d'une carte de profondeur en *tuiles chevauchantes*, pour réduire l'empreinte mémoire.

- **Interconnexion des graphes locaux** L'ensemble des graphes locaux construits à l'étape précédente est enrichi avec des données additionnelles décrivant explicitement les interconnexions entre eux. Les interconnexions sont définies par des *arêtes inter-graphes* associant les sommets des différents graphes qui décrivent la même unité de surface numérisée (appelés par la suite *sommets redondants*) selon la stratégie présentée Figure 45. Ces arêtes inter-graphes sont incluses dans la structure de données avec un coût de stockage minimal et permettent de naviguer d'un graphe à un autre comme dans une structure globale.

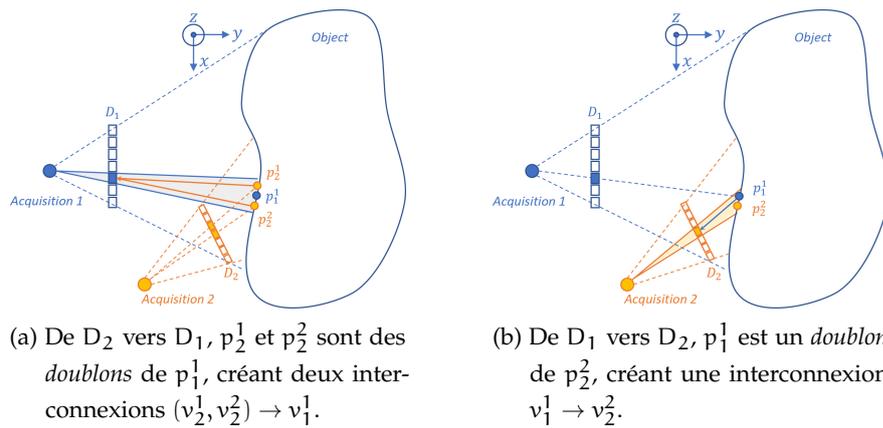


FIGURE 45 – Méthodologie pour interconnecter deux graphes locaux.

- **Gestion des sommets interconnectés** Une arête inter-graphe relie des sommets redondants. Si une opération quelconque doit être effectuée sur l'un de ces sommets, il est fait sur le sommet v ayant la plus forte densité d'échantillonnage local $w(v)$ dans son graphe, estimée avec la fonction suivante

$$\frac{1}{w(v)} = \frac{1}{|\mathcal{N}_1(v)|} \sum_{v' \in \mathcal{N}_1(v)} \|P(v') - P(v)\|^2,$$

où $\mathcal{N}_1(v)$ est le 1-voisinage de v dans le graphe concerné, et $P(v)$ et $P(v')$ les coordonnées 3D des points associés à v et v' , respectivement. Ce sommet v sera considéré comme le *meilleur représentant* de cette région parmi cet ensemble de sommets interconnectés. Ainsi, les sommets de chaque graphe sont classés en deux groupes : les sommets *actifs* sur lesquels les opérations seront effectuées, et les sommets *inactifs* qui récupéreront le résultat des opérations faites sur leur meilleur représentant. Le choix du meilleur représentant pour chaque ensemble de sommets interconnectés est stocké comme information additionnelle dans la structure de données.

Le tableau 18 montre que l'on peut structurer des milliards de points - plusieurs centaines de GiB - sans que l'occupation de la RAM dépasse les 6GiB (cellules

grisées). Ce tableau montre aussi que le pic mémoire atteint en RAM peut être contrôlé en ajustant la taille des tuiles (cellules non grisées). Cette fonctionnalité est particulièrement intéressante si l'on doit structurer des nuages de points sur des machines ayant des capacités limitées. La contrepartie est une augmentation du temps d'exécution.

10.3 TECHNIQUE DE RÉ-ÉCHANTILLONNAGE BASÉE SUR CETTE STRUCTURE

Cette structure permet de généraliser l'algorithme de lancer de fléchettes présenté au chapitre précédent à tout type de nuage de points 3D, qu'il soit unique ou issu de la fusion de plusieurs acquisitions. Le principe général est illustré Figure 46. Considérons un domaine Ω à échantillonner décrit par plusieurs sous-domaines superposés (représentés ici par des rectangles) et définis par autant de graphes connectés. Le processus est itératif pour limiter l'occupation mémoire : un premier sous-domaine (rectangle rouge) est ré-échantillonné. Un deuxième sous-domaine (rectangle vert) est ensuite ré-échantillonné en tenant compte des disques déjà positionnés dans la zone commune (la transmission de l'information se fait *via* les arêtes inter-graphes), et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble du domaine d'échantillonnage soit ré-échantillonné.

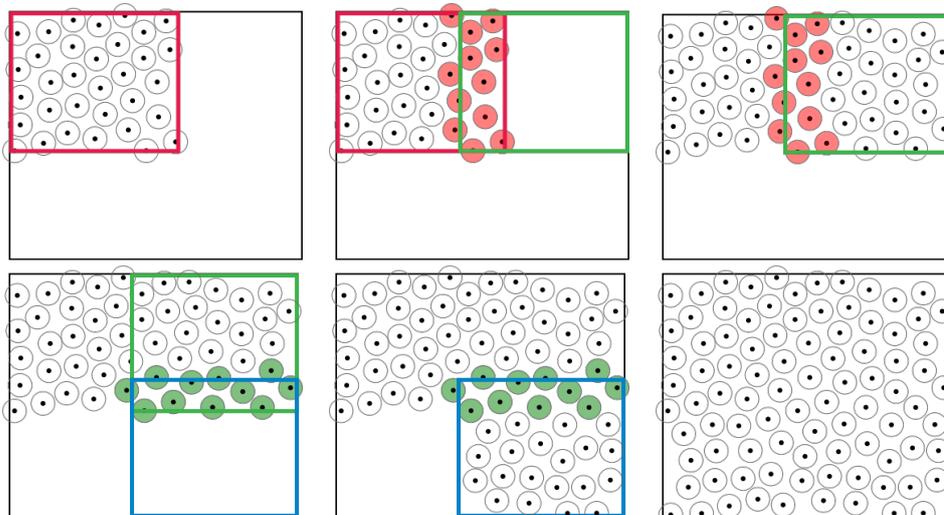


FIGURE 46 – Principe général de notre schéma de ré-échantillonnage.

La figure 47 présente ARMADILLO ré-échantillonné avec notre approche, à partir de douze cartes de profondeur générées synthétiquement [Pie+11]. Les distributions sont visuellement satisfaisantes, quelle que soit la densité. Le tableau 19 confirme la qualité des distributions obtenues avec notre méthode.

Les nuages 3D représentant des scènes étendues (environnements urbains, sites historiques, etc.) présentent des caractéristiques qui justifient pleinement une tech-

Données	# Points [M]	# Acq.	Stockage [GiB]	Tuilage	Tailles tuiles (p × p)	# Tuiles	Pic RAM [GiB] (gain)	Temps [h : m : s]
TEMPLO MAYOR	349	17	46,2	non	n/a	n/a	3,5 (-92,4%)	00:07:23
				oui	8192	33	1,8 (-96,1%)	00:09:25
				oui	4096	55	1,0 (-97,8%)	00:11:48
PALAIS (EXT.)	977	23	71,8	oui	2048	213	0,6 (-98,7%)	00:25:57
				non	n/a	n/a	5,7 (-92,1%)	00:15:22
				oui	8192	54	2,8 (-96,1%)	00:25:14
MEETING HOUSE	1 493	50	139,0	oui	4096	162	1,0 (-98,3%)	01:00:36
				oui	2048	490	0,6 (-99,0%)	03:04:53
				non	n/a	n/a	5,7 (-95,9%)	00:56:28
PALAIS (INT.)	1 748	37	135,7	oui	8192	101	2,9 (-97,9%)	01:30:18
				oui	4096	278	1,1 (-99,2%)	03:56:03
				oui	2048	933	0,6 (-99,6%)	12:32:46
ANANDA OAK KYAUNG	1 703	126	158,7	non	n/a	n/a	5,7 (-95,2%)	00:43:00
				oui	8192	78	2,8 (-97,9%)	01:04:51
WAT PHRA SI SANPHET	5 313	177	641,8	oui	4096	234	1,1 (-99,1%)	02:26:14
				oui	2048	704	0,6 (-99,5%)	04:30:21
				non	n/a	n/a	1,9 (-98,8%)	02:17:57
				non	n/a	n/a	5,7 (-99,1%)	10:35:28

TABLEAU 18 – Coût de stockage (4ème colonne), Occupation RAM (8ème colonne) et temps d'exécution (9ème colonne) nécessaires pour structurer des jeux de données gigantesques.

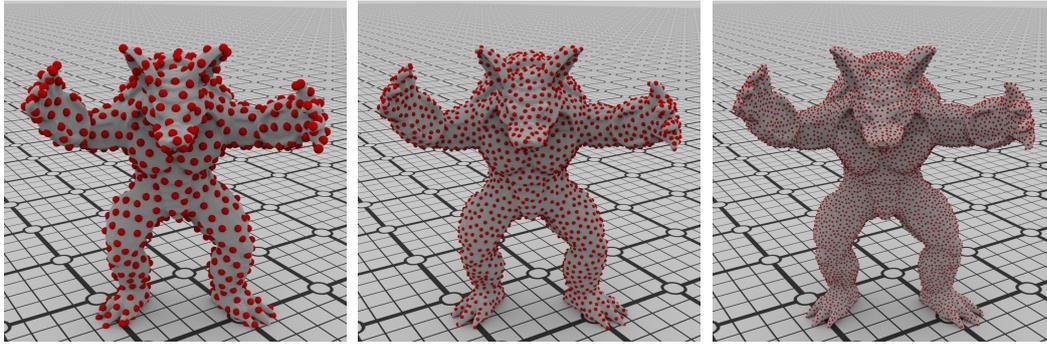


FIGURE 47 – Distributions en disques de Poisson (DDPs) générées sur ARMADILLO.

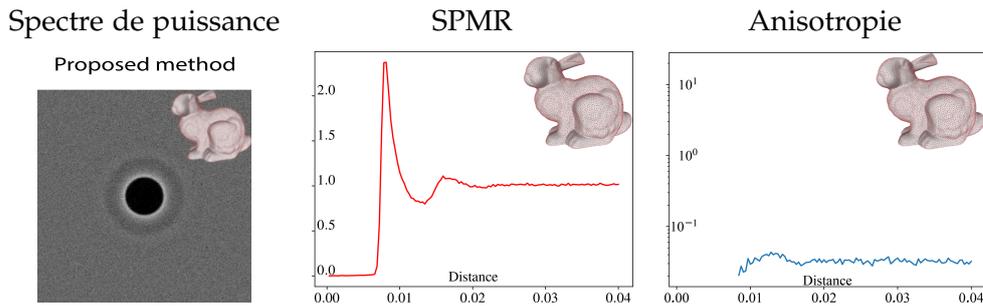


TABLEAU 19 – Les distributions générées par notre algorithme présentent des statistiques typiques de DDPs (évaluées avec [WW11]).

nique de ré-échantillonnage basée sur notre structure : i) ils sont obtenus par fusion de dizaines ou centaines de scans, ii) ils peuvent contenir des milliards de points, et sont souvent *out-of-core* iii) la densité de points présente de fortes variations locales en fonction de la position et de l'orientation des scanners sur le site, mais aussi à cause des zones de recouvrement. La figure 48 confirme cela : on y voit WAT PHRA SI SANPHET (40 km², 5,3 milliards de points, 156 acquisitions) ré-échantillonné avec "seulement" 155 millions de points, en n'utilisant jamais plus de 16GiB de RAM. De plus, notre structure offre la possibilité d'appliquer un ré-échantillonnage *adaptatif* tenant compte de la courbure, ce qui permet de répartir efficacement les points sur toute la surface, tout en préservant des détails fins tel que les briques. La figure 49 confirme la capacité de notre approche adaptative à conserver les détails fins et par conséquent à mettre en avant les saillances des surfaces [BDC18] de manière efficace. On y voit la verrière du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE ré-échantillonnée uniformément avec [CCS12] ou avec notre méthode, puis ré-échantillonnée avec notre méthode de manière adaptative. Pour obtenir ces résultats, notre méthode a traité l'ensemble des données (1,5 milliard de points, 37 acquisitions) en utilisant au maximum 16GiB de RAM. En comparaison, [CCS12] a utilisé environ 7GiB de RAM, mais uniquement pour ré-échantillonner la partie correspondante à la verrière (3,3% du nombre total de points) que nous avons dû



FIGURE 48 – WAT PHRA SI SANPHET (40 km², 5,3 milliards de points, 156 acquisitions) [Goo] ré-échantillonné de manière adaptative avec 155 millions de points (2,8%).

extraire manuellement car son implémentation est *in-core* et ne supportait pas la taille des données initiales. D'une manière générale, durant ce projet notre échantillonneur a été capable de traiter des nuages allant jusqu'à de plus de 5 milliards de points avec un pic mémoire toujours inférieur à 16GiB, et pouvant être réduit à moins de 1GiB avec des tuiles de 2048×2048 pixels.

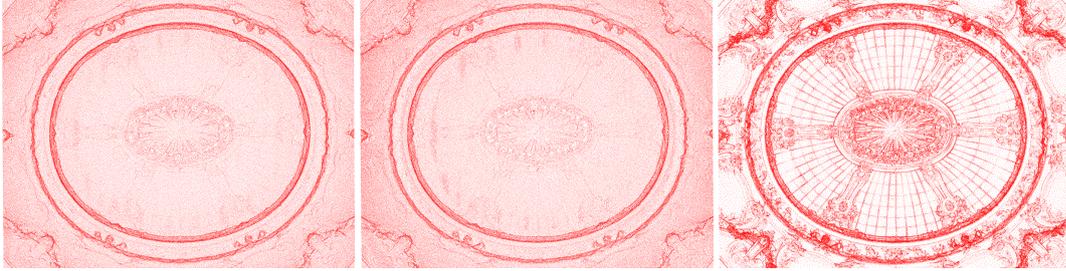


FIGURE 49 – Verrière du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE [Agg] ré-échantillonnée avec 1% des points initiaux. Respectivement : DDP uniforme obtenue avec [CCS12], et DDPs uniforme et adaptative obtenues avec notre méthode. Données d'entrée : 1,5 milliard de points.

Pour montrer une autre application possible, les Figures 50 et 51 présentent des reconstructions faites avec [BL17] à partir de nuages ré-échantillonnés avec notre méthode. Nous pouvons constater que les reconstructions obtenues sont de haute qualité.



FIGURE 50 – Surfaces [Goo] reconstruites avec [BL17] à partir de DDPs adaptatives.



FIGURE 51 – Façade du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE [Agp], et surface correspondante reconstruite avec [BL17] à partir d’une DDP adaptative.

10.4 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre présente la solution inédite que nous avons proposée pour structurer des nuages de points 3D. Tirant partie des avantages d’un graphe modélisant une surface numérisée [Che+18], nous avons proposé une structure originale qui définit un graphe local par carte de profondeur associée au nuage. Les graphes sont dans un second temps interconnectés pour couvrir entièrement et sans redondance le nuage de points 3D. Grâce à une implémentation *out-of-core*, des milliards de points peuvent ainsi être structurés avec n’importe quel ordinateur ayant une configuration raisonnable. Cette structure nous semble être prometteuse, et utile pour la communauté du traitement de la géométrie tant la quantité gigantesque de données représente à elle seule un véritable défi scientifique. Pour rendre notre structure encore plus attractive, une amélioration potentielle serait de réduire son coût de stockage, en proposant une structure plus compacte des graphes et des informations additionnelles telles que les interconnexions. Une parallélisation de certaines fonctions, notamment la mise en correspondance des points redondants, permettrait aussi de réduire le temps de calcul d’un facteur proche du nombre de *threads* utilisés.

De nombreuses applications peuvent s’appuyer sur cette structure. Nous avons montré qu’elle permet de ré-échantillonner efficacement des nuages 3D gigantesques, ce qui est impossible avec des méthodes de l’état de l’art telles que [CCS12] et [Che+18]. Nous avons aussi montré dans [BPA22] qu’elle permettait de calculer au fil de l’eau des diagrammes de Voronoï sur des surfaces définies par des nuages

de points 3D, ce qui pourrait à terme découler sur une nouvelle méthode de reconstruction 3D *out-of-core*.



FIGURE 52 – Diagrammes de Voronoï de points 3D calculés au fil de l'eau à partir de graphes locaux interconnectés [BPA22].

Quatrième partie

FOCUS SUR... MES PROJETS EN COURS

INTRODUCTION

Cette partie détaille mes deux projets les plus récents. Le premier projet est le fruit d'une collaboration débutée en 2015 avec des membres de l'IFPEN, principalement Laurent Duval (avec qui je collabore encore), et Sébastien Schneider (jusqu'en 2017). Ces derniers travaillaient sur une technique d'analyse multi-échelle dédiée aux maillages volumiques très particuliers que l'on manipule en géosciences. Désireux de mettre en place une collaboration afin de développer une solution complète de compression progressive facilitant le stockage de ces données très volumineuses (aucune méthode de l'état de l'art n'est adaptée aux maillages géologiques), Laurent nous a contacté. Cette collaboration s'est concrétisée durant le postdoc de Jean-Luc Peyrot (2015-2016) qui a développé **HexaShrink, une technique de décomposition multi-échelle qui prend en compte toutes les spécificités des maillages volumiques géologiques** (discontinuités géométriques, propriétés hétérogènes attribuées aux cellules, etc.) [Pey+16; Pay+17; Bou+18; Pey+19]. Une fonctionnalité de HEXASHRINK a fait l'objet d'un brevet international [Ant+17] en 2017. Notre collaboration s'est poursuivie avec le co-encadrement de Lauriane Bouard (2018-2021). Durant cette période, nous avons mis en place une solution complète de compression progressive basée sur HEXASHRINK. Soucieux de réduire la quantité extraordinaire de données numériques générées, manipulées et produites dans le domaine de la simulation, nous avons montré qu'il était possible d'effectuer des **simulations numériques réalistes à partir des maillages partiellement décodés** [Bou+19a; Bou+19b; Bou+21]. Le chapitre 11 relate ces contributions.

Le deuxième de ces projets est né d'une rencontre avec Dominique Douguet, chemo-informaticienne à l'IPMC (UCA-CNRS), en 2018. Dominique souhaitait développer une méthode de calcul de similarité moléculaire. Ce sujet est très répandu dans le domaine de la pharmacologie, notamment dans un contexte de développement de nouveaux médicaments. La plupart des méthodes de calcul de similarité est basée sur des représentations 1D ou 2D. Quelques unes se basent sur des représentations 3D, mais rarement sur la géométrie des surfaces moléculaires. C'est dans l'optique d'utiliser des représentations discrètes des surfaces moléculaires que Dominique a contacté l'équipe. Inspirés par les techniques de recalage de nuages de points 3D, Dominique et moi-même avons développé **SenSaaS, un algorithme capable de superposer des surfaces moléculaires discrétisées afin de mettre en évidence des similarités géométriques mais aussi physico-chimiques** entre molécules [DP20; DP21; DPG21]. Le chapitre 12 lui est dédié.

TRAITEMENT DES MAILLAGES VOLUMIQUES SPÉCIFIQUES AUX GÉOSCIENCES : VERS UNE COMPRESSION PROGRESSIVE ET UNE SIMULATION À PRÉCISION VARIABLE.

Le contenu de ce chapitre s'inspire de l'article [Pey+19] (coécrit avec Jean-Luc Peyrot, Laurent Duval, Lauriane Bouard, Lénaïc Chizat, Sébastien Schneider et Marc Antonini), et du manuscrit de thèse de Lauriane Bouard [Bou21].

Il chapitre est structuré de la manière suivante : La section 11.1 introduit les maillages hexaédriques que l'on rencontre en géosciences, la problématique liée à leurs spécificités et la solution proposée, nommée HEXASHRINK. La section 11.2 détaille HEXASHRINK. La section 11.3 présente des performances en terme de compression. La section 11.4 explique comment HEXASHRINK peut être utilisé pour effectuer des simulations à précision variable. Enfin, la section 11.5 résume nos contributions et présente les perspectives.

11.1 INTRODUCTION

En géosciences, un **MV** est généralement hexaédrique (Figure 53). Il est donc *structuré* : ces cellules sont topologiquement alignées sur une grille cartésienne 3D. Chaque sommet est associé à un nœud sur la grille, et chaque cellule est indexé à l'aide d'un triplet (i, j, k) . La connectivité est implicite, et seule la position des sommets est requise pour décrire le **MV**. Les **MVs** représentant des sous-sols ont généralement des *propriétés physiques* associées aux cellules (voir Figure 53, au centre et à droite) : elles peuvent être scalaires (porosité,...) ou vectorielles (type de roches, ...). On peut aussi distinguer les *propriétés continues* (saturation, porosité, perméabilité, température,...) et les *propriétés catégorielles* (valeurs sans unité, le

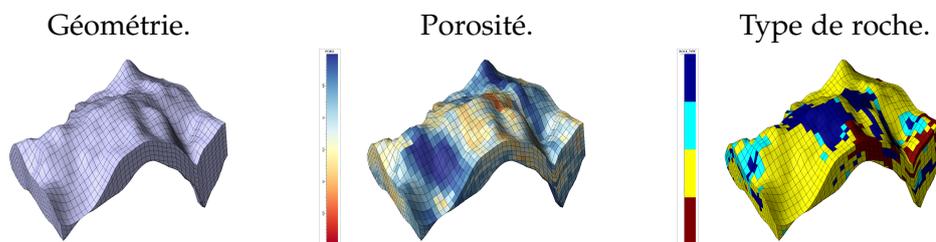


FIGURE 53 – maillage volumique (**MV**) géologique typique.

type de roches par exemple). Chaque cellule possède aussi un booléen `ACTNUM` qui permet de désactiver son affichage (pour décrire des grottes, des surplombs ou tout simplement les bords du maillage) et aussi son influence lors de simulations. Une autre spécificité est la présence éventuelle de *discontinuités géométriques* pour modéliser des failles. Ainsi, à chaque nœud de la grille cartésienne sont associés 8 sommets, un pour chaque cellule adjacente (voir Figure 54).

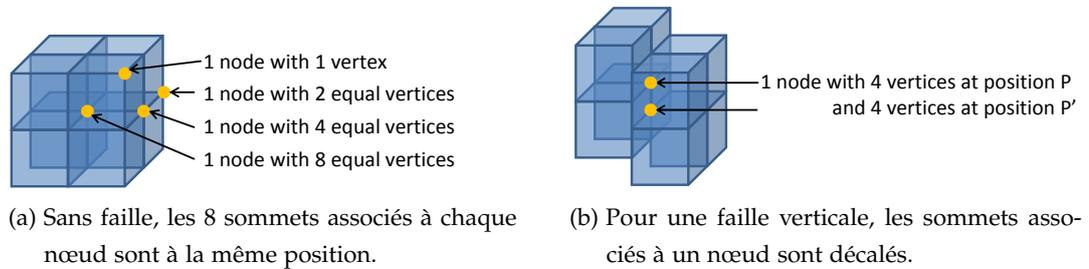


FIGURE 54 – Gestion des failles.

La structure de données la plus populaire pour les `MVs` géologiques se nomme *Corner Point Grid* [RH16; Lie16]. Elle est aussi connue sous le nom de *pillar grid* car elle est composée d'un ensemble de piliers verticaux plus ou moins inclinés (Figure 55), entre lesquelles les cellules vont pouvoir se déformer, s'écraser, etc.

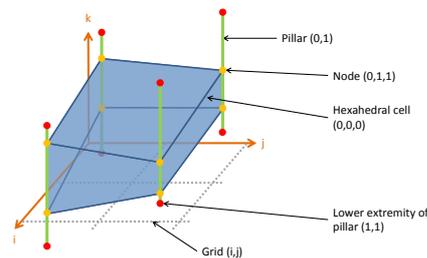


FIGURE 55 – Cellule hexaédrique décrite selon la méthode des "piliers" (*pillar grid*).

Toutes ces spécificités font que les méthodes de compression de `MVs` proposées à partir de la fin des années 90 ne sont pas utilisables en géosciences, qu'elles soient monorésolutions (*single-rate* en anglais) [SR00; GGS99; IA03; KTvo8; LI08; Che+05; Ise+06; CI10], ou *progressives/multirésolutions* [PRS99; Dan+02; Bos+06]. C'est dans ce contexte que les chercheurs de l'IFPEN ont proposé en 2014 un prototype de décomposition multi-échelle pour maillages géologiques [Chi14]. Sa principale contribution réside dans la gestion des failles grâce à une ondelette morphologique (Figure 56). Malheureusement, ce prototype ne gérait qu'un nombre limité de types de faille.

Motivation et contribution Lors de la collaboration IFPEN-I3S, nous avons proposé HEXASHRINK, une décomposition multi-échelle dédiée aux maillages géolo-

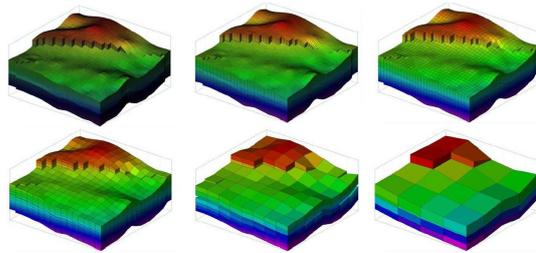


FIGURE 56 – Décomposition multi-échelle obtenue avec le prototype de [Chi14] sur un MV géologique simple .

giques (Figure 57). HEXASHRINK n'est pas la première technique produisant des versions sous-échantillonnées de tels maillages : les "géomodeleurs", logiciels très répandus en géosciences, proposent depuis des années des fonctions d'*upscaling* pour simplifier les maillages. Mais à notre connaissance, HEXASHRINK est la première méthode qui produit une structure imbriquée et totalement réversible des résolutions inférieures (de manière similaire à ce qui se fait en image ou en vidéo), tout en préservant une cohérence des failles, des bords, et de toutes les propriétés d'une résolution à l'autre.

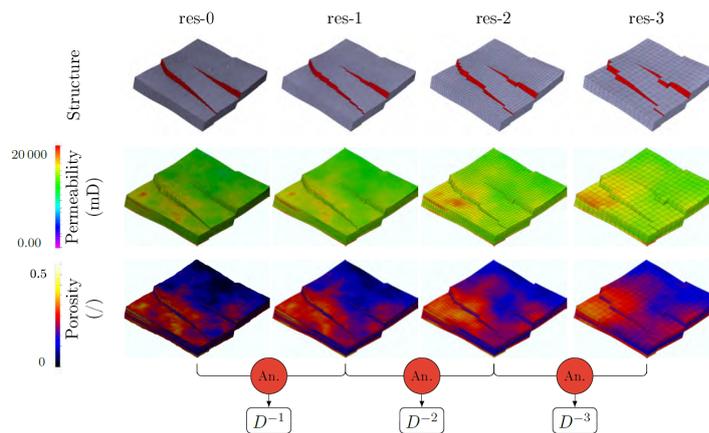


FIGURE 57 – Maillage original et trois résolutions inférieures fournies par HEXASHRINK. La structure géométrique, les failles et la répartition spatiale des propriétés continues restent cohérentes à travers les résolutions.

La structure imbriquée produite par HEXASHRINK a de nombreux avantages :

- elle facilite la visualisation à différents niveaux de détails (LOD) ;
- elle n'occupe pas plus de mémoire que le maillage original, contrairement aux maillages produits par *upscaling* ;
- elle est propice à la compression : voir Section 11.3 ;
- elle permet d'effectuer des simulations subjectivement réalistes dans des maillages partiellement décompressés : voir Section 11.4.

11.2 MÉTHODOLOGIE HEXASHRINK

Lors de l'analyse, HEXASHRINK transforme un MV M^0 en une version approximée M^{-1} contenant 8 fois moins de cellules, *plus* un sous-ensemble de détails (ou *coefficients*) D^{-1} représentant les informations retirées à M^0 (Figure 58). La synthèse produit l'effet inverse. Si on applique l'étape d'analyse L fois, M^0 sera décomposé en M^{-L} , une approximation grossière de M^0 et L sous-ensembles de détails ($D^{-L}, \dots, D^1, \dots, D^{-1}$), représentant les informations retirées entre chaque résolution.

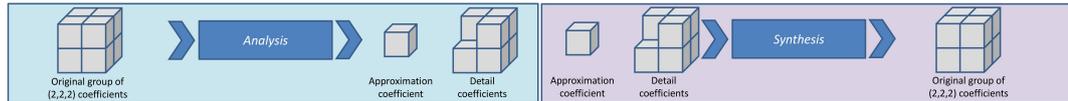


FIGURE 58 – HEXASHRINK transforme un regroupement de 8 cellules voisines en une cellule d'approximation, et 7 cellules de détails.

Pour gérer les différentes informations décrivant le maillage M^0 , nous avons combiné 4 schémas de décomposition que nous appellerons par simplicité *ondelettes* [KGV12] dans le reste du chapitre. Ces schémas sont tous implémentés selon un *schéma lifting* [Swe96], combinant de manière linéaire ou non-linéaire les coefficients, mais aussi de manière séparable ou non-séparable [Jac+11], selon le type d'information analysée.

11.2.1 Analyse multirésolution de la structure géométrique

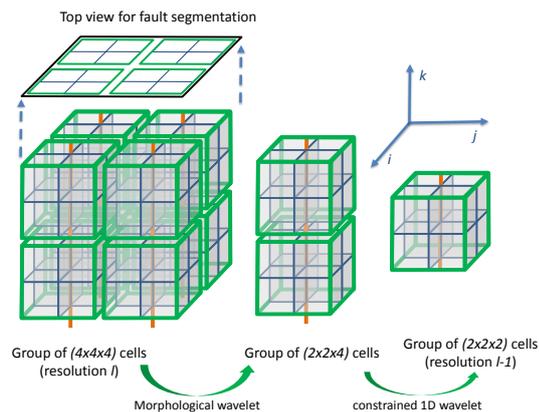


FIGURE 59 – Schéma d'analyse pour la géométrie.

L'analyse de la géométrie se fait en deux étapes (Figure 59). La première étape est une ondelette 2D morphologique qui prédit les failles aux résolutions inférieures. A chaque résolution, les failles sont décrites à l'aide d'une douzaine de

configurations possibles vues du dessus. La prédiction à la résolution inférieure se fait par fusion de 4 configurations voisines selon le principe de la fonction logique OU appliquée sur chaque côté de chaque groupe de 4 nœuds (Figure 60). Le nœud dont la configuration minimise sa distance avec celle prédite correspond au coefficient d'approximation retenu à la résolution inférieure.

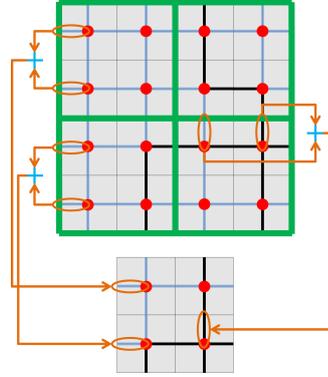


FIGURE 60 – Prédiction d'une faille à la résolution inférieure.

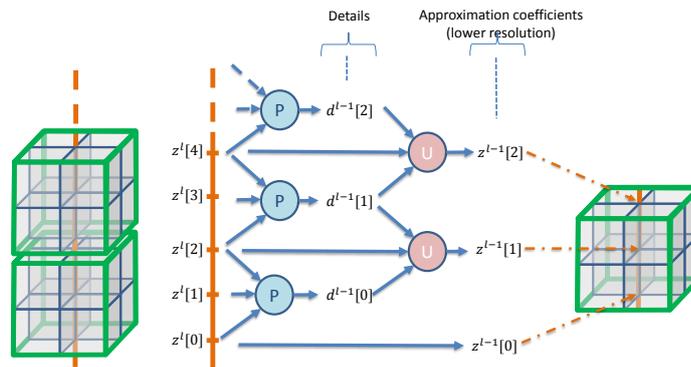


FIGURE 61 – Analyse des coordonnées z des sommets le long des piliers.

La deuxième étape est une ondelette 1D non linéaire (CDF 5/3 [CDF_{g2}]) appliquée sur les coordonnées z des sommets le long de chaque pilier conservé à l'étape précédente (Figure 61). Pour récupérer les détails d^l et les coordonnées z^l à la résolution $l - 1$ à partir de l'échelle l , on utilise les équations suivantes ($\forall n \in \mathbb{N}$) :

$$d^{l-1}[n] = z^l[2n + 1] - \left\lfloor \frac{z^l[2n] + z^l[2n + 2]}{2} \right\rfloor, \quad (1)$$

$$z^{l-1}[n] = z^l[2n + 0] + \left\lfloor \frac{d^{l-1}[n - 1] + d^{l-1}[n]}{4} \right\rfloor, \quad (2)$$

Pour la synthèse :

$$z^l[2n] = z^{l-1}[n] - \left\lfloor \frac{d^{l-1}[n - 1] + d^{l-1}[n]}{4} \right\rfloor, \quad (3)$$

$$z^l[2n + 1] = d^{l-1}[n] + \left\lfloor \frac{z^l[2n] + z^l[2n + 2]}{2} \right\rfloor. \quad (4)$$

Pour éviter l'apparition d'artefacts sur les bords des maillages, des contraintes ont été ajoutées lors de l'analyse des nœuds extrêmes et un traitement particulier a aussi été proposé pour les piliers limitrophes de cellules inactives (ayant un champ $ACTNUM = 0$). Pour plus de détails voir [Pey+19]. Ce schéma est aussi appliqué aux ensembles de nœuds *floor* et *ceil* du MV initial, pour obtenir les coordonnées x et y des extrémités des piliers conservés à la résolution inférieure.

11.2.2 Analyse multirésolution des propriétés continues

Pour les propriétés scalaires, une valeur $p_i \in \mathbb{R}$ est associée à chaque cellule i du maillage. L'analyse de ces propriétés se base sur une adaptation de l'ondelette de *Haar*, toujours selon le schéma de décomposition présenté Figure 58. Pour chaque bloc de 8 cellules, le coefficient d'approximation p^{l-1} est la valeur moyenne des huit coefficients de propriété associés $\{p_1^l, p_2^l, \dots, p_8^l\}$. Les détails sont les différences par rapport au coefficient d'approximation :

$$p^{l-1} = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 p_n^l; \quad d_n^{l-1} = p_n^l - p^{l-1}, \forall n \neq 1.$$

Pour éviter une imprécision liée à la division, les réels sont convertis en entiers avec un facteur 10^6 (défini par l'utilisateur), puis on s'affranchit de la division en utilisant une somme. L'analyse devient :

$$p^{l-1} = \sum_{n=1}^8 p_n^l; \quad d_n^{l-1} = 8p_n^l - p^{l-1}, \forall n \neq 1,$$

et la synthèse devient

$$p_n^l = \frac{1}{8}(d_n^{l-1} + p^{l-1}), \forall n \neq 1; \quad p_1^l = p^{l-1} - \sum_{n=2}^8 p_n^l.$$

11.2.3 Analyse multirésolution des propriétés catégorielles

Pour décomposer les propriétés catégorielles nous utilisons une transformée originale nommée *modelet* [Ant+17]. Considérons une catégorie décrite par un ensemble de valeurs discrètes $\Omega_0 = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_W\}$. A la résolution l , un bloc de cellules sera approximé par sa valeur modale, autrement dit la valeur la plus présente. Ainsi, la *modelet* assure une cohérence des propriétés catégorielles au travers des résolutions. Si deux ou plusieurs catégories dominent un bloc de cellules, nous affectons la valeur dominante dans les cellules du 1-voisinage. Si le maximum n'est toujours pas unique, nous choisissons la catégorie indexée la plus basse. Pour les détails retirés entre les deux résolutions, nous utilisons les différences entre les

catégories originales et la valeur modale. Pour éviter les valeurs négatives (et accessoirement diminuer l'entropie des données d'environ 5%), les détails $\{d_n^{l-1}\}$ d'un bloc \mathcal{C}^l donné sont déterminés par

$$d_n^{l-1} = (-1)^{(p_n^l - p^{l-1} < 0) \wedge ((2p^{l-1} - p_n^l) \notin \Omega)} \times (p_n^l - p^{l-1}).$$

Lors de la synthèse, les coefficients $\{p_i^l\}$ sont obtenus grâce l'équation suivante

$$p_n^l = p^{l-1} + (-1)^{((p^{l-1} + d_n^{l-1}) \notin \Omega)} \times d_n^{l-1}.$$

La Figure 62 montre comment la structure géométrique d'un maillage décomposée avec HEXASHRINK est globalement bien préservée résolution après résolution. Même au niveau le plus grossier, les discontinuités sont toujours présentes. En ce qui concerne les propriétés, porosité et type de roches, les décompositions sont également cohérentes au fil de la décomposition.

11.3 HEXASHRINK DANS UN CONTEXTE DE COMPRESSION

Le tableau 20 présente des performances typiques de compression obtenues lorsque l'on encode des décompositions HEXASHRINK avec les codeurs sans pertes génériques gzip (1992), bzip2 (1996) et LZMA (1998) [NG95; SM09]. HEXASHRINK offre dans tous les cas un taux de compression intéressant, tout en proposant une structure multi-échelle et imbriquée. Cependant, si on analyse individuellement

Maillage	décomposition	gzip	bzip2	LZMA
1	0	3.73	4.98	6.43
	1	5.62	6.07	7.52
	2–4	5.67	6.12–6.13	7.42–7.44
2	0	3.23	8.41	10.12
	1	6.49	10.82	11.81
	2–6	7.48–7.58	12.75–13.03	13.35
3	0	2.67	2.99	3.63
	1	3.88	4.70	5.24
	2–4	4.03–4.05	4.92–4.93	5.47–5.48
4	0	1.83	1.89	2.21
	1	2.64	3.06	3.48
	2–4	2.76	3.22–3.23	3.64–3.65

TABLEAU 20 – Taux de compression obtenus avec HEXASHRINK + [gzip, bzip2, LZMA] pour 4 maillages typiques.

l'efficacité des différentes ondelettes intégrées dans HEXASHRINK (figure 63), on

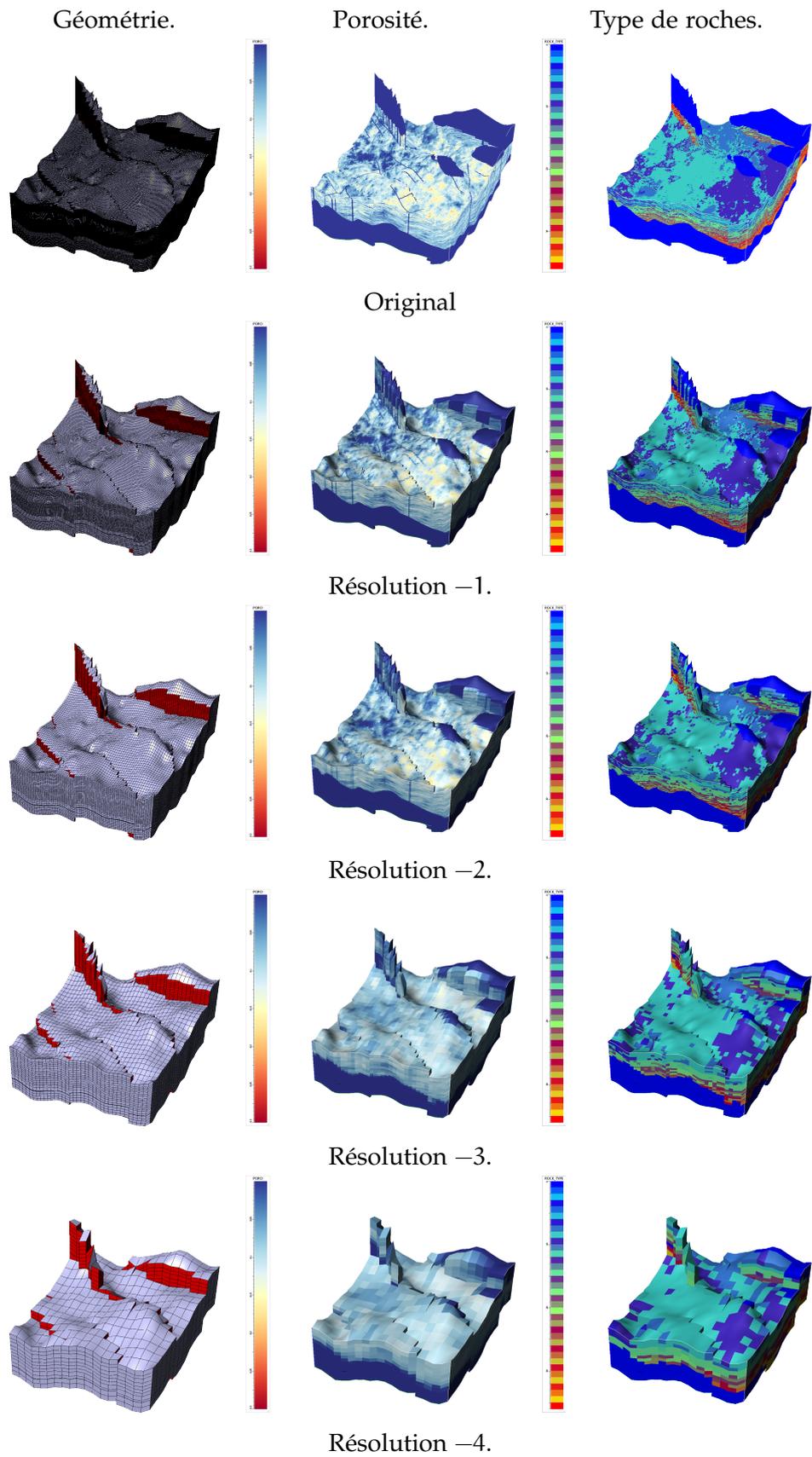


FIGURE 62 – Décomposition HEXASHRINK d'un maillage exhibant des failles.

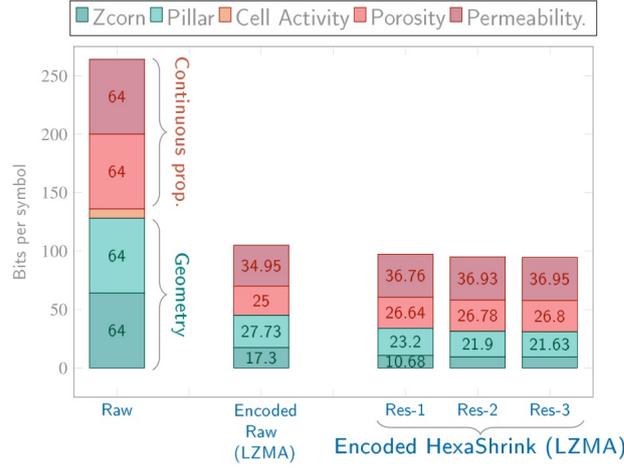


FIGURE 63 – Cout binaire de chaque composante d’un maillage typique avec ou sans compression.

se rend compte que la décomposition appliquée sur les propriétés continues n’a pas l’impact attendu. Ceci s’explique par une dynamique élevée et une précision numérique excessive, toutes deux requises par la simulation. De plus, les codeurs génériques appliqués tels quels n’exploitent pas la corrélation inter-résolution.

Nous avons proposé par la suite un schéma de compression plus perfectionné, combinant un compandor original pour améliorer l’encodage des propriétés continues, HEXASHRINK et un codeur de type *zerotree* [Sha93; SP96] pour exploiter la corrélation inter-résolution et encoder les maillages géologiques de manière progressive (Figure 64). Le compandor proposé permet de modifier les statistiques

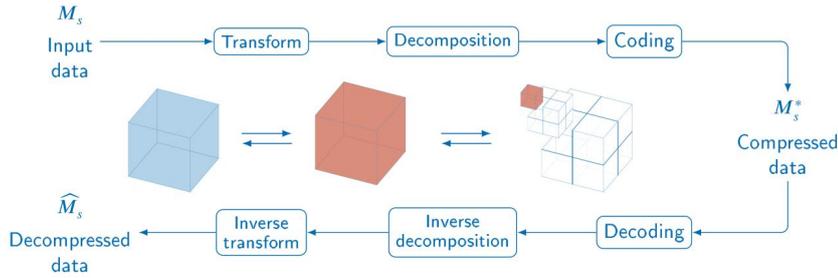


FIGURE 64 – Pipeline de compression/décompression progressive pour MVs, combinant compandor, HEXASHRINK, et codeur *zerotree*.

des propriétés continues, afin de faciliter leur encodage. Pour une propriété P donnée, avant de décomposer le maillage avec HEXASHRINK, nous appliquons la fonction $\Lambda_{\alpha, nbits}$ suivante :

$$\Lambda_{\alpha, nbits}(P) = \text{round} \left(\frac{\lambda_{\alpha}(P) - \lambda_{\alpha}(\min P)}{\lambda_{\alpha}(\max P) - \lambda_{\alpha}(\min P)} \times (2^{nbits} - 1) \right), \quad (5)$$

avec

$$\lambda_{\alpha}(P) = \begin{cases} \log(P + 1) & \text{if } \alpha = 0 \\ \frac{(P+1)^{\alpha}-1}{\alpha} & \text{if } \alpha > 0 \end{cases}$$

α peut varier entre 0 et 1. Egal à 1, Λ est une simple fonction linéaire, mais elle devient logarithmique quand α tend vers zéro. Le facteur $2^{\text{nbits}} - 1$ permet de convertir les valeurs réelles en valeurs discrètes distribuées entre 0 et $(2^{\text{nbits}} - 1)$. Ainsi, nbits permet de définir la précision des données.

La figure 65 montre le rendu global obtenu à partir d'une perméabilité décompressée à différents débits (selon le nombre de plans de bits décodés) sans compandor. Les dégradations visuelles sont quasi imperceptibles jusqu'à un budget binaire de 18,85 bits/valeur, ce qui est beaucoup plus intéressant que ceux obtenus avec les codeurs sans pertes. De plus, avec le compandor appliqué sur les propriétés continues, on peut voir (en bas à droite dans le cadre) que le rendu est très proche visuellement du rendu original jusqu'à 12,17 bits/valeur. Ces résultats montrent que réduire la précision des propriétés continues n'affecte pas nécessairement les données dans un contexte de level of detail (LOD). Nous verrons dans la prochaine section que les mêmes observations peuvent être faites dans un contexte de simulation numérique.

11.4 HEXASHRINK DANS UN CONTEXTE DE SIMULATION À PRÉCISION VARIABLE

De nombreux travaux récents sont consacrés à la recherche d'alternatives aux représentations en virgule flottante [Mul+18; LLH18; Cap+19] afin de réduire les quantités faramineuses de données que nécessitent et génèrent les simulations numériques. Dans le même esprit, nous avons voulu savoir si HEXASHRINK permettait de faire des simulations satisfaisantes à partir de données à précision réduite. Pour cela, nous avons comparé des résultats de simulation à pleine précision (calculé sur un MV complètement décodé) et des résultats de simulation à précision variable (à partir d'un MV partiellement décodé). Nous avons simulé un écoulement diphasique sur le maillage nommé LUNDI, dans un contexte d'ingénierie réservoir (Figure 66a). Initialement, les deux phases du réservoir sont stratifiées horizontalement, avec du pétrole au-dessus de l'eau. A $t = 0$, de l'eau est injectée par I_1 dans la partie inférieure du réservoir. La pression de l'eau pousse l'huile à travers le réservoir jusqu'au producteur P_1 . Un indicateur précieux dans la production pétrolière pour déterminer l'exploitation du champ est l'estimation de la courbe de *water cut* (WC) (figure 66b), *i.e.*, la proportion entre volume d'eau et volume total de liquide au niveau du puits producteur au cours du temps. Le point d'in-

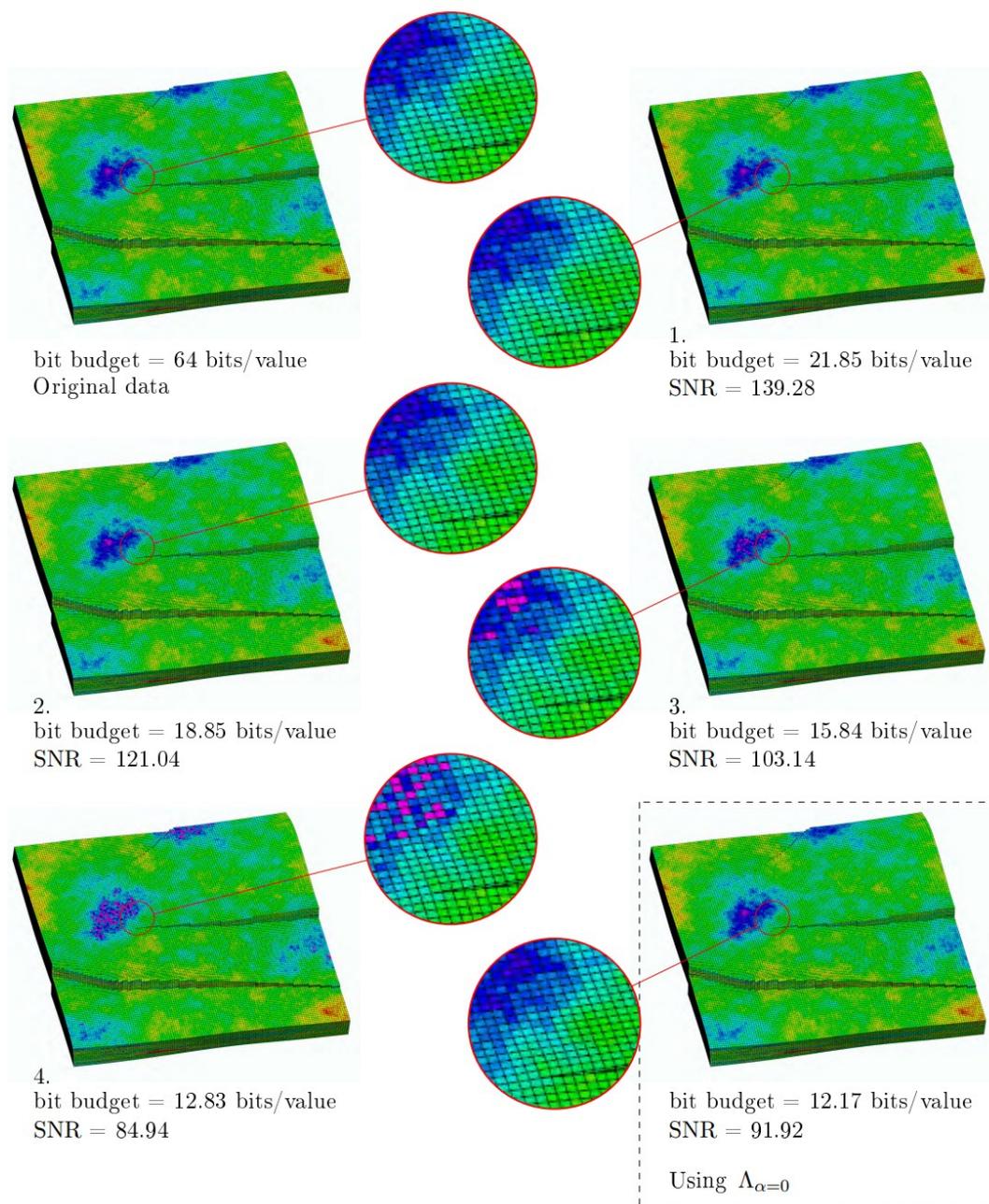


FIGURE 65 – Rendu visuel de *Lundi* avec la perméabilité décompressée à différents débits sans compandor. Dans le cadre en bas à droite, avec compandor.

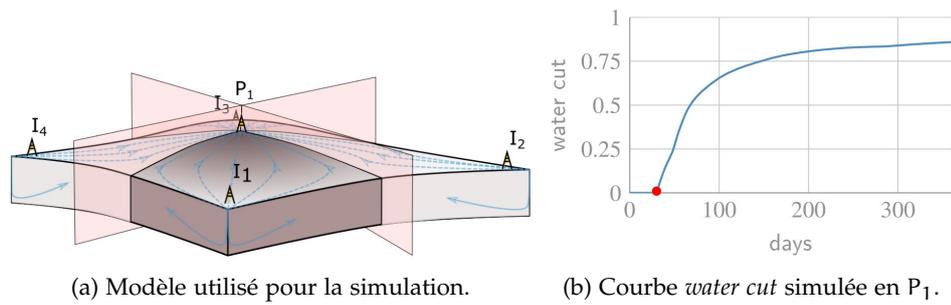


FIGURE 66 – Simulation d’écoulement diphasique. Les flux d’eau (lignes bleues sur la figure 66a) sont injectés depuis quatre puits ($\{I_i\}$) jusqu’à un puits producteur P_1 . LUNDI représente un quart de ce modèle. La sous-figure 66b montre une courbe *water cut* (WC) simulée en P_1 .

flexion (point rouge sur la courbe) correspond à l’arrivée de l’eau à P_1 . A partir de cet instant, le liquide extrait contient de plus en plus d’eau. Pour éviter des post-traitements coûteux et optimiser la configuration de l’exploitation, les ingénieurs réservoir cherchent à retarder cet instant.

La figure 67a montre des courbes de WC simulés sur LUNDI à partir de valeurs de perméabilité partiellement décodées, et donc à précision réduite. Pour chaque courbe, la valeur $\times MSB_M$ en légende indique le nombre de plans de bits décodés et utilisés pour reconstruire le maillage utilisé pour la simulation. Le pourcentage associé indique la proportion de données décodées. la couleur de la courbe indique une évaluation subjective faite par un ingénieur réservoir de la qualité de simulation : bleu signifie que la simulation est parfaite (identique à la courbe obtenue à partir du maillage original), vert correcte, jaune acceptable, orange inacceptable, et rouge aberrant.

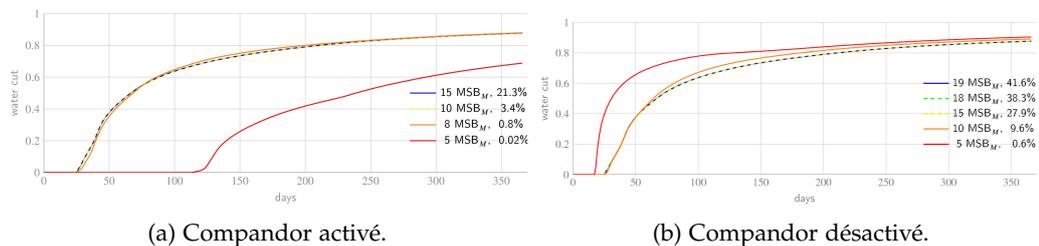


FIGURE 67 – Courbes de WC simulés à partir de valeurs de perméabilité partiellement décodées.

On peut observer qu’en utilisant seulement 15 plans de bits pour représenter la perméabilité, la simulation est parfaite (en bleu), et qu’avec seulement 10 plans de bits, la simulation donne une courbe jugée acceptable, et donc suffisante pour confi-

gurer certains paramètres lors de certaines simulations. Des résultats similaires ont été obtenus sur différents environnements géologiques. A noter à nouveau l'effet bénéfique du compandor puisque, à qualité subjective équivalente, il réduit considérablement le nombre de plans de bits nécessaires par rapport au cas où le compandor n'est pas utilisé (voir Figure 67b). Ces résultats sont extrêmement satisfaisants et nous confortent dans l'idée qu'un compandor peut être très intéressant dans le domaine de la simulation numérique, et d'une manière générale qu'il n'est probablement pas nécessaire de représenter certaines données flottantes à simple, voire double précision. Ce serait donc un bon moyen de réduire l'énorme quantité d'informations que l'on doit stocker pour certaines simulations numériques.

11.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

HEXASHRINK offre un cadre complet pour une représentation progressive de maillages hexaédriques structurés. Le traitement spécifique des discontinuités géométriques, mais aussi des propriétés continues et catégorielles associées aux cellules à travers les résolutions fait de HEXASHRINK un outil particulièrement efficace pour la visualisation des maillages massifs rencontrés en géosciences. HEXASHRINK peut traiter n'importe quelle taille de maillages, grâce à un algorithme *out-of-core* basé GPU. Notre méthode est déterministe et exacte. Les quatre schémas d'analyse et de synthèse permettent une reconstruction parfaite, ce qui permet de l'intégrer dans un schéma de compression sans pertes. Nous avons aussi montré qu'il était possible d'aborder l'encodage des propriétés continues de manière progressive, en le combinant avec un codeur *zerotree*. Cette combinaison nous a aussi permis de montrer qu'il était possible d'effectuer des simulations numériques précises d'écoulement de fluides, mêmes sur des données à précision réduite.

Les perspectives sont nombreuses. Confortés par les résultats très encourageants obtenus sur les propriétés continues, nous envisageons de développer un schéma complet de compression/décompression progressive pour les maillages hexaédriques structurés, ce qui est *a priori* possible étant donnée la représentation imbriquée et non redondante proposée par HEXASHRINK pour l'ensemble des données constituant ces maillages. Ce schéma donnera la possibilité aux utilisateurs d'effectuer de la compression avec pertes [Lu+18; Lia+18], facilitant notamment le stockage et le transfert de ce type de données dont la taille et le nombre évoluent de manière alarmante, mais aussi tester plus en profondeur la simulation à précision réduite. Une autre perspective très intéressante serait de gérer l'évolution potentielle de la géométrie ou des propriétés des maillages dans le temps.

RECHERCHE DE SIMILARITÉ GÉOMÉTRIQUE ENTRE STRUCTURES MOLÉCULAIRES 3D

Ce chapitre s'inspire de l'article [DP20] co-écrit avec Dominique Douguet.

Il est structuré de la manière suivante : La section 12.1 introduit la notion de similarité entre structures moléculaires, présente un état de l'art succinct des méthodes de calcul de similarité, puis introduit la solution proposée, nommée SENSAAAS. La section 12.2 détaille SENSAAAS. La section 12.3 atteste de l'intérêt de notre méthode dans un contexte de Benchmarking et présente une autre application possible. La section 12.4 résume notre contribution et présente les travaux futurs.

12.1 INTRODUCTION

Le processus de découverte de nouveaux médicaments est un processus long et complexe qui, schématiquement, peut se résumer en 4 étapes :

- Sélection de la *cible*, structure cellulaire ou moléculaire impliquée dans la pathologie étudiée, sur laquelle le futur médicament est censé agir.
- Criblage de la cible à partir de base de données de molécules. Seront retenues les molécules (*hits*) qui interagissent avec la cible en l'inhibant/bloquant (antagonisme), ou au contraire en la stimulant (agonisme).
- Optimisation "hit-to-lead". Le but est d'optimiser les propriétés pharmacodynamiques et pharmacocinétiques des molécules retenues à l'étape précédente, puis de sélectionner la molécule finale pour le médicament (*lead*).
- Développement et validation du médicament (impliquant études pré-cliniques, cliniques, ...).



FIGURE 68 – Processus de découverte d'un nouveau médicament "pour les nuls".

Les outils informatiques sont de plus en plus utilisés durant ce processus. On peut par exemple citer le criblage virtuel qui permet de tester rapidement un très

grand nombre de molécules à partir de différentes modélisations mathématiques, ou encore la chimie médicinale dont le but est de modifier entièrement ou partiellement une structure moléculaire lors de l'étape d'optimisation. Dans un tel contexte, de nombreuses méthodes ont été développées ces dernières années pour comparer et quantifier la similarité entre les molécules. Le calcul de similarité moléculaire peut se baser sur des représentations 1D, 2D, voire 3D (Figure 69), la forme d'une molécule étant une caractéristique importante dans l'activité biologique [KKE09].

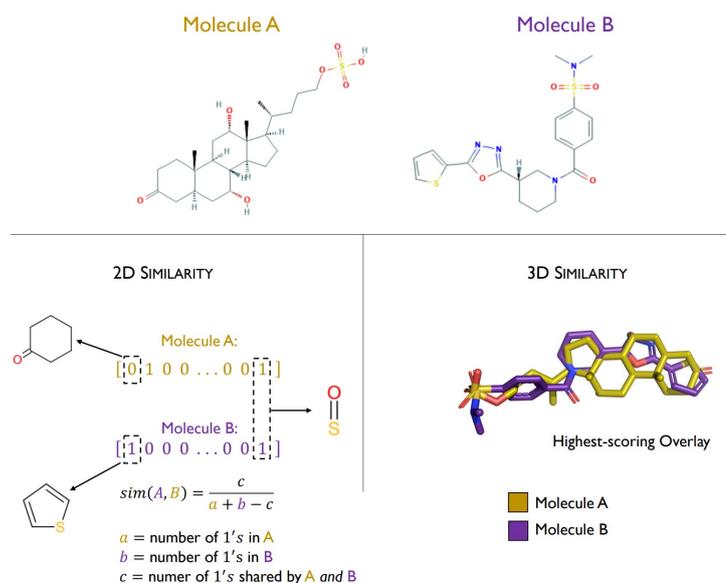


FIGURE 69 – Deux manières d'évaluer la similarité entre deux molécules, à partir d'une représentation 2D ou 3D. Image issue de [RK20].

Les méthodes travaillant dans l'espace 3D utilisent différentes fonctions pour évaluer les similarités. Les *méthodes basées sur des gaussiennes* centrées sur les atomes, qui évaluent le chevauchement volumique maximal entre deux molécules sont probablement les plus utilisées, la plus connue étant ROCS [Sof]. Les *méthodes basées sur la distance atomique* décrivent la forme des molécules à l'aide de distributions de ces distances inter-atomiques (par exemple USR [BR07]). Les *méthodes basées sur des champs moléculaires* calculés aux points d'une grille entourant la molécule utilisent ces derniers pour comparer, par exemple, le potentiel électrostatique ou hydrophobe des molécules testées. Certaines méthodes, comme ShaEP [VPJ09], combinent représentations de champs moléculaires et gaussiennes. Parmi les méthodes fondées sur des représentations 3D, on trouve les *méthodes basées sur les surfaces moléculaires*, décrites de diverses manières : à l'aide d'harmoniques sphériques [Cai+12], d'*alpha shapes* [Wil+09], ou encore d'un ensemble de points 3D. Pour un état de l'art plus détaillé, voir [KZ18].

Motivation et contribution L'idée commune des méthodes décrivant les surfaces moléculaires à l'aide de points 3D est d'utiliser des descripteurs locaux pour rechercher des similarités géométriques locales entre molécules [CBJ00; HLA04; BHo6]. C'est finalement le même principe que les méthodes de recalage 3D [Tam+13; Hua+21] que l'on utilise pour fusionner des acquisitions 3D (Figure 70) : on recherche sur plusieurs nuages de points 3D les détails géométriques communs - définis par des descripteurs locaux - qui permettent de repositionner tous les nuages dans un seul et même repère. Pour évaluer la similarité moléculaire, il faut ensuite déterminer un score pour quantifier la ressemblance.

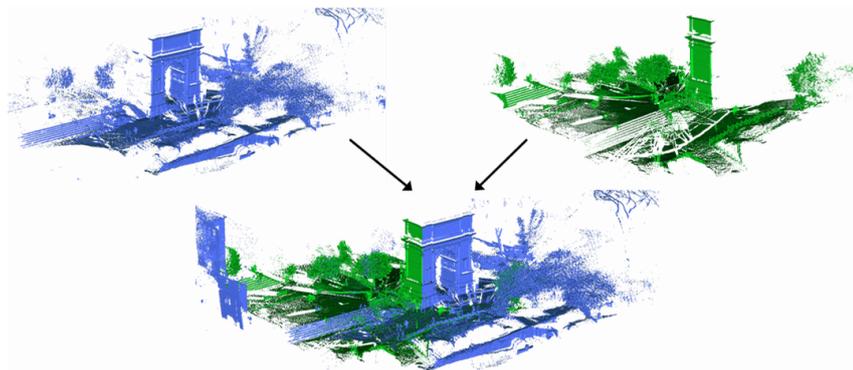


FIGURE 70 – Recalage de nuages de points 3D.

Au cours du projet SENSaaS (*SENSitive As A Shape*), nous avons proposé une approche inédite de recherche de similarité moléculaire qui "recycle" des méthodes de recalage 3D rigides développées ces dernières années. On considère en entrée *Source* et *Cible*, deux molécules que l'on souhaite comparer (Figure 71a). L'algorithme calcule une matrice de transformation *Trans* qui va superposer *Source* sur *Cible* du mieux possible selon un critère donné (Figure 71b). Un score est ensuite calculé pour évaluer le niveau de similarité entre les deux molécules.

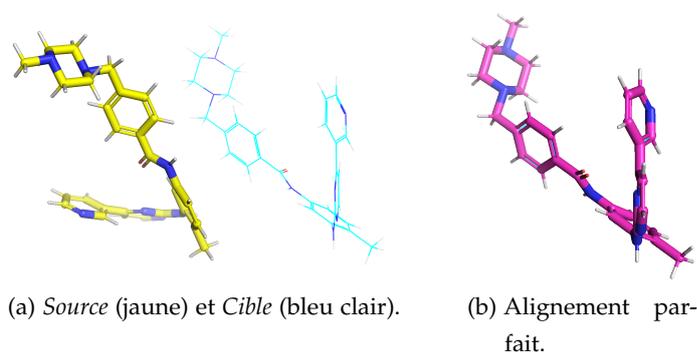


FIGURE 71 – *Self-matching* d'IMATINIB réussi par SENSaaS. Le score SENSaaS est égal à 2 (maximum possible).

La figure 72 donne une vue d'ensemble de SENSAAAS :

- Préparation des données : discrétisation de la surface moléculaire de *Source* et de *Cible* et coloration des points à partir de leur graphe 3D respectif ;
- Superposition de *Source* sur *Cible* par recalage global en prenant en compte uniquement la géométrie des points 3D ;
- Raffinement de cette superposition, en prenant en compte la géométrie mais aussi les propriétés physico-chimiques des atomes proches de la surface.
- Calcul d'un score de ressemblance prenant en compte géométrie et propriétés, et possibilité de visualiser la superposition obtenue.

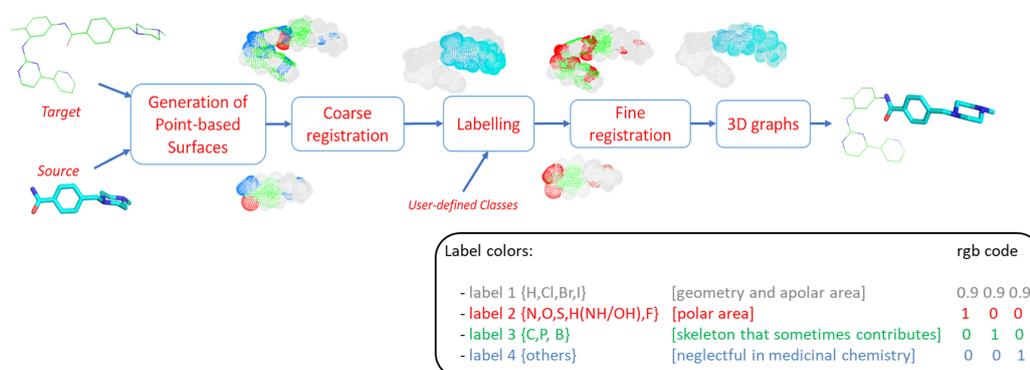


FIGURE 72 – Vue d'ensemble de l'algorithme SENSAAAS.

Préparation des données La première étape consiste à calculer une version discrétisée de la surface (ou enveloppe) de Van der Waals de *Source* et de *Cible* à partir de leur graphe 3D respectif. On obtient ainsi un ensemble de points 3D décrivant géométriquement chaque molécule. La deuxième étape consiste à colorer chaque point 3D en fonction de l'atome le plus proche (rouge pour oxygène, vert pour carbone, etc.). L'idée sous-jacente est que chaque point sur la surface interagit avec son environnement externe en fonction des propriétés chimiques et physiques de l'atome le plus proche. A ce stade *Source* et *Cible* sont représentés par deux nuages points 3D colorés (voir Figure 73).

Superposition de *Source* sur *Cible* On commence par calculer des descripteurs 3D locaux nommés FPFH [RBB09] sur un sous-ensemble de points 3D de chaque nuage. Un FPFH (*Fast Point Feature Histograms*) consiste en un histogramme de dimension 31 qui caractérise localement la géométrie de la surface autour d'un point donné. Chaque nuage de point est donc caractérisé par cet ensemble de FPFH esti-

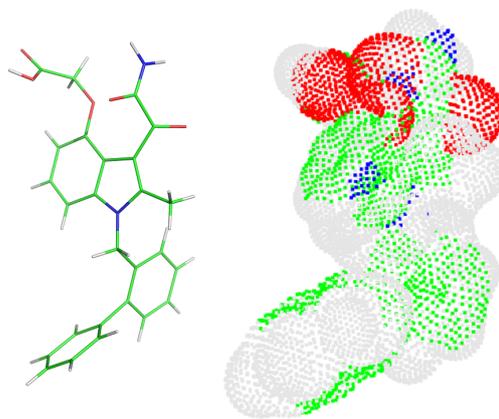


FIGURE 73 – Nuage de points 3D colorés de la surface de Van der Waals de la molécule INDOXAM.

més régulièrement sur sa surface. RANSAC [FB81] est ensuite utilisé pour mettre en correspondance les deux ensembles de descripteurs.

Raffinement de la superposition Une technique de recalage de nuages de points 3D colorés [PZK17] est ensuite appliquée sur *Source* - transformée à l'étape précédente - et *Cible*. Cette technique cherche à minimiser conjointement les distances entre les 2 nuages dans l'espace 3D mais aussi dans l'espace colorimétrique, afin de privilégier la mise en correspondance de points de couleurs similaires. Dans notre contexte, nous aurions pu simplement recalcer les nuages en prenant en compte la couleur attribuée à chaque atome lors de la préparation des données (voir au-dessus). Au lieu de cela, nous avons défini quatre sous-groupes d'atomes ayant des propriétés physico-chimiques communes (voir en bas à droite de la Figure 72), associé une couleur à chaque sous-groupe, et reporté ces couleurs aux points 3D. Ainsi le recalage ne cherche pas à aligner des points en fonction de l'atome le plus proche, mais plutôt en fonction de propriétés similaires, ce qui est plus cohérent lorsque l'on cherche des similarités entre molécules.

Calcul d'un score de ressemblance Pour évaluer de manière quantitative la similarité entre *Source* et *Cible*, SENSaaS propose le score $gfit+hfit$. Le score $gfit$ (entre 0 et 1) détermine la proportion de points de *Source* appairés à un point de *Cible*. Le score $hfit$ (entre 0 et 1) fait de même mais par sous-groupes d'atomes sans tenir compte des hydrogènes pour prendre en compte les caractéristiques des pharmacophores. Un $gfit+hfit$ proche de 2,0 signifie une superposition parfaite, un $gfit+hfit$ supérieur à 1,0 signifie que des similitudes ont été identifiées.

12.3 EXPÉRIMENTATIONS

12.3.1 Benchmarking sur la base de données AstraZeneca

Nous avons testé la capacité de notre algorithme à reproduire la superposition des structures moléculaires de la base de données AstraZeneca (1465 ligands) et nous avons comparé ses résultats avec ceux générés par deux méthodes de référence : ShaEP et SHAFTS. La Figure 74 montre que SENSAAAS est globalement aussi précis ($\text{RMSD} \leq 2\text{\AA}$) que les méthodes de référence, tout en générant des alignements plus nombreux dans le premier intervalle de précision ($\text{RMSD} \leq 0.5\text{\AA}$).

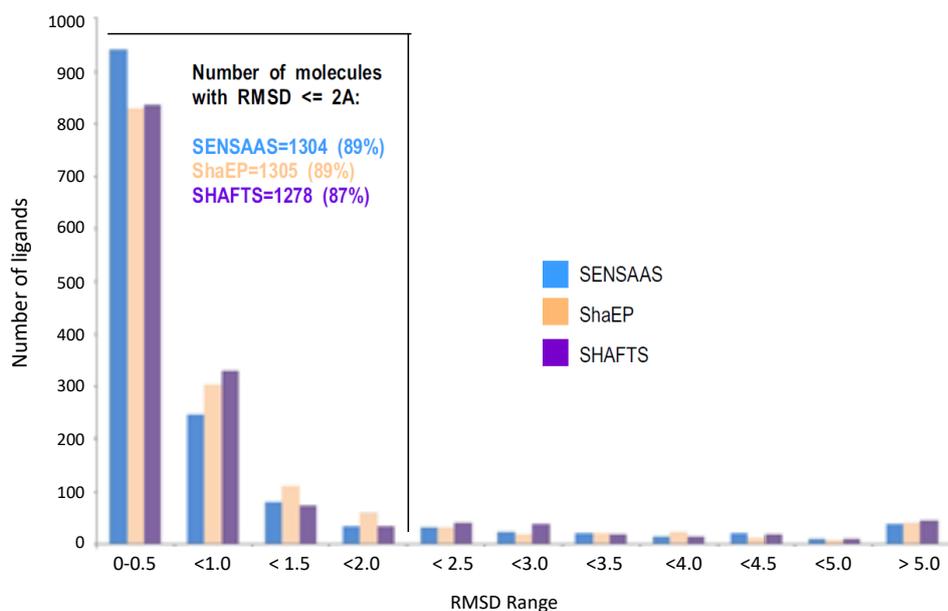


FIGURE 74 – Distribution de la plus faible RMSD obtenue pour chaque molécule de la base de données AstraZeneca. Les résultats de SENSAAAS sont colorés en bleu, ceux de ShaEP en beige et ceux de SHAFTS en mauve.

12.3.2 Recalage de sous-structures

Figure 75 montre le recalage de sous-structures d'une molécule donnée sur la molécule elle-même (*self-submatching*). On observe que les trois sous-structures mises successivement en *Source* s'alignent à chaque fois parfaitement sur la partie correspondante de la molécule *Cible*, confirmant la capacité de notre méthode à trouver des similarités locales, ce qui n'est pas le cas des méthodes populaires telles que ROCS et ShaEP. Cette capacité de *submatching* est particulièrement intéressante pour la chimie médicinale. Elle peut être par exemple exploitée au stade de l'optimisation *hit-to-lead* lors du processus de recherche de médicaments (voir

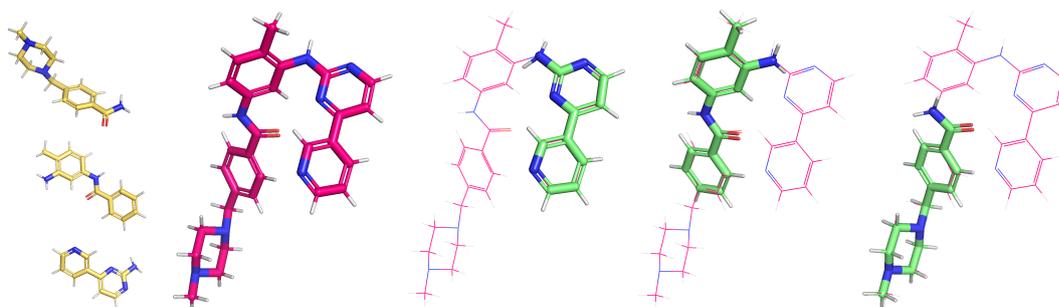


FIGURE 75 – *Self-submatching* sur IMATINIB. De gauche à droite : trois sous-structures *Source* (en jaune), la *Cible* (en rouge), et les trois superpositions respectives obtenues (en vert).

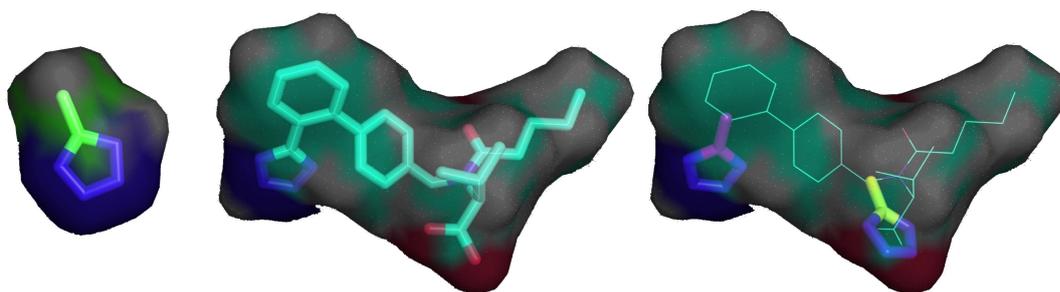


FIGURE 76 – Les deux meilleures superpositions (à droite) proposées par SENSAAAS de TÉTRAZOLE (à gauche) sur VALSARTAN (au milieu). Ces alignements correspondent à un cas de *self-submatching* (meilleur score) et à un remplacement bioisostérique connu du VALSARTAN (2ème meilleur score).

section 12.1) pour remplacer une partie seulement de la molécule candidate. En effet, SENSAAAS, de part son approche non déterministe liée à l'utilisation de RANSAC, peut être utilisé pour classer les différents recalages possibles en fonction des scores de ressemblance obtenus. La Figure 76 illustre cette utilisation avec VALSARTAN (*Cible*) et TÉTRAZOLE (*Source*) : la meilleure superposition proposée par SENSAAAS est un cas de *self-submatching* ; la deuxième meilleure superposition est un remplacement bioisostérique avéré du VALSARTAN.

12.4 CONCLUSION DU CHAPITRE

SENSAAAS combine deux techniques de recalage déjà éprouvées en informatique graphique. SENSAAAS a été évalué et validé sur plusieurs cas d'école, puis son efficacité a été confrontée à plusieurs méthodes de l'art sur un très grand nombre de molécules grâce à un *benchmarking* sur la base de données AstraZeneca. SENSAAAS est au moins aussi efficace que ShaEP et SHAFTS. SENSAAAS possède en plus des propriétés remarquables de *submatching*, ce qui lui permet de détecter des similari-

tés entre sous-structures, ce que les logiciels les plus répandus ne sont pas capables de faire.

L'utilisation de techniques de recalage 3D et leur nature stochastique fait que notre algorithme n'est pas déterministe. Pour évaluer la ressemblance entre molécules de manière efficace et obtenir un seul alignement pour des raisons de reproductibilité, il suffit de répéter les expériences afin de sélectionner l'alignement qui donne le meilleur score (option par défaut de SENSAAAS, implicite). Mais nous avons aussi tiré parti de cette nature stochastique pour inclure dans SENSAAAS une option (nommée meta-SENSAAAS) capable de proposer les x meilleures ressemblances entre (sous-)structures et fragments d'autres molécules. Cette option fait de SENSAAAS un outil prometteur dans le domaine de la chimie médicinale, par exemple pour découvrir des remplacements bioisostériques (comme l'a montré l'exemple entre VALSARTAN et TETRAZOLE), ou encore pour du *scaffold hopping*.

D'un point de vue implémentation, SENSAAAS est basé sur la librairie libre Open3D [ZPK18] (www.open3d.org), et tout le code python est disponible sur [Github](#). La prise en main est relativement simple, et peut donc être facilement déployé pour opérer d'autres comparaisons de structures, telles que les peptides, les protéines, les cavités (l'image négative de la surface de la protéine), etc.

BILAN ET PERSPECTIVES

Ce manuscrit synthétise mon travail depuis plus de quinze ans sur le traitement de la géométrie 3D. Les nombreuses contributions présentées ici témoignent de la variété des applications proposées et des domaines que j'ai pu aborder. Toutes mes recherches ont été menées dans le cadre de projets locaux (IDEX UCAjedi), régionaux (bourse Région Sud) ou nationaux (GDR ISIS, CIFRE, projet collaboratif), la plupart du temps en collaboration avec un industriel et/ou des membres d'autres laboratoires ou instituts. D'un point de vue quantitatif, mes recherches ont conduit à la publication d'un chapitre d'ouvrage, 10 articles de revues internationales indexées JCR, et des communications dans 34 conférences internationales et 16 conférences nationales. J'ai participé au dépôt de 2 brevets internationaux. Tout ce travail a été mené grâce à l'encadrement de doctorants et de stagiaires, sans qui tout cela n'aurait pas été possible. Je les en remercie.

A ce jour, je collabore toujours avec Dominique Douguet (IPMC) et Laurent Duval (IFPEN), respectivement sur les projets SENSAAAS et HEXASHRINK. Concernant SENSAAAS, les perspectives et les évolutions sont nombreuses et prometteuses. Nous avons développé ces deux dernières années une version 2.0 pour étendre les capacités initiales de notre algorithme. Cette version 2.0 a fait l'objet d'une déclaration d'invention l'année dernière, et nous collaborons actuellement avec la SATT Sud-est pour une potentielle valorisation. En parallèle, un article est en cours de rédaction pour communiquer sur les deux nouvelles fonctionnalités de la version 2.0.

Concernant le projet HEXASHRINK, nous sommes en train de finaliser deux articles pour des revues internationales : le premier pour la revue *Geoscience Data Journal* pour présenter et diffuser le modèle LUNDI, le second pour la revue *Elsevier Computers & Geosciences* pour communiquer sur nos résultats de simulation à précision réduite. Par la suite, nous envisageons Laurent et moi de continuer à collaborer sur les problématiques de simulation numérique à précision variable, qui pourrait être une solution simple et efficace pour réduire la quantité gigantesque de données utilisées et produites quotidiennement dans ce domaine.

Par ailleurs, ces deux collaborations m'ont inspiré pour orienter ma recherche vers une nouvelle problématique : le stockage des données numériques.

13.1 STOCKAGE DES DONNÉES NUMÉRIQUES : UNE "INFOBÉSITÉ" GALOPANTE

Les données numériques prennent de plus en plus de place dans les sociétés actuelles, au sens propre comme au figuré. Selon Forbes [Cou18], la quantité de données numériques stockées sur terre en 2018 était estimée à 33.00 ZB et la prévision pour 2025 était de 175.00 ZB (voir figure 77). Ce chiffre a été revu à la hausse en 2020 : selon le site Statista [Tay20], nous atteindrons plus de 180.00 ZB en 2025. La faute, entre autres, à une utilisation de plus en plus répandue de l'intelligence artificielle dans tous les domaines, qui nécessitent des apprentissages sur d'énormes quantités de données pour être efficace, à l'IoT, au *streaming*, etc.

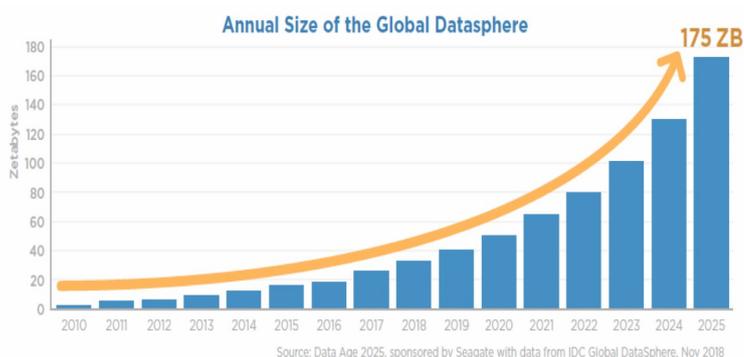


FIGURE 77 – Estimation du volume mondial de données numériques créées ou répliquées depuis 2010.

Cette croissance incroyable a un coût financier de plus en plus élevé pour les entreprises, mais aussi un impact environnemental non négligeable dont on prend de plus en plus conscience. Il est plus qu'urgent de trouver des solutions pour réduire l'impact environnemental du numérique. Quelques statistiques [McN19] pour prendre conscience de cela :

- 500 000 datacenters en 2012, 8 millions en 2019 ;
- selon certains modèles, le coût énergétique des datacenters pourrait engloutir plus de 10% de l'électricité mondiale d'ici à 2030 si rien ne change ;
- en 2019, les datacenters généraient déjà autant de CO₂ que l'industrie aérienne mondiale ;
- la quantité d'énergie utilisée par les datacenters doublerait tous les 4 ans ;
- les supports actuels (optiques, bandes magnétiques ou disques durs) sont fragiles et ont une espérance de vie de 5 à 7 ans, impliquant une recopie régulière sur de nouveaux supports de toutes les données.

Pour couronner le tout, environ 80% des données stockées seraient ce qu'on appelle des données "froides" : des données stockées hors ligne pour le long-terme, et rarement désarchivées.

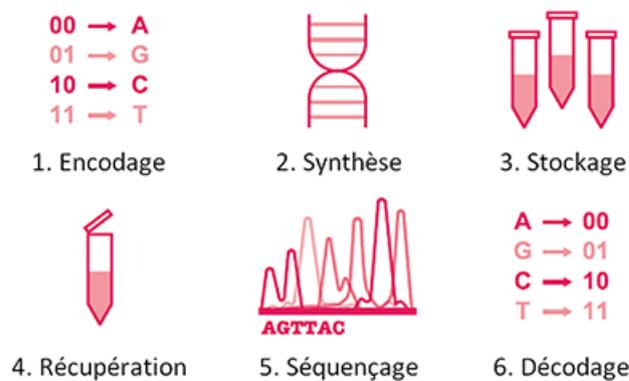


FIGURE 78 – Processus de stockage sur ADN synthétique. Image issue de [Pep].

Pour stocker des données dites "froides", la durée de vie très limitée des supports actuels exige que l'on trouve de nouvelles solutions éco-responsables. Une alternative prometteuse est le stockage sur ADN synthétique [HA21 ; DA22], dont le principe général est exposé Figure 78. Au moment de l'archivage, une donnée numérique passe trois étapes :

- **Encodage** - la donnée numérique est convertie/encodée en une série de symboles quaternaires notés A, T, C et G (en référence aux nucléotides qui constituent l'ADN), qui sera formatée puis distribuée en un ensemble d'*oligos* (pour oligonucléotides) ;
- **Synthèse** - les oligos sont synthétisés en brins d'ADN ;
- **Stockage** - Les brins ADN sont stockés dans une capsule étanche et résistante aux conditions environnementales.

Au moment du désarchivage :

- **Récupération** - les brins ADN associés à la donnée que l'on souhaite récupérer sont extraits de la capsule ;
- **Séquençage** - les brins ADN sont analysés par un *séquenceur* pour retrouver les symboles constituant chaque oligo ;
- **Décodage** - La série de symboles quaternaires est entièrement reconstruite, puis décodée pour retrouver la donnée numérique initiale.

Cette technique est prometteuse car l'ADN présente plusieurs avantages par rapport aux supports traditionnels :

- l'ADN synthétique offre une capacité de stockage impressionnante : en théorie, un gramme d'ADN pourrait contenir jusqu'à 215 pétaoctets de données, et toutes les données du monde pourraient tenir dans une boîte à chaussures.

- l'ADN pourrait permettre de conserver les données pendant des milliers d'années sans dégradation, et surtout pour un coût énergétique minimal puisque il n'est pas nécessaire d'alimenter la capsule pour conserver les données.

Plusieurs projets ont déjà utilisé l'ADN synthétique pour stocker des données multimédias. En 2016, Microsoft a stocké 200 mégaoctets de données sur ADN synthétique [Ros16]. En 2021, la *Déclaration des droits de l'homme et du citoyen* de 1789 et la *Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne* de 1791, sont les premiers documents archivés sur ADN au sein des archives nationales françaises [Bou20].

13.3 LES LIMITES ET LES SOLUTIONS ACTUELLES DU STOCKAGE SUR ADN

La synthèse et le séquençage sont les deux étapes clés. A l'heure actuelle, leur coût et les erreurs inhérentes au processus biochimique introduites dans le contenu numérique limitent encore la démocratisation du stockage sur ADN.

Le coût Il y a quelques années, un séquençage coûtait environ 1 dollar par nucléotide avec un modèle *Illumina*. Heureusement, des séquenceurs moins coûteux, mais aussi plus rapides et moins encombrants ont récemment vu le jour (voir figure 79). Le coût restant relativement onéreux, il est primordial de compresser efficacement les données.



FIGURE 79 – Séquenceur *Oxford MinION Nanopore*.

Le bruit et l'erreur Le stockage sur ADN est comparable à une transmission de données sur canal bruité. Le bruit introduit des erreurs dans les données qui entraînent des substitutions (un A devient un T par exemple), des pertes (un symbole disparaît), ou des insertions (un symbole est ajouté). Des découvertes majeures ont permis de fortement réduire ces erreurs [CGK12], sans pour autant les supprimer totalement. Pour obtenir un décodage fiable en dépit du bruit restant, il est nécessaire d'introduire une certaine redondance selon le principe du codage "canal". C'est pourquoi une amplification PCR est généralement effectuée lors du séquençage pour avoir une multitude de copies de chaque oligo synthétisé. Chaque copie ne contenant ni le même taux ni le même type d'erreurs, il est possible en les analysant de déterminer l'oligo le plus représentatif pour le décodage. Une approche efficace est la sélection par regroupement, communément appelée *clustering*

[Ras+17], qui combine des milliers (voire des millions) de copies pour proposer en sortie une séquence de symboles la moins erronée possible. Il est aussi possible d'utiliser des *codes correcteurs* pour détecter et supprimer les éventuelles erreurs résiduelles [Gol+13; Gra+15; Bla+16; EZ16].

L'équipe Mediacoding s'est orientée depuis déjà quelques années sur la problématique du stockage sur ADN synthétique, avec notamment quatre thèses. Marc Antonini est par ailleurs le directeur du *Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) MoleculArXiv [Pep]*, qui vise à inventer de nouveaux dispositifs de stockage de données sur support moléculaire. Parmi les contributions de l'équipe on peut citer *Paircode [Dim20]*, un algorithme capable de produire des mots codes quaternaires robustes au bruit de séquençage applicable sur n'importe quel type de données, ou encore une technique de *mapping [DSAA20]* qui augmente la résilience au bruit lors du décodage.

13.4 STOCKER LES NUAGES DANS L'ADN

Les nuages de points 3D sont des données volumineuses qui peuvent vite saturer les disques. La "faute" aux systèmes de numérisation 3D récents entre autres, capables de créer des modèles 3D de plus en plus précis et détaillés d'objets physiques ou d'environnements réels. A titre d'exemple, les lidars sont maintenant capables de capturer des millions de points 3D (géométrie plus couleur) en une seule acquisition. La compression des nuages de points 3D (PCC) [Val+23] est donc devenu un domaine de recherche très actif depuis quelques années. Les nuages ont dorénavant leur standard de compression dans MPEG [Sch+19]. Deux architectures populaires ont été adoptées : l'une basée sur la vidéo (V-PCC), l'autre basée sur la géométrie (G-PCC). Le principe de V-PCC est de transformer les points 3D en un ensemble d'images 2D pour ensuite appliquer les codecs vidéo conventionnels, tandis que G-PCC encode les nuages dans leur forme native, en utilisant des structures de données 3D populaires telles que les *octrees [Mam+19]*. Des méthodes de PCC utilisant l'apprentissage profond ont aussi été proposées récemment - avec pertes [QVD20; YG22; She+22] ou sans pertes [QLX21; Ngu+21] - offrant des performances de codage prometteuses. Le groupe *JPEG Pleno Point Cloud* travaille d'ailleurs à l'élaboration d'une norme de codage basée sur l'apprentissage [Per+22]. Google a également proposé il y a quelques années son propre schéma de compression (Draco) qui est devenu un standard dans le secteur industriel [VRPP22].

De nombreuses initiatives existent pour numériser le patrimoine culturel dans le monde entier [PGA01]. On peut citer par exemple le Projet *Open Heritage* [Goo], porté par Cyark en collaboration avec Google. Ce projet est en train de créer une collection incroyable de données multimédias relatives à des sites remarquables sur la planète. Parmi ces données, on y trouve des modèles numériques 3D parfois constitués de plusieurs milliards de points, représentant des Téraoctets de données à stocker. Dans ce contexte de sauvegarde à long terme de données numériques gigantesques, le stockage sur ADN semble être une solution idéale.

A courte et moyenne échéance, je souhaite consacrer une partie de mon temps de recherche au développement de méthodes de compression pour nuages de points 3D, à des fins de stockage sur ADN. Ci-dessous quelques pistes envisagées.

- Adapter une méthode de l'état de l'art pour la rendre spécifique au stockage sur ADN est une première voie envisageable, de la même manière qu'il a été possible d'adapter la norme JPEG [PA22]).
- Une deuxième possibilité serait de développer une méthode de compression "maison" tirant profit des contributions déjà apportées par l'équipe au domaine, notamment l'algorithme *Paircode* [Dim20] ou encore la technique de *mapping* [DSAA20] qui offre une bonne résilience au bruit lors du décodage des données. Je pourrai aussi m'appuyer sur les contributions apportées durant la thèse d'Arnaud Bletterer en ré-échantillonnage [BPA20] et en partitionnement [BPA22] de nuages de points 3D. J'envisage notamment d'étudier l'impact de la qualité de l'échantillonnage des nuages de points 3D sur les performances des méthodes de PCC [Pie+22].

13.5 SENSaaS AU SERVICE DU STOCKAGE SUR ADN

Une des forces de SENSaaS est d'être capable de trouver des similarités géométriques locales entre sous-structures. Un brin ADN n'étant finalement rien d'autre qu'une structure moléculaire très particulière, je me suis récemment posé la question suivante : "*est-ce que SENSaaS pourrait aider à l'élaboration de techniques de stockage sur ADN?*" Et d'une manière plus générale, "*est-ce que la connaissance de la géométrie des oligos et des nucléotides pourrait faciliter le stockage sur ADN?*" Cette dernière question n'a, à ma connaissance, jamais été soulevée dans la communauté. Elle est pourtant légitime puisque la forme géométrique 3D d'une molécule joue un rôle primordial dans l'interaction avec son environnement [KKE09].

Un brin ADN est constitué de nucléotides. Ces nucléotides sont au nombre de 4 (Figure 80) : L'adénine (A) et la guanine (G) qui sont des purines, et la thymine (T) et la cytosine (C) qui sont des pyrimidines. Récemment, j'ai vérifié s'il était

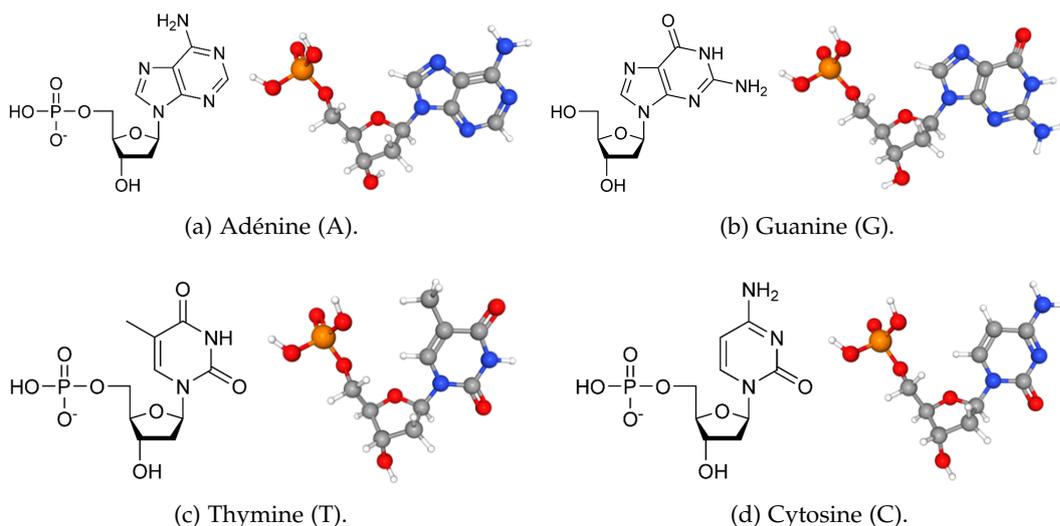


FIGURE 80 – Les quatre nucléotides constituant un brin ADN, en 2D et en 3D.

possible de distinguer les nucléotides à partir de leur forme géométrique. Pour cela, j'ai modifié les classes de SENSAAAS [DP20] pour un traitement spécifique des nucléotides, puis mesuré les scores de similarité entre les 4 nucléotides.

source / cible	A	G	C	T
A	1,999	1,838	1,434	1,417
G	1,717	1,999	1,321	1,333
C	1,543	1,513	1,999	1,815
T	1,418	1,447	1,706	1,999

TABEAU 21 – Scores de similarité SENSAAAS ([0, 2]) entre nucléotides.

Le tableau 21 montre que les scores les plus élevés correspondent bien aux cas de *self-matching*, ce qui atteste de la capacité de SENSAAAS à discriminer les différents nucléotides.

A plus longue échéance, je souhaite donc consacrer une partie de mon temps de recherche à l'étude de l'impact de la géométrie 3D dans le contexte du stockage sur ADN, et notamment comment la connaissance de celle-ci pourrait permettre d'améliorer certaines étapes. Ci-dessous quelques pistes envisagées.

- Une première piste envisagée est de considérer la géométrie des copies produites par PCR/séquençage et des mots codes les composant pour améliorer le processus de sélection du meilleur oligo. Par exemple, améliorer le *clustering* des copies [Ras+17] en exploitant la similarité géométrique entre les représentations moléculaires des mots codes, en complément/remplacement

de la distance de Levenshtein [Lev65], métrique souvent utilisée pour mesurer la similarité entre deux séquences d'ADN [GLH22].

- La technique de *mapping* proposée dans [DSAA20] assure qu'un mot code altéré par une substitution lors du décodage pointera vers un vecteur altéré "proche" du vecteur de données original, limitant l'impact visuel des erreurs résiduelles. Cette technique est relativement efficace, mais se limite aux erreurs liées à une seule substitution par mot code, déterminée à l'aide d'une distance de Hamming. Une deuxième piste envisagée est là encore d'étudier la similarité géométrique entre les représentations moléculaires des mots codes pour augmenter la résilience de ce type de codeurs, et d'une manière générale pour améliorer les codeurs utilisant une quantification vectorielle.
- Une troisième piste envisagée, probablement la plus ambitieuse, est d'analyser les erreurs produites par les séquenceurs de type *Nanopore* en fonction de la géométrie des brins ADN. Ceci pourrait permettre à terme de modéliser le bruit introduit par le processus de séquençage [HD23]. La connaissance de ce modèle pourrait améliorer les codes correcteurs génériques, ou permettre de proposer de nouvelles techniques. Cette analyse pourrait nécessiter l'utilisation de techniques d'apprentissage profond pour nuages de points 3D [Guo+21].

Ce projet de recherche pluridisciplinaire s'intègre parfaitement dans le contexte du PEPR *MolecularXiv* auquel participe l'équipe Mediacoding. Pour mener à bien ces travaux, j'envisage de collaborer avec les autres membres de l'équipe travaillant sur cette thématique, mais aussi avec d'autres équipes de recherche participant au PEPR, notamment celles plus axées sur les problématiques de synthèse/séquençage. Par ailleurs, l'expertise en chemo-informatique de Dominique Douguet chercheuse à l'IPMC avec qui je collabore dans le cadre du projet SENSAS sera aussi une aide précieuse pour mener à bien ces travaux.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÈTE

- [HD23] B. HAMOUM et E. DUPRAZ. « Channel Model and Decoder With Memory for DNA Data Storage With Nanopore Sequencing ». In : *IEEE Access* 11 (2023), p. 52075-52087 (cf. p. 112).
- [Val+23] G. VALENZISE, M. QUACH, D. TIAN, J. PANG et F. DUFAUX. « Chapter 13 - Point cloud compression ». In : *Immersive Video Technologies*. Sous la dir. de G. VALENZISE, M. ALAIN, E. ZERMAN et C. OZCINAR. Academic Press, 2023, p. 357-385 (cf. p. 109).
- [BPA22] A BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Graph-based Computation of Voronoi Diagrams on Large-scale Point-based Surfaces ». In : *Proc. Eurographics Conf. Short papers*. Reims, France, avr. 2022 (cf. p. 22, 76, 77, 110).
- [DA22] M. DIMOPOULOU et M. ANTONINI. « Data and image storage on synthetic DNA : existing solutions and challenges ». In : *EURASIP J. Image Video Process.* 2022 (oct. 2022) (cf. p. 107).
- [GLH22] A. J. X. GUO, C. LIANG et Q.-H. HOU. *Deep Squared Euclidean Approximation to the Levenshtein Distance for DNA Storage*. 2022. arXiv : 2207.04684 [cs.LG] (cf. p. 112).
- [Kha+22] D. KHAN et al. « Surface Remeshing : A Systematic Literature Review of Methods and Research Directions ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 28.3 (2022), p. 1680-1713 (cf. p. 40).
- [Per+22] S. PERRY, L. A. DA SILVA CRUZ, J. PRAZERES, A. PINHEIRO, E. DUMIC, D. LAZZAROTTO et T. EBRAHIMI. « Subjective and Objective Testing in Support of the JPEG Pleno Point Cloud Compression Activity ». In : *Eur. Workshop on Visual Inform. Process.* 2022, p. 1-6 (cf. p. 109).
- [PA22] X. PIC et M. ANTONINI. *Image coding algorithm for DNA data storage combining JPEG and autoencoders*. Workshop on Coding and Crypt. Poster. Munich, Germany, juin 2022 (cf. p. 110).
- [Pie+22] E. PIERSON, T. BESNIER, M. DAOUDI et S. ARGUILLÈRE. « Parameterization Robustness of 3D Auto-Encoders ». In : *Eurographics Workshop on 3D Obj. Retrieval*. Sous la dir. de S. BERRETTI, T. THEHOARIS, M. DAOUDI, C. FERRARI et R. C. VELTKAMP. 2022 (cf. p. 110).

- [She+22] X. SHENG, L. LI, D. LIU, Z. XIONG, Z. LI et F. WU. « Deep-PCAC : An End-to-End Deep Lossy Compression Framework for Point Cloud Attributes ». In : *IEEE Trans. Multimedia* 24 (2022), p. 2617-2632 (cf. p. 109).
- [Tli+22] M. TLIBA, A. CHETOUANI, G. VALENZISE et F. DUFAUX. « Representation Learning Optimization for 3D Point Cloud Quality Assessment without Reference ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Bordeaux, France, oct. 2022.
- [VRPP22] B. J. VAN RENSBURG, W. PUECH et J.-P. PEDEBOY. « The First Draco 3D Object Crypto-Compression Scheme ». In : *IEEE Access* 10 (2022), p. 10566-10574 (cf. p. 109).
- [YG22] K. YOU et P. GAO. « Patch-Based Deep Autoencoder for Point Cloud Geometry Compression ». In : *ACM Multimed. Asia*. 2022 (cf. p. 109).
- [Bou21] L. BOUARD. « Refinable resolution and precision for volume mesh compression and simulation in geosciences ». Thèse de doct. Université Côte d'Azur, mars 2021 (cf. p. 11, 23, 83).
- [Bou+21] L. BOUARD, L. DUVAL, F. PAYAN, C. PREUX et M. ANTONINI. « Étude comparative de l'impact d'un codage à précision variable sur des données de simulation en géosciences ». In : *Proc. colloque COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Sophia Antipolis, France, nov. 2021 (cf. p. 24, 81).
- [DP21] D. DOUGUET et F. PAYAN. « Recalage de nuages de points 3D pour la comparaison de molécules pharmacologiques ». In : *Proc. colloque COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Sophia Antipolis, France, nov. 2021 (cf. p. 25, 81).
- [DPG21] D. DOUGUET, F. PAYAN et L. GRANDMOUGIN. « SenSaaS : Shape-based Alignment by Registration of Colored Point-based Surfaces ». 22th GGMM and 10th SFCi. Poster. Sept. 2021 (cf. p. 25, 81).
- [Guo+21] Y. GUO, H. WANG, Q. HU, H. LIU, L. LIU et M. BENNAMOUN. « Deep Learning for 3D Point Clouds : A Survey ». In : *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 43.12 (2021), p. 4338-4364 (cf. p. 112).
- [HA21] T. HEINIS et J. J. ALNASIR. *Survey of Information Encoding Techniques for DNA*. 2021. arXiv : 1906.11062 [q-bio.QM] (cf. p. 107).
- [Hua+21] X. HUANG, G. MEI, J. ZHANG et R. ABBAS. « A comprehensive survey on point cloud registration ». In : *CoRR* abs/2103.02690 (2021). arXiv : 2103.02690 (cf. p. 99).

- [Ngu+21] D. T. NGUYEN, M. QUACH, G. VALENZISE et P. DUHAMEL. « Lossless Coding of Point Cloud Geometry Using a Deep Generative Model ». In : *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 31.12 (déc. 2021), p. 4617-4629 (cf. p. 109).
- [QLX21] Z. QUE, G. LU et D. XU. « VoxelContext-Net : An Octree based Framework for Point Cloud Compression ». In : *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recogn.* Juin 2021, p. 6038-6047 (cf. p. 109).
- [Qui+21] F. QUILICHINI, T. FISICHELLA, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Recalage de deux nuages de points 3D au rapport d'échelle non uniforme ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels.* Sophia Antipolis, France, nov. 2021.
- [BPA20] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « A local graph-based structure for processing gigantic aggregated 3D point clouds ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* (déc. 2020), p. 1-1 (cf. p. 11, 21, 22, 55, 67, 110).
- [Bou20] A.-S. BOUTAUD. *Stockage de données : la révolution sur ADN.* 2020. URL : <https://lejournal.cnrs.fr/articles/stockage-de-donnees-la-revolution-sur-adn> (cf. p. 108).
- [Dim20] M. DIMOPOULOU. « Encoding techniques for long-term storage of digital images into synthetic DNA ». Doctorat. Université Côte d'Azur, déc. 2020 (cf. p. 109, 110).
- [DSAA20] M. DIMOPOULOU, E. G. SAN ANTONIO et M. ANTONINI. « A quaternary code mapping resistant to the sequencing noise for DNA image coding ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2020, p. 1-6 (cf. p. 109, 110, 112).
- [DP20] D. DOUGUET et F. PAYAN. « SenSaaS : Shape-based Alignment by Registration of Colored Point-based Surfaces ». In : *Mol. Inf.* (juin 2020) (cf. p. 11, 25, 81, 97, 111).
- [QVD20] M. QUACH, G. VALENZISE et F. DUFAUX. « Improved Deep Point Cloud Geometry Compression ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2020, p. 1-6 (cf. p. 109).
- [RK20] S. RASCHKA et B. KAUFMAN. « Machine learning and AI-based approaches for bioactive ligand discovery and GPCR - ligand recognition ». In : *Methods* 180 (2020), p. 89-110 (cf. p. 98).
- [Tay20] P. TAYLOR. *Amount of data created, consumed, and stored 2010-2020, with forecasts to 2025.* 2020. URL : <https://www.statista.com/statistics/871513> (cf. p. 106).

- [BPA19a] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Rééchantillonnage des nuages de points gigantesques produits lors de la numérisation 3D de monuments ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019 (cf. p. 22).
- [BPA19b] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Structuration de nuages de points issus d’acquisitions LiDAR multiples à l’aide de graphes locaux connectés ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019 (cf. p. 21).
- [Bou+19a] L. BOUARD, L. DUVAL, C. PREUX, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Lossless progressive compression of meshes for upscaling and upgridding in reservoir simulation with HexaShrink ». In : *Proc. EAGE Conf. Tech. Exhib.* London, UK, juin 2019 (cf. p. 24, 81).
- [Bou+19b] L. BOUARD, L. DUVAL, C. PREUX, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Refinable-precision in mesh compression for upscaling and upgridding in reservoir simulation with HexaShrink ». In : *Ring Meeting*. Nancy, France, sept. 2019 (cf. p. 24, 81).
- [Cap+19] F. CAPPELLO et al. « Use cases of lossy compression for floating-point data in scientific data sets ». In : *Int. J. High Perform. Comput. Appl.* (juill. 2019) (cf. p. 92).
- [MB+19] N. MAHMOUDIAN BIDGOLI, T. MAUGEY, A. ROUMY, F. NASIRI et F. PAYAN. « A Geometry-aware compression of 3D mesh texture with random access ». In : *Proc. Pict. Coding Symp.* Ningbo, China, nov. 2019, p. 1-5 (cf. p. 24, 25).
- [Mam+19] K. MAMMOU, P. A. CHOU, D. FLYNN, M. KRIVOKUĆA, O. NAKAGAMI et T. SUGIO. « G-PCC codec description v2 ». In : *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N 18189* (2019), p. 1-39 (cf. p. 109).
- [McN19] M. McNERNEY. *The data center dilemma : Is our data destroying the environment?* 2019. URL : <https://www.datacenterknowledge.com/industry-perspectives/data-center-dilemma-our-data-destroying-environment> (cf. p. 106).
- [Nas+19a] F. NASIRI, N. M. BIDGOLI, F. PAYAN et T. MAUGEY. « Codage d’atlas de textures avec prédiction guidée par la topologie des maillages ». In : *Proc. GRETSI*. Lille, France, août 2019, p. 1-4 (cf. p. 24).
- [Nas+19b] F. NASIRI, N. MAHMOUDIAN BIDGOLI, F. PAYAN et T. MAUGEY. « A Geometry-aware framework for compressing 3D mesh textures ». In : *Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* Brighton, England, mai 2019 (cf. p. 24, 25).

- [Pey+19] J.-L. PEYROT, L. DUVAL, F. PAYAN, L. BOUARD, L. CHIZAT, S. SCHNEIDER et M. ANTONINI. « HexaShrink, an exact scalable framework for hexahedral meshes with attributes and discontinuities : multiresolution rendering and storage of geoscience models ». In : *Computat. Geosci.* 23.4 (août 2019), p. 723-743 (cf. p. 11, 23, 81, 83, 88).
- [Sch+19] S. SCHWARZ et al. « Emerging MPEG Standards for Point Cloud Compression ». In : *IEEE J. Emerg. and Sel. Topics Circuits Syst.* 9.1 (2019), p. 133-148 (cf. p. 109).
- [Ble18] A. BLETTERER. « Une approche basée graphes pour la modélisation et le traitement de nuages de points massifs issus d’acquisitions de LiDARs terrestres ». Thèse de doct. Université Côte d’Azur, déc. 2018 (cf. p. 11, 19, 67).
- [Ble+18a] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « Out-of-core Resampling of Gigantic Point Clouds ». In : *Proc. Eurographics Symp. Geom. Process.* Paris, France, 2018 (cf. p. 22).
- [Ble+18b] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « Towards the reconstruction of wide historical sites : A local graph-based representation to resample gigantic acquisitions ». In : *Eurographics Workshop on Graph. and Cult. Herit.* Vienna, Austria, nov. 2018, p. 1 -9 (cf. p. 22).
- [Bou+18] L. BOUARD, L. DUVAL, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Décomposition multi-échelles de maillages 3D hexaédriques dans le domaine des géosciences. Étude des performances en compression sans pertes. » In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels.* Poitiers, France, nov. 2018 (cf. p. 23, 81).
- [BDC18] Y. BÉARZI, J. DIGNE et R. CHAINE. « Wavejets : A Local Frequency Framework for Shape Details Amplification ». In : *Comput. Graph. Forum* 37.2 (2018), p. 13-24. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cgf.13338> (cf. p. 73).
- [Che+18] S. CHEN, D. TIAN, C. FENG, A. VETRO et J. KOVAČEVIĆ. « Fast Resampling of Three-Dimensional Point Clouds via Graphs ». In : *IEEE Trans. Signal Process.* 66.3 (2018), p. 666-681 (cf. p. 68, 76).
- [Cou18] T. COUGHLIN. *175 zettabytes by 2025*. 2018. URL : <https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025> (cf. p. 106).
- [KZ18] A. KUMAR et K. Y. J. ZHANG. « Advances in the Development of Shape Similarity Methods and Their Application in Drug Discovery ». In : *Frontiers in Chem.* 6 (2018) (cf. p. 98).

- [Lia+18] X. LIANG et al. « Error-Controlled Lossy Compression Optimized for High Compression Ratios of Scientific Datasets ». In : *IEEE Int. Conf. Big Data* (Seattle, WA, USA). Déc. 2018 (cf. p. 95).
- [LLH18] P. LINDSTROM, S. LLOYD et J. HITTINGER. « Universal coding of the reals : Alternatives to IEEE Floating Point ». In : *Proc. Conference for Next Generation Arithmetic (CONGA)*. ACM Press, 2018 (cf. p. 92).
- [Lu+18] T. LU et al. « Understanding and Modeling Lossy Compression Schemes on HPC Scientific Data ». In : *IEEE Int. Parallel and Distributed Process. Symposium* (Vancouver, Canada). Mai 2018 (cf. p. 95).
- [Mul+18] J.-M. MULLER et al. *Handbook of Floating-Point Arithmetic*. Springer, 2018 (cf. p. 92).
- [ZPK18] Q.-Y. ZHOU, J. PARK et V. KOLTUN. « Open3D : A Modern Library for 3D Data Processing ». In : *arXiv :1801.09847* (2018) (cf. p. 104).
- [Ant+17] M. ANTONINI, F. PAYAN, S. SCHNEIDER, L. DUVAL et J.-L. PEYROT. « Method of exploitation of hydrocarbons of an underground formation by means of optimized scaling ». Brev. 20170344676. 2017 (cf. p. 11, 23, 81, 88).
- [Ble+17] A. BLETTERER, F. PAYAN, M. ANTONINI et A. MEFTAH. « De la carte de profondeur au maillage surfacique : reconstruction de scènes 3D complexes. » In : *Proc. GRETSI*. Juan les Pins, France, sept. 2017 (cf. p. 21).
- [BL17] D. BOLTCHEVA et B. LEVY. « Surface reconstruction by computing restricted Voronoi cells in parallel ». In : *Comput. Aided Des.* 90 (2017), p. 123-134 (cf. p. 75, 76).
- [PZK17] J. PARK, Q.-Y. ZHOU et V. KOLTUN. « Colored Point Cloud Registration Revisited ». In : *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.* 2017, p. 143-152 (cf. p. 101).
- [Pay+17] F. PAYAN, J.-L. PEYROT, S. SCHNEIDER, L. DUVAL et M. ANTONINI. « Décomposition progressive de maillages hexaédriques avec discontinuités : application aux modèles géologiques ». In : *Proc. GRETSI*. Juan les Pins, France, sept. 2017 (cf. p. 23, 81).
- [Qi+17] C. R. QI, L. YI, H. SU et L. J. GUIBAS. « PointNet++ : Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space ». In : *CoRR* abs/1706.02413 (2017). arXiv : 1706.02413.
- [Ras+17] C. RASHTCHIAN et al. « Clustering Billions of Reads for DNA Data Storage ». In : *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* T. 30. Déc. 2017, 3362-3373 (cf. p. 109, 111).

- [Bla+16] M. BLAWAT et al. « Forward Error Correction for DNA Data Storage ». In : *Int. Conf. Comput. Sc.* 80 (2016), p. 1011-1022 (cf. p. 109).
- [BPA16] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Point cloud compression using depth-maps ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San francisco, USA, fév. 2016 (cf. p. 20).
- [EZ16] Y. ERLICH et D. ZIELINSKI. « Capacity-approaching DNA storage ». In : *bioRxiv* (2016), p. 074237 (cf. p. 109).
- [Lie16] K.-A. LIE. *An Introduction to Reservoir Simulation Using MATLAB. User Guide for the Matlab Reservoir Simulation Toolbox (MRST)*. SINTEF ICT, Departement of Applied Mathematics. Oslo, Norway, déc. 2016 (cf. p. 84).
- [PPA16a] F. PAYAN, J.-L. PEYROT et M. ANTONINI. « Blue noise Sampling of surfaces from stereoscopic images ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San Francisco, USA, fév. 2016 (cf. p. 18).
- [PRS16] F. PAYAN, C. ROUDET et B. SAUVAGE. « Semi-regular Triangle Remeshing : a Comprehensive Study ». In : *Proc. Eurographics Conf. State of The Art Report (STAR)*. Lisboa, Portugal, mai 2016 (cf. p. 18, 39).
- [Pey+16] J.-L. PEYROT, L. DUVAL, S. SCHNEIDER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Hexashrink : Multiresolution Compression of Large Structured Hexahedral Meshes with Discontinuities in Geosciences ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Phoenix, USA, sept. 2016, p. 1101-1105 (cf. p. 23, 81).
- [PPA16b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « From stereoscopic images to semi-regular meshes ». In : *Signal Process. Image Comm.* 40 (jan. 2016), p. 97-110 (cf. p. 11, 19, 20, 47).
- [RH16] P. RØE et R. HAUGE. « A volume-conserving representation of cell faces in corner point grids ». In : *Computat. Geosci.* 20.3 (juin 2016), p. 453-460 (cf. p. 84).
- [Ros16] A. ROSENBLUM. *Microsoft Reports a Big Leap Forward for DNA Data Storage*. 2016. URL : <https://www.technologyreview.com/2016/07/07/158934> (cf. p. 108).
- [TCF16] D. THANOU, P. A. CHOU et P. FROSSARD. « Graph-based compression of dynamic 3D point cloud sequences ». In : *IEEE Trans. Image Process.* 25.4 (2016), p. 1765-1778 (cf. p. 67).
- [BPA15] A. BLETTERER, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Utilisation de cartes de profondeur pour la visualisation de nuages de points ». In : *Journées de l'AFIG*. Lyon, France, nov. 2015.

- [Gra+15] R. N. GRASS, R. HECKEL, M. PUDDU, D. PAUNESCU et W. J. STARK. « Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes ». In : *Angewandte Chemie International Edition* 54.8 (2015), p. 2552-2555 (cf. p. 109).
- [PRS15] F. PAYAN, C. ROUDET et B. SAUVAGE. « Semi-Regular Triangle Remeshing : A Comprehensive Study ». In : *Comput. Graph. Forum* 34.1 (2015), p. 86-102 (cf. p. 11, 18, 40).
- [PPA15] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Direct Blue Noise resampling of meshes of arbitrary topology ». In : *Vis. Comput.* 31.10 (oct. 2015), p. 1365-1381 (cf. p. 11, 18, 55, 57, 60, 62).
- [Ber+14] M. BERGER, A. TAGLIASACCHI, L. SEVERSKY, P. ALLIEZ, J. LEVINE, A. SHARF et C. SILVA. « State of the art in surface reconstruction from point clouds ». In : *Proc. Eurographics Conf. T. 1. State of The Art Report (STAR) 1*. 2014, p. 161-185 (cf. p. 48).
- [Chi14] L. CHIZAT. « Multiresolution signal compression : Exploration and Application ». Mém. de mast. Juill. 2014 (cf. p. 84, 85).
- [FP14] N. FORTINO et F. PAYAN. « Une pédagogie interactive en R&T grâce aux boîtiers de vote électronique ». In : *Proc. Workshop pédagogique Réseaux & Télécoms*. Saint Denis, France, nov. 2014 (cf. p. 11).
- [HF+14] L. HIDD FONTELES, A. MEFTAH, M. ANTONINI et F. PAYAN. « Method, System and Computer Program Product for 3D objects graphical representation ». Brev. 4152728.3-1502. 2014 (cf. p. 11, 15, 18, 46).
- [MP14] P. MATHIEU et F. PAYAN. « GSTREAMER un cadre pour manipuler les objets multimédia ». In : *Proc. Workshop pédagogique Réseaux & Télécoms*. Saint Denis, France, 2014 (cf. p. 11).
- [Pey14] J.-L. PEYROT. « Optimisation de la chaîne de numérisation 3D : de la surface au maillage semi-régulier ». Thèse de doct. Université Nice Sophia Antipolis, déc. 2014 (cf. p. 11, 47, 57, 62, 65).
- [PPA14a] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Aliasing-free simplification of surface meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Paris, France, oct. 2014, p. 4677-4681 (cf. p. 19, 62, 65).
- [PPA14b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Reconstruction semi-régulière de surfaces par stéréoscopie ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels*. Reims, France, nov. 2014 (cf. p. 19).

- [Pey+14] J.-L. PEYROT, F. PAYAN, N. RUCHAUD et M. ANTONINI. « Stereo reconstruction of semiregular meshes, and multiresolution analysis for automatic detection of dents on surfaces ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Paris, France, oct. 2014, p. 5417-5421 (cf. p. 19).
- [Bat+13] V. BATICLE, F. PAYAN, R. GUILLAUME, M. ANTONINI et P. SCHIAVONE. « Recompression de données non-structurées nano-lithographiques ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels.* Le Creusot, France, nov. 2013.
- [Che+13] J. CHEN et al. « Bilateral Blue Noise Sampling ». In : *ACM Trans. Graph.* 32.6 (nov. 2013) (cf. p. 58).
- [EBN13] J. ELSEBERG, D. BORRMANN et A. NÜCHTER. « One billion points in the cloud—an octree for efficient processing of 3D laser scans ». In : *J. Photogramm. Remote Sensing* 76 (2013), p. 76-88 (cf. p. 67).
- [Gol+13] N. GOLDMAN, P. BERTONE, S. CHEN, C. DESSIMOZ, E. M. LEPROUST, B. SIPOS et E. BIRNEY. « Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA ». In : *Nature* 494 (2013), p. 77-80 (cf. p. 109).
- [HSD13] D. HECK, T. SCHLÖMER et O. DEUSSEN. « Blue Noise Sampling with Controlled Aliasing ». In : *ACM Trans. Graph.* 32.3 (juill. 2013) (cf. p. 57).
- [Hor+13] A. HORNING, K. M. WURM, M. BENNEWITZ, C. STACHNISS et W. BURGARD. « OctoMap : An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees ». In : *Auton. Robots* 34.3 (2013), p. 189-206 (cf. p. 67).
- [LZZ13] C. LOOP, C. ZHANG et Z. ZHANG. « Real-time high-resolution sparse voxelization with application to image-based modeling ». In : *Proc. ACM High Perf. Graph. Conf.* 2013, p. 73-79 (cf. p. 67).
- [PPA13a] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Amélioration d'un outil d'analyse différentielle de surfaces échantillonnées ». In : *Proc. colloque COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels.* Le Creusot, France, nov. 2013.
- [PPA13b] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Échantillonnage de maillages surfaciques basé sur la distribution en disques de Poisson et préservant les caractéristiques géométriques ». In : *Proc. Colloque ORASIS, journ. franc. des jeunes chercheurs en vision par ordi.* Cluny, France, juin 2013 (cf. p. 18).
- [PPA13c] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Feature-preserving direct blue noise sampling for surface meshes ». In : *Proc. Eurographics Conf. Short papers.* Girona, Spain, mai 2013, p. 9-12 (cf. p. 18).

- [PPA13d] J.-L. PEYROT, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Simplification de maillages CAO avec échantillonnage anti-aliasing ». In : *Proc. GRETSI*. Brest, France, sept. 2013 (cf. p. 19).
- [Tam+13] G. K. TAM et al. « Registration of 3D point clouds and meshes : a survey from rigid to nonrigid. » In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 19.7 (2013), p. 1199-1217 (cf. p. 99).
- [Cai+12] C. CAI, J. GONG, X. LIU, H. JIANG, D. GAO et H. LI. « A novel, customizable and optimizable parameter method using spherical harmonics for molecular shape similarity comparisons ». In : *J. molec. modeling* 18.4 (avr. 2012), 1597—1610 (cf. p. 98).
- [CG12] R. CHEN et C. GOTSMAN. « Parallel Blue-noise Sampling by Constrained Farthest Point Optimization. » In : *Comput. Graph. Forum* 31.5 (2012), p. 1775-1785 (cf. p. 58).
- [Che+12] Z. CHEN, Z. YUAN, Y.-K. CHOI, L. LIU et W. WANG. « Variational Blue Noise Sampling ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 18.10 (2012), 1784–1796 (cf. p. 58).
- [CGK12] G. M. CHURCH, Y. GAO et S. KOSURI. « Next-Generation Digital Information Storage in DNA ». In : *Science* 337.6102 (2012), p. 1628-1628 (cf. p. 108).
- [CCS12] M. CORSINI, P. CIGNONI et R. SCOPIGNO. « Efficient and flexible sampling with blue noise properties of triangular meshes ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 18.6 (2012), p. 914-924 (cf. p. 58, 62, 64, 73, 75, 76).
- [KPA12] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Sparsity-based optimization of two lifting-based wavelet transforms for semi-regular mesh compression ». In : *Comput. Graph.* 36.4 (mars 2012), p. 272-282 (cf. p. 11, 17, 40).
- [KGV12] J. KOVAČEVIĆ, V. GOYAL et M. VETTERLI. *Signal Processing Fourier and Wavelet Representations*. 2012 (cf. p. 86).
- [PLL12] M. K. PARK, S. J. LEE et K. H. LEE. « Multi-scale tensor voting for feature extraction from unstructured point clouds ». In : *Graph. Model.* 74.4 (2012), p. 197-208 (cf. p. 48).
- [Xu+12] Y. XU, R. HU, C. GOTSMAN et L. LIU. « Blue noise sampling of surfaces ». In : *Comput. Graph.* 36 (2012), 232–240 (cf. p. 58).
- [CJL11] C.-H. CHIANG, B.-S. JONG et T.-W. LIN. « A robust feature-preserving semi-regular remeshing method for triangular meshes ». In : *Vis. Comput.* 27.9 (2011), p. 811-825 (cf. p. 42).

- [Gen+11] B. GENG, H. ZHANG, H. WANG et G. WANG. « Approximate Poisson Disk Sampling On Mesh ». In : *Comput. Aided Des.* 23.1 (2011), 62–69 (cf. p. 58).
- [Jac+11] L. JACQUES, L. DUVAL, C. CHAUX et G. PEYRÉ. « A panorama on multiscale geometric representations, intertwining spatial, directional and frequency selectivity ». In : *Signal Process.* 91.12 (déc. 2011), p. 2699–2730 (cf. p. 86).
- [Kam11] A. KAMMOUN. « Contributions dans le domaine de l’analyse multi-résolution de maillages surfaciques semi-réguliers. Application à la compression géométrique ». Thèse de doct. Université de Nice Sophia Antipolis, déc. 2011 (cf. p. 11, 17, 39).
- [KPA11a] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Approche adaptative basée Voronoï pour le remaillage semi-régulier ». In : *Proc. GRETSI*. Bordeaux, France, sept. 2011 (cf. p. 18).
- [KPA11b] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Optimisation du schéma lifting basé Butterfly pour les maillages semi-réguliers ». In : *Proc. Colloque ORASIS, journ. franc. des jeunes chercheurs en vision par ordi*. Praz-sur-Arly, France, juin 2011 (cf. p. 17).
- [KPA11c] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Optimized butterfly-based lifting scheme for semi-regular meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Brussels, Belgium, sept. 2011, p. 1269–1272 (cf. p. 17).
- [Pie+11] N. PIETRONI, M. TARINI, O. SORKINE et D. ZORIN. « Global Parametrization of Range Image Sets ». In : *ACM Trans. Graph.* 30.6 (déc. 2011), 149 :1-149 :10 (cf. p. 52, 69, 71).
- [RP11] C. ROUDET et F. PAYAN. « Remaillage semi-régulier pour les maillages surfaciques triangulaires : un état de l’art ». In : *Rev. Elec. Franc. Info. Graph.* 5.1 (2011), p. 27–40.
- [SHD11] T. SCHLÖMER, D. HECK et O. DEUSSEN. « Farthest-point optimized point sets with maximized minimum distance ». In : *ACM SIGGRAPH Symp. High Perf. Graph.* NY, USA, 2011, p. 135–142 (cf. p. 58).
- [WW11] L.-Y. WEI et R. WANG. « Differential domain analysis for non-uniform sampling ». In : *ACM Trans. Graph.* 30.4 (2011), 50 :1-50 :10 (cf. p. 62, 64, 73).
- [Xu+11] Y. XU, L. LIU, C. GOTSMAN et S. J. GORTLER. « Capacity-Constrained Delaunay Triangulation for point distributions. » In : *Comput. Graph.* 35.3 (2011), p. 510–516 (cf. p. 58).

- [Bow+10] J. BOWERS, R. WANG, L.-Y. WEI et D. MALETZ. « Parallel Poisson disk sampling with spectrum analysis on surfaces ». In : *ACM Trans. Graph.* 29.6 (2010), p. 166 (cf. p. 58, 60).
- [CI10] C. COURBET et M. ISENBURG. « Streaming compression of hexahedral meshes ». In : *Vis. Comput.* 26.6-8 (juin 2010), p. 1113-1122 (cf. p. 84).
- [DMS10] L. DENIS, A. MUNTEANU et P. SCHELKENS. « Semi-regular remeshing with reduced remeshing error ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* 2010, p. 365-368 (cf. p. 42).
- [Den+10] L. DENIS, S. M. SATTI, A. MUNTEANU, J. CORNELIS et P. SCHELKENS. « Scalable Intraband and Composite Wavelet-Based Coding of Semi-regular Meshes ». In : *IEEE Trans. Multimedia* 12.8 (2010), p. 773-789 (cf. p. 41).
- [KPA10] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Adaptive Semi-Regular Remeshing : A Voronoi-Based Approach ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2010, p. 5 (cf. p. 18, 39).
- [Li+10] H. LI, L.-Y. WEI, P. V. SANDER et C.-W. FU. « Anisotropic blue noise sampling ». In : *ACM Trans. Graph.* 29.6 (2010), p. 167 (cf. p. 58).
- [Mef+10] A. MEFTAH, A. ROQUEL, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Measuring Errors for Massive Triangle Meshes ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2010, p. 5.
- [ÖAG10] A. C. ÖZTIRELI, M. ALEXA et M. GROSS. « Spectral sampling of manifolds ». In : *ACM Trans. Graph.* T. 29. 6. 2010, p. 168 (cf. p. 58).
- [PA10] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Compression of Surface Meshes ». In : *Bio-medical Diagnostics and Clinical Technologies : Applying High-Performance Cluster and Grid Computing.* IGI Global Publishing (Eds. : M. Pereira and M. Freire), juill. 2010 (cf. p. 11).
- [Roq+10] A. ROQUEL, A. MEFTAH, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Measuring Errors for Huge Semi-regular Meshes ». In : *Electron. Imaging Conf. - 3D Image Proc. Meas. Appl.* San Diego, USA, jan. 2010.
- [RP10] C. ROUDET et F. PAYAN. « Remaillage semi-régulier pour les maillages surfaciques triangulaires : un état de l'art ». In : *Journées de l'AFIG.* France, nov. 2010.
- [RH10] J. RYDE et H. HU. « 3D mapping with multi-resolution occupied voxel lists ». In : *Auton. Robots* 28.2 (2010), p. 169 (cf. p. 67).
- [BSD09] M. BALZER, T. SCHLÖMER et O. DEUSSEN. « Capacity-constrained Point Distributions : A Variant of Lloyd's Method ». In : *ACM Trans. Graph.* 28.3 (juill. 2009), 86 :1-86 :8 (cf. p. 58).

- [Cli+09] D. CLINE, S. JESCHKE, A. RAZDAN, K. WHITE et P. WONKA. « Dart Throwing on Surfaces ». In : *Comput. Graph. Forum* 28.4 (juin 2009), 1217–1226 (cf. p. 49, 58).
- [KPA09] A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Bit allocation for Spatio-temporal Wavelet Coding of Animated Semi-regular Meshes ». In : *Int. MultiMed. Modeling Conf.* France, jan. 2009 (cf. p. 17).
- [KCL09] H. S. KIM, H. K. CHOI et K. H. LEE. « Feature detection of triangular meshes based on tensor voting theory ». In : *J. Comput. Aided Design and Comput. Graph.* 41.1 (jan. 2009), 47–58.
- [KKE09] S. KORTAGERE, M. D. KRASOWSKI et S. EKINS. « The importance of discerning shape in molecular pharmacology. » In : *Trends Pharmacol. Sc.* 30.3 (2009), p. 138-47 (cf. p. 98, 110).
- [MPF09] Y. MIAO, R. PAJAROLA et J. FENG. « Curvature-aware adaptive re-sampling for point-sampled geometry ». In : *Comput. Aided Des.* 41.6 (2009), p. 395-403.
- [PMA09] F. PAYAN, F. MÉRIAUX et M. ANTONINI. « View-Dependent Geometry Coding Of 3D Scenes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Cairo, Egypt, nov. 2009.
- [RBB09] R. B. RUSU, N. BLODOW et M. BEETZ. « Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration ». In : *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 2009, p. 3212-3217 (cf. p. 100).
- [SM09] D. SALOMON et G. MOTTA. *Handbook of Data Compression*. Springer, 2009 (cf. p. 89).
- [VPJ09] M. J. VAINIO, J. S. PURANEN et M. S. JOHNSON. « ShaEP : Molecular Overlay Based on Shape and Electrostatic Potential ». In : *J. Chem. Inform. Modeling* 49.2 (2009), p. 492-502 (cf. p. 98).
- [Wil+09] J. A. WILSON, A. BENDER, T. KAYA et P. A. CLEMONS. « Alpha Shapes Applied to Molecular Shape Characterization Exhibit Novel Properties Compared to Established Shape Descriptors ». In : *J. Chem. Inform. Modeling* 49.10 (2009), p. 2231-41 (cf. p. 98).
- [All+08] P. ALLIEZ, G. UCELLI, C. GOTSMAN et M. ATTENE. « Recent Advances in Remeshing of Surfaces ». In : *Shape Anal. and Structuring*. 2008, p. 53-82 (cf. p. 40, 46).
- [FZo8] Y. FU et B. ZHOU. « Direct Sampling on Surfaces for High Quality Remeshing ». In : *ACM Symp. Solid and Physical Modeling*. Stony Brook, US, 2008, 115–124 (cf. p. 58).

- [KTvo8] S. KRIVOGRAĐ, M. TRLEP et B. ŽALIK. « A hexahedral mesh connectivity compression with vertex degrees ». In : *Comput. Aided Des.* 40.12 (déc. 2008), p. 1105-1112 (cf. p. 84).
- [LDo8] A. LAGAE et P. DUTRÉ. « A comparison of methods for generating Poisson disk distributions ». In : *Comput. Graph. Forum.* T. 27. 1. Wiley Online Library. 2008, p. 114-129 (cf. p. 57).
- [Li+08] H. LI, K.-Y. LO, M.-K. LEUNG et C.-W. FU. « Dual Poisson-Disk Tiling : An Efficient Method for Distributing Features on Arbitrary Surfaces ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 14.5 (2008), p. 982-998 (cf. p. 57).
- [Llo8] P. LINDSTROM et M. ISENBURG. « Lossless Compression of Hexahedral Meshes ». In : *Proc. Data Compression Conf.* (Snowbird, UT, USA). Mars 2008, p. 192-201 (cf. p. 84).
- [Mam+08] K. MAMOU, T. ZAHARIA, F. PRÊTEUX, A. KAMMOUN, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Two Optimizations of the MPEG-4 FAMC standard for Enhanced Compression of Animated 3D Meshes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* Cairo, Egypt, 2008 (cf. p. 17).
- [PKAo8] F. PAYAN, A. KAMMOUN et M. ANTONINI. « Remeshing and Spatio-Temporal Wavelet Filtering for 3D Animations ». In : *Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* Las Vegas, USA, avr. 2008 (cf. p. 17).
- [VCPo8] S. VALETTE, J.-M. CHASSERY et R. PROST. « Generic remeshing of 3D triangular meshes with metric-dependent discrete Voronoi Diagrams ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 14.2 (2008), p. 369-381 (cf. p. 43, 62).
- [BRo7] P. J. BALLESTER et W. G. RICHARDS. « Ultrafast shape recognition to search compound databases for similar molecular shapes ». In : *J. Computa. Chem.* 28.10 (2007), p. 1711-1723 (cf. p. 98).
- [BCAPo7] Y. BOULFANI-CUISINAUD, M. ANTONINI et F. PAYAN. « Motion-Based Mesh Clustering For MCDWT Compression Of 3D Animated Meshes ». In : *Proc. Eur. Sig. Image Proc. Conf.* Poznan, Poland, sept. 2007, p. 2105-2109.
- [BCPAo7] Y. BOULFANI-CUISINAUD, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Temporal wavelet-based compression of 3D animated meshes using motion-based clustering ». In : *Proc. TAIMA.* Tunisia, mai 2007.
- [Guso7] I. GUSKOV. « Manifold-based approach to semi-regular remeshing ». In : *Graph. Model.* 69.1 (2007), p. 1-18 (cf. p. 37, 42, 45).

- [PA07] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Temporal Wavelet-based Geometry Coder for 3D Animated models ». In : *Comput. Graph.* 31.1 (jan. 2007), p. 77-88 (cf. p. 11, 17).
- [PHB07] F. PAYAN, S. HAHMANN et G.-P. BONNEAU. « Deforming surface simplification based on dynamic geometry sampling ». In : *Proc. Shape Modeling International*. Lyon, France, juin 2007, p. 71-80.
- [SHB07] B. SAUVAGE, S. HAHMANN et G.-P. BONNEAU. « Volume Preservation of Multiresolution Meshes ». In : *Comput. Graph. Forum* 26.3 (2007), p. 275-283 (cf. p. 40).
- [WCE07] K. B. WHITE, D. CLINE et P. K. EGBERT. « Poisson Disk Point Sets by Hierarchical Dart Throwing ». In : *Symp. Interactive Ray Tracing* (2007), p. 129-132 (cf. p. 58).
- [BHo6] D. BAUM et H.-C. HEGE. « A Point-Matching Based Algorithm for 3D Surface Alignment of Drug-Sized Molecules ». In : *Comput. Life Sc. II*. 2006, p. 183-193 (cf. p. 99).
- [Bos+06] L. B. BOSCARDÍN, L. R. CASTRO, S. M. CASTRO et A. D. GIUSTI. « Wavelets bases defined over tetrahedra ». In : *J. Comput. Sci. Tech.* 6.1 (avr. 2006), p. 46-52 (cf. p. 84).
- [BCPA06] Y. BOULFANI-CUISINAUD, F. PAYAN et M. ANTONINI. « Model-based Quality Control for the Compression of 3D Mesh Sequences with Fixed Connectivity ». In : *IEEE ISCCSP*. Morocco, mars 2006.
- [DHo6] D. DUNBAR et G. HUMPHREYS. « A spatial data structure for fast Poisson - disk sample generation ». In : *ACM SIGGRAPH*. Boston, USA, 2006, 503-508 (cf. p. 58).
- [Ise+06] M. ISENBURG, P. LINDSTROM, S. GUMHOLD et J. SHEWCHUK. « Streaming compression of tetrahedral volume meshes ». In : *Proc. Graphics Interface*. Quebec City, juin 2006, p. 115-121 (cf. p. 84).
- [PA06] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Mean Square Error Approximation for Wavelet-based Semiregular Mesh Compression ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 12.4 (mai 2006), p. 649-657 (cf. p. 11).
- [SK06] R. SCHNABEL et R. KLEIN. « Octree-based Point-Cloud Compression ». In : *Symp. Point-Based Graph.* 2006, p. 111-120 (cf. p. 67).
- [SPR06] A. SHEFFER, E. PRAUN et K. ROSE. « Mesh parameterization methods and their applications ». In : *Found. Trends Comp. Graph. Vis.* 2.2 (2006), p. 105-171 (cf. p. 40).

- [Che+05] D. CHEN, Y.-J. CHIANG, N. MEMON et X. WU. « Geometry Compression Of Tetrahedral Meshes Using Optimized Prediction ». In : *Proc. Eur. Sig. Image Proc. Conf.* (Istanbul, Turkey). Sept. 2005 (cf. p. 84).
- [PA05a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « An Efficient Bit Allocation for Compressing Normal Meshes with an Error-driven Quantization ». In : *Comput. Aided Geomet. Des.* 22.5 (juill. 2005), p. 466-486 (cf. p. 11, 37, 41).
- [PA05b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « MSE Approximation for Model-based Compression of Multiresolution Semiregular Meshes ». In : *Proc. Eur. Sig. Image Proc. Conf.* Antalya, Turkey, sept. 2005 (cf. p. 37).
- [PA05c] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Wavelet-based Compression of 3D Mesh Sequences ». In : *ACIDCA-ICMI*. Tozeur, Tunisia, nov. 2005.
- [PBCA05] F. PAYAN, Y. BOULFANI-CUISINAUD et M. ANTONINI. « Temporal Lifting Scheme for the Compression of Animated Sequences of Meshes ». In : *IEEE Int. Work. Very Low Bitrate Vid. Coding*. Italy, sept. 2005.
- [PK05] J. PENG et C.-C. J. KUO. « Geometry-guided progressive lossless 3D mesh coding with octree (OT) decomposition ». In : *ACM Trans. Graph.* T. 24. 3. 2005, p. 609-616 (cf. p. 67).
- [Roy+05] M. ROY, S. FOUFOU, A. KOSCHAN, F. TRUCHETET et M. ABIDI. « Multi-resolution analysis for meshes with appearance attributes ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* T. 3. 2005, p. 816-819 (cf. p. 40).
- [Bero4] M. BERTRAM. « Biorthogonal Loop-subdivision wavelets ». In : *Computing* 72.1-2 (2004), p. 29-39 (cf. p. 40).
- [FSK04] I. FRIEDEL, P. SCHRÖDER et A. KHODAKOVSKY. « Variational normal meshes ». In : *ACM Trans. Graph.* 23.4 (2004), p. 1061-1073 (cf. p. 42).
- [HLA04] C. HOFBAUER, H. LOHNINGER et A. ASZÓDI. « SURFCOMP : A Novel Graph-Based Approach to Molecular Surface Comparison ». In : *J. Chem. Inform. Comput. Sc.* 44.3 (2004), p. 837-47 (cf. p. 99).
- [LQS04] D. LI, K. QIN et H. SUN. « Unlifted Loop Subdivision Wavelets ». In : *Proc. Pacific Conf. Comput. Graph. Applic.* 2004, p. 25-33 (cf. p. 40).
- [Afx] « MPEG-4 Part 16 : Animation Framework eXtension (AFX) ». In : *ISO / IEC JTC1 / SC29 / WG11, Standard 14496-16*. 2004 (cf. p. 41).
- [Pay04] F. PAYAN. « Rate-distortion optimization for geometry compression of triangular meshes ». Thèse de doct. Université Nice Sophia Antipolis, déc. 2004 (cf. p. 37).
- [PA04] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Model-based Bit Allocation for Normal Mesh Compression ». In : *IEEE Workshop Multimedia Signal Process.* Sept. 2004, p. 327-330.

- [Sim+04] J.-Y. SIM, C.-S. KIM, C.-C. J. KUO et S.-U. LEE. « Rate-distortion optimized compression and view-dependent transmission of 3D normal meshes ». In : *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 14.7 (2004), p. 854-868 (cf. p. 41).
- [VP04] S. VALETTE et R. PROST. « A Wavelet Based Compression Scheme for Triangle Meshes : Wavemesh ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 10.2 (2004), p. 123-133 (cf. p. 40).
- [DVS03] C. DACHSBACHER, C. VOGELGSANG et M. STAMMINGER. « Sequential point trees ». In : *ACM Trans. Graph.* T. 22. 3. 2003, p. 657-662 (cf. p. 67).
- [IA03] M. ISENBURG et P. ALLIEZ. « Compressing hexahedral volume meshes ». In : *Graph. Model.* 65.4 (juill. 2003), p. 239-257 (cf. p. 84).
- [KG03] A. KHODAKOVSKY et I. GUSKOV. « Compression of Normal Meshes ». In : *Geom. Modeling for Sci. Vis.* (2003), p. 189-206 (cf. p. 41).
- [KLS03] A. KHODAKOVSKY, N. LITKE et P. SCHRÖDER. « Globally smooth parameterizations with low distortion ». In : *ACM SIGGRAPH.* 2003, p. 350-357 (cf. p. 42).
- [LCB03] S. LAVU, H. CHOI et R. BARANIUK. « Geometry compression of normal meshes using rate-distortion algorithms ». In : *Proc. Eurographics Symp. Geom. Process.* 2003, p. 52-61 (cf. p. 41).
- [PA03a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « 3D multiresolution context-based coding for geometry compression ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* T. 1. Barcelona, Spain, sept. 2003, p. 785-788.
- [PA03b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Weighted bit allocation for multiresolution 3D mesh geometry compression ». In : *Proc. SPIE Vis. Communic. Image Process.* Lugano, Switzerland, 2003.
- [AMD02] P. ALLIEZ, M. MEYER et M. DESBRUN. « Interactive geometry remeshing ». In : *ACM SIGGRAPH.* San Antonio, Texas, 2002, p. 347-354 (cf. p. 57).
- [Bie+02] H. BIERMANN, I. MARTIN, F. BERNARDINI et D. ZORIN. « Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces ». In : *ACM Trans. Graph.* 21.3 (2002), p. 312-321 (cf. p. 40, 41).
- [Dan+02] E. DANOVARO, L. DE FLORIANI, M. T. LEE et H. SAMET. « Multiresolution Tetrahedral Meshes : An Analysis and a Comparison ». In : *Proc. Shape Modeling International* (Banff, Canada). Mai 2002, p. 83-91 (cf. p. 84).

- [Mey+02] M. MEYER, M. DESBRUN, P. SCHRÖDERR et A. BARR. « Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds ». In : *Int. Workshop Vis. and Math.* 2002 (cf. p. 43).
- [PA02a] F. PAYAN et M. ANTONINI. « 3D Mesh Wavelet Coding Using Efficient Model-based Bit Allocation ». In : *Proc. IEEE Int. Symp. 3D Data Proc. Vis. Transm.* Italy, juin 2002.
- [PA02b] F. PAYAN et M. ANTONINI. « Multiresolution 3D Mesh Compression ». In : *Proc. Int. Conf. Image Process.* T. 2. Rochester, USA, sept. 2002, p. 245-248.
- [HLG01] K. HORMANN, U. LABSIK et G. GREINER. « Remeshing triangulated surfaces with optimal parameterizations ». In : *Comput. Aided Des.* 33.11 (2001), p. 779-788 (cf. p. 42).
- [Mic+01] T. MICHIKAWA, T. KANAI, M. FUJITA et H. CHIYOKURA. « Multiresolution interpolation meshes ». In : *Proc. Pacific Conf. Comput. Graph. Applic.* 2001, p. 60 -69 (cf. p. 41).
- [PGA01] M. PIERACCINI, G. GUIDI et C. ATZENI. « 3D digitizing of cultural heritage ». In : *J. Cult. Herit.* 2.1 (2001), p. 63-70 (cf. p. 110).
- [PSS01] E. PRAUN, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER. « Consistent mesh parameterizations ». In : *ACM SIGGRAPH.* 2001, p. 179-184 (cf. p. 41).
- [CB]00] D. COSGROVE, D. BAYADA et A. JOHNSON. « A novel method of aligning molecules by local surface shape similarity ». In : *J. Comput. Aided Molec. Des.* 14.6 (août 2000), p. 573-591 (cf. p. 99).
- [Gus+00] I. GUSKOV, K. VIDIMCE, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER. « Normal Meshes ». In : *ACM SIGGRAPH.* 2000, p. 95-102 (cf. p. 18, 42, 45).
- [KSS00] A. KHODAKOVSKY, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS. « Progressive Geometry Compression ». In : *ACM SIGGRAPH.* 2000, p. 271-278 (cf. p. 40, 41).
- [KS00] J. KOVACEVIC et W. SWELDENS. « Wavelet families of increasing order in arbitrary dimensions ». In : *IEEE Trans. Image Process.* 9.3 (2000), p. 480-496 (cf. p. 40).
- [Lab+00] U. LABSIK, L. KOBBELT, R. SCHNEIDER et H.-P. SEIDEL. « Progressive transmission of subdivision surfaces ». In : *Computat. Geom.* 15.1-3 (2000), p. 25-39 (cf. p. 41).
- [LMH00] A. W. F. LEE, H. MORETON et H. HOPPE. « Displaced Subdivision Surfaces ». In : *ACM SIGGRAPH.* 2000, p. 85-94 (cf. p. 41, 42).

- [RL00] S. RUSINKIEWICZ et M. LEVOY. « QSplat : A multiresolution point rendering system for large meshes ». In : *Proc. ACM SIGGRAPH Comput. Graph.* 2000, p. 343-352 (cf. p. 67).
- [SR00] A. SZYMCAK et J. ROSSIGNAC. « Grow & Fold : Compressing the Connectivity of Tetrahedral Meshes ». In : *Comput. Aided Des.* 32.8-9 (août 2000), p. 527-537 (cf. p. 84).
- [Gio99] P. GIOIA. « Reducing the number of wavelet coefficients by geometric partitioning ». In : *Computat. Geom. Theory and Applic.* 14.1-3 (1999), p. 25-48 (cf. p. 42).
- [GGS99] S. GUMHOLD, S. GUTHE et W. STRASSER. « Tetrahedral Mesh Compression with the Cut-Border Machine ». In : *Proc. IEEE Visualization Conf.* San Francisco, CA, USA, oct. 1999, p. 51-58 (cf. p. 84).
- [GSS99] I. GUSKOV, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER. « Multiresolution Signal Processing for Meshes ». In : *ACM SIGGRAPH.* 1999, p. 325-334 (cf. p. 40).
- [Lee+99] A. W. F. LEE, D. DOBKIN, W. SWELDENS et P. SCHRÖDER. « Multiresolution Mesh Morphing ». In : *ACM SIGGRAPH.* 1999, p. 343-350 (cf. p. 41).
- [Mal99] S. MALLAT. *A Wavelet Tour of Signal Processing, 2nd edition.* Academic Press, 1999 (cf. p. 40).
- [PRS99] R. PAJAROLA, J. ROSSIGNAC et A. SZYMCAK. « Implant Sprays : Compression of Progressive Tetrahedral Mesh Connectivity ». In : *Proc. IEEE Visualization Conf.* (San Francisco, USA). Oct. 1999, p. 299-305 (cf. p. 84).
- [Bon98] G.-P. BONNEAU. « Multiresolution Analysis on Irregular Surface Meshes ». In : *IEEE Trans. Visual Comput. Graph.* 4.4 (1998), p. 365-378 (cf. p. 40).
- [Kob+98] L. KOBELT, S. CAMPAGNA, J. VORSATZ et H.-P. SEIDEL. « Interactive multi-resolution modeling on arbitrary meshes ». In : *ACM SIGGRAPH.* 1998, p. 105-114 (cf. p. 40).
- [Lee+98] A. W. F. LEE, W. SWELDENS, P. SCHRÖDER, L. COWSAR et D. DOBKIN. « MAPS : multiresolution adaptive parameterization of surfaces ». In : *ACM SIGGRAPH.* T. 32. 1998, p. 95-104 (cf. p. 42, 44, 45).
- [LDW97] M. LOUNSBERY, T. D. DEROSE et J. WARREN. « Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type ». In : *ACM Trans. Graph.* 16.1 (jan. 1997), p. 34-73 (cf. p. 40, 41).
- [ZSS97] D. ZORIN, P. SCHRÖDER et W. SWELDENS. « Interactive multiresolution mesh editing ». In : *ACM SIGGRAPH.* 1997, p. 259-268 (cf. p. 40).

- [Cer+96] A. CERTAIN, J. POPOVIC, T. DEROSE, T. DUCHAMP, D. SALESIN et W. STUETZLE. « Interactive multiresolution surface viewing ». In : *ACM SIGGRAPH*. 1996, p. 91-98 (cf. p. 40, 41).
- [SP96] A. SAID et W. A. PEARLMAN. « A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees ». In : *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 6.3 (juin 1996), p. 243-250 (cf. p. 91).
- [Swe96] W. SWELDENS. « The lifting scheme : a custom-design construction of biorthogonal wavelets ». In : *Appl. Comput. Harmon. Analysis* 3.2 (avr. 1996), p. 186-200 (cf. p. 86).
- [Dah+95] S. DAHLKE, W. DAHMEN, E. SCHMITT et I. WEINREICH. « Multiresolution Analysis and Wavelets on S_2 and S_3 ». In : *Numer. Funct. Anal. Optim.* 16.1,2 (1995), p. 19-41 (cf. p. 40).
- [Eck+95] M. ECK, T. DEROSE, T. DUCHAMP, H. HOPPE, M. LOUNSBERY et W. STUETZLE. « Multiresolution analysis of arbitrary meshes ». In : *ACM SIGGRAPH*. 1995, p. 173-182 (cf. p. 42).
- [NG95] M. NELSON et J.-L. GAILLY. *The Data Compression Book*. Wiley, 1995 (cf. p. 89).
- [SS95] P. SCHRÖDER et W. SWELDENS. « Spherical wavelets : efficiently representing functions on the sphere ». In : *ACM SIGGRAPH*. 1995, p. 161-172 (cf. p. 40).
- [Sha93] J. M. SHAPIRO. « Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients ». In : *IEEE Trans. Signal Process.* 41 (déc. 1993), p. 3445-3462 (cf. p. 91).
- [CDF92] A. COHEN, I. DAUBECHIES et J.-C. FEAUVEAU. « Biorthogonal bases of compactly supported wavelets ». In : *Commun. ACM* 45.5 (juin 1992), p. 485-560 (cf. p. 87).
- [DLG90] N. DYN, D. LEVIN et J. GREGORY. « A Butterfly Subdivision Scheme for Surface Interpolation with Tension Control ». In : *ACM Trans. Graph.* 9 (1990), p. 160-169 (cf. p. 43).
- [DW85] M. A. Z. DIPPÉ et E. H. WOLD. « Antialiasing through stochastic sampling ». In : *Proc. ACM SIGGRAPH Comput. Graph.* New York, USA, 1985, p. 69-78 (cf. p. 58).
- [ZS84] T. Y. ZHANG et C. Y. SUEN. « A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns ». In : *Commun. ACM* 27.3 (mars 1984), p. 236-239 (cf. p. 48).
- [Llo82] S. LLOYD. « Least squares quantization in PCM ». In : *IEEE Trans. Inform. Theory* 28.2 (1982), p. 129-137 (cf. p. 42, 58).

- [FB81] M. A. FISCHLER et R. C. BOLLES. « Random Sample Consensus : A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography ». In : *Commun. ACM* 24.6 (juin 1981), 381–395 (cf. p. 101).
- [Cro77] F. C. CROW. « The aliasing problem in computer-generated shaded images ». In : *Commun. ACM* 20.11 (nov. 1977), 799–805 (cf. p. 57).
- [Lev65] V. I. LEVENSHTEIN. « Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals ». In : *Soviet physics. Doklady* 10 (1965), p. 707–710 (cf. p. 112).
- [Dij59] E. W. DIJKSTRA. « A Note on Two Problems in Connexion with Graphs ». In : *Numer. Math.* 1.1 (déc. 1959), p. 269–271 (cf. p. 60).
- [Del34] B. DELAUNAY. « Sur la Sphère Vide. A la Mémoire de Georges Voronoï. » In : *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk* 7 (1934), p. 93–800 (cf. p. 42).
- [Agp] *Art Graphique & Patrimoine*. URL : <https://www.artgp.fr/> (cf. p. 75, 76).
- [Cin] CINTOO. *SDK SmartMesh*. <https://cintoo.com/> (cf. p. 51).
- [Goo] GOOGLE/CYARK. *Open Heritage*. URL : <https://artsandculture.google.com/project/cyark> (cf. p. 74, 75, 110).
- [Jpe] *JPEG2000 Part 1 Final Draft International Standard*. ISO / IEC / JTC1 / SC29 WG1. URL : www.jpeg.org (cf. p. 20).
- [Pep] *PEPR MoleculArXiv*. URL : <https://www.ins2i.cnrs.fr/fr/pepr-molecularxiv> (cf. p. 107, 109).
- [Sof] O. S. SOFTWARE. *ROCS*. URL : <https://www.eyesopen.com/rocs> (cf. p. 98).