COLLEGES SCIENCES
BRETAGNE POUR L'INGENIEUR
LOIRE ET LE NUMERIQUE

ENSTA BRETAGNE

THESE DE DOCTORAT DE

l'École Nationale Supérieure
de Techniques Avancées Bretagne

ÉCOLE DOCTORALE N° 648
Sciences pour l'Ingénieur et le Numérique
Spécialité : Physique et Sciences de l'Ingénieur

Par

**Yannick ARGOUARC'H**

# Développement d'une méthode de mesure tridimensionnelle pour l'identification de l'usure de contact et de la corrosion généralisée de mailles de chaines d'ancrage vieillies en milieu marin

**Thèse présentée et soutenue à Brest, le 31 janvier 2025.**
**Unité de recherche : Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) – UMR CNRS 6027**

**Rapporteurs avant soutenance** :

| | |
|---|---|
| M. Pierre Grussenmeyer | Professeur des Universités, INSA de Strasbourg |
| M. Nabil Anwer | Professeur des Universités, Université Paris-Saclay |

**Composition du Jury :**

| | |
|---|---|
| Président : | |
| M. Laurent Gaillet | Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel |
| Examinateurs : | |
| Mme Céline Roudet | Maître de Conférences, Université de Bourgogne |
| M. Franck Schoefs | Professeur des Universités, Université de Nantes |
| Dir. de thèse : | |
| Romain Créac'hcadec | Maître de Conférences HDR, ENSTA Bretagne |

# REMERCIEMENTS

Pour commencer, il me semble important de remercier avant tout mon employeur, l'ENSTA Bretagne, de m'avoir accordé ces 6 années de travail à mi-temps afin de réaliser cette thèse. En particulier, je remercie très sincèrement Monsieur Jean-Pierre Baudu, Directeur Général des Services, de m'avoir soutenu dès la proposition de cette idée et tout au long de cette longue période de travail. Un grand merci à lui pour la confiance qu'il m'a accordée.

Ensuite, je remercie Monsieur Romain Créac'hcadec, mon directeur de thèse. Du fait de mon âge, je n'ai certainement pas été le doctorant le plus malléable de sa carrière. Du fait de mon activité à mi-temps, je n'ai sûrement pas été le doctorant le plus véloce. Du fait de la thématique choisie, je ne suis pas non plus le doctorant qui lui a apporté le plus d'intérêt direct pour ses propres activités de recherche. Je le remercie donc pour sa grande patience, pour ses conseils, pour sa disponibilité quand cela fut nécessaire, et de manière générale, pour tous ces moments d'échanges que nous partageons et que nous partagerons encore sur de nouveaux projets.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au CEREMA, centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, direction technique Eau Mer et Fleuves (Brest, France), pour leur participation au financement du projet sur l'usure des chaînes d'ancrage. En particulier, je remercie Monsieur Philippe Renaudin, expert en lignes de mouillages, pour le partage de son expérience et pour avoir fourni de nombreux sujets d'étude aux élèves de l'ENSTA Bretagne.

Ma reconnaissance va aussi au SSF (Service de Soutien de la Flotte) et au SMP (Service des Moyens Portuaires) de la base navale de Brest, pour le partage des connaissances et des moyens autour de la problématique du vieillissement des chaînes de mouillage et d'ancrage. Notre

collaboration a été riche d'activités diverses : étude sur la résistance à la corrosion des chaînes galvanisée, étude comparée sur le vieillissement des chaînes HR et Q3, et conception d'une machine dédiée à la galvanisation des chaînes de mouillage. Sans être exhaustif, je pense en particulier à Messieurs Sébastien Barreau, Pierre-Yves Hily, Thomas Morlet, Ludovic Blondelle, David Fevrier, Frédéric Beaurain, Nicolas Laussier, Florent Mioni, Pascal Madec, Matthieu Simon, Ludovic Stalin, Tommy Faity, Thierry Dehedin...

Toujours concernant les partenaires, je pense bien sûr aux Phares & Balises des ports de Brest et de Lézardrieux, pour la mise à disposition des moyens humains et matériels qui ont permis de récolter des échantillons de mailles de chaînes usées et d'étudier le vieillissement des chaînes immergées en participant à la mise à l'eau et aux relevés réguliers des lignes d'ancrage. Je pense en particulier à Messieurs Fanck Grall, Yann Riou, Toussaint Le Calvez, Gwenhael Raux, Patrick Coadalan, ainsi que tous les membres de l'équipage du Beg an Arvor et tout le personnel qui a contribué aux différentes actions sur les quais des centres de balisage.

Durant ces années d'études sur les ancrages marins, j'ai pu proposer des problématiques concrètes pour certains élèves ingénieurs de l'ENSTA Bretagne (mais pas que) et ceci sous forme de projets ou de stages au sein de l'école. Je remercie donc très sincèrement l'ensemble de ces élèves pour les études pertinentes réalisées. Il s'agit de :

- Monsieur Thibaud Maillard, pour son travail de défrichage sur l'imagerie 3D et les processus de registration.
- Mesdames Laura Mitaux-Maurouard et Tifaine Le Merrer, pour leur étude sur la torsion des chaînes.
- L'ensemble des élèves mécaniciens de la promotion 2021, pour la conception d'un banc multiaxial dédié à usure de chaînes d'ancrage.
- Messieurs Bryan Better et Sacha Hirsch, pour la poursuite du travail de conception sur le banc d'essai.
- Monsieur Nicolas Salaün, Mesdames Suzana Soares-Nunes et Colombe Julia, pour l'analyse de la déformation accidentelle d'une cosse supérieure d'un mouillage hauturier de Météo France.
- Messieurs Damien Morice, Joël Foyang Nzedom et Antony de Biasio, pour leurs études sur la résistance résiduelle à la rupture des chaînes d'ancrage.
- Madame Maryse Gille, pour la reprise de la démonstration de la théorie de Hertz et son travail sur les images tomographiques.

- Madame Marion Souheil et Messieurs Hugo Phelep, Mathis Cassagne et Louis Gauthier, pour la conception d'une machine dédiée à la galvanisation des chaînes d'ancrages.

Il est parfois des coups de pouce qui parviennent à point nommé. À la limite du découragement, lorsqu'aucun calcul de registration ne convergeait sur les mailles corrodées, quelques mots-clés fournis par un collègue ont permis d'amorcer les bonnes pistes de réflexion. Je remercie donc vivement Monsieur Guillaume Sicot (Lab-STICC ENSTA Bretagne) grâce auquel, par ces quelques mots, j'ai pu gagner un temps considérable.

Bien évidemment, je n'oublie pas de remercier l'ensemble des collègues de l'équipe CMA de l'ENSTA Bretagne (Conception Mécanique Appliquée). Je mesure pleinement la chance que j'ai eue, jusqu'à présent, de pouvoir travailler dans cette équipe et j'apprécie au plus haut point de partager mon quotidien avec eux. Merci à eux de supporter mes bêtises, mes oublis, mes approximations, mes agacements réguliers et mon bazar. Merci donc à Nicolas Dufil, Jean-François Guillemette, Alain Poulhalec et Jean-Louis Quénec'h. Merci aussi aux jeunes retraités, Hervé Trébaol, avec qui je travaille encore, Thierry Ropert, Didier Pochard et Catherine le Lagadec. Merci enfin au « petit jeune » Erwan Tanné qui vient d'arriver et à notre secrétaire préférée Nathalie Léal.

Je remercie aussi, bien sûr, l'ensemble du personnel de soutien administratif et technique de l'ENSTA Bretagne, pour toutes les compétences dont ils font preuve, pour leur grande disponibilité et pour la qualité de leur accueil.

Je n'oublie pas non plus mes trois relecteurs : Ghislaine, Karine et Stéphane. Ils savent désormais ce qu'est une registration, et cela leur sera extrêmement utile dans leur vie quotidienne. Merci à eux de m'avoir appris à placer judicieusement les virgules aux bons endroits, à utiliser adroitement le participe présent, et surtout, à ne pas utiliser d'expressions bretonnantes...

Au terme de ce travail, je pense à ma famille, ma femme Karine et mes enfants Alan et Soline. Je pense aussi à ma mère, mes sœurs, mes nièces et mes beaux-frères. Merci à eux d'avoir fait preuve d'un soutien sans faille malgré ma surcharge de travail et d'avoir supporté, lors de nos échanges, mes divagations de pensées, mes absences psychiques, voyages fréquents et incontrôlés alors que l'on me parle, parmi les équations mathématiques et les problèmes mécaniques non résolus.

# RÉSUMÉ

L'observation de l'évolution géométrique tridimensionnelle de mailles de chaînes d'ancrage ayant séjourné en milieu marin peut être réalisée par l'utilisation de scanners 3D. À la suite de relevés successifs, il est ainsi possible d'identifier précisément la localisation, les formes et les quantités de matière perdue par corrosion ou par usure. Cependant, ces identifications ne sont possibles qu'après alignement des scans obtenus, car ils ne sont pas exprimés dans les mêmes repères. Les algorithmes usuels d'alignement de nuages de points n'étant pas adaptés au problème rencontré, le travail réalisé met en œuvre un algorithme nouveau décliné de la méthode itérative du point le plus proche (ICP). Le processus itératif d'alignement développé déplace le nuage de point correspondant à la maille vieillie, sur la maille neuve, après détection et suppression des points situés dans les zones de pertes de matière localisées (corrosion par piqûre ou usure) et après augmentation en épaisseur des surfaces restantes d'une valeur correspondant à la perte de matière par corrosion généralisée, supposée constante. Les tests réalisés à partir de maillages parfaits, provenant de constructions CAO, montrent une bonne convergence du processus d'alignement et une très bonne précision des positionnements obtenus. Les tests réalisés à partir de scans de pièces réelles montrent une bonne convergence du processus itératif et une qualité d'alignement qui semble suffisante au regard des objectifs de travail, mais à condition que l'hypothèse de corrosion généralisée puisse être réellement validée. De futurs travaux peuvent être désormais envisagés pour améliorer les connaissances sur le vieillissement des chaînes d'ancrage ou toute autre pièce mécanique ayant subi les mêmes types d'agressions physico-chimiques.

# ABSTRACT

The observation of the three-dimensional geometrical evolution of mooring chain links exposed to the marine environment can be achieved by using 3D scanners. Successive surveys make it possible to precisely identify the location, shapes and quantities of material loss by corrosion or fretting in interlink contact areas. However, these identifications are only possible after an alignment of the obtained scans, because they are not expressed in the same reference marks. The usual point cloud alignment algorithms not being adapted to the problem encountered, the carried-out work implements a new algorithm based on the iterative closest point method (ICP). The developed iterative process of alignment, moves the point cloud corresponding to the aged link onto the new link, after detecting and deleting the points located in the areas of localized material losses (pitting corrosion or wear), and after adding an extra layer on the remaining surfaces, of a value corresponding to the loss of material by a generalized corrosion assumed to be constant. The tests carried out on perfect meshes from CAD designs show good convergence of the alignment process and very good accuracy of the positions obtained. The tests carried out using scans of real parts show good convergence of the iterative process and an alignment quality that seems sufficient for the work objectives, provided that the generalised corrosion hypothesis can be validated. Future work can now be envisaged to improve our knowledge of the ageing of anchor chains or any other mechanical part subjected to the same types of physico-chemical aggressions.

# TABLE DES MATIÈRES

**REMERCIEMENTS** ..... **i**

**RÉSUMÉ** ..... **v**

**ABSTRACT** ..... **vii**

**TABLE DES MATIÈRES** ..... **ix**

**INTRODUCTION** ..... **1**

**Chapitre I. CHAÎNES D'ANCRAGE - État de l'art et perspectives** ..... **5**

I.1. ANCRAGE DES DISPOSITIFS FLOTTANTS ..... 5

I.1.1. Offshore pétrolier et gazier ..... 5

I.1.2. Offshore éolien ..... 8

I.1.3. Navigation maritime et fluviale ..... 9

I.1.4. Bouées ..... 12

I.1.4.1. Bouées de signalisation maritime ..... 13

I.1.4.2. Bouées d'amarrage ..... 15

I.1.4.3. Bouées scientifiques ..... 16

I.1.5. Pontons flottants ..... 17

I.2. CHAÎNES D'ANCRAGE ..... 19

I.2.1. Utilisation des chaînes dans les lignes d'ancrage ..... 19

I.2.2. Caractéristiques des chaînes d'ancrage ..... 21

I.2.2.1. Géométrie et fabrication ..... 21

I.2.2.2. Matériaux et propriétés mécaniques ..... 24
I.2.2.3. Charges d'épreuve et de rupture ..... 26
I.2.3. Dimensionnement et défaillances des chaînes d'ancrage ..... 29
I.2.3.1. Chargements excessifs ..... 30
I.2.3.2. Fatigue en traction simple ..... 33
I.2.3.3. Moments hors plan (In-Plane / Out-of-Plane Bending – IPB/OPB) ..... 35
I.2.3.4. Torsion des chaînes ..... 36
I.2.3.5. Corrosion ..... 39
I.2.3.6. Usure des chaînes ..... 46
I.2.4. Contrôle des chaînes d'ancrage ..... 50
I.3. GÉOMÉTRIES TRIDIMENSIONNELLES DES MAILLES ..... 53
I.3.1. Perspectives attendues ..... 53
I.3.2. Moyens et méthodes d'acquisition des images 3D ..... 56
I.3.2.1. Scanners 3D - généralités ..... 56
I.3.2.2. Scanner utilisé dans cette étude ..... 63
I.3.2.3. Méthodes d'acquisition et de post-traitement ..... 65
I.4. CONCLUSION ..... 72
I.4.1. Perspectives générales attendues ..... 72
I.4.2. Identification des pertes de matière ..... 73
I.4.3. Problématique générale ..... 74
**Chapitre II. REGISTRATIONS - État de l'art ..... 77**
II.1. PRÉAMBULE ..... 77
II.1.1. Objectif ..... 77
II.1.2. Un nombre de publications important ..... 78
II.1.3. Organisation de la bibliographie ..... 80
II.2. PROBLÈMES DE PROCRUSTE ..... 80
II.2.1. Procruste, le mythe ..... 80
II.2.2. Formulations du problème de Procruste ..... 81
II.2.2.1. Formulation générique ..... 81
II.2.2.2. Formulation adaptée à la registration ..... 82
II.2.3. Problème de Procruste orthogonal ..... 83

II.2.4. Problème de Procruste orthogonal et rotatoire ..... 85
II.2.5. Problème de Procruste orthogonal étendu ..... 85
II.3. ALIGNEMENTS APPROXIMATIFS ..... 86
II.3.1. Alignements « manuels » ..... 87
II.3.2. Signature sphérique des points ..... 88
II.3.3. Analyse en composantes principales (ACP) ..... 90
II.3.4. Courbures principales ..... 92
II.3.5. Variation de surface ..... 94
II.3.6. Spin-image ..... 95
II.4. ALIGNEMENTS FINS : MÉTHODE ICP ..... 97
II.4.1. Présentation générale de l'algorithme ..... 98
II.4.2. ICP - Étape 1 : sélection des points de contrôle ..... 102
II.4.2.1. Taille de l'échantillon ..... 102
II.4.2.2. Méthodes d'échantillonnage ..... 102
II.4.3. ICP - Étape 2 : recherche des correspondances ..... 106
II.4.3.1. Préambule ..... 106
II.4.3.2. Point le plus proche ..... 106
II.4.3.3. Projection normale ..... 108
II.4.3.4. Vecteur-caractéristique le plus proche ..... 109
II.4.4. ICP - Étape 3 : pondération / rejet ..... 112
II.4.4.1. Mise en équation du problème général ..... 113
II.4.4.2. Résolution pour les transformations rigides ..... 113
II.4.4.3. Choix des pondérations ..... 117
II.4.5. ICP - Étape 4 : définition des fonctions-objectif ..... 120
II.4.5.1. Distance point-point ..... 120
II.4.5.2. Distance point-plan ..... 120
II.4.6. ICP - Étape 5 : transformations géométriques ..... 122
II.4.6.1. Utilisation des quaternions ..... 122
II.4.6.2. Utilisation des coordonnées homogènes ..... 124
II.4.7. ICP - Étape 6 : test de convergence ..... 127
II.5. CONCLUSION ..... 129

**Chapitre III. CALCULS DE DISTANCES - Distances point / nuage de points ..... 131**

III.1. INTRODUCTION ..... 131
III.1.1. Distances point / nuage de points ..... 131
III.1.2. Configurations matérielles et librairie ..... 133
III.2. DISTANCE POINT-POINT ..... 133
III.2.1. Description de la méthode point-point ..... 133
III.2.2. Tests de la méthode point-point ..... 134
III.3. UTILISATION DE LISSAGE LOCAL ..... 135
III.3.1. Description de la méthode ..... 135
III.3.2. Tests de la méthode ..... 139
III.3.2.1. Application sur une sphère ..... 139
III.3.2.2. Applications sur des mailles ..... 140
III.3.3. Justification du paramétrage de la méthode ..... 143
III.3.3.1. Description des paramètres ..... 143
III.3.3.2. Test des paramètres ..... 143
III.4. MÉTHODE MIXTE ..... 146
III.4.1. Présentation ..... 146
III.4.2. Tests de la méthode ..... 148
III.5. DISCUSSION SUR LES MÉTHODES DE CALCUL DE DISTANCES. ..... 150
**Chapitre IV. REGISTRATIONS - Pièces usées et corrodées ..... 151**
IV.1. IMPLÉMENTATION DE LA REGISTRATION ..... 151
IV.1.1. Reprise du problème général ..... 151
IV.1.2. Détails de l'implémentation ..... 153
IV.1.3. Tests de la méthode ICP sur des mailles identiques ..... 156
IV.1.4. Discussion des résultats ..... 156
IV.2. APPLICATIONS SUR PIÈCES CORRODÉES ..... 158
IV.2.1. Tests de la méthode ICP sur des mailles corrodées. ..... 158
IV.2.2. Discussion des résultats ..... 159
IV.3. ADAPTATIONS POUR CORROSION GÉNÉRALISÉE ..... 160
IV.3.1. Description de la nouvelle méthode GC-ICP ..... 160
IV.3.2. Tests de la méthode GC-ICP ..... 162
IV.3.3. Discussion sur la méthode GC-ICP ..... 163

IV.4. ADAPTATIONS POUR CORROSION GÉNÉRALISÉE ET USURE ..... 164
IV.4.1. Description de la méthode WGC-ICP ..... 164
IV.4.2. Tests de la méthode WGC-ICP ..... 168
IV.4.3. Discussion sur la méthode WGC-ICP ..... 170
IV.5. OPTIMISATION DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON ..... 173
IV.5.1. Introduction ..... 173
IV.5.2. Tests réalisés ..... 173
IV.5.3. Résultats ..... 175
IV.5.4. Discussion ..... 178
**Chapitre V. APPLICATIONS DES METHODES - Cas réels ..... 179**
V.1. INTRODUCTION ..... 179
V.1.1. Objectifs ..... 179
V.1.2. Provenance des modèles 3D utilisés ..... 180
V.2. REGISTRATION DES MAILLES ..... 183
V.2.1. Description des tests réalisés ..... 183
V.2.2. Résultats des calculs ..... 184
V.2.3. Discussion des résultats ..... 189
V.3. EXEMPLES D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS ..... 190
V.3.1. Identification rigoureuse d'un repère local ..... 190
V.3.2. Observation des pertes de matière ..... 191
V.3.3. Détermination des zones usées dans le contact intermaille ..... 194
**CONCLUSION ET PERSPECTIVES ..... 197**
**BIBLIOGRAPHIE ..... 201**
**TABLE DES FIGURES ..... 213**
**TABLE DES TABLES ..... 225**
**ANNEXES ..... 229**

# INTRODUCTION

Les chaînes d'ancrage sont des dispositifs largement utilisés dans le domaine maritime. Elles permettent de lier les structures flottantes aux fonds marins afin de limiter les déplacements provoqués par les courants et les vents. Souvent associées à des textiles ou des câbles métalliques, elles possèdent les résistances mécaniques adaptées aux chargements extrêmes rencontrés dans ce type d'utilisation.

Les chaînes sont fabriquées en acier dont les caractéristiques sont contrôlées, et les produits obtenus sont testés à la rupture suivant des méthodologies normalisées. Si les résistances mécaniques globales des produits neufs sont maîtrisées, il est notable que celles-ci se réduisent progressivement du fait de la corrosion et de l'usure des mailles. En effet, les chaînes sont livrées la plupart du temps sans traitement efficace contre la corrosion, et l'action de celle-ci est particulièrement prononcée en environnement marin. De plus, la géométrie singulière du contact intermaille induit des pressions de contact importantes qui provoquent un phénomène d'usure / corrosion prononcé dans cette zone. Il résulte donc, de ces phénomènes, des pertes de matière significatives, principalement localisées dans les cintres (voir Annexe B), qui affectent nécessairement les résistances mécaniques initiales.

Le comportement mécanique des ancrages marins dépend de très nombreux paramètres. Si les simulations dynamiques sont aujourd'hui largement étudiées et connues, les modèles tribologiques associés restent peu développés. Par exemple, la cinétique des pertes de matière et les géométries des usures sont à ce jour difficiles à prédire. Les modèles temporels existants étant peu fiables, les dimensions des mailles de chaînes sont donc aujourd'hui contrôlées in situ et de manière régulière, par les services de maintenance des installations. Lors de la dernière décennie, plusieurs études ont recensé les cas de défaillances des lignes d'ancrage, ainsi que leurs origines. Parmi ces défaillances, l'usure intermaille a été identifiée comme un facteur majeur nécessitant de plus amples investigations.

Afin d'améliorer les connaissances sur le comportement tribologique du contact intermaille, il est au préalable nécessaire d'initier un travail sur les géométries tridimensionnelles d'usure de contact. Ce travail est envisagé par l'utilisation de scanners 3D optiques qui permettent d'effectuer des mesures non destructives. Les pertes de matière 3D sont obtenues après comparaison des géométries des mailles, avant et après séjour en milieu marin. Cette comparaison n'est possible qu'en superposant les géométries acquises. Cependant, les agressions physico-chimiques affectant l'intégralité de la surface des mailles métalliques, il n'existe donc plus de géométrie intacte, commune, qui pourrait permettre une superposition simple des modèles 3D.

La registration correspond au processus mathématique qui permet d'aligner des scans tridimensionnels ou des images 2D. Il existe de nombreux algorithmes de registration, et parmi ceux-ci, la méthode ICP « Itérative Closest Point » est l'algorithme le plus fréquemment utilisé et le plus documenté. Cependant, il sera démontré que cet algorithme est inefficace pour superposer les modèles 3D de mailles altérées par la corrosion et l'usure de contact. En conséquence, afin d'améliorer les connaissances sur les géométries tridimensionnelles des pertes de matière, il est proposé dans cet ouvrage de construire une nouvelle méthode de registration qui permet d'aligner les modèles 3D d'une maille de chaîne d'ancrage vieillie en mer.

Pour mener à bien cette étude, la première étape a été de réaliser un état des connaissances sur les chaînes d'ancrage et sur leurs utilisations. Outre la description de leurs usages dans différents domaines maritimes et de leurs caractéristiques géométriques et mécaniques, les modes de défaillances rencontrés ont été recensés, ainsi que les moyens de contrôle utilisés. Cette première partie recense les connaissances nécessaires à la bonne compréhension de la problématique générale de l'étude, et permet d'identifier les perspectives qui pourront être envisagées par la suite.

La seconde étape propose un état de l'art sur les méthodes de registration. À la suite de la description des différents problèmes de Procruste (orthogonal, orthogonal et rotatoire, orthogonal étendu), deux catégories d'alignements sont présentées : les alignements approximatifs et les alignements fins. Les alignements approximatifs se distinguent par la nature des correspondances utilisées et par la manière dont ces correspondances sont associées. Ces méthodes sont souvent appliquées pour déterminer une transformation peu précise, préalable nécessaire pour utiliser les algorithmes d'alignements fins. Parmi les alignements fins, la méthode ICP sera alors choisie comme méthode de référence, puis décrite de manière approfondie.

La troisième étape est un préalable nécessaire à l'implémentation de la méthode ICP : il est en effet indispensable de pouvoir mesurer des distances entre des modèles 3D et ceci avec une précision contrôlée. Trois méthodes sont alors proposées et évaluées : une méthode rapide, mais peu précise en cas de distances faibles, une méthode lente et précise qui utilise des lissages de surfaces, et enfin une méthode mixte qui allie les avantages des deux premières.

La suite du travail propose une implémentation de la méthode ICP qui sera tout d'abord testée sur des modèles 3D de mailles dont la géométrie est identique. Les résultats de ces tests montrent une bonne convergence du processus itératif et une précision des résultats suffisante au regard du contexte d'utilisation. L'implémentation est alors testée sur des mailles corrodées ayant perdu une épaisseur de matière constante sur l'intégralité de leur surface (corrosion généralisée). Les tests consistent à appliquer la méthode ICP classique entre les mailles corrodées et les mailles neuves associées (non corrodées). Les résultats montrant des défauts de convergence et de précision, il est alors envisagé de construire deux nouvelles méthodes de registration : une méthode nommée « GC-ICP » qui prend en compte la corrosion généralisée et une méthode nommée « WGC-ICP » qui prend en compte la corrosion généralisée, ainsi que les pertes de matière locales, dues, par exemple, à l'usure de contact. Ces nouvelles méthodes sont alors testées et validées sur des modèles 3D de mailles provenant de constructions CAO.

Les nouveaux processus d'alignement sont ensuite appliqués sur des scans de mailles réelles vieillies en mer. Ces mailles proviennent de chaînes immergées qui ont été relevées tous les ans environ. Il a ainsi été possible d'acquérir périodiquement des modèles 3D de nombreuses mailles, avec ou sans étai, coaltarées ou non. Les résultats associés aux nouveaux algorithmes montrent la pertinence de ceux-ci, en cas de mailles réelles, mais à condition que l'hypothèse de corrosion généralisée puisse être validée.

Pour finir, il est proposé différentes applications des méthodes développées : construction de repères locaux précis, colorisation de la répartition spatiale des pertes de matière, sections paramétrées de scans dans le but d'identifier des modèles géométriques d'usures, et identifications des surfaces usées dans le contact intermaille. Ces dernières applications correspondent à des étapes utiles pour ouvrir les diverses perspectives d'études qui ont été identifiées initialement.

Chapitre I.

# CHAÎNES D'ANCRAGE - État de l'art et perspectives

## I.1. ANCRAGE DES DISPOSITIFS FLOTTANTS

L'ancrage des équipements flottants revêt la plus haute importance dans le domaine maritime, que ce soit pour les plates-formes offshore, les navires, les bouées, les pontons, les ponts ou encore les installations aquacoles. L'ancrage permet la liaison du dispositif flottant avec un ou plusieurs points fixes liés au fond marin afin de résister à des conditions météorologiques et océaniques variables. Cet aspect crucial de la conception des équipements implantés en mer garantit leur sécurité et leur efficacité opérationnelle. Différentes architectures de lignes d'ancrage sont utilisées en fonction des usages, dont certains d'entre eux seront exposés ci-dessous.

### I.1.1. Offshore pétrolier et gazier

Dans le domaine pétrolier et gazier, le contexte actuel de pénurie d'énergie et de réchauffement climatique induit un développement paradoxal de nouvelles unités d'exploitation offshore. La raréfaction des énergies fossiles engendre une recherche de nouveaux gisements dans des eaux de plus en plus profondes (voir Figure I-1), sans possibilité de liaison rigide entre les équipements de surface et la croûte océanique. Nécessairement flottants, ces équipements requièrent d'être maintenus en position par des lignes d'ancrage robustes afin d'éviter une dérive provoquée par les vagues, les courants marins et les conditions météorologiques.

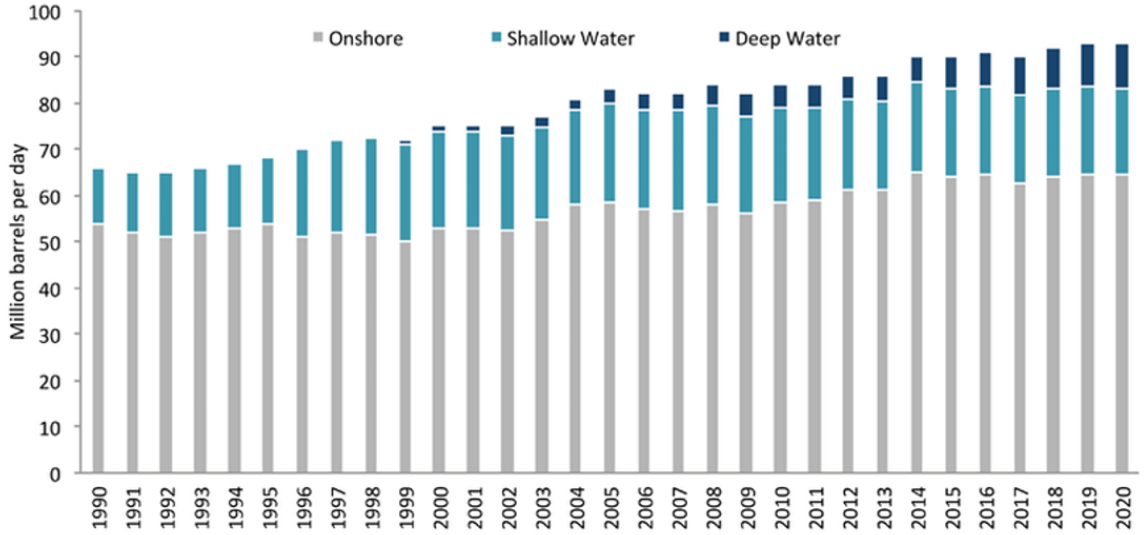
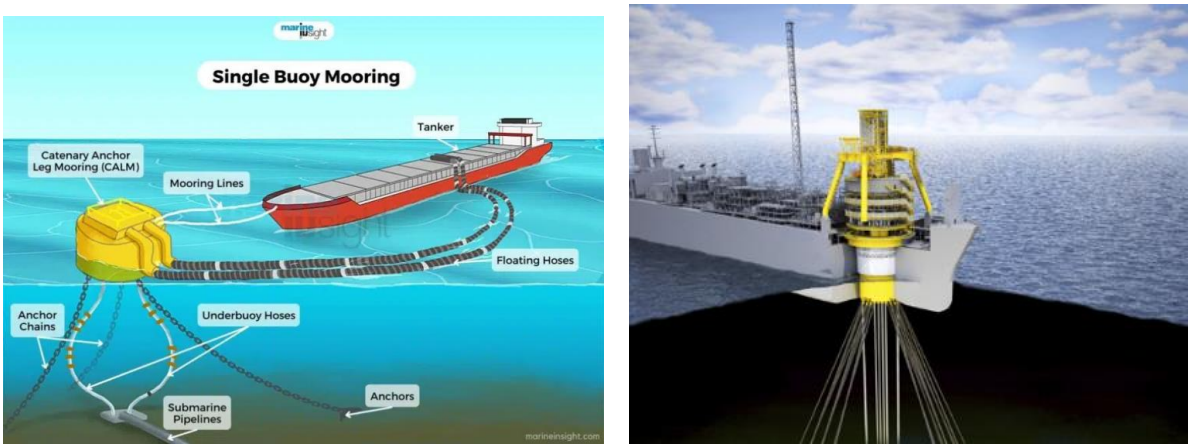



*Figure I-1 - Production mondiale de pétrole brut. Diagramme permettant la comparaison de la production onshore en gris, offshore peu profond en bleu clair ($< 100\ m$) et offshore profond en bleu foncé ($\geq 100\ m$) (Harris, 2016).*

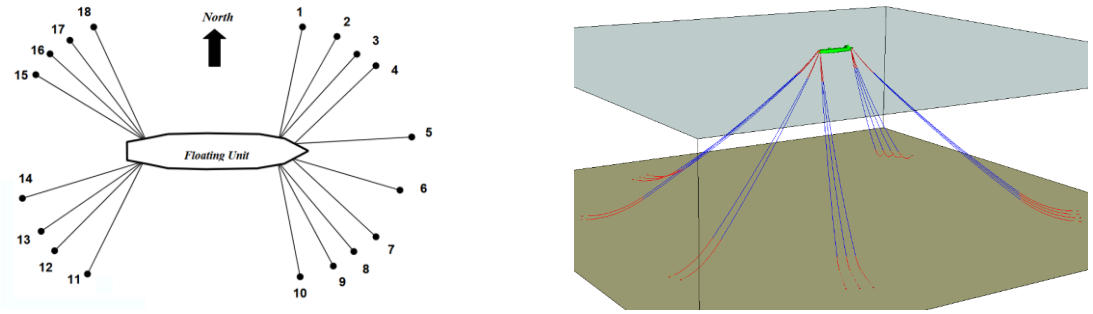
Les architectures des ancrages utilisés se distinguent en deux catégories principales : les ancrages à point unique et les ancrages multipoints. Dans le premier cas, le dispositif flottant est relié à un seul point de fixation attaché au fond marin par plusieurs lignes d'ancrage. Cette configuration permet au dispositif flottant de s'orienter face aux actions mécaniques dominantes de l'environnement. Le point de fixation peut être une bouée externe possédant une mobilité en rotation, ou peut être un touret directement intégré au système de production (voir Figure I-2 (a) et (b)).




(a) (b)

*Figure I-2 – Ancrages à point unique : (a) ancrage avec bouée externe (Raunek, 2019), (b) ancrage avec touret interne (SBM Offshore, 2016).*

Le second cas, « multipoint » ou « spread mooring », est le procédé traditionnel qui permet de réaliser un ancrage. Plusieurs lignes relient ainsi directement le dispositif flottant avec le fond marin (voir Figure I-3 (a) et (b)). Du fait de la position des points de fixation (principalement à la poupe et à la proue) et de l'orientation des lignes autour du navire, ce second mode d'ancrage impose au dispositif flottant une direction fixe ou très peu variable. Ceci implique une prédominance directionnelle des actions mécaniques exercées par l'environnement.




(a) (b)

*Figure I-3 - Ancrage multipoint, 18 lignes (Carbono et al., 2005) : (a) représentation de la répartition angulaire, (b) représentation 3D de l'ancrage.*

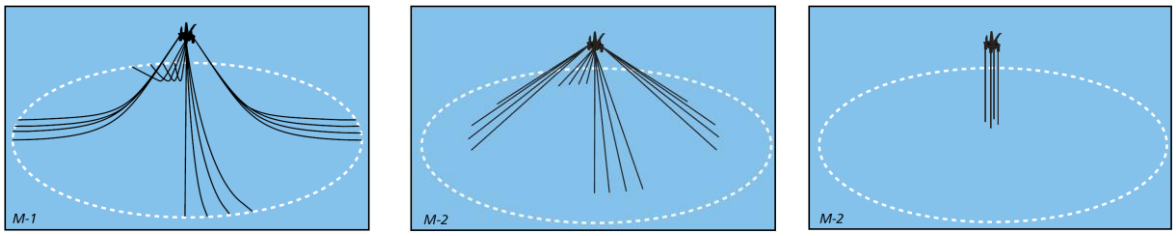
Deux familles de lignes d'ancrage peuvent être utilisées pour la construction des architectures précédentes : les lignes caténaires et les lignes tendues.

**Le système caténaire** est le plus répandu et le plus ancien (voir Figure I-4 (a)). Souvent constitué de chaînes, il induit une force de maintien en position engendrée par le poids important de la masse suspendue. Une partie de la ligne reposant horizontalement sur le fond marin, sa longueur totale est relativement longue par rapport à la hauteur d'eau, et l'ancre traînante conventionnelle associée ne transmet qu'une charge horizontale. Lorsque l'unité flottante est soumise à des charges environnementales variables, son mouvement provoque un soulèvement et un abaissement de la ligne sur le fond marin. Ceci engendre une force de rappel complémentaire qui ramène l'unité en position. En cas de profondeur d'eau importante (plus de 100 m), le poids de la chaîne devient excessif par rapport à la flottabilité de l'unité offshore. Afin de réduire le poids, tout en conservant un effet de rappel, les lignes d'ancrage sont alors constituées d'assemblages variés de portion de chaînes, de câbles métalliques ou de câbles textiles. En eaux profondes, les systèmes à lignes tendues sont néanmoins plus rentables.

**Les systèmes à lignes tendues** sont composés de câbles métalliques ou textiles qui sont tendus entre l'unité offshore et le fond marin. L'angle est souvent compris entre 30 et 45° (voir Figure I-4 (b)). Les points d'ancrage avec le fond marin étant soumis à des charges verticales et horizontales, les technologies de liaison diffèrent de celles utilisées pour les lignes caténaires. Il s'agit alors, par exemple, de pieux à aspiration ou d'ancres torpilles. Le poids net immergé des lignes tendues étant faible, l'effet de rappel caténaire devient négligeable. Cette action

mécanique nécessaire est alors assurée par l'élasticité des câbles qui doit être suffisante (p. ex. polyester pour les câbles textiles). Les TLP « Tension Leg Platform » correspondent à un cas particulier des systèmes d'ancrage à lignes tendues : elles sont verticales (voir Figure I-4 (c)). Dans ce cas, la poussée d'Archimède est supérieure au poids du dispositif, et la différence de charge est reprise par les lignes d'ancrage.

Ces différentes lignes d'ancrages sont conçues pour une durée de vie souvent identique à celle du dispositif amarré : jusqu'à 30 ans en fonction du potentiel d'extraction du champ d'énergie fossile. Les différents composants des lignes d'ancrage sont sélectionnés en fonction de nombreux paramètres : profondeur d'eau, courant, houle, glace, vent, propriétés géologiques du fond marin, nature des équipements de surface, méthode d'installation, condition de démantèlement, etc.




(a) (b) (c)

*Figure I-4 – Lignes d'ancrage (Vryhof Anchors, 2015) : (a) ancrage caténaire, (b) ancrage tendu à 45°, (c) Tension Leg Platform.*

## I.1.2. Offshore éolien

Dans le domaine de la production d'énergie décarbonée, l'augmentation de la part des implantations offshore (voir Figure I-5) est liée à plusieurs facteurs, comme la rentabilité des vents qui y sont présents, la taille des surfaces nécessaires, mais aussi la récurrente opposition des riverains pour les projets d'installations à terre. Le maintien en position des éoliennes offshore peut être assuré de deux manières différentes : dispositif dit « posé », c'est-à-dire lié rigidement au fond marin (exemple en Figure I-6 (a)) ou dispositif dit « flottant » (exemple en Figure I-6 (b)), c'est-à-dire sans liaison rigide. La première solution est économiquement adaptée pour des eaux peu profondes, inférieures à 50 m. La seconde permet des installations plus au large, ce qui augmente la quantité de sites appropriés pour implanter des fermes éoliennes, améliore les rendements du fait de la qualité des vents, et limite l'impact visuel. Dans ce second cas, les dispositifs flottants de production d'énergie éolienne sont liés au fond marin par des lignes d'ancrage dont les caractéristiques sont souvent basées sur l'expérience industrielle de l'industrie pétrolière.

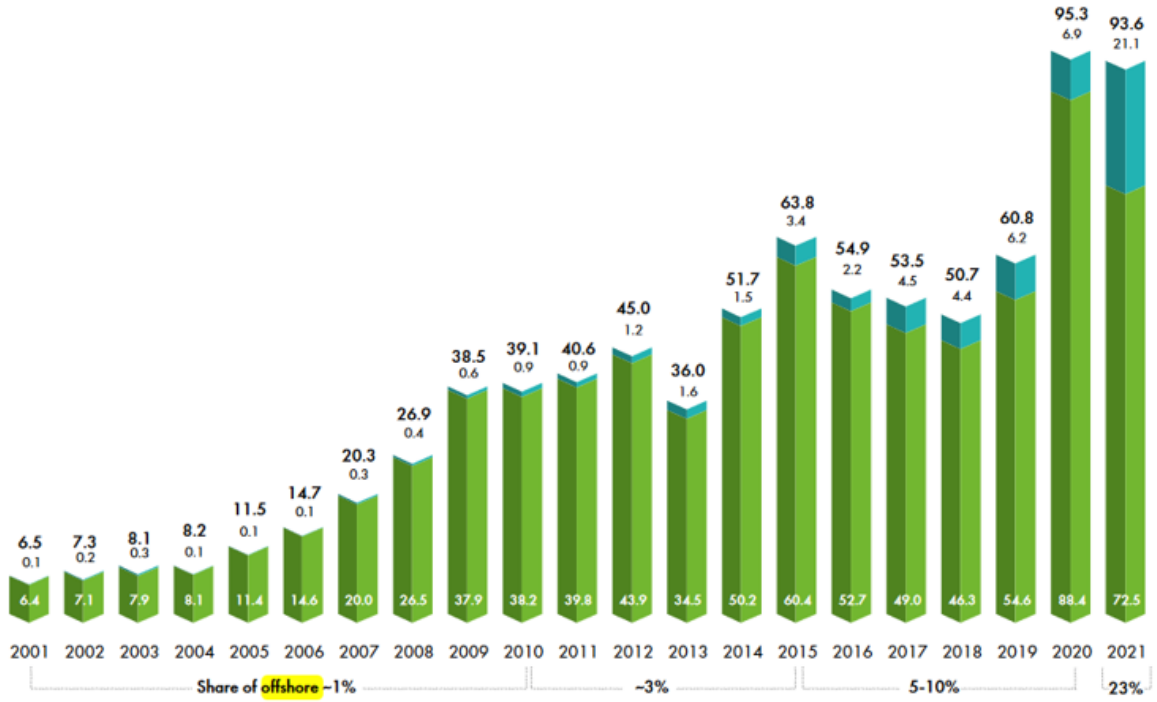
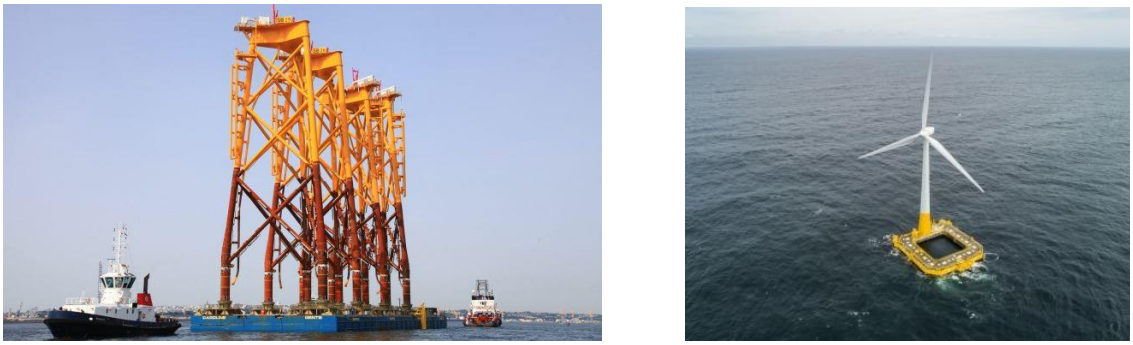



*Figure I-5 - Évolution historique des nouvelles installations éoliennes mondiales (en GW), onshore en vert, offshore en bleu (Global Wind Energy Council, 2022).*



(a) (b)

*Figure I-6 – Maintiens en position des éoliennes : (a) fondation de type "jacket" en baie de Saint-Brieuc - France (Ailes Marines, 2022), (b) Floatgen, projet de démonstrateur d'éolien flottant au large du Croisic - France (Floatgen, 2019).*

## I.1.3. Navigation maritime et fluviale

Dans le domaine de la navigation maritime et fluviale, les navires sont équipés de liens qui leur permettent de se tenir immobiles à un endroit spécifique. Dans les ports, les navires sont liés aux quais par des haussières (voir Figure I-7 (a)) qui sont des cordages textiles dédiés. En dehors des ports, en eaux peu profondes, les navires sont reliés au fond de la mer par des lignes de mouillage associées à des ancres. Au contraire des installations flottantes offshore, ces lignes de mouillage sont mises en place de manière temporaire, elles doivent donc pouvoir être

installées et remontées simplement. À cet effet, des apparaux spécifiques sont prévus à bords. Ainsi les guindeaux (voir Figure I-7 (b)), associés à des barbotins (noix permettant l'enroulement des chaînes), permettent de remonter les chaînes à travers les écubiers, vers les puits à chaînes assurant le stockage. Les ancres, quant à elles, restent souvent immobilisées contre le bordé du navire.



(a) (b)

*Figure I-7 – Spécificités des amarrages : (a) haussières du porte-avions « Charles de Gaule » dans le port de Toulon (Var-matin, 2023), (b) guindeaux et barbotins (Boop, 2024).*

Dans le cas de navires à fort tonnage, plusieurs lignes de mouillage sont nécessaires. Celles-ci sont principalement composées de chaînes métalliques et d'ancres (voir Figure I-8 (a) et (b)). Une chaîne se divise en chaînons de 30 m environ appelés « maillons ». Ceux-ci sont assemblés entre eux par différents organes métalliques éventuellement démontables (émerillons, manilles, mailles Kenter, etc.) (voir Figure I-9). Chaque maillon est composé d'anneaux d'acier imbriqués deux à deux. Ces anneaux qui sont appelés « mailles » sont les composants élémentaires d'une chaîne. Dans le vocabulaire courant, la maille est souvent confondue avec le maillon. Dans le domaine maritime, la désignation est strictement respectée (Van Campenhoudt, 1997).



(a) (b)

*Figure I-8 – Mouillages des navires : (a) ligne de mouillage du porte-avions « Charles de Gaule » (Marit, 2024), (b) ancre du cuirassé Courbet (Musée mémorial de Camaret, 2024).*

Les ancres sont des dispositifs embarqués qui permettent d'assurer une liaison amovible avec le fond marin. Du fait de la nécessité de pouvoir décoller celles-ci verticalement lors des opérations de relevage, l'action mécanique transmissible entre une ancre conventionnelle et le fond marin est nécessairement horizontale. Ceci implique une architecture de ligne de type caténaire (voir I.1.1) qui nécessite une longueur de chaîne importante, environ 5 fois la hauteur d'eau (voir Figure I-10). La masse de la chaîne associée devient alors plus importante que celle de l'ancre utilisée. À titre d'exemple, la ligne de mouillage du porte-avions « Charles de Gaule » est composée de 10 maillons de 30 m, liés à une ancre de 12 tonnes. La masse totale de cette ligne de mouillage atteint les 80 tonnes, soit 68 tonnes de chaînes pour 300 m de longueur de ligne.

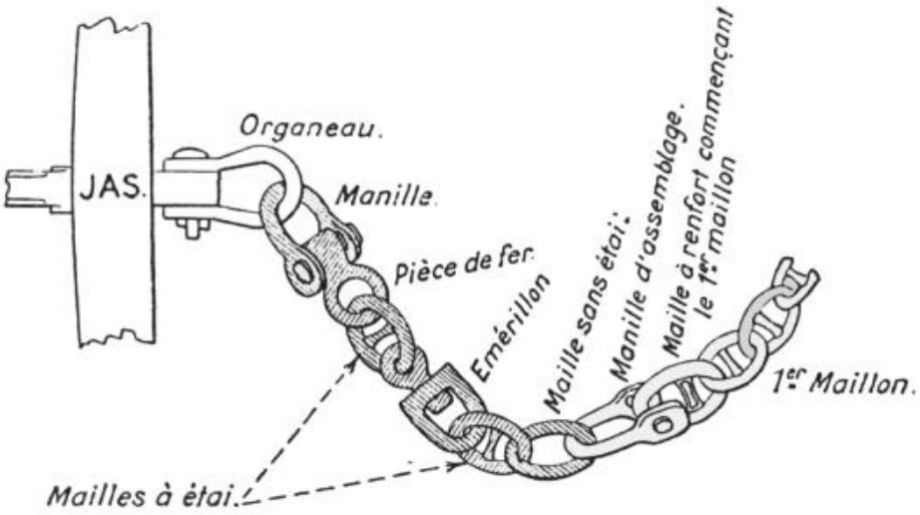



*Figure I-9 – Illustration d'un bas de ligne de mouillage et vocabulaire associé (Massenet et al., 1911).*

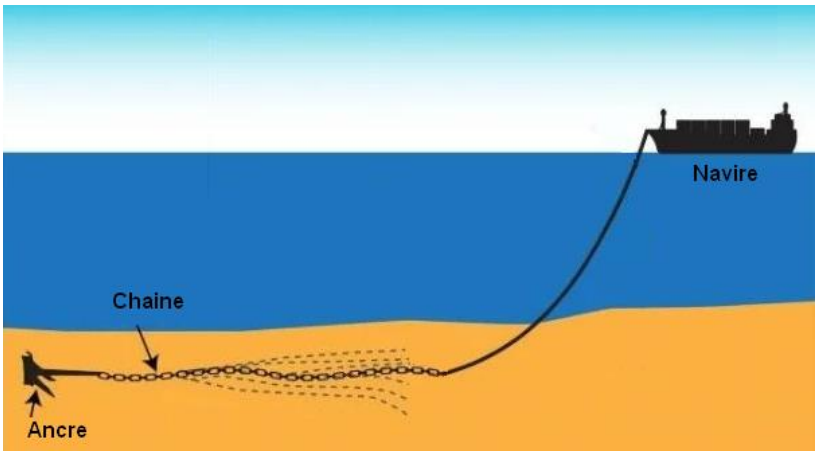



*Figure I-10 – Schéma de principe d'une ligne de type caténaire pour un mouillage de navire. La direction de la chaîne est tangentielle au fond marin, à proximité de l'ancre (Watson et al., 2022).*

Dans le cas des navires à faible tonnage (p. ex. bateaux de plaisance), les lignes de mouillage sont associées à des contraintes mécaniques moins importantes (quelques dizaines de kilogrammes pour les ancres). Il devient alors possible d'utiliser des textiles en remplacement des chaînes (p. ex. polyamide – Nylon ®). Certains textiles peuvent cependant être sensibles aux frottements engendrés par les glissements dans les chaumards et les poulies, ou au ragage avec le fond marin. De ce fait, des gaines textiles de protection aptes au frottement (p. ex. polyester ou polyéthylène à haut module – Dyneema ®) protègent l'âme résistante (voir Figure I-11 (a)), et des chaînes métalliques assurent le contact avec le fond marin (voir Figure I-11(b)).



(a) (b)

*Figure I-11 – Mouillage des navires à faible tonnage : (a) cordage, âme Dyneema® et gaine Polyester (Ino-Rope, 2024), (b) ligne de mouillage complète de marque 4Water®, ancre, chaîne et textile polyester sans gaine (Forwater, 2024).*

## I.1.4. Bouées

Les bouées sont des dispositifs nautiques dont la fonction principale est de générer une poussée d'Archimède importante pour une masse réduite. Principalement flottantes, elles peuvent aussi être totalement immergées afin d'assurer, de manière permanente, une poussée verticale tendant à ramener le dispositif associé vers la surface. Par exemple, une bouée subsurface associée à une ligne d'ancrage permettra de diminuer la tension sur la ligne et changera la forme de la caténaire. Les bouées flottantes sont utilisées pour diverses fonctions, comme la signalisation maritime, l'amarrage de navires ou l'étude océanographique et météorologique. En fonction des usages, différentes architectures de lignes d'ancrage sont utilisées. Certaines d'entre elles seront décrites ci-après.

### I.1.4.1. Bouées de signalisation maritime

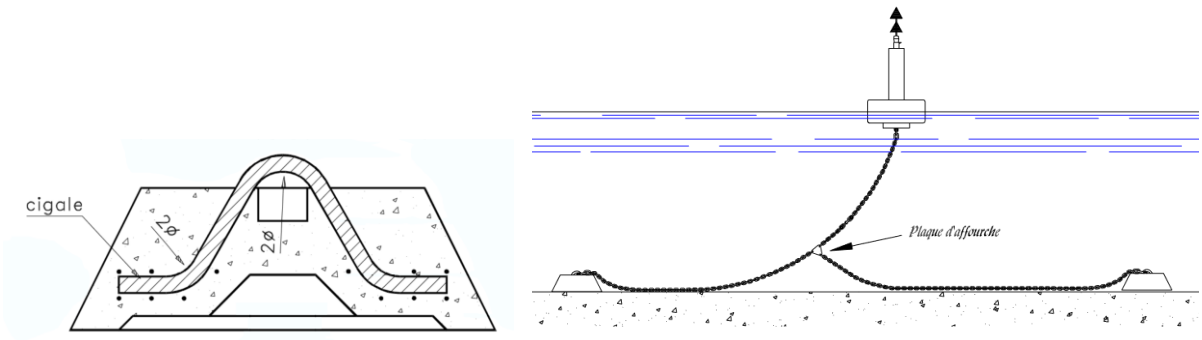
Dans le domaine de la signalisation maritime, les bouées flottantes sont appelées « balises ». Elles sont équipées de signaux visuels et sonores qui transmettent aux marins diverses informations permettant une navigation sécurisée (voir Figure I-12 (a) et (b)).



(a) (b)

*Figure I-12 – Bouées de signalisation maritime (Kraif, 2024) : (a) bouée cardinale, (b) bouée de signalisation latérale.*

Principalement situées sur le bord des côtes, ces balises possèdent des ancrages peu profonds, souvent inférieurs à 100 m de hauteur d'eau. Du fait de cette hauteur modérée, les lignes d'ancrage sont très majoritairement constituées de chaînes qui sont associées à des corps-morts en béton, en fonte, ou autres matières denses. Les ancres qui peuvent déraper lors des changements de marées sont peu adaptées à la nécessité d'un positionnement permanent des balises. Les corps-morts transmettent des actions mécaniques horizontales par frottement, mais aussi verticales par gravité et par effet ventouse sur les fonds sableux et vaseux. À cet effet, une réservation peut être prévue sur la face inférieure de ceux-ci (voir Figure I-13(a)). À la différence d'un mouillage de navire (voir I.1.3) dont la longueur de ligne avoisine 5 fois la hauteur d'eau, la possibilité de transmission de charge verticale du corps-mort permet un raccourcissement de la ligne à 3 fois la hauteur d'eau (en première approche). Ceci induit un déplacement de la balise dans un cercle de rayon plus réduit. Afin d'améliorer la précision de la localisation, la diminution de ce rayon, nommé « rayon d'évitage », peut être accentuée par l'immersion de deux corps-morts pour constituer ainsi un mouillage multiligne appelé « affourchage » (voir Figure I-13(b)).




(a) (b)

*Figure I-13 – Détails de corps-morts (CEREMA, 1997) : (a) corps-mort en béton avec sa tige scellée de liaison (cigale) et sa réservation pour améliorer l'effet ventouse, (b) ancrage multiligne (affourchage) permettant la diminution du rayon d'évitage.*

Les lignes utilisées pour l'ancrage des balises de signalisation maritime sont composées de l'assemblage de chaînes dont les caractéristiques diffèrent en fonction de leur position sur la ligne. Ainsi la chaîne dormante est liée au corps-mort, elle s'use essentiellement par ragage sur le fond marin. Vient ensuite la chaîne de marnage qui est soumise au pilonnement dû à la houle, puis la chaîne flottante et enfin la chaîne liée au cul de bouée. Le choix d'utilisation de chacune de ces chaînes est défini en fonction de la hauteur d'eau associée au balisage (voir Figure I-14).

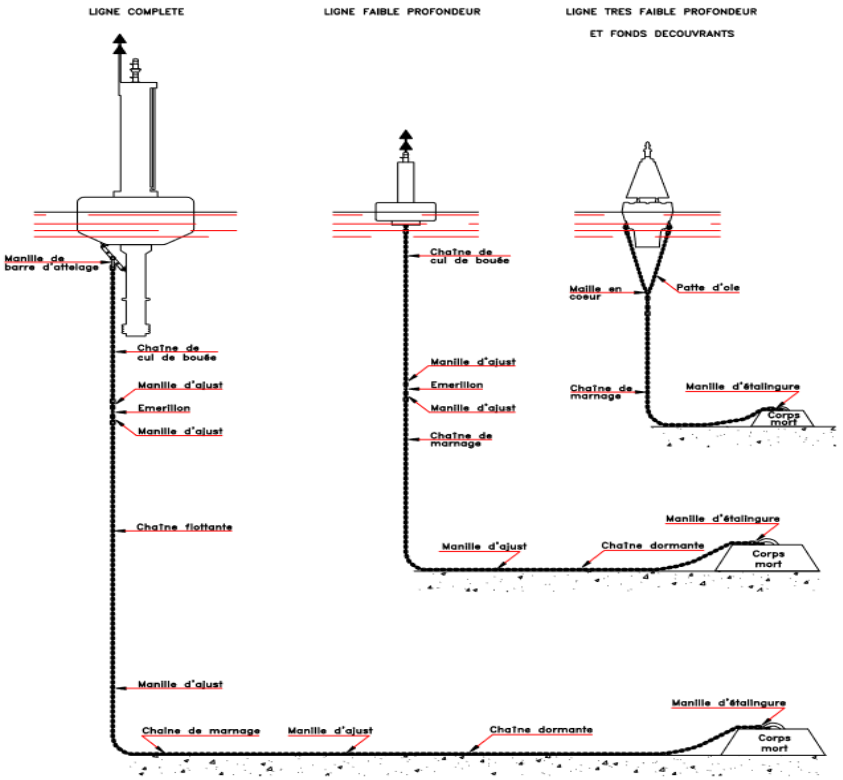



*Figure I-14 - Fractionnement des lignes de mouillage (CEREMA, 1997).*

### I.1.4.2. Bouées d'amarrage

Le cas de l'amarrage des navires rejoint la typologie d'ancrage à point unique utilisée dans le domaine offshore (voir I.1.1) : le navire n'est pas directement lié au fond marin par ses propres lignes de mouillage, il est lié par ses amarres à une (voir Figure I-15(a)) ou plusieurs (voir Figure I-15(b)) bouées flottantes qui, elles, possèdent des lignes d'ancrage. Les bouées dont la fonction est l'amarrage de navire sont appelées « coffres d'amarrage ». Leurs lignes d'ancrage sont principalement constituées de chaînes et de corps-morts, du fait des faibles profondeurs d'utilisation (voir Figure I-16 (a) et (b)). Notons que ce type d'amarrage est aussi utilisé pour des navires à faible tonnage (p. ex. navires de plaisance). Dans ce cas, les bouées ne sont plus appelées des « coffres », mais sont appelées « bouées de mouillage » que l'on trouve en grande quantité dans les ports de plaisance.



(a) (b)

*Figure I-15 – Bouées d'amarrage. (a) L'abeille Bourbon en alerte pour la surveillance du rail d'Ouessant (29). Le remorqueur est amarré sur un coffre situé devant le port du Stiff (Lukomoliox, 2020). (b) Cimetière des bateaux de Landévennec (29). Les unités désarmées sont amarrées dans le sens du courant par deux coffres d'amarrage (Ouest-France, 2021).*




(a) (b)

*Figure I-16 - (a) et (b) Coffre d'amarrage destiné à la Marine nationale française. Un puit à chaîne traversant permet de lier directement l'amarre du navire à la chaîne d'ancrage. La flottabilité nette de ce type de bouées peut atteindre 40 tonnes (Océan 3, 2024).*

### I.1.4.3. Bouées scientifiques

Certaines bouées sont utilisées pour des applications scientifiques spécifiques, par exemple, l'étude océanographique ou météorologique. Ces bouées sont équipées de nombreux capteurs aériens et/ou sous-marins qui récoltent diverses mesures transmises par voie satellitaire (vitesse du vent, température, pression atmosphérique, accélérations liées à la présence de houle…). Dans certains cas, ces bouées nécessitent d'être localisées dans des zones où les fonds marins atteignent des profondeurs importantes. Par exemple, les bouées « Antilles1 » (voir Figure I-17) et « Antilles2 », exploitées par Météo France, sont positionnées respectivement à 350 km de la Guadeloupe et à 500 km de la Martinique. Les profondeurs d'eau atteignent 5500 m. Les lignes d'ancrage utilisées étant de longueurs très importantes, l'usage de chaînes sur l'intégralité de cette longueur est exclu. Les chaînes sont utilisées uniquement aux extrémités. La partie centrale (la plus longue) est alors composée de câbles textiles en Nylon® et en polypropylène (voir Figure I-18 et Figure I-19).

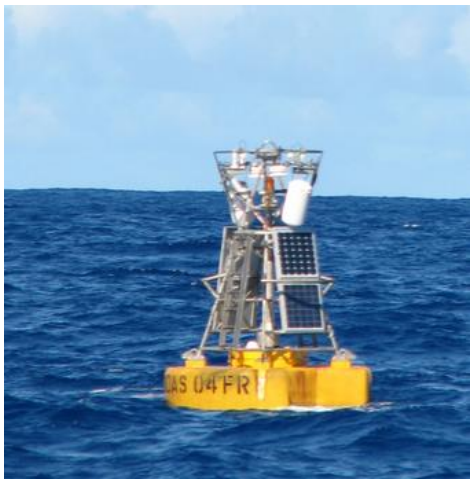


*Figure I-17 - Bouée météorologique « Antilles 1 », mer des Caraïbes, profondeur 5500 m environ (Météo France, 2022).*



*Figure I-18 - Cosse de liaison entre la chaîne d'extrémité et la corde en Nylon® de l'ancrage de la bouée météorologique « Antilles 2 ». Photo prise au Centre de Météorologie Marine de Brest (CMM).*

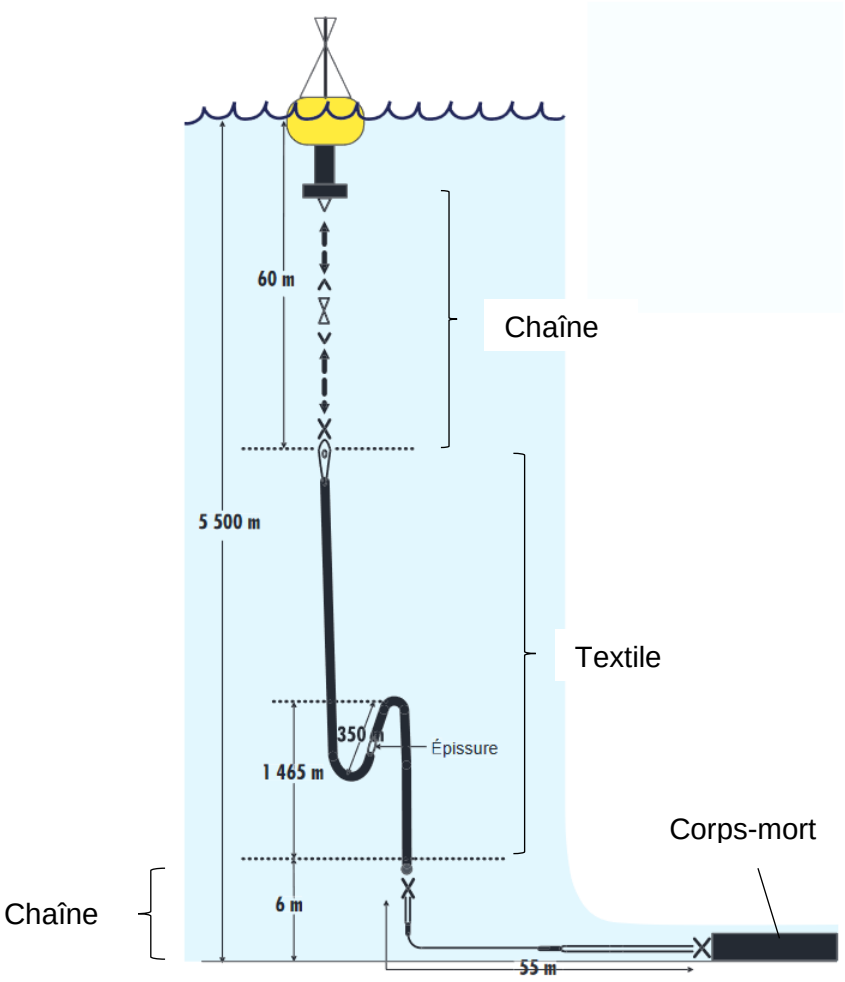



*Figure I-19 – Caractéristiques des bouées météorologiques Antilles1 et 2 : corps-mort de 1,5 tonne, 55 m de chaînes en cul de bouée, 55 m de chaînes en bas de ligne, 4500 m de Nylon®, 1640 m de polypropylène (Rolland and Blouch, 2002).*

## I.1.5. Pontons flottants

De nombreux dispositifs flottants situés à proximité des côtes, ou au sein même des ports, permettent d'amarrer les navires et facilitent l'accès à la mer pour les usagers. Contrairement aux quais fixes, la construction de dispositifs flottants garantit une possibilité d'usage, quelle que soit la hauteur d'eau. De plus, la flottaison de ces dispositifs limite les risques de dommages sur les navires, car la longueur d'amarrage varie nécessairement en fonction de la marée dans le cas des quais fixes.

Les pontons flottants sont donc très utilisés dans toutes les infrastructures portuaires, pour la plaisance, la pêche, le commerce et les usages militaires. Souvent reliés à des passerelles d'accès, les pontons sont maintenus en position par des pieux le long desquels ils peuvent glisser en fonction de la marée. De manière plus économique, ou en présence de hauteurs d'eau plus

importantes, ils sont fixés au fond de la mer par des chaînes ou des câbles associés à des corps-morts (voir Figure I-20).

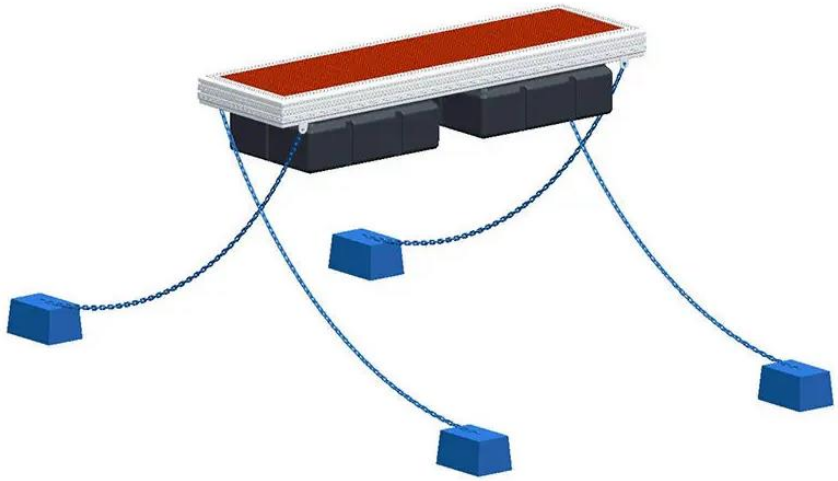


*Figure I-20 - Ponton flottant modulaire positionné sur ancrages par chaînes et corps-mort (Hong Kong Horizon Marine Industry, 2024).*

Dans le cas où le tonnage des navires deviendrait très important, les solutions constructives évoluent vers des pontons flottants aux caractéristiques spécifiques. Ainsi, les frégates multimissions de la Marine nationale française sont amarrées dans le port de Brest sur des pontons flottants en béton pesant 10 000 tonnes et mesurant 160 m de long, 17 m de largeur et 8 m de hauteur (voir Figure I-21). Ces pontons sont reliés au quai et au musoir (extrémité fixe, immergée) par des chaînes de fortes capacités qui sont munies d'amortisseurs permettant de limiter les chocs en cas de sollicitations extrêmes.



*Figure I-21 - Ponton d'accostage pour les frégates multimissions de la base navale de Brest. Les chaînes d'amarrage (au premier plan) sont munies d'amortisseurs et relient le ponton au quai. (Charier, 2022).*

# I.2. CHAÎNES D'ANCRAGE

## I.2.1. Utilisation des chaînes dans les lignes d'ancrage

Les lignes d'ancrage permettent de limiter les mouvements des dispositifs flottants. Ces systèmes de liaison avec le fond marin sont très largement utilisés dans le domaine maritime (voir I.1). Simples ou multiples, tendues ou caténaires, les architectures des lignes d'ancrage sont variées et choisies en fonction des contextes d'utilisation. Leurs compositions sont souvent mixtes, assemblages hétéroclites de câbles métalliques ou textiles, de chaînes, de bouées subsurfaces, de lests, de manilles et autres émerillons… Chaque élément est choisi afin de répondre aux diverses contraintes à assurer.

Les chaînes sont très souvent utilisées dans la composition des lignes d'ancrage, que ce soit en totalité sur la ligne, ou partiellement. Le choix des chaînes est réalisé en tenant compte des avantages et inconvénients intrinsèques qu'elles possèdent. Ceux-ci sont identifiés dans la Table 1 ci-dessous.

*Table 1 - Avantages et inconvénients de l'utilisation des chaînes d'ancrage.*

| **Avantages** | **Inconvénients** |
|---|---|
| Charge de rupture importante | Corrosion significative |
| Très bonne résistance au ragage, par rapport aux capacités des câbles métalliques et textiles | Usure interne : perte de matière progressive au contact entre les mailles |
| Masse : elle est considérée comme un avantage dans le cas des lignes caténaires de faible profondeur (<100 m). | Masse : elle est considérée comme un inconvénient dans le cas de ligne d'ancrage de grande profondeur. |
| Pas de fluage significatif | Possibilité de rupture par fatigue |
| Rigidité importante | |
| Stockage aisé | |
| Coût modéré | |
| Matériau recyclable | |

La masse linéique des chaînes peut être considérée comme un désavantage important. En effet, en eaux profondes, il n'est pas envisageable de concevoir une ligne uniquement composée de chaînes, car la masse totale induite est alors incompatible avec la flottabilité des dispositifs installés en surface. A contrario, en eaux peu profondes, les chaînes sont fréquemment utilisées sur la totalité des lignes d'ancrage. Tel est le cas, par exemple, pour les lignes de mouillages des navires (voir I.1.3), ou les ancrages des bouées de signalisation maritime (voir I.1.4).

Lorsque les installations flottantes sont situées en eaux profondes, l'usage des câbles textiles devient indispensable. Cependant, il est rarement envisageable de concevoir une ligne uniquement composée de câbles textiles pour deux raisons. D'une part leur flottabilité (souvent positive) induit une interaction dangereuse avec les dispositifs de surface, et d'autre part leur sensibilité à l'abrasion proscrit leur utilisation dans la zone de contact avec le fond de la mer. L'utilisation des câbles textiles pour les grandes profondeurs implique donc usuellement l'ajout de chaînes aux extrémités (voir Figure I-22). Celle de surface permet de faire plonger le câble textile profondément et résiste aux interactions potentielles avec les dispositifs de surface. Celle positionnée au fond de la mer permet à la ligne d'ancrage de résister au ragage avec la croûte océanique.

En conséquence, que cela soit en eaux profondes ou peu-profondes, les chaînes métalliques sont des éléments largement utilisés pour les ancrages des dispositifs flottants. Du mouillage de navires, à l'ancrage d'éoliennes ou de plate-forme offshore, leurs résistances et leur fiabilité les rendent aptes à l'emploi dans des conditions d'utilisation très sévères.

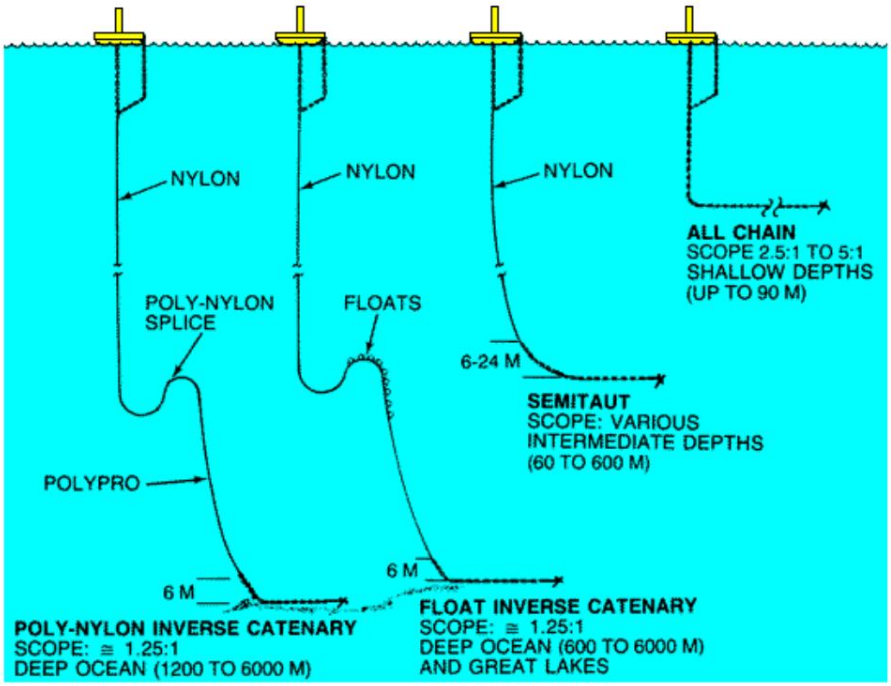



*Figure I-22 - Configurations classiques de lignes d'ancrage en fonction de la profondeur d'eau (Taft et al., 2009).*

## I.2.2. Caractéristiques des chaînes d'ancrage

### I.2.2.1. Géométrie et fabrication

Les chaînes sont composées de mailles imbriquées, formées à partir de barres d'acier laminées à chaud. Les barres sont découpées, décalaminées, chauffées par conduction ou par induction, cintrées, puis soudées par étincelage (sans métal d'apport). L'unique soudure se situe au milieu de la partie droite de la maille (voir Figure I-23 (a)). Le bourrelet associé est supprimé mécaniquement afin de garantir les tolérances imposées par les normes.



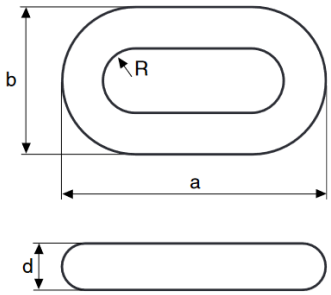
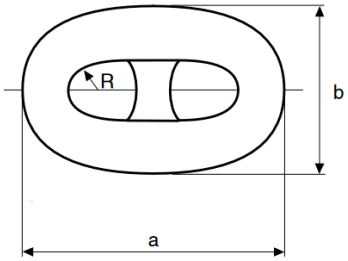

(a) (b)

*Figure I-23 – Mailles de chaînes. (a) Échantillon de maille neuve, sans étai, fourni par l'entreprise Carlier (Carlier, 2024). La soudure est visible dans sa partie inférieure, le bourrelet associé a été supprimé mécaniquement. (b) Mailles avec étais (Marit, 2024).*

Les mailles peuvent être renforcées par la présence d'un étai central inséré entre ses deux parties droites (voir Figure I-23(b)). L'étai peut être monté en force dans la maille encore chaude, ou soudé afin d'assurer un meilleur maintien. La soudure de l'étai n'est alors réalisée que d'un seul côté : celui opposé à la soudure par étincelage.

Les opérations de fabrication doivent permettre de respecter une géométrie de maille définie par la norme ISO 1704. Cette norme décrit uniquement la géométrie des mailles de chaîne avec étais. Les mailles sans étai ne sont pas normalisées, mais les bureaux de classification définissent néanmoins, dans leurs recommandations, des standards afin d'uniformiser le marché : NR216 (Bureau Veritas, 2018) pour le Bureau Veritas, DNV–OS-302 (Det Norske Veritas, 2009) pour le Det Norske Veritas, et W22 (IACS, 2016) ou W18 (IACS, 2004) pour l'International Association of Classification Societies. Historiquement, les dimensions des mailles avec étai sont restées les mêmes depuis les années 1860, période lors de laquelle elles ont été approuvées par l'amirauté britannique. Les dimensions standardisées sont données dans la Table 2.

*Table 2 - Dimensions et tolérances des mailles avec et sans étai selon ISO 1704 et IACS W22.*

| | **Maille sans étai** | **Maille avec étai** |
|---|---|---|
| |  |  |
| $a$ | $6d \mp 0.15d$ | $6d \mp 0.15d$ |
| $b$ | $3.35d \mp 0.09d$ | $3.6d \mp 0.09d$ |
| $R$ | $0.6d\ mini$ | $0.65d\ mini$ |

Les mailles avec étais permettent d'éviter la formation de coques (paquets de chaînes), facilitent la manutention et augmentent la durée de vie des chaînes en apportant une meilleure résistance à la fatigue. Cette résistance améliorée provient de la diminution du moment de flexion présent dans le cintre lors de la mise sous tension de la chaîne. Cette réduction du moment est aussi possible en diminuant la largeur de la maille. C'est ainsi que les mailles sans étai sont moins larges que les mailles avec étai : 3.35 fois le diamètre nominal, au lieu de 3.6 fois pour les mailles avec étais.

Outre les tolérances dimensionnelles données dans la Table 3, qui correspondent environ à $\pm 2.5\%$ des cotes de largeur et de longueur, il existe d'autres indications normatives concernant la variabilité géométrique tolérée des mailles neuves. Ainsi, une longueur de 5 mailles consécutives de chaîne est régulièrement contrôlée : elle ne doit pas être inférieure à la longueur nominale égale à 22 fois le diamètre, ni excéder 2.5% de cette longueur. En outre, le diamètre des mailles comporte des tolérances établies en fonction de l'endroit où il est mesuré, mais aussi en fonction du calibre même de la maille. Le diamètre mesuré correspond à la moyenne entre deux diamètres mesurés perpendiculairement. Les mesures de contrôle sont réalisées après l'application d'une charge d'essai qui sera définie au chapitre suivant. Ces informations de tolérancement sont synthétisées dans la Table 3.

*Table 3 - Tolérances géométriques admises selon ISO 1704 et IACS W22.*

| **Dimensions** | **Tolérances** |
|---|---|
| Tolérances admises sur les diamètres mesurés dans les cintres en fonction du diamètre nominal : | |
| $d \leq 40\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-1\end{matrix} mm$ |
| $40\ mm < d \leq 84\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-2\end{matrix} mm$ |
| $84\ mm < d \leq 122\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-3\end{matrix} mm$ |
| $122\ mm < d \leq 152\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-4\end{matrix} mm$ |
| $152\ mm < d \leq 184\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-6\end{matrix} mm$ |
| $184\ mm < d \leq 222\ mm$ | $\begin{matrix}0\\-7.5\end{matrix} mm$ |
| Complément : l'aire de la section mesurée dans un cintre ne doit pas être inférieure à celle d'un disque dont le diamètre est égal au diamètre nominal de la maille. | |
| Tolérance sur le diamètre au niveau de la soudure par étincelage : | |
| $\forall d$ | $\begin{matrix}0.15d\\0\end{matrix} mm$ |
| Tolérances sur les diamètres, partout ailleurs : | |
| $\forall d$ | $\begin{matrix}0.05d\\0\end{matrix} mm$ |
| Tolérance sur une longueur de 5 mailles, avec une chaîne chargée entre 5 et 10 % de la charge d'épreuve : | |
| Longueur nominale : $22d$ | $\begin{matrix}0.55d\\0\end{matrix} mm$ |

Les valeurs dimensionnelles et les tolérances retranscrites ci-dessus proviennent de la norme ISO 1704 et des documents fournis par les bureaux de contrôle. Il est notable que d'autres géométries de mailles existent, car chaque utilisateur peut, en fonction de ses besoins, définir avec un fabricant une géométrie et des tolérances qui lui sont appropriées. On trouve ainsi, dans le commerce, des longueurs de maille courtes, mesurant 5 fois le diamètre nominal, ou des longueurs de mailles longues mesurant jusqu'à 8.5 fois le diamètre nominal.

À titre d'illustration, les dimensions et les tolérances d'une maille standard sans étai possédant un diamètre nominal de 40 mm sont présentées en Figure I-24. Les tolérances non négligeables montrent, par l'exemple, que la variabilité dimensionnelle d'une maille devra nécessairement être prise en compte pour toute étude nécessitant l'utilisation de ces données géométriques.

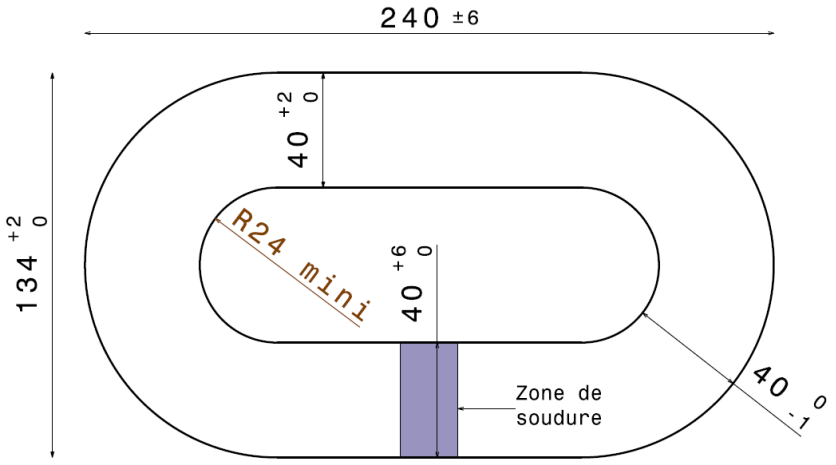



*Figure I-24 - Maille 6d de calibre 40 mm, cotes et tolérances en mm.*

### I.2.2.2. Matériaux et propriétés mécaniques

L'International Association of Classification Societies (IACS) définit des normes techniques minimales pour le milieu maritime. Cette association regroupe les 13 principales sociétés de classification qui couvrent aujourd'hui 90% du tonnage mondial de la construction navale. L'IACS distingue deux types de chaînes, celles destinées aux installations offshore avec la norme W22 « Offshore mooring chain » (IACS, 2016) et celles utilisées pour le mouillage des navires avec la norme W18 « Anchor chain cable » (IACS, 2004). Ces normes définissent 8 grades de chaînes qui se différencient principalement par les propriétés mécaniques des aciers utilisés. Certaines propriétés sont résumées dans la Table 4 ci-dessous.

Notons que les bureaux de certification ont la possibilité d'apporter des indications complémentaires plus restrictives. Ainsi chaque bureau de certification définit ses propres grades avec des désignations différentes, mais avec des propriétés très similaires. Cette diversité de dénomination complexifie nettement la standardisation du marché des chaînes. La Table 5 synthétise la dénomination de matériaux équivalents pour 3 bureaux de certification.

La composition chimique des chaînes comporte peu de recommandations pour les chaînes offshore, le sidérurgiste indique alors une composition chimique qui doit être approuvée par la société de classification et par le fabricant de chaînes. Les grades R4, R4S et R5 doivent cependant comporter un minimum de 0.2% de molybdène. Concernant les chaînes de mouillage pour les navires, les compositions chimiques proposées doivent être accordées avec les valeurs fournies dans la Table 6.

*Table 4 - Propriétés mécaniques (hors résilience et dureté) des aciers à chaînes selon IACS W22 et IACS W18.*

| **Type** | **Grade** | **Limite élastique minimale (MPa)** | **Résistance à la traction (MPa)** | **Allongement à la rupture minimal (%)** |
|---|---|---|---|---|
| Mouillage | Grade 1 | - | 370-490 | 25 |
| Mouillage | Grade 2 | 295 | 490-690 | 22 |
| Mouillage | Grade 3 | 410 | 690 min | 17 |
| Offshore | R3 | 410 | 690 min | 17 |
| Offshore | R3S | 490 | 770 min | 15 |
| Offshore | R4 | 580 | 860 min | 12 |
| Offshore | R4S | 700 | 960 min | 12 |
| Offshore | R5 | 760 | 1000 min | 12 |

*Table 5 - Dénominations des grades pour les chaînes de mouillage de navires et pour les chaînes d'ancrage offshore.*

| **Type** | **IACS** | **Bureau Veritas** | **Det Norske Veritas** | **Lloyd's register** |
|---|---|---|---|---|
| Mouillage | Grade 1 | Q1 | K1 | U1 |
| Mouillage | Grade 2 | Q2 | K2 | U2 |
| Mouillage | Grade 3 | Q3 | K3 | U3 |
| Offshore | R3 | QR3 | R3 | R3 |
| Offshore | R3S | QR3S | R3S | R3S |
| Offshore | R4 | QR4 | R4 | R4 |
| Offshore | R4S | QR4S | R4S | R4S |
| Offshore | R5 | QR5 | R5 | R5 |

*Table 6 - Composition chimique préconisée pour les chaînes de mouillage des navires selon IACS W18.*

| Grades | Compositions chimiques | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C (%) max. | Si (%) | Mn (%) | P (%) max. | S (%) max | Al tot (%) min. (1) |
| **1** | 0.2 | 0.15 – 0.35 | Min. 0.4 | 0.040 | 0.040 | - |
| **2** (2) | 0.24 | 0.15 – 0.55 | Max. 1.6 | 0.035 | 0.035 | 0.020 |
| **3** | En accord avec les sociétés de classification | | | | | |

(1) L'aluminium peut être remplacé en partie par d'autres éléments à grain fin.
(2) D'autres éléments peuvent être ajoutés en accord avec la société de classification.

D'autres recommandations peuvent exister en fonction des usages. Ainsi, la Marine nationale française impose une désignation complémentaire « HR » qui lui est propre. Cette chaîne haute résistance possède, en particulier, une aptitude de résilience renforcée à très basse température, ou des propriétés amagnétiques. Le matériau imposé pour les chaînes HR est l'acier 27 Mn Si 5. Pour les bouées de signalisation maritime, les Phares & Balises utilisent des chaînes équivalentes : la nuance choisie doit être « proche en composition chimique et en caractéristiques mécaniques » du même acier, le 27 Mn Si 5 (CEREMA, 2013). Notons ici qu'il existe deux normes spécifiques complémentaires qui définissent les aciers aptes à la fabrication de chaînes : la norme française NF 35-566 et la norme allemande DIN 17115.

#### I.2.2.3. Charges d'épreuve et de rupture

Outre les propriétés mécaniques, les compositions chimiques et les propriétés cristallographiques (non ici abordées) des aciers utilisés, les chaînes fabriquées doivent pouvoir résister à des charges d'épreuve et de rupture spécifiques définies par l'IACS et par les sociétés de classification (voir Table 7). Chaque chaîne fabriquée (longueur 27.5 m) doit ainsi être soumise à la charge d'épreuve imposée. En outre, des échantillons composés d'au moins 3 mailles sont prélevés à une certaine fréquence lors de la fabrication. Ceux-ci doivent résister à la charge de rupture préconisée pendant au moins 30 secondes. Dans les deux cas, épreuve et rupture, la chaîne ne doit pas se rompre ni laisser apparaître de fissure au niveau de la soudure par étincelage.

*Table 7 – Coefficients de charge de rupture, coefficients de charge d'épreuve selon IACS W22 et W18, et ratio associé en %. Les valeurs pour les mailles sans étais sont indiquées entre parenthèses, si elles diffèrent des mailles avec étais. Les chargements en kN sont obtenus par la multiplication de ces coefficients par la valeur $d^2(44-0.08d)$ avec d, le calibre de la maille en mm.*

| **Usage** | **Grade** | **Coefficient de charge d'épreuve** | **Coefficient de charge de rupture** | **Charge de rupture / charge épreuve %** |
|---|---|---|---|---|
| Mouillage | Grade 1 | 0.00686 | 0.00981 | 70 |
| Mouillage | Grade 2 | 0.00981 | 0.01373 | 71 |
| Mouillage | Grade 3 | 0.01373 | 0.01961 | 70 |
| Offshore | R3 | 0.0148 | 0.0223 | 66 |
| Offshore | R3S | 0.0180<br>(0.0174) | 0.0249 | 72<br>(70) |
| Offshore | R4 | 0.0216<br>(0.0192) | 0.0274 | 79<br>(70) |
| Offshore | R4S | 0.0240<br>(0.0213) | 0.0304 | 79<br>(70) |
| Offshore | R5 | 0.0251<br>(0.0223) | 0.0320 | 78<br>(70) |

Les essais de rupture permettent de vérifier statistiquement qu'une charge minimale pourra être atteinte avant rupture des chaînes. Cette charge minimale est définie comme étant la charge permettant d'atteindre environ 75 % de la résistance à la rupture (Noble Denton, 2006). Le modèle analytique associé au calcul de cette charge minimale n'est pas précisé par les organismes de certification. On note que les charges de rupture sont identiques pour les mailles avec et sans étai. Seule la charge d'épreuve diffère à partir d'un certain calibre. Il est donc avisé de rappeler ici que les chaînes avec étais ne sont pas destinées à être plus résistantes à la traction quasi-statique que les chaînes sans étais. À titre d'illustration, la Figure I-25 représente les

charges de rupture tracées en fonction des calibres des mailles et en fonction des différents grades.

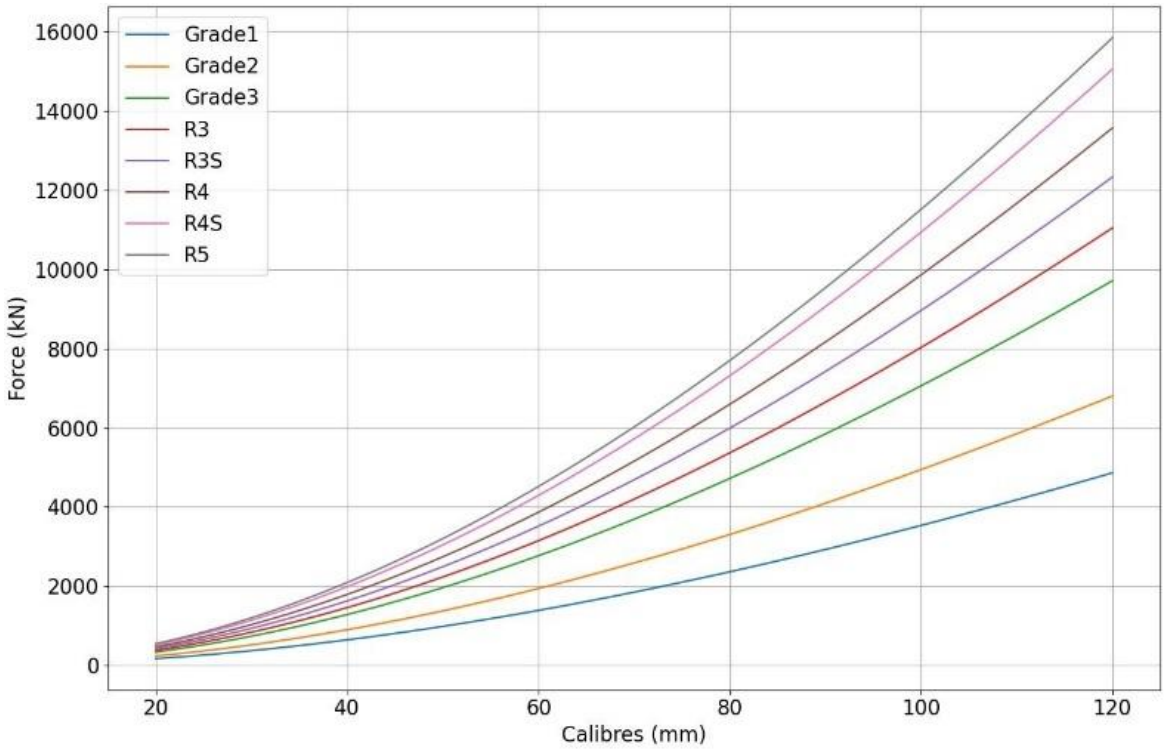
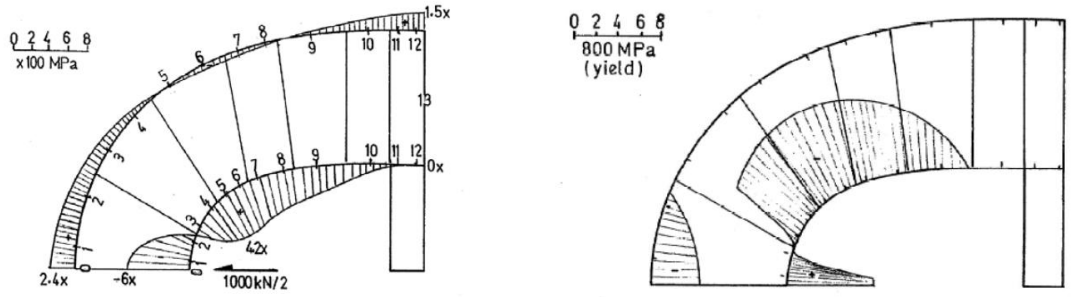



*Figure I-25 - Charges de rupture normalisées tracées en fonction du calibre. Cette charge minimale à atteindre est identique pour les mailles avec étais et pour les mailles sans étais.*

La charge d'épreuve est établie pour vérifier, en particulier, la rigidité des chaînes et la bonne tenue de leurs étais. Cette charge d'épreuve peut être majorée de 10 % à 15% afin de permettre au fabricant d'ajuster la longueur de la chaîne ou d'améliorer le blocage en position des étais. La charge d'épreuve correspond à 70 % environ de la charge de rupture (voir Table 7), et, après application de la majoration, à une contrainte qui est proche de la limite élastique du matériau. Encore une fois, on note que le modèle analytique associé aux calculs des chargements n'est pas explicité par les organismes de certification.

Lorsqu'une chaîne est soumise à une charge de traction, la contrainte présente dans la maille est similaire à celle représentée dans la Figure I-26 (a). Dans le cas de la charge d'épreuve, suite à déchargement, il résulte une contrainte résiduelle de traction au niveau du contact intermaille et de compression au niveau des épaules de la maille (intrados) (voir Figure I-26 (b)). Lors d'une nouvelle mise en charge de la chaîne, cette contrainte de compression doit être inversée afin qu'une contrainte de traction apparaisse. Or, comme la partie de la maille située au niveau interne des épaules est sujette aux amorces de fissures, il résulte de ceci que la charge d'épreuve est bénéfique à la tenue en fatigue des mailles (Noble Denton, 2017; Shoup et al., 1992). A contrario, la charge d'épreuve induit des déformations plastiques dans le cintre, au niveau du

contact, ce qui complexifie la définition de la géométrie initiale des mailles. En outre, cette déformation plastique limite les possibilités de rotation, de glissement ou de roulement entre mailles (Bastid and Smith, 2013), ce qui induit potentiellement des moments hors plans néfastes à la bonne tenue mécanique de l'ensemble.




(a) (b)

*Figure I-26 – Distribution des contraintes dans une maille (Brown et al., 2010) : (a) distribution de contrainte dans une maille en tension, (b) contrainte résiduelle à la suite du déchargement.*

## I.2.3. Dimensionnement et défaillances des chaînes d'ancrage

Une rupture de ligne d'ancrage peut induire des conséquences très importantes, quelle que soit la nature des dispositifs flottants associés : pertes humaines, catastrophes environnementales, pertes financières majeures… Par exemple, la perte d'une bouée de signalisation maritime met en danger la navigation et peut être la cause de naufrages associés à des pertes humaines. De même, la rupture des lignes de mouillage d'un navire peut mener à une situation critique pour celui-ci, s'il cherche à s'abriter en s'immobilisant près des côtes, lors d'une tempête. Dans le domaine offshore pétrolier & gaz, outre les pertes de production et la destruction des installations, le détachement d'une unité peut être associé à des conséquences dramatiques pour l'environnement. Dans ce domaine, depuis une trentaine d'années, aucun incident majeur n'a été relaté par la presse concernant la dérive incontrôlable d'une unité de production. Néanmoins, les enquêtes menées par l'industrie sur les défaillances des lignes d'ancrage montrent que certains incidents majeurs ont bien eu lieu dans un passé récent (D'Souza and Majhi, 2013; E. Fontaine et al., 2014; Kvitrud, 2014; Ma et al., 2013).

Les enquêtes menées montrent en particulier que les ruptures des lignes d'ancrage ne subviennent pas uniquement lors de conditions climatiques exceptionnelles qui induisent des chargements extrêmes. Les défaillances subviennent autant lors de conditions modérées que lors de conditions sévères. Les défaillances sont par ailleurs principalement observées aux interfaces des chaînes : en surface (chaumards, sabots, écubiers), dans la zone de contact avec le fond marin et au niveau des connecteurs le long des caténaires (manilles, émerillons). En

outre, l'enquête menée par Kai-Tung Ma (Ma et al., 2013) montre que les chaînes sont responsables de 47 % de la totalité des incidents sur les installations offshores.

Pour estimer les chargements subis, le concepteur peut se référer à des guides de calculs qui sont édités par différentes associations, organisations étatiques ou autres bureaux de certification (Bureau Veritas, 2015; CEREMA, 1997; Det Norske Veritas, 2010; IALA, 2010). Dans ces guides, le chargement subi par les chaînes est déterminé à partir de combinaisons d'actions mécaniques environnementales défavorables. Celles-ci sont associées à des actions identifiées pour des périodes de retour définies, par exemple, de 100 ans pour le vent et les vagues dans le domaine offshore pétrole & gaz. Des coefficients partiels de sécurité sont aussi imposés. Ils sont déterminés, entre autres, en fonction de classes de conséquences en cas de dommage, en fonction de la méthode de calcul utilisée, mais aussi, pour des cas de chargement accidentels, en fonction du nombre de lignes rompues (mouillages multilignes).

Les principaux facteurs pouvant mener à la rupture sont les surcharges, la fatigue en traction, la fatigue liée aux moments hors plans, la torsion, la corrosion et l'usure. Ces différents modes sont exposés ci-dessous.

#### I.2.3.1. Chargements excessifs

En quasi-statique, une chaîne se rompt de manière ductile si l'intensité du chargement de traction est supérieure à la charge de rupture de la chaîne. Un chargement excessif peut se produire si le concepteur a mal identifié les charges environnementales. Cette cause est cependant limitée du fait des recommandations et vérifications proposées par les bureaux de certification. Il peut donc s'agir d'un chargement dû à l'apparition d'une charge environnementale exceptionnelle, jamais répertoriée, ou d'une surcharge liée à la rupture d'autres lignes d'ancrages (dans le cas de mouillage multiligne). Cela peut aussi être des charges qui proviennent d'erreurs d'installations ou de manutention (voir exemple en Figure I-27).

Concernant les chargements excessifs, il est notable que la croissance du fouling sur les lignes d'ancrage crée une augmentation de la masse linéique des chaînes, mais aussi une élévation des forces de traînées hydrodynamiques. La prise en compte de cette majoration de charge est imposée par certains bureaux de certification (Det Norske Veritas, 2010, p. 28) et ceci même si la vitesse de croissance de la matière organique est fortement variable en fonction de la profondeur d'eau, de la température, de la quantité de matière nutritive (plancton ou azote) présente dans l'eau, mais aussi de la saisonnalité.

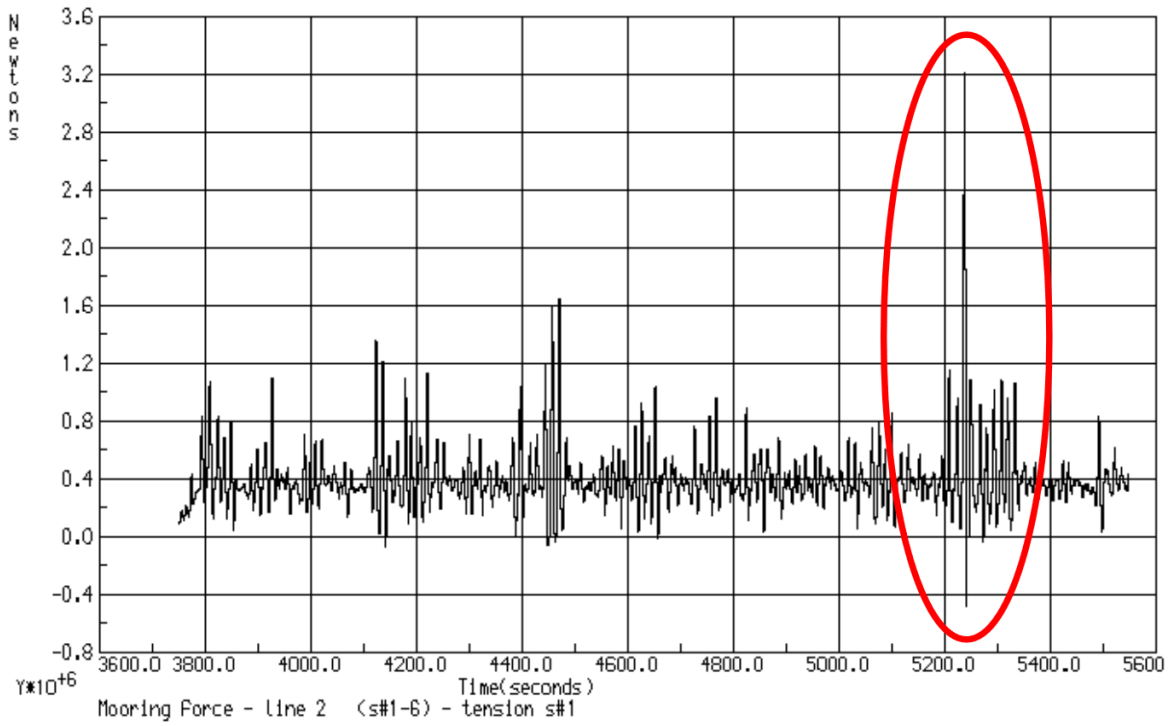



*Figure I-27 - Surcharge due à la détente et à la mise en tension rapide d'une ligne d'ancrage. Le choc multiplie par 8 la charge moyenne (Akers, 2014).*

La Figure I-28 (a) et (b) montre le fouling présent sous une bouée de signalisation maritime relevée à bord d'un baliseur des Phares & balises. La Figure I-29 montre la variabilité de tension présente dans la chaîne associée à cette même bouée. On constate une augmentation progressive de la charge, depuis la mise à l'eau en octobre 2020, jusqu'à l'été 2021. La charge est alors multipliée par 4 par rapport à la valeur initiale. Après la période estivale, la charge diminue lors de l'hiver 2021, mais sans revenir au chargement initial (coefficient 3 environ). Une quantité de fouling importante reste donc présente le long de la chaîne et sur la bouée pendant l'hiver. Au printemps suivant, une nouvelle croissance de fouling débute et se rajoute à celle de l'année précédente. Ceci induit inévitablement une augmentation progressive de la tension présente dans la chaîne. L'endiguement de ce phénomène passe nécessairement par la maintenance des bouées de signalisation maritime : relevé périodique de la bouée, de la chaîne et du corps-mort afin de supprimer mécaniquement le fouling présent sur l'ensemble du dispositif de signalisation.

Cette problématique d'augmentation de charge liée à la croissance du fouling sur les installations est aussi identifiée pour l'industrie offshore pétrole & gaz (Stachowitsch et al., 2002; Yan et al., 2006) et l'industrie offshore éolien (Decurey et al., 2020; "Prix EDF Pulse Occitanie," 2023). Notons que les techniques de nettoyage du fouling présent sur ces types d'installations constituent des enjeux technologiques importants, car cette opération de maintenance indispensable est complexe à mettre en œuvre.



(a) (b)

*Figure I-28 – Fouling présent sur une bouée cardinale de signalisation maritime après 19 mois de service sur la « Moulière de Saint Quay » – Côtes-d'Armor (22) – France.*

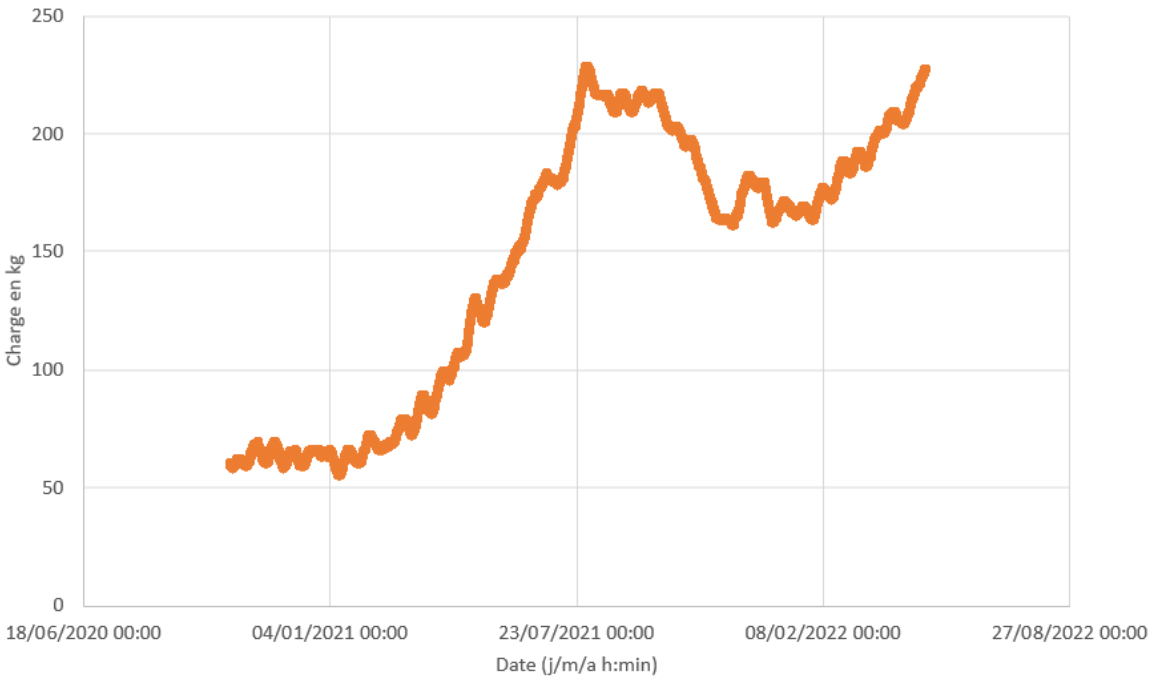



*Figure I-29 - Charge en kg sur la chaîne de bouée de signalisation maritime localisée à la « Moulière de Saint Quay » – Côtes-d'Armor (22) – France. Mesures réalisées par un capteur SF10 de marque NKE. Les données ont été relevées toutes les minutes, la courbe affichée propose un lissage des valeurs sur une semaine.*

### I.2.3.2. Fatigue en traction simple

Les chaînes sont soumises à des chargements dont les caractéristiques sont nécessairement dynamiques du fait de la nature des sollicitations environnementales. La tension présente dans la chaîne comporte donc une composante moyenne et une composante variable, cyclique. Par exemple, une houle régulière de période égale à 7 s induit $1.4 \times 10^7$ cycles de chargement sur un ancrage de bouée de signalisation maritime dont la durée de vie est égale à 3 ans, et induit $9 \times 10^7$ cycles pour une installation permanente offshore dont la durée de vie est égale à 20 ans. Le chargement cyclique provoque une propagation de fissures dans l'acier qui conduit à la rupture au bout d'un certain nombre de cycles (voir exemples de ruptures en Figure I-30), et ceci même si son intensité est bien plus faible que la charge minimale de rupture de la chaîne.



(a) (b)

*Figure I-30 - Exemples de ruptures par fatigue de chaînes de grade R4 ou R5, sous sollicitations de traction uniaxiale (Fernández et al., 2014).*

La fatigue des chaînes est un phénomène étudié depuis les années 1970 où les premiers essais ont été menés en milieu aérien (De Laval, 1971). La Figure I-31 illustre les fissures observées lors d'essais en fatigue réalisés lors du BOMEL - JIP entre 1989 et 1992 (Billington Osborne-Moss Engineering Limited - Joint Industry Project) (Bolt et al., 1995). On constate que la majorité des fissures se sont logiquement développées à partir des zones où les contraintes de traction sont maximales (pour rappel, voir Figure I-26 (a)).

Les bureaux de certification proposent des méthodes pour prendre en compte la fatigue des chaînes soumises à un chargement en traction (avec ou sans étais). Ces méthodes sont basées sur des campagnes d'essais qui ont permis d'identifier des courbes S-N ou T-N obtenues par régression linéaire en échelle log-log et décalées de deux écarts-types afin d'atteindre une probabilité de non-rupture de 97.7 %. Les caractéristiques de ces courbes et les conditions d'application sont fournies dans la Table 8, ci-dessous.

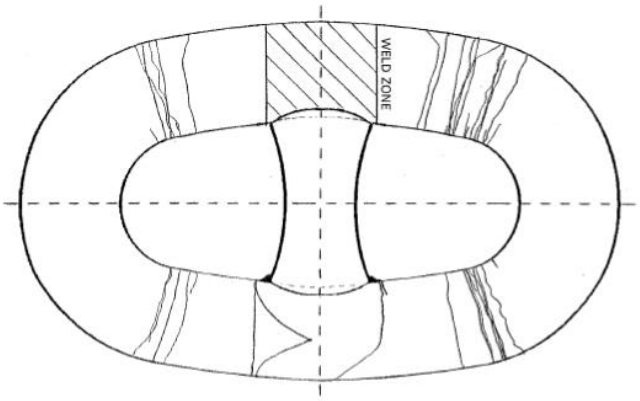



*Figure I-31 - Localisation des fissures pour des essais de fatigues menés lors du BOMEL JIP (Bolt et al., 1995).*

*Table 8 - Vérification en fatigue selon le Bureau Veritas (Bureau Veritas, 2015) et selon le Det Norske Veritas (Det Norske Veritas, 2010), respectivement courbes T-N et S-N.*

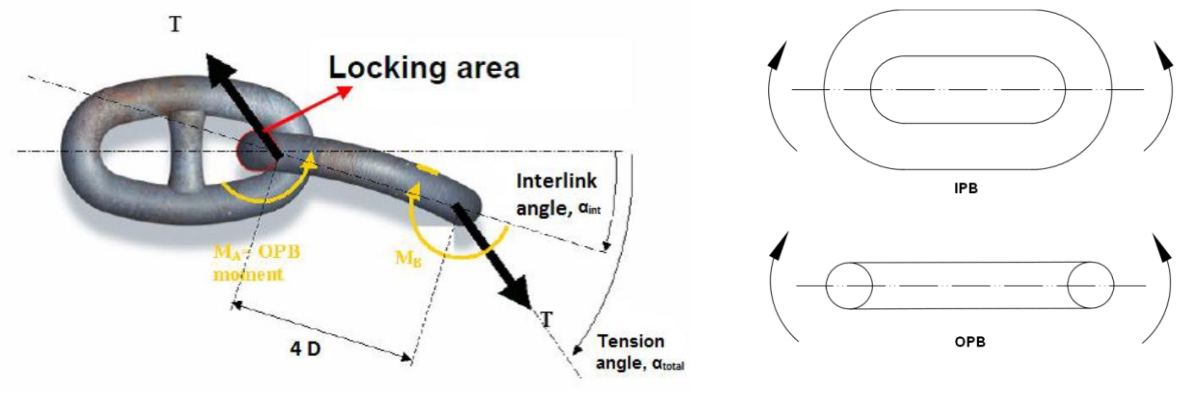
| | **Bureau Veritas** | **Det Norske Veritas** |
|---|---|---|
| Relations | $NR^m = K$ | $Ns^m = a_D$ |
| $N$ | Nombre de cycles avant rupture | |
| $m$ | 3 | 3 |
| $K, a_D$ | $K_1 = 1000$, avec étai<br>$K_2 = 316$, sans étai | $a_{D1} = 1.2 \times 10^{11}$, avec étai<br>$a_{D2} = 6.0 \times 10^{10}$, sans étai |
| $R, s$ | $R$ : ratio entre la double amplitude de la charge appliquée avec la charge minimale de rupture d'une maille de même diamètre et composée d'un matériau API-ORQ (5.5% inférieur au QR3) | $s$ : contrainte en MPa calculée en divisant la double amplitude de la charge appliquée, par la section de référence de la maille, soit $2 \times \pi\, d^2/4$, avec $d$ le calibre associé. |
| Coefficient de sécurité | 3 mini | 5 mini (3 si inspections régulières) |
| Commentaires | Les valeurs obtenues sont applicables en eau de mer. | |

Les durées de vies ci-dessus estimées permettent d'obtenir une comparaison entre les performances en fatigue des mailles avec étai et des mailles sans étai. Deux calculs rapides $(K_1 - K_2)/K_1$ et $(a_{D1} - a_{D2})/a_{D1}$ nous donnent 68 % de durée de vie supplémentaire pour les mailles avec étai, selon le Bureau Véritas et 50% selon le Det Norske Veritas. Il convient donc de préconiser l'utilisation de chaîne avec étais pour les installations à long terme (plus de 5 ans selon Det Norske Veritas). Cependant, en pratique, il est régulièrement constaté des pertes d'étais en fonctionnement, et, de ce fait, la durée de vie effective devient bien inférieure à celle calculée, d'autant plus que le siège de l'étai disparu amorce la propagation de fissures. Pour éviter ce dysfonctionnement majeur, les chaînes sans étai sont donc usuellement utilisées pour les installations à long terme.

#### I.2.3.3. Moments hors plan (In-Plane / Out-of-Plane Bending – IPB/OPB)

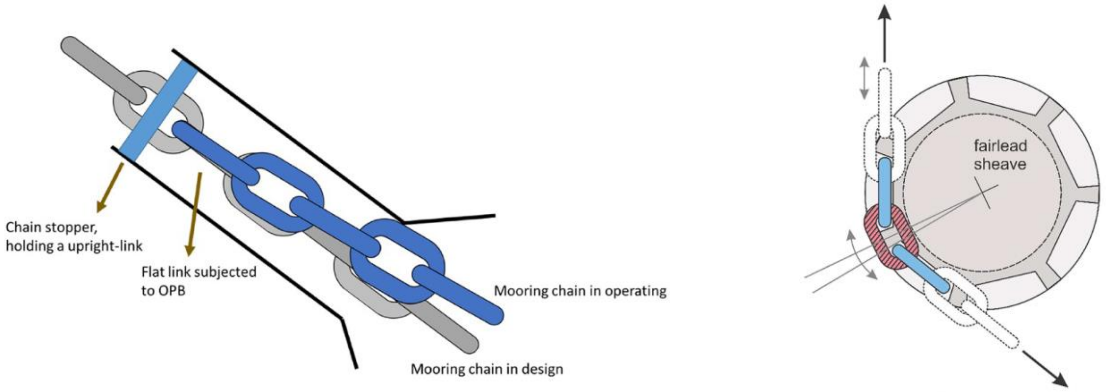
Lorsque la tension présente dans une chaîne augmente, les mailles tendent à s'aligner entre elles, à condition qu'elles puissent s'orienter librement en roulant ou en glissant les unes sur les autres. Dans le cas de présence d'usure, de frottement important ou de déformation permanente de la surface de contact, les mailles ont tendance à se verrouiller, et un moment de flexion complémentaire apparaît alors dans la maille (voir Figure I-32 (a)). Ce moment de flexion qui peut être situé dans le plan de la maille ou en dehors de ce plan (In-Plane / Out-of_Plane Bending – IPB/OPB – voir Figure I-32 (b)) change alors la distribution des contraintes. Il doit donc être pris en compte dans la conception des lignes d'ancrage. En effet, ces contraintes additionnelles induisent des ruptures en fatigue qui sont principalement observées aux extrémités des chaînes (Morandini and Legerstee, 2009; Noble Denton, 2006) : dans les chaumards, les écubiers ou les barbotins (voir Figure I-33). On rappelle ici (voir paragraphe I.2.2.3) que si la charge d'épreuve améliore la tenue en fatigue des chaînes soumises à une simple tension, la déformation plastique engendrée au contact intermaille engendre cependant un effet antagoniste : majoration du verrouillage des mailles, ce qui diminue la durée de vie en fatigue par IPB/OPB.

Depuis la rupture prématurée des chaînes de la bouée Girassol en 2002 (Noble Denton, 2006, p. 205), 7 mois seulement après son installation, la fatigue liée aux moments hors plan est considérée comme un mode de rupture majeur pour les extrémités des lignes d'ancrage. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont donc été menées ces dernières années afin de proposer des modèles prédictifs pour prendre en compte ce phénomène (Jean et al., 2005; Lassen et al., 2010; Melis et al., 2005; Morandini and Legerstee, 2009; Rampi et al., 2015). Ces études ont conduit les organismes de certification à introduire des préconisations de conception dans leurs documentations réglementaires. Par exemple le Bureau Veritas édite une méthodologie complète pour évaluer la fatigue due à ce type de sollicitations (Bureau Vertitas, 2014). Notons que sans prise en compte des moments hors plan, le Bureau Veritas préconise un coefficient de sécurité égal à 10 sur la durée de vie en fatigue des chaînes (Bureau Veritas, 2015, p. 34).




(a) (b)

*Figure I-32 – Moments de flexion complémentaires : (a) moment hors plan en jaune (OPB) dû au verrouillage de la rotation dans le contact intermaille (Jean et al., 2005), (b) IPB dans le plan principal de la maille, OPB dans son plan perpendiculaire (Xue et al., 2020).*




(a) (b)

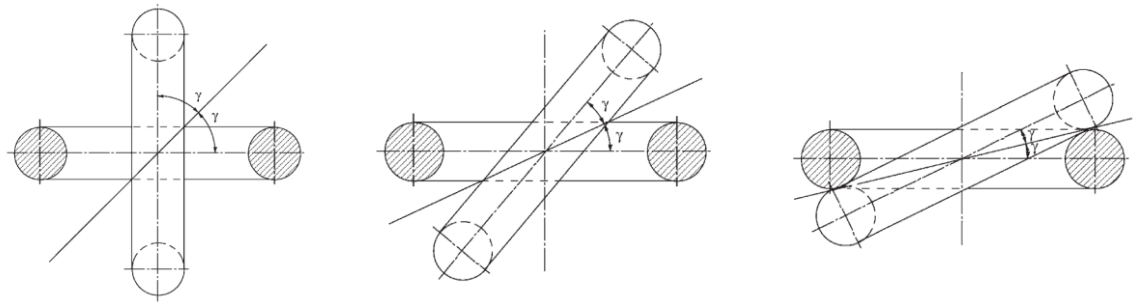
*Figure I-33 – Moment hors plan : (a) moment hors plan sur la première maille mobile (bleue), après le blocage d'une partie de la chaîne (grise) en entrée d'écubier (Xue et al., 2020), (b) illustration d'une rotation relative entre mailles, au passage d'un barbotin (Mamiya et al., 2019).*

### I.2.3.4. Torsion des chaînes

Une chaîne correctement déployée, c'est-à-dire sans rotation axiale entre les mailles (voir Figure I-34 (a)) ne génère pas de torsion lorsqu'elle est soumise à de la traction simple. En présence d'un angle inférieur à 3° (Noble Denton, 2006, p. 89), la raideur en torsion reste faible, car le contact intermaille peut encore être assimilé à un point : les mailles conservent leur

mobilité en rotation axiale. On note que cette explication simple de contact ponctuel doit être modérée, car elle ne prend pas en compte les imperfections de fabrications, les frottements, ainsi que les déformations plastiques engendrées par la charge d'épreuve.

Dans le cas où l'angle de rotation ne serait pas maîtrisé lors de l'installation de la chaîne (voir Figure I-35 (a)) ou lorsque des câbles métalliques présents dans la ligne d'ancrage sont non antigiratoires, l'angle de rotation peut augmenter (voir Figure I-34 (b)) jusqu'à une position de blocage (voir Figure I-34 (c)) et un moment de torsion significatif apparaît alors dans la chaîne d'ancrage (voir Figure I-36). Ce moment est lié à la capacité augmentée de transmission d'une torsion par l'apparition de deux zones de contact distinctes qui s'éloignent l'une de l'autre lorsque l'angle de rotation augmente (voir Figure I-37). Les études à ce sujet sont peu nombreuses, elles ont été principalement réalisées par Isabel Ridge et Roger Hobbs entre 2005 et 2011 (Hobbs and L Ridge, 2005; Ridge et al., 2011, 2006).




(a) (b) (c)

*Figure I-34 - Rotations axiales entre mailles (Hobbs and L Ridge, 2005) : (a) sans rotation axiale* ($\gamma = 45°$)*, (b) en présence d'une rotation axiale* ($\gamma < 45°$)*, (c) rotation axiale maximale.*



(a) (b)

*Figure I-35 – Torsion des chaînes : (a) torsion d'une chaîne lors d'un relevage sur le pont d'un FPSO (Noble Denton, 2006, p. 90), (b) paquet de chaîne lors de la remontée d'une ancre (Hough, 2017).*

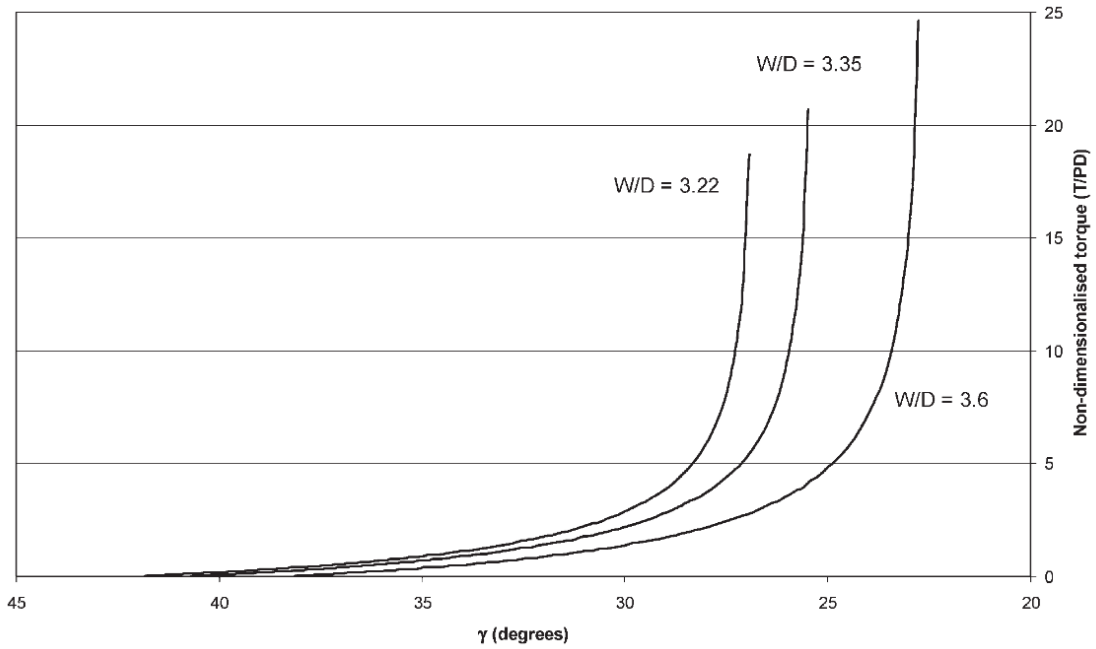



*Figure I-36 – Courbes exprimant le moment de torsion adimensionné en fonction de l'angle de rotation en degrés. Trois types de mailles sont étudiées, largeurs W=3.22D, 3.35D et 3.6D, avec D le diamètre de la maille. Le moment de torsion est adimensionné par division avec le produit DP, P étant la charge de traction. (Hobbs and L Ridge, 2005).*

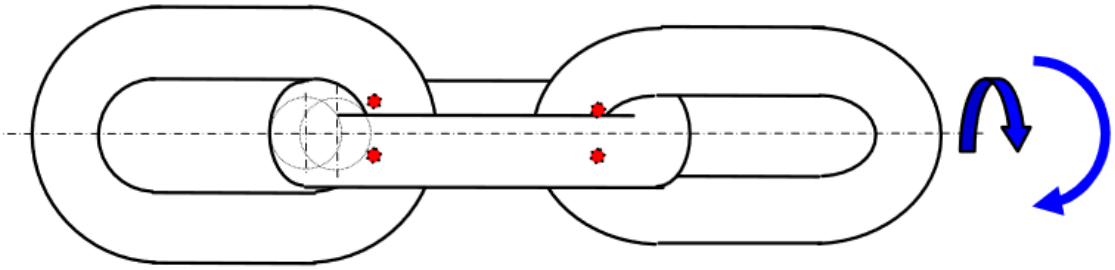


*Figure I-37 - Schéma illustrant l'apparition de deux contacts (en rouge), lorsqu'une chaîne est soumise à une rotation axiale importante (Ridge et al., 2011).*

Lorsque l'angle de torsion d'une chaîne mise en tension augmente, outre l'apparition d'un moment de torsion fortement non linéaire, il est notable de constater que les mailles se soulèvent et se rapprochent entre elles. Dans un cas extrême, les mailles peuvent se nouer et former ce que l'on appelle un « paquet de chaîne » ou une « coque » (voir Figure I-35 (b)). L'utilisation de mailles avec étai limite le risque de formation de ces paquets de chaîne et facilite donc la manutention. L'utilisation d'émerillons est une solution pour libérer un degré de liberté en rotation, ce qui supprime en conséquence presque totalement la torsion induite, si cet organe est conçu et choisi avec soin.

Les performances des chaînes soumises à de la traction et à de la torsion sont peu documentées à ce jour. Les travaux de Isabel Ridge et Roger Hobbs ont néanmoins mis en lumière qu'un

niveau de contrainte critique peut être atteint en présence d'un chargement modéré, associé à un angle de torsion significatif (Ridge et al., 2006). Les organismes de certification ne proposent cependant pas de méthodologie pour prendre en compte ce sujet, sans doute car une installation correcte de la ligne d'ancrage ou l'utilisation d'émerillons peut réduire très fortement la présence de la torsion.

#### I.2.3.5. Corrosion

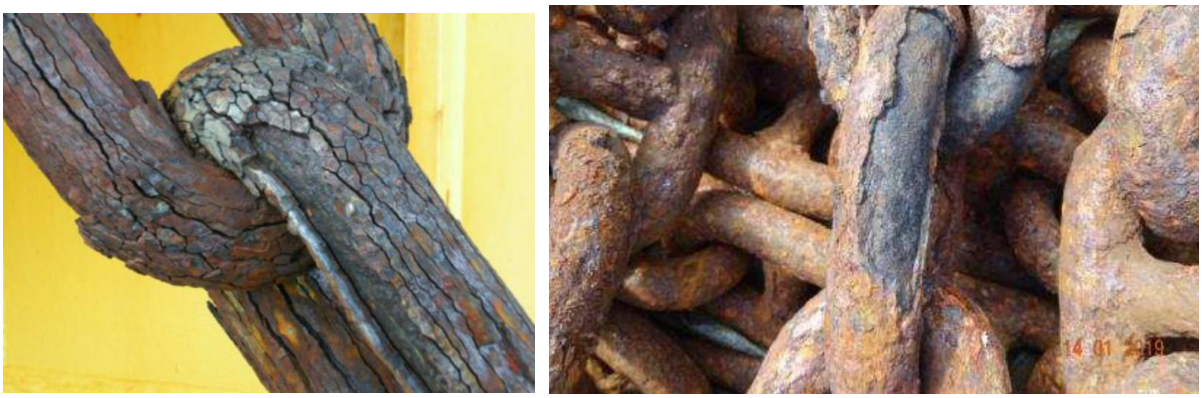
La corrosion est due à la tendance des métaux à revenir à leur état naturel sous forme d'oxydes métalliques. La corrosion de l'acier forme la rouille, matière friable qui réduit la robustesse des éléments sur laquelle elle se développe (voir Figure I-38 (a) et (b)). Les deux principaux réactifs du processus électrochimique sont l'eau et l'oxygène.

L'eau de mer est un électrolyte efficace qui accélère le processus de corrosion. Sa conductivité électrique dépend de sa salinité, c'est-à-dire sa teneur en chlorure qui est variable en fonction de la profondeur et de la localisation géographique. Par exemple, en eaux douces, la corrosion est moins importante qu'en eau de mer.

L'oxygène qui compose 21% de l'atmosphère est aussi présent dans l'eau de mer, mais sous forme dissoute. Sa concentration varie en fonction de nombreux paramètres comme la profondeur, la température, ou la photosynthèse du milieu environnant.

Les cinétiques d'oxydation sont difficiles à prévoir, mais la profondeur et la concentration d'oxygène associée sont deux paramètres qui permettent d'expliquer les observations concernant les pertes de matières par corrosion. Les plus importantes sont situées dans les zones d'éclaboussures « splash zones » et les zones de basses eaux (CEREMA, 2020; Emmanuel Fontaine et al., 2014). Dans les zones d'éclaboussures (voir Figure I-39), la forte corrosion est due à l'humidité permanente, la saturation de l'eau par l'oxygène et la forte concentration en sels du fait du séchage progressif des projections d'eau de mer. Dans les zones de basses eaux, la corrosion est maximale. Celle-ci est expliquée, en particulier, par la présence de fouling et de micro-organismes qui s'y développent.

Différentes catégories de corrosion peuvent être observées. Il en existe une douzaine, dont 10 d'entre elles sont illustrées en Figure I-40. L'apparition de ces typologies de corrosion dépend de divers facteurs environnementaux. Concernant la corrosion des chaînes en milieu marin, deux catégories principales de perte de matière sont constatées : perte de matière uniforme sur toute la surface de la maille (voir Figure I-41 (a)) et pertes de matière localisées, sous forme de cavernes (voir Figure I-41 (b)).



(a) (b)

*Figure I-38 – Corrosion de chaînes. (a) Mailles de chaînes indonésiennes situées au-dessus de la ligne d'eau. Observation d'une corrosion généralisée entraînant une perte de matière importante (Emmanuel Fontaine et al., 2014). (b) Corrosion généralisée importante sur des mailles d'une ligne de mouillage de navire, après seulement 8 mois d'utilisation (Marine nationale française, 2019).*

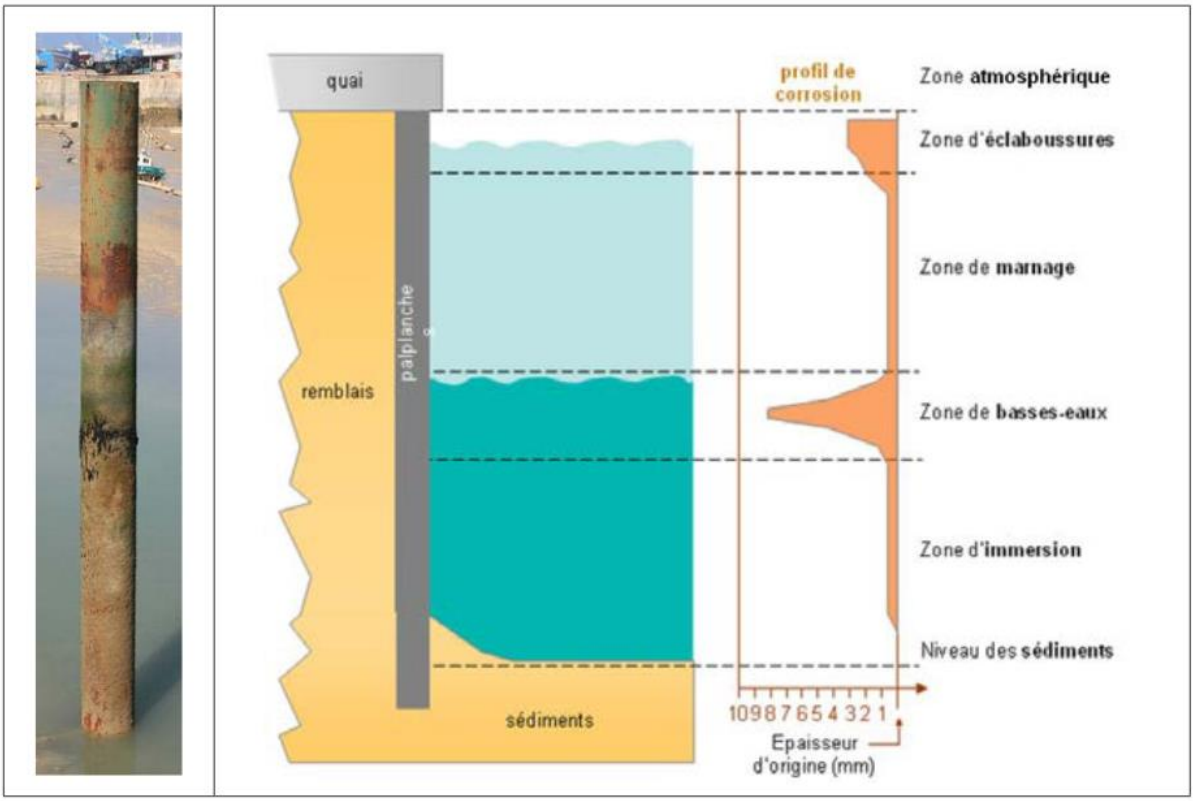



*Figure I-39 - Corrosion en fonction de la profondeur en zone portuaire. Les épaisseurs de corrosion sont maximales dans la zone d'éclaboussures et dans la zone de basses eaux Ces observations sont semblables à celles observées pour les chaînes vieillies en pleine mer. (CEREMA, 2020).*

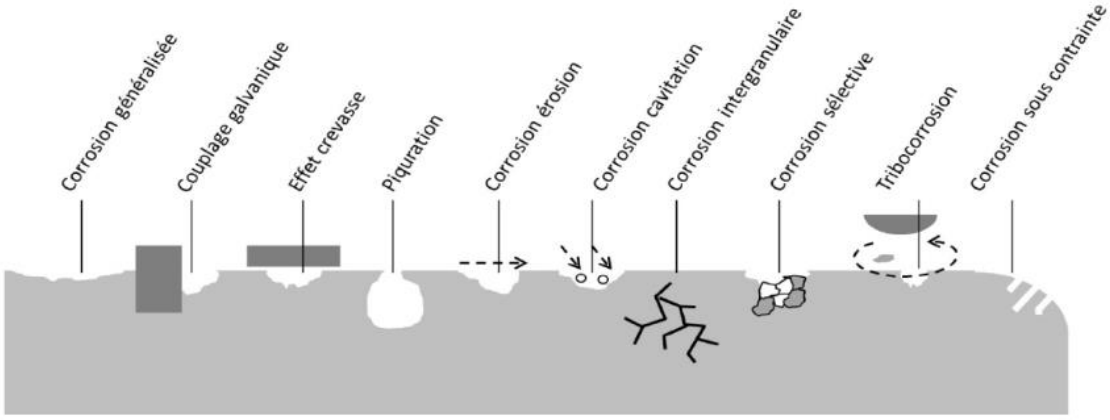



*Figure I-40 – Différents types de corrosion métallique (CEREMA, 2020)*



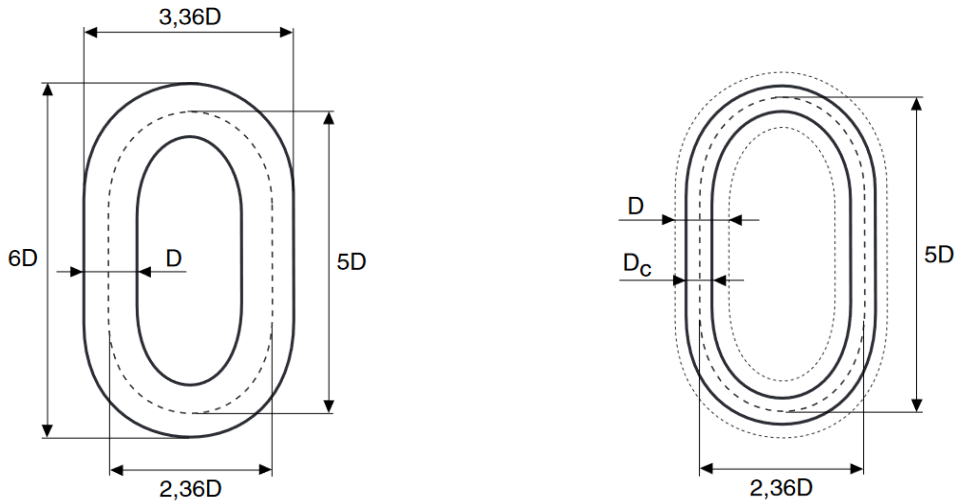
(a) (b)

*Figure I-41 – Mailles de chaînes utilisées pour l'ancrage de bouées de signalisation maritime. (a) Chaîne utilisée en mer, immersion permanente. La corrosion est généralisée : la surface est régulière et ne présente pas de cratères. (b) Chaîne utilisée en eau saumâtre, après 3 ans d'immersion. Observation de corrosion localisée prépondérante sous forme de multiples cratères.*

- **Corrosion généralisée**

Les pertes uniformes de matière correspondent à de la corrosion généralisée. La cinétique électrochimique est approximativement la même sur toute la surface de la maille. C'est la corrosion la plus simple et la mieux connue. Elle peut, sans trop de difficultés, être reproduite en laboratoire afin de mesurer, pour un matériau et un électrolyte donné, l'épaisseur de perte de matière en fonction du temps. Cette épaisseur de corrosion étant la même sur toute la surface, il est ainsi possible d'estimer la géométrie tridimensionnelle de la maille en fonction du temps d'utilisation. De ce fait, lors de la conception des lignes d'ancrage, la résistance minimale à la rupture d'une maille de chaîne ayant servi un certain nombre d'années peut être estimée équivalente (voir Table 7) à celle d'une maille de chaîne comportant le même matériau et dont le diamètre est égal au diamètre de la maille neuve minoré d'une épaisseur de corrosion connue. Cette pratique courante, qui est notifiée par le Bureau Veritas (Bureau Veritas, 2015, paras. S3-

9.3.1), doit cependant être modérée, car la fibre neutre d'une maille qui se corrode de manière uniforme reste identique au fil du temps. Or choisir une maille de calibre inférieur implique de changer sa fibre neutre, ce qui induit un comportement mécanique différent (pour rappel voir Figure I-42 (a)). La géométrie d'une maille vieillie par corrosion généralisée n'est donc pas équivalente à celle d'une maille de calibre réduit, elle n'est pas non plus équivalente à celle d'une maille de dimensions réduites par une homothétie. La géométrie qui doit être utilisée est celle illustrée en Figure I-42 (b). C'est cette géométrie qui est préconisée pour le calcul de résistance à la rupture, dans le cas de vérifications après observations de mailles en service (Bureau Veritas, 2015, paras. S3-9.3.3).




(a) (b)

*Figure I-42 – Modèle de perte de matière (Bureau Veritas, 2015, p. 29) : (a) géométrie d'une maille neuve, (b) géométrie d'une maille ayant perdu de la matière de manière uniforme par corrosion généralisée. La vérification des résistances des mailles en service est réalisée en prenant en compte cette géométrie usée qui ne modifie pas la fibre neutre de la maille initiale.*

Pour estimer les géométries usées, les organismes de certification proposent, dans leurs guides de conception, des indications sur les réductions annuelles de perte de matière. Par exemple, le Bureau Veritas propose, pour les chaînes utilisées dans le domaine offshore, une réduction de matière de 0.4 mm par année dans les zones d'éclaboussures, dans les zones en contact avec le fond marin et à proximité des liaisons avec les dispositifs de surface. Dans le reste de la chaîne, la perte de matière est estimée à 0.3 mm par année (Bureau Veritas, 2015, p. 29). Le Det Norske Veritas propose, quant à lui, des indications complémentaires concernant les installations situées sur la plate-forme continentale de Norvège et une distinction d'épaisseur de corrosion annuelle en fonction des fréquences d'inspection (Det Norske Veritas, 2010, p. 50). Notons que ces deux organismes de certification associent leurs recommandations de corrosion annuelle à des avertissements suggérant que des pertes de matière plus élevées doivent être prises en compte en fonction des réglementations locales, des observations in situ ou en présence de

corrosion bactérienne. Les données de corrosion indiquées sont donc proposées seulement à titre indicatif et doivent être prises comme des valeurs minimales. La pertinence de ces données et la manière de les utiliser sont par ailleurs controversées (Noble Denton, 2006, p. 99).

Tout d'abord, les valeurs minimales, qui sont proposées par les organismes de certification, doivent être prises en compte lors des calculs de vérification comme des pertes de matière uniformes sur toute la surface. Cependant, ces indications comprennent non seulement la corrosion généralisée mais aussi la corrosion localisée et l'usure. Or le comportement mécanique d'une maille comprenant des altérations locales n'est pas équivalent à celui d'une maille réduite uniformément en épaisseur. En outre, il n'est pas aisé d'assurer que cette méthode de prise en compte de l'usure / corrosion soit conservative, car la disparité des irrégularités géométriques liées à l'usure et à la corrosion locale induit une variabilité importante des concentrations de contraintes.

Ensuite, ces valeurs de corrosion sont controversées, car les valeurs annuelles indiquées de perte de matière semblent faibles par rapport à diverses observations dans le domaine offshore. Notons, pour finir, que les usures / corrosions observées dans le domaine de la signalisation maritime peuvent atteindre plusieurs millimètres par an, ordre de grandeur bien supérieur aux indications ci-dessus citées.

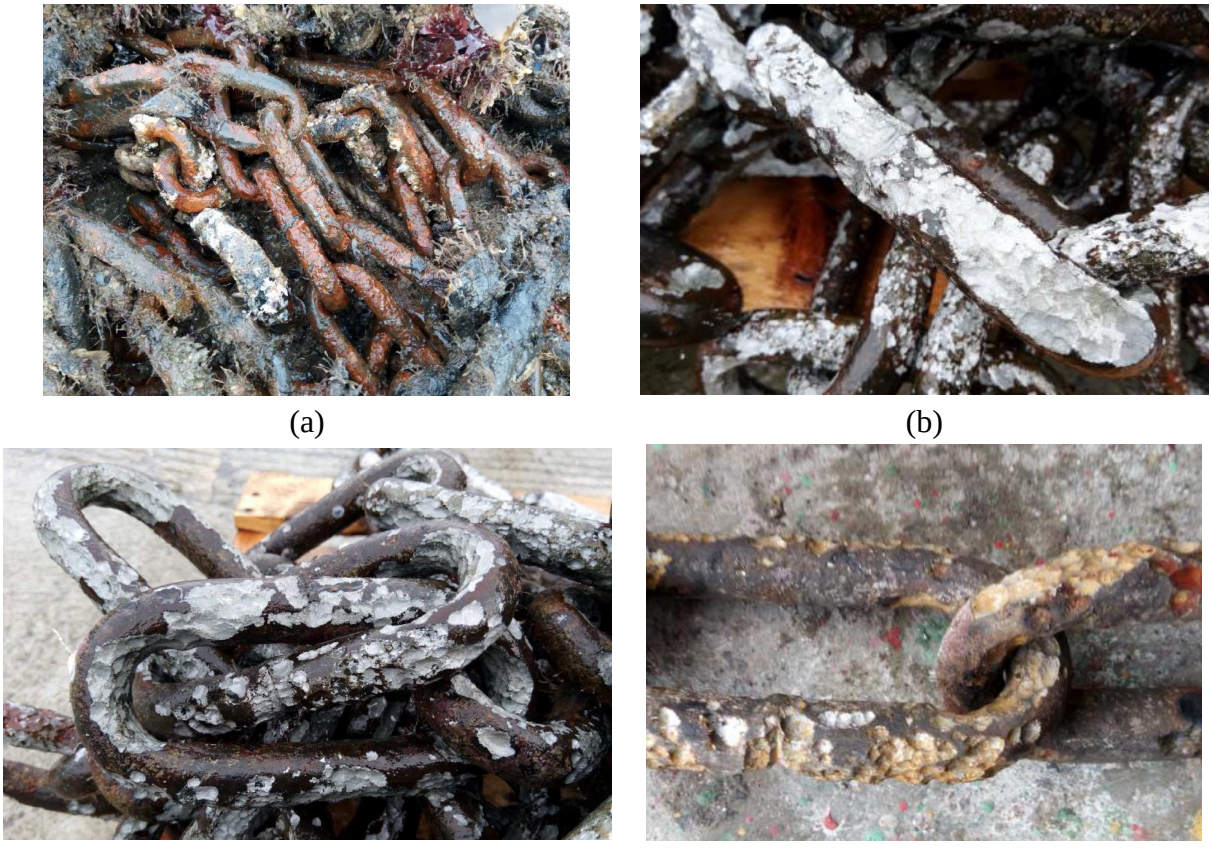
- **Corrosion localisée**

La corrosion est dite localisée lorsqu'elle ne se développe pas de manière uniforme sur toute la surface de la maille. Il existe donc des cinétiques électrochimiques différentes sur les diverses parties de celle-ci. Certaines observations dans le domaine offshore montrent que la perte de matière dans ces zones peut être 10 fois plus rapide que la corrosion généralisée (Emmanuel Fontaine et al., 2014). Il résulte de ces différentes cinétiques : des trous, des cratères et des fissures qui sont disséminés de manière aléatoire autour des mailles étudiées (voir Figure I-43 et Figure I-44). L'explication la plus probable de cette hétérogénéité de perte de matière est la présence d'organismes marins qui accélère localement le processus de corrosion. Celui-ci est surtout observé dans les zones de basses eaux (voir Figure I-39) ou l'immersion est permanente. Ce type d'altération est souvent nommée "biocorrosion" ou "corrosion influencée par les micro-organismes" (CIM). Le phénomène peut se développer dès qu'un simple film organique se développe sur le métal (Melchers, 2010, 2007). Il se poursuit ensuite au fur et à mesure de la progression de la colonisation biologique qui devient ce que l'on appelle communément le fouling (balanes, moules, huîtres, algues…). La perte importante de matière constatée n'est pas due à une consommation directe du métal par les animaux marins eux-mêmes, mais à un changement de la nature électrochimique du milieu au contact avec le métal : diminution du PH, émission d'hydrogène, concentration en oxygène, etc. Les organismes présents sont donc des catalyseurs déclenchant des corrosions qui peuvent être de natures très diverses.



(a) (b)

*Figure I-43 – Corrosion localisée (Emmanuel Fontaine et al., 2014) : (a) fouling présent sur une chaîne immergée en Afrique de l'Ouest, (b) trous (cratères), localisés et profonds, apparaissant sous le fouling après récupération de la chaîne et après nettoyage.*



(a) (b)

(c) (d)

*Figure I-44 – Biocorrosion. (a) Fouling présent sur une chaîne associée à une bouée d'amarrage implantée en eau saumâtre dans la rivière du Trieuc (Côtes-d'Armor – France) et relevée en novembre 2019. (b et c) Présence de multiples cratères de couleur gris mat, juste après le nettoyage haute pression. (d) Corrosion rapide des cratères après quelques heures à l'air libre. On distingue une majoration de perte de matière au niveau de la soudure de la maille.*

À ce jour de nombreuses études sont réalisées afin d'établir des liens entre les corrosions observées et la biologie présente sur les structures métalliques immergées. Par exemple, Wabin Chen et al. (Chen et al., 2023) ont étudié en baie de Dalian (Chine) les effets de la présence des moules, des ascidies et des balanes sur un acier doux de type Q235, équivalent chinois du S235. La Figure I-45 illustre les différents modes de corrosion identifiés pour ces 3 types d'organismes. Dans cette étude, les chercheurs tentent d'apporter une explication sur le processus de corrosion pour 3 animaux marins et pour un matériau particulier. Notons que les explications données semblent controversées pour les balanes (Cai et al., 2023; Murugan et al., 2020) et qu'il reste encore des centaines de bactéries, mollusques et autres crustacés non encore étudiés (Hoaglin et al., 2010). Il est ici nécessaire de constater qu'un travail important doit encore être mené afin de comprendre ces phénomènes de corrosion et afin de protéger au mieux les structures métalliques immergées. Notons que les travaux ABIOP et ABIOP+ de France Énergie Marine contribuent au renforcement des connaissances à ce sujet (Portas et al., 2022).

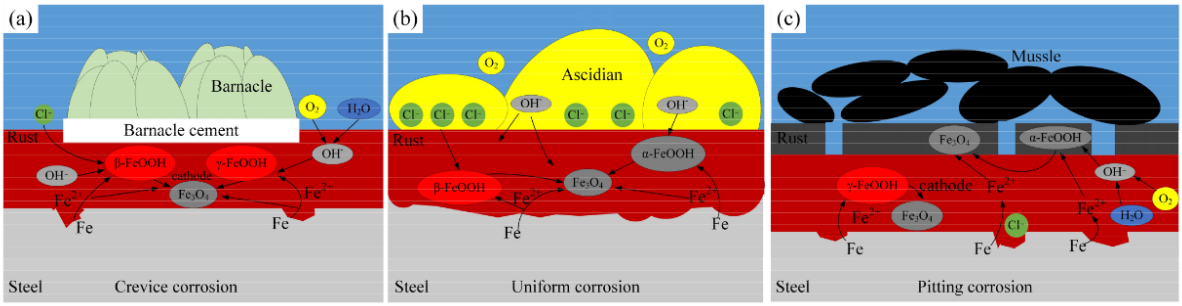
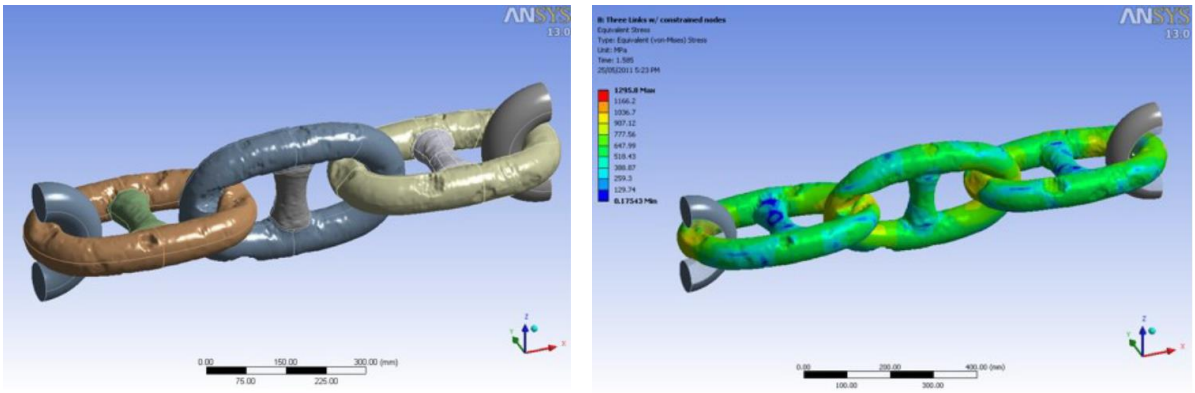



*Figure I-45 – Modèles proposés pour décrire les mécanismes de corrosion pour : (a) les balanes, (b) les ascidies et (c) les moules (Chen et al., 2023).*

Le comportement mécanique des chaînes présentant des cratères dus à de la corrosion localisée est difficile à prévoir du fait des diversités de forme, de position et de profondeur des défauts géométriques. Emmanuel Fontaine propose, dans son étude de 2012 (Fontaine et al., 2012), une analyse de mailles de calibre 76 mm provenant d'Afrique de l'Ouest (voir Figure I-43 (b)). Ces mailles comportent des cratères profonds qui se sont formés au bout de 7 années seulement. Afin d'identifier la résistance à la rupture résiduelle de ces chaînes, la géométrie 3D des mailles a été relevée par imagerie tridimensionnelle, ce qui a permis de réaliser une étude par éléments finis à partir du maillage obtenu (voir Figure I-46). Les résultats des simulations ont ensuite été comparés aux valeurs expérimentales relevées sur banc de traction. La conclusion de cette étude est que les forts cratères créés par le biofouling affectent peu la résistance des chaînes étudiées. Ce résultat étonnant et contre-intuitif devra nécessairement être validé par d'autres expérimentations, sur d'autres chaînes. Notons ici que la méthodologie utilisant un scanner 3D pour capturer la géométrie tridimensionnelle des mailles semble prometteuse pour ce type d'étude.



(a) (b)

*Figure I-46 – Modèle mécanique tridimensionnel (Fontaine et al., 2012) : (a) géométrie tridimensionnelle de mailles de chaîne comportant des cratères profonds, (b) contraintes de von Mises obtenues par une Méthode Éléments Finis.*

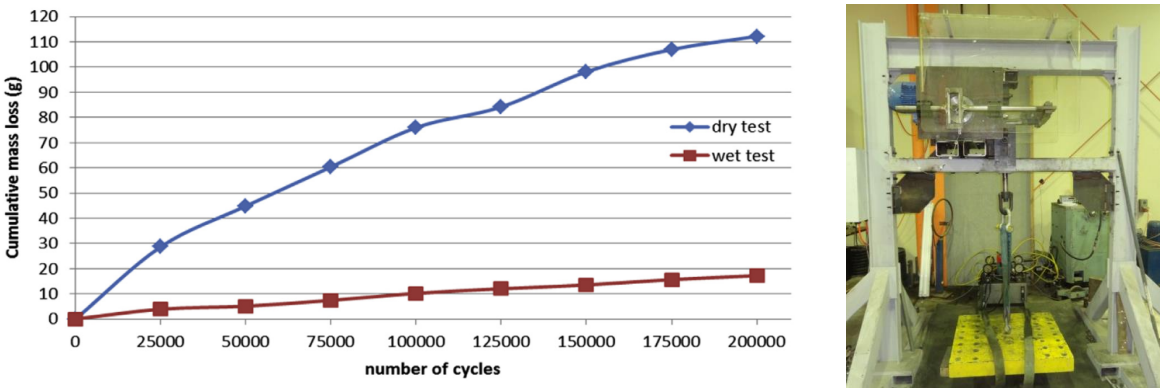
### I.2.3.6. Usure des chaînes

L'usure correspond à l'élimination progressive de matière sur la surface d'un corps qui est soumis à l'action mécanique et au mouvement relatif d'un autre corps.

Parmi les différentes origines des défaillances des chaînes d'ancrage, l'usure a été identifiée comme un des paramètres nécessitant de plus amples investigations, car au niveau des zones de contact, la diminution du diamètre contribue à un affaiblissement important des résistances mécaniques pouvant conduire à la rupture (Noble Denton, 2006). On rappelle ici (voir I.2.3.5) que la vérification de la tenue mécanique d'une chaîne doit être réalisée en se basant sur sa géométrie en fin de vie. La charge minimale de rupture d'une chaîne vieillie est donc approchée par la charge de rupture d'une chaîne de géométrie équivalente (voir I.2.2.3), dont le calibre est égal à celui de la maille neuve étudiée, réduit d'une épaisseur d'usure/corrosion fournie par les organismes de certification ou connue par l'expérience acquise sur les sites d'implantation. L'hypothèse concernant l'aspect conservatif de cette méthode étant discutable, il a donc été recommandé, dès 2006, que des données statistiques concernant les charges minimales de rupture de chaînes usées puissent être acquises au fur et à mesure des remplacements des lignes d'ancrage employées.

L'analyse de la littérature montre que le phénomène d'usure est peu connu et qu'il n'existe pas, à ce jour, de consensus concernant, par exemple, les modèles analytiques pour prédire les pertes de matière (Jayasinghe et al., 2018). À ce sujet, deux études se distinguent et sont régulièrement citées. Celle menée par Robert E. Melchers et Amin Lotfollahi Yaghin en 2015 (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015), ainsi que celle, plus ancienne, réalisée par G.J. Shoup et R.A. Mueller en 1984 (Shoup and Mueller, 1984). Ces travaux, basés sur des études expérimentales, décrivent les pertes de matière en fonction du nombre de cycles et ceci en fonction de différents chargements et autres conditions de fonctionnement (voir Figure I-47). Plus récemment, dans le cadre du SCORCH JIP (Seawater Corrosion of Ropes & CHain Joint Industry Project) (Potts

et al., 2018), des banques de données importantes ont été constituées, concernant, en particulier, l'usure et la corrosion des chaînes qui sont utilisées dans le domaine offshore pétrole & gaz.




(a) (b)

*Figure I-47 – Essais d'usure de mailles de chaînes (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015). (a) Pertes de matière mesurées en grammes, en fonction du nombre de cycles, pour une chaîne de calibre 16 mm, composée d'un matériau spécifique (AISI 1522). Une masse d'une tonne est suspendue à la chaîne, et un dispositif mécanique impose un déplacement latéral alternatif. Les essais sont réalisés à sec et sous projection d'eau douce. (b) Photographie du dispositif d'essai associé.*

De manière générale, il est nécessaire de noter que l'usure est un phénomène complexe qui dépend de très nombreux paramètres. Parmi ceux-ci, on peut identifier de manière non exhaustive la tension de la chaîne, l'amplitude des mouvements relatifs, les matériaux en présence, la nature du troisième corps (eau de mer par exemple) et bien sûr la corrosion. Concernant ce dernier paramètre, il est aujourd'hui démontré que l'usure / corrosion est un processus plus rapide que chaque phénomène étudié seul. Par exemple, dans la zone de contact intermaille, la tension de la chaîne génère des pressions de contact importantes, qui, couplées aux mouvements relatifs des mailles, altèrent rapidement l'acier par un phénomène d'adhésion/grippage. La corrosion dans cette zone de contact est donc nécessairement accélérée par l'usure, car l'épaisseur de rouille qui protège naturellement l'acier est détruite au fur et à mesure des mouvements relatifs. La Figure I-49 montre une maille de chaîne observée immédiatement après être sortie de l'eau de mer. On constate aisément la couleur de l'acier gris dans la zone de contact. Cet acier visible est donc soumis en permanence au processus électrochimique de corrosion, il n'est pas protégé sous la couche importante de rouille visible ailleurs.




(a) (b)

*Figure I-48 –Maille de chaîne immédiatement sortie de l'eau de mer. (a) Les zones gris clair qui laissent entrevoir le métal à nu sont uniquement présentes dans les cintres, au niveau du contact intermaille. (b) Surface de contact agrandie avec microscope Keyence. L'acier nu apparaît nettement au contact entre des zones corrodées.*

Les typologies d'usure observées lors des opérations de maintenance peuvent être divisées en deux catégories. Les usures internes sont celles résultant des pertes de matière dues aux contacts entre les mailles. Les usures externes sont celles dues à un élément extérieur à la chaîne, comme le fond marin, les attaches avec les dispositifs flottants, les barbotins, les écubiers, les particules abrasives présentes dans les courants marins etc.

- **Usures internes**

Les usures internes sont observées principalement dans le contact intermaille. Elles possèdent des géométries typiques, peu variées, qui dépendent surtout du type de mouvement relatif entre les mailles : torsion, flexion uniaxiale ou flexion multiaxiale (voir définitions en Annexe C).

- Flexion uniaxiale seule

Les chaînes tendues, peu soumises à de la torsion ou à de la flexion multiaxiale, comportent des gorges à flancs droits qui pénètrent nettement dans les creux des cintres des mailles. La Figure I-49 (a) illustre ce type de perte de matière pour une chaîne reliant un ponton d'amarrage à un quai, dans une zone portuaire. Le quai est fixe, le ponton n'est soumis qu'aux mouvements de la marée, la rotation axiale de la chaîne n'est pas autorisée et la direction de la tension est inclinée par rapport à l'axe de la maille. La forme obtenue correspond à une gorge unique et inclinée dans la direction de l'effort. Des écoulements plastiques sont observables sur le bord de cette gorge. La Figure I-49 (b) provient de l'étude expérimentale menée par Robert Melcher et Yaghin Lotfollahi. Des chaînes sont mises en tension de manière gravitaire et sont soumises à un mouvement alternatif plan. L'absence de rotation induit deux flancs droits facilement identifiables, ainsi que des écoulements plastiques.



(a) (b)

*Figure I-49 – Usures de chaînes dont les rotations axiales ne sont pas autorisées : (a) maille de ponton d'amarrage en zone portuaire (Brest), (b) usures réalisées en laboratoire (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015).*

- Torsion et flexion multiaxiale

En présence de torsion ou de flexion multiaxiale, les géométries d'usures internes sont différentes. Les pertes de matière induisent une géométrie spécifique, sans flanc droit. Dans le plan principal de la maille, l'usure croit progressivement à partir des bras vers un maximum souvent situé au creux du cintre (voir Figure I-50 (a) et (b)). Ce type d'usure est généralement observé pour les ancrages à point unique, où la chaîne est sollicitée avec des orientations d'efforts très variables. C'est le cas, par exemple, des ancrages utilisés pour le maintien des bouées de signalisation maritime (voir I.1.4.1).



(a) (b)

*Figure I-50 – Usures dans des cintres de chaînes dont les rotations axiales sont autorisées. Mailles ayant servi à l'ancrage de bouées de signalisation maritime.*

- **Usures externes**

Concernant les usures externes (voir Figure I-51 (a) et (b)), les géométries observées sont extrêmement variées et donc difficilement prévisibles. Elles dépendent de la nature du corps externe qui vient en contact, et des mouvements relatifs de celui-ci par rapport aux mailles de la chaîne. Par exemple, dans la zone de contact avec le fond de la mer, les usures en présence

de sable ou de vase sont très différentes de celles constatées pour un sol rocheux et dur. De même, en cas de sol rocheux dur, l'usure sera très différente si le dispositif de surface est fortement exposé à la houle, ou protégé dans une baie : le pilonnement permanent de la chaîne sur le sol rocheux entraîne une détérioration très rapide de l'acier. C'est le cas, par exemple, de la chaîne d'ancrage du coffre situé devant le port du Stiff à Ouessant (voir Figure I-15(a)). Celle-ci est positionnée sur un sol rocheux et est particulièrement exposée à la houle. Malgré son calibre égal à 80 mm, elle doit être remplacée tous les deux ans seulement.



(a) (b)

*Figure I-51 – Usures externes : (a) usure externe très importante sur un bras d'une maille de chaîne relevée (Steenkiste et al., 2011), (b) usure externe sur un bras d'une maille de chaîne toujours en fonctionnement (Sachan, 2019).*

## I.2.4. Contrôle des chaînes d'ancrage

Les lignes d'ancrage subissent des agressions physico-chimiques qui réduisent progressivement les sections des mailles de chaîne. Les pertes de matières évoluent en fonction du temps, à des vitesses variables qui dépendent des chargements et des conditions environnementales. Les modèles prédisant les pertes de matière étant controversés (voir I.2.3.5 et I.2.3.6), il est préconisé de venir contrôler périodiquement les diamètres résiduels afin d'effectuer des remplacements si nécessaires. Les fréquences et les critères de mise au rebut sont variables en fonction des domaines d'utilisations. De manière générale, la diminution autorisée du diamètre des mailles varie de 40 % dans le domaine de la signalisation maritime, 12 % dans le domaine militaire et jusqu'à 2 % dans le domaine offshore. Ces critères sont détaillés par domaines, dans les trois paragraphes qui suivent.

- **Domaine de la signalisation maritime**

Dans le domaine de la signalisation maritime, les services de maintenance interviennent une fois par an pour contrôler les chaînes (CEREMA, 1997) et les débarrasser des agrégats biologiques. La fréquence d'intervention peut être augmentée à deux fois par an pour les sites

très exposés. L'agressivité des sites est répertoriée dans un document nommé « registre du balisage flottant » qui permet de rationaliser les interventions par la définition des vitesses moyennes d'usures constatées par site. Les mailles sont usuellement remplacées si les pertes de matière sont trop importantes : le diamètre résiduel ne doit pas être inférieur au 3/5 du calibre initial de la maille (réduction de 40 % du diamètre). En pratique, les usures les plus prononcées sont situées dans les creux des cintres pour les chaînes flottantes et les chaînes de culs de bouée, ou alors, sur le sommet et le long des bras pour la chaîne de marnage et la chaîne dormante (vocabulaire défini dans l'annexe B et la Figure I-14). La règle des 3/5 est adaptée en fonction de l'expérience des marins des Phares & balises, qui connaissent parfaitement les sites et les dispositifs implantés. Certains d'entre eux affirment savoir si une chaîne doit être changée en écoutant simplement le bruit qu'elle émet lorsque, une fois remontée, elle est déposée sur le pont des baliseurs : « un bruit de gourmette ». Il est notable que, dans le domaine de la signalisation maritime, les maillons qui ont été identifiés inaptes à l'emploi pour un site peuvent être réemployés sur un autre site avec de plus faibles exigences. Le dernier réemploi des chaînes consiste à les couler dans le béton des corps-morts afin d'augmenter leur densité.

- **Domaine militaire**

Dans le domaine militaire, les mouillages des navires sont eux aussi soumis à des contrôles réguliers (Marine nationale française, 2016). La périodicité d'inspection est usuellement de 3 ans, mais varie en fonction du type de bâtiment qui peut être suivi en classe (référentiel maritime civil) ou non suivi en classe (chasseur de mines, porte-avions…). Plusieurs types de contrôles sont alors réalisés, en particulier ceux définis ci-dessous.

- Pour 10% des mailles, contrôle du diamètre résiduel par deux mesures : une dans le creux du cintre et l'autre perpendiculairement. Il est toléré 12 % d'usure maximum.
- Pour 10% des mailles, contrôle du pas interne. Celui-ci ne doit pas dépasser de 8 % la longueur nominale théorique.
- Pour 4 longueurs de 5 mailles consécutives sur un maillon (dont les extrémités), contrôle de la longueur externe des 5 mailles consécutives qui sont mises en tension de manière à obtenir un contact franc. La longueur des 5 mailles mesurée ne doit pas dépasser de 8 % la longueur théorique.

Certains contrôles visuels complémentaires sont préconisés, mais sans relevés quantitatifs : tenue des étais, absence de défauts superficiels, de criques, de défauts de soudure, etc.

- **Domaine offshore pétrole & gaz**

Dans le domaine offshore, les contrôles des lignes d'ancrage sont préconisés à des fréquences variables qui dépendent du type d'installation considérée. Ces contrôles peuvent, par exemple, consister en de simples inspections visuelles chaque année, ou alors, tous les 5 ans, ils nécessitent un nettoyage complet des chaînes et une vérification dimensionnelle précise de

chaque maille (Bureau Veritas, 2015; IACS, 2010). Les mailles contrôlées sont considérées comme défaillantes si l'un des deux critères suivants n'est pas vérifié (valeurs indiquées préconisées par le Bureau Veritas) :

- La moyenne de deux mesures de diamètre doit rester supérieure à 95 % du calibre de la chaîne. Les mesures sont prises perpendiculairement entre elles.
- Les diamètres, mesurés dans n'importe quelle direction, doivent être supérieurs à 90 % du calibre de la chaîne.

Si, lors de la phase de conception, il est pris en compte une surépaisseur de corrosion, le calibre de chaîne considéré pour les critères ci-dessus est celui qui est estimé en fin de vie. En outre, comme l'inspection des chaînes n'est pas toujours possible hors d'eau, il n'est techniquement pas possible d'effectuer des mesures directes dans les zones de contact intermaille : les mailles ne sont pas séparables du fait des tensions présentes. Les diamètres dans ces zones de contact sont alors obtenus en divisant par deux la mesure d'épaisseur des deux diamètres consécutifs, tel que représenté en Figure I-52.

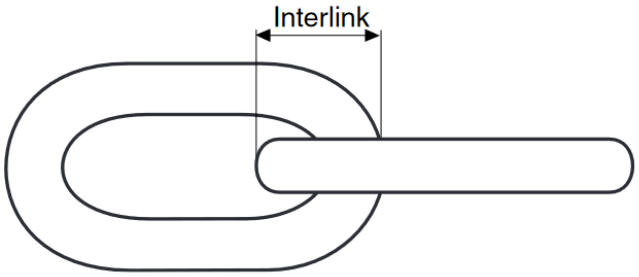



*Figure I-52 - Mesure du diamètre dans les zones de contact intermaille. Le diamètre est obtenu en divisant par deux la mesure indiquée (Bureau Veritas, 2015).*

Des indications complémentaires sont préconisées telles que l'identification de larges piqûres ou de crevasses sur la maille. La zone de soudure par étincelage doit faire l'objet d'une attention particulière. Dans le cas où les critères de vérification ne sont pas respectés, ou si des formes singulières de pertes de matières sont observées, il est toujours possible de ne pas remplacer la maille, mais à condition de prouver la bonne tenue de celle-ci par des moyens appropriés. Dans le cas de chaînes avec étais, si celui-ci est manquant, la maille sera définitivement considérée comme défaillante (pour rappel, voir I.2.3.2). Notons pour finir que les valeurs des critères dimensionnels indiqués ci-dessus sont majorées à 98 % pour le Det Norske Veritas (Det Norske Veritas, 2010, p. 50).

# I.3. GÉOMÉTRIES TRIDIMENSIONNELLES DES MAILLES

Aujourd'hui, les contrôles géométriques des chaînes sont très majoritairement réalisés avec des mesures obtenues par des instruments traditionnels de métrologie, comme les pieds à coulisse ou les micromètres. L'instrumentation utilisée limite donc les connaissances sur les géométries des mailles et, en conséquence, sur leur vieillissement et leurs charges résiduelles. Les géométries tridimensionnelles des mailles neuves ou usées sont donc à ce jour peu documentées. Certaines études (Emmanuel Fontaine et al., 2014; Pederson et al., 2013; Sachan, 2019) commencent cependant à utiliser les scanners 3D optiques pour identifier les géométries tridimensionnelles utiles (voir Figure I-53 (a) et (b)).



(a)



(b)

*Figure I-53 – Géométrie tridimensionnelle de mailles (Emmanuel Fontaine et al., 2014) : (a) opération de numérisation tridimensionnelle de mailles par photogrammétrie, (b) maille numérisée.*

Un certain nombre de perspectives ouvertes par la connaissance précise des modèles 3D des mailles de chaînes sont décrites ci-dessous.

## I.3.1. Perspectives attendues

Les scanners 3D sont des dispositifs de mesure permettant de capturer, sans contact, les géométries tridimensionnelles de pièces mécaniques. Les caractéristiques de ces appareils seront présentées dans le paragraphe (I.3.2). Leur capacité à obtenir des informations géométriques complémentaires, non connues à ce jour, ouvre de nouvelles perspectives pour de futurs travaux de recherche. Quelques-unes de ces perspectives sont proposées ci-dessous.

- Evolution temporelle des géométries tridimensionnelles d'usures

Les vitesses d'usure de chaînes d'ancrage sont habituellement répertoriées en fonction des sites d'implantation. Il existe des données nombreuses à ce sujet, mais elles sont souvent peu accessibles. Ces données réelles correspondent à des relevés tels que définis au paragraphe I.2.4 : ce sont donc des contrôles dimensionnels par mesures localisées. Ces valeurs dépendant de nombreux paramètres, souvent peu répertoriés, il est difficile d'identifier les facteurs influents qui auraient pu permettre de proposer des modèles temporels paramétrés de perte de matière. Afin d'identifier plus justement ces modèles, il est néanmoins possible d'enrichir les données de vieillissement des chaînes, en envisageant des relevés tridimensionnels réguliers de chaînes d'ancrage dont les conditions d'utilisation sont clairement répertoriées. Pour identifier ces modèles temporels paramétrés, il est également envisageable de réaliser des essais en laboratoire, avec des machines de traction spécifiques, permettant un paramétrage contrôlé en force et en cinématique. D'un point de vue expérimental, des travaux similaires ont déjà été réalisés par Robert Melchers en 2015 (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015), mais uniquement en flexion monoaxiale ce qui limite l'utilisation des résultats (voir forme d'usures typiques en Figure I-49 (b)).

De manière non exhaustive, les résultats attendus pour ces relevés in situ et pour les essais en laboratoire sont : la perte de masse temporelle, la variation de la géométrie tridimensionnelle des mailles en fonction du temps, la distinction entre les pertes de masse par corrosion et les pertes de masse par usure de contact. Pour rappel, cette distinction n'est pas effectuée aujourd'hui par les organismes de certification (voir chapitre I.2.3.5). Ces résultats attendus sont un préalable nécessaire aux perspectives envisagées concernant les résistances résiduelles qui sont décrites ci-dessous.

- Charges résiduelles de rupture

Lors des opérations de maintenance d'une chaîne en service, la géométrie altérée de certaines mailles peut laisser craindre une diminution trop importante de la résistance à la rupture. Les essais de traction n'étant pas envisageables, la connaissance de la géométrie 3D de ces mailles ouvre la possibilité de justifier par calcul numérique, auprès des organismes de contrôle, le maintien en service ou la mise au rebut. Ce travail a déjà été entrepris par Emmanuel Fontaine en 2012 (Fontaine et al., 2012), ainsi que Ankit Sachan en 2019 (Sachan, 2019). Les méthodes utilisées ne peuvent cependant pas encore être généralisées, car les résultats rapportés sont basés sur des données encore trop peu nombreuses.

- Fatigue en traction simple

La durée de vie en fatigue des mailles est aujourd'hui obtenue par des simulations numériques et des essais réalisés avec des mailles neuves, non usées (Fernández et al., 2014; Martinez Perez et al., 2019). Il est cependant notable que la perte de matière au niveau du contact intermaille induit une augmentation progressive de la surface de contact et donc une modification des contraintes qui affectent, en conséquence, l'estimation des durées de vie. L'amélioration des modèles prédictifs de fatigue, aujourd'hui associés à des coefficients de sécurité importants (voir I.2.3.2), requiert donc une meilleure connaissance des géométries temporelles et

tridimensionnelles des mailles. Comme indiqué précédemment, celles-ci peuvent être évaluées : en laboratoire avec l'aide de bancs d'essai spécifiques, ou in situ, par des relevés successifs de géométries 3D de chaînes immergées.

- Fatigue due aux moments hors plan et torsions des chaînes

L'endommagement des mailles par fatigue est majoré par la présence de moments hors plans. Ce phénomène est dû au verrouillage des mailles, par frottement ou par blocage géométrique, ce qui empêche les mobilités attendues et crée des moments complémentaires générant une majoration des contraintes. À ce jour, les études à ce sujet ne prennent en compte que des géométries parfaites de mailles (voir I.2.3.3), or il semble important d'analyser ce phénomène en présence de mailles usées : l'altération progressive de la surface de contact intermaille influe nécessairement sur les mouvements possibles. Cette même réflexion peut être conduite sur les phénomènes de torsion (voir I.2.3.4), même si ce mouvement de chaîne semble moins pénalisant que les moments hors plans.

- Contrôle des géométries de fabrication

La connaissance des géométries tridimensionnelles des mailles après fabrication peut permettre de vérifier de manière automatique, par traitement informatique, l'adéquation des géométries fabriquées aux exigences des organismes de certification (voir I.2.2.1). Ceci apporterait, en outre, une connaissance plus précise de la géométrie des cintres dans lesquels la section du barreau, initialement cylindrique, a été déformée par les opérations de cintrage.

- Modèles analytiques

Il existe depuis très longtemps des modèles analytiques, élastiques linéaires, prédisant les comportements mécaniques de mailles neuves, de géométrie parfaite (Goodenough and Moore, 1907). La connaissance précise des géométries tridimensionnelles des mailles permet d'envisager l'adaptation de ces modèles mécaniques : pour des mailles neuves, par une meilleure connaissance des déformées dans les cintres, et pour des mailles usées, par la prise en compte de géométries paramétrées d'usure.

La création de modèles analytiques de mailles usées répond à un besoin, en particulier, dans le domaine de la signalisation maritime. Il serait ainsi possible de permettre, de manière plus rigoureuse et sans moyens numériques lourds, la quantification approchée de la résistance résiduelle en traction. Un calcul simple et véloce peut ainsi aider à une prise de décision plus rationnelle pour les équipages devant souvent faire un choix rapide de remplacement, ou de remise à l'eau, des chaînes montées à bord (voir I.2.4). Il s'agit ici de proposer des critères complémentaires pour contrôler les chaînes lors des opérations de maintenance.

## I.3.2. Moyens et méthodes d'acquisition des images 3D

### I.3.2.1. Scanners 3D - généralités

- **Introduction**

Les scanners 3D sont des appareils électroniques conçus pour capturer la géométrie tridimensionnelle d'un objet physique afin de la convertir en modèle numérique. Les modèles 3D obtenus sont surfaciques : seules les surfaces visibles des objets sont capturées. Si des informations sont attendues sur les parties internes des pièces, il sera alors nécessaire d'utiliser d'autres technologies. Par exemple, les tomographes sont des dispositifs basés sur la radiographie à rayon X et sont destinés à créer une représentation spatiale de la densité des pièces analysées. Les scanners 3D sont utilisés dans des domaines variés, notamment en ingénierie mécanique, en architecture, en médecine, en archéologie et bien d'autres. Le fonctionnement des scanners 3D est souvent scindé en 3 étapes successives.

- L'acquisition des données : le scanner émet des signaux (p. ex. laser, lumière structurée, son) et capture les grandeurs physiques produites par l'interaction entre les signaux émis et l'objet à numériser (p. ex. temps de retour, déphasage, images).
- Traitement des données : les données capturées sont traitées mathématiquement afin de reconstruire la géométrie tridimensionnelle sous forme de nuages de points. La triangulation (Forest Collado, 2004) est une des méthodes mathématiques utilisées afin de réaliser cet objectif.
- Post-traitement : une fois le nuage de points créé, des logiciels de post-traitement peuvent être utilisés pour nettoyer, réparer, assembler et améliorer le modèle, ainsi que pour l'exporter dans différents formats de fichier.

Les scanners 3D se distinguent selon de nombreuses spécificités : type de signaux émis, avec ou sans contact, efficacité des algorithmes utilisés, rapidité d'acquisition, précision obtenue, résolution minimale, simplicité d'utilisation, portabilité, etc. Quelques-unes de ces spécificités, dont la compréhension est nécessaire pour le travail qui va suivre, seront décrites ci-dessous.

- **Types de scanners adaptés**

La capture des géométries 3D d'un objet physique implique la visualisation de celui-ci suivant toutes les orientations de l'espace. Cette nécessité de multiplier les prises de vues impose un déplacement relatif entre l'objet physique et le scanner. Dans le cas des chaînes et dans un contexte de contrôle non destructif, leur longueur et leur masse importantes impliquent un choix de déplacement du scanner, plutôt que des chaînes. De plus, cette opération devant être réalisée en dehors des laboratoires (pont de navires, quais de zones portuaires, ateliers), l'appareil utilisé est nécessairement portatif. Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) sont en

conséquence exclues de ce champ d'applications et, de manière générale, il en est de même pour les appareils de mesure par contact (palpeurs). Les scanners 3D optiques et portatifs seront donc privilégiés pour l'acquisition des géométries tridimensionnelles des mailles de chaînes. Dans la catégorie des scanners 3D optiques et portatifs, on distingue trois types de technologies : l'utilisation de laser, la photogrammétrie et la projection de lumière structurée.

- Scanners de type LIDAR

Ce type de scanner est souvent désigné par l'acronyme LIDAR signifiant « Light Detection And Ranging », mais ce terme générique, peu précis, englobe plusieurs technologies distinctes. De manière générale, les scanners de type LIDAR émettent un faisceau laser sur la surface de l'objet à numériser. Le laser est réfléchi, et un capteur photosensible détecte le signal. En mesurant le temps de vol du signal ou le décalage de phase entre l'onde envoyée et l'onde reçue, le scanner mesure la distance entre l'émetteur du laser et le point éclairé de l'objet. Associée à la connaissance précise de la distance et de l'angle entre l'émetteur et le capteur du scanner, une triangulation permet de définir les coordonnées spatiales du point mesuré (voir Figure I-54 (a)). Un balayage est réalisé en réorientant le faisceau laser, et des dizaines de milliers de points, voire des centaines de milliers, peuvent être capturés par seconde. Les données collectées sont ensuite traitées pour reconstruire un modèle 3D de l'objet, dans un repère associé au scanner. Ce type d'appareil sert à l'acquisition de géométries de grandes tailles (topologie, bâtiment), mais la technologie impose une position fixe de l'appareil pendant la mesure ou une connaissance précise du déplacement de celui-ci. Des trépieds de maintien sont alors souvent utilisés (voir Figure I-54 (b)).




(a) (b)

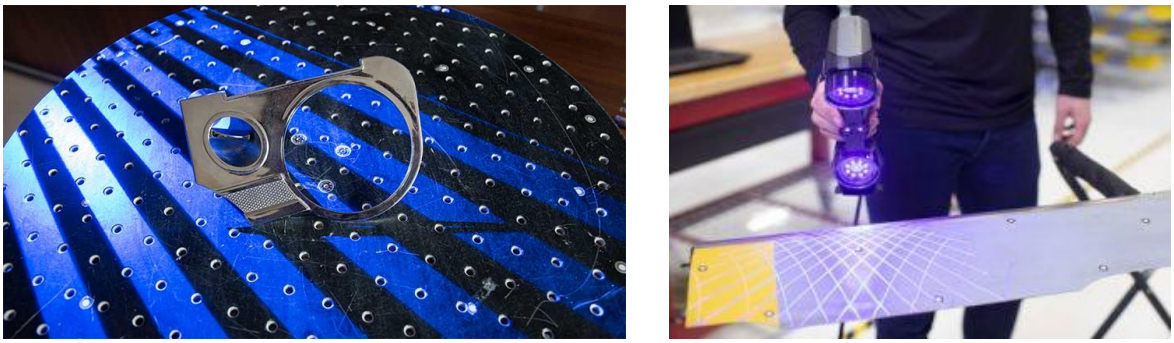
*Figure I-54 – Scanner de type LIDAR : (a) triangulation laser permettant l'obtention des coordonnées spatiales du point mesuré (3Dnatives, 2019), (b) scanner laser de type FARO Focus, monté sur trépied et utilisé dans le cadre d'applications de génie civil (FARO, 2024).*

- Scanners avec projection de lumière structurée

Les scanners utilisant de la lumière structurée projettent un motif lumineux (voir Figure I-55 (a) et (b)) sur l'objet physique à numériser. Ces motifs peuvent être des lignes, des franges ou des grilles (Salvi et al., 2004), et les projecteurs sont principalement des lasers ou des lampes à

LED. Lorsque le motif lumineux atteint la surface à numériser, il se déforme en fonction de la géométrie de cette surface. Plusieurs caméras positionnées sur le scanner, avec des points de vue différents, capturent alors ces motifs déformés et un traitement mathématique permet ensuite de construire un nuage de point dans un repère local associé au scanner (Zhang, 2010). Les lumières utilisées dépendent des fabricants de scanners : blanches, monochromatiques, dans le domaine visible ou invisible. Par exemple, la lumière bleue monochromatique peut offrir un meilleur contraste par rapport à d'autres couleurs, ce qui permet la capture de détails plus fins. Ensuite, cette lumière étant moins sensible aux interférences et aux variations des lumières ambiantes, elle facilite l'acquisition des géométries dans différentes conditions d'éclairage. Enfin, utilisée dans une gamme de longueurs d'onde qui la rend invisible à l'œil humain, elle peut réduire le risque de fatigue oculaire pour l'opérateur.

Outre sa précision et sa rapidité d'acquisition, l'intérêt majeur de la projection de lumière structurée est que le scanner peut être mobile, sans connaissance précise du mouvement relatif par rapport à l'objet numérisé. Ainsi, le scanner devient non seulement portable, mais aussi manuel : le scanner est déplacé manuellement autour de l'objet à numériser, un trépied fixe n'est plus nécessaire.



(a) (b)

*Figure I-55 – Projection de lumière structurée : (a) motif de franges utilisé par un scanner de type HEGAGON SmartScan (HEXAGON, 2024), (b) motif de grille utilisé par un scanner de type CREAFORM HandySCAN 3D (CREAFORM, 2019).*

- Scanners par photogrammétrie

La photogrammétrie est une méthode qui date du XIX$^{e}$ siècle et qui permet d'obtenir des informations tridimensionnelles à partir de clichés photographiques bidimensionnels. Les scanners par photogrammétrie utilisent donc des photographies pour mesurer et reconstruire des objets en trois dimensions. Il n'y a pas d'utilisation de laser, ni de projection de lumière structurée sur l'objet à numériser. Ainsi, la photogrammétrie doit être davantage considérée comme une méthode de calcul, plutôt qu'une technologie de scanner spécifique, et ceci même si certains fabricants fournissent des scanners basés uniquement sur ce principe.

La photogrammétrie peut être utilisée à partir d'images fournies par des appareils photographiques courants, cependant la précision du modèle 3D obtenu dépend de la qualité de l'appareil choisi (déformation des images, résolution …). En outre, les images doivent posséder des parties communes afin de permettre leur superposition. Il faut aussi qu'elles soient suffisamment nombreuses afin de permettre une reconstitution complète de l'objet. Les traitements mathématiques utilisés pour construire le modèle 3D évoluent en permanence et font encore l'objet de nombreuses publications (Govindu, 2001; Jiang et al., 2024; Tomasi and Kanade, 1992). Comme pour les appareils à lumière structurée, la photogrammétrie permet l'utilisation d'appareils portables et manuels qui nécessitent (ou pas) des motifs collés sur l'objet physique à numériser (voir Figure I-56).



(a) (b)

*Figure I-56 – Utilisation d'un scanner photogrammétrique SCANTECH MSCAN-L15 dans le cadre de la numérisation d'un réacteur d'avion. On peut noter la présence de motifs collés sur le réacteur qui permettent la simplification et l'amélioration du processus d'alignement des images (SCANTECH, 2023).*

- **Précision (ou erreur de mesure)**

La précision est un terme générique qui permet de décrire, dans le vocabulaire courant, la qualité des résultats obtenus par des appareils de mesure. Ce terme est souvent mal utilisé, car il se substitue au terme plus exact qu'est l'« erreur de mesure ». Il est ici nécessaire d'apporter quelques informations complémentaires à ce sujet. La Figure I-57 illustre la densité de probabilité d'obtenir une valeur dans un échantillon de mesures réalisées. La valeur de référence indiquée dans ce graphique correspond à la mesure exacte de la grandeur que l'on cherche à estimer (mesurande). L'erreur de mesure est la somme d'une erreur aléatoire, qui varie de façon imprévisible, et d'une erreur systématique.

- L'erreur aléatoire est définie comme la proximité des mesures les unes par rapport aux autres. Elle peut être quantifiée, par exemple, par l'écart-type de l'ensemble des valeurs

de l'échantillon. L'erreur aléatoire est aussi nommée variabilité, précision, dispersion statistique, répétabilité.

- L'erreur systématique est définie comme la proximité des mesures par rapport à la valeur de référence. Elle peut être définie comme étant la différence entre la valeur moyenne des mesures avec la valeur de référence. L'erreur systématique est aussi nommée exactitude, biais, justesse.

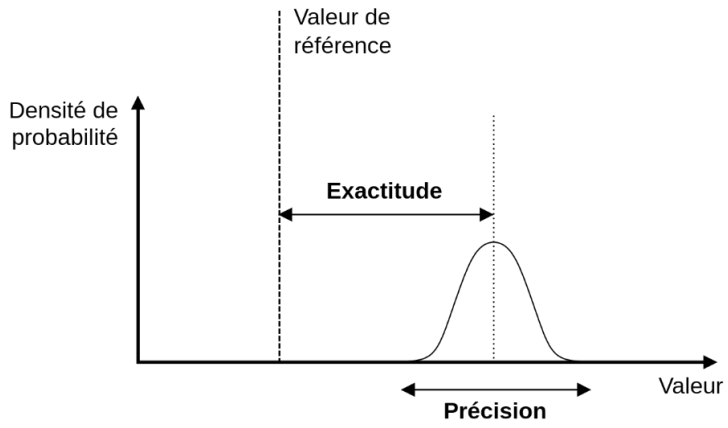
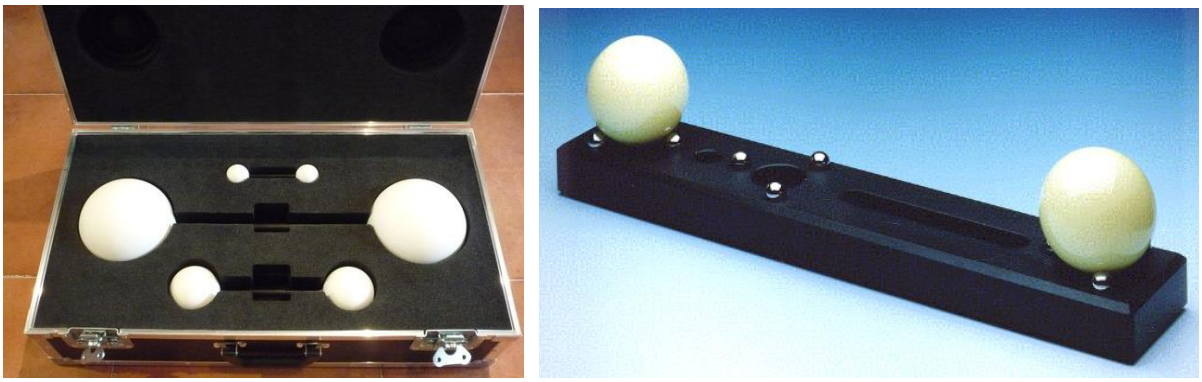



*Figure I-57 - Schéma explicatif concernant la précision et l'exactitude.*

La norme VDI 2634 (VDI, 2008) est une norme allemande qui définit les exigences pour l'évaluation de la précision des systèmes de mesure optiques tridimensionnels, en particulier pour les scanners laser et pour les scanners à projection de lumière structurée. Ainsi les fabricants de scanners 3D peuvent faire référence à cette norme afin de définir la « précision » de leurs appareils. La VDI 2634 propose, entre autres, d'utiliser des sphères calibrées (voir Figure I-58 (a) et (b)) afin de réaliser les tests de mesure. Les mesures sont effectuées en deux étapes : la barre comprenant les deux sphères est digitalisée séquentiellement en deux positions dans le champ de vision du scanner testé (voir Figure I-59). Les deux mesures permettent d'obtenir deux géométries 3D dans lesquelles les parties sphériques sont identifiées. Les diamètres des sphères et les distances centre à centre sont alors calculés à l'aide de la méthode des moindres carrés. Les différences par rapport aux valeurs de référence doivent alors rester inférieures à la « précision » indiquée par le fabricant.

Les résultats présentés en Figure I-59 sont ceux d'un scanner de type Artec Space Spider. L'écart maximal relevé est égal à 0.022 mm, valeur inférieure à la « précision » de 0.050 mm, indiquée par le constructeur Artec. Il est important de constater ici que la notion de précision indiquée pour cet appareil ne distingue pas l'erreur aléatoire de l'erreur systématique. En outre, les résultats affichés sont réalisés avec deux scans uniquement, ce qui empêche un traitement statistique des résultats. Notons, de plus, que la précision indiquée est déduite d'un traitement de nuage de point par la méthode des moindres carrés, ceci ayant pour conséquence de diminuer

grandement l'erreur aléatoire lors du calcul des propriétés géométriques des sphères. En conséquence, il est nécessaire de garder à l'esprit, lors de l'exploitation des scans réalisés, que l'erreur obtenue sur la position spatiale d'un seul point de scan peut en conséquence être supérieure à la « précision » affichée par le constructeur de scanners utilisant cette norme.



(a) (b)

*Figure I-58 – Contrôle de précision : (a) sphères calibrées en diamètre et en position, fabriquées par Trapet Precision Engineering (Trapet Precision Engineering, 2024), (b) ball bar avec sphères amovibles (Luhmann and Wendt, 2000).*

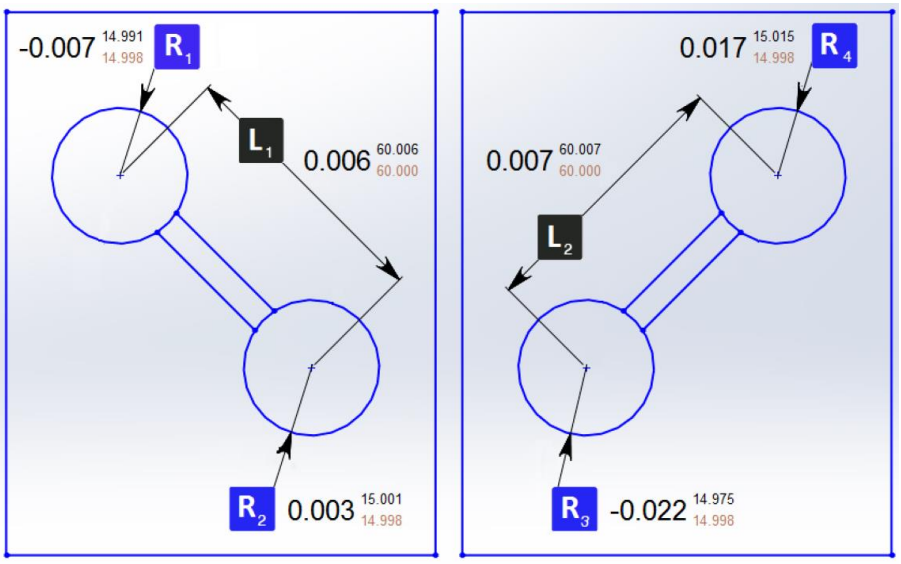



*Figure I-59 - Résultats de test pour un scanner 3D de type Artec Space Spider. Les cotes indiquées en orange sont les valeurs de références. Les chiffres utilisant les grandes polices sont les erreurs par rapport aux valeurs de référence.*

- **Résolution des scanners 3D**

La résolution est le paramètre qui représente la capacité d'un appareil à capturer les petits détails d'un objet physique et à les retranscrire en modèle numérique. Par exemple, la résolution d'un

appareil photographique est intrinsèquement liée au nombre de pixels présents dans une image. La Figure I-60 illustre la déformation observée sur un cercle, à la suite du processus de discrétisation d'une image : pour une même taille d'image, plus la quantité de pixels est importante, moins le cercle semble déformé.

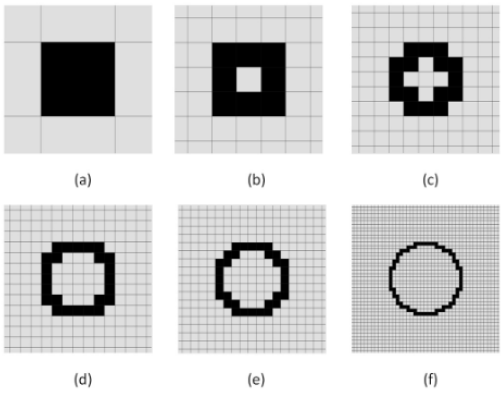



*Figure I-60 - Cercle représenté par plusieurs images avec un nombre de pixel croissant (Herrera-Navarro et al., 2012).*

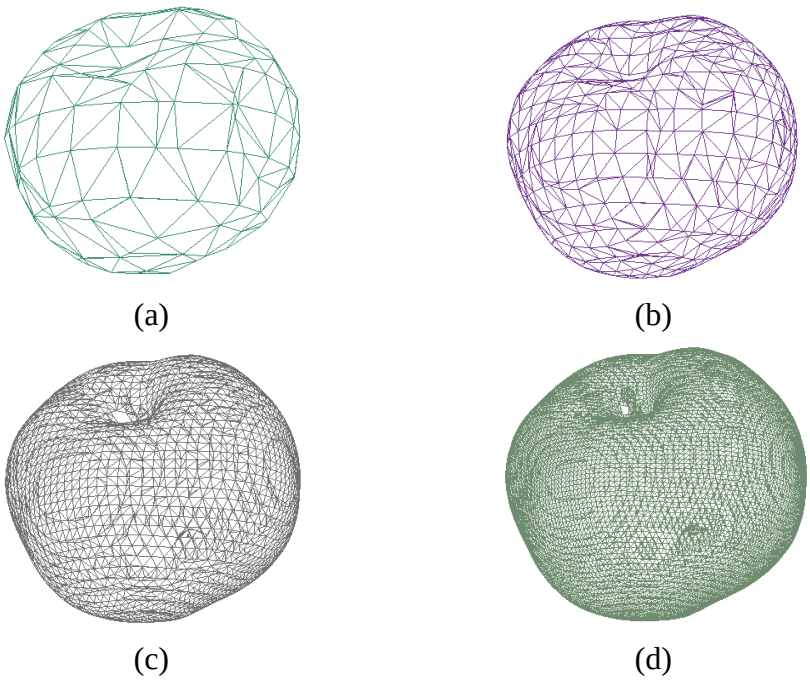



*Figure I-61 - Scan d'une pomme : (a) résolution de 10 mm, (b) résolution de 5 mm, (c) résolution de 2 mm, (d) résolution de 1 mm. Plus la résolution est faible, plus les détails apparaissent.*

Concernant les scanners 3D, la résolution correspond à la plus petite distance entre deux points à travers le modèle 3D généré. Plus la résolution d'un scan est élevée, plus le nombre de points sera important et plus il y aura de détails dans le modèle. La Figure I-61 illustre 4 maillages

extraits d'un même scan de pomme, dont la résolution est de plus en plus petite. On constate que le pédoncule commence à apparaître à partir d'une résolution de 2 mm. En contrepartie de la finesse des détails numérisés, plus la résolution d'un scan est élevée, plus le fichier associé sera lourd et plus les capacités de stockage et de traitement devront donc être importantes. La Table 9 illustre l'augmentation de la taille des fichiers des scans en fonction de la résolution choisie : il est possible de constater que la diminution d'un facteur 10 de la résolution augmente d'un facteur 100 environ la taille du fichier généré. Afin d'éviter ces problèmes, une adéquation doit donc être trouvée entre la résolution choisie et le type d'utilisation du modèle 3D généré (métrologie ou autres).

*Table 9 – Scan 3D d'une pomme : comparaison de la taille sur le disque des fichiers 3D paramétrés avec des résolutions différentes (format STL).*

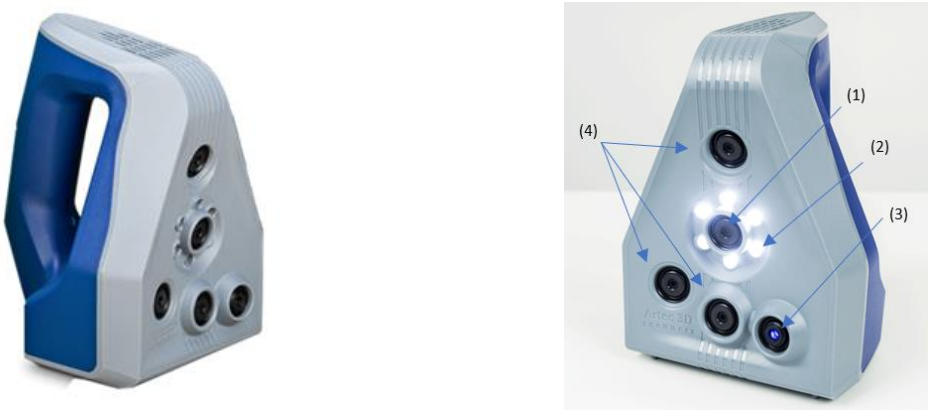
| **Résolution (mm)** | **Taille du fichier sur le disque (ko)** | **Nombre de points du maillage** |
|---|---|---|
| 10 | 21 | 1 242 |
| 5 | 77 | 4 674 |
| 2 | 482 | 29 556 |
| 1 | 1 927 | 118 344 |
| 0.5 | 7 719 | 474 228 |
| 0.1 | 192 597 | 11 833 143 |

#### I.3.2.2. Scanner utilisé dans cette étude

Dans la suite de cette étude, le scanner utilisé est un appareil de type Artec Space Spider (Artec 3D, 2024) basé sur une technologie de lumière bleue structurée, dans le domaine invisible. Une vue générale de ce scanner portatif est donnée en Figure I-62 (a). La Figure I-62 (b) permet l'identification des différents composants optiques permettant l'acquisition 3D :

- (1) Caméra couleur permettant la capture d'images 2D de 1.3 Méga pixels, avec une profondeur de couleur égale à 24 bits par pixels.
- (2) LED de lumière blanche générant des flashs lumineux, pour la capture des images couleur 2D.
- (3) Émetteur de lumière structurée bleue invisible.

- (4) Capteurs pour l'acquisition du motif de lumière structurée.




(a) (b)

*Figure I-62 – Artec Space Spider : (a) vue générale du scanner 3D optique, (b) identification des différents composants permettant l'acquisition 3D.*

Cet appareil ne nécessite pas d'utilisation de marqueurs collés sur l'objet physique : les nuages de points scannés sont assemblés « à la volée » par des algorithmes robustes et rapides. Outre l'acquisition des géométries tridimensionnelles, l'Artec Space Spider permet aussi l'acquisition des textures des objets physiques, c'est-à-dire la couleur de ceux-ci : chaque facette du maillage est associée à une couleur capturée périodiquement par l'appareil photographique intégré (voir Figure I-63 (a) et (b)).



(a) (b)

*Figure I-63 – Capture des couleurs. (a) Scan d'une pomme défini avec une résolution de 1 mm et visualisé en mode solide, c'est-à-dire faisant apparaître les facettes du maillage éclairées virtuellement par une source lumineuse. (b) Scan identique, visualisé en mode solide, mais faisant apparaître les couleurs capturées de la pomme, qui sont associées à chaque facette du maillage.*

L'Artec Space Spider pèse seulement 850 g, il est donc aisément manipulable et transportable. Cependant, avant son utilisation, celui-ci nécessite un temps de chauffe pour atteindre une température optimale qui est proche de 36 °C. Cette température de fonctionnement est

nécessaire pour garantir un positionnement relatif optimal des capteurs et de l'émetteur de lumière structurée. Le temps de chauffe dépend de la température initiale de l'appareil : 2 min environ si la température de celui-ci avoisine 20°C (conditions de laboratoire), et jusqu'à une demi-heure si les acquisitions sont réalisées à l'extérieur, en période hivernale.

Outre l'attente nécessaire pour atteindre la température de fonctionnement optimale, il est important de noter (même si le fabricant minimise cet aspect) que les acquisitions en dehors du laboratoire peuvent parfois être difficiles du fait des conditions d'éclairage variables rencontrées : soleil, passage de nuages intermittents, néons. En effet, ces conditions d'éclairage engendrent des reflets sur les objets à scanner et ceux-ci empêchent une capture correcte de la géométrie tridimensionnelle. Ces reflets peuvent cependant être éliminés par l'application soignée de sprays matifiants sur les surfaces brillantes. Cette technique est aussi employée pour scanner des pièces transparentes ou noires qui ne permettent pas une réflexion correcte des motifs projetés de lumière structurée. En plus des reflets directs sur la pièce à scanner, la présence d'une lumière intense (p. ex. soleil) induit aussi des reflets sur l'écran de l'ordinateur associé au scanner, or la visualisation de celui-ci est indispensable lors du processus d'acquisition. Enfin, il est aussi constaté qu'une lumière puissante dans le champ de vision de l'appareil aveugle les capteurs, ce qui rend très difficile l'acquisition 3D et ceci même s'il n'y a pas de reflet sur l'objet physique à scanner. De ces différentes observations, il est donc important de conclure qu'une utilisation en milieu extérieur n'est pas aisée du fait des conditions d'éclairage. Une protection de la zone de travail doit donc être envisagée, par exemple, en dressant une tenture opaque pour isoler la zone de travail des sources lumineuses perturbatrices.

Malgré ces quelques inconvénients nécessitant une bonne maîtrise des conditions d'utilisation, le scanner Artec Space Spider, associé au logiciel d'acquisition et de traitement Artec Studio 15, produit des modèles numériques très performants : la précision et la résolution revendiquées par le fabricant Artec sont respectivement égales à 0.05 mm et 0.1 mm.

#### I.3.2.3. Méthodes d'acquisition et de post-traitement

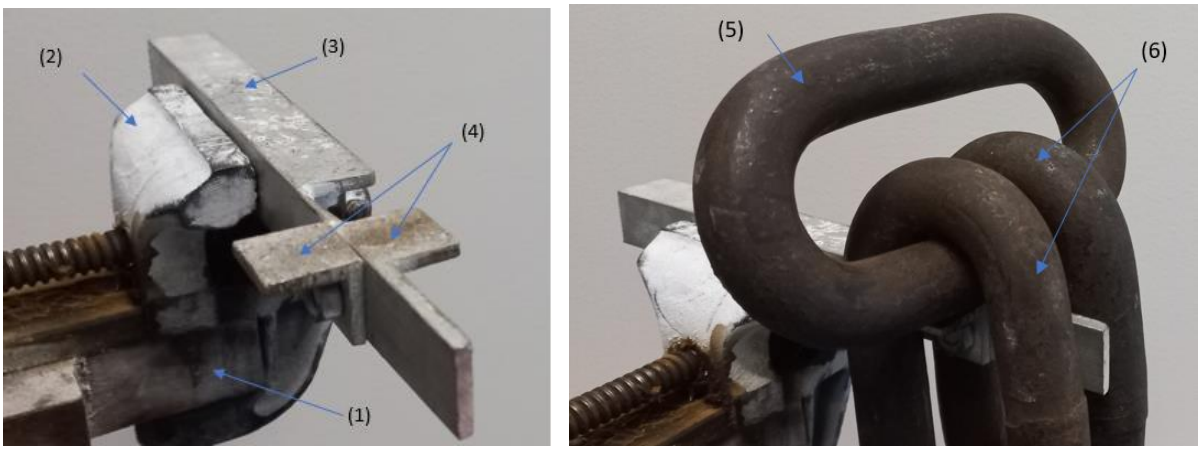
- **Acquisition des scans**

Le contexte de ce travail impose l'acquisition de la géométrie 3D de mailles de chaînes sans employer de méthode destructive de mesure. Ainsi, la découpe des mailles adjacentes à la maille étudiée est proscrite. Les mailles sont donc scannées en présence des deux mailles adjacentes, mais aussi en présence d'un dispositif indispensable de maintien en position de la chaîne. Celui-ci est observable en Figure I-64.

La description numérotée des éléments de ce dispositif est fournie ci-dessous :

- (1) Support en bois permettant de surélever la chaîne par rapport à sa surface générale d'appui (sol, quai, pont de navire).

- (2) Étau de maintien lié rigidement au support en bois.
- (3) Équerre de dimensions variables (dépendant de la taille des mailles à numériser), maintenue dans les mâchoires de l'étau.
- (4) Plateau support sur lequel la maille étudiée vient s'appuyer.
- (5) Maille à numériser, simplement posée sur le plateau support.
- (6) Mailles adjacentes suspendues plaquant par gravité la maille étudiée sur le plateau support.




(a) (b)

*Figure I-64 – Dispositif de maintien des mailles : (a) description des éléments du dispositif de maintien, (b) position des mailles sur le dispositif de maintien. Les mailles adjacentes (6) plaquent la maille à scanner (5) qui reste en équilibre sur le support (4).*

Comme les surfaces de contact entre les pièces sont non visibles par le scanner, le séquencement d'acquisition doit imposer un déplacement relatif des pièces pour qu'à la fin du processus, toutes les surfaces aient au moins été observées une fois par le scanner 3D. Outre le positionnement relatif des mailles et du support, il est notable que la géométrie spécifique étudiée ne permet pas de numériser facilement la partie interne des bras et les creux des mailles. A contrario, les formes externes sont facilement numérisables. Des observations suivant des directions spécifiques doivent donc être imposées lors de la procédure d'acquisition.

La méthode de numérisation qui sera utilisée pour cette étude prend en compte les diverses directions d'observation utiles, ainsi que les différentes positions relatives attendues pour rendre visible l'intégralité de la surface de la maille étudiée. Les différentes étapes de cette méthode sont décrites en Figure I-65, de (a) à (f). Des pastilles de couleurs sont ajoutées sur les images afin de permettre une meilleure compréhension de la réorientation des mailles à chaque étape. Six différents scans sont nécessaires, mais ce nombre peut être réduit à 4 en présence de mailles sans étai. À la suite des acquisitions, les parties des nuages de points qui appartiennent

aux pièces supplémentaires sont supprimés « manuellement » avec le logiciel Artec Studio 15 qui est utilisé pour le post-traitement des scans.



(a)

*Scan n°1 : Le bras gris/orange repose sur le support, le bras bleu/jaune est incliné vers l'arrière, les mailles adjacentes sont plaquées contre l'étai. Les mailles adjacentes et le support masquent la majorité des surfaces du bras gris/orange. L'opérateur accentue la capture des surfaces internes du bras côté bleu, et des cintres côtés violet et rouge.*



(b)

*Scan n°2 : La maille est réorientée angulairement vers l'avant. Le bras gris/orange repose toujours sur le support. L'opérateur accentue alors la capture des surfaces internes du bras côté jaune, et des cintres côtés bleu clair et vert.*



(c)

*Scan n°3 : La maille est renversée haut/bas. Le bras jaune/bleu repose désormais sur le support, les mailles adjacentes sont plaquées contre l'étai. Les mailles adjacentes et le support masquent la majorité des surfaces du bras jaune/bleu. L'opérateur accentue la capture des surfaces internes du bras côté gris, et des cintres côtés vert et bleu clair.*



(d)

*Scan n°4 : La maille est réorientée angulairement vers l'avant. Le bras jaune/bleu repose toujours sur le support. L'opérateur accentue alors la capture des surfaces internes du bras côté orange, et des cintres côtés rouge et violet.*



(e)

*Scan n°5 : La maille est réorientée de manière horizontale, la face bleue/rouge/orange/violette repose sur le support, les mailles adjacentes sont plaquées contre les cintres. L'opérateur accentue la capture des surfaces de l'étai, côté jaune/gris.*



(f)

*Scan n°6 : La maille est retournée, la face gris/vert/jaune/bleu clair repose sur le support, les mailles adjacentes sont plaquées contre les cintres. L'opérateur accentue la capture des surfaces de l'étai, côté orange/bleu.*

*Figure I-65 – (a), (b), (c), (d), (e) et (f) : étapes successives utiles pour la construction d'une géométrie 3D complète de maille avec étai.*

- **Post-traitement des scans**

À la suite de l'acquisition des scans, un post-traitement est nécessaire afin d'extraire une géométrie tridimensionnelle complète de maille. Le type de résultat attendu est illustré en Figure I-66 : le modèle 3D est dépourvu de points aberrants, de trous, et la restitution de la rugosité de la surface est fidèle par rapport au modèle réel.

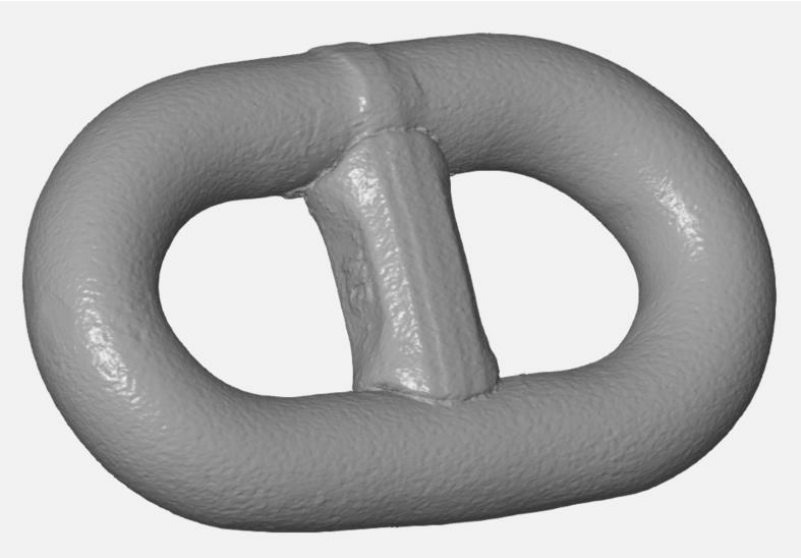


*Figure I-66 - Modèle tridimensionnel de maille de chaîne.*

Plusieurs étapes sont nécessaires pour réaliser le post-traitement. Celles-ci sont représentées par un organigramme en Figure I-67. L'automatisation du processus étant difficilement programmable, toutes ces étapes sont réalisées « manuellement » sur le logiciel Artec Studio 15 fourni avec le scanner.

La première et la seconde étape du post-traitement sont les plus chronophages. Tout d'abord, chacun des 6 scans doit être débarrassé des points appartenant au support et aux mailles adjacentes. Ensuite, il est nécessaire de fusionner les 6 scans en un seul. Dans ce but, une opération d'alignement des scans est indispensable : chaque scan est écrit dans un repère différent. Pour ce faire, les scans doivent être réorientés et déplacés « manuellement » afin d'être prépositionnés correctement les uns par rapport aux autres. Cette étape est importante, car l'algorithme d'alignement précis du logiciel n'est efficace que si les scans sont, avant traitement, dans une position relative proche de la position terminale. Après le processus d'alignement fin, tous les scans sont positionnés précisément les uns par rapport aux autres. La méthodologie de calcul concernant les alignements de nuages de points sera abordée dans le prochain chapitre.

La totalité du post-traitement est relativement longue : 45 minutes environ pour construire et exporter un modèle tridimensionnel de maille. En conséquence, en prenant en compte un temps

d'acquisition de 15 minutes, la numérisation complète d'une maille (de calibre 30 mm), dure une heure environ. Cette valeur importante est bien sûr à garder à l'esprit lors de la prévision des campagnes de mesure.

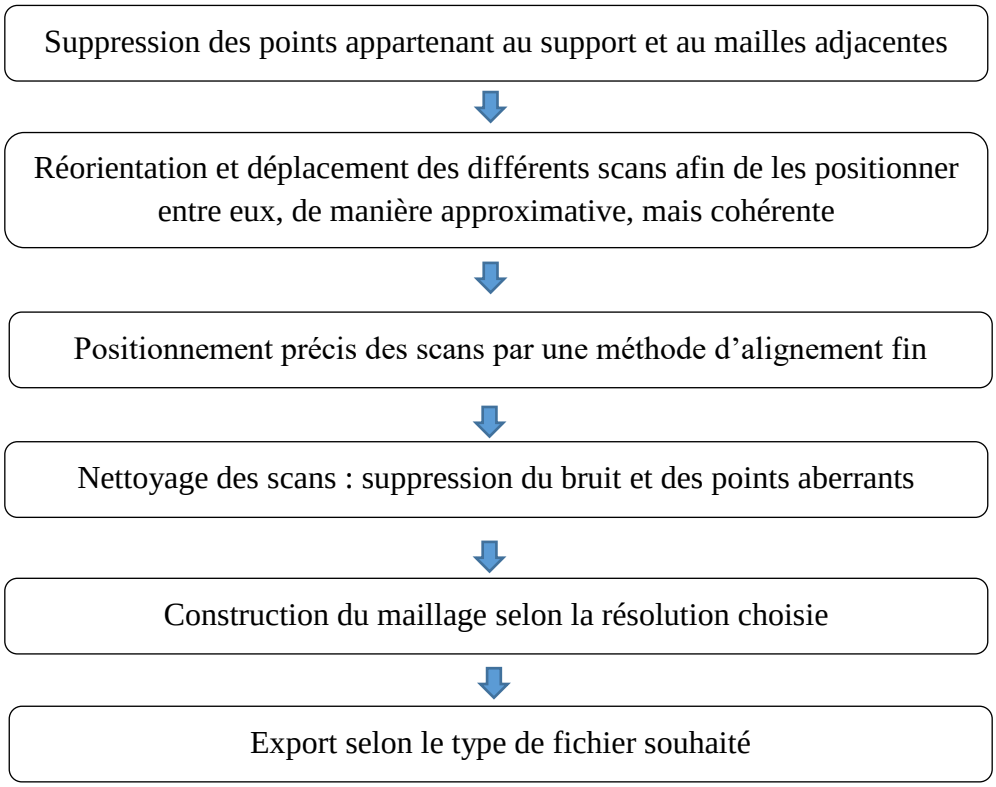



*Figure I-67 - Post-traitement des scans : séquencement nécessaire à la création d'un modèle 3D d'une maille de chaîne.*

- **Types de fichier d'export**

Les maillages réalisés sont usuellement composés de triangles, souvent nommés « facettes », dont les sommets[1] sont définis dans un repère cartésien. Les données sont ensuite exportées vers des formats de fichiers 3D qui peuvent être de types variés.

Le format de fichier qui sera souvent utilisé dans cette étude est de type STL (Standard Tesselation Language). Ce type de fichier contient les informations qui permettent de définir le maillage et la position de la matière par rapport aux peaux de l'objet scanné : définition des facettes, coordonnées des sommets associés, coordonnées des normales associées (les normales étant unitaires et orientées vers l'extérieur de la matière).

Dans cette étude, la couleur des mailles de chaînes scannées ne sera pas exploitée. En effet, les acquisitions successives des différents scans imposent de multiples réorientations de la maille

[1] Notons que la traduction anglaise du mot français « *sommet* » est « *vertex* » au singulier, et « *vertices* » au pluriel. L'utilisation du mot « *vertice* », parfois rencontré, est incorrecte.

étudiée (voir paragraphe précédent). Ceci peut modifier la coloration de cette maille, car les dépôts des sprays de matification, souvent indispensables (p. ex. poudre blanche), transforment la couleur originale des pièces et sont altérés à chaque manipulation. Si néanmoins, dans le cas d'autres études, l'exploitation de la couleur est nécessaire, les fichiers de type STL ne sont plus adaptés. Il pourrait alors être judicieux d'utiliser des fichiers de type OBJ, ou PLY, qui contiennent plus d'informations, dont la couleur.

# I.4. CONCLUSION

## I.4.1. Perspectives générales attendues

Dans le chapitre I.3.1, il a été montré que la capacité à acquérir les géométries 3D des mailles de chaînes (neuves ou usées) pouvait ouvrir diverses perspectives pour contribuer à améliorer la fiabilisation de l'utilisation de ces pièces mécaniques en milieu marin. Pour rappel, ces perspectives sont synthétisées ci-dessous :

- Contrôle précis de la conformité des géométries de fabrication.
- Identification des géométries réelles des sections dans les cintres de mailles neuves permettant de renforcer les modèles prédictifs de rupture actuellement basés sur des géométries parfaites (sections circulaires).
- Proposition de modèles géométriques tridimensionnels temporels de perte de matière et identification des paramètres influents associés.
- Distinction entre les pertes de matières par usure / corrosion et les pertes de matière par corrosion généralisée uniquement.
- Amélioration de la prédiction de la résistance résiduelle à la rupture des chaînes, au bout de la durée de vie envisagée pour l'installation.
- Amélioration de l'estimation de la résistance résiduelle à la rupture de mailles immergées, afin de justifier auprès des organismes de certification leur maintien en service, ou leur mise au rebut (Offshore pétrole & gaz et énergie renouvelable).
- Proposition de modèles analytiques légers pour estimer la résistance résiduelle à la traction, afin d'aider les équipages à prendre des décisions rapides pour le maintien ou la mise au rebut des chaînes lors des opérations de maintenance (installations avec une moindre criticité).
- Amélioration des modèles prédictifs de résistance à la fatigue des chaînes soumises à de la traction simple, par la connaissance de l'évolution temporelle de la géométrie des mailles.

- Renforcement de la pertinence des modèles actuels de fatigue prématurée, induite par les moments hors plan et par la torsion des chaînes.

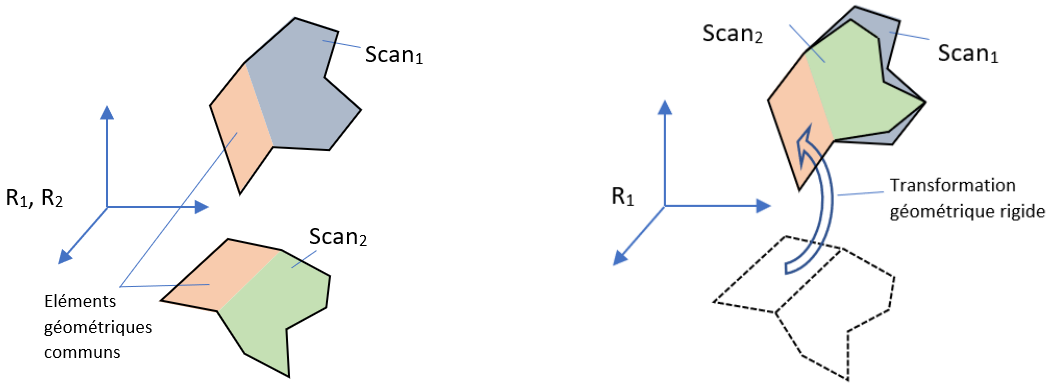
Il est ici important de constater qu'en dehors des perspectives associées aux mailles neuves, les perspectives associées aux mailles usées nécessitent presque toutes la connaissance préalable de la géométrie des pertes de matière. **En conséquence, pour ouvrir ces perspectives, il est fondamental de pouvoir identifier ces pertes de matière et d'être capable de les mesurer, les quantifier et les modéliser.**

## I.4.2. Identification des pertes de matière

L'identification des pertes de matière nécessite intrinsèquement la comparaison des géométries d'une même maille, mais relevées avant et après un séjour en milieu marin. Notons que comparer une maille vieillie avec un modèle théorique de maille neuve n'est pas une méthode adaptée, car les tolérances de fabrication (voir I.2.2.1) sont trop importantes par rapport aux quantités que l'on souhaite identifier : plusieurs millimètres acceptés sur les tolérances, par rapport à quelques dixièmes de millimètres à identifier (voir I.2.3.6). Il est donc important de comparer les géométries de mailles vieillies, avec leurs propres géométries, mais acquises à un moment antérieur.

L'identification des pertes de matières est donc effectuée par la comparaison de deux modèles géométriques tridimensionnels d'une maille. Cette identification peut, par exemple, être réalisée par soustraction booléenne du modèle numérique de la maille usée, au modèle numérique de la maille moins altérée. Cependant, cette opération ne peut être effectuée qu'après une superposition préalable précise (alignement fin) des deux scans. Or, la méthode d'acquisition associée au scanner induit un repère différent pour l'écriture des coordonnées des nuages de points de chaque scan relevé : un nouveau repère local lié au scanner est défini à chaque déclenchement de celui-ci.

Classiquement, la superposition des scans est réalisée par des méthodes numériques qui calculent une transformation rigide permettant l'alignement de surfaces communes préalablement identifiées (voir Figure I-68). Malheureusement, il est constaté que les vieillissements des mailles en mer conduisent à une altération de la totalité de leur surface. En conséquence, les méthodes d'alignement classiques ne sont pas applicables, car il n'existe plus d'éléments géométriques identiques entre les deux modèles tridimensionnels relevés. Une nouvelle méthode doit donc être mise au point.




(a) (b)

*Figure I-68 – Superposition des scans : (a) scans non superposés possédant des éléments géométriques communs, (b) déplacement du scan$_2$ sur le scan$_1$ après identification de la transformation rigide qui permet d'aligner les éléments communs.*

## I.4.3. Problématique générale

En résumé, pour ouvrir les perspectives de fiabilisation précédemment décrites, il est indispensable d'être capable d'identifier les caractéristiques des géométries tridimensionnelles des pertes de matières des mailles de chaînes vieillies en mer. Pour identifier ces pertes de matières, trois étapes sont identifiées : **l'acquisition** des scans, **l'alignement** des scans et la **comparaison** des scans alignés. Parmi ces 3 étapes, la seconde nécessite une attention toute particulière.

La problématique principale de cette étude est donc définie de la manière suivante :

L'identification des géométries tridimensionnelles des pertes de matière des mailles de chaînes vieillies en mer est envisageable en réalisant l'acquisition, l'alignement et la comparaison de géométries 3D obtenues par l'utilisation de scanners optiques.

Les géométries 3D acquises ne possédant plus de géométrie commune, l'alignement nécessaire au processus d'identification constitue un obstacle important à franchir, car il ne trouve pas de solution dans l'état actuel des connaissances.

L'objectif à atteindre est donc de proposer et valider une méthode permettant l'alignement des scans de mailles de chaînes vieillies en mer. Cette méthode pourra être étendue par la suite à l'analyse géométrique comparée de toute pièce subissant les mêmes types d'agressions physico-chimiques.

À la suite de l'identification de l'état de l'art associé aux méthodes d'alignement de scans, il sera développé dans cet ouvrage une méthode d'alignement spécifique pour résoudre la problématique rencontrée. À l'issue de ce travail, le séquencement proposé pour atteindre l'objectif terminal d'identification des pertes de matière sera appliqué sur plusieurs cas de mailles de chaînes ayant séjourné en mer pendant plusieurs années.

# Chapitre II.
# REGISTRATIONS - État de l'art

## II.1. PRÉAMBULE

### II.1.1. Objectif

Dans le cadre de cette thèse, le processus d'alignement de scans est utilisé pour permettre la comparaison de deux modèles 3D complets d'une maille de chaîne vieillie en mer. Les acquisitions des modèles 3D étant réalisées à des moments distincts lors de la vie de la chaîne, les géométries sont nécessairement différentes du fait des pertes de matière par usure de contact et par corrosion. En conséquence, ces modèles 3D ne possèdent plus de partie commune, ce qui complexifie la méthode d'alignement à utiliser.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une description des méthodes les plus communes d'alignement de scans que l'on trouve à ce jour dans la littérature scientifique. Ces méthodes, usuellement appelées « registrations », peuvent être définies de la manière suivante : processus mathématique qui permet de trouver une transformation spatiale alignant deux nuages de points, tout en minimisant l'erreur de positionnement. Les registrations sont souvent utilisées pour fusionner plusieurs ensembles de données géométriques dans un seul modèle cohérent (voir exemple en Figure II-1). Ce problème mathématique est aussi nommé « problème de Procustre » qui fait référence au mythe de Thésée que nous décrirons dans le paragraphe II.2.1.

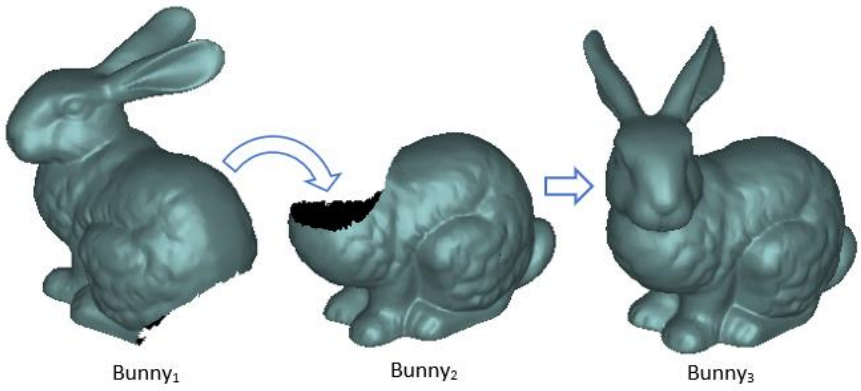



*Figure II-1 – Exemple de registration : alignement du modèle incomplet $Bunny_1$ sur le modèle incomplet $Bunny_2$, pour d'obtenir le modèle complet $Bunny_3$. Modèle utilisé : Stanford Bunny (Stanford University, 2024).*

## II.1.2. Un nombre de publications important

Avant de débuter ce chapitre bibliographique, il est important de constater que le nombre d'articles publiés ayant pour objet la registration de données est extrêmement important. En effet, une recherche de l'expression « registration method » dans le Scopus (Scopus, 2024) et dans IEEE Xplore (IEEE, 2024) permet d'obtenir respectivement les références de 1153 et 759 articles publiés entre 2004 et 2024. Outre la quantité importante de publications relative au problème de registration, il est notable que les domaines concernés par cette problématique sont relativement nombreux, comme la vision artificielle, la robotique mobile, l'imagerie médicale, la psychométrie, la finance, l'archéologie… Ces multiples domaines engendrent des environnements de recherche qui fonctionnent de manière plus ou moins autonome. Cela conduit parfois à des références différentes concernant d'une part, la paternité de méthodes et d'autre part, des désignations différentes pour la dénomination de celles-ci. En conséquence, concernant la registration de nuages de points, la diversité des domaines d'utilisation et la quantité importante de publications rend illusoire l'objectif de rendre compte ici d'une bibliographie exhaustive à ce sujet. L'état de l'art proposé réduit donc les méthodes abordées aux méthodes usuelles, bien documentées, et dont la robustesse est communément admise. Néanmoins, la Table 10 présente chronologiquement un ensemble de publications dont l'objet principal est une synthèse sur les méthodes d'alignement d'images ou de géométries 3D utilisées dans des domaines variés. Le lecteur pourra donc s'y référer s'il souhaite obtenir des informations complémentaires sur des variantes moins usuelles de méthodes de registration que l'on peut trouver dans la littérature scientifique.

*Table 10 – Publications sur les 20 dernières années ayant pour objet une synthèse sur les méthodes d'alignement.*

| **Référence** | **Titre** |
|---|---|
| (Sengupta et al., 2022) | A survey on mutual information based medical image registration algorithms |
| (Fontana et al., 2020) | A Benchmark for Point Clouds Registration Algorithms |
| (Cheng et al., 2018) | Registration of Laser Scanning Point Clouds: A Review |
| (Jana and Dalibor, 2018) | Notes on iterative closest point algorithm |
| (Wang and Zhao, 2017) | A survey of iterative closest point algorithm |
| (Maiseli et al., 2017) | Recent developments and trends in point set registration methods |
| (Díez et al., 2015) | A Qualitative Review on 3D Coarse Registration Methods |
| (Pomerleau et al., 2015) | A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics |
| (Bellekens et al., 2015) | A Benchmark Survey of Rigid 3D Point Cloud Registration Algorithms |
| (Tam et al., 2013) | Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid |
| (Markelj et al., 2012) | A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions |
| (Fluck et al., 2011) | A survey of medical image registration on graphics hardware |
| (Salvi et al., 2007) | A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation |
| (Bowyer et al., 2006) | A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D+2D face recognition |
| (Pluim et al., 2003) | Mutual-information-based registration of medical images: a survey |
| (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) | Efficient variants of the ICP algorithm |
| (Audette et al., 2000) | An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging |

### II.1.3. Organisation de la bibliographie

Après avoir défini le problème de Procruste et proposé des solutions directes pour certaines déclinaisons de ce problème, deux grandes catégories de registration seront détaillées : les alignements approximatifs[1] et les alignements fins. La première catégorie contient des méthodes qui fournissent des résultats rapides (quelques secondes), peu précis (quelques millimètres) et qui ne nécessitent généralement pas de puissance de calcul importante. La seconde catégorie contient, au contraire, des méthodes souvent itératives qui fournissent des résultats moins rapides (plusieurs minutes), précis (inférieurs au dixième de millimètre) et qui mobilisent bien plus de ressources informatiques. Notons que l'application des méthodes de la seconde catégorie nécessite usuellement l'utilisation préalable d'un alignement approximatif de la première catégorie afin de prépositionner les scans les uns par rapport aux autres.

## II.2. PROBLÈMES DE PROCRUSTE

### II.2.1. Procruste, le mythe

Dans la mythologie grecque, Procruste (voir Figure II-2) était un brigand qui accueillait des voyageurs dans sa maison. Il leur proposait de s'allonger dans un lit convenant mystérieusement à toutes les tailles. Une fois les hôtes attachés, s'ils étaient trop petits pour la longueur du lit, il les écartelait alors cruellement. Dans le cas contraire, il leur coupait les membres qui dépassaient. Procruste fut tué par Thésée qui lui fit subir le même supplice : il l'attacha au lit et coupa sa tête qui dépassait. Une interprétation de cette légende pourrait aboutir à la considérer comme une invitation à ne pas céder à la facilité de transformer le réel afin que ce dernier corresponde à nos modèles théoriques, à nos standards et à notre façon de penser.

Dans le domaine scientifique de l'analyse de formes, ce mythe grec est associé au problème de registration ici étudié. Le lit de Procruste correspond à la forme d'un objet de référence connu (p. ex. maille neuve) sur laquelle il faut allonger des objets victimes (p. ex. mailles usées) que l'on souhaite étudier par comparaison (p. ex. pour identifier les pertes de matière). Pour allonger au mieux les objets victimes sur l'objet de référence, il s'agit alors de leur appliquer des transformations géométriques, mais sans que cela soit trop « brutal ».

[1] Traduction française de l'expression anglaise « coarse registration ».

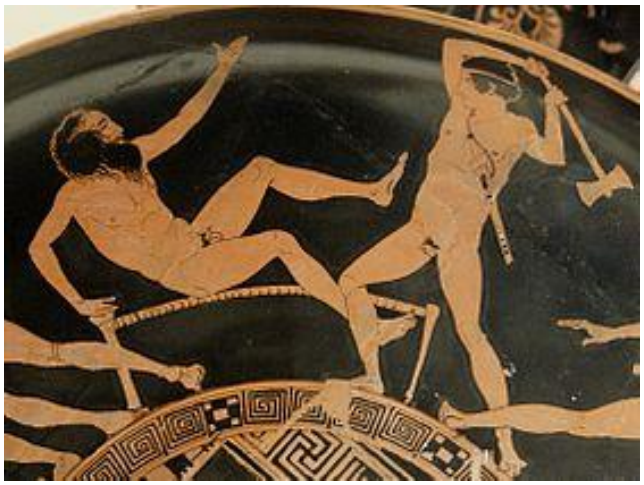


*Figure II-2 - Thésée tuant Procruste : Kylix attique conservée au British Museum de Londres (British Museum, 2024).*

Le problème de registration fut appelé pour la première fois « problème de Procruste orthogonal » en 1962, par John Hurley et Raymond Cattell (Hurley and Cattell, 1962), qui proposaient un algorithme de correspondance dont la fiabilité était discutée. Cependant, les premières publications à ce sujet sont bien antérieures : elles datent du début du XX$^{e}$ siècle (Boas, 1905).

## II.2.2. Formulations du problème de Procruste

### II.2.2.1. Formulation générique

En algèbre linéaire, le problème de Procruste est un problème d'approximation matricielle. Il comporte des variantes, mais est souvent défini de manière générique, tel que décrit ci-dessous.

Soit $M_{n\times p}(\mathbb{R})$, l'espace des matrices de dimension $n \times p$ à coefficients réels.

Soient $A$ et $B$, deux matrices appartenant à $M_{n\times p}(\mathbb{R})$.

Le problème de Procruste consiste à trouver la matrice de transformation $T \in M_{p\times p}(\mathbb{R})$ qui modifie $A$ (le voyageur imprudent), de manière à approcher au mieux la matrice de référence B (le lit de Procruste). La transformation optimale est donnée par :

$$T_{opt} = arg\,min_T \|AT - B\|_F^2 \qquad \textit{(II-1)}$$

avec, $\| . \|_F$, la norme de Frobenius telle que rappelée ci-dessous :

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p} a_{ij}^2} = \sqrt{tr(A^T A)} \qquad \textit{(II-2)}$$

La matrice de transformation $T$ peut être restreinte à certains types de matrices : orthogonales, symétriques, matrices de permutation…

#### II.2.2.2. Formulation adaptée à la registration

Dans le cas où le problème de Procruste est utilisé pour aligner des nuages de points de mêmes dimensions, il doit alors être formulé d'une manière adaptée.

Soit $M_{n\times 3}(\mathbb{R})$, l'espace des matrices de dimension $n \times 3$, à coefficients réels. Soient $A$ et $B$, deux matrices appartenant à $M_{n\times 3}(\mathbb{R})$ qui contiennent les coordonnées des deux nuages de points à aligner, écrits sous forme de ligne.

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} et\ B = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ X_n & Y_n & Z_n \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-3)}$$

Le problème de Procruste consiste alors à trouver la matrice de transformation $T \in M_{3\times 3}(\mathbb{R})$ qui modifie $A$, de manière à approcher au mieux la matrice de référence $B$. La transformation optimale $T_{opt}$ est donnée de la même manière que la formulation générique, c'est-à-dire par la relation (II-1).

Soient $(x_i, y_i, z_i)$ et $(X_i, Y_i, Z_i)$, les coordonnées des points $A_i$ et $B_i$ écrites par lignes dans les matrices $A$ et $B$. Pour trouver la transformation qui transforme $A$ en $B$, il est fondamental de connaître au préalable les correspondances entre les points $A_i$ et $B_i$. Par exemple, pour aligner deux images contenant un visage, les centres des yeux de l'image à transformer devront s'aligner sur les centres des yeux de l'image de référence. Les **correspondances physiques sont donc connues,** et ces correspondances sont traduites par l'écriture ligne à ligne des points correspondants dans les matrices $A$ et $B$ (voir Figure II-3).

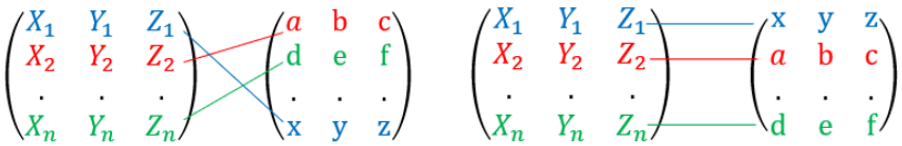



*Figure II-3 – Représentation de correspondances de points : (a) nuages de points écrits sans correspondances implicites, (b) nuages de points écrits avec correspondances ligne à ligne.*

Les restrictions possibles des matrices de transformation recherchées pour la résolution du problème de Procruste conduisent à multiplier les variantes de ce problème. Pour les trois variantes développées dans ce chapitre, les correspondances de points seront initialement connues. Il est notable que, dans le cas de nuages de points bruts obtenus par l'utilisation de scanners 3D, ces correspondances sont initialement inconnues, et les méthodes de résolution proposées ci-dessous devront donc être adaptées.

## II.2.3. Problème de Procruste orthogonal

Le problème de Procruste orthogonal est défini de manière identique au problème générique, mais une condition d'orthogonalité est ajoutée à la matrice $T$. Pour trouver $T$, la relation complémentaire $T^tT = I_{p\times p}$ est ajoutée au problème à résoudre : il est donc recherché une matrice de rotation ou de réflexion (symétrie) transformant $A$ pour ressembler à $B$, au sens de la norme de Frobenius. Cette formulation du problème a été résolue analytiquement en 1966 (Schönemann, 1966) en introduisant la décomposition en valeurs singulières de la matrice $A^tB$. Cette démonstration importante est retranscrite ci-dessous à partir de la formulation générique.

Les propriétés de la norme de Frobenius nous permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} T_{opt} &= arg\,min_T \|AT - B\|_F^2 \\ &= arg\,min_T \left[tr\left((AT-B)^t(AT-B)\right)\right] \\ &= arg\,min_T \left[tr((AT)^t(AT) - (AT)^tB - B^t(AT) + B^tB)\right] \\ &= arg\,min_T \left[tr(ATT^tA^t) + tr(B^tB) - tr((AT)^tB) - tr\left(B^t(AT)\right)\right] \\ &= arg\,min_T \left[tr(AA^t) + tr(B^tB) - 2tr(T^tA^tB)\right] \\ &= arg\,max_T \left[tr(T^tA^tB)\right] \end{aligned} \qquad \textit{(II-4)}$$

On se propose maintenant de décomposer la matrice $A^tB$ en valeurs singulières.

Pour rappel, la décomposition en valeurs singulières[1] permet de décomposer une matrice quelconque appartenant à $M_{n\times p}(\mathbb{R})$ en un produit $\boldsymbol{UDV^t}$ tel que :

- $\boldsymbol{U} \in M_{n\times n}(\mathbb{R})$ est orthogonale,

- $\boldsymbol{D} \in M_{n\times p}(\mathbb{R})$ est diagonale et $d_{ii} > 0$ : $D = diag\big(d_1 > 0, d_2 > 0, .., d_{min(n,p)} > 0\big)$,

Par exemple, dans le cas où $n > p$, on a $D = \begin{pmatrix} d_1 > 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 > 0 & 0 & 0 \\ .. & .. & .. & .. \\ 0 & 0 & 0 & d_p > 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

- $\boldsymbol{V} \in M_{p\times p}(\mathbb{R})$ est orthogonale.

On obtient donc,

$$\begin{aligned} T_{opt} &= arg\,max_T\,[tr(T^t U D V^t)] \\ &= arg\,max_T\,\,[tr(D V^t T^t U)] \\ &= arg\,max_T\,\,[tr(DX)] \\ &= arg\,max_T \left[\sum_{i=1}^{p} d_i \times x_{ii}\right] \end{aligned} \qquad \textit{(II-5)}$$

Avec, $X = V^t T^t U$ une matrice orthogonale, car produit de matrices orthogonales, $X \in M_{p\times p}(\mathbb{R})$.

Comme $d_i > 0$, la quantité $\sum_{i=1}^{p} d_i \times x_{ii}$ est maximale si $x_{ii}$ est maximal. Or, une matrice orthogonale est constituée de vecteurs orthogonaux deux à deux, et de normes égales à 1. De ce fait, la trace $tr(DX)$ est maximale si $x_{ii} = 1$, les autres composantes des vecteurs de X étant nulles. En conséquence, $X = V^t T^t U = I_{p\times p}$. On obtient donc la transformation recherchée qui est orthogonale et qui minimise bien la norme de Frobenius :

$$T = UV^t \qquad \textit{(II-6)}$$

Remarquons pour finir que le problème ici développé devrait sans doute s'appeler problème orthonormal de Procruste, plutôt que problème orthogonal de Procruste.

[1] Traduction anglaise : Singular value Decomposition (SVD)

## II.2.4. Problème de Procruste orthogonal et rotatoire

L'équation (II-6) précédente nous permet de déterminer la matrice de transformation orthogonale qui apporte une solution au problème de Procruste orthogonal. Dans le but de rechercher des matrices de transformation qui soient uniquement des rotations, il est nécessaire d'ajouter une nouvelle restriction au problème.

Notons au préalable que, comme $T^tT = I_{p\times p}$, on a $det(T) = \pm 1$. Dans le cas où le déterminant est égal à 1, la matrice identifiée sera une rotation, ce qui est ici recherché. Dans le cas où le déterminant est égal à -1, la matrice sera une réflexion, ce que nous ne voulons pas obtenir. Les deux restrictions à considérer sont donc $T^tT = I_{p\times p}$ et $det(T) = 1$.

Afin de s'assurer que $det(T) = 1$, il est nécessaire d'adapter l'identification de X tout en conservant la minimisation de la norme de Frobenius. Il a été démontré (Umeyama, 1991) que la forme suivante de X permet d'atteindre ce minimum :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & .. & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & .. & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & det(UV^t) \end{pmatrix} = diag[1,1,..,det(UV^t)] \qquad \textit{(II-7)}$$

La matrice de rotation recherchée est donc finalement de la forme suivante :

$$T = U\ diag[1,1,..,det(UV^t)]\ V^t \qquad \textit{(II-8)}$$

## II.2.5. Problème de Procruste orthogonal étendu

Le problème de Procruste ici abordé concerne l'identification d'une transformation composée d'une rotation, d'une translation et d'un facteur d'échelle. Il s'agit donc de trouver 7 paramètres, qui sont : 3 angles pour la rotation, 3 déplacements pour la translation et un facteur d'échelle. Ce problème, aussi nommé « problème de Procruste à 7 paramètres » ou « problème des transformations de Helmert », a été résolu pour des petits déplacements dans les années 1960 (Bursa, 1962; Wolf, 1963) et résolu globalement par Peter Schönemann et Robert Carroll en 1970 (Schönemann and Carroll, 1970). Pour information complémentaire, notons que le problème de Procruste à 9 paramètres aborde les transformations composées d'une rotation, d'une translation et d'une mise à l'échelle anisotropique (Awange et al., 2008).

La formulation du problème à 7 paramètres, proposée ci-dessous, est directement inspirée de la publication de Schönemann et Carroll.

Soit $M_{n\times p}(\mathbb{R})$, l'espace des matrices de dimension $n \times p$, et à coefficients réels. Soient $A$ et $B$, deux matrices appartenant à $M_{n\times p}(\mathbb{R})$. L'erreur $E \in M_{n\times p}(\mathbb{R})$ résultant de la transformation recherchée est définie de la manière suivante :

$$E = B - sAR - JT_0^t \qquad \textit{(II-9)}$$

Avec,

- $R \in M_{p\times p}(\mathbb{R})$, la matrice orthogonale de rotation : $R^t R = I_{p\times p}$ et $det(R) = 1$,
- $T_0 \in M_{p\times 1}(\mathbb{R})$, la translation recherchée,
- $J \in M_{n\times 1}(\mathbb{R})$, tel que $J = (1,1,..,1)^t$
- $s$, un scalaire correspondant au facteur d'échelle.

Après avoir minimisé l'erreur $E$, au sens de la norme de Frobenius, et tout en conservant les propriétés recherchées de la matrice $R$, Schönemann et Carroll parviennent à formuler les solutions suivantes :

$$R = U\, diag[1,1,..,det(UV^t)]\, V^t \qquad \textit{(II-10)}$$

$$T_0 = (B - sAR)^t \frac{J}{n} \qquad \textit{(II-11)}$$

$$s = \frac{tr\left\{T^t A^t \left(I_{n\times n} - \frac{JJ^t}{n}\right) B\right\}}{tr\left\{A^t \left(I_{n\times n} - \frac{JJ^t}{n}\right) A\right\}} \qquad \textit{(II-12)}$$

Avec, $UDV^t$ la décomposition en valeurs singulières de $A^t \left(I_{n\times n} - \frac{JJ^t}{n}\right) B$ et $D$, la matrice diagonale associée.

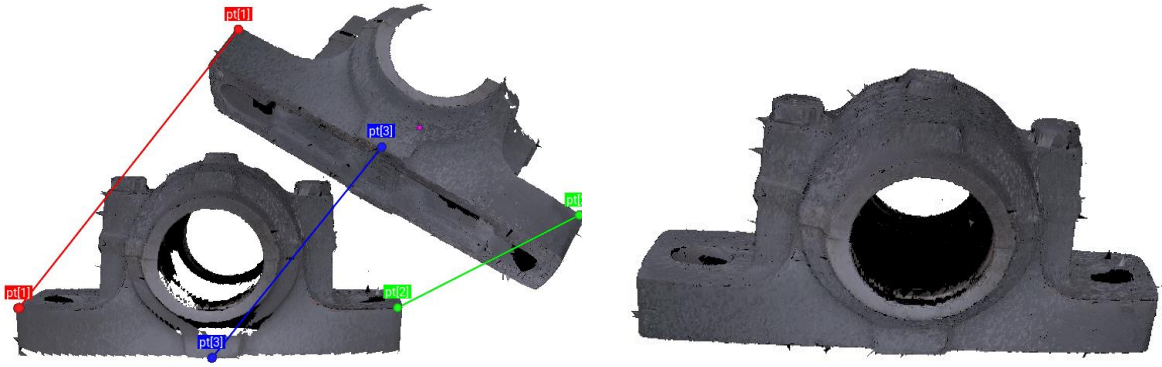
## II.3. ALIGNEMENTS APPROXIMATIFS

Les méthodes décrites dans ce paragraphe permettent d'estimer une transformation approchée afin de registrer deux nuages de points obtenus par l'utilisation de scanners 3D. Ces algorithmes se distinguent par la nature des correspondances utilisées et par la manière dont ces

correspondances sont associées. Les alignements approximatifs sont souvent appliqués pour réaliser une première transformation peu précise, ce qui est un préalable nécessaire à l'utilisation d'algorithmes d'alignements plus fins qui seront décrits au paragraphe II.4.

## II.3.1. Alignements « manuels »

Dans le cas où les formes étudiées comportent des caractéristiques physiques facilement repérables et dans le cas où la quantité de scans à aligner ne nécessite pas de processus automatisé, il est possible d'envisager un alignement « manuel ». Celui-ci est réalisé avec l'intervention d'un opérateur qui identifie visuellement des points localisés sur des éléments communs dans les deux scans (centres de cercles, intersections d'arêtes, taches de couleur …). A minima, trois paires de points non colinéaires doivent être repérées (voir Figure II-4). Ensuite, la transformation géométrique peut être calculée en utilisant, par exemple, la solution explicitée pour la résolution du problème de Procruste orthogonal étendu (II.2.5). Cette méthode rudimentaire induit des résultats dont la précision est faible, car la désignation des points communs est souvent approximative.




(a) (b)

*Figure II-4 - Alignement manuel, avec l'aide du logiciel Artec Studio 15, du scan correspondant à la partie inférieure d'un palier sur le scan de sa partie supérieure. (a) Trois points physiques sont identifiés manuellement sur les deux scans. Une transformation est alors calculée. (b) Scans superposés après application de la transformation.*

Une variante consiste alors à sélectionner, non pas des points extraits directement des scans, mais des ensembles de points dont la surface associée est modélisable par des formes élémentaires (plans, droites, cylindres, sphères…). La méthode des moindres carrés appliquée à ces nuages de points permet alors de calculer les caractéristiques géométriques de ces formes élémentaires associées (centres, orientations, dimensions) et ce sont ces caractéristiques qui permettent de construire ensuite, et plus précisément, les 3 paires de points essentiels au calcul de la transformation.

## II.3.2. Signature sphérique des points[1]

La signature sphérique des points est un descripteur qui a été établi par Chua et Jarvis en 1997 (Chua and Jarvis, 1997) pour trouver des correspondances. Ce descripteur capte, à partir d'une sphère, l'environnement proche de chaque point pour en extraire une signature spécifique. La Figure II-5 et le paramétrage ci-dessous permettent de définir cette signature.

Soient :

- un point $A$ appartenant à un nuage de points qui décrit une surface scannée $\mathcal{S}$,
- la courbe $\mathcal{C}$, intersection de la surface $\mathcal{S}$ avec une sphère de centre $A$ et de rayon $r$,
- le plan $\pi$, tangent à $\mathcal{S}$ au point $A$,
- le vecteur unitaire $\overrightarrow{n_1}$, normal au plan $\pi$ et orienté vers l'extérieur de la matière,
- le vecteur $\overrightarrow{n_2}$, dit de « référence », appartenant à $\pi$ et qui permet de construire un vecteur $\overrightarrow{n_3}$, pour former un repère local orthonormé centré en $A$,
- le vecteur unitaire $\overrightarrow{u_r}$, appartenant au plan $\pi$ et défini tel que $(\overrightarrow{n_2}, \overrightarrow{u_r}) = \theta$,
- le point $H$, projection d'un point $P \in \mathcal{C}$ sur $\pi$.

Chaque point $P$ appartenant à la courbe $\mathcal{C}$ peut être défini par :

$$\overrightarrow{AP} = AH.\overrightarrow{u_r(\theta)} + d.\overrightarrow{n_1} \qquad \textit{(II-13)}$$

Par définition, la signature sphérique du point A correspond au profil des distances $d(\theta)$ avec $\theta \in [0, 360°]$. Quelques exemples de signatures sphériques de points sont donnés en Figure II-6 pour des géométries spécifiques de surfaces. L'orientation choisie pour le vecteur $\overrightarrow{n_2}$ est telle que $d(\theta = 0) = d_{max}$, si cette valeur maximale est unique.

Après calcul des signatures sphériques des points, les correspondances sont ensuite recherchées. Par exemple, pour deux points $A_1$ et $A_2$ à comparer, ces points sont correspondants si, pour une tolérance $\varepsilon_{tol}$ choisie, les profils des distances vérifient :

$$|d_1(\theta) - d_2(\theta)| \leq \varepsilon_{tol}\ , \forall \theta \in [0{,}360°] \qquad \textit{(II-14)}$$

[1] Cette méthode est dénommée en anglais « Point signature ». La traduction proposée en français ajoute l'adjectif « sphérique » afin de rendre la désignation plus spécifique. Il existe, en effet, de nombreuses signatures de points différentes dans la littérature scientifique.

Même s'il est avéré que cette méthode est efficace, l'inconvénient principal de celle-ci est l'importance du temps de calcul des signatures sphériques des points des scans à aligner. En particulier, le calcul de l'intersection de la sphère et de la surface $\mathcal{S}$ est particulièrement long.

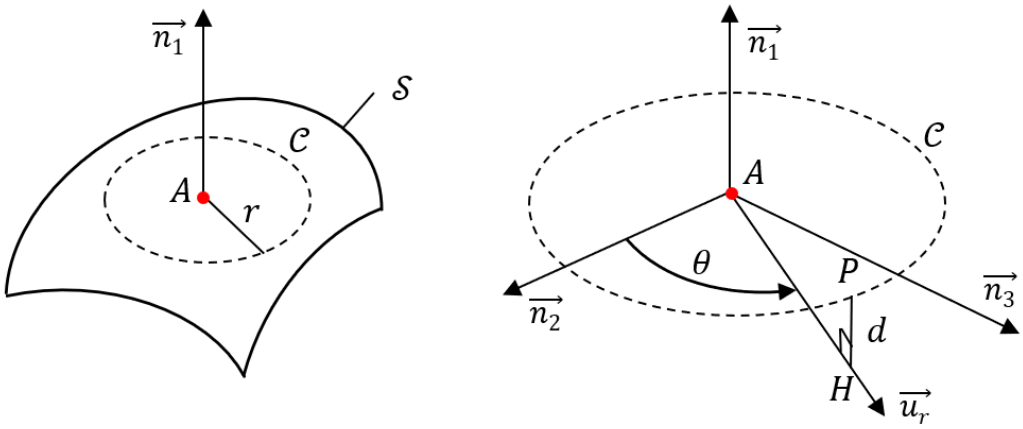



*Figure II-5 – Paramétrage de l'environnement local du point A.*

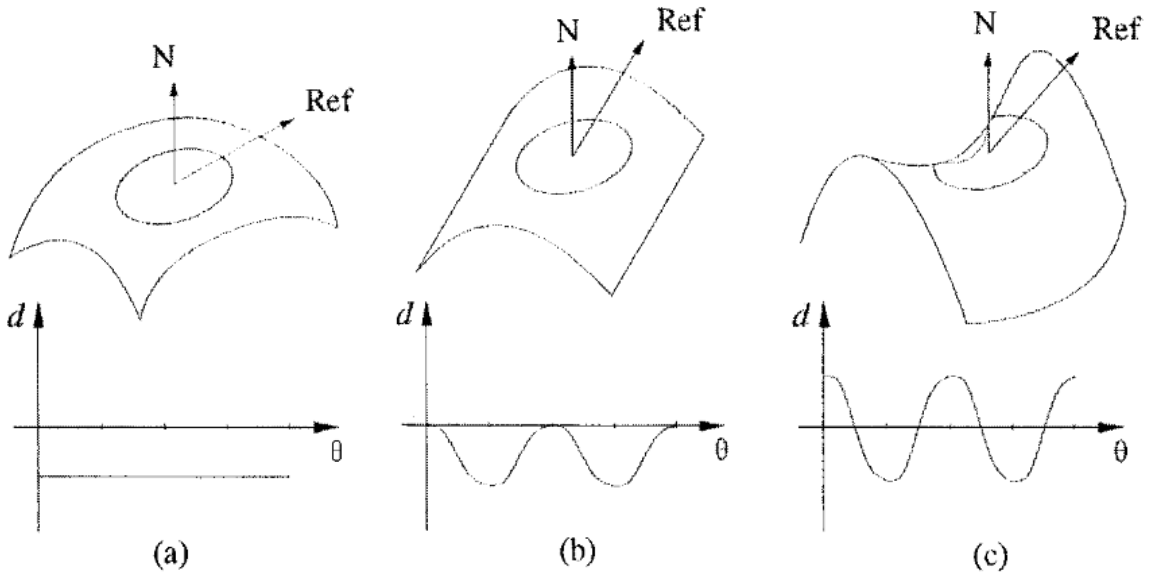



*Figure II-6 - Signature de : (a) un sommet, (b) un pont, (c) une selle de cheval (Chua and Jarvis, 1997).*

## II.3.3. Analyse en composantes principales[1] (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode qui a été développée par Karl Pearson en 1901 (Pearson, 1901) pour ajuster des plans ou des droites sur des nuages de points. Dans le cas de notre problème de registration, après avoir centré les nuages de points sur leur barycentre, cette méthode calcule les axes principaux puis identifie un alignement par rotation. Cette stratégie prend en compte les formes générales des nuages de points. Il ne s'agit donc pas ici d'identifier des signatures de points pour les faire correspondre une à une.

Le principe de calcul proposé utilise la matrice de variance-covariance telle que définie ci-dessous.

Soient :

- $P_i$ l'ensemble des $n$ points d'un nuage de points $\mathcal{P}$, dont les coordonnées $\vec{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^t$ sont exprimées dans une base $\mathcal{B}_0$.

- $P_c$, le barycentre du nuage de points $\mathcal{P}$, dont les coordonnées $\vec{p}_c = (x_c, y_c, z_c)^t$ sont exprimées dans cette même base.

- $X \in M_{3\times n}(\mathbb{R})$, la matrice contenant les coordonnées centrées des $n$ points $P_i$. Ces coordonnées sont écrites par colonnes tel qu'illustré dans l'équation (II-15).

$$X = (\vec{p}_1 - \vec{p}_c \quad \dots \quad \vec{p}_n - \vec{p}_c) = \begin{pmatrix} x_1 - x_c & \dots & x_n - x_c \\ y_1 - y_c & \dots & y_n - y_c \\ z_1 - z_c & \dots & z_n - z_c \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-15)}$$

- $\Sigma \in M_{3\times 3}(\mathbb{R})$ la matrice de variance-covariance, symétrique, semi-définie et positive, telle que $\Sigma$ vérifie la relation suivante : $\Sigma = \frac{1}{n} XX^t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\vec{p}_i - \vec{p}_c)\,(\vec{p}_i - \vec{p}_c)^t$

- $U \in M_{3\times 3}(\mathbb{R})$, la matrice de passage orthonormale permettant de diagonaliser $\Sigma$ dans une base $\mathcal{B}_v$ de vecteurs propres. On a donc $\Sigma = UDU^t$, avec $D$, la matrice diagonale de valeurs propres associées. On note que $U$ est aussi la matrice de rotation qui permet de déplacer la base $\mathcal{B}_0$ sur la base $\mathcal{B}_v$.

Le vecteur propre associé à la valeur propre la plus grande correspond à la direction de la plus grande variabilité du nuage de points, c'est-à-dire la direction dans laquelle il est le plus étendu. Inversement, la valeur propre la plus faible est liée à la direction la moins étendue du nuage de points. À titre d'exemple, la Figure II-7 illustre l'identification d'un repère principal par la méthode ACP sur un nuage de points 2D et un nuage de points 3D.

L'idée proposée ici est d'identifier une transformation qui superpose les barycentres et les directions principales des nuages de points que l'on souhaite aligner.

[1] Traduction anglaise : Principal Composant Analysis (PCA)

Soient :

- $\mathcal{P}^1$ et $\mathcal{P}^2$, deux nuages de points dont les barycentres sont respectivement $P_{c1}$ et $P_{c2}$, de coordonnées $\vec{p}_{c1}$ et $\vec{p}_{c2}$,

- $U_1$ et $U_2$ les matrices de passage orthonormales qui permettent de diagonaliser les matrices de variante-covariance $\Sigma_1$ et $\Sigma_2$ des nuages de points $\mathcal{P}^1$ et $\mathcal{P}^2$,

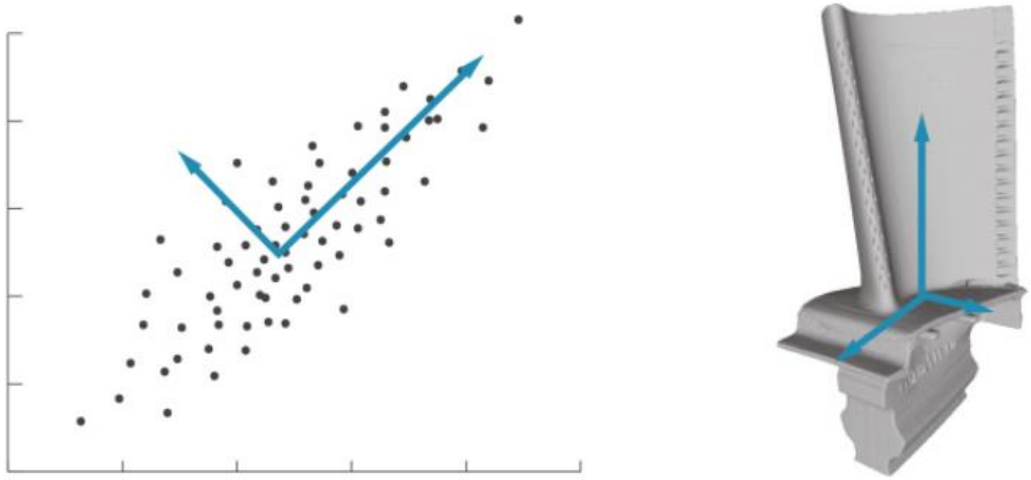
- $Q'$, l'image du point $Q \in \mathcal{P}^1$ par alignement de $\mathcal{P}^1$ sur $\mathcal{P}^2$,

- $\vec{q}'$ et $\vec{q}$ les coordonnées respectives des points $Q'$ et $Q$,

Après recentrage sur les barycentres et réalignement par rotation du nuage de points $\mathcal{P}^1$, les points $Q$ et $Q'$ se superposent. On peut donc écrire l'égalité (II-16) qui conduit à l'expression (II-17) dans laquelle apparaît la transformation recherchée. Celle-ci est composée d'une rotation $R = U_2^t U_1$ et d'une translation $\vec{t} = \vec{p}_{c2} - U_2^t U_1 \vec{p}_{c1}$.

$$U_2(\vec{q}' - \vec{p}_{c2}) = U_1(\vec{q} - \vec{p}_{c1}) \qquad \textit{(II-16)}$$

$$\vec{q}' = U_2^t U_1 \vec{q} + (\vec{p}_{c2} - U_2^t U_1 \vec{p}_{c1}) = R\vec{q} + \vec{t} \qquad \textit{(II-17)}$$



(a) (b)

*Figure II-7 -Analyse en composante principale pour : (a) un nuage de points 2D, et (b) un nuage de points 3D (Díez et al., 2015).*

La méthode ACP est une méthode très rapide d'alignement approximatif de nuages de points. Dans le cas où il existe des plans de symétrie, une attention particulière doit cependant être portée, car il existe deux vecteurs propres potentiels pour une seule valeur propre. Un second

point d'attention sera la présence de bruit de mesure qui peut affecter la qualité de l'alignement recherché (Bailey, 2012).

## II.3.4. Courbures principales

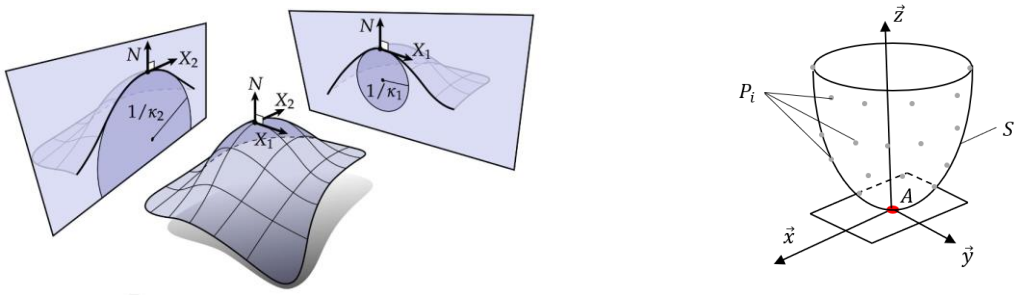
Sachant que certaines grandeurs obtenues à partir de calculs différentiels sur les surfaces restent invariantes par l'application de translations, de rotations ou de mises à l'échelle, l'idée ici développée est de définir ces grandeurs comme les signatures des points qui permettent d'identifier les correspondances possibles entre les scans à aligner.

Feldmar et Ayache ont proposé en 1996 (Feldmar and Ayache, 1996) une méthode permettant un alignement approximatif se basant sur le calcul des courbures principales (voir Figure II-8 (a)). Les courbures principales peuvent se calculer de différentes manières (Goldfeather and Interrante, 2004). Seule celle qui utilise une approximation de surface quadratique sera explicitée ci-dessous. La Figure II-8 (b) illustre ainsi une surface $S$ qui approche au mieux, au point $A$, un ensemble de $n$ points $P_i$, avec $n > 3$. Dans le cas où cette surface peut être définie par une quadrique, elle peut s'exprimer dans le repère $(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ selon l'équation cartésienne $f(x, y)$ telle que proposée dans l'équation (II-18). Le plan $(A, \vec{x}, \vec{y})$ est un plan tangent au point $A$, à la surface $S$. Comme $f(0,0) = 0$ et comme le plan $(A, \vec{x}, \vec{y})$ est tangent à la surface $S$, les termes $(d, e, f)$ de la fonction f sont nuls. De plus, la valeur n choisie étant souvent plus grande que 3 (pour capter au mieux la géométrie locale), l'identification des coefficients $(a, b, c)$ est associée à un problème surcontraint qui peut être résolu par l'utilisation de la méthode des moindres carrés. Pour finir, comme l'équation cartésienne peut se mettre sous la forme matricielle (II-19), il suffit de déterminer les vecteurs propres et les valeurs propres de la matrice $M$ pour trouver respectivement les directions principales $(\overrightarrow{X_1}, \overrightarrow{X_2})$ et les courbures principales $(k_1, k_2)$ de la surface $S$ au point $A$.

Afin d'estimer la signature du point considéré, ces deux valeurs de courbures peuvent alors être choisies séparément ou alors être combinées entre-elles : produit, moyenne ou fonction particulière. La Figure II-9 donne quelques exemples colorés qui illustrent ces différents choix de signatures. On remarque que la signature de type « shape index » (Koenderink and van Doorn, 1992) est la plus contrastante. Une fois les signatures établies pour les deux nuages de points à aligner, des correspondances seront alors recherchées, ce qui permettra d'identifier une transformation par la méthode proposée au chapitre II.2.

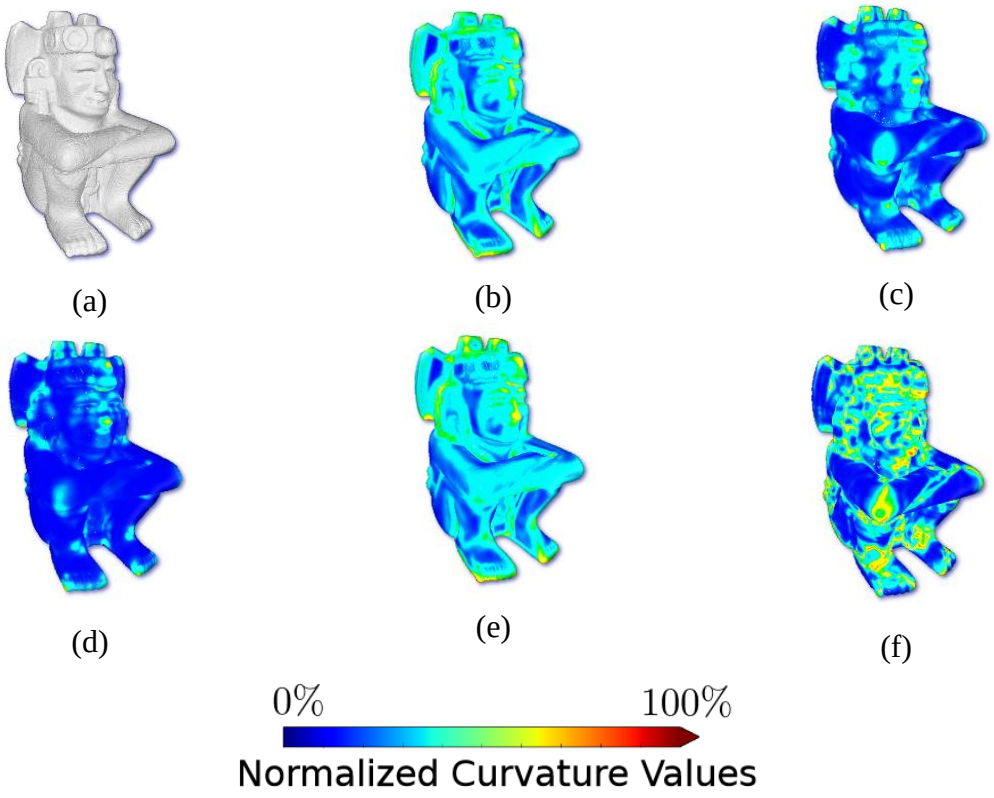
$$f(x, y) = ax^2 + 2bxy + cy^2 + dx + ey + f \qquad \textit{(II-18)}$$

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}^t M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-19)}$$




(a) (b)

*Figure II-8 – Courbures principales : (a) illustration des directions principales $(\overrightarrow{X_1}, \overrightarrow{X_2})$ et des courbures principales associées $(k_1, k_2)$ pour une surface en forme de sommet (Brickisland, 2024), (b) surface quadrique S qui approche au mieux localement, autour du point A, une quantité n imposée de points $P_i$.*




(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

*Figure II-9 – Comparaison de différentes signatures d'un modèle 3D, à partir des courbures $(k_1, k_2)$ calculées en chaque point (Canul-Ku et al., 2016) : (a) modèle sans coloration, (b) courbure maximale : $k_{max} = max(k_1, k_2)$, (c) courbure minimale : $k_{min} = min(k_1, k_2)$, (d) courbure gaussienne : $k_g = k_1 k_2$, (e) index de forme[1] $k_s = \frac{2}{\pi} tan^{-1} \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2}$.*

1 Traduction anglaise : « shape index ».

## II.3.5. Variation de surface

Reprenons la Figure II-8 (b) qui représente autour d'un point $A$, de coordonnées $\vec{a}$, les n points $P_i$ les plus proches de $A$. La quantité n est un entier choisi pour essayer de capter efficacement la géométrie locale autour de $A$ (Pauly et al., 2002). La matrice de variance-covariance $\Sigma \in M_{3\times3}(\mathbb{R})$ peut alors être calculée à partir des coordonnées $\vec{p}_i$ des points $P_i$ , recentrées sur $A$ (voir équation (II-20). Comme déjà indiqué au chapitre II.3.3, cette matrice est symétrique, semi-définie et positive. Ses valeurs propres $\lambda_i$ , $i \in \{1,2,3\}$ sont réelles et ses vecteurs propres $\vec{e}_i$ , $i \in \{1,2,3\}$ forment une base orthogonale. Les valeurs propres $\lambda_i$ sont définies telles que $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$. Une valeur propre $\lambda_i$ traduit la variation de la position des points $P_i$ le long de la direction $e_i$. En conséquence, $\vec{e}_1$ associé à $\lambda_1 = min(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ correspond à la direction où la variation est la plus faible, soit la direction normale à la surface. On en déduit que les vecteurs propres $\vec{e}_2$ et $\vec{e}_3$ forment une base du plan tangent en $A$. Notons ici que l'identification d'une normale locale à une surface devient aisée par l'application de cette méthode.

$$\Sigma = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\vec{p}_i - \vec{a})\,(\vec{p}_i - \vec{a})^t \qquad \textit{(II-20)}$$

À partir de ces considérations, il est possible d'introduire une nouvelle signature $\sigma_n(A)$ telle que présentée dans l'équation (II-21). Cette quantité nommée « variation de surface » décrit ainsi la variation de la surface le long de la direction normale, ce qui représente une certaine forme d'irrégularité locale. La valeur $\sigma_n$ est nulle dans le cas d'une surface plane, et elle est au maximum égale à 1/3 dans le cas d'une surface isotropique. Notons néanmoins que $\sigma_n$ varie en fonction de la quantité $n$ de points choisie. La Figure II-10 donne quelques exemples de calcul sur un modèle 3D qui illustrent l'intérêt de cette signature.

$$\sigma_n(A) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \qquad \textit{(II-21)}$$

Une fois les signatures établies pour les deux nuages de points à aligner, des correspondances seront alors recherchées, ce qui permettra d'identifier une transformation par la méthode proposée au chapitre II.2.

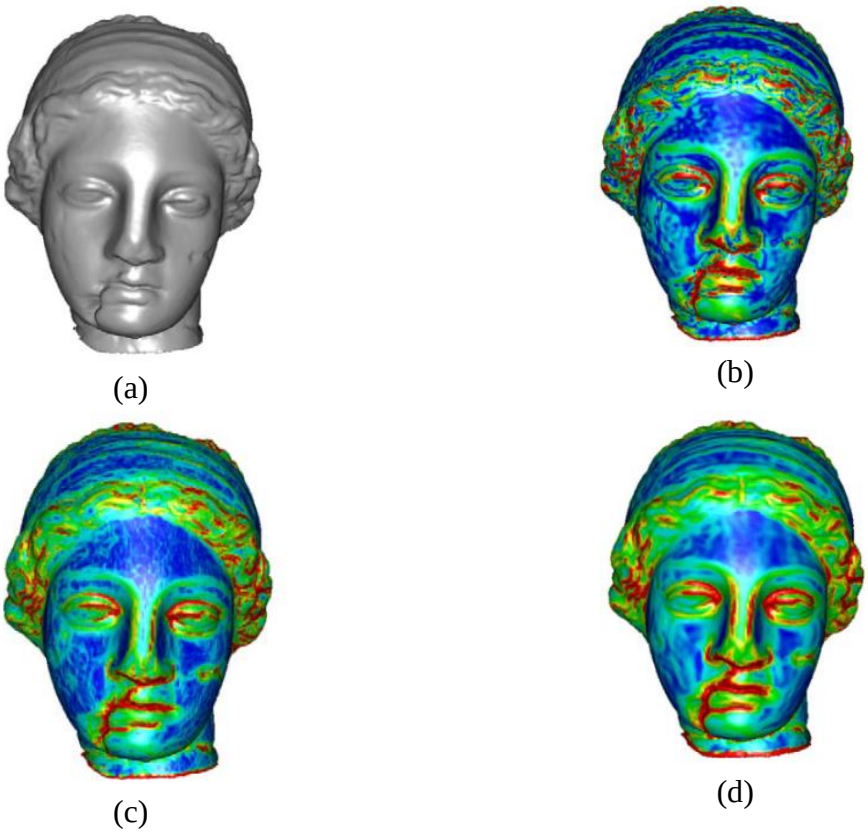



*Figure II-10 - Comparaison entre une signature calculée par courbures locales et par variation de surface (Pauly et al., 2002) : (a) modèle initial, (b) signatures estimées par la valeur moyenne des courbures, (c) signatures estimées par la variation de surface $\sigma_{20}$, (d) signatures estimées par la variation de surface $\sigma_{50}$.*

## II.3.6. Spin-image

Il s'agit ici, encore une fois, de définir une signature de points spécifique permettant, après identification des correspondances, de calculer une transformation géométrique qui aligne les nuages de points considérés. Cette méthode, nommée « spin-image », a été introduite par Johnson et Hebert en 1999 (Johnson and Hebert, 1999). La signature proposée est une image 2D de l'ensemble du modèle 3D, créée à partir d'un repère local établi en fonction de l'environnement proche du point considéré. La Figure II-11 permet d'illustrer les définitions qui suivent.

Soient :

- un point $O$ de coordonnées $\vec{p}$ appartenant à un nuage de points d'une surface scannée $\mathcal{S}$,

- le plan $P$, tangent à $\mathcal{S}$ au point $O$ (voir chapitre II.3.5 pour sa méthode de construction),

- le vecteur unitaire $\vec{n}$ normal au plan $P$ et orienté vers l'extérieur de la matière,

- la droite $(L)$, passant par $O$ et parallèle à $\vec{n}$,

- le point $M$ de coordonnée $\vec{x}$ appartenant au nuage de points,

- les coordonnées $\alpha$ et $\beta$, respectivement égales aux distances radiale et axiale entre les points $O$ et $M$.

Les coordonnées $\alpha$ et $\beta$ sont définies par les équations (II-22) et (II-23). La coordonnée $\alpha$ est toujours positive, tandis que la coordonnée $\beta$ est une distance signée. Pour chaque point $O$ considéré, il est donc possible d'établir les valeurs $\alpha$ et $\beta$ de tous les points $M$ du nuage de points et de représenter ce nuage 3D par un graphique 2D dont les abscisses sont $\alpha$ et les ordonnées sont $\beta$ (voir exemples en Figure II-12). L'espace 2D est ensuite discrétisé en cases régulières (pixellisation) et chaque case est associée à la quantité de points qui y est présente. Une représentation de cette quantité en niveaux de gris permet de créer une nouvelle image 2D (spin-image) qui sera considérée comme la signature du point $O$.

$$\alpha = \sqrt{\left\|\overrightarrow{OM}\right\|^2 - \left(\overrightarrow{OM}.\vec{n}\right)^2} \qquad \textit{(II-22)}$$

$$\beta = \overrightarrow{OM}.\vec{n} \qquad \textit{(II-23)}$$

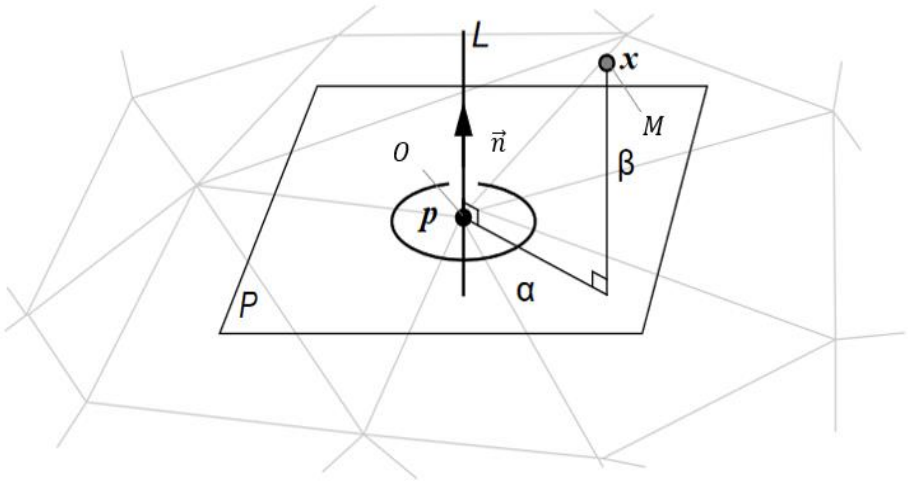



*Figure II-11 - Illustration des coordonnées utilisées pour la définition de la signature cylindrique des points (Johnson, 1997).*

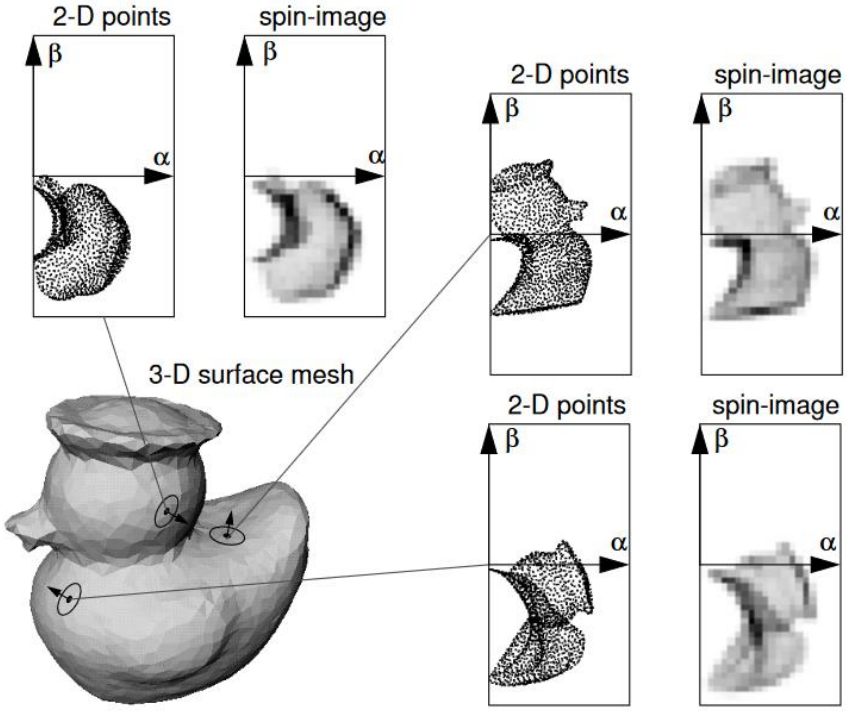



*Figure II-12 – Spin images pour un modèle simple de canard (Johnson and Hebert, 1999). Le nuage de points du modèle 3D est représenté pour 3 points considérés par un graphique de coordonnées $\alpha$ et $\beta$. La quantité de points identifiée après avoir défini une discrétisation de l'espace 2D du graphique permet de construire les 3 spin-images associées aux 3 points considérés.*

Le problème principal de cette méthode est qu'elle est dépendante de la taille de la pixellisation choisie et de la résolution des scans (Carmichael et al., 1999). Plus cette taille est grande, moins la quantité de données à enregistrer est importante. Cependant, cette variation de résolution affecte nécessairement la finesse de la signature du point considéré et l'efficacité des correspondances recherchées par la suite. Cette méthode a donc été améliorée par différentes variantes (Ruiz-Correa et al., 2001; Salti et al., 2011; Zhong, 2009), et les résultats associés sont considérés aujourd'hui comme étant précis et robustes (Salvi et al., 2007, p. 581).

## II.4. ALIGNEMENTS FINS : MÉTHODE ICP

Les alignements fins sont usuellement utilisés après l'application d'une transformation géométrique initiale calculée par une méthode approximative d'alignement, telle que présentée au chapitre II.3 précédent. Ces alignements fins permettent d'obtenir une registration plus précise, mais sont plus gourmands en ressources informatiques et en temps de calcul. La méthode ICP (Iterative Closest Point) est sans doute, à ce jour, l'alignement fin le plus répandu dans la littérature scientifique. Cette méthode calcule, de manière itérative, une transformation

géométrique en choisissant, à chaque itération, de nouveaux points correspondants. Il existe d'autres méthodes permettant des registrations précises (Chow et al., 2004; Maiseli et al., 2017; Masuda, 2002; Segal et al., 2009), mais du fait de sa popularité et de sa robustesse reconnue, seule la méthode ICP et quelques-unes de ses variantes seront ici étudiées.

## II.4.1. Présentation générale de l'algorithme

La méthode ICP permet de déterminer un alignement fin entre deux maillages ou deux nuages de points. Elle a été introduite pour la première fois par Besl et McKay en 1992 (Besl and McKay, 1992). L'algorithme de cette méthode est présenté en Figure II-13, et les étapes associées sont illustrées en Figure II-14. Ces différentes étapes seront tout d'abord décrites sommairement ci-dessous en considérant presque uniquement les caractéristiques essentielles de la méthode originelle proposée par Besl et McKay. Ensuite, comme de nombreuses variantes de la méthode ICP existent, un certain nombre d'entre elles seront présentées, plus en détail, à partir du paragraphe II.4.2.

**(0) État initial** : deux nuages de points sont ici considérés. Un nuage cible qui sera fixe lors du processus d'alignement et un nuage source qui sera déplacé successivement vers le nuage cible. Pour que l'algorithme puisse converger, la position du nuage cible est initialement proche du nuage source, et les deux nuages doivent posséder une quantité suffisante de points communs (points qui décrivent la même partie d'un objet physique).

**(1) Sélection** : le nuage source pouvant comporter de très nombreux points, il est difficile de les utiliser dans leur totalité car le temps de calcul devient alors trop important. Un échantillon de points, appelés points de contrôle, est donc choisi dans le nuage source pour appliquer la méthode ICP. Le choix de sélection peut être divers : une répartition aléatoire, une répartition uniforme, une répartition des points de manière à obtenir une isotropie de l'ensemble des normales calculées en chaque point, etc.

**(2) Recherche des correspondances** : pour chaque point de contrôle, le point le plus proche sur le nuage cible est défini comme étant le point correspondant. Ce choix est celui proposé par Besl et McKay dans leur publication de 1992. La littérature scientifique montre cependant qu'il est possible d'utiliser de manière efficace d'autres types de correspondances. De ce fait, l'algorithme nommé initialement « Itérative Closest Point[1] » devrait aujourd'hui, plus judicieusement, être nommé « Iterative Corresponding Point[2] ».

1 Traduction française : « Méthode itérative du point le plus proche ».
2 Traduction française : « Méthode itérative du point correspondant ».

**(3) Pondération / rejet** : lors de cette étape, chaque couple de points (contrôle / correspondant) est associé à une pondération qui représente la fiabilité de cette correspondance. En effet, les correspondances identifiées sont basées sur des estimations approchées des positions terminales exactes des points de contrôle et ces inexactitudes peuvent affecter grandement les résultats obtenus. Dans le cas où, pour certains critères, il est nécessaire de rejeter le couple de points considéré, une pondération nulle peut être alors être attribuée.

**(4) Minimisation de l'erreur métrique** : il s'agit ici de minimiser, à chaque itération, une fonction-objectif qui est souvent prise égale à la somme des carrés de l'erreur de positionnement, après application de la transformation géométrique recherchée. Une méthode possible de minimisation peut être celle décrite pour le problème de Procruste qui a été abordé au paragraphe II.2.

**(5) Transformation géométrique** : la transformation géométrique obtenue est appliquée à l'échantillon de points extrait du nuage source. Elle peut être calculée par l'utilisation de quaternions ou de coordonnées homogènes (voir paragraphe II.4.6).

**(6) Test de convergence** : à cette étape, si la nouvelle position de l'échantillon du nuage de points source est suffisamment proche du nuage de points cible, le processus itératif s'arrête. Dans le cas contraire, l'algorithme boucle à l'étape (2) ou parfois à l'étape (1) suivant les auteurs. En cas d'arrêt, une transformation générale composée des transformations successives identifiées à chaque itération est alors calculée. Cette transformation est ensuite appliquée au nuage de points source dans son intégralité. La position obtenue aligne alors au mieux le nuage de points source sur le nuage de points cible.

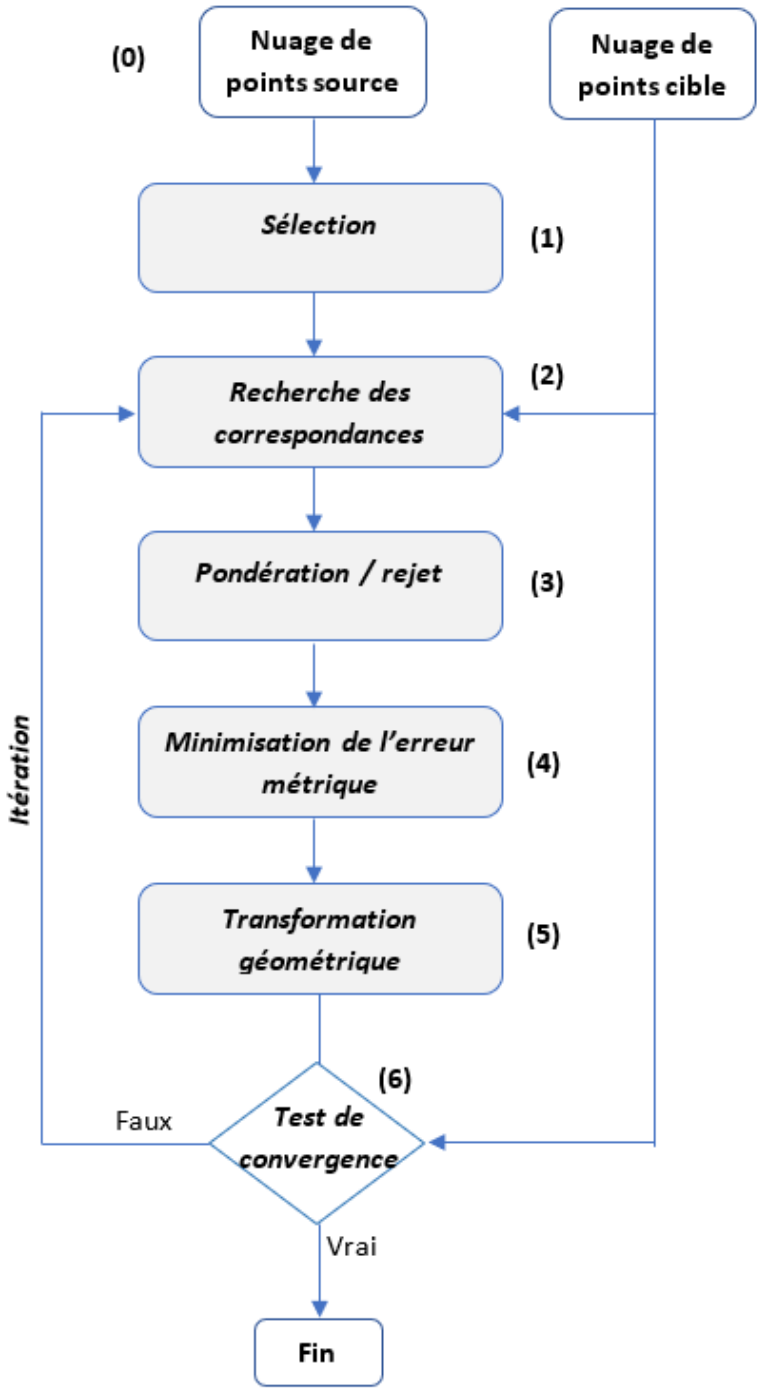
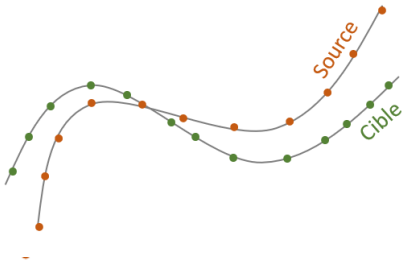
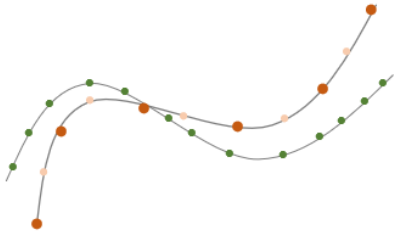



*Figure II-13 - Algorithme de la méthode ICP (Itérative Closest point). Le nuage de points source est déplacé de manière itérative vers le nuage de points cible. Quand les nuages de points sont suffisamment proches, l'algorithme est interrompu.*

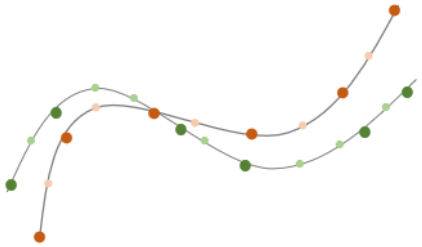
**(0)** **État initial**




**(1)** **Sélection**



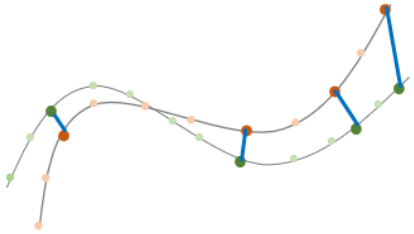
**(2)** **Recherche des correspondances**



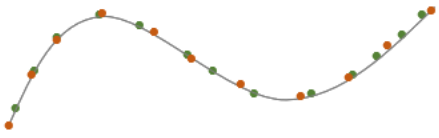
**(3)** **Pondération / rejet**



**(4)** **Minimisation de l'erreur**



**(5)** **Transformation géométrique**



**(6)** **Retour à (2) ou (1) si convergence non atteinte**

*Figure II-14 - Illustration des différentes étapes de la méthode Itérative Closest Point. La surface source est progressivement alignée sur la surface cible qui est fixe.*

## II.4.2. ICP - Étape 1 : sélection des points de contrôle

Les points de contrôle sont les points appartenant au nuage source qui seront utilisés lors du calcul itératif de registration. Leur quantité et la manière de les choisir seront décrites ci-dessous.

### II.4.2.1. Taille de l'échantillon

Même si certains auteurs utilisent la totalité des points du nuage source (Besl and McKay, 1992; Chen and Medioni, 1992), cette manière de procéder devient trop gourmande en temps de calcul pour la registration des maillages pouvant contenir plusieurs millions de points. En outre, comme il suffit de la connaissance des positions initiales et terminales de trois points non colinéaires pour définir une transformation géométrique rigide, il semble cohérent de ne pas alourdir inutilement le calcul par une quantité choisie trop élevée. Rusinkiewicz et Levoy (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) proposent, par exemple, d'utiliser 1% du nombre de points du nuage source pour définir l'échantillon.

### II.4.2.2. Méthodes d'échantillonnage

Outre la taille de l'échantillon choisi, la manière dont les points de contrôle sont sélectionnés influe aussi grandement sur la qualité de l'alignement obtenu. Trois méthodes de sélection sont couramment utilisées : l'échantillonnage aléatoire, l'échantillonnage uniforme et l'échantillonnage isotropique. Même s'il existe de nombreuses autres méthodes, telles que celles présentées dans les publications suivantes (Gelfand et al., 2003; Lyu et al., 2024; Weik, 1997), seules les trois méthodes classiques de sélection définies ci-dessus seront présentées par la suite. La répartition des points associée à ces méthodes sera visualisée (pour exemple) sur un nuage de points qui décrit un plan comprenant deux rainures orthogonales, tel que défini en Figure II-15. Ce modèle 3D comprend quatre surfaces planes de normale $\vec{z}$ permettant un alignement de ce modèle sur lui-même selon cette même direction. De manière complémentaire, la rainure orientée suivant $\vec{x}$ permet l'alignement selon la direction $\vec{y}$, et la rainure orientée suivant $\vec{y}$ permet l'alignement selon la direction $\vec{x}$.

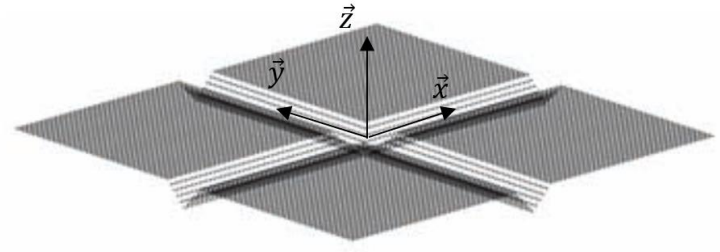



*Figure II-15 – Nuage de points décrivant une surface plane doublement rainurée, et comportant 10 201 points (Glira et al., 2015).*

- **Échantillonnage aléatoire**[1]

Cette méthode permet de sélectionner de manière aléatoire l'échantillon de points de contrôle dans le nuage de points source. C'est la méthode de sélection la plus simple et la plus rapide en temps de calcul (Halma et al., 2010; Masuda and Yokoya, 1995). Son inconvénient principal est que certaines parties du maillage source peuvent être peu échantillonnées du fait de l'aspect aléatoire de la sélection. En conséquence, si l'influence de ces parties est importante pour l'identification de la transformation géométrique recherchée, la qualité de la registration sera nécessairement médiocre. La Figure II-16 illustre un échantillonnage aléatoire sur le plan rainuré précédemment défini. On constate que la quantité de points associée aux surfaces planes est importante, donc le positionnement suivant la direction $\vec{z}$ sera précis. Cependant, comme peu de points sont présents dans les rainures, les alignements selon $\vec{x}$ et $\vec{y}$ seront médiocres.

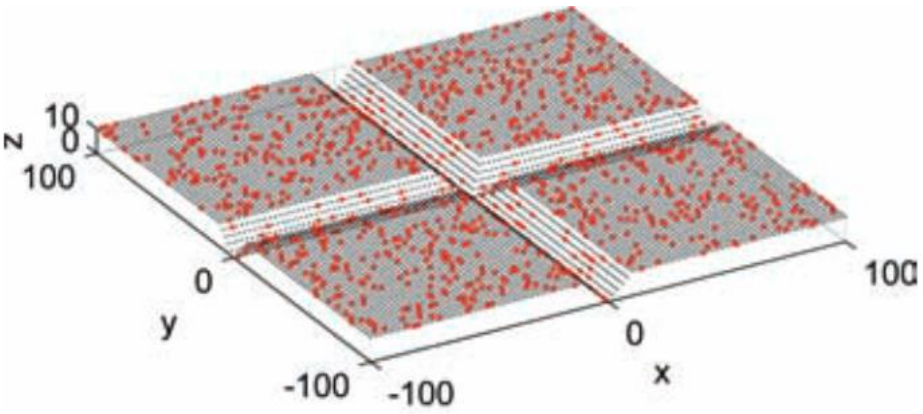



*Figure II-16 – Échantillonnage aléatoire à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015).*

- **Échantillonnage uniforme**[2]

Cette méthode permet de sélectionner de manière uniforme un échantillon de points de contrôle dans le nuage de points source (Masuda, 2001; Turk and Levoy, 1994). Pour ce faire, une grille régulière de voxel 3D est construite sur ce nuage de points. La dimension caractéristique d'un voxel est fixée en fonction de la quantité de points souhaitée pour l'échantillon. Les points de contrôle sélectionnés par cette méthode correspondent alors aux points les plus proches des barycentres des points présents dans chaque voxel (voir Figure II-17). Cette méthode est, de fait, plus lourde en temps de calcul que la méthode aléatoire précédente. La Figure II-18 illustre un échantillonnage uniforme sur le plan rainuré précédemment défini en Figure II-15. On constate que la quantité de points associée aux rainures est majorée par rapport à l'échantillonnage aléatoire. Cependant, un déséquilibre existe encore entre la quantité de points

[1] Traduction anglaise : « Random sampling »
[2] Traduction anglaise : « Uniform sampling »

présente sur les surfaces horizontales planes et la quantité de points (plus faible) présente dans les rainures.

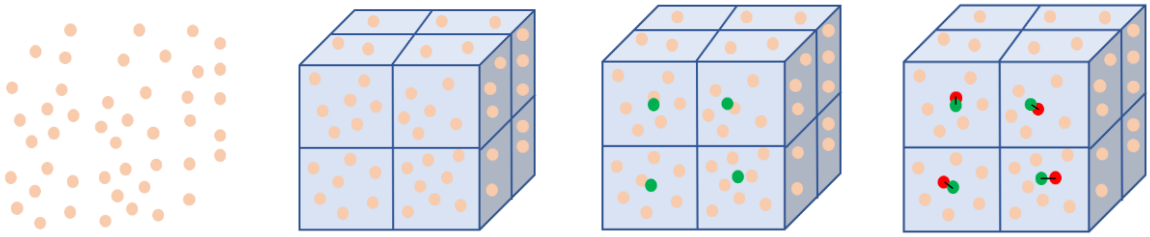



*Figure II-17 – Méthode d'échantillonnage uniforme : (a) nuage de points source, (b) voxelisation uniforme du nuage de points, (c) calcul du barycentre de chaque voxel (en vert), (d) identification du point le plus proche (en rouge) de chaque barycentre.*

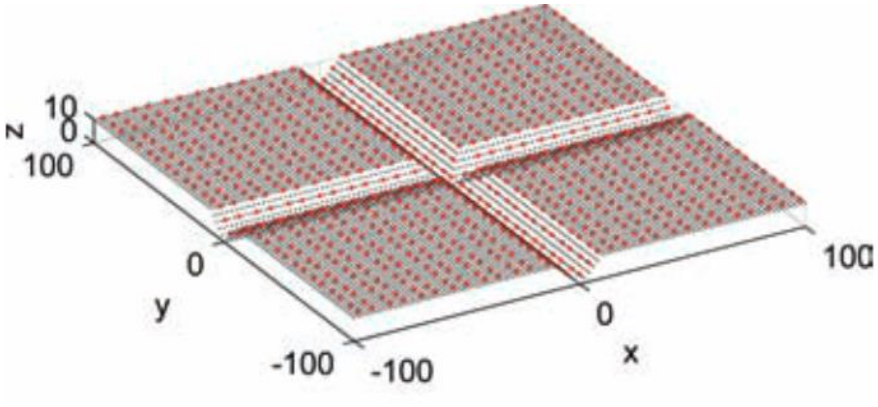



*Figure II-18 - Échantillonnage uniforme à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015).*

- **Échantillonnage isotropique**[1]

L'échantillonnage isotropique a été présenté pour la première fois par Rusinkiewicz et Levoy en 2001 (Rusinkiewicz and Levoy, 2001). Cette méthode permet de construire un échantillon dont la distribution des normales est la plus uniforme possible. Pour cela, dans un premier temps, les points du nuage source sont groupés en fonction de l'orientation angulaire de leur normale. Puis, dans un second temps, la sélection des points de contrôle est effectuée de manière uniforme sur les groupes d'équivalence angulaire constitués. La Figure II-19 illustre la répartition obtenue sur le plan rainuré défini précédemment. On constate que le nombre de points sur les 4 plans horizontaux a diminué au profit du nombre de points présents dans les rainures. Ceci améliore nécessairement les alignements attendus suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

[1] Désignation anglaise équivalente : « Normal space sampling »

La Figure II-20 présente, quant à elle, une comparaison de résultats d'alignement pour les trois méthodes d'échantillonnage décrites. On constate que, pour le modèle 3D exploité dans cette comparaison, il existe peu d'informations permettant de réaliser un alignement correct dans les directions parallèles au plan principal. Les registrations basées sur les répartitions aléatoires et uniformes sont associées à des erreurs de positionnement significatives, contrairement à la répartition isotropique qui impose une quantité supérieure de points dans la croix centrale du modèle 3D.

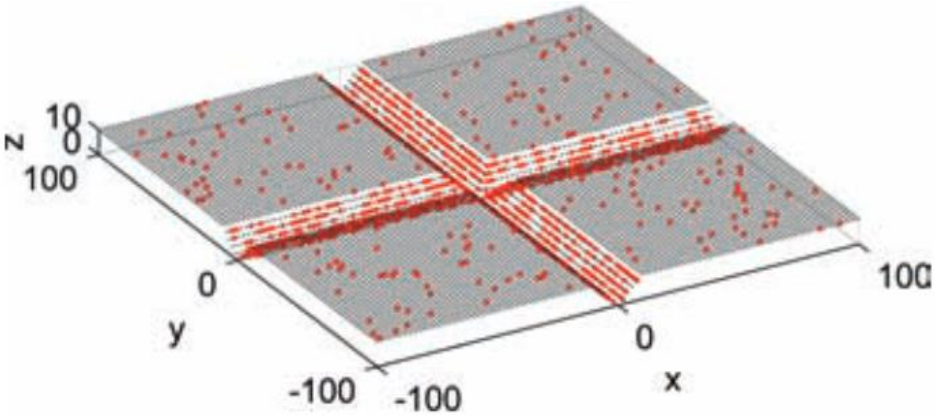
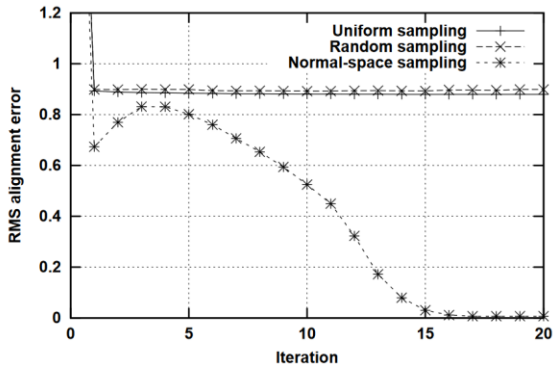
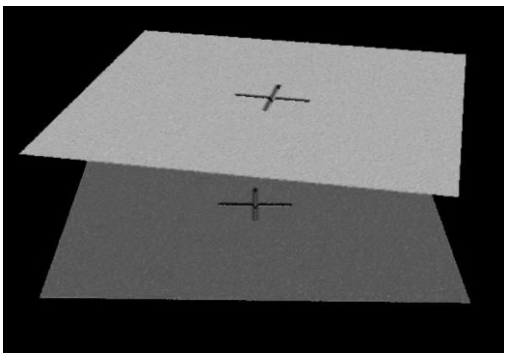



*Figure II-19 - Échantillonnage isotropique à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015).*




(a)



(b)

*Figure II-20 – Comparaison de 3 méthodes d'échantillonnage (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) : (a) évolution de l'erreur d'alignement pour un échantillonnage aléatoire, uniforme et isotropique, (b) modèle 3D utilisé pour réaliser la registration avec les 3 méthodes d'échantillonnage étudiées.*

## II.4.3. ICP - Étape 2 : recherche des correspondances

### II.4.3.1. Préambule

Le problème de Procruste développé au chapitre II.2 présuppose que les correspondances sont connues entre les nuages de points source et les nuages de points cible. Une transformation idéale peut alors être calculée pour aligner les deux modèles 3D. Dans le cas de l'alignement de nuages de points acquis par des scanners 3D optiques, ces correspondances ne sont pas connues. Elles sont alors présupposées pour permettre le calcul de la transformation géométrique.

Il existe de nombreux types de correspondances dans la littérature scientifique. Par exemple, et sans être exhaustif, la sélection du point le plus proche[1] (Besl and McKay, 1992), la sélection par projection normale[2] (Chen and Medioni, 1992), l'utilisation d'un vecteur-caractéristique le plus proche[3], la calibration inverse[4] (Blais and Levine, 1995), ou bien le point le plus proche avec compatibilités (Godin et al., 1994; Pulli, 1999; Sharp et al., 2002). Quelques-unes de ces correspondances seront décrites ci-dessous.

### II.4.3.2. Point le plus proche

- **Principe général**

La méthode d'identification du point le plus proche comme point correspondant a été introduite dès la première proposition de l'algorithme ICP par Besl et McKay en 1992 (Besl and McKay, 1992). L'hypothèse principale associée à ce choix de correspondance est que le point le plus proche d'un point de contrôle, dans le nuage de points cible, est proche de la position terminale attendue pour ce point de contrôle (voir Figure II-21). Ce principe de correspondance est vérifié si le nuage source est initialement proche du nuage cible. Dans le cas contraire, l'hypothèse n'est pas du tout exacte et c'est pour cela qu'une registration approximative doit être réalisée préalablement au calcul de l'alignement fin.

La méthode de correspondance ici décrite est très souvent utilisée. Elle fournit de bons résultats, même en ajoutant un bruit gaussien aux modèles 3D (Salvi et al., 2007). Il faut s'assurer néanmoins que, s'il existe des parties de surface qui ne sont pas présentes dans les deux modèles 3D, les distances point-point qui y sont calculées devront être supprimées du processus de calcul. En effet, ces distances sont incohérentes vis-à-vis des positions terminales attendues, et la transformation identifiée sera alors imprécise. Notons de plus que la recherche du point le

[1] Traduction anglaise : « Closest point »
[2] Traduction anglaise : « Normal shooting »
[3] Traduction anglaise : « Closest feature vector »
[4] Traduction anglaise : « Reverse calibration », ou « Projection-based matching »

plus proche est gourmande en temps de calcul si celui-ci est mené de manière brute, c'est-à-dire en calculant toutes les distances avec le nuage de points cible pour identifier celle qui est minimale. Les arbres k-d[1] sont alors très souvent choisis pour accélérer cette recherche.

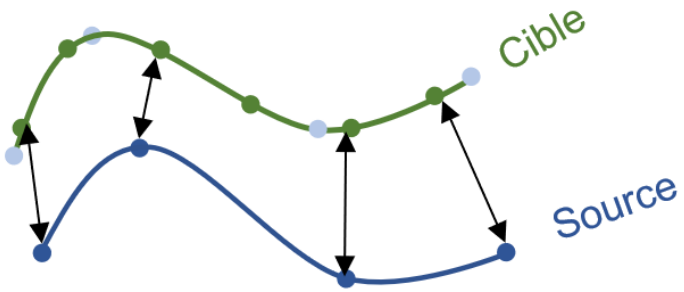



*Figure II-21 – Après un alignement parfait, les positions terminales des points de contrôle du nuage source (en bleu) sont représentées en bleu clair sur le nuage cible. La méthode de correspondance choisie suppose que ces positions terminales sont proches des points les plus proches des points de contrôle dans le nuage cible (points verts désignés par les flèches noires).*

- **Arbres k-d**

Les arbres k-d sont des structures de données qui permettent de partitionner l'espace pour enregistrer de manière structurée des nuages de points (Bentley, 1975). Ils peuvent être utilisés pour des données 2D, des données spatiales ou de dimension supérieure (k dimensionnels). L'idée la plus courante utilisée pour la construction de l'arbre k-d est le partitionnement successif de l'espace par un plan qui le divise deux parties égales. La normale au plan est tour à tour prise égale aux axes du repère utilisé (x-y-z-x-y-...) et la position de ce plan est fixée sur la médiane du sous-espace considéré ou sur le point médian de celui-ci afin d'équilibrer l'arbre k-d obtenu. Ces principes ne sont pas exhaustifs : il en existe de nombreux autres dans la littérature scientifique (Loh, 2011; Maneewongvatana and Mount, 1999; Sproull, 1991). Les parties (a), (b) et (c) de la Figure II-22 illustrent les étapes du partitionnement d'un nuage de points 2D, avec le choix du point médian pour la position du plan séparateur. La Figure II-22 (d) représente le début de l'arbre k-d obtenu.

Une fois la construction de l'arbre réalisée, les arbres k-d permettent d'identifier rapidement les points les plus proches d'un autre point. Soit $n_p$, le nombre de points du modèle 3D étudié, un calcul brut de toutes les distances induit un temps de calcul $O(n_p)$ qui peut devenir très important. En utilisant des arbres k-d classiques, tels que décrits ci-dessus, ce temps de calcul est réduit à $O(\log n_p)$, ce qui représente un gain considérable par rapport au calcul brut. Il faut cependant ajouter à cet ordre de grandeur, le temps de calcul initial $O(n_p \log n_p)$ nécessaire à

[1] Traduction anglaise : « kd-tree »

la construction du k-d tree, mais celui-ci n'est à réaliser qu'une seule fois au début de l'algorithme. Outre l'avantage du temps de calcul, les implémentations d'arbres k-d, par exemple la librairie Scipy ("Scipy spatial KDTree," 2011), permettent d'identifier facilement les k premiers points les plus proches, contraints si besoin, par une distance maximale à ne pas dépasser.

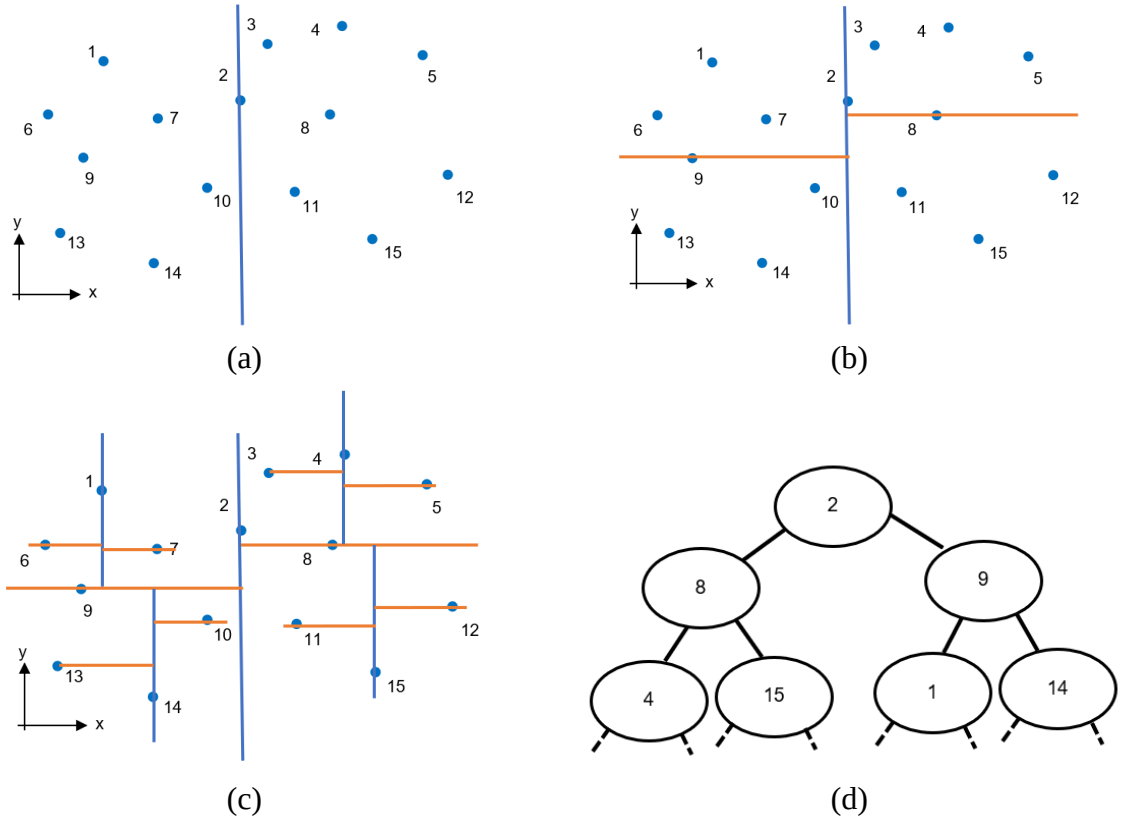



*Figure II-22 – Construction d'un arbre k-d : (a) l'espace 2D est divisé par un plan de normale $\vec{x}$, positionné sur le nœud médian numéroté 2, (b) les sous-espaces obtenus sont divisés par des plans de normale $\vec{y}$, positionnés sur les nœuds médians 8 et 9, (c) le partitionnement est poursuivi jusqu'à atteindre tous les points du nuage, (d) représentation de la partie initiale de l'arbre k-d obtenu.*

### II.4.3.3. Projection normale

L'utilisation d'une projection normale pour identifier le point correspondant a été introduite pour la première fois par Chen et Médioni en 1992 (Chen and Medioni, 1992). La Figure II-23 illustre la technique proposée pour la recherche de cette correspondance. Pour trouver, dans le nuage de points cible, le point correspondant $Q$ du point de contrôle $P$, il est tout d'abord nécessaire d'identifier la normale $\vec{n}$ du nuage de points source, au point $P$. Ensuite, le point

correspondant $Q$ est déterminé par la projection, suivant la normale $\vec{n}$, du point $P$ sur la surface du modèle 3D cible.

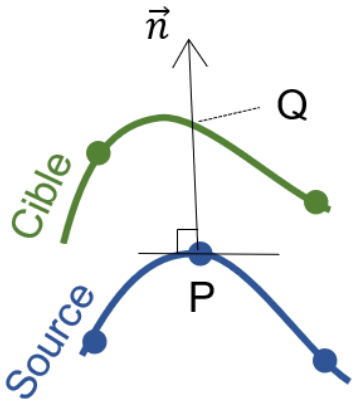



*Figure II-23 – Correspondance par projection normale.*

#### II.4.3.4. Vecteur-caractéristique le plus proche

- **Vecteur 3D : géométrie simple**

Pour identifier le point correspondant, les deux méthodes précédentes utilisent des considérations strictement géométriques : point le plus proche sur le nuage de points cible, point projeté sur le nuage de points cible. La notion du point le plus proche est associée à la minimisation de la distance euclidienne classique $d_e$, telle que définie par l'équation (II-24), entre deux points $P$ et $Q$, de coordonnées respectives $\vec{p} = (x, y, z)^t$ et $\vec{q} = (x', y', z')^t$.

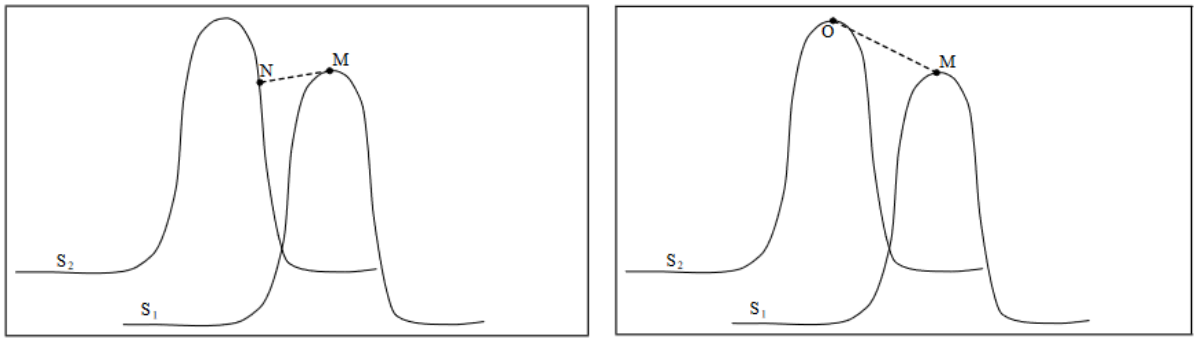
$$d_e^2(P, Q) = \|\vec{p} - \vec{q}\|^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 \qquad \textit{(II-24)}$$

- **Vecteur 8D : géométrie, normale et courbure**

Feldmar et Ayache (Feldmar and Ayache, 1996) proposent d'étendre l'utilisation du vecteur des coordonnées 3D à un vecteur de dimension 8 comprenant des informations complémentaires composées d'invariants par la transformation géométrique recherchée. Ils ajoutent ainsi aux coordonnées du vecteur position, les coordonnées $(n_x, n_y, n_z)$ de la normale au point considéré, ainsi que ses courbures principales $(k_1, k_2)$ (voir paragraphe II.3.4). Le point correspondant est alors identifié par la minimisation d'une nouvelle distance d, telle que définie par l'équation (II-25), entre deux points $P$ et $Q$, de coordonnées respectives $(x, y, z, n_x, n_y, n_z, k_1, k_2)$ et $(x', y', z', n'_x, n'_y, n'_z, k'_1, k'_2)$. Les coefficients $\alpha_i$ utilisés sont définis par l'inverse de l'amplitude des valeurs, dans la dimension $i$ considérée, pour le nuage de points cible.

$$d^2(P,Q) = \alpha_1(x-x')^2 + \alpha_2(y-y')^2 + \alpha_3(z-z')^2 + \alpha_4(n_x-n'_x)^2 + \alpha_5\left(n_y-n'_y\right)^2 + \alpha_6\left(n_y-n'_y\right)^2 + \alpha_7(k_1-k'_1)^2 + \alpha_8(k_2-k'_2)^2 \quad \textit{(II-25)}$$

Comme pour les méthodes précédentes, la recherche du point le plus proche, au sens de cette nouvelle distance, peut être accélérée par l'utilisation d'un arbre k-d, défini dans ce cas comme un arbre 8-d, nécessairement plus long à construire initialement. La Figure II-24 illustre la différence entre un point correspondant au sens euclidien et un point correspondant au sens de Feldman et Ayache.




(a) (b)

*Figure II-24 – Point correspondant euclidien versus point correspondant en 8D (Feldmar and Ayache, 1996) : (a) point le plus proche $N \in S_2$ du point $M \in S_1$ au sens euclidien, (b) point le plus proche $N \in S_2$ du point $M \in S_1$ en prenant en compte les coordonnées de la normale en $M$, ainsi que les courbures principales.*

- **Vecteur 11D : géométrie, courbures, moments centrés, harmoniques sphériques**

Sharp, Lee et Wehe (Sharp et al., 2002) proposent une variante nommée ICPIF (« ICP registration using Invariant Features ») qui utilise les courbures locales (Besl and Jain, 1986), les moments tridimensionnels (Sadjadi and Hall, 1980), et les harmoniques sphériques (Burel and Hénocq, 1995). Un exemple de traitement est donné en Figure II-25, qui représente les invariants calculés pour une même image. La distance utilisée pour trouver le point correspondant est définie dans l'équation (II-26) avec : $\vec{p}_e$ et $\vec{q}_e$ les coordonnées géométriques des points $P$ et $Q$, $\vec{p}_f$ et $\vec{q}_f$ les coordonnées des invariants proposés par les auteurs, et $\alpha$ la pondération permettant de contrôler l'importance des invariants par rapport aux coordonnées géométriques.

$$d(p,q) = \|\vec{p}_e - \vec{q}_e\|^2 + \alpha^2 \left\|\vec{p}_f - \vec{q}_f\right\|^2 \qquad \textit{(II-26)}$$

Les auteurs affirment que leur méthode permet de converger avec moins d'itérations que la méthode ICP qui utilise le point le plus proche comme point correspondant. La convergence est parfois atteinte en utilisant les invariants seuls, mais il est néanmoins préférable, dans un cas général, d'utiliser les coordonnées géométriques des points et les invariants associés.

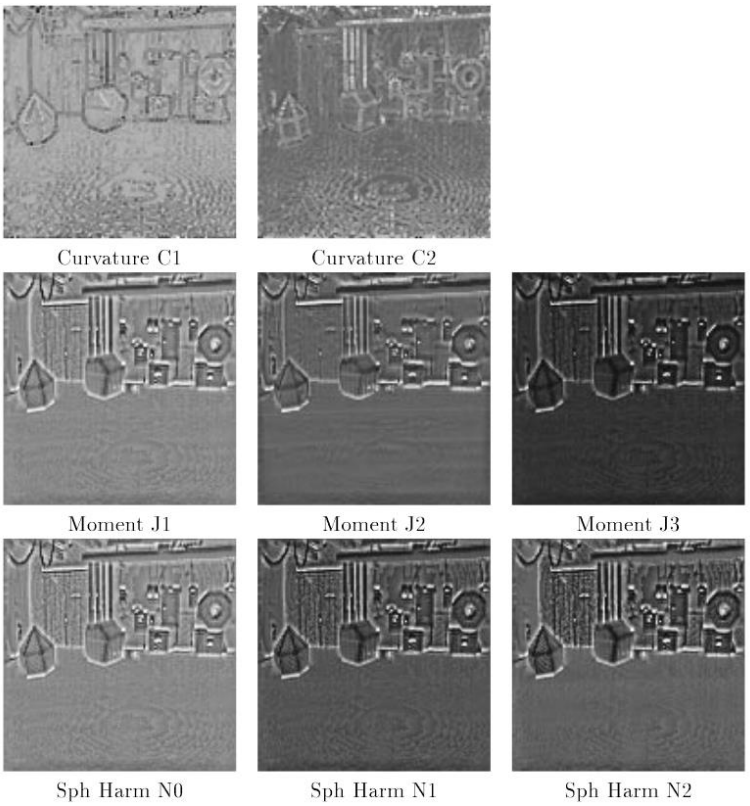



*Figure II-25 – Invariants utilisés pour l'identification des points correspondants : courbures, moments tridimensionnels et harmoniques sphériques (Sharp et al., 2002).*

- **Vecteur 6D : géométrie et couleur**

Johnson et Kang proposent des invariants basés sur la couleur des pièces numérisées (Johnson and Kang, 1999). Le modèle de couleur choisie est le YIQ (Foley, 1996, p. 775). Le premier canal Y définit l'intensité lumineuse, le second canal I le contraste rouge-cyan et le troisième canal Q, le contraste vert-magenta. La distance proposée dans ce cas est définie par l'équation (II-27), avec : $(x_1, y_1, z_1)$ et $(x_2, y_2, z_2)$ les coordonnées géométriques respectives des points $A$ et $B$, $(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ et $(c_{21}, c_{22}, c_{23})$ les valeurs Y, I et Q décrivant la couleur aux points $A$ et $B$, et $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ les pondérations respectives des canaux Y, I et Q.

$$d^2(A,B) = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 + \alpha_1(c_{11} - c_{21})^2 + \alpha_2(c_{12} - c_{22})^2 + \alpha_3(c_{13} - c_{23})^2 \quad \textit{(II-27)}$$

Afin d'atténuer les effets des variations de luminosité lors de la numérisation des objets physiques, les auteurs proposent de réduire la pondération $\alpha_1$ au dixième des deux autres pondérations qui décrivent les couleurs. La Figure II-26 présente l'histogramme des erreurs pour trois méthodes de calculs : géométrie seule, couleurs seules, et l'association de la géométrie et de la couleur. Les résultats montrent que l'utilisation de la couleur et la géométrie réduisent d'un facteur 10 l'erreur commise par rapport à la géométrie seule.

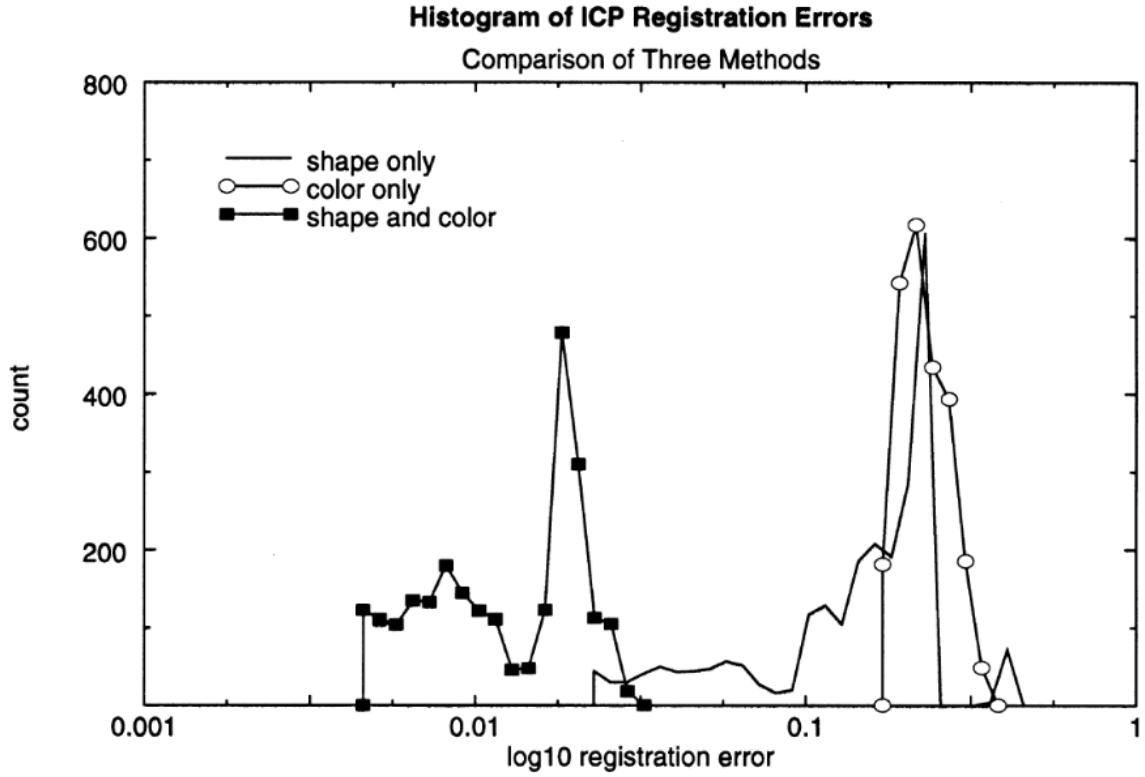



*Figure II-26 – Histogramme des erreurs d'alignement pour 3 versions de méthode ICP (Johnson and Kang, 1999)*

## II.4.4. ICP - Étape 3 : pondération / rejet

L'objectif de cette étape de la méthode ICP est de réduire l'influence défavorable de certains couples de points (contrôles/correspondants) sur la convergence du processus itératif et sur la qualité de l'alignement obtenu. Pour ce faire, la métrique liée à ces couples de points est associée à une pondération qui peut être définie de différentes manières : compatibilité des normales, distance entre points, position sur une frontière, compatibilité de signatures, etc. Dans

certains cas, une pondération nulle peut être attribuée, ce qui exclut complètement le couple de points considéré de la détermination de la transformation.

Dans la suite de ce chapitre, une fois le problème mathématique posé, une solution directe sera déterminée dans le cas des transformations rigides. Plusieurs types de pondérations seront ensuite succinctement décrites.

#### II.4.4.1. Mise en équation du problème général

Soient :

- $\mathcal{P}^s$, le nuage de points source, et $\mathcal{P}^c$ le nuage de points cible,

- $P_i^s$ , $i \in [1, n]$ les $n$ points de contrôle de coordonnées $\vec{p}_i^s = (x_i, y_i, z_i)^t$, choisis dans $\mathcal{P}^s$,

- $P_i^c$ , les $n$ points correspondants dans $\mathcal{P}^c$, de coordonnées $\vec{p}_i^c = (X_i, Y_i, Z_i)^t$,

- $w_i$ , les $n$ pondérations associées aux couples $(P_i^s, P_i^c)$,

- $R \in \mathrm{M}_{3\times3}(\mathbb{R})$, $\vec{t} \in \mathrm{M}_{3\times1}(\mathbb{R})$ et $s \in \mathbb{R}_+^*$, respectivement une matrice de rotation quelconque, un vecteur translation quelconque et un facteur d'échelle quelconque.

Les transformations $R_{opt} \in M_{3\times3}(\mathbb{R})$, $\vec{t}_{opt} \in \mathrm{M}_{3\times1}(\mathbb{R})$ et $s_{opt}$ recherchées sont obtenues par la nouvelle formulation du problème de Procruste telle que définie par la relation (II-28).

$$\left(R_{opt}, \vec{t}_{opt}, s_{opt}\right) = arg\,min_{(R,\vec{t},s)} \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| \left(sR\vec{p}_i^s + \vec{t}\right) - \vec{p}_i^c \right\|^2 \qquad \textit{(II-28)}$$

Dans le cas d'une recherche de transformation rigide $\left(s_{opt} = 1\right)$, il est possible de résoudre par calcul direct le problème ci-dessus formulé. La démonstration de cette résolution est proche méthodologiquement de celle établie pour le problème de Procruste au chapitre II.2. L'importance des solutions mathématiques directes impose néanmoins de détailler cette démonstration ci-dessous.

#### II.4.4.2. Résolution pour les transformations rigides

L'objectif de ce paragraphe est de proposer une solution directe au problème de Procruste orthogonal rigide et pondéré. La démonstration proposée est fortement inspirée du document publié par Sorkine-Hornung et Rabinovich en 2017 (Sorkine-Hornung and Rabinovich, 2017).

- **Problème à résoudre**

Les transformations $R_{opt} \in \mathrm{M}_{3\times3}(\mathbb{R})$ et $\vec{t}_{opt} \in M_{3\times1}(\mathbb{R})$ recherchées sont obtenues par la formulation (II-29) du problème de Procruste.

$$\left(R_{opt}, \vec{t}_{opt}\right) = arg\, min_{(R,\vec{t})} \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| \left(R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{t}\right) - \vec{p}_i^{\,c} \right\|^2 \qquad \textit{(II-29)}$$

- **Recherche de la translation**

Soit $F\left(R, \vec{t}\right) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| \left(R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{t}\right) - \vec{p}_i^{\,c} \right\|^2$, il est possible de déterminer $\vec{t}_{opt}$ en différenciant $F$ par rapport à $\vec{t}$. On obtient alors :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \vec{t}} &= \sum_{i=1}^{n} 2w_i \left(R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{t} - \vec{p}_i^{\,c}\right) \\ &= 2\vec{t} \sum_{i=1}^{n} w_i + 2R \sum_{i=1}^{n} w_i\, \vec{p}_i^{\,s} - 2 \sum_{i=1}^{n} w_i\, \vec{p}_i^{\,c} \end{aligned} \qquad \textit{(II-30)}$$

Soient $P_g^c$ et $P_g^s$ les barycentres pondérés des nuages de points. Les coordonnées $\vec{p}_g^{\,c}$ et $\vec{p}_g^{\,s}$ de ces points s'écrivent de la manière suivante :

$$\vec{p}_g^{\,c} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i\, \vec{p}_i^{\,c}}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad \textit{(II-31)}$$

$$\vec{p}_g^{\,s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i\, \vec{p}_i^{\,s}}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad \textit{(II-32)}$$

En remplaçant dans l'équation précédente (II-30), il vient :

$$\frac{\partial F}{\partial \vec{t}} = \vec{0} \Leftrightarrow 2\vec{t} + 2R\vec{p}_g^{\,s} - 2\vec{p}_g^{\,c} = 0 \qquad \textit{(II-33)}$$

D'où :

$$\vec{t} = \vec{p}_g^{\,c} - R\vec{p}_g^{\,s} \qquad \textit{(II-34)}$$

En réinjectant $\vec{t}$ dans la fonction $F(R, \vec{t})$, on a :

$$\begin{aligned} F(R) &= \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| \left( R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{p}_g^{\,c} - R\vec{p}_g^{\,s} \right) - \vec{p}_i^{\,c} \right\|^2 \\ &= \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| R\left( \vec{p}_i^{\,s} - \vec{p}_g^{\,s} \right) - \left( \vec{p}_i^{\,c} - \vec{p}_g^{\,c} \right) \right\|^2 \end{aligned} \qquad \textit{(II-35)}$$

On se propose maintenant d'effectuer le changement de variables suivant :

$$\vec{s}_i = \vec{p}_i^{\,s} - \vec{p}_g^{\,s} \qquad \textit{(II-36)}$$

$$\vec{c}_i = \vec{p}_i^{\,c} - \vec{p}_g^{\,c} \qquad \textit{(II-37)}$$

Ce qui permet d'écrire une nouvelle formulation de $F$ :

$$F(R) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| R\vec{s}_i - \vec{c}_i \right\|^2 \qquad \textit{(II-38)}$$

On a donc :

$$R_{opt} = arg\, min_R \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| R\vec{s}_i - \vec{c}_i \right\|^2 \qquad \textit{(II-39)}$$

- **Recherche de la rotation**

Développons tout d'abord la fonction $F$ :

$$F(R) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| R\vec{s}_i - \vec{c}_i \right\|^2 \qquad \textit{(II-40)}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} w_i \left(\vec{s}_i^t R^t R \vec{s}_i - \vec{c}_i^t R \vec{s}_i - \vec{s}_i^t R^t \vec{c}_i + \vec{c}_i^t \vec{c}_i\right)$$

Ensuite, comme $R$ est orthogonale, on a $R^t R = I$, et comme la transposée d'un scalaire est ce même scalaire, on a $\vec{c}_i^t R \vec{s}_i = \vec{s}_i^t R^t \vec{c}_i$. En réinjectant ces informations dans l'équation (II-40), on obtient :

$$F(R) = \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{s}_i^t \vec{s}_i - 2 \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t R \vec{s}_i + \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t \vec{c}_i \qquad \textit{(II-41)}$$

Donc :

$$\begin{aligned} R_{opt} &= arg\, min_R \left( \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{s}_i^t \vec{s}_i - 2 \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t R \vec{s_i} + \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t \vec{c}_i \right) \\ &= arg\, max_R \left( \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t R \vec{s}_i \right) \end{aligned} \qquad \textit{(II-42)}$$

Soient $S$ et $C \in \mathrm{M}_{3\times n}(\mathbb{R})$, les matrices contenant respectivement, par colonnes, les coordonnées $\vec{s}_i$ et $\vec{c}_i$. Soit $W = diag\ (w_1, w_2, .., w_n)$, la matrice diagonale contenant les pondérations des couples de points contrôle/correspondant. On peut écrire :

$$\begin{aligned} R_{opt} &= arg\, max_R \left( \sum_{i=1}^{n} w_i \vec{c}_i^t R \vec{s}_i \right) \\ &= arg\, max_R \left( tr(W C^t R S) \right) \end{aligned} \qquad \textit{(II-43)}$$

Comme la trace est commutative, on a enfin :

$$R_{opt} = arg\, max_R \left( tr(R S W C^t) \right) \qquad \textit{(II-44)}$$

On se propose maintenant, comme pour la résolution du problème de Procruste orthogonal, de décomposer la matrice $SWC^t$ en valeurs singulières :

$$SWC^t = UDV^t \qquad \textit{(II-45)}$$

Avec, $U$ et $V \in M_{3\times 3}(\mathbb{R})$, des matrices orthogonales et $D \in M_{3\times 3}(\mathbb{R}^+)$, une matrice diagonale.

La résolution est maintenant similaire à celle proposée dans le paragraphe II.2.3. La rotation recherchée est finalement obtenue par la relation générale (II-46) ci-dessous, améliorée par la relation (II-47) pour éviter le calcul de réflexions.

$$R = VU^t \qquad \textit{(II-46)}$$

$$R = V\ diag[1,1,..,det(VU^t)]U^t \qquad \textit{(II-47)}$$

On note que ces expressions sont très proches de celles obtenues pour le problème non pondéré. Néanmoins, les définitions de $U$ et de $V$ sont différentes, tout comme le changement de repère initial construit sur le barycentre pondéré des points, au lieu du simple barycentre.

#### II.4.4.3. Choix des pondérations

- **Distances entre points**

Chaque couple de points est associé à une métrique qui peut, par exemple, être une distance point-point (voir II.4.5.1) ou une distance point-plan (voir II.4.5.2). L'étude de l'ensemble de ces distances permet d'identifier des couples de points qui semblent trop éloignés pour valider l'hypothèse fondamentale utilisée dans le processus de registration : à chaque itération, le point correspondant dans le nuage cible est proche de la position terminale attendue pour le point de contrôle. Une pondération $w_d$ peut donc être établie afin de réduire l'importance des points trop éloignés dans le processus de minimisation. Plusieurs méthodes peuvent alors être proposées :

- Pondération nulle si la métrique est supérieure à un seuil défini arbitrairement.
- Pondération nulle pour les $p$ % de points les plus éloignés (Pulli, 1999).
- Pondération nulle si la métrique est supérieure à un seuil $d_{lim}$ défini statistiquement à partir de l'écart-type $\sigma$ et de la moyenne $d_{moy}$ de l'ensemble des métriques. Le seuil $d_{lim}$ peut être construit tel que proposé dans l'équation (II-48) suivante, avec $k$ choisi arbitrairement (Masuda and Yokoya, 1995).

$$d_{lim} = d_{moy} + k \times \sigma, \qquad k \in \mathbb{R}_+ \qquad \textit{(II-48)}$$

- Pondération proportionnelle, établie entre la métrique $d$ du couple de points $(P^s, P^c)$ considéré et la distance maximale $d_{max}$ identifiée sur l'ensemble des métriques calculées (Godin et al., 1994).

$$w_d = 1 - \frac{d(P^s, P^c)}{d_{max}} \qquad \textit{(II-49)}$$

- **Compatibilité des normales**

Ce type de méthode utilise la compatibilité des normales $(\vec{n}^s, \vec{n}^c)$ des points de contrôle et correspondants $(P^s, P^c)$ pour définir une nouvelle pondération $w_n$.

- Pondération nulle si l'angle $\alpha$ entre les normales est supérieur à une valeur $\alpha_{lim}$ fixée arbitrairement (p. ex. 45°) (Godin et al., 1994).

$$w_n = 0 \; si \; \alpha = cos^{-1}|(\vec{n}^s)^t . \vec{n}^c| > \alpha_{lim} \qquad \textit{(II-50)}$$

- Pondération régulière associée à l'angle formé entre les normales.

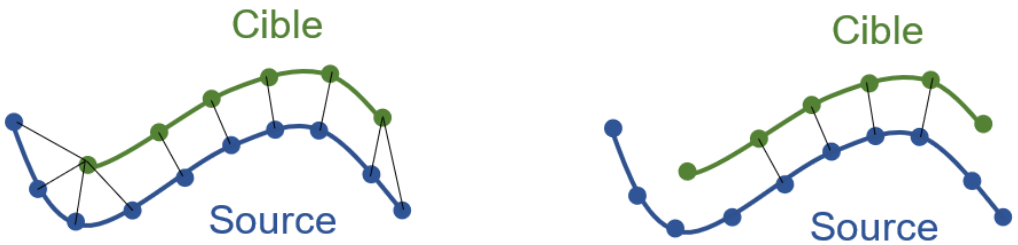
$$w_n = |(\vec{n}^s)^t . \vec{n}^c| \qquad \textit{(II-51)}$$

- **Autres pondérations / rejets**

- Point correspondant situé sur une frontière

Lorsque les modèles 3D à aligner possèdent des zones de non-recouvrement, les positions terminales de certains points de contrôles du nuage de points source sont situées en dehors du nuage de points cible. Ces points ne peuvent donc pas participer à la recherche de la transformation géométrique, car ils ne possèdent pas d'homologues physiques sur le nuage de points cible. Cependant, l'algorithme associe, à chaque point de contrôle, un point correspondant, ce qui induit alors des erreurs dans le processus de calcul. En constatant que, dans le cas des points de contrôle situés sur des zones de non-recouvrement, les points correspondants associés par la méthode du point le plus proche sont situés sur une frontière du modèle 3D cible, il est possible d'utiliser ce critère de frontière pour rejeter le couple de points concerné (voir Figure II-27).

Notons que cette technique peut aussi être étendue à tout point correspondant ou à tout point de contrôle appartenant à une arête de l'objet physique scanné, car les appareils de mesure tridimensionnels produisent très souvent un bruit local autour de ces arêtes (voir Figure II-28), surtout lorsque qu'elles sont vives (Turk and Levoy, 1994).




(a) (b)

*Figure II-27 – Modèles 3D avec non-recouvrement total des surfaces : (a) certains points de contrôle sont associés à des points les plus proches situés sur une frontière du modèle 3D cible, (b) ces points de contrôles sont donc situés sur des zones de non-recouvrement, ils sont alors supprimés du processus de registration.*

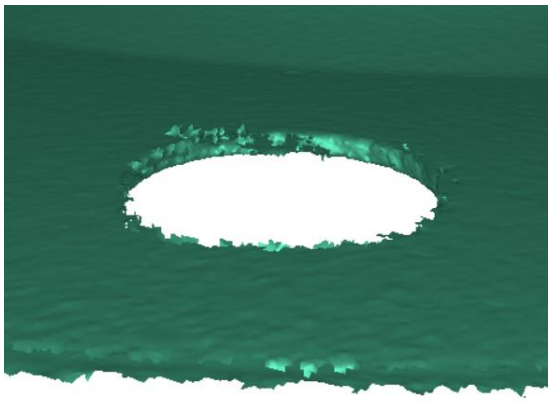


*Figure II-28 – Bruit local situé autour d'un trou dans une tôle fine et situé sur le bord de cette tôle.*

- Utilisation d'invariants divers

La méthode des pondérations/rejets ici décrite permet de limiter ou de supprimer l'influence de certains couples de points contrôle/correspondant sur le processus de calcul. Si une pondération régulière peut être établie pour des distances et des normales, elle peut, de la même manière, être construite pour de nombreuses autres propriétés qui doivent néanmoins être invariantes par la transformation géométrique recherchée.

La couleur peut, par exemple, être choisie comme propriété permettant de construire une pondération. Si les points de contrôle et correspondant choisis possèdent des couleurs trop différentes, il sera alors affecté une pondération faible. Dans le cas du choix de cette propriété, il faut néanmoins être assuré que cette donnée ne change pas entre deux scans. Ceci peut être

le cas si les conditions de luminosité évoluent ou si un produit de matification est ajouté et est altéré par des manipulations entre ces deux scans.

Remarquons, pour finir, que toutes les signatures de points définies au chapitre II.3 (signature sphérique des points, courbures principales, variation de surface et spin-image) sont des invariants qui peuvent être judicieusement utilisés pour construire des pondérations du processus de registration.

## II.4.5. ICP - Étape 4 : définition des fonctions-objectif

Une fois les points de contrôle et les points correspondants identifiés, il est nécessaire de minimiser une fonction-objectif afin d'identifier une transformation géométrique à chaque itération. Pour cela, une méthode des moindres carrés pondérés est souvent utilisée. À la suite des premiers développements de la méthode ICP en 1992, de nombreuses variantes ont été publiées dans la littérature scientifique, chacune comprenant ses spécificités, ses avantages, mais aussi ses inconvénients. Néanmoins, beaucoup d'entre elles utilisent les deux fonctions-objectif qui seront décrites ci-dessous.

### II.4.5.1. Distance point-point

L'équation (II-52) définit une première fonction-objectif $F_1$ dans laquelle l'erreur est prise égale à la distance point à point, entre la transformée du point de contrôle et son point correspondant. Dans ce cas, comme nous l'avons déjà démontré dans le chapitre II.4.4, la décomposition en valeurs singulières (SVD) du système matriciel associé permet de trouver directement la transformation rigide recherchée.

$$F_1(R,\vec{t}) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left\| \left(R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{t}\right) - \vec{p}_i^{\,c} \right\|^2 \qquad \textit{(II-52)}$$

Avec $\vec{p}_i^{\,s} \in \mathrm{M}_{3\times1}(\mathbb{R})$ et $\vec{p}_i^{\,c} \in \mathrm{M}_{3\times1}(\mathbb{R})$, respectivement les coordonnées de $P_i^s$ le $i^{ème}$ point de contrôle et de $P_i^c$ le $i^{ème}$ point correspondant associé, $w_i \in \mathbb{R}$ la pondération attribuée à ce couple de points, $R \in \mathrm{M}_{3\times3}(\mathbb{R})$ une matrice de rotation et $\vec{t} \in \mathrm{M}_{3\times1}(\mathbb{R})$ un vecteur translation.

### II.4.5.2. Distance point-plan

La méthode couramment nommée « distance point-plan » est la méthode initialement développée par Chen et Médioni en 1992 (Chen and Medioni, 1992). Une fois le point correspondant choisi (par projection normale pour ces auteurs), l'erreur à minimiser correspond

à la distance minimale entre le point $T(P^s)$, transformée du point de contrôle $P^s$, et le plan tangent $(\pi)$ construit sur le point correspondant $P^c$ (voir Figure II-29).

L'équation (II-53) définit la fonction-objectif $F_2$ utilisée alors pour cette méthode.

$$F_2(R,\vec{t}) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left[ \left( R\vec{p}_i^{\,s} + \vec{t} - \vec{p}_i^{\,c} \right)^t . \vec{n}_i^{\,c} \right]^2 \qquad \textit{(II-53)}$$

Avec, $\vec{p}_i^{\,s} \in M_{3\times1}(\mathbb{R})$ et $\vec{p}_i^{\,c} \in M_{3\times1}(\mathbb{R})$ respectivement les coordonnées de $P_i^s$ le $i^{ème}$ point de contrôle et de $P_i^c$ le $i^{ème}$ point correspondant associé, $w_i \in \mathbb{R}$ la pondération attribuée à ce couple de points, $R \in M_{3\times3}(\mathbb{R})$ une matrice de rotation, $\vec{t} \in M_{3\times1}(\mathbb{R})$ un vecteur translation, et $\vec{n}_i^{\,c}$ la normale au plan tangent construit en $P_i^c$ sur le nuage de points cible.

Chen et Médioni ont proposé cette technique dans le but de diminuer le nombre d'itérations nécessaires à l'obtention de la convergence, ce qui a été confirmé ultérieurement par d'autres publications (Rusinkiewicz and Levoy, 2001; Soon-Yong Park and Subbarao, 2003). Les auteurs justifient cette convergence rapide en indiquant que la distance point-plan de leur méthode libère deux degrés de liberté localement, ce qui autorise plus de mouvements pour le nuage de points source. Notons tout de même que si ce choix de points correspondants diminue le nombre d'itérations, il n'est pas assuré que cela soit le cas pour le temps global de calcul. En effet, le processus nécessite plus d'opérations complexes : calculs de normales, d'intersections et de plans tangents. Notons aussi que la métrique point-plan choisie peut être vue comme la distance minimale entre un point et une approximation plane de la surface locale autour du point correspondant. Cette remarque est associée à la notion de lissage des maillages 3D que nous aborderons au Chapitre III suivant.

La minimisation de la nouvelle fonction-objectif $F_2$ n'est pas directe comme cela est le cas pour la méthode point-point précédente. L'obtention des paramètres de la transformation géométrique doit alors être réalisée par des méthodes de calcul permettant de résoudre des problèmes de moindres carrés non linéaires, comme l'algorithme de Levenberg–Marquardt (Levenberg, 1944). Cependant, comme une registration approchée est initialement réalisée avant de procéder à l'alignement fin, il est possible de linéariser les matrices de rotation en considérant des petits angles afin d'obtenir ainsi une solution directe pour des transformations rigides sans pondérations (Low, 2004).

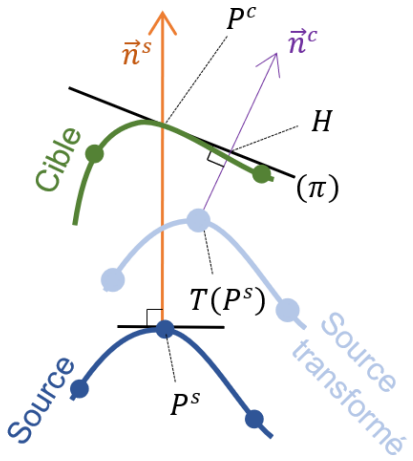



*Figure II-29 – Distance point-plan selon Chen et Médioni. L'erreur minimisée est la distance entre $T(P^s)$, la transformée de $P^s$, et son point le plus proche $H$ sur le plan $(\pi)$.*

## II.4.6. ICP - Étape 5 : transformations géométriques

Deux outils mathématiques sont usuellement utilisés pour effectuer des transformations géométriques sur des nuages de points : les quaternions et les coordonnées homogènes.

### II.4.6.1. Utilisation des quaternions

- **Définitions mathématiques**

Les quaternions correspondent à une extension des nombres complexes qui a été introduite par Sir William Rowan Hamilton en 1843 (Hamilton, 1843). Si $\mathbb{C}$ est l'espace des nombres complexes qui ajoute $\boldsymbol{i}$ à l'espace des réels $\mathbb{R}$, alors $\mathbb{H}$ est l'espace des quaternions qui ajoute $\boldsymbol{j}$ et $\boldsymbol{k}$ à l'espace des complexes $\mathbb{C}$. Les quaternions q appartenant à $\mathbb{H}$ se mettent sous la forme :

$$q = a + b\boldsymbol{i} + c\boldsymbol{j} + d\boldsymbol{k} \qquad \textit{(II-54)}$$

Avec, $(a, b, c, d) \in \mathbb{R}^4$ et les nombres $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$, $\boldsymbol{k}$ vérifiant :

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{ij} = \boldsymbol{k} \; et \; \boldsymbol{ji} = -\boldsymbol{k} \\ &\boldsymbol{jk} = \boldsymbol{i} \; et \; \boldsymbol{kj} = -\boldsymbol{i} \\ &\boldsymbol{ki} = \boldsymbol{j} \; et \; \boldsymbol{ik} = -\boldsymbol{j} \\ &\boldsymbol{i}^2 = \boldsymbol{j}^2 = \boldsymbol{k}^2 = \boldsymbol{ijk} = -1 \end{aligned} \qquad \textit{(II-55)}$$

Même si l'algèbre de l'espace des quaternions ne sera pas détaillée ici, on note que la partie réelle $a$ du quaternion $q$ se comporte algébriquement comme un scalaire de $\mathbb{R}$, et que sa partie imaginaire $b\boldsymbol{i} + c\boldsymbol{j} + d\boldsymbol{k}$ se comporte algébriquement comme un vecteur de $\mathbb{R}^3$.

De ce fait, lorsqu'un quaternion est utilisé en géométrie, on l'associe souvent à un vecteur $\vec{v}$ tel que $q = a + \vec{v}$. Dans ce cas, à la place des règles définies en (II-55), il est possible d'utiliser le produit scalaire "." et le produit vectoriel " ∧ " de $\mathbb{R}^3$ pour définir une multiplication entre deux quaternions $q_1$ et $q_2$, tels que $q_1 = a_1 + \vec{v}_1$ et $q_2 = a_2 + \vec{v}_2$.

On obtient :

$$\begin{aligned} q_1 q_2 &= (a_1 + \vec{v}_1)(a_2 + \vec{v}_2) \\ &= a_1 a_2 + a_1 \vec{v}_2 + a_2 \vec{v}_1 + \vec{v}_1 \vec{v}_2 \\ &= a_1 a_2 + a_1 \vec{v}_2 + a_2 \vec{v}_1 + (-\vec{v}_1 . \vec{v}_2 + \vec{v}_1 \wedge \vec{v}_2) \end{aligned} \qquad \textit{(II-56)}$$

Les conditions spécifiques (II-55) attribuées au triplet $\boldsymbol{i},\ \boldsymbol{j},\ \boldsymbol{k}$ déclinées dans la relation (II-56) imposent une conséquence négative à l'algèbre associée aux quaternions : la non-commutativité de la multiplication $(qq' \neq q'q)$. La définition de cette multiplication de quaternions conduit à déterminer l'inverse $q^{-1}$ d'un quaternion $q$. Si $\bar{q}$ est le conjugué de $q$ tel que $\bar{q} = a - b\boldsymbol{i} - c\boldsymbol{j} - d\boldsymbol{k}$ et $\|q\|$ est la norme de $q$ telle que $\|q\|^2 = q\bar{q} = a^2 + b^2 + c^2 + d^2$, alors l'inverse $q^{-1}$ est défini par :

$$q^{-1} = \frac{\bar{q}}{\|q\|^2} \qquad \textit{(II-57)}$$

En contrepartie de la non-commutativité de la multiplication, un triple produit de quaternions associé à cette algèbre va permettre de formaliser simplement des rotations dans l'espace vectoriel 3D.

- **Rotations et quaternions**

En 1775, Leonhard Euler a prouvé que tout déplacement d'un corps solide, tel que l'un de ses points reste fixe dans l'espace, peut être équivalent à une rotation autour d'un axe passant par ce point fixe. L'utilisation de quaternions associés à une application linéaire $\Phi$ dédiée permet d'écrire simplement cette rotation, le point fixe étant ici l'origine.

Soit $\mathcal{P}$, le sous-espace des quaternions purs. Ce sous-espace $\mathcal{P}$ est uniquement composé de vecteurs, sans composantes réelles. Tout vecteur de $\mathbb{R}^3$ peut donc être considéré comme un élément de $\mathcal{P}$, ce qui permet de lui appliquer les opérations liées à $\mathbb{H}$, l'espace des quaternions.

Soient $U$, l'ensemble des quaternions de norme égale à 1, et $q$ tel que $q \in U$. On peut montrer qu'il existe un réel $\theta$ (unique à $2\pi$ près) et un vecteur unitaire $\vec{u}$ tels que :

$$q = cos\frac{\theta}{2} + sin\frac{\theta}{2}\vec{u} \qquad \textit{(II-58)}$$

Soit $\Phi$, l'application linéaire de $\mathcal{P}$ dans $\mathcal{P}$ telle que :

$$\Phi: \vec{v} \in \mathcal{P} \rightarrow q\vec{v}q^{-1} \in \mathcal{P} \qquad \textit{(II-59)}$$

L'application linéaire $\Phi$ est alors la rotation d'axe $(O, \vec{u})$, d'angle $\theta$ qui transforme le vecteur $\vec{v}$. De plus, comme $q \in U$, alors $\|q\| = 1$. Il vient $q^{-1} = \frac{\bar{q}}{\|q\|^2} = \bar{q}$ et donc l'image de $\vec{v}$ par la rotation $\Phi$ peut simplement aussi s'écrire $q\vec{v}\bar{q}$.

En outre, si $\Phi_1$ est la rotation associée au quaternion $q_1$ et $\Phi_2$ est la rotation associée au quaternion $q_2$, alors la rotation $\Phi_2 \circ \Phi_1$ est associée au quaternion $q_2 q_1$.

- **Commentaires**

Une fois l'algèbre spécifique maîtrisée, les quaternions permettent de calculer très simplement l'image d'un vecteur par une rotation autour d'un axe passant par l'origine. Cette méthode de calcul permet en particulier de :

- se prémunir des phénomènes de blocage de cadran[1] associés aux angles d'Euler classiques (Hemingway and O'Reilly, 2018),
- déplacer « en douceur » un objet, d'une orientation A vers une orientation B (Shoemake, 1985),
- limiter la taille de la mémoire nécessaire au calcul (4 flottants au lieu de 9 ou de 16, pour les matrices appartenant respectivement à $M_{3\times3}$ ou $M_{4\times4}$).

A contrario, les quaternions ne permettent pas de définir des translations, des dilatations anisotropiques et des effets de cisaillement de nuages de points.

### II.4.6.2. Utilisation des coordonnées homogènes

- **Introduction**

Les coordonnées homogènes ressemblent à des quaternions, car elles sont aussi de dimension quatre. Introduits par August Ferdinand Möbius en 1827 (Möbius, 1827), les concepts mathématiques associés sont cependant totalement différents.

[1] Traduction anglaise : « Gimbal lock »

Soit $M$, un point de l'espace de coordonnées $(x, y, z)$. Ce point de l'espace est représenté par les coordonnées homogènes $(X, Y, Z, w)$, avec $w \neq 0$, $x = \frac{X}{w}$, $y = \frac{Y}{w}$, et $z = \frac{Z}{w}$. Cette transformation d'un espace de dimension $N$ en un espace à $N + 1$ dimensions permet de travailler avec les concepts de géométrie projective. Par exemple, les coordonnées homogènes $(1,2,3)$, $(2,4,6)$ et $(3,6,9)$ représentent toutes le même point 2D de coordonnées $\left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right)$ de l'espace cartésien (voir Figure II-30).

Les coordonnées homogènes ici définies permettent de représenter sous forme matricielle, de nombreuses transformations y compris des translations. Dans le paragraphe suivant seront définies les transformations homogènes utiles à la registration des nuages de points : rotation, translations et homothéties. Le coefficient $w$ sera alors fixé à la valeur 1. Pour simplifier l'écriture, les matrices présentées seront souvent décrites à partir d'exemples élémentaires.

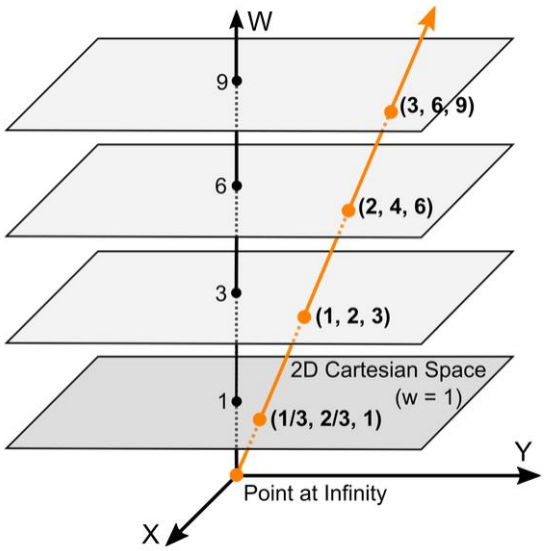



*Figure II-30 – Coordonnées homogènes d'un même point ("Homogeneous Coordinates," 2024).*

- **Transformations homogènes**

- Matrice de translation

Soit $M'(x', y', z')$, la transformée de $M(x, y, z)$ par la translation de vecteur $\vec{t} = \left(t_x, t_y, t_z\right)^t$. En utilisant les coordonnées homogènes de $M$ et $M'$, respectivement $\overrightarrow{m} = (x, y, z, 1)^t$ et $\overrightarrow{m'} = (x', y', z', 1)^t$, la matrice de transformation $T$ qui transforme $M$ en $M'$, ($\overrightarrow{m'} = T\overrightarrow{m}$), est définie de la manière suivante :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-60)}$$

- Matrice de rotation

Soit $M'(x', y', z')$, la transformée de $M(x, y, z)$ par la rotation d'angle $\theta$ autour de l'axe $(O, \vec{z})$ (par exemple). En utilisant les coordonnées homogènes de $M$ et $M'$, la matrice de transformation $R$ qui transforme $M$ en $M'$ est définie de la manière suivante :

$$R = \begin{pmatrix} cos\,\theta & -sin\,\theta & 0 & 0 \\ sin\,\theta & cos\,\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-61)}$$

- Dilatation anisotropique

Soit $M'(x', y', z')$, la transformée de $M(x, y, z)$ par une dilatation anisotropique de centre O et de facteurs $s_x, s_y, s_z$ suivant les directions respectives $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$. En utilisant les coordonnées homogènes de $M$ et $M'$, la matrice de transformation $S$ qui transforme $M$ en $M'$ est définie de la manière suivante :

$$S = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-62)}$$

Si les coefficients $s_x, s_y, s_z$ sont tous égaux, alors la transformation calculée devient une homothétie (ou mise à l'échelle).

- Transformations successives

Soient $G_1$, $G_2$ et $G_3$, trois matrices de transformation homogènes appliquées successivement ($G_1$ puis $G_2$ puis $G_3$). La transformation globale $G$ équivalente est égale au produit des 3 matrices, tel que $G = G_3 G_2 G_1$.

- Transformation combinée (p. ex. rotation et translation)

La matrice de transformation homogène $TR$, définie par la relation (II-63), correspond à l'application d'une rotation d'angle $\theta$ autour de l'axe $(O, \vec{x})$, suivie d'une translation de vecteur $\vec{t} = (t_x, t_y, t_z)^t$.

$$TR = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & cos\,\theta & -sin\,\theta & t_y \\ 0 & sin\,\theta & cos\,\theta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-63)}$$

- Inverse d'une matrice de transformation combinée

L'inverse de la matrice de transformation combinée $G$ définie par la relation (II-64), avec $R$, une matrice de rotation appartenant à $SO(3)$ et $\vec{q}$, un vecteur translation, est la matrice $G^{-1}$ définie par l'équation (II-65).

$$G = \begin{pmatrix} R & \vec{q} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-64)}$$

$$G^{-1} = \begin{pmatrix} R^t & -R^t\vec{q} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(II-65)}$$

## II.4.7. ICP - Étape 6 : test de convergence

Lors de cette étape de l'algorithme, il est nécessaire d'évaluer si le processus itératif doit s'interrompre ou pas. Plusieurs critères peuvent alors être utilisés, certains d'entre eux seront décrits ci-dessous.

Soient :

- $P_{i_k}^s$, le $i^{ème}$ point, parmi les $n$ points de contrôle, à l'itération $k$,

- $P_{i_k}^c$, le $i^{ème}$ point correspondant associé, à l'itération $k$,

- $T_{opt_k}$ la transformation optimale qui minimise la fonction-objectif, à l'itération $k$,

- $d_{i_k}\left(P_{i_k}^c, T_{opt_k}(P_i^s)\right)$ la distance point-point non signée entre $P_{i_k}^c$ et $T_{opt_k}(P_i^s)$, à l'itération $k$.

Remarque : la distance point-point ici proposée peut éventuellement être remplacée, dans les tests qui suivent, par la distance point-surface telle que définie au paragraphe II.4.5.

- Test de convergence en distance maximale

Pour sortir du processus itératif, un seuil maximal de distance $d_{max}$ peut être imposé. La condition (II-66) définit alors le critère à vérifier pour terminer l'algorithme à l'itération $k$.

$$d_{i_k} \leq d_{max}\ , \forall i \in [1, n] \qquad \textit{(II-66)}$$

- Test de convergence en variation de distance

Pour sortir du processus itératif, un seuil maximal de variation de distance $\Delta d_{max}$ peut être imposé. La condition (II-67) définit alors le critère à vérifier pour terminer l'algorithme à la fin de l'itération $k$.

$$\left|d_{i_k} - d_{i_k-1}\right| \leq \Delta d_{max}\ , \forall i \in [1, n] \qquad \textit{(II-67)}$$

- Tests de convergence statistique

Pour sortir du processus itératif, un seuil obtenu à partir de considérations statistiques sur les distances peut être fixé. Il est par exemple possible d'imposer une valeur maximale sur les distances moyennes, sur l'écart-type des distances ou sur l'écart médian absolu qui est moins sensible aux bruits de mesure.

- Variation du résidu

Soit $F^k\left(R, \vec{t}\right)$, la fonction-objectif minimisée par la transformation $T_{opt_k}$ à l'itération $k$. Le résidu $e^k$, à cette itération, est égal à $F^k\left(T_{opt_k}\right)$. Soient, $\varepsilon_l \in \mathbb{R}_+^*$ le seuil fixé et $N_k$ le nombre de couples de points contrôle/correspondant non rejetés lors de cette itération. Selon Chen et Médioni, le processus itératif s'interrompt si la condition (II-68) est vérifiée (Chen and Medioni, 1992) :

$$\frac{|e^k - e^{k-1}|}{N_k} \leq \varepsilon_l \qquad \textit{(II-68)}$$

Afin d'adimensionner la variation du résidu, Besl et McKay (Besl and McKay, 1992) proposent de diviser le seuil choisi par $\sqrt{tr(\Sigma)}$, avec $\Sigma$ la matrice de variance-covariance des points de contrôle utilisés (voir paragraphe II.3.3), la valeur $\sqrt{tr(\Sigma)}$ correspondant alors à une taille représentative du modèle 3D étudié.

- Test de convergence sur les transformations

Si la transformation recherchée à l'itération $k$ est la composition d'une rotation composée de 3 angles $\left(r_{1_k}, r_{2_k}, r_{3_k}\right)$ et d'une translation $\vec{t}_k = \left(t_{x_k}, t_{y_k}, t_{z_k}\right)$, alors il est possible de fixer deux seuils $H_r$ et $H_t$ pour sortir du processus itératif. Les conditions (II-69) définissent alors les critères à vérifier pour terminer l'algorithme (Johnson and Kang, 1999).

$$\sqrt{\left(t_{x_k}^2 + t_{y_k}^2 + t_{z_k}^2\right)} \leq H_t \text{ et } \sqrt{\left(r_{1_k}^2 + r_{2_k}^2 + r_{3_k}^2\right)} \leq H_r \qquad \textit{(II-69)}$$

- Quantité maximale d'itérations

Pour sortir du processus itératif, une quantité maximale d'itérations peut être imposée. Ce critère peut judicieusement être associé aux critères précédents afin de limiter les temps de calcul, si le processus ne converge pas, ou s'il converge trop lentement.

# II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé différentes méthodes qui existent dans la littérature scientifique pour aligner des nuages de points obtenus par des dispositifs de mesure sans contact. Si les correspondances entre les points sont connues, la résolution du problème de Procruste (voir II.2) permet d'obtenir de manière directe la transformation recherchée. Si les correspondances ne sont pas connues, elles sont alors supposées successivement à chaque itération d'un algorithme spécifique, nommé Itérative Closest Point (voir II.4). Cet algorithme, qui est majoritairement utilisé du fait de sa simplicité et de sa robustesse, possède de très nombreuses variantes, dont certaines ont été décrites dans ce chapitre. Afin de converger vers le minimum local attendu, la méthode utilisée nécessite néanmoins de connaître un alignement approché initial entre les deux nuages de points. Cet alignement est obtenu en utilisant d'autres méthodes dites « approximatives » qui ont été décrites au paragraphe II.3.

Les méthodes ici présentées présupposent souvent que les modèles 3D à aligner proviennent d'un même objet physique. Cependant, des transformations comme les mises à l'échelle (voir II.2.5) permettent, par exemple, d'aligner des numérisations qui proviennent d'objets non strictement identiques. Dans le cas de l'étude du vieillissement des chaînes d'ancrage, les scans de mailles neuves doivent être alignés sur les scans de mailles vieillies qui possèdent des géométries différentes du fait des pertes de matière par usure de contact, par corrosion sous forme de piqûres, et aussi par corrosion généralisée. Ces pertes de matière ne correspondent pas à des déformations géométriques classiques que l'on peut identifier dans la littérature scientifique traitant des registrations : dilatations anisotropiques, homothéties, cisaillements... Il sera donc nécessaire d'adapter les méthodes présentées dans ce chapitre afin d'aligner les scans de mailles de chaînes, ce qui permettra d'identifier les géométries des pertes de matière, pour ouvrir les perspectives de recherche proposées dans le paragraphe I.4.1.

Avant de proposer une nouvelle méthode de registration pour les pièces corrodées et usées, nous allons tout d'abord étudier plus en détail la notion de distance entre un point et un nuage de points. Cette notion de distance, à priori triviale, nécessite en effet une attention toute particulière si des mesures précises sont attendues.

Chapitre III.

# CALCULS DE DISTANCES - Distances point / nuage de points

## III.1. INTRODUCTION

### III.1.1. Distances point / nuage de points

L'objectif terminal de ce travail est d'identifier et de quantifier les pertes de matière tridimensionnelles de mailles de chaînes vieillies en mer. Pour cela des numérisations 3D de chaînes sont réalisées périodiquement lors de leur utilisation. Ces numérisations sont ensuite superposées par registration pour permettre leur comparaison : les pertes de matière peuvent être identifiées par des opérations booléennes sur les modèles 3D, et leurs spécificités dimensionnelles peuvent être relevées, en particulier, par des mesures géométriques incluant des calculs de distances. Les pertes de matière recherchées étant associées à un ordre de grandeur de quelques dixièmes de millimètres (voir I.2.3.6), il est donc indispensable de pouvoir mesurer, sur ces modèles 3D, des distances avec une précision inférieure à cet ordre de grandeur.

Dans le chapitre précédent, différentes méthodes d'alignement ont été présentées, dont la plus connue est la méthode ICP (Itérative Closest Point). À chaque itération, les points les plus proches des points de contrôle sont choisis comme points correspondants pour permettre le calcul d'une transformation géométrique. De manière implicite, le point le plus proche est choisi parmi les points du nuage cible, et l'identification de celui-ci est souvent accélérée par l'utilisation d'arbres k-d (voir II.4.3.2). Il est cependant important de remarquer que le point le plus proche, parmi les points du nuage cible, ne correspond pas au point le plus proche situé sur

la surface décrite par ce même nuage de points. Pour illustrer ce propos, la Figure III-1 représente schématiquement cette méthode de correspondance. La figure (a) représente le maillage cible et le maillage source avant alignement. Ces maillages, et donc leurs nœuds, sont construits distinctement suite à deux acquisitions réalisées sur un même objet, par des appareils de mesure tridimensionnelle. De ce fait, même si les modèles 3D étaient parfaitement alignés, les nœuds du maillage cible et du maillage source ne seraient pas coïncidants : voir nœuds verts et bleus dans la figure (b). En conséquence, il apparaît que la méthode de correspondance qui associe le point le plus proche parmi les points du nuage cible induit des distances non nulles et donc une fonction-objectif non nulle, même si les surfaces sont parfaitement positionnées. Ceci produit ainsi une erreur dans la position terminale calculée et donc une erreur sur les géométries d'usure identifiées.

Cependant, si la résolution du maillage cible est fine, il existera alors un nœud dans ce maillage qui sera très proche de la position terminale attendue pour les points de contrôle. L'erreur commise sera alors plus faible que pour un maillage grossier. Il résulte de ces considérations que la qualité de l'alignement obtenu, en utilisant comme point correspondant le point le plus proche parmi les points du nuage cible, dépend intrinsèquement de la résolution des maillages. Plus ils sont fins, meilleure sera la registration entre le nuage source et le nuage cible, mais ceci au détriment du temps de calcul associé au processus. Notons que pour s'affranchir de cette difficulté de résolution des maillages, il est possible d'améliorer le calcul des distances par des opérations de lissage, afin qu'une fois les maillages superposés, les distances calculées soient toutes nulles.




(a) (b)

*Figure III-1 – Coïncidence de maillages : (a) nuage de points source et nuage de points cible construits à partir d'une même surface physique, (b) superposition exacte des deux surfaces, mais non coïncidence des nœuds des maillages.*

La capacité à mesurer correctement une distance entre deux maillages est donc centrale dans le processus général d'identification des pertes de matière. Il est par conséquent important de décrire de manière détaillée les deux méthodes de calcul de distance qui seront par la suite utilisées : distance point-point et distance avec lissages.

### III.1.2. Configurations matérielles et librairie

Les algorithmes proposés dans ce travail ont été développés en langage Python 3.6 sous environnement Anaconda. La librairie utilisée pour faciliter l'exploitation des fichiers 3D est Trimesh (Dawson-Haggerty, 2019). L'ensemble des calculs a été réalisé par deux ordinateurs différents. Deux configurations matérielles seront donc citées par la suite :

- *Configuration 1* : Dell Latitude 5590, i5-8350U associé à 16 Go de mémoire RAM,
- *Configuration 2* : Dell Precision 3571, i5-12500H associé à 16 Go de mémoire RAM.

## III.2. DISTANCE POINT-POINT

### III.2.1. Description de la méthode point-point

Soit $S_p$ une surface physique réelle support d'un maillage $M_p$ dont les nœuds forment un nuage de points $Pc_p$ composé de $n_p$ points $P_j$. Soit $Q_i$, un point quelconque de l'espace. $Q_i$ et $P_j$ ont pour coordonnées respectives $\vec{q}_i$ et $\vec{p}_j$ dans le repère cartésien $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

La distance euclidienne de $Q_i$ au point $P_j$, notée $d_e(Q_i, P_j)$, est la distance telle que :

$$d_e(Q_i, P_i) = \|\vec{p}_j - \vec{q}_i\| \qquad \textit{(III-1)}$$

La distance de $Q_i$ à la surface $S_p$, notée $d(Q_i, S_p)$ est approchée dans cette première méthode par la distance de $Q_i$ au nuage de points $Pc_p$, notée $d(Q_i, Pc_p)$. Cette distance est définie comme la distance de $Q_i$ à son point le plus proche parmi les points de $Pc_p$ :

$$d(Q_i, S_p) \cong d(Q_i, Pc_p) = min_{i\in(1,n_p)}[d_e(Q_i, P_i)] \qquad \textit{(III-2)}$$

Soit $P_k(Q_i)$, le $k^{ième}$ point le plus proche de $Q_i$ parmi $Pc_p$. La distance de $Q_i$ au nuage de points $Pc_p$ peut donc s'écrire :

$$d(Q_i, Pc_p) = d_e(Q_i, P_1(Q_i)) \qquad \textit{(III-3)}$$

Les distances $d(.)$ ici définies sont signées en fonction de la normale $\vec{n}_i$ à la surface $S_p$ construite sur le premier point le plus proche $P_1(Q_i)$ qui est déterminé simplement par l'utilisation d'un arbre k-d. Cette normale est orientée vers l'extérieur de la matière et les distances sont considérées positives si $(\overrightarrow{p_1}(Q_i) - \vec{q}_i)^t . \vec{n}_i \geq 0$. La normale $\vec{n}_i$ peut être obtenue assez simplement dans cette première méthode de calcul de distance, par la somme

normée des normales des facettes adjacentes au point $P_1(Q_i)$ ou par une méthode ACP telle que décrite au paragraphe II.3.3.

## III.2.2. Tests de la méthode point-point

- **Présentation**

Le nuage de point $Pc_p$ étant une représentation discrète de la surface réelle $S_p$, il est nécessaire de s'interroger sur l'erreur commise en calculant $d(Q_i, Pc_p)$ au lieu de $d(Q_i, S_p)$. Dans l'exemple qui suit, il est considéré une surface sphérique $S_p$ de rayon $R$ centrée en O, origine du repère cartésien. Cette sphère est le support d'un maillage triangulaire $M_p$ dont la longueur des arêtes n'excède pas une valeur $b_s$. Une quantité $n_q$ de points $Q_i$ est générée de manière aléatoire et les distances $d(Q_i, Pc_p)$ sont calculées par la méthode point-point puis comparées aux distances exactes $d(Q_i, S_p) = \|\overrightarrow{OQ_i}\| - R$. Les valeurs fixées sont les suivantes : $R = 10$ mm, $b_s = 0.207$ mm et $n_q = 10\,000$. La configuration matérielle utilisée est la numéro 2.

La Figure III-2 représente la valeur absolue de l'erreur commise en fonction de $d(Q_i, S_p)$, la distance exacte de $Q_i$ à la surface $S_p$. Cette figure montre que, plus les points $Q_i$ sont proches de la sphère, plus l'erreur est importante. L'erreur maximale commise est égale à 0.102 mm, soit environ la moitié de la résolution du maillage de la sphère. Le temps de traitement nécessaire pour calculer ces $n_q$ distances est égal à 14.26 s.

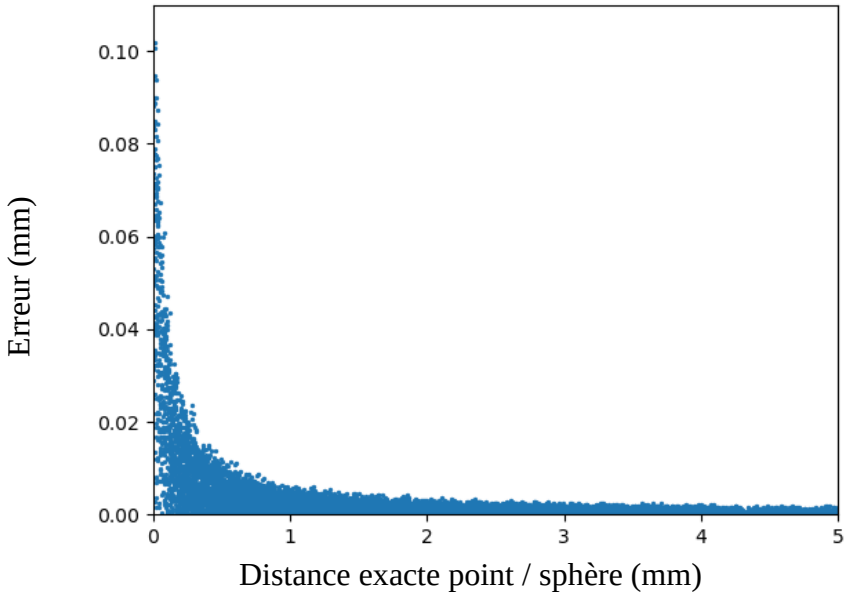



*Figure III-2 - Erreur sur les distances calculées par la méthode point-point, entre 10 000 points aléatoires et le maillage d'une sphère de rayon 10 mm. La résolution maximale est égale à 0.207 mm.*

Un raisonnement simple illustré par la Figure III-3 montre que les points $Q_i$ , proches de la surface réelle $S_p$, induisent une erreur significative. L'erreur maximale $\frac{b_s}{2}$, est atteinte dans le cas défavorable ou le point $Q_i$ est situé au milieu de l'arête la plus longue du maillage.

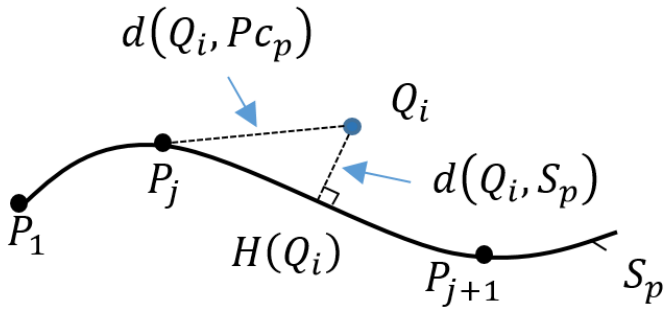



*Figure III-3 - Approximation lors d'un calcul de distance point-point. Le point $H(Q_i)$ est ici le point le plus proche de $Q_i$ sur $S_p$. La distance $d(Q_i, S_p)$ est différente de la distance $d(Q_i, Pc_p)$.*

- **Discussion**

La méthode de calcul de distance présentée induit une erreur significative lorsque les distances recherchées sont faibles. L'erreur maximale atteinte est égale à la moitié de la résolution du maillage. Dans le cas de notre étude, le scanner utilisé (voir I.3.2.2) permet d'obtenir une résolution de 0.1 mm (en moyenne sur un maillage), soit une erreur systématique de 50 microns lorsque les distances sont faibles. Cette erreur devient particulièrement pénalisante lorsqu'il est nécessaire de réduire la taille des fichiers (augmentation de la résolution) ou lorsque la précision des alignements attendus est importante. Il sera donc proposé par la suite une seconde méthode de calcul pour diminuer cette erreur de mesure systématique.

# III.3. UTILISATION DE LISSAGE LOCAL

## III.3.1. Description de la méthode

Afin d'améliorer la précision du calcul de distance, il est proposé d'approcher localement la surface $S_p$ par une courbe de lissage polynomiale $C_p(Q_i)$ , construite à partir des $m$ premiers points $P_k(Q_i)$ les plus proches du point $Q_i$. La distance du point $Q_i$ à la surface $S_p$ est donc calculée, avec cette méthode, par la distance de $Q_i$ au point le plus proche $H(Q_i)$ qui appartient à la courbe $C_p(Q_i)$.

$$d(Q_i, S_p) \cong d(Q_i, C_p(Q_i)) = min_{P \in C_p(Q_i)}[d_e(Q_i, P)] \\ = d_e(Q_i, H(Q_i)) \qquad \textit{(III-4)}$$

L'opération de lissage est réalisée dans un nouveau repère $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ tel que $\vec{z}_1$ est colinéaire à la normale au premier point le plus proche. Dans ce nouveau repère $R_1$, un point $P$ ayant pour coordonnées $(x, y, z)$ appartient à la courbe de lissage $C_p(Q_i)$ si ses coordonnées vérifient l'équation (III-5) suivante :

$$z = f_p(x, y) = c_9x^3 + c_8y^3 + c_7x^2y + c_6xy^2 + c_5x^2 + c_4y^2 + c_3xy \\ + c_2x + c_1y + c_0 \qquad \textit{(III-5)}$$

Dans le plan $(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$ , la surface qui est définie par le plus petit rectangle orienté contenant les projections des $k$ points les plus proches est appelée zone d'intérêt $Iz(Q_i)$ du point $Q_i$. Les coordonnées maximales et minimales en $z$ de l'ensemble des points $P_k(Q_i)$ sont notées respectivement $z_m$ et $z_M$. Afin de limiter la surface de recherche du point $H(Q_i)$, il a été défini une zone de recherche $Rz(Q_i)$ (voir Figure III-4) plus petite que la zone d'intérêt $Iz(Q_i)$ . La définition de cette zone de recherche est décrite ci-dessous.

Du fait de la définition du repère $R_1$, il est notable que la direction de la droite $(Q_iH(Q_i))$ est proche de $\vec{z}_1$. La zone de recherche $Rz(Q_i)$ du point $Q_i$ est donc centrée sur la projection du point $Q_i$ dans le plan $(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$. En faisant l'hypothèse que la projection de $H(Q_i)$ dans le plan $(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$ n'est pas plus éloignée que celle du second point le plus proche $P_2(Q_i)$, la géométrie de la zone de recherche est donc définie par un carré orienté dont le côté $b(Q_i)$ est donné par l'équation (III-6) suivante :

$$b(Q_i) = 2 \times max\ \{abs\ [(\overrightarrow{p_2}(Q_i) - \vec{q}_i)\ .\vec{x}_1], abs[(\overrightarrow{p_2}(Q_i) - \vec{q}_i)\ .\vec{y}_1]\} \qquad \textit{(III-6)}$$

Pour cette méthode de calcul de distance, il est proposé d'incrémenter successivement le degré du polynôme jusqu'à obtenir un lissage jugé correct. Le lissage défini est donc plan, sinon quadrique, sinon cubique. À chaque degré de polynôme, la quantité $m$ de points les plus proches utilisés doit simplement être supérieure ou égale au nombre de paramètres recherchés. Il a été jugé préférable de conserver cette valeur $m$ fixe quel que soit le degré du polynôme afin que la surface de la zone d'intérêt $Iz(Q_i)$ reste relativement constante quel que soit le degré du polynôme. En première approche, une valeur égale à 12 a été jugée adaptée pour les calculs qui vont suivre. Cette valeur sera néanmoins discutée dans le paragraphe III.3.3.

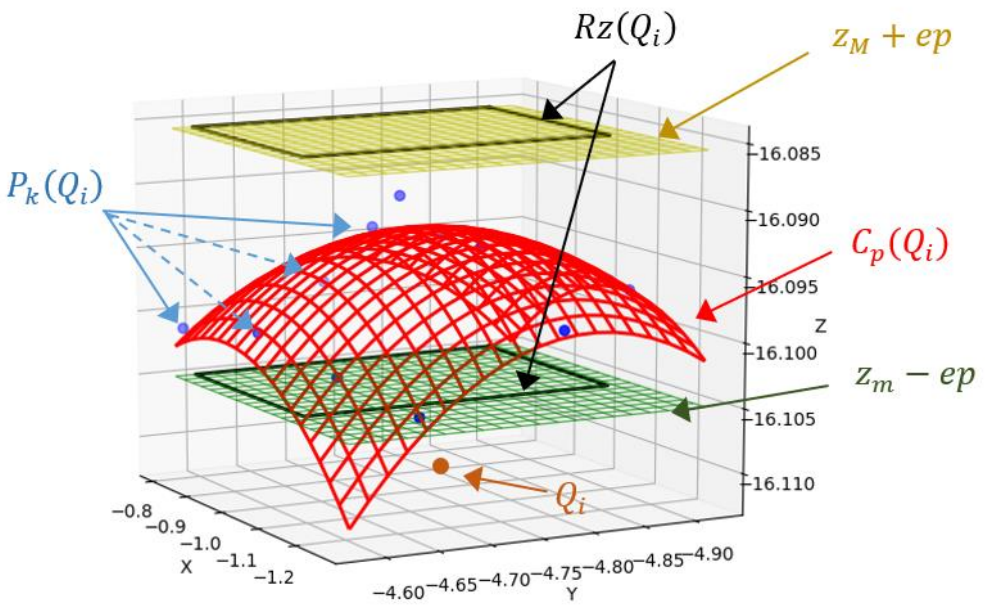



*Figure III-4 - Schéma illustratif permettant la définition du lissage.*

Une fois les paramètres $c_i$ identifiés par la méthode des moindres carrés, le lissage est considéré comme valide s'il vérifie trois conditions :

**Première condition** : En chacun des $m$ points les plus proches $P_k(Q_i)$, la valeur absolue de l'erreur en $z$ doit être inférieure à $e_p$(mm), une valeur imposée (p.ex. 0.005 mm). Cette condition traduit la nécessité que $C_p(Q_i)$ passe au plus proche des points $P_k(Q_i)$, points pouvant être considérés comme appartenant à la surface physique liée à $S_p$.

$$\left|z_{P_k(Q_i)} - f_p\left(x_{P_k(Q_i)}, y_{P_k(Q_i)}\right)\right| \leq e_p \,, \forall k \in (1, m) \qquad \textit{(III-7)}$$

**Seconde condition** : Dans la zone de recherche $Rz(Q_i)$, les coordonnées en $z$ de la courbe $C_p$ doivent rester bornées entre $z_m - e_p$ et $z_M + e_p$. Cette condition est liée à la possibilité que les points $P_k(Q_i)$ soient partiellement alignés, ce qui conduit à des lissages $C_p(Q_i)$ inappropriés, comportant de fortes ondulations (voir Figure III-5). Ce phénomène est souvent observé pour les maillages obtenus à partir de constructions CAO, mais aussi parfois pour certains types de numérisations qui régularisent les coordonnées des nœuds des maillages.

$$z_m - e_p \leq \left|f_p(x, y)\right| \leq z_M + e_p \,, \forall (x, y) \in Rz(Q_i) \qquad \textit{(III-8)}$$

**Troisième condition** : Aucun point $P_k(Q_i)$ parmi les $m$ points les plus proches de $Q_i$ n'est situé sur une frontière du maillage $M_p$. Cette dernière condition interdit la mesure de

distance pour des points proches des frontières du maillage, car le calcul de la normale au point le plus proche sur $S_p$ peut alors être inexact.

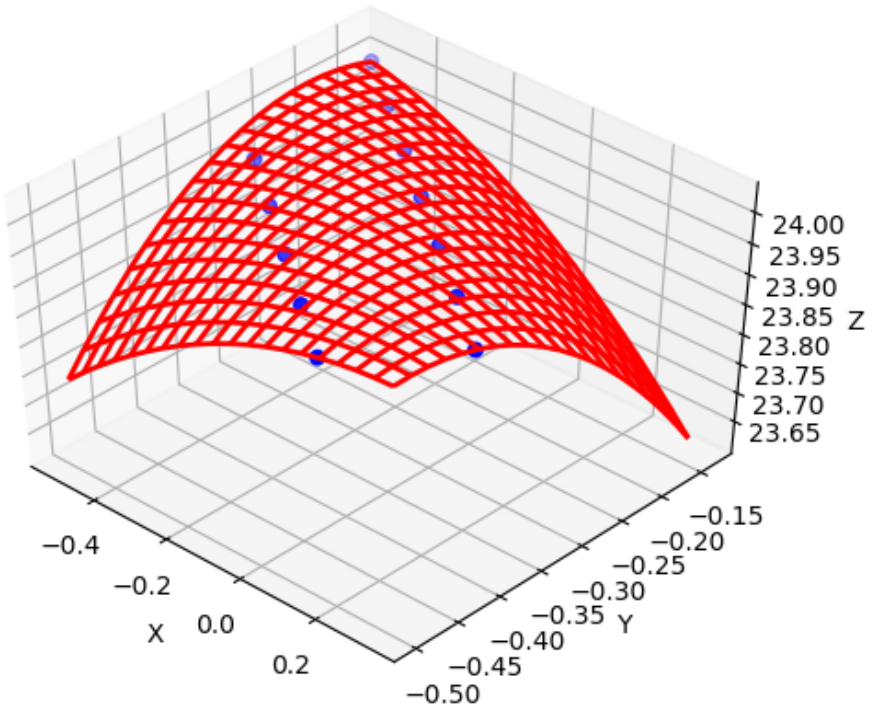



*Figure III-5 – Exemple de courbe Cp construite sur des points partiellement alignés. Au lieu d'une surface plane, le lissage possède une courbure inappropriée.*

Si l'une des conditions de validité de $C_p(Q_i)$ n'est pas vérifiée, la méthode de calcul de distance avec lissages ne renvoie pas de résultat pour le point $Q_i$ concerné. Si toutes les conditions sont validées, la distance de $Q_i$ à la surface réelle $S_p$ est alors approchée par la distance minimale de $Q_i$ à la courbe analytique $C_p(Q_i)$. La recherche de cette valeur minimale est réalisée par programmation quadratique séquentielle (Kraft, 1988) sur la zone de recherche $Rz(Q_i)$. En d'autres termes :

$$\begin{aligned} d(Q_i, S_p) &\cong d(Q_i, C_p(Q_i)) = d_e(Q_i, H(Q_i)) \\ &= min_{(x,y)\in Rz(Q_i)}\{d_e(Q_i, P[x, y, f_p(x, y)])\} \end{aligned} \qquad \textit{(III-9)}$$

Les distances obtenues sont signées en fonction de la normale $\vec{n}\,(H(Q_i))$, extérieure à la matière et située au point le plus proche $H(Q_i)$. Cette normale est calculée, en postprocesseur, par dérivation de la fonction $f_p$.

Au final, cette méthode de calcul de distance permet d'obtenir :

- la distance $d(Q_i, S_p)$,
- le point le plus proche $H(Q_i)$ sur $C_p(Q_i)$,
- un ensemble de points $Q_i$ à partir desquels le lissage est rejeté (ce qui permettra par la suite d'ignorer les points aberrants liés, par exemple, aux bruits de mesure),
- en postprocesseur, par dérivation de $f_p$, la normale à la courbe $C_p(Q_i)$ au point $H(Q_i)$, notée $\vec{n}\left(H(Q_i)\right)$.

## III.3.2. Tests de la méthode

### III.3.2.1. Application sur une sphère

Il est ici proposé de reprendre l'exemple de la sphère du paragraphe III.2.2, et de réaliser les calculs d'erreur de distance avec lissages pour deux précisions de calcul : $e_p$ : 0.005 mm et 0.002 mm. Les temps de traitement sont mesurés et comparés à ceux de la méthode point-point par l'estimation d'un pourcentage de majoration. Les résultats des calculs effectués avec la configuration n°1 sont synthétisés dans la Table 11 ci-dessous.

*Table 11 – Distances avec lissages : erreurs de calcul sur une sphère de rayon égal à 10 mm.*

| **Cas** | **$e_p$ (mm)** | **Quantité de lissages plans** | **Quantité de lissages quadriques** | **Quantité de lissages cubiques** | **Erreur maximale (mm)** | **Temps de calcul (s)** | **Majoration temps de calcul (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cas 1 | 0.005 | 10000 | 0 | 0 | 0.0037 | 24.99 | 75 |
| Cas 2 | 0.002 | 0 | 10000 | 0 | 4.7e-7 | 25.84 | 81 |

Les résultats montrent que pour une valeur de $e_p$ égale à 0.005 mm, un lissage plan est suffisant. Pour une valeur de $e_p$ égale à 0.002 mm, le lissage plan devient insuffisant. Un lissage quadrique est donc sélectionné et l'erreur calculée devient alors très proche de zéro. Concernant les temps de calcul, ils sont supérieurs à ceux obtenus pour la méthode point-point. Il est aussi possible de constater que les erreurs commises ne dépendent plus de la proximité de $Q_i$ à la sphère, ce qui était le but recherché (voir Figure III-6).

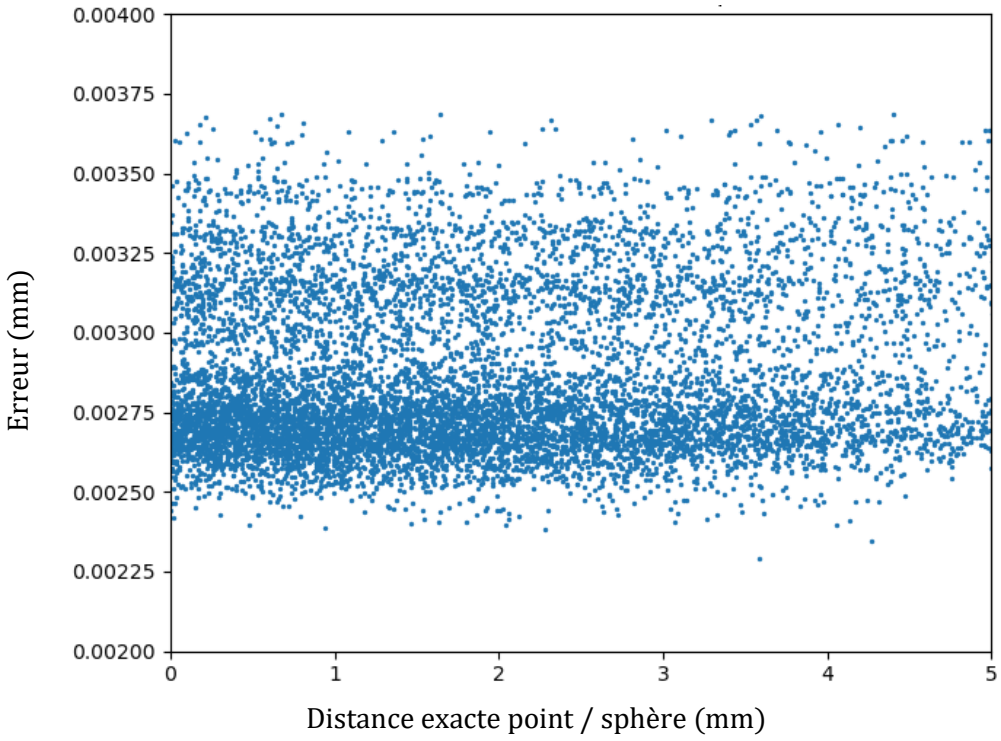


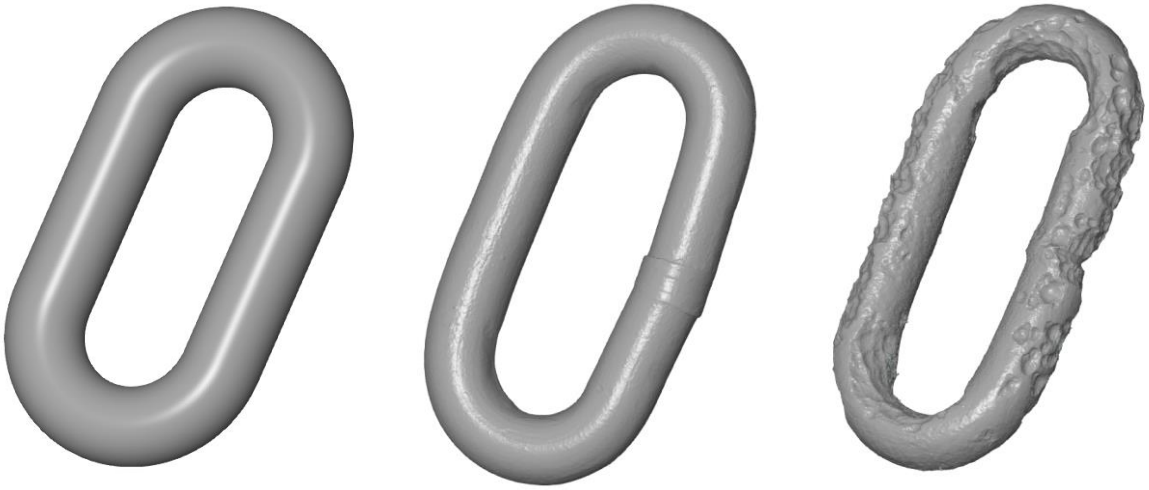

*Figure III-6 - Erreur sur les distances calculées entre 10 000 points aléatoires et une sphère de rayon 10 mm. La valeur $e_p$ est égale à 0.005 mm. Le lissage est construit à partir des 12 points les plus proches.*

### III.3.2.2. Applications sur des mailles

Dans cet exemple, plusieurs calculs de distances avec lissages sont traités à partir de six géométries différentes de mailles, superposées par paires dans le même repère. Pour chaque cas, 5000 calculs de distances sont réalisés. La valeur $e_p$ est prise égale à 0.005 mm, puis à 0.002 mm. Les mailles $Li_0$, $Li_1$, $Li_2$, $Li_3$ sont des mailles obtenues par construction CAO. Les mailles $Li_1$, $Li_2$, $Li_3$ sont déduites de la maille $Li_0$ (voir Figure III-7 (a)) après réduction d'épaisseur de matière $t_{hk}$ de 0.05, 0.5 et 5 mm respectivement. Les distances attendues pour les calculs de distances correspondent alors à ces réductions d'épaisseur de matière. La maille $Li_4$ (voir Figure III-7 (b)) provient d'un scan de maille neuve dont la surface est relativement lisse. La maille $Li_5$ (voir Figure III-7 (c)) provient d'un scan de maille usée avec une surface rugueuse, très altérée par biocorrosion. Ces deux dernières mailles étant superposées sur elles-mêmes, les distances attendues sont nulles. Les caractéristiques des six mailles sont indiquées dans la Table 12. Les résultats des calculs de distance effectués avec la configuration matérielle n°1 sont synthétisés dans la Table 13.

*Table 12 - Caractéristiques des mailles permettant l'application de la méthode de calcul de distances avec lissages. La résolution des maillages est notée $b_s$.*

| **Mailles** | $b_s$ **(mm)** | $t_{hk}$ **(mm)** | $n_p$ | **Taille sur le disque (Mo)** |
|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | 0.28 | 0 | 1 124 304 | 110 |
| $Li_1$ | 0.28 | 0.05 | 1 119 540 | 110 |
| $Li_2$ | 0.28 | 0.5 | 1 078 896 | 105 |
| $Li_3$ | 0.28 | 5 | 703 420 | 69 |
| $Li_4$ | 0.29 | 0 | 1 003 308 | 98 |
| $Li_5$ | 0.34 | 0 | 1 048 985 | 102 |



(a) (b) (c)

*Figure III-7 – Modèles tridimensionnels de mailles : (a) maille $Li_0$, construction CAO, désignation 30-6-3.4, (b) maille $Li_4$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-7-3.4, (c) maille $Li_5$, scan de maille réelle fortement usée, désignation 20-7-3.4.*

*Table 13 – Résultats des calculs de distances réalisés avec lissages sur des mailles CAO (en bleu) et réelles (en orange).*

| **Mailles** | | $e_p$ | **Quantité de lissages plans** | **Quantité de lissages quadriques** | **Quantité de lissages cubiques** | **Quantité de points refusés** | **Erreur maximale (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | $Li_1$ | 0.005 | 5000 | 0 | 0 | 0 | 0.0019 |
| $Li_0$ | $Li_1$ | 0.002 | 3133 | 1867 | 0 | 0 | 0.0017 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 0.005 | 5000 | 0 | 0 | 0 | 0.0019 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 0.002 | 3761 | 1239 | 0 | 0 | 0.0019 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 0.005 | 5000 | 0 | 0 | 0 | 0.0022 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 0.002 | 3900 | 1100 | 0 | 0 | 0.0019 |
| $Li_4$ | $Li_4$ | 0.005 | 2827 | 1722 | 301 | 150 | 0.0050 |
| $Li_4$ | $Li_4$ | 0.002 | 335 | 2296 | 1258 | 1111 | 0.0020 |
| $Li_5$ | $Li_5$ | 0.005 | 450 | 1939 | 1597 | 1014 | 0.0050 |
| $Li_5$ | $Li_5$ | 0.002 | 17 | 560 | 1771 | 2652 | 0.0020 |

Ces résultats montrent que les erreurs obtenues sont toutes inférieures à la valeur $e_p$ fixée. Plus cette erreur est faible, plus le degré du polynôme tend à augmenter. Plus les mailles sont irrégulières, plus le degré du polynôme tend aussi à augmenter. Aucun calcul n'est rejeté si les mailles proviennent de constructions CAO, car les surfaces sont lisses, régulières. Par contre, dans le cas de scans réels, le nombre de points refusés peut être significatif. Un pourcentage de 53 % est atteint pour la maille $Li_5$ qui est très fortement altérée avec de très nombreuses aspérités et irrégularités.

## III.3.3. Justification du paramétrage de la méthode

### III.3.3.1. Description des paramètres

Deux paramètres sont utilisés pour la méthode de calcul avec lissages : la quantité $m$ de points les plus proches sur lesquels sont construits les lissages, et l'erreur $e_p$ qui permet de valider les lissages obtenus ou de les rejeter le cas échéant.

- Quantité $m$ de points les plus proches

La quantité $m$ de points est à minima égale à 10 : nombre de points nécessaires pour interpoler une cubique. Comme indiqué au paragraphe III.3.1, il a été choisi de conserver ce paramètre fixe lors des calculs, afin d'obtenir la surface de la zone d'intérêt à peu près constante quel que soit le degré du polynôme utilisé. Un choix initial légèrement supérieur à 10 permet d'augmenter la surface sur laquelle est calculé le lissage, dans l'idée de capturer au mieux la géométrie locale autour du premier point le plus proche, mais sans chercher des points trop éloignés.

- Erreur $e_p$ admissible pour les lissages

L'erreur $e_p$ est l'erreur tolérée entre le lissage et les $m$ points les plus proches sur lequel il est défini. Plus $e_p$ est faible, plus la précision attendue pour ce lissage est importante. Si l'erreur est dépassée, aucun résultat de distance n'est renvoyé par le calcul. La diminution de ce paramètre entraîne donc une augmentation potentielle des rejets de points à partir desquels une distance doit être estimée. En effet, toutes les surfaces physiques ne peuvent être modélisées précisément par les types de lissages proposés : plan, quadrique ou cubique.

### III.3.3.2. Test des paramètres

Il est ici choisi de reprendre les cas traités dans le paragraphe III.3.2.2. Pour chaque cas, 1000 calculs de distances avec lissages sont traités à partir de six géométries de mailles superposées par paires dans le même repère. Les distances attendues sont connues, et les calculs sont répétés en fonction de différents paramétrages. L'erreur $e_p$ est prise successivement égale à 0.01, 0.005 et 0.002 millimètres. La quantité $m$ varie entre 10 et 20. La configuration matérielle utilisée est la n°2.

**L'influence du paramètre $e_p$** est observable dans la Table 14 et la Table 15, pour une quantité $m$ fixe égale à 12. Comme lors des premiers tests du paragraphe précédent, on constate que les erreurs maximales obtenues lors des calculs restent inférieures à la valeur $e_p$ fixée. Plus $e_p$ est faible, plus l'erreur est faible sans jamais dépasser $e_p$. Cependant, cette diminution n'est pas très prononcée pour les mailles provenant de constructions CAO, car le lissage est efficace quel que soit l'erreur $e_p$ choisie. Concernant les modèles 3D provenant de scans réels, on constate

que plus $e_p$ est faible, plus le nombre de points rejetés devient important, allant jusqu'à plus de 50 % des points pour les calculs sur la maille très usée $Li_5$.

De manière générale, la valeur $e_p$ choisie est à mettre au regard de la précision de l'appareil d'acquisition utilisé qui est égale à 0.05 mm dans le cas de l'Artec Space Spider (voir I.3.2.2). Ainsi, un choix usuel de $e_p$ égal à 0.005 mm semble adapté à notre étude : l'erreur maximale attendue est inférieure d'un facteur 10 à celle de l'appareil. En outre, avec cette valeur, le taux de points rejetés (3% environ) sera modéré pour les géométries des mailles usuellement étudiées qui ne sont généralement pas aussi altérées que $Li_5$.

*Table 14 - Erreur maximale en µm obtenue pour 1000 points de calculs de distances par la méthode avec lissages et avec un nombre de points m égal à 12. En bleu les maillages issus de modélisation CAO, en orange les maillages issus de scans réels.*

| **Mailles** | | $e_p$ ($\mu m$) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 5 | 2 |
| $Li_0$ | $Li_1$ | 0.065 | 0.065 | 0.031 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 0.210 | 0.210 | 0.210 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 0.081 | 0.081 | 0.004 |
| $Li_4$ | $Li_4$ | 9.615 | 4.996 | 1.998 |
| $Li_5$ | $Li_5$ | 9.890 | 4.993 | 1.976 |

*Table 15 – Nombre de points rejetés pour 1000 points de calculs de distances par la méthode avec lissages et avec un nombre de points m égal à 12. Seuls les scans réels sont répertoriés, car aucun calcul n'est rejeté pour les maillages issus de modélisations CAO.*

| **Mailles** | | $e_p$ ($\mu m$) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 5 | 2 |
| $Li_4$ | $Li_4$ | 4 | 29 | 214 |
| $Li_5$ | $Li_5$ | 68 | 200 | 545 |

**L'influence du paramètre $m$** est observable dans la Figure III-8, la Figure III-9 et la Figure III-10. Les deux premières figures éditent l'erreur maximale de calcul en fonction du paramètre $m$, pour les modèles 3D provenant de constructions CAO et pour les modèles 3D provenant de scans. On observe qu'à partir de 12 points et jusqu'à la valeur maximale 20, l'évolution de l'erreur n'est pas monotone : ni strictement croissante, ni strictement décroissante. Il n'y a donc pas d'intérêt à augmenter la valeur de $m$ au-delà de 12 points, pour les exemples de géométries

ici étudiées. En outre, la Figure III-10 montre que, jusqu'à la valeur 12, le nombre de calculs refusés reste constant, mais celui-ci augmente rapidement au-delà de cette valeur, et ceci surtout dans le cas de la maille très usée. Le choix de la valeur 12 semble donc un choix judicieux pour le calcul des lissages dans notre cadre de travail.

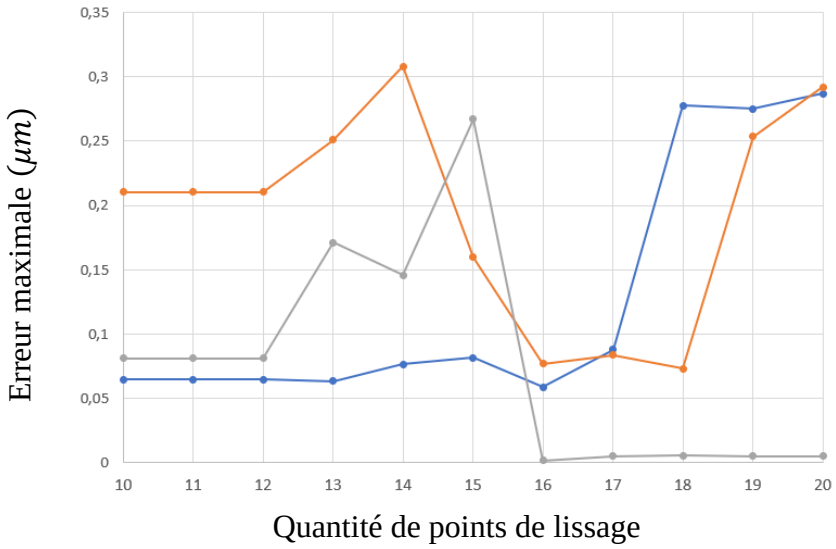



*Figure III-8 – Erreurs maximales de calcul de distance en fonction de m, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $e_p$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de construction CAO. En bleu les mailles $Li_0/Li_1$, en orange les mailles $Li_0/Li_2$ et en gris les mailles $Li_0/Li_3$.*

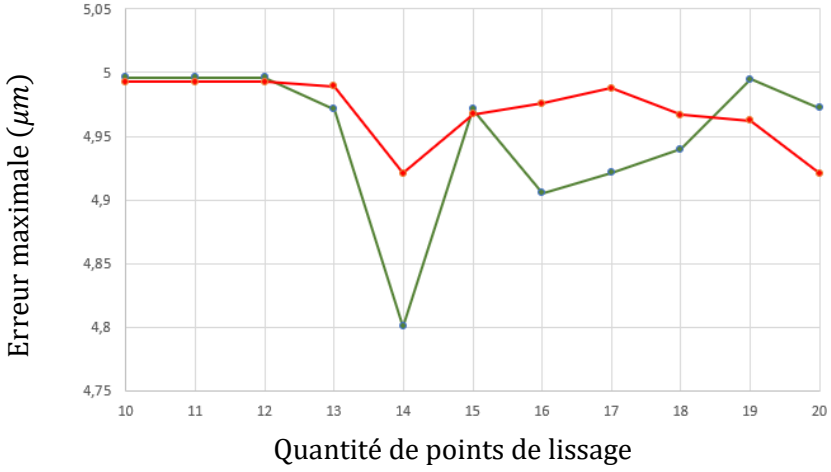



*Figure III-9 – Erreurs maximales de calcul de distance en fonction de m, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $e_p$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de scans de mailles réelles. En vert les mailles $Li_4/Li_4$ et en rouge les mailles $Li_5/Li_5$.*

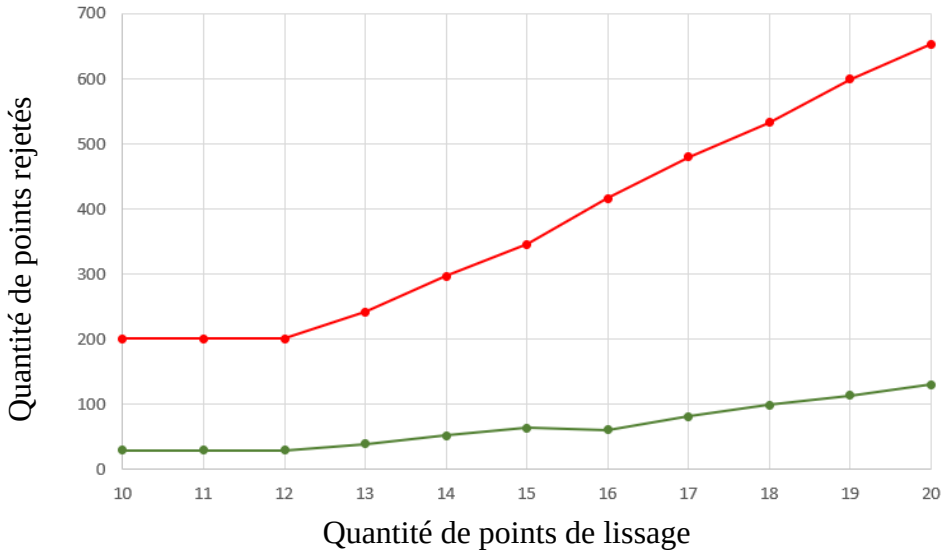



*Figure III-10 – Quantité de points rejetés en fonction de $m$, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $e_p$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de scans de mailles réelles, car aucun calcul n'est rejeté dans le cas de modèles CAO. En vert les mailles $Li_4/Li_4$ et en rouge les mailles $Li_5/Li_5$.*

# III.4. MÉTHODE MIXTE

## III.4.1. Présentation

Les résultats précédents montrent que la méthode utilisant des lissages est efficace quelle que soit l'amplitude de la distance recherchée, mais ceci au détriment du temps de calcul. A contrario, la méthode point-point est rapide, mais induit une erreur significative lorsque les distances sont faibles. Il est donc possible d'envisager une méthode de calcul mixte qui utilise les lissages pour des distances faibles et qui utilise la distance point-point pour des valeurs recherchées plus importantes. Une distance seuil $d_s$ peut être choisie arbitrairement, mais il a été démontré précédemment (voir III.2.2) que l'erreur commise dépend de la résolution du maillage. Il est donc préférable de proposer une distance seuil qui dépend de la précision recherchée et aussi de la résolution du maillage.

La Figure III-11 illustre une représentation locale d'un lissage de point $C_p(Q_i)$ autour d'un point $P_1(Q_i)$, nœud le plus proche de $Q_i$ sur le nuage de point considéré. Le point $H(Q_i)$ est le point le plus proche de $Q_i$ sur $C_p(Q_i)$.

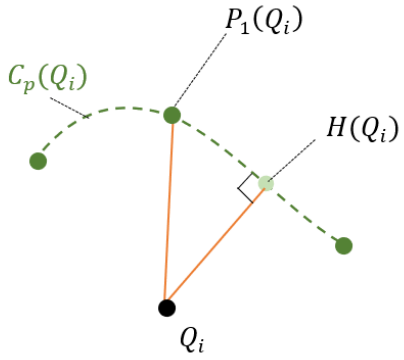



*Figure III-11 – Schéma illustratif de la méthode de calcul mixte.*

Soit $e_m$, l'erreur de mesure acceptée et $b_s$, la taille maximale des arêtes du maillage. L'erreur commise par la méthode point-point doit rester inférieure à $e_m$. En raisonnant sur un calcul de distance positives, il est donc possible d'écrire :

$$d_e\big(Q_i, P_1(Q_i)\big) - d_e\big(Q_i, H(Q_i)\big) \leq e_m \qquad \textit{(III-10)}$$

Par la suite, des notations allégées seront adoptées. En supposant une surface locale suffisamment plane et en rappelant que l'erreur commise est maximale quand $P_1H$ est maximal (c'est à dire égal à $b_s/2$), il vient :

$$Q_iH^2 + \left(\frac{b_s}{2}\right)^2 = {Q_iP_1}^2 \qquad \textit{(III-11)}$$

En remplaçant $Q_i$H dans l'équation (III-10), on obtient :

$$Q_iP_1 - \sqrt{{Q_iP_1}^2 - \left(\frac{b_s}{2}\right)^2} \leq e_m \qquad \textit{(III-12)}$$

Comme il est recherché une distance seuil relativement élevée pour pouvoir utiliser la méthode point-point, la distance $Q_iP_1$ est grande par rapport à la résolution du maillage. Il est alors possible d'utiliser un développement limité en zéro, au premier ordre, pour la fonction racine :

$$\sqrt{a^2 - x} = a - \frac{x}{2a} + o(x^2) \qquad \textit{(III-13)}$$

En remplaçant dans l'équation (III-12), il vient :

$$\frac{1}{2Q_iP_1} \times \left(\frac{b_s}{2}\right)^2 \leq e_m \qquad \textit{(III-14)}$$

D'où :

$$Q_iP_1 \geq \frac{b_s^2}{8e_m} \qquad \textit{(III-15)}$$

Ainsi, la connaissance de $b_s$ et le choix d'une erreur maximale $e_m$ permettent d'obtenir une distance seuil $d_s = \frac{b_s^2}{8e_m}$ au-delà de laquelle il est possible d'utiliser le calcul rapide de distance point-point, au lieu d'utiliser des lissages plus coûteux en temps de calcul.

## III.4.2. Tests de la méthode

Il est ici proposé de reprendre l'exemple de la sphère du paragraphe III.3.2.1 et de déterminer les erreurs avec la méthode mixte de calcul de distances (configuration matérielle n°2). Pour les lissages, deux précisions de calcul $e_p$ sont proposées : 0.005 mm et 0.002 mm. Dans un souci d'homogénéité pour les deux types de calcul (lissage et mixte), l'erreur tolérée $e_m$ pour le calcul mixte sera prise égale à $e_p$, l'erreur maximale tolérée pour les lissages polynomiaux. Dans ce cas, les distances seuils sont respectivement égales à 1,07 mm et 2.67 mm, pour $e_p$ égal à 0.005 mm et $e_p$ égal à 0.002 mm. Les temps de traitement sont mesurés et comparés à ceux de la méthode avec lissages par l'estimation d'un pourcentage de minoration. Les résultats sont synthétisés dans la Table 16 ci-dessous.

*Table 16 – Résultats avec la méthode de calcul de distance mixte pour 10 000 calculs de distance sur une sphère.*

| Cas | $e_p$, $e_m$ (mm) | Quantité de calcul point-point | Quantité de lissages plans | Quantité de lissages quadriques | Erreur maximale (mm) | Temps de calcul (s) | Minoration temps de calcul (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.005 | 6914 | 3086 | 0 | 0.0056 | 17.91 | - 28 % |
| 2 | 0.002 | 3396 | 0 | 6604 | 0.0031 | 22.01 | - 15 % |

Ces résultats montrent que les temps de calcul sont diminués de manière significative, cependant l'erreur maximale relevée dans le cas des mesures par la méthode mixte est supérieure à l'erreur maximale attendue. Cela concerne 0.1 % des points dans le cas où l'erreur attendue est égale à 0.005 mm et 2,4 % des points lorsque l'erreur est égale à 0.002 mm. Une analyse plus fine des résultats (voir Figure III-12) montre que les points en erreur sont associés à une distance relativement proche de la distance seuil. Cette inexactitude provient donc du modèle proposé, en particulier de l'approximation plane de la surface locale. Notons tout de même que l'erreur commise par la méthode point-point seule possédait un ordre de grandeur égal au dixième de millimètre (moitié de la résolution) et qu'avec la méthode mixte, cette erreur chute autour de 50 microns pour une quantité de points très faible.

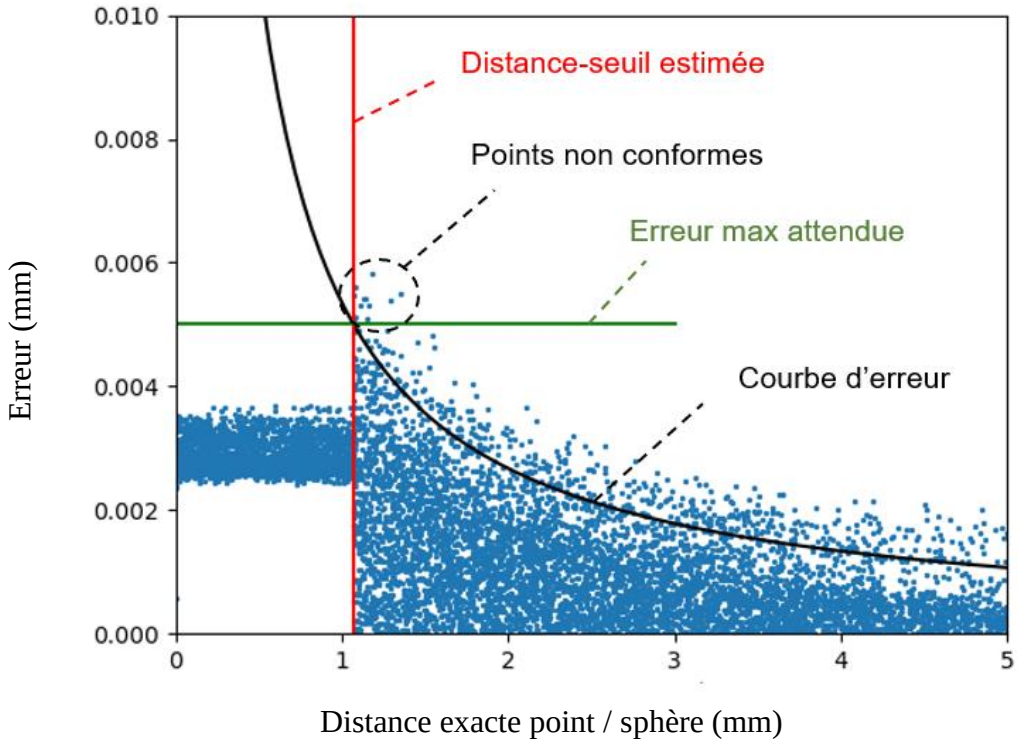



*Figure III-12 - Erreurs sur les distances calculées avec $e_p$ égal à 5 $\mu m$, entre 10 000 points aléatoires et une sphère de rayon 10 mm. En dessous de la distance seuil, les distances sont calculées à partir de lissages sur 12 points. Au-dessus, les distances sont calculées par la méthode point-point. Quelques points de mesure induisent une erreur supérieure à l'erreur maximale attendue égale à 0.005 mm.*

# III.5. DISCUSSION SUR LES MÉTHODES DE CALCUL DE DISTANCES.

La première méthode de calcul point-point estime la distance d'un point $Q_i$ à une surface $S_p$ par la distance entre ce point $Q_i$ et son point le plus proche parmi les points du nuage de points $Pc_p$, construit à partir de la surface $S_p$. Cette méthode permet d'obtenir des résultats rapides, mais l'erreur relative devient importante lorsque $Q_i$ est proche de $S_p$.

La seconde méthode de calcul estime la distance d'un point $Q_i$ à une surface $S_p$ par la distance entre ce point $Q_i$ et une courbe de lissage polynomiale passant au mieux par les $m$ points les plus proches identifiés dans $Pc_p$. Cette méthode qui induit une durée de calcul plus importante permet une qualité de mesure qui ne dépend pas de la distance de $Q_i$ à la surface $S_p$. L'erreur commise reste alors inférieure à la valeur $e_p$ fixée. Si le lissage associé à un point $Q_i$ ne vérifie pas certains critères, le calcul ne renvoie pas de résultat et le point est dit « rejeté ». Plus le paramètre $e_p$ est faible, plus le lissage devient difficile et plus le nombre de points $Q_i$ rejetés est important. De ce fait, lors de l'utilisation de cette méthode, il est nécessaire de trouver, pour chaque type de surfaces scannées, un compromis entre la précision recherchée et la quantité de points rejetés. Les valeurs choisies pour la plupart des calculs qui vont suivre sont $m = 12$ et $e_p = 0.005$ mm.

Le troisième type de calcul est une méthode mixte qui utilise les deux méthodes précédentes pour conserver la précision et diminuer le temps de calcul. Celui-ci est effectué avec lissage si la distance attendue est faible. Dans le cas contraire, il est réalisé par la méthode point-point qui est plus rapide. La distance seuil choisie pour distinguer les deux méthodes est identifiée en supposant une surface locale relativement plane, mais cette hypothèse induit un pourcentage de points pour qui l'erreur commise reste supérieure à l'erreur attendue. Les résultats obtenus par la méthode mixte ne permettent donc pas d'obtenir des mesures fiables dans tous les cas. Cependant, comme le pourcentage de points en défaut reste faible, la méthode mixte pourra être envisagée dans les méthodes de registration qui vont suivre, lors des premières itérations pour accélérer les calculs, par exemple. Après ces premières itérations, lorsque les modèles 3D deviendront proches, la méthode de calcul des distances avec lissages pourra alors être utilisée pour plus de fiabilité.

Chapitre IV.

# REGISTRATIONS - Pièces usées et corrodées

## IV.1. IMPLÉMENTATION DE LA REGISTRATION

L'implémentation de la méthode ICP ici décrite propose une structure algorithmique simple, proche de celle publiée par Besl et McKay en 1992 (Besl and McKay, 1992), sans optimisation majeure, ni pour le temps de calcul, ni pour la précision des résultats. Ce choix est guidé par la nécessité d'utiliser un code robuste, sans grande complexité, afin d'effectuer les premiers tests généraux, et afin de construire commodément, par la suite, les adaptations nécessaires à la registration de mailles de chaînes corrodées et usées.

### IV.1.1. Reprise du problème général

Soient deux surfaces $S_p$ et $S_q$, observations exactes d'une même surface physique $S$. Les surfaces $S_p$ et $S_q$ sont supports de deux maillages $M_p$ et $M_q$, dont les nœuds forment des nuages de points $Pc_p$ et $Pc_q$, composés de $n_p$ et $n_q$ points $P_j$ et $Q_i$. L'objectif d'une registration entre la surface cible $S_p$ et la surface source $S_q$ est de trouver la transformation optimale $\mathcal{T}_{opt}$ telle que les distances entre $S_p$ et $\mathcal{T}_{opt}(S_q)$ soient nulles. À l'issue de l'application de cette transformation optimale, les maillages seront dits « alignés », « registrés » ou « superposés ». L'objectif d'une registration peut être traduit par la condition (IV-1) ou de manière discrète, sur le nuage de point $Pc_q$, par la condition (IV-2).

$$\forall\, Q \in S_q, d\left(S_p, \mathcal{T}_{opt}(Q)\right) = 0 \qquad \textit{(IV-1)}$$

$$\forall\, Q_i \in Pc_q, d\left(S_p, \mathcal{T}_{opt}(Q_i)\right) = 0 \qquad \textit{(IV-2)}$$

Dans un cas général, les deux surfaces $S_p$ et $S_q$ sont des observations imparfaites de la surface physique $S$ du fait, entre autres, de l'imprécision des appareils d'acquisition. L'identification de la transformation optimale $\mathcal{T}_{opt}$ qui aligne au mieux les deux surfaces $S_p$ et $S_q$ peut alors être réalisée en minimisant une fonction-objectif $F$, telle que définie par l'expression (IV-3).

$$\mathcal{T}_{opt} = arg\,min_{\mathcal{T}}\{F(\mathcal{T})\} = arg\,min_{\mathcal{T}}\left\{\sum_{\substack{i=1 \\ Q_i \in Pc_q}}^{n_q}\left[d\left(S_p, \mathcal{T}(Q_i)\right)\right]^2\right\} \qquad \textit{(IV-3)}$$

On définit par la suite le point terminal $Pt_i$ comme étant la position terminale, sur $S_p$, de l'image de $Q_i$ par la transformation qui aligne au mieux les deux surfaces. En exprimant $F$ en fonction de $Pt_i$ et en ne considérant uniquement qu'un échantillon $Ec_q$ de $N$ points de $Pc_q$, on obtient la nouvelle fonction objectif (IV-4). Cet échantillon de points de contrôle est choisi par différentes méthodes telles que celles décrites au paragraphe II.4.2.

$$F(\mathcal{T}) = \sum_{i=1}^{N}\left[d_e\left(Pt_i, \mathcal{T}(Q_i)\right)\right]^2, Q_i \in Ec_q \qquad \textit{(IV-4)}$$

La méthode la plus répandue permettant d'identifier la transformation $\mathcal{T}$ recherchée est la méthode itérative du point le plus proche (Itérative Closest Point - ICP). Cette méthode décrite dans le paragraphe II.4 est retenue pour résoudre le problème de registration ici posé. Elle permet de trouver la transformation optimale, en rapprochant, par étapes, la surface source $S_q$ vers la surface cible $S_p$. À chaque itération $k$, l'objectif est donc de trouver la transformation $\mathcal{T}_{opt,k}$ qui minimise la fonction-objectif $F_k$ telle que définie par l'expression (IV-5). L'échantillon $Ec_{q,k-1}$ contient les points de contrôle $Q_{i,k-1}$, images des points $Q_{i,k-2}$ par la transformation optimale précédente $\mathcal{T}_{opt,k-1}$.

$$\mathcal{T}_{opt,k} = argmin_{\mathcal{T}}\{F_k(\mathcal{T})\} = argmin_{\mathcal{T}}\left\{\sum_{\substack{i=1 \\ Q_{i,k-1} \in Ec_{q,k-1}}}^{N}\left[d_e\left(Pt_i, \mathcal{T}\left(Q_{i,k-1}\right)\right)\right]^2\right\} \qquad \textit{(IV-5)}$$

## IV.1.2. Détails de l'implémentation

Ci-dessous seront décrits les éléments essentiels à l'implémentation proposée pour la méthode ICP développée dans cette étude.

- **Transformations**

Dans le problème posé par la registration de mailles vieillies, l'objectif est de trouver une transformation géométrique ne déformant pas les maillages. Il s'agit donc uniquement de déplacer ces derniers.

Dans la suite de la résolution, les coordonnées homogènes seront choisies afin de modéliser simplement les transformations attendues. Les coordonnées homogènes sont choisies au détriment des quaternions, car les matrices de transformation construites permettent d'intégrer facilement les translations, et, car l'algèbre associée est plus simple que celle utilisée pour les quaternions (voir paragraphe II.4.6). Si les points $Pt_i$ et $Q_{i,k-1}$ sont représentés par leurs coordonnées homogènes $\overrightarrow{pt_i}$ et $\vec{q}_{i,k-1}$ (voir paragraphe II.4.6.2), il est possible de définir la transformation rigide $\mathcal{T}$ par une matrice de transformation $T$ telle que décrite par l'expression (IV-6), afin de déplacer facilement les points de contrôle dans l'espace.

$$T = \begin{bmatrix} & R_{3\times3} & & t_{3\times1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \textit{(IV-6)}$$

La matrice $T$ est composée d'une matrice de rotation $R$ de $SO(3)$ construite à partir de trois paramètres angulaires, et d'un vecteur translation $\vec{t}$ défini par trois paramètres de longueur. À chaque itération, la matrice de transformation optimale $T_{opt,k}$ peut donc être identifiée de la manière suivante :

$$T_{opt,k} = argmin_T \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left[ d_e\left(\overrightarrow{pt_i}, T\vec{q}_{i,k-1}\right) \right]^2 \right\} \qquad \textit{(IV-7)}$$

- **Correspondances**

La transformation rigide à identifier comporte 6 paramètres : 3 angles pour définir une rotation et 3 longueurs pour définir une translation. La recherche de ces 6 paramètres est réalisée, à chaque itération, par minimisation de la fonction objectif $F_k$. Cependant, la résolution est complexe, car $3N$ inconnues supplémentaires se rajoutent à ces 6 paramètres géométriques. En effet, les $N$ points terminaux $Pt_i$, qui correspondent aux positions terminales attendues pour les points de contrôle $Q_i$, sont aussi inconnus. Rappelons ici que les points les plus proches

$H(Q_{i,k-1})$ de $Q_{i,k-1}$ sur $S_p$ sont différents des points terminaux $Pt_i$ (voir Figure IV-1). Cependant, plus les surfaces $S_p$ et $S_q$ sont proches, plus ces points ont tendance à se confondre.

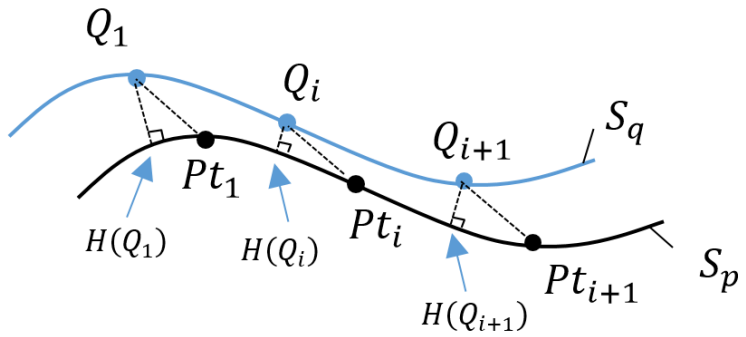



*Figure IV-1 - Points terminaux, points de contrôle et points les plus proches à chaque itération.*

Une phase initiale de prépositionnement des surfaces permet alors de faire l'hypothèse que les points terminaux $Pt_i$ sont proches des points $H(Q_{i,k-1})$, points les plus proches de $Q_{i,k-1}$ sur $S_p$. Les points $Pt_i$ sont alors remplacés dans l'équation (IV-7) par les points $H(Q_{i,k-1})$ déterminés facilement par la méthode de calcul de distances avec lissages, développée dans le paragraphe III.3. Si le vecteur $\vec{h}_{i,k-1}$ correspond aux coordonnées homogènes de $H(Q_{i,k-1})$, la fonction objectif $F_k$ s'écrit alors de la manière suivante :

$$F_k(T) = \sum_{i=1}^{N} \left[ d_e\left(\vec{h}_{i,k-1}, T\vec{q}_{i,k-1}\right) \right]^2 \qquad \textit{(IV-8)}$$

On note qu'en émettant l'hypothèse que les points les plus proches sont proches des points terminaux, la fonction-objectif ici écrite ne contient plus que les 6 inconnues de la matrice de transformation. De plus, on note que, même si les points terminaux $Pt_i$ sont uniques, les points les plus proches doivent, a contrario, être réévalués à chaque itération.

- **Résolution**

Chaque matrice de transformation $T_k$ est obtenue par minimisation de la fonction $F_k$ en utilisant une décomposition en valeurs singulières telle que présentée au paragraphe II.2.4. À la fin du processus itératif, la transformation générale recherchée $T_{opt}$ est égale au produit de toutes les matrices $T_{opt,k}$ identifiées.

$$T_{opt} = \prod_{k} T_{opt,k} \qquad \textit{(IV-9)}$$

- **Échantillon**

La sélection des $N$ points de l'échantillon $Ec_q$ se fait de manière aléatoire dans $Pc_q$. La quantité de points de contrôle choisie pour atteindre une précision suffisante avec un temps de calcul maîtrisé est fixée à 400 points. Une optimisation de cette quantité sera abordée dans le paragraphe IV.5.

Lors de la sélection initiale de l'échantillon dans $Pc_q$, il est nécessaire de majorer ce nombre de points de contrôle pour prendre en compte la quantité de points qui sera rejetée par la méthode de calcul avec lissage. Un taux de rejet est donc estimé initialement en réalisant un calcul de distances de $Pc_p$ sur lui-même (distances nulles attendues).

Par ailleurs, un calcul de distances de $Ec_q$ sur lui-même est aussi réalisé afin de rejeter les points de contrôle qui ne sont pas associés à une surface locale suffisamment régulière pour y appliquer un lissage. Ce calcul de distance avec lissage permet, en outre, de calculer la normale au point de contrôle $Q_i$. Cette normale $\vec{n}_i$ (normale à $S_q$ en $Q_i$) sera utile pour les méthodes qui seront proposées dans les prochains paragraphes.

En résumé, l'échantillon choisi comporte plus de 400 points de contrôle pour tenir compte du taux de rejet, et ces points sont associés à une surface locale suffisamment régulière pour y calculer une normale.

- **Alignement initial**

Pour initier le calcul, les maillages $M_p$ et $M_q$ doivent être proches l'un de l'autre. Dans le cas contraire, le temps de calcul peut être fortement augmenté ou bien la convergence de l'algorithme n'est pas assurée. Cette opération de mise en position initiale sera ici omise, car les maillages utilisés sont prépositionnés initialement assez proches les uns des autres. Dans le cas contraire, un alignement approximatif tel que décrit au paragraphe II.3 pourrait être utilisé (analyse en composantes principales, en particulier).

- **Critère de convergence**

Les itérations se poursuivent jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint (voir paragraphe II.4.7). Dans le cas de cette implémentation, le processus itératif se poursuit tant que la quantité d'itérations ne dépasse pas 120, et tant que l'écart-type des distances entre les maillages reste supérieur à 0.003 mm.

- **Amélioration du temps de calcul**

L'identification des points correspondants $H(Q_{i,k-1})$ est réalisée lors des quinze premières itérations par la méthode de calcul de distance point-point pour induire une phase d'approche rapide (voir paragraphe III.2.1). La méthode avec lissages (plus lente) est ensuite utilisée pour une registration fine. La précision $e_p$ est alors fixée à 0.005 mm et $m$ est égal à 12.

- **Algorithme général**

L'algorithme de la méthode ICP ici implémentée est proposé ci-dessous :

- Sélection d'un échantillon $Ec_q$ de $N$ points $Q_i$ dans $Pc_q$
- Début d'itération k
  - Pour chaque $Q_{i,k-1}$, estimation du point le plus proche sur $S_p$
  - Identification de la transformation $T_k$ par minimisation de $F_k$
  - Déplacement de $Ec_{q,k-1}$ par la transformation $T_k$
  - Calcul du critère de convergence
- Rebouclage si critère non vérifié
- Calcul de la matrice de transformation totale $T$
- Déplacement du maillage $M_q$ par la transformation $T$

## IV.1.3. Tests de la méthode ICP sur des mailles identiques

Trois mailles non corrodées sont utilisées pour tester l'implémentation de la méthode ICP. Il s'agit des mailles $Li_0$, $Li_4$, et $Li_5$ décrites dans le chapitre III.3.2. Pour chaque maille, une copie d'elle-même est déplacée dans l'espace par une transformation géométrique de faible amplitude. Deux cas sont étudiés $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$ et $(R_y, T_x) = (6°, 5\ mm)$. L'objectif de la registration est donc de réaligner la copie déplacée sur la maille initiale. À la fin du processus, les distances attendues sont nulles. À chaque itération, la moyenne et l'écart-type sont calculés à partir des distances entre les points de contrôle et la maille déplacée. Ces valeurs sont visibles dans la Figure IV-2 et la Figure IV-3 pour la transformation $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$. De plus, le nombre d'itérations, l'erreur maximale ainsi que les temps de calcul sont relevés à la fin des processus itératifs. Les résultats finaux sont synthétisés dans la Table 17. La configuration matérielle utilisée est la numéro 1.

## IV.1.4. Discussion des résultats

Les résultats sur les mailles non corrodées montrent que la convergence est régulière. L'écart-type est strictement décroissant. Il atteint dans les trois cas le seuil minimal avant que le nombre d'itérations maximal soit dépassé. L'erreur maximale après registration est inférieure au centième de millimètre pour toutes les mailles, ce qui était attendu en définissant un écart-type de 3 micromètres comme critère principal d'arrêt pour le processus itératif. La moyenne des distances converge rapidement au bout d'une dizaine d'itérations vers une valeur très proche de celle attendue en fin de convergence.

Ces résultats sont représentatifs des nombreux calculs effectués avec cette implémentation de la méthode ICP. Ils confirment la bonne convergence de cette méthode pour des mailles sans réduction d'épaisseur (non corrodées).

*Table 17 – Tests de la méthode ICP implémentée sur des mailles identiques, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances.*

| Maille | $R_y$ (degré) | $T_x$ (mm) | Moyenne (mm) | Écart-type (mm) | Erreur maximale (mm) | Quantité itérations | Temps de calcul (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | 3 | 2 | -0.0011 | 0.0004 | 0.0019 | 11 | 46 |
| $Li_0$ | 6 | 5 | -0.0011 | 0.0030 | 0.0084 | 39 | 279 |
| $Li_4$ | 3 | 2 | -0.0000 | 0.0030 | 0.0031 | 48 | 339 |
| $Li_4$ | 6 | 5 | -0.0003 | 0.0028 | 0.0097 | 63 | 475 |
| $Li_5$ | 3 | 2 | -0.0001 | 0.0030 | 0.0084 | 36 | 271 |
| $Li_5$ | 6 | 5 | -0.0000 | 0.0029 | 0.0077 | 41 | 332 |

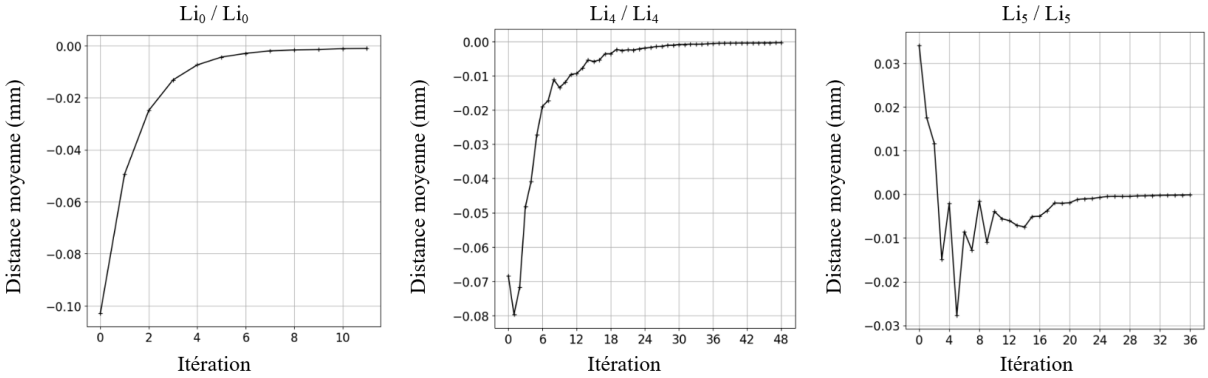



*Figure IV-2 - Mailles non corrodées - Distances moyennes pour $Li_0$, $Li_4$ et $Li_5$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\,mm)$*

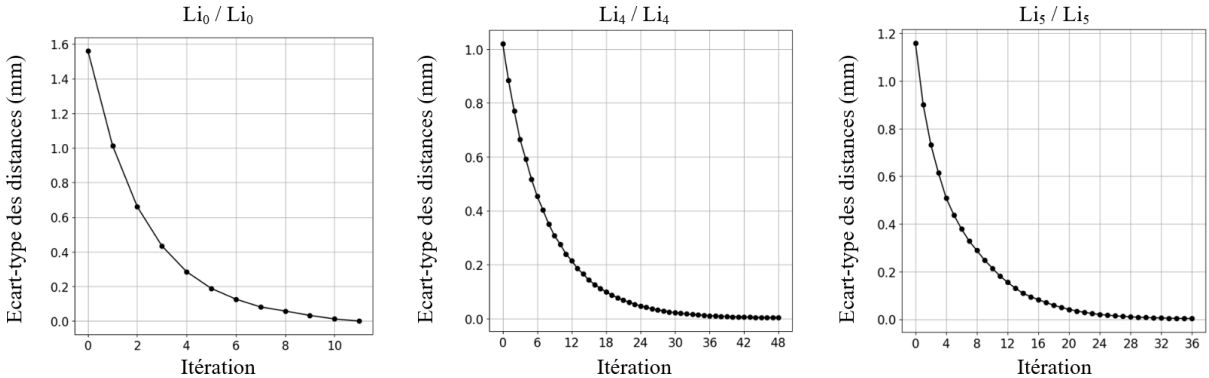



*Figure IV-3 - Mailles non corrodées - Écarts-types des distances pour $Li_0$, $Li_4$ et $Li_5$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\,mm)$.*

# IV.2. APPLICATIONS SUR PIÈCES CORRODÉES

Il est ici proposé de tester la registration précédemment implémentée pour aligner une maille corrodée sur une maille de même type, mais sans corrosion (neuve). L'hypothèse principale qui permet d'envisager l'utilisation de la méthode ICP sur des mailles corrodées est une hypothèse de corrosion généralisée : en tout point de la maille corrodée, la perte de matière est identique et est égale à $t_{hk}$ mm.

### IV.2.1. Tests de la méthode ICP sur des mailles corrodées.

Les tests de l'implémentation de la méthode ICP pour des mailles corrodées sont réalisés à partir de mailles CAO uniquement. Il est en effet difficile d'obtenir des mailles physiques (étalons) avec variations d'épaisseurs contrôlées pouvant servir de référence. Les mailles choisies sont les mailles avec réduction d'épaisseur $Li_1$, $Li_2$, et $Li_3$ décrites dans le chapitre III.3.2, dont le positionnement initial se superpose exactement avec celui de la maille $Li_0$. Chacune de ces mailles est déplacée dans l'espace par une transformation géométrique de faible amplitude. L'objectif de la registration est de réaligner ces 3 mailles sur $Li_0$, maille CAO initiale avant réduction d'épaisseur. À la fin du processus, les distances attendues entre mailles sont égales à $t_{hk}$ (voir Table 12). Le paramétrage et l'exploitation des résultats sont réalisés de manière identique aux tests du paragraphe IV.1.2, excepté le nombre d'itérations maximal autorisé qui a été abaissé de 120 à 80. Les résultats des calculs sont synthétisés dans la Table 18, dans la Figure IV-4 et la Figure IV-5. La configuration matérielle utilisée est la numéro 1.

*Table 18 - Tests de la méthode ICP implémentée sur des mailles corrodées, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances.*

| Maille fixe | Maille déplacée | $R_y$ (degré) | $T_x$ (mm) | Moyenne (mm) | Écart-type (mm) | Erreur maximale (mm) | Quantité itérations | Temps de calcul (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | $Li_1$ | 3 | 2 | 0.0477 | 0.0074 | 0.0166 | 80 | 692 |
| $Li_0$ | $Li_1$ | 6 | 5 | 0.0476 | 0.0079 | 0.0192 | 80 | 669 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 3 | 2 | 0.4878 | 0.0742 | 0.1452 | 80 | 660 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 6 | 5 | 0.4859 | 0.0802 | 0.1891 | 80 | 654 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 3 | 2 | 4.8332 | 1.0462 | 2.2125 | 80 | 804 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 6 | 5 | 4.8124 | 1.0940 | 2.2577 | 80 | 774 |

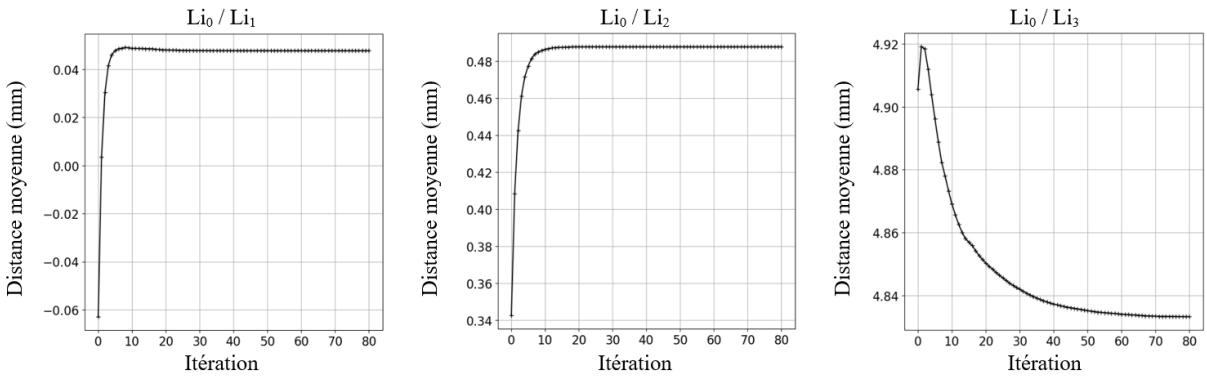



*Figure IV-4 - Mailles CAO corrodées - Distances moyennes pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$. Les distances attendues pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ sont respectivement égales à 0.05, 0.5 et 5 mm.*

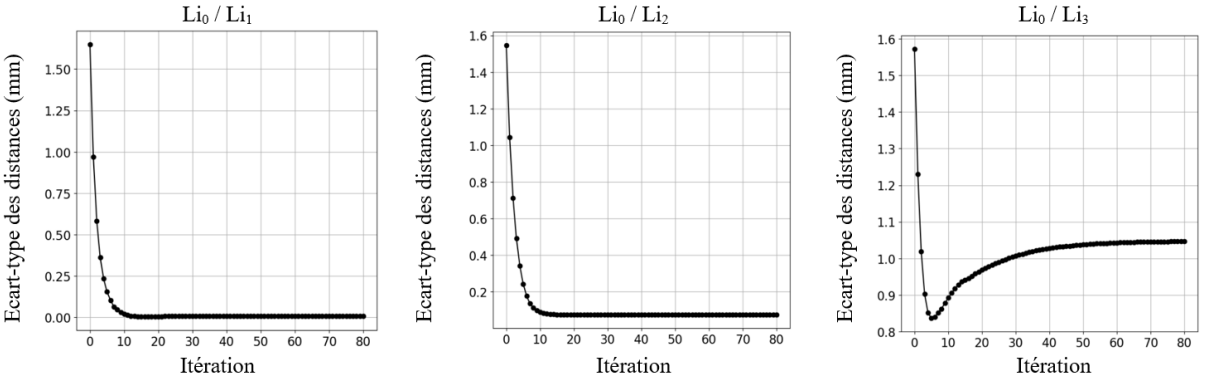



*Figure IV-5 - Mailles CAO corrodées – Écarts-types des distances pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$.*

## IV.2.2. Discussion des résultats

Les résultats pour les mailles corrodées sont différents de ceux obtenus pour les mailles non corrodées. On constate que :

- Le critère de convergence établi à 3 $\mu m$ pour l'écart-type n'est pas atteint. Le processus est interrompu au bout du nombre d'itérations maximal imposé.
- Plus l'épaisseur $t_{hk}$ est importante, plus l'écart-type obtenu est important.
- L'erreur maximale après registration est élevée au regard des épaisseurs de corrosion $t_{hk}$.
- Comme pour les mailles non corrodées, la moyenne des distances converge rapidement, au bout d'une dizaine d'itérations, vers une valeur relativement proche de celle attendue, qui est égale à $t_{hk}$. Cette information est importante, et elle sera utilisée par la suite pour proposer une nouvelle méthode de registration.

Ces résultats montrent qu'une méthode de registration classique, de type ICP, n'est pas adaptée pour des mailles dont l'épaisseur a été réduite de manière égale sur toute la surface (corrosion généralisée). Il est donc nécessaire de proposer des adaptations à cet algorithme afin de résoudre le problème rencontré.

# IV.3. ADAPTATIONS POUR CORROSION GÉNÉRALISÉE

## IV.3.1. Description de la nouvelle méthode GC-ICP

Soit $S_p$, la surface d'une pièce non corrodée. Soit $S_q$, la surface de cette même pièce après corrosion. L'hypothèse de corrosion généralisée implique que la perte de matière sur $S_p$ est identique quel que soit le point $P_i$ considéré. Il s'agit d'une réduction d'épaisseur de matière de $t_{hk}$ mm dans la direction opposée à la normale à $S_p$, au point $P_i$. L'objectif d'une registration entre $S_p$ et $S_q$ est de trouver la transformation rigide $\mathcal{T}$ telle que les distances entre $S_p$ et $\mathcal{T}(S_q)$ soient toutes égales à $t_{hk}$. Cet objectif peut être traduit par la condition (IV-10).

$$\forall\, Q \in S_q, d\left(S_p, \mathcal{T}(Q)\right) = t_{hk} \qquad \textit{(IV-10)}$$

À la différence d'une méthode ICP classique (voir IV.1), il est notable que les points terminaux $Pt_i$ ne sont pas situés sur $S_p$, car les surfaces sont décalées de $t_{hk}$ après registration : elles ne sont pas superposées (voir Figure IV-6). Pour des corrosions importantes, il est donc inadapté d'essayer d'approcher ces points terminaux par les points $H(Q_i)$, points les plus proches de $Q_i$ sur $S_p$, comme dans les implémentations classiques de la méthode ICP. Ceci explique les mauvais résultats précédemment obtenus. La stratégie de résolution doit donc être modifiée.

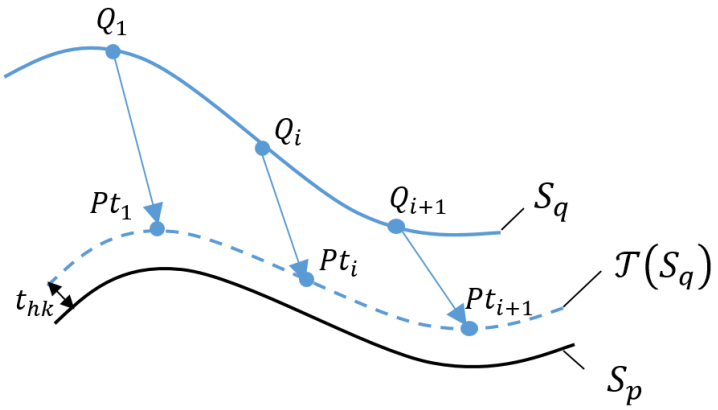



*Figure IV-6 - Surface corrodée et points terminaux après registration. Ces points, non situés sur $S_p$, ne peuvent pas être approché par les points les plus proches de $Q_i$ sur $S_p$.*

Afin de résoudre le problème, il est proposé de construire à partir de $S_q$ une surface $S'_q$ augmentée en épaisseur d'une valeur $t_{hk}$ a priori inconnue. Chaque point $Q_i$ est donc translaté d'une distance $t_{hk}$ selon $\vec{n}_i$, la normale à $S_q$ en $Q_i$ (voir Figure IV-7). Ainsi, pour registrer $S_q$ sur $S_p$, il suffit désormais de registrer $S'_q$ sur $S_p$ en vérifiant la condition (IV-11). Comme les nouveaux points terminaux $\mathrm{Pt}'_i$ sont désormais situés sur $S_p$, il est possible d'envisager à nouveau de les approcher par les points les plus proches $H(Q'_i)$ et donc d'utiliser la méthode classique précédemment implémentée.

$$\forall\, Q' \in S'_q, d\left(S_p, \mathcal{T}(Q')\right) = 0 \qquad \textit{(IV-11)}$$

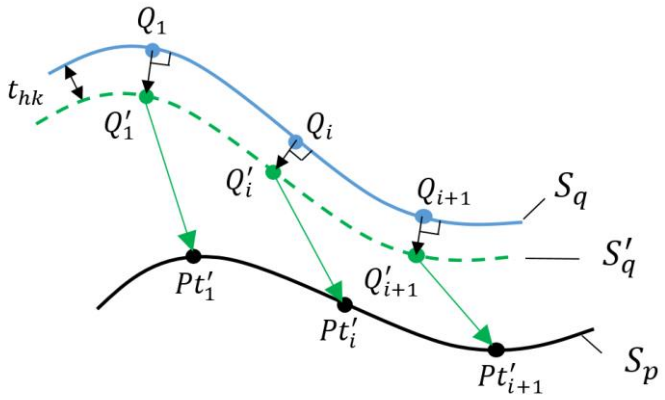



*Figure IV-7 - Augmentation d'une épaisseur $t_{hk}$ sur $S_q$ pour obtenir $S'_q$, puis registration de $S'_q$ sur $S_p$.*

L'objectif est désormais de trouver, à chaque itération $k$, la transformation $\mathcal{T}_k$ qui minimise la fonction objectif $F'_k$ définie par l'expression (IV-12) et sous forme vectorielle par l'expression (IV-13). Les points de contrôle $Q_{i,k-1}$ appartenant à l'échantillon $Ec_{q,k-1}$ sont ici remplacés par les points translatés $Q'_{i,k-1}$ constituant le nouvel échantillon $Ec'_{q,k-1}$.

$$F'_k(\mathcal{T}) = \sum_{i=1}^{N} \left[d_e\left(H\left(Q'_{i,k-1}\right), \mathcal{T}\left(Q'_{i,k-1}\right)\right)\right]^2, Q'_{i,k-1} \in Ec'_{q,k-1} \qquad \textit{(IV-12)}$$

$$F'_k(T) = \sum_{i=1}^{N} \left\| \vec{h}'_{i,k-1} - T\left(\vec{q}_{i,k-1} + t_{hk} \times \vec{n}_{i,k-1}\right)\right\|^2 \qquad \textit{(IV-13)}$$

À chaque itération, pour trouver la transformation minimisant $F'_k$, les points $Pt'_i$ sont approchés par les points $H\left(Q'_{i,k-1}\right)$, points les plus proches de $Q'_{i,k-1}$ sur $S_p$ et de coordonnées homogènes $\vec{h}'_{i,k-1}$ .La fonction-objectif ainsi écrite comprend alors 7 inconnues : l'épaisseur de corrosion $t_{hk}$ et les 6 paramètres de la transformation rigide recherchée. La décomposition classique en

valeurs singulières ne permet pas d'identifier ces 7 inconnues. Cependant, il a été observé lors des tests précédents (voir IV.2.2) que la moyenne des distances calculées convergeait rapidement vers l'épaisseur de corrosion. Il est donc proposé d'imposer initialement une valeur nulle pour $t_{hk}$ puis de remplacer régulièrement cette valeur dans le processus itératif par la moyenne des distances calculées. Une valeur égale à quinze itérations a été retenue par expérience.

## IV.3.2. Tests de la méthode GC-ICP

Les tests réalisés sur des mailles corrodées sont identiques à ceux définis au paragraphe précédent IV.2.1. Les résultats de ces tests sont synthétisés dans la Table 19, dans la Figure IV-8 et la Figure IV-9. La configuration matérielle utilisée est la numéro 1.

*Table 19 – Tests de la méthode GC-ICP implémentée sur des mailles corrodées, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances.*

| Maille fixe | Maille déplacée | $R_y$ (degré) | $T_x$ (mm) | Moyenne (mm) | Écart-type (mm) | Erreur maximale (mm) | Quantité itérations | Temps de calcul (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | $Li_1$ | 3 | 2 | 0.0489 | 0.0028 | 0.0077 | 43 | 395 |
| $Li_0$ | $Li_1$ | 6 | 5 | 0.0488 | 0.0028 | 0.0073 | 34 | 254 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 3 | 2 | 0.4990 | 0.0029 | 0.0074 | 38 | 299 |
| $Li_0$ | $Li_2$ | 6 | 5 | 0.499 | 0.0025 | 0.0070 | 22 | 126 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 3 | 2 | 4.998 | 0.0026 | 0.0070 | 72 | 693 |
| $Li_0$ | $Li_3$ | 6 | 5 | 4.998 | 0.0022 | 0.0067 | 78 | 731 |

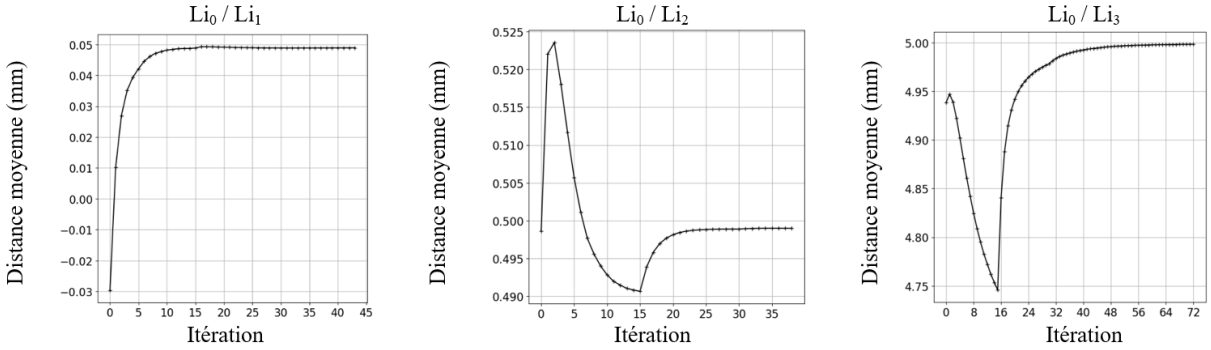



*Figure IV-8 – Méthode GC-ICP - Distances moyennes pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$. Les distances attendues pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ sont respectivement égales à 0.05, 0.5 et 5 mm.*

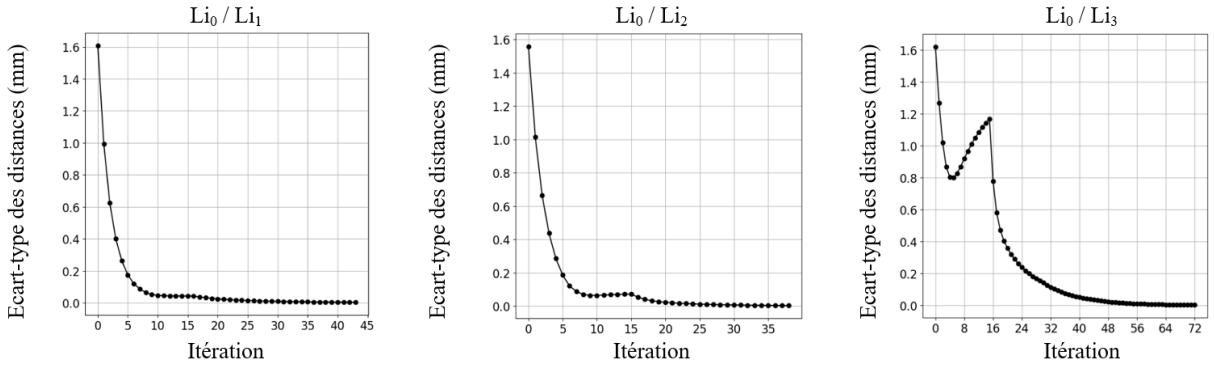



*Figure IV-9 - Méthode GC-ICP – écarts-types de distances pour $Li_1$, $Li_2$ et $Li_3$ avec $(R_y, T_x) = (3°, 2\ mm)$.*

## IV.3.3. Discussion sur la méthode GC-ICP

Lors des quinze premières itérations, la perte de matière est supposée nulle pour la minimisation de $F'_k$. Lors de cette phase, le processus ne converge pas, mais la moyenne des distances tend néanmoins rapidement vers une valeur proche de la diminution d'épaisseur attendue. Par la suite, l'épaisseur $t_{hk}$ est actualisée par la valeur du calcul de la moyenne, toutes les quinze itérations. Il en résulte des discontinuités $C^1$ de la moyenne et de l'écart-type, mais le processus global converge vers la solution attendue.

Pour ces 6 cas testés, l'écart-type atteint le seuil minimal de 3 $\mu m$ avant que le nombre d'itérations maximal soit dépassé. L'erreur maximale, après registration, est inférieure au centième de millimètre pour toutes les mailles. Ces résultats sont représentatifs des nombreux calculs effectués avec l'implémentation de la méthode GC-ICP. Ils confirment la bonne convergence de cette méthode pour des mailles CAO avec réduction d'épaisseur uniforme (corrosion généralisée). Cependant, aucun cas test n'a pu être réalisé sur des scans réels, car il est difficile de se procurer des pièces étalons qui correspondent au cas de perte de matière rencontré. Notons que pour les mailles CAO, aucun point n'est rejeté par les calculs de distance : la surface est suffisamment régulière pour la construction des lissages locaux.

Dans le cas de mailles réelles, un nombre de points sera nécessairement rejeté (voir III.3.1), et la construction des lissages induira des imprécisions sur le calcul des normales. La méthode semble cependant assez robuste pour plusieurs raisons :

- La registration est appliquée à des maillages préalablement filtrés au moment de leur définition par les logiciels constructeurs associés aux scanners. Ils sont donc peu concernés par la présence de points aberrants[1] qui peuvent induire des résultats inexacts sur le calcul des normales.

[1] Traduction anglaise : « Outlier »

- Le calcul des normales $\vec{n}_i$ est réalisé à partir des lissages construits localement avec les $m$ premiers points les plus proches sur $S_q$. En cas de présence d'un point aberrant, l'influence de celui-ci est compensée, dans une certaine limite, par la présence des $m-1$ autres points.
- Si la surface locale sur $S_q$ n'est pas réguliere, le point considéré est rejeté de l'échantillon des points de contrôle (voir IV.1.2). Il ne participe donc pas au processus de registration. Ces points peuvent être des points aberrants correspondant à des artefacts enregistrés lors du processus d'acquisition, mais aussi des discontinuités locales de surface liées à d'éventuelles corrosions par piqûres, présences résiduelles de matières biologiques ou autres usures de contact et défauts de fabrication. Dans tous les cas, le choix initial de l'échantillon de points de contrôle rejette tous les points de ces types.

# IV.4. ADAPTATIONS POUR CORROSION GÉNÉRALISÉE ET USURE

Dans le cas de la registration des mailles de chaînes vieillies en mer, les pertes de matière qui doivent être prises en compte sont des pertes dues à de la corrosion généralisée et des pertes localisées dues, par exemple, à l'usure, à la corrosion par piqûres ou à la biocorrosion. Il est notable que les pertes de matière localisées se rajoutent à la corrosion généralisée. En conséquence, dans un processus d'alignement, les distances mesurées dans les zones altérées localement sont plus importantes que celles mesurées sur le reste de la maille uniquement soumise à de la corrosion généralisée. Il n'est donc pas souhaitable de réaliser une registration par la méthode GC-ICP sur des mailles comprenant des altérations locales. En effet, ces distances, plus importantes, affecteraient indubitablement le calcul de la fonction-objectif, et il en résulterait un positionnement incertain après registration.

Une nouvelle méthode WGC-ICP prenant en compte les usures localisées et la corrosion généralisée doit donc être développée.

## IV.4.1. Description de la méthode WGC-ICP

Pour cette nouvelle méthode, il est envisagé de filtrer les points de contrôle qui sont positionnés sur des zones de perte localisée de matière. On rappelle qu'il a été choisi de déplacer $S_q$, la maille vieillie, sur la maille fixe $S_p$ neuve, ou moins altérée. Une fois les points supprimés, il devient alors possible de registrer, par la méthode précédente, les mailles sur ce nouvel échantillon réduit. Suite à l'application du filtre, la quantité restante de points de l'échantillon doit cependant rester suffisante pour assurer une bonne convergence du processus. Cette

méthode est donc adaptée si la surface altérée localement reste limitée au regard de la surface totale de la maille analysée.

Soit $Ec_q^w$, l'échantillon de point de $Pc_q$ qui ne contient pas de points présents sur des zones de pertes de matière localisées. L'objectif de la registration entre $S_p$ et $S_q$ est désormais de trouver la transformation rigide $\mathcal{T}$ telle que les distances entre $S_p$ et $\mathcal{T}(Ec_q^w)$ soient égales à $t_{hk}$. Cet objectif, qui peut être traduit par la condition (IV-14), est atteint de la même manière que la méthode GC-ICP, mais sur l'échantillon de points filtrés.

$$\forall\, Q_i \in Ec_q^w, d\left(S_p, \mathcal{T}(Q_i)\right) = t_{hk} \qquad \textit{(IV-14)}$$

Soit $D(S_p, Ec_q)$ l'ensemble des distances calculées entre les points de l'échantillon $Ec_q$ de $S_q$, avec la surface $S_p$. Parmi ces distances, celles correspondant aux points présents sur les zones de pertes de matière localisées sont peu nombreuses et sont éloignées des grandeurs typiques de l'ensemble des distances calculées. Les points de $S_q$ seront donc des points d'altération locale si leur distance par rapport à $S_p$ est supérieure à une distance de coupure $d_c$ à déterminer.

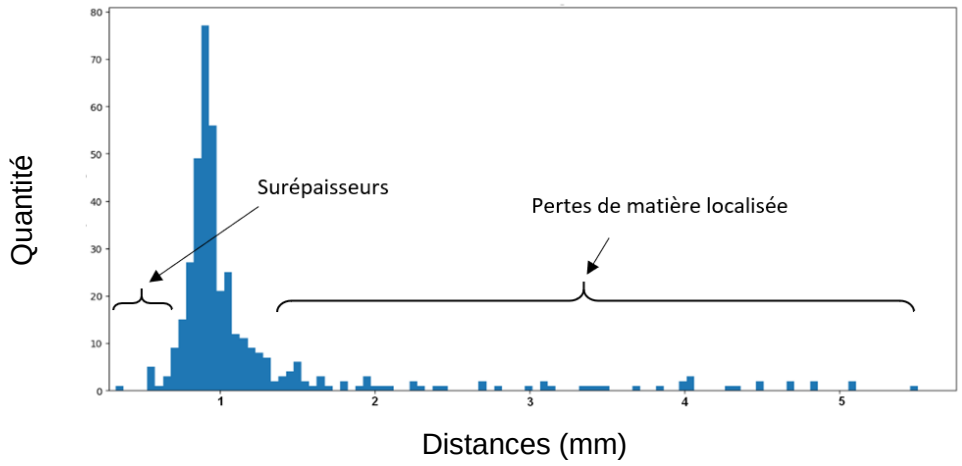



*Figure IV-10 - Histogramme typique des distances entre une maille vieillie et une maille neuve.*

En Figure IV-10 est représenté un histogramme typique des distances $D(S_p, Ec_q)$. On y observe un sommet centré sur l'épaisseur de corrosion généralisée et un ensemble de distances élevées qui correspond aux points présents sur les zones de pertes de matière localisées. Notons que les distances inférieures au sommet sont associées à une dispersion inévitable autour de l'épaisseur de corrosion, mais aussi, parfois, à des surépaisseurs locales présentes sur la surface de la maille usée. Cela peut correspondre, par exemple, à un gonflement local dû à de la corrosion ou à des restes de fouling qui ont solidement adhéré à la surface de la maille. De manière générale, ces distances inférieures singulières sont très peu nombreuses par rapport aux distances élevées, car les pertes de matière prédominent largement dans le phénomène de vieillissement. Elles sont

néanmoins à prendre en compte pour le calcul de la distance de coupure $d_c$ qui est estimée en suivant les 3 étapes décrites ci-dessous.

- **Étape 1** - Calcul de la médiane sur $D(S_p, Ec_q)$ : $med[D(S_p, Ec_q)]$ et suppression de toutes les distances supérieures à la médiane (voir Figure IV-11). La médiane estime la distance correspondant au sommet de l'histogramme, c'est-à-dire l'épaisseur de corrosion $t_{hk}$. Rappelons ici que la médiane est peu sensible aux valeurs extrémales.

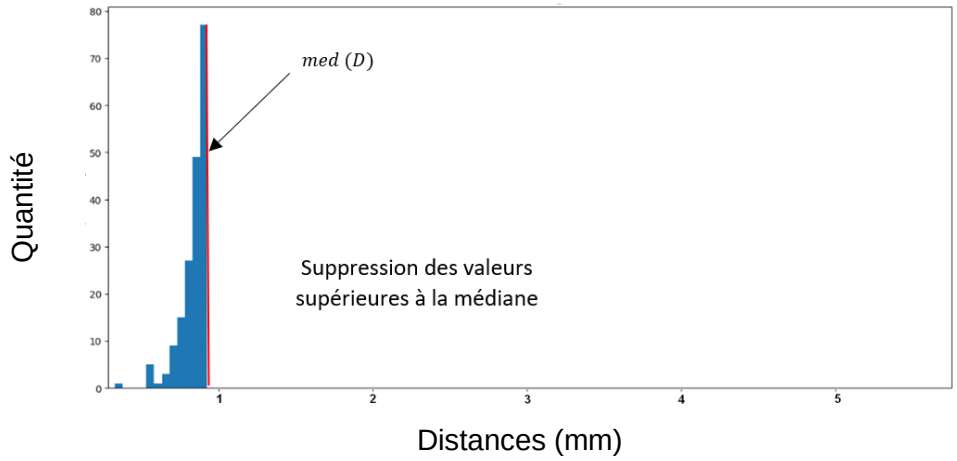



*Figure IV-11 – Calcul de la médiane et suppression des distances supérieures à la médiane. On considère ici que les distances supérieures à la médiane sont trop affectées par les pertes de matière localisées pour permettre leur exploitation dans le but de calculer la distance de coupure.*

- **Étape 2** - Construction de $D'(S_p, Ec_q)$, l'ensemble des distances obtenues par symétrisation des distances inférieures à la médiane, par rapport à l'axe vertical passant par cette médiane (voir Figure IV-12).

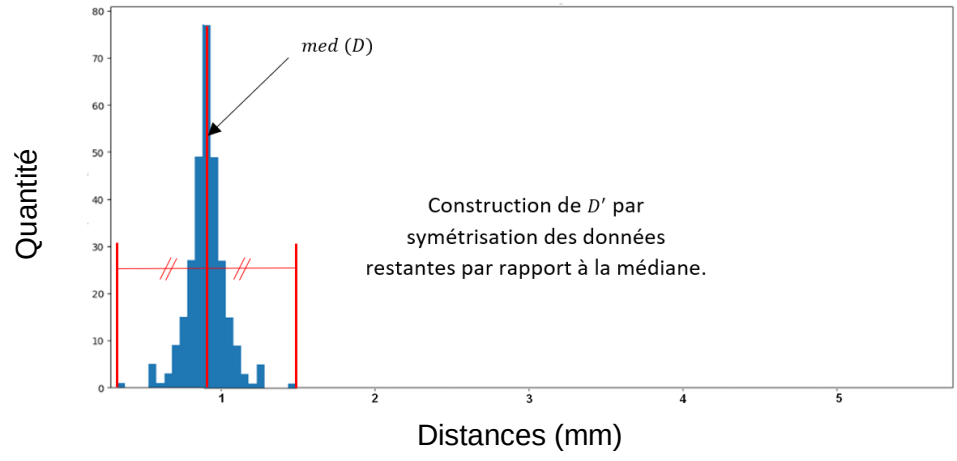



*Figure IV-12 – Symétrisation des distances. Il est supposé que les bosses (peu nombreuses) affectent faiblement la partie inférieure de l'histogramme. En conséquence, l'histogramme des distances sans pertes de matière locale peut être reconstruit à partir de la symétrisation de sa partie inférieure, par rapport à la médiane.*

- **Étape 3** - Calcul de l'écart absolu médian sur $D'(S_p, Ec_q)$ : $mad[D'(S_p, Ec_q)]$, et calcul de la distance de coupure $d_c$ définie en fonction d'un seuil $thr$ et par la relation (IV-15) (voir Figure IV-13). Il s'agit ici de calculer la dispersion des valeurs sur l'ensemble des distances symétrisées, avec des statistiques robustes, peu sensibles aux données aberrantes. L'écart absolu médian permet de s'affranchir des données extrêmes, qui correspondent sur $D'$ aux surépaisseurs locales, peu nombreuses, présentes sur la surface $S_q$.

$$d_c = med[D(S_p, Ec_q)] + thr \times mad[D'(S_p, Ec_q)] \qquad (IV\text{-}15)$$

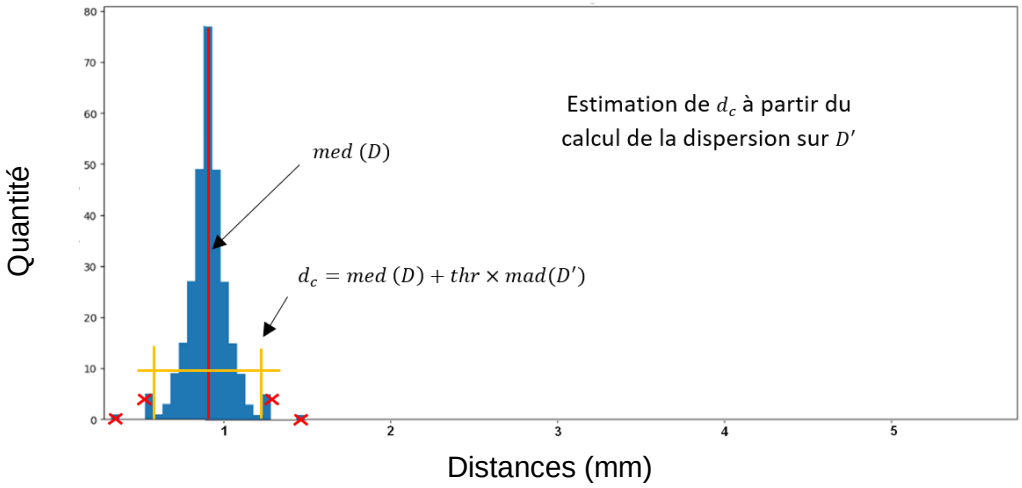



*Figure IV-13 – Calcul de la distance de coupure $d_c$ à partir de l'histogramme reconstruit. Par la suite, tous les points de contrôle, dont la valeur absolue de leur distance à $S_p$ sera supérieure à $d_c$, seront supprimés de l'échantillon lors du processus itératif de registration.*

Dans la méthode ici proposée, la médiane $med$ et l'écart absolu médian $mad$ sont utilisés en remplacement de la moyenne et de l'écart-type afin d'estimer une distance de coupure robuste statistiquement (Hoaglin et al., 2010; Leys et al., 2013) et indépendante des distances atypiques. L'écart absolu médian $mad$ est défini par la relation (IV-16) dans laquelle la valeur $k_{dist}$ est prise égale à 1.4826 afin de rendre cet estimateur équivalent à l'utilisation de l'écart-type pour une distribution normale (Rousseeuw and Croux, 1993). De ce fait, le seuil $thr$ choisi est compris classiquement entre 2.5 et 3 pour supprimer entre 1% et 0.27% des données sur $D'(S_p, Ec_q)$.

$$mad[D'(S_p, Ec_q)] = k_{dist} \times med_i(|d_i - med[D'(S_p, Ec_q)]|) \quad d_i \in D'(S_p, Ec_q) \qquad (IV\text{-}16)$$

## IV.4.2. Tests de la méthode WGC-ICP

Quatre mailles, $Li_6$, $Li_7$, $Li_8$ et $Li_9$, sont utilisées pour tester l'implémentation de la méthode WGC-ICP. Ces mailles, provenant de constructions CAO, sont décrites dans la Table 20. Les mailles $Li_7$, $Li_8$, et $Li_9$ (voir Figure IV-14) sont déduites de la maille $Li_6$, de type 40-5-3.4, après :

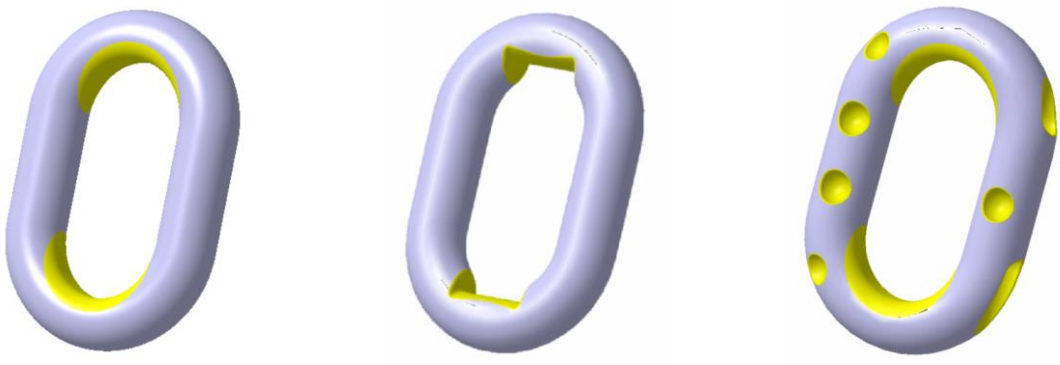
- réduction d'une épaisseur de matière $t_{hk}$ égale à 3 mm,
- ajout d'une usure régulière dans les cintres pour $Li_7$,
- ajout d'une usure sous forme de gorge dans les cintres pour $Li_8$,
- ajout d'une usure régulière dans les cintres et ajout de cavités dispersées pour $Li_9$.

Les mailles altérées sont déplacées dans l'espace par deux transformations géométriques : $(R_y, T_x) = (-3°, 2\ mm)$ ou $(R_y, T_x) = (2°, 4\ mm)$. À la fin du processus de registration entre les mailles altérées et la maille $Li_6$ et à la suite de la suppression des points présents sur les zones de pertes localisées de matière, les distances attendues entre mailles sont égales à l'épaisseur de corrosion $t_{hk}$. Les résultats de ces calculs sont synthétisés dans la Table 21, dans la Figure IV-15 et la Figure IV-16.

Le paramétrage des registrations est identique à celui défini dans le paragraphe concernant la méthode GC-ICP. Après les 15 premières itérations d'approche rapide, le calcul de l'épaisseur de corrosion généralisée et le filtre des points sont réactualisés toutes les 10 itérations. La valeur du seuil $thr$ est fixée à 3. La configuration matérielle utilisée est la numéro 1.

*Table 20 - Caractéristiques des mailles $Li_6$, $Li_7$, $Li_8$ et $Li_9$ utilisées pour les tests de la méthode WGC-ICP, avec $b_s$, la résolution des maillages, et $t_{hk}$, l'épaisseur de corrosion généralisée.*

| **Mailles** | $b_s$ **(mm)** | $t_{hk}$ **(mm)** | $n_p$ | **Taille sur le disque (Mo)** |
|---|---|---|---|---|
| $Li_6$ | 0.28 | 0 | 1 750 140 | 171 |
| $Li_7$ | 0.44 | 3 | 1 487 642 | 145 |
| $Li_8$ | 0.33 | 3 | 2 458 041 | 240 |
| $Li_9$ | 0.33 | 3 | 2 758 610 | 269 |



(a) (b) (c)

*Figure IV-14 – Description des mailles CAO altérées localement. Les diminutions locales d'épaisseur sont représentées en jaune pour : (a) la maille $Li_7$, (b) la maille $Li_8$, et (c) la maille $Li_9$.*

*Table 21 – Résultats de la méthode WGC-ICP pour des mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances.*

| **Maille fixe** | **Maille déplacée** | **$R_y$ (°)** | **$T_x$ (mm)** | **Moyenne (mm)** | **Écart-type (mm)** | **Erreur maximale (mm)** | **Quantité itérations** | **Temps calcul (s)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Li_6$ | $Li_7$ | -3 | 2 | 2.9999 | 0.0028 | 0.0074 | 68 | 1008 |
| $Li_6$ | $Li_7$ | 2 | 4 | 2.9989 | 0.0028 | 0.0075 | 81 | 1181 |
| $Li_6$ | $Li_8$ | -3 | 2 | 2.9988 | 0.0025 | 0.0085 | 64 | 948 |
| $Li_6$ | $Li_8$ | 2 | 4 | 2.9989 | 0.0029 | 0.0074 | 49 | 725 |
| $Li_6$ | $Li_9$ | -3 | 2 | 2.9995 | 0.0025 | 0.0113 | 81 | 1205 |
| $Li_6$ | $Li_9$ | 2 | 4 | 2.9992 | 0.0036 | 0.0096 | 120 | 1921 |

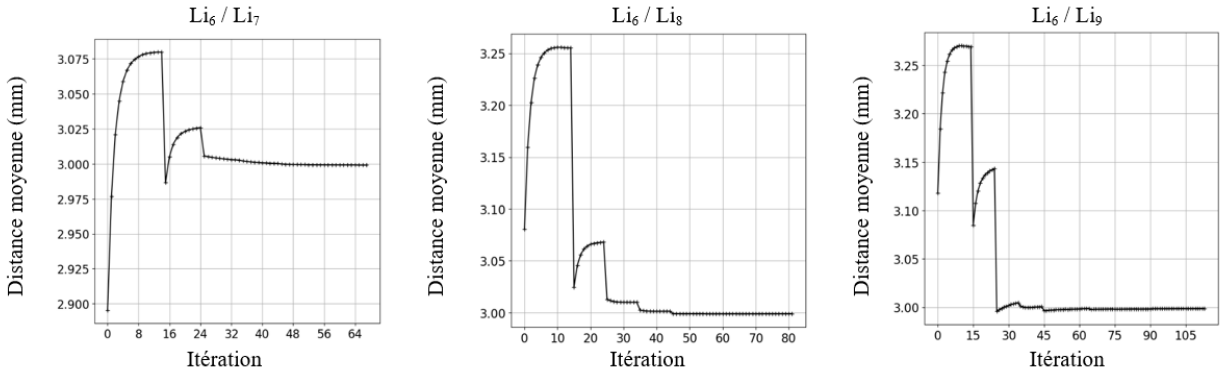



*Figure IV-15 - Méthode WGC-ICP - Mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées - Distances moyennes pour $Li_7$, $Li_8$ et $Li_9$ avec $(R_y, T_x) = (2°, 4\ mm)$.*

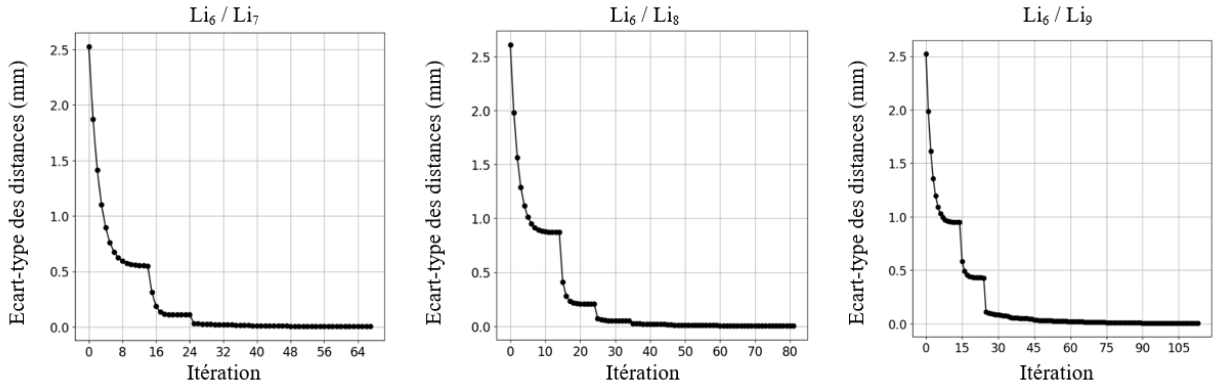


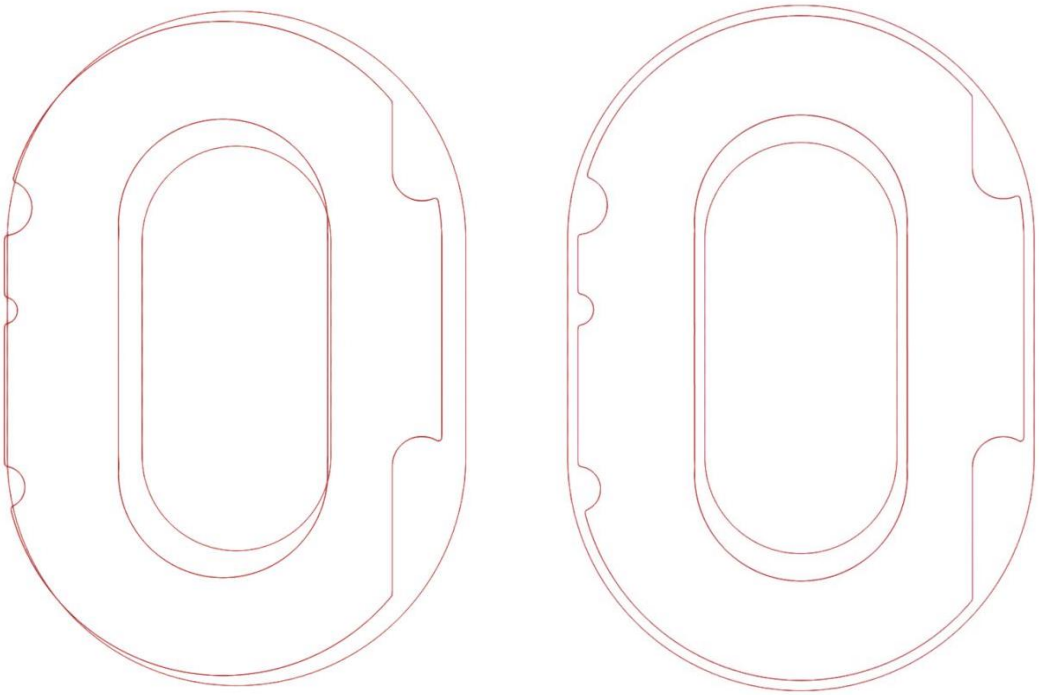

*Figure IV-16 - Méthode WGC-ICP - Mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées. Écarts-types des distances pour $Li_7$, $Li_8$ et $Li_9$ avec $(R_y, T_x) = (2°, 4\ mm)$.*

## IV.4.3. Discussion sur la méthode WGC-ICP

Toutes les dix itérations, l'épaisseur $t_{hk}$ est réactualisée par la moyenne des distances, et les points présents sur les zones de pertes localisées de matière sont filtrés. Il en résulte des discontinuités $C^1$ de la moyenne et de l'écart-type, mais le processus converge vers la solution attendue. Il est notable que le filtre est appliqué uniquement sur un échantillon de points $Ec_q$ de $S_q$. Il n'a pas pour but d'identifier précisément tous les points concernés par les pertes de matière localisées. L'objectif est ici de supprimer seulement les points de $Ec_q$ qui peuvent avoir une influence négative sur le processus d'alignement des mailles. L'erreur maximale obtenue après registration est proche du centième de millimètre pour toutes les mailles testées. Le nombre d'itérations nécessaires et les temps de calcul sont cependant significativement majorés par rapport aux méthodes précédentes.

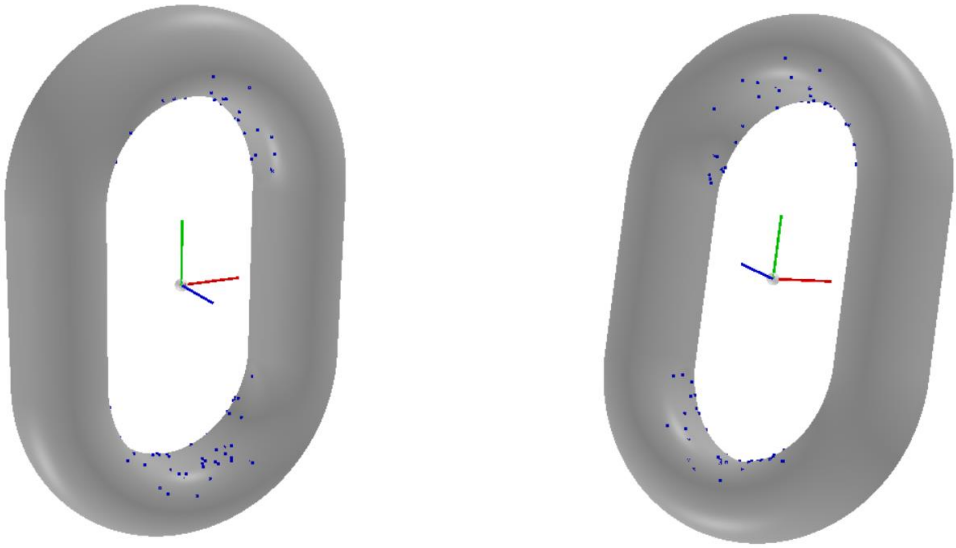
Ces résultats sont représentatifs des nombreux calculs effectués avec l'implémentation de la méthode WGC-ICP, ils confirment la bonne convergence de cette méthode pour des mailles CAO.

A titre d'illustration, sur la Figure IV-17, les sections XY des mailles $Li_6$ et $Li_9$ sont représentées avant registration en figure (a) et après registration par la méthode WGC-ICP en figure (b). Toujours à titre d'illustration, il est représenté, sur la Figure IV-18, les points identifiés par l'algorithme comme étant situés sur des zones de pertes de matière localisées pour les mailles $Li_7$, $Li_8$ et $Li_9$. Il est notable qu'aucune erreur n'a été détectée dans ce processus d'identification d'altérations locales.



(a) (b)

*Figure IV-17 – Illustration d'un résultat de registration : (a) section XY de la superposition des mailles Li6 et Li9 avant registration, (b) section XY de la superposition des mailles Li6 et Li9 après registration par la méthode WGC-ICP.*



(a) (b)

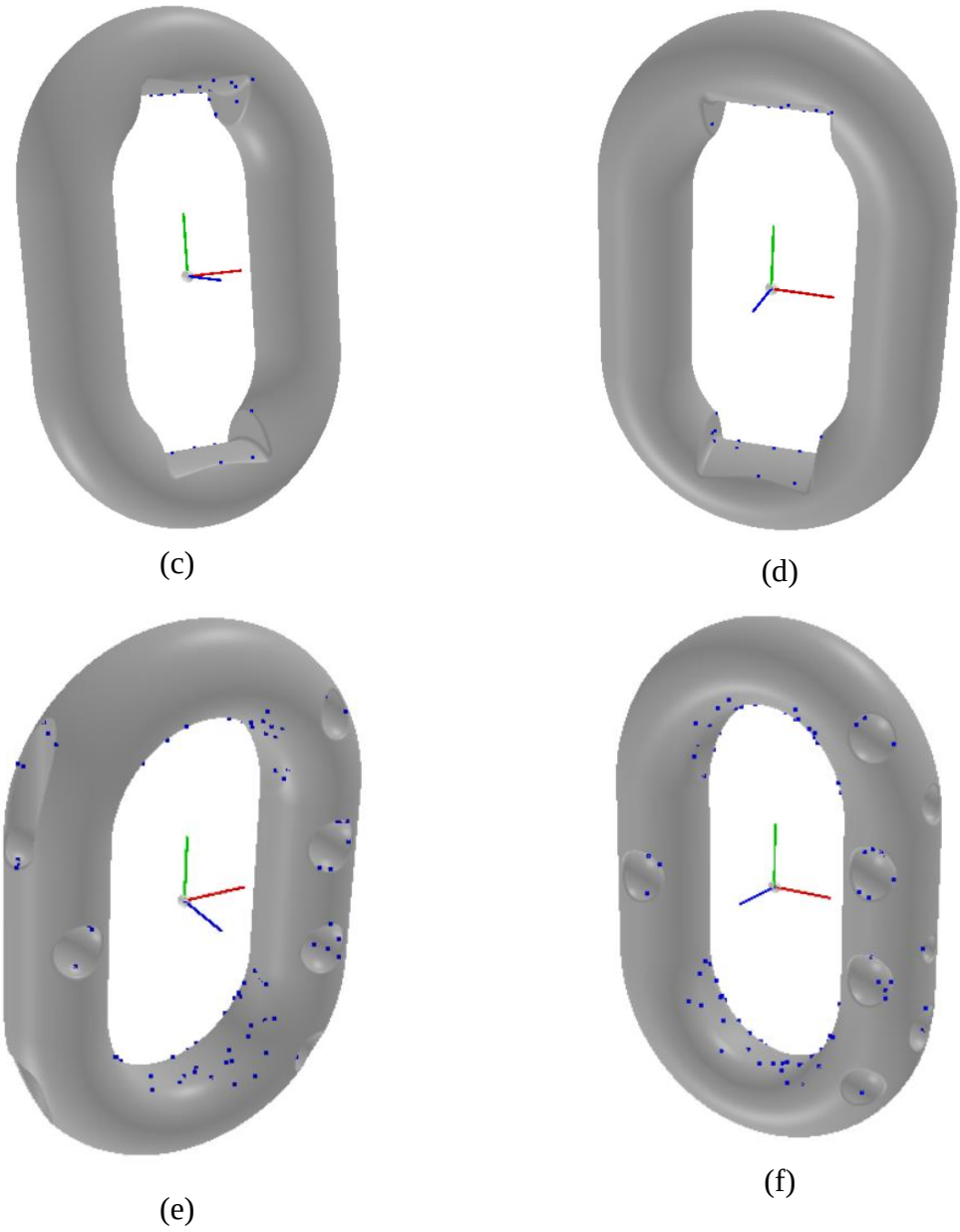



*Figure IV-18 – Points de contrôle situés sur des pertes localisées de matière. Ces points sont identifiés par le filtre de la méthode WGC-ICP, et sont représentés en bleu : (a) et (b) maille $Li_7$, (b) et (c) maille $Li_8$, (c) et (d) maille $Li_9$.*

Il est important de noter que, lors du processus de suppression des points présents sur les zones de pertes localisées de matière, il peut être nécessaire de contrôler que les points restants soient associés à des normales dont les directions dans l'espace ne comportent pas d'orientation privilégiée. Par exemple, les points de contrôle restant, après un filtre sur une maille localement altérée à l'intérieur et à l'extérieur des cintres (bosse et creux), possèdent des normales principalement perpendiculaires à l'axe $(O, \vec{x})$ (voir repérage en annexe A). Dans ces conditions, il est difficile de trouver une position précise suivant cette même direction (voir paragraphe II.4.2).

# IV.5. OPTIMISATION DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON

## IV.5.1. Introduction

Les premiers tests de l'implémentation de la méthode ICP ont été réalisés en faisant référence à la publication de Rusinkiewicz et Levoy (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) dans laquelle la valeur de l'échantillon est fixée à 1% du nombre de points total du nuage source (voir paragraphe II.4.2). Ces tests ont alors montré que ce pourcentage de points augmentait de manière importante le temps de calcul, sans diminution du nombre d'itérations, ni amélioration notable de la précision obtenue. Plusieurs essais numériques prudents ont alors conduit à une quantité 25 fois inférieure à celle préconisée, soit environ 400 points de contrôle pour les mailles étudiées dans les paragraphes précédents.

Il est ici proposé de tester une quantité de points bien inférieure à celle précédemment choisie afin d'identifier une valeur optimale qui permettrait d'atteindre la précision souhaitée, tout en diminuant de manière importante les temps de calcul. Ces tests seront réalisés sur la méthode ICP seule. Les résultats obtenus pourront néanmoins être transposés aux méthodes GC-ICP et WGC-ICP.

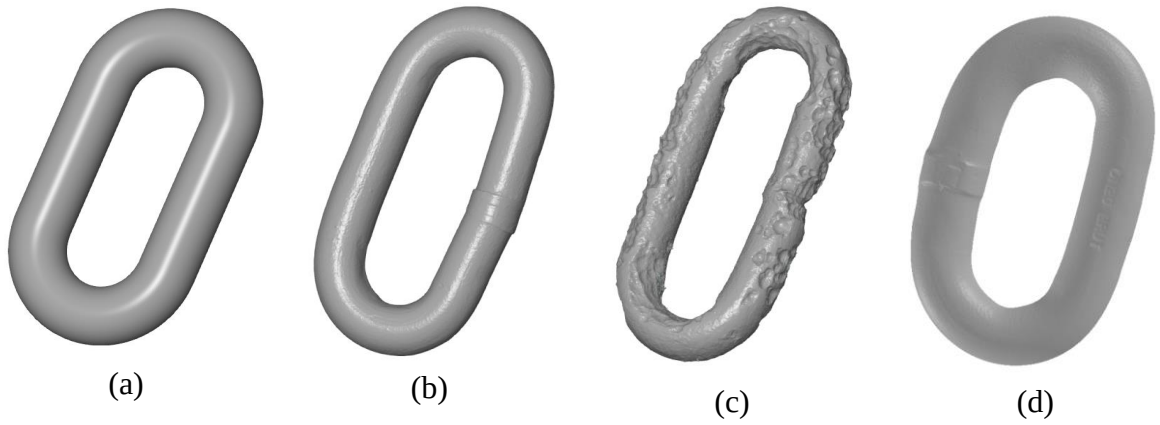
## IV.5.2. Tests réalisés

Plusieurs mailles ont été choisies pour réaliser les tests de convergence. Il s'agit des mailles $Li_0$, $Li_4$ et $Li_5$, définies au paragraphe III.3.2.2, et des mailles $Dn_{01}$, $Dn_{02}$ et $Dn_{03}$, construites à partir d'un scan de maille de chaîne réelle, dont la résolution est progressivement réduite. Des illustrations de $Li_0$, $Li_4$, $Li_5$ et $Dn_{01}$ sont proposées en Figure IV-19. Les caractéristiques des maillages associés sont fournies dans la Table 22.

Pour chaque maille, une copie d'elle-même est déplacée dans l'espace par une transformation géométrique de faible amplitude. Un seul cas est étudié $(R_y, T_x, T_y, T_z) = (3°, 3\ mm, 4\ mm, 1\ mm)$. L'objectif de la registration étant de réaligner la copie déplacée sur la maille initiale, les distances terminales attendues entre mailles sont donc nulles. L'implémentation de la méthode ICP utilisée est identique à celle proposée dans le paragraphe IV.1.2, exceptées les caractéristiques suivantes : le nombre d'itérations maximal est égal à 60, l'écart-type à atteindre est égal à 0.015 mm, et la configuration matérielle utilisée pour ces calculs est la numéro 2.

*Table 22 - Caractéristiques des mailles $Li_0$, $Li_4$, $Li_5$ et $Dn_i$. Les mailles $Dn_i$ sont construites à partir d'un scan de maille de chaîne réelle, mais avec des résolutions différentes.*

| **Mailles** | **$b_s$ moyen (mm)** | **$n_p$** | **Taille sur disque (Mo)** | **Surface (mm²)** |
|---|---|---|---|---|
| $Li_0$ | 0.21 | 1 124 304 | 110 | 36 020 |
| $Li_4$ | 0.16 | 1 003 308 | 98 | 18 343 |
| $Li_5$ | 0.15 | 1 048 985 | 102 | 18 144 |
| $Dn_{01}$ | 0.10 | 2 067 550 | 202 | 15 722 |
| $Dn_{02}$ | 0.20 | 508 154 | 50 | 15 695 |
| $Dn_{03}$ | 0.31 | 225 651 | 22 | 15 685 |



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

*Figure IV-19 – Mailles utilisées pour l'optimisation du nombre de points de contrôle. (a) Maille $Li_0$, construction CAO, désignation 30-6-3.4. (b) Maille $Li_4$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-7-3.4. (c) Maille $Li_5$, scan de maille réelle fortement usée, désignation 20-7-3.4. (d) Maille $Dn_{01}$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-6-3.6.*

Deux modes de sélection des points de contrôles sont choisis : le mode aléatoire tel que précédemment utilisé, mais aussi le mode uniforme tel que décrit dans le paragraphe II.4.2. Un seul type de calcul avec choix aléatoire n'aurait pas permis de discuter l'influence du nombre de points de contrôle, car la caractéristique aléatoire conditionne aussi la qualité de la convergence du calcul itératif.

Les échantillons testés sont construits à partir de la liste de quantité de points de contrôle définie en (IV-17). Les tailles *N* des échantillons ne sont cependant pas exactement égales à ces valeurs, car l'algorithme de sélection uniforme ne permet pas d'obtenir précisément la quantité souhaitée, et, car les points situés sur des surfaces trop irrégulières sont refusés par le calcul de distances avec lissage.

$$[10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 200, 400] \qquad \textit{(IV-17)}$$

La Figure IV-20 présente les différences de répartition des points de contrôle entre la méthode aléatoire et la méthode uniforme pour les mailles $Li_5$, et $Dn_{01}$ avec $N = 40$, et $N = 400$.

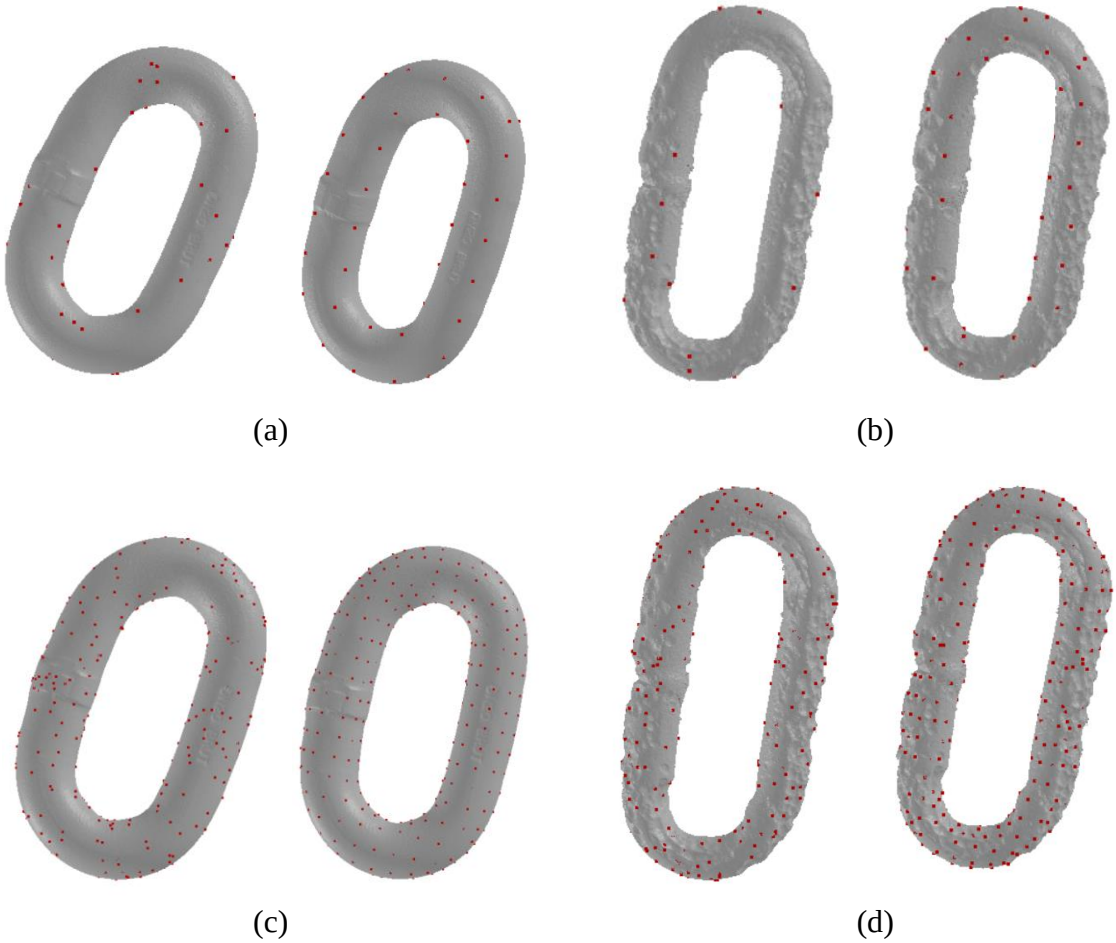



*Figure IV-20 – Répartition aléatoire et répartition uniforme des points de contrôle pour les mailles $Li_5$ et $Dn_{01}$ : (a) et (b) 40 points de contrôle, (c) et (d) 400 points de contrôle.*

## IV.5.3. Résultats

La quantité d'itérations et le temps de calcul sont relevés à la fin de chaque test numérique. Les résultats des calculs sont synthétisés dans : la Figure IV-21 et la Figure IV-22 pour la méthode de choix uniforme, la Figure IV-23 et la Figure IV-24 pour la méthode de choix aléatoire.

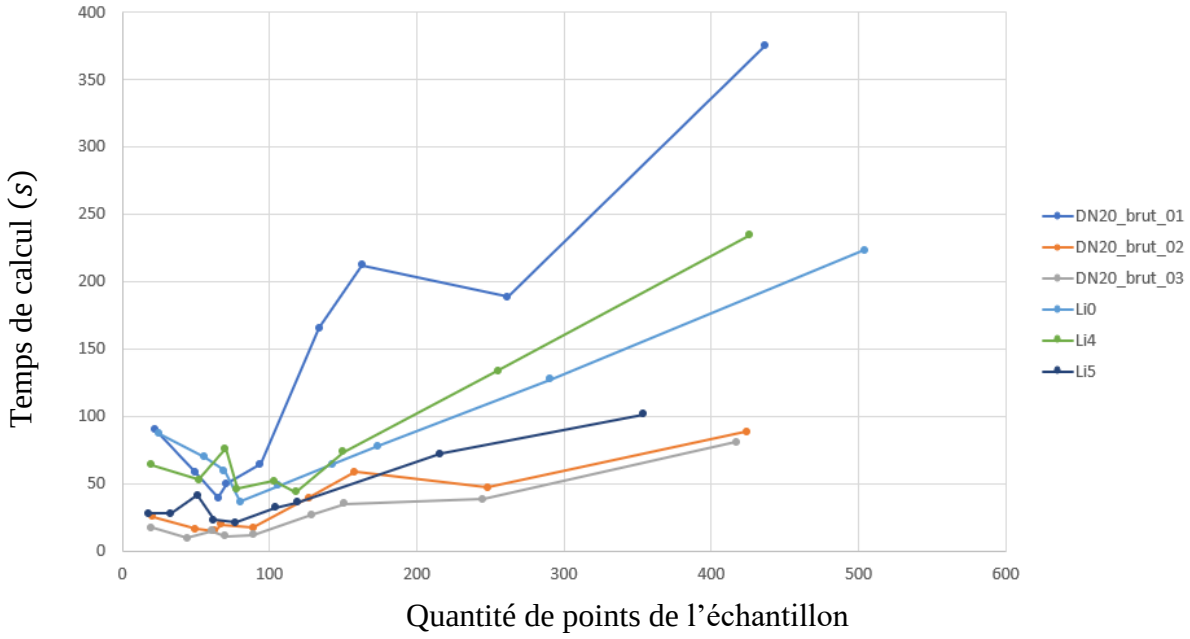



*Figure IV-21 – Temps de calcul en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition uniforme.*

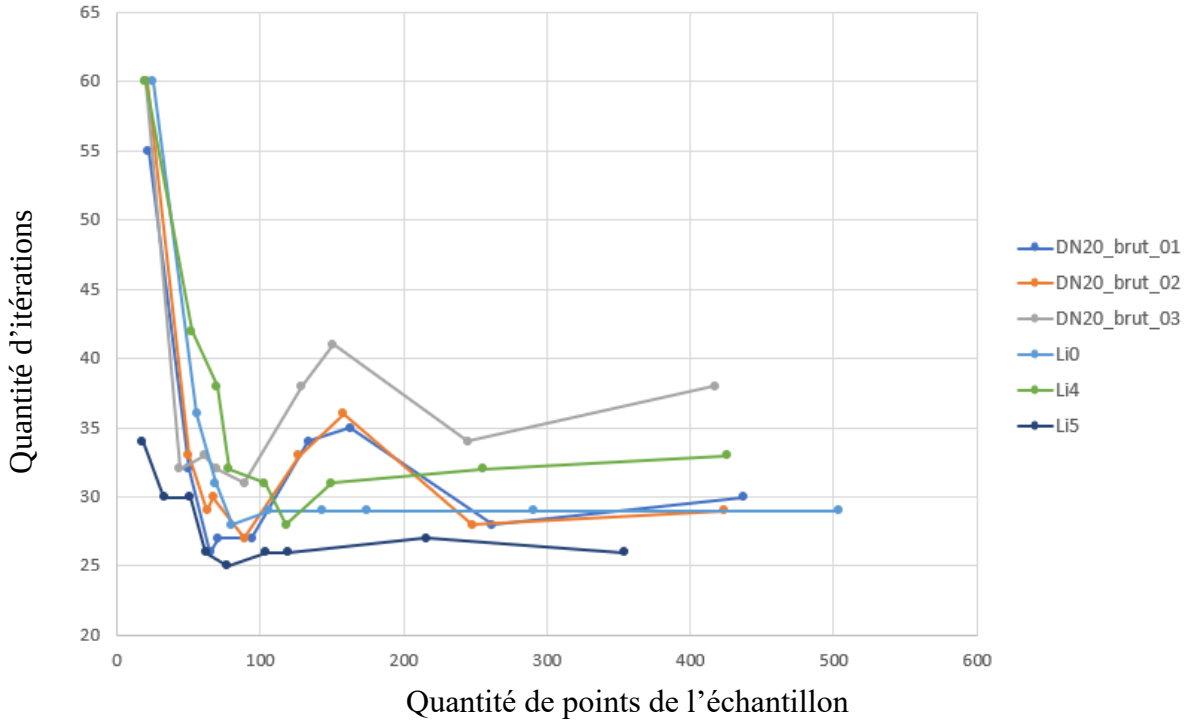



*Figure IV-22 – Nombre d'itérations en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition uniforme.*

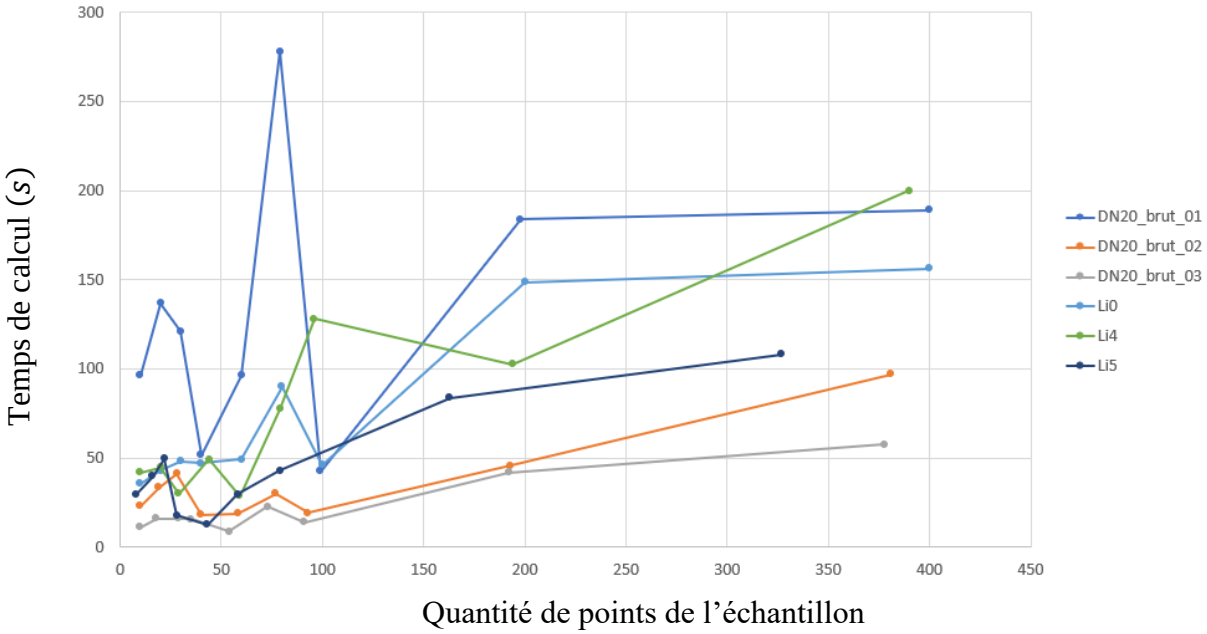



*Figure IV-23 - Temps de calcul en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition aléatoire.*

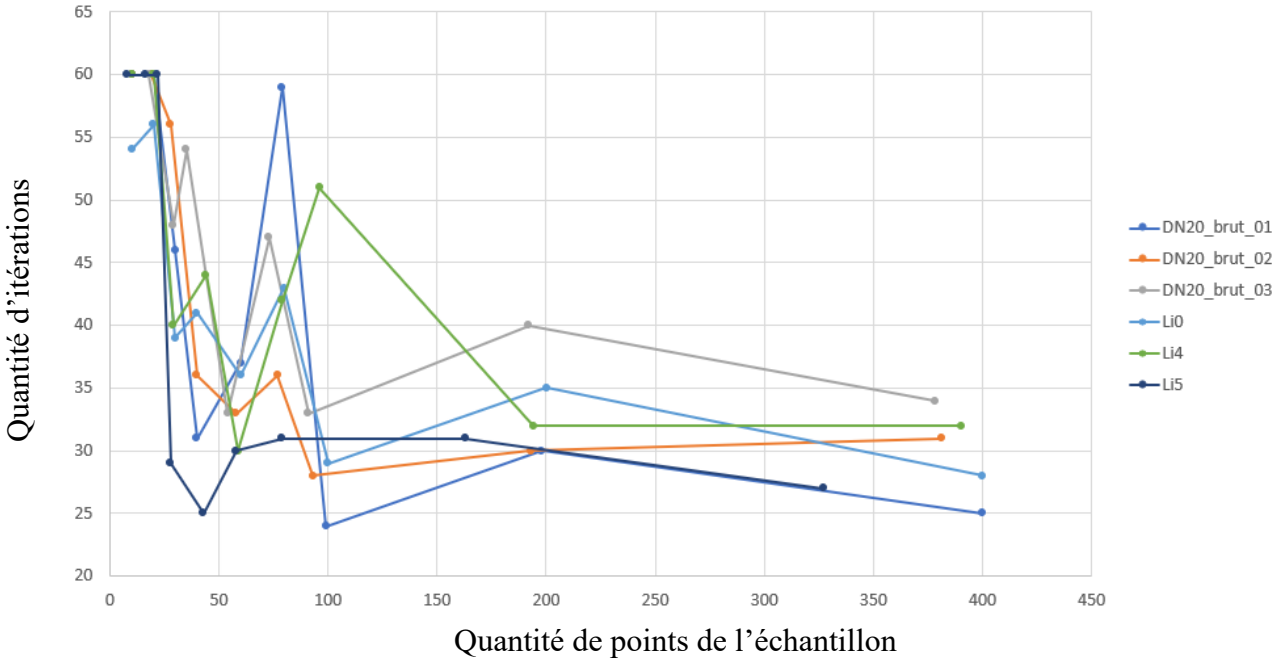



*Figure IV-24 - Nombre d'itérations en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition aléatoire.*

## IV.5.4. Discussion

Les calculs réalisés comprennent 54 tests avec la méthode aléatoire et 54 tests avec la méthode uniforme. Très peu de calculs n'ont pas pu atteindre l'écart-type souhaité avant que le nombre d'itérations maximal soit atteint : seulement 4 calculs pour la méthode uniforme et 11 calculs pour la méthode aléatoire. Les valeurs $N$ en défaut sont $[21, 20, 25, 20]$ pour la méthode uniforme et $[10, 20, 10, 19, 10, 18, 10, 20, 8, 16, 22]$ pour la méthode aléatoire. Tous les calculs avec $N$ plus grand que 30 ont convergé.

Concernant la méthode de choix avec répartition uniforme, la Figure IV-22 représente le nombre d'itérations en fonction de la taille de l'échantillon. On peut y observer une décroissance des courbes pour $N$ inférieur à 100. Au-delà de cette valeur et jusqu'aux valeurs maximales (autour de 400), les courbes sont relativement stables. Le nombre d'itérations maximal est alors compris entre 25 et 41. La Figure IV-21 représente le temps de calcul en fonction de la taille de l'échantillon. On peut y observer une certaine stabilité pour des valeurs de $N$ inférieures à 100 puis une augmentation régulière et importante des temps de calcul.

Concernant la méthode aléatoire, la Figure IV-24 montre que l'évolution du nombre d'itérations est différente de celle observée pour la méthode uniforme. Pour des valeurs inférieures à 100, l'évolution des courbes n'est pas monotone. Cependant, au-delà de cette valeur, le nombre d'itérations reste globalement identique à la méthode uniforme. La Figure IV-23, représentant les temps de calcul, montre des durées qui, au-delà de 100 points de contrôle, sont souvent inférieures à celles obtenues par la méthode uniforme. L'utilisation d'une méthode uniforme semble donc induire une plus grande régularité des courbes pour des valeurs de $N$ inférieures à 100, mais n'apporte pas d'intérêt flagrant pour la vitesse de convergence au-delà de cette valeur. Cependant, il est notable que le choix maîtrisé de la répartition des points est moins sujet au risque de non-convergence que le choix aléatoire : 4 non-convergences pour la méthode uniforme, contre 11 pour la méthode aléatoire.

La diminution de la résolution des maillages des mailles $Dn_i$ ne permet pas de mettre en évidence une valeur optimale de $N$ qui dépendrait de ce paramètre, et il en est de même pour la surface des mailles testées. À la lecture de ces résultats, il est donc difficile de considérer qu'une valeur optimale de $N$ puisse être estimée avec un taux de points ou une valeur en points/mm². Une valeur constante initiale semble être une méthode adaptée, valeur pouvant ensuite être augmentée en cas de non-convergence. Comme tous les calculs convergent au-delà de 30 points de contrôle et que le temps de calcul augmente inutilement au-delà de 100 points, une valeur minimale sécuritaire de 100 points peut donc être retenue pour toutes les mailles testées.

Chapitre V.

# APPLICATIONS DES METHODES - Cas réels

## V.1. INTRODUCTION

### V.1.1. Objectifs

Dans le chapitre précédent, les tests de validation des méthodes de registration GC-ICP et WGC-ICP ont été réalisés à partir de modèles CAO représentant des géométries observées de mailles réelles ayant vieilli en mer. Les résultats de ces calculs ont montré que les méthodes proposées permettent d'atteindre des alignements très précis, avec des écarts-types de distances réduits à quelques micromètres. Bien que ces méthodes n'aient pas pu être testées sur des pièces étalons (avec géométries contrôlées), il est supposé qu'elles conservent leur efficacité pour des scans de pièces réelles (voir commentaires à ce sujet au paragraphe IV.3.3).

Dans ce chapitre, les méthodes de registration développées seront appliquées sur des scans de mailles de chaînes réelles ayant séjourné pendant plusieurs années en mer. L'objectif n'est pas de valider les méthodes proposées, mais d'observer certaines variabilités concernant les hypothèses de travail et d'illustrer les méthodes de calcul par des applications concrètes. Parmi ces applications, un calcul d'identification de pertes de matière sera effectué, ce qui correspond à la résolution de la problématique générale de l'étude (voir I.4.3).

## V.1.2. Provenance des modèles 3D utilisés

Afin d'aborder les perspectives scientifiques développées au paragraphe I.4.1, plusieurs acteurs associés au milieu maritime se sont coordonnés en 2018 pour engager une étude concernant le vieillissement des chaînes d'ancrage. Dans ce cadre, l'ENSTA Bretagne, le CEREMA, la Marine nationale française et les Phares & Balises ont proposé une mise en commun de leurs moyens et de leurs compétences pour réaliser un suivi périodique de chaînes immergées sur 4 sites localisés en Bretagne. Après numérisation par la méthode définie au paragraphe I.3.2, des chaînes neuves ont donc été mises à l'eau à partir de 2019. Par la suite, et jusqu'en 2023, ces chaînes ont été relevées tous les ans environ pour être de nouveau numérisées. Un total de 6 chaînes a été installé. Leurs localisations et certains détails sont synthétisés dans la Table 23 ci-dessous. Deux photographies de mailles prises avant immersion sont fournies en Figure V-1 (a) et (b). Les bouées associées aux chaînes sont visibles en Figure V-2.

*Table 23 – Détails associés aux chaînes immergées en 2019. Les chaînes C1 et C2 n'ont pas pu être étudiées, car elles ont été accidentellement détruites dès la première année d'immersion.*

| Nom | Lieu | Point GPS (DMS) | Gestionnaire | Calibre & Matériau | Longueur (m) | Nb scans |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C1 | Ile-longue (29) | 48° 18' 16.00" N 4° 28' 59.88" W | Marine nationale | 14-6-3.6 HR | 13.5 | 12 |
| C2 | Ile-longue (29) | 48° 18' 12.09" N 4° 29' 50.56" W | Marine nationale | 14-6-3.6 Q3 | 13.5 | 12 |
| C3 | Landévénec (29) | 48° 17' 19.97" N 4° 16' 35.00" W | Marine nationale | 14-6-3.6 HR | 13.5 | 12 |
| C4 | Landévénec (29) | 48° 17' 19.72" N 4° 16' 45.82" W | Marine nationale | 14-6-3.6 Q3 | 13.5 | 12 |
| C5 | Saint-Quay-Portrieux (22) | 48° 39' 49.72" N 2° 49' 59.61" W | Phares & balises | 20-7-3.6 Q3 | 29.7 | 12 |
| C6 | Lézardrieux (22) | 48° 47' 30.72" N 3° 05' 51.71" W | Phares & balises | 20-7-3.6 Q3 | 20.6 | 16 |



(a) (b)

*Figure V-1 – Chaînes avant immersion : (a) chaîne brute, sans étai, de type 20-7-3.6, et utilisée par les Phares & balises, (b) chaîne coaltarée, avec étais, de type 14-6-3.6, et utilisée par la Marine nationale.*



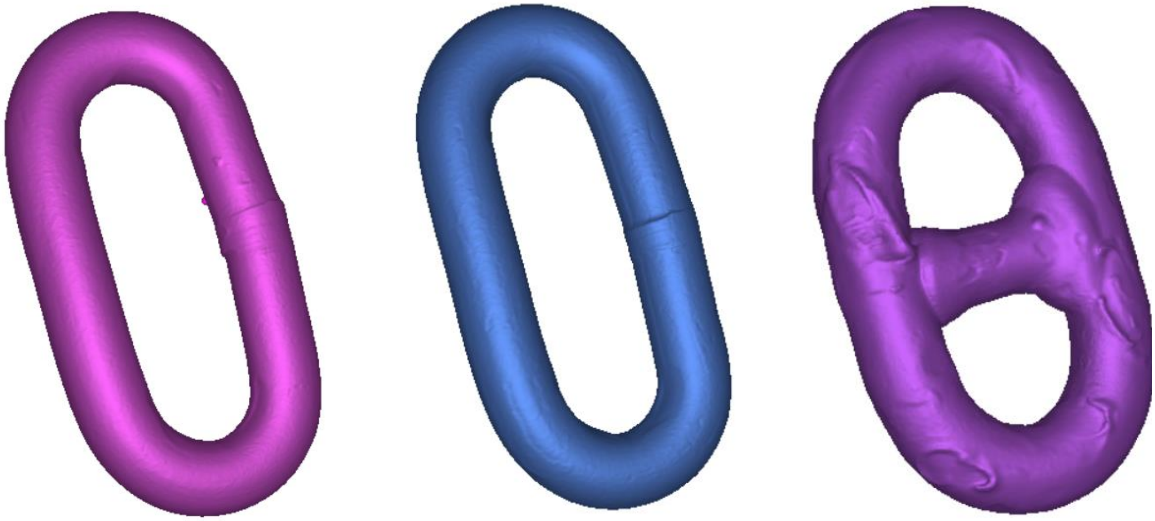
(a) (b) (c)

*Figure V-2 - Bouées associées aux chaînes étudiées : (a) Saint Quay-Portrieux, (b) Lézardrieux, et (c) Landévennec.*

L'objectif défini dans ce chapitre est de réaliser des exemples de calcul sur un nombre limité de scans de mailles réelles, et non pas de réaliser l'étude complète de l'ensemble des chaînes ci-dessus citées. Les scans de mailles qui seront utilisés pour appliquer les méthodes de registration proviennent donc uniquement des chaînes C3, C5 et C6. Pour chacune de ces chaînes, parmi l'ensemble des mailles scannées, la maille sélectionnée pour les calculs est celle qui est située au plus près de la bouée. La Table 24 propose une dénomination pour les scans, ainsi que les durées d'immersion associées. Les numérisations des mailles neuves Stquai_1, Lezard_1 et Lande_1 sont visibles en Figure V-3. La Table 25 recense les caractéristiques des modèles 3D associés à chacun des scans relevés.

*Table 24 – Dénomination des mailles et durées d'immersion.*

| Dénomination | Chaîne | Type | État | Durée immersion (mois) |
|---|---|---|---|---|
| Stquai_1 | C5 | 20-7-3.6 | Neuf | 0 |
| Stquai_2 | C5 | 20-7-3.6 | Usé | 10 |
| Stquai_3 | C5 | 20-7-3.6 | Usé | 28 |
| Lezard_1 | C6 | 20-7-3.6 | Neuf | 0 |
| Lezard_2 | C6 | 20-7-3.6 | Usé | 10 |
| Lezard_3 | C6 | 20-7-3.6 | Usé | 28 |
| Lande_1 | C3 | 14-6-3.6 | Neuf | 0 |
| Lande_2 | C3 | 14-6-3.6 | Usé | 28 |



(a) (b) (c)

*Figure V-3 – Numérisation des mailles situées en cul de bouée, à l'état neuf : (a) maille Stquai_1, (b) maille Lezard_1 et (c) maille Lande_1.*

*Table 25 - Caractéristiques des scans utilisés pour l'application de la méthode WGC-ICP sur des mailles réelles : résolution $b_s$, nombre de sommets du maillage $n_p$ et taille des fichiers associés.*

| Mailles | $b_s$ (mm) | $n_p$ | Taille sur le disque (Mo) |
|---|---|---|---|
| Stquai_1 | 0.21 | 563 165 | 55 |
| Stquai_2 | 0.21 | 565 532 | 55.2 |
| Stquai_3 | 0.21 | 552 610 | 55 |
| Lezard_1 | 0.21 | 565 067 | 55.2 |
| Lezard_2 | 0.21 | 569 017 | 55.6 |
| Lezard_3 | 0.21 | 566 956 | 55.4 |
| Lande_1 | 0.21 | 283 146 | 27.7 |
| Lande_2 | 0.21 | 280 690 | 27.4 |

# V.2. REGISTRATION DES MAILLES

## V.2.1. Description des tests réalisés

La méthode de registration WGC-ICP est ici testée sur plusieurs paires de mailles. Il s'agit de registrer les scans Stquai_2 et Stquai_3 sur Stquai_1, Lezard_2 et Lezard_3 sur Lezard_1, puis Lande_2 sur Lande_1. Tous les modèles 3D sont initialement réécrits dans le repère défini en Annexe A, ce qui permet de réaliser le premier alignement approximatif (voir II.3), prérequis à la bonne convergence des alignements fins de type ICP (voir II.4). Cette première étape est effectuée par la méthode ACP (voir II.3.3) suivie d'un contrôle visuel afin de s'assurer de la bonne orientation de l'axe $x$, qui pointe vers le fond de la mer, et de l'axe $y$ qui pointe vers la soudure.

Le paramétrage de la méthode WGC-ICP pour réaliser les alignements fins est identique à celui proposé au paragraphe IV.4.2 excepté les modifications suivantes :

- La taille $N$ de l'échantillon est fixé à 200 points de contrôle.
- L'écart-type à atteindre est fixé à 0.03 mm, valeur nécessairement plus grande que celle utilisée pour les tests sur les modèles CAO dont les surfaces sont parfaites.

- Le nombre d'itérations maximal est fixé à 95.
- Un critère d'arrêt supplémentaire est ajouté afin d'éviter que le processus itératif se poursuive sans amélioration de la qualité de l'alignement obtenu. Le calcul est donc interrompu si la variation de l'écart-type devient inférieure à 0.1 $\mu m$
- Une phase d'approche rapide par un calcul de distance point-point est réalisée sur les 20 premières itérations. Ensuite, les distances sont calculées par la méthode avec lissages.
- La configuration matérielle utilisée est la numéro 2.

## V.2.2. Résultats des calculs

À la fin de chaque processus de registration, le temps de calcul et le nombre d'itérations sont relevés. Un ensemble de calculs statistiques est ensuite réalisé sur les distances obtenues à partir de la totalité des nœuds des maillages des scans, puis à partir des nœuds filtrés par la méthode proposée au paragraphe IV.4.1. Les résultats numériques finaux sont synthétisés dans la Table 26.

Pour rappel, le filtre supprime les nœuds qui sont associés à une distance supérieure à une distance de coupure, afin de ne conserver que ceux qui sont situés sur des zones concernées par de la corrosion généralisée. Ce filtre dédié à la méthode WGC-ICP sera amélioré dans le paragraphe suivant pour identifier plus précisément les surfaces usées.

*Table 26 – Résultats statistiques des tests réalisés par la méthode WGC-ICP sur des mailles réelles. Les lignes grises correspondent aux valeurs filtrées.*

| Maille fixe | Maille déplacée | Moyenne (mm) | Écart-type (mm) | Distance maximale (mm) | Distance minimale (mm) | Quantité itérations | Temps de calcul (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stquai_1 | Stquai_2 | 0.166 | 0.185 | 0.921 | -1.140 | 26 | 60.1 |
| Stquai_1 | Stquai_2 | 0.161 | 0.179 | 0.659 | | | |
| Stquai_1 | Stquai_3 | 0.511 | 0.279 | 1.789 | -0.153 | 25 | 52.8 |
| Stquai_1 | Stquai_3 | 0.477 | 0.225 | 1.174 | | | |
| Lezard_1 | Lezard_2 | 0.087 | 0.176 | 0.915 | -1.070 | 23 | 41.6 |
| Lezard_1 | Lezard_2 | 0.051 | 0.130 | 0.377 | | | |
| Lezard_1 | Lezard_3 | 0.400 | 0.361 | 2.215 | -0.174 | 26 | 59.6 |
| Lezard_1 | Lezard_3 | 0.304 | 0.199 | 0.964 | | | |
| Lande_1 | Lande_2 | 0.565 | 0.526 | 2.200 | -0.995 | 21 | 14.3 |
| Lande_1 | Lande_2 | 0.559 | 0.518 | 1.972 | | | |

Les coupes XY des superpositions après registration sont visibles dans la Figure V-4, la Figure V-6 et la Figure V-8, respectivement pour les mailles Lande_i, Stquai_i et Lezard_i. Les coupes XZ ($x > 0$) des superpositions des cintres extraits des scans registrés sont visibles dans la Figure V-5, la Figure V-7 et la Figure V-9, respectivement pour Stquai_i, Lezard_i et Lande_i. Les histogrammes de la totalité des distances calculées et des distances filtrées sont visibles dans la Figure V-10, la Figure V-11 et la Figure V-12, respectivement pour les mailles Lande_2, Stquai_3 et Lezard_3.

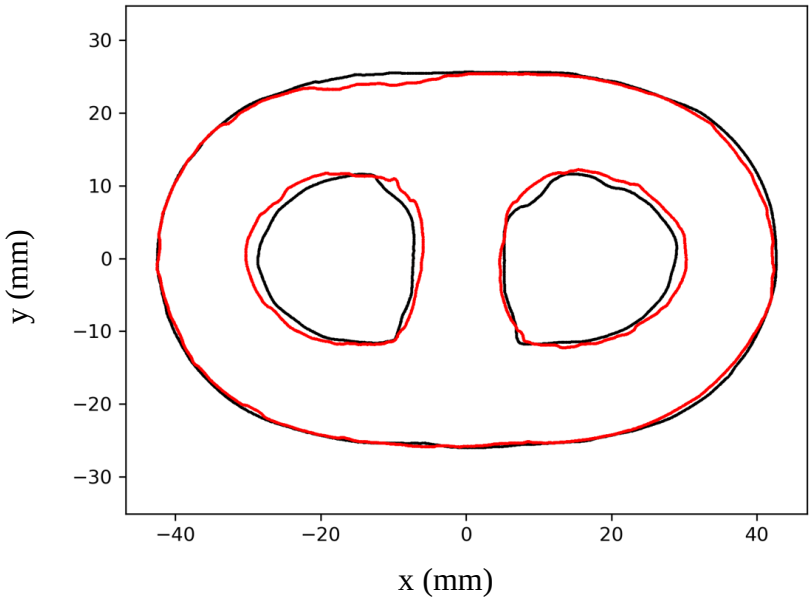



*Figure V-4 – Coupe XY des mailles Lande1 (en noir) et lande2 (en rouge).*

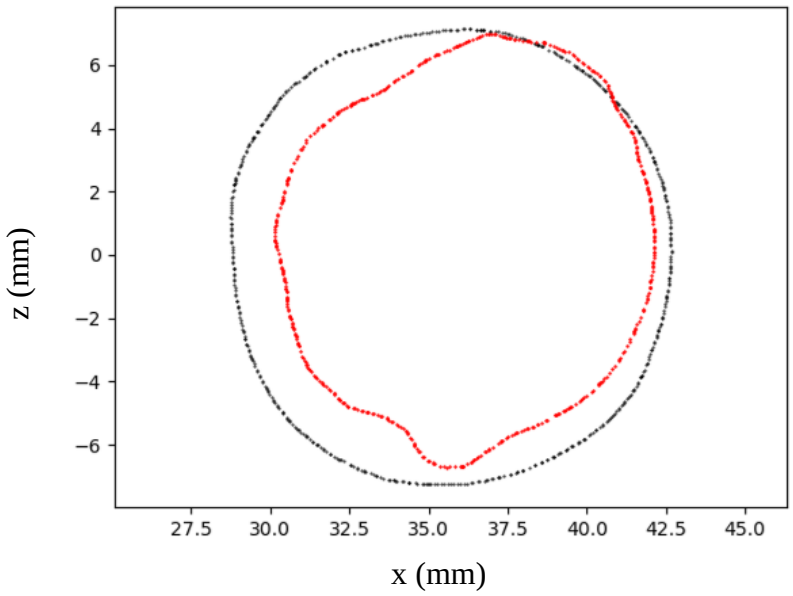



*Figure V-5 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Lande1 (en noir) et Lande2 (en rouge).*

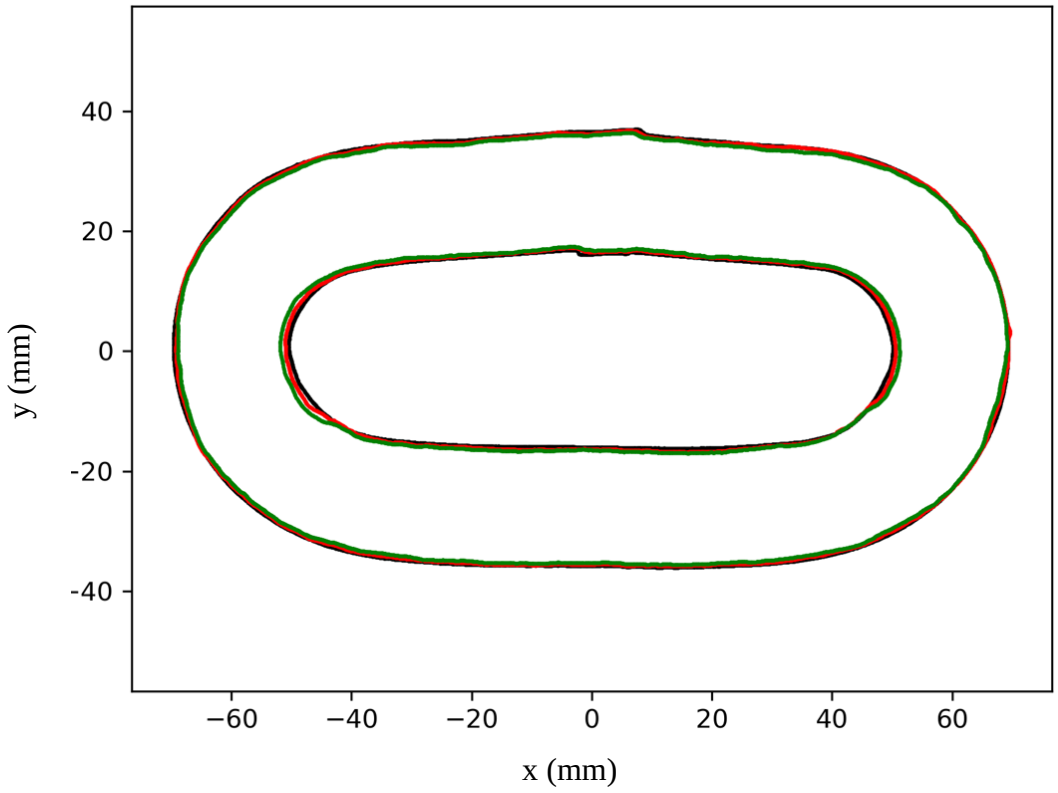



*Figure V-6 - Coupe XY des mailles Stquai1 (en noir), Stquai2 (en rouge) et Stquai3 (en vert).*

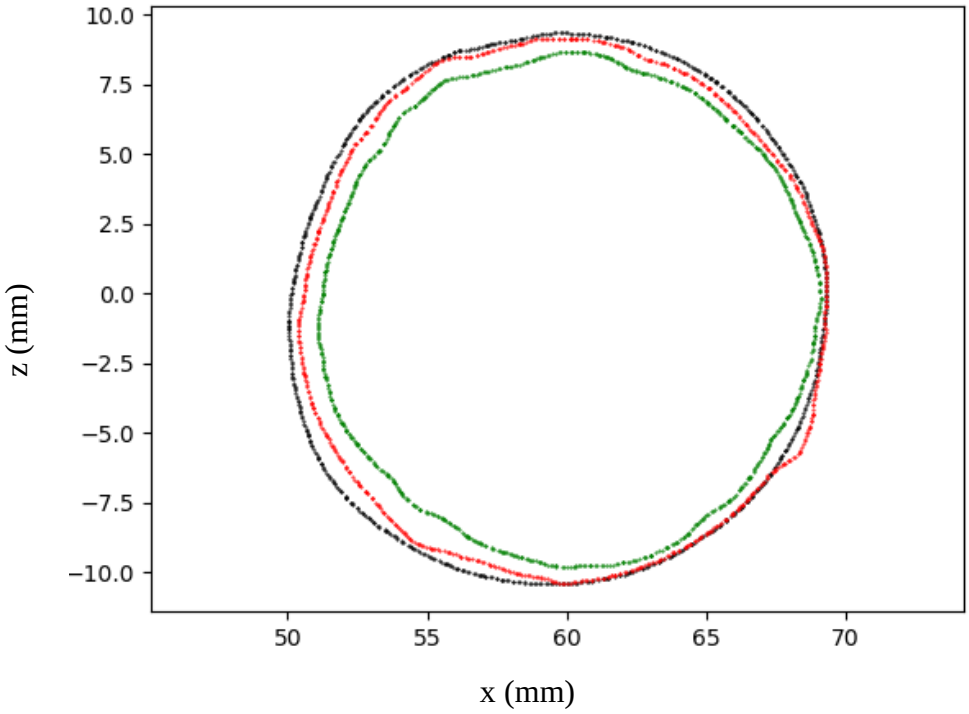



*Figure V-7 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Stquai1 (en noir), Stquai2 (en rouge) et Stquai3 (en vert).*

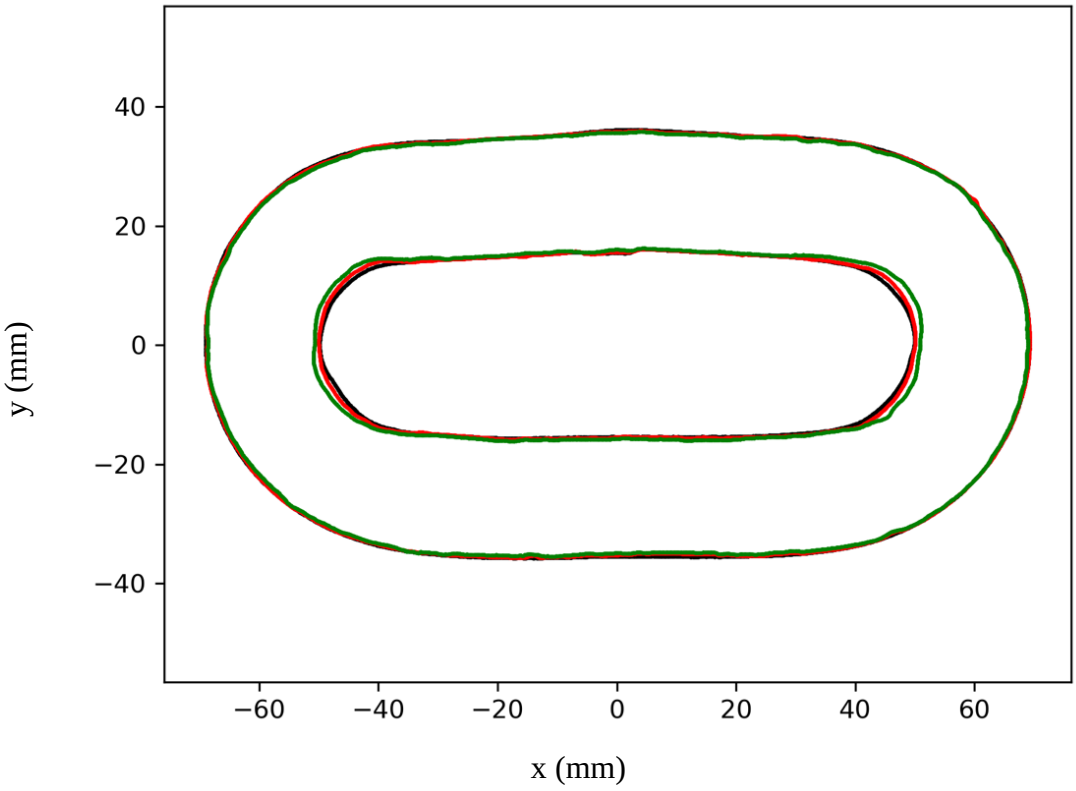



*Figure V-8 - Coupe XY des mailles Lezard1 (en noir), Lezard2 (en rouge) et Lezard3 (en vert).*

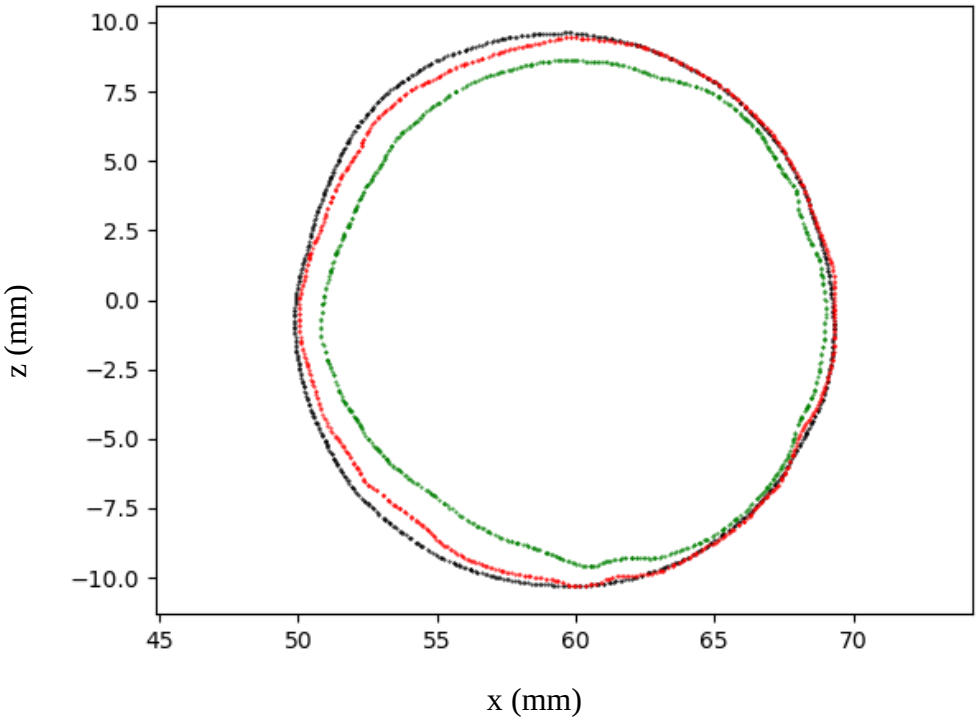
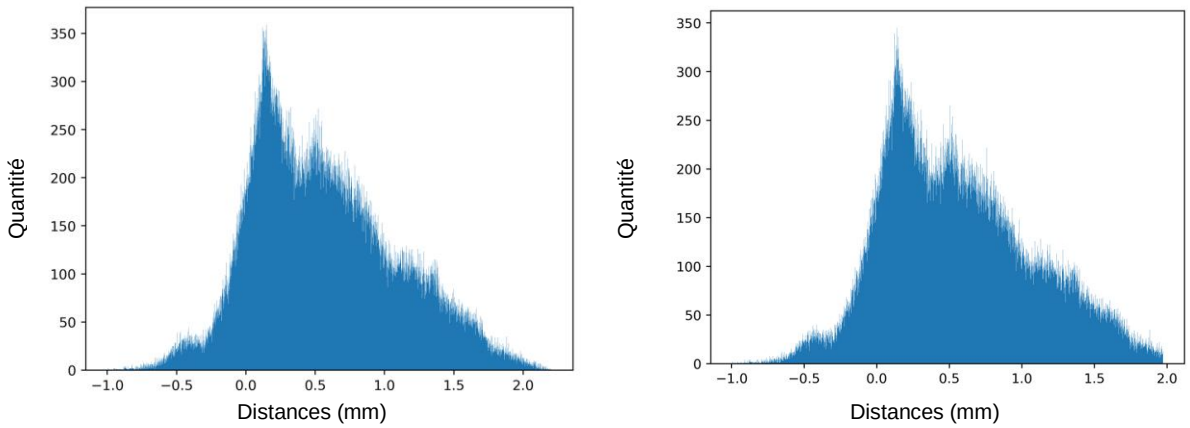
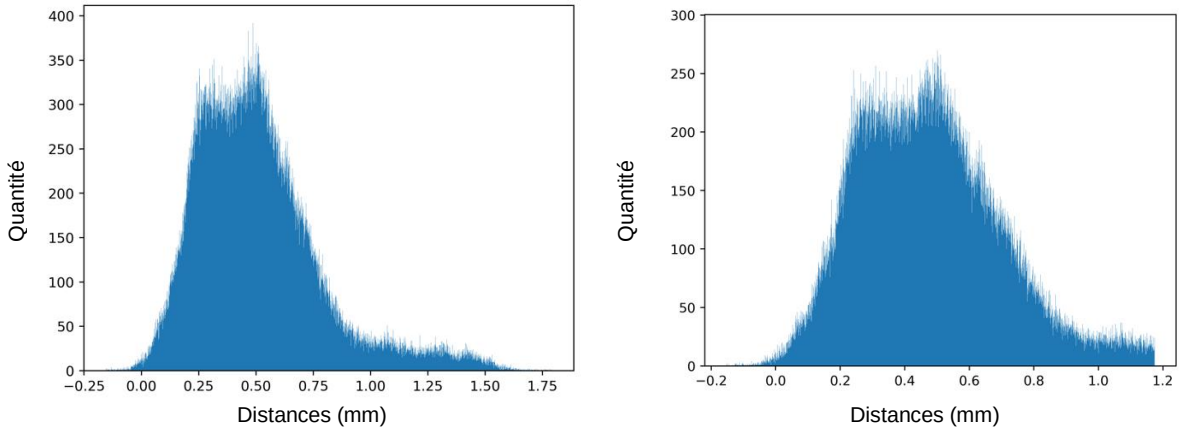



*Figure V-9 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Lezard1 (en noir), Lezard2 (en rouge) et Lezard3 (en vert).*



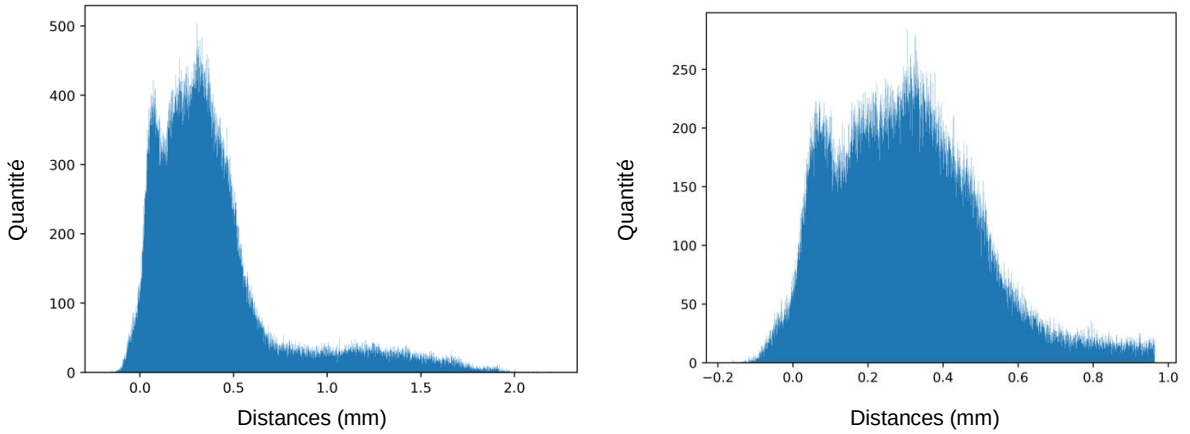

(a) (b)

*Figure V-10 - Histogramme des distances calculées entre Lande_2 et Lande_1 : (a) sans filtre et (b) avec filtre.*




(a) (b)

*Figure V-11 - Histogramme des distances calculées entre Stquai_3 et Stquai_1 : (a) sans filtre et (b) avec filtre.*




(a) (b)

*Figure V-12 - Histogramme des distances calculées entre Lezard_3 et Lezard_1 : (a) sans filtre, et (b) avec filtre.*

## V.2.3. Discussion des résultats

- Observations générales

De manière générale, il est possible de constater que les calculs réalisés convergent rapidement, avec une quantité d'itérations bien inférieure à celle obtenue lors des registrations des chapitres précédents. Cette réduction du temps de calcul est due à la diminution de la taille de l'échantillon de points de contrôles (voir paragraphe IV.5), mais aussi à l'ajout du critère d'arrêt supplémentaire qui interrompt les calculs si la variation de l'alignement devient trop faible entre deux itérations.

- Cas des mailles situées à Landévennec

La maille Lande_1 est une maille neuve avec étai qui est protégée contre la corrosion par du coaltar (voir Figure V-1 (b)). Le coaltar est un enduit bitumeux, grumeleux dont l'épaisseur initiale varie de manière importante (plusieurs millimètres). Les évolutions de ces épaisseurs sont facilement observables sur la surface scannée de cette maille qui est présentée en Figure V-3 (c). De plus, il a été observé lors des relevés successifs des chaînes que cet enduit ne se désagrège pas de manière uniforme en fonction du temps : il se décolle progressivement par plaques, par écailles. De ce fait, il est difficile de faire l'hypothèse que la maille perd de la matière de manière majoritairement uniforme, en fonction du temps d'immersion. La méthode WGC-ICP ne semble donc pas être adaptée à l'alignement de ce type de mailles, ce qui est constaté dans les résultats numériques obtenus : l'écart-type obtenu après registration ($\approx 0.5\ mm$) est relativement grand par rapport aux autres mailles, et les histogrammes associés ne montrent pas de distances correspondant à des points usés, malgré leurs observations concrètes sur les mailles réelles.

Les résultats obtenus pour les mailles de Landévennec sont donc à prendre avec la plus grande prudence, même si l'observation de la superposition des sections semble être relativement correcte. La forme spécifique de l'histogramme et la valeur de l'écart-type sont des critères qui pourraient être retenus pour identifier, de manière systématique, les erreurs de convergence difficilement observables à l'œil nu sur les images registrées.

- Cas des mailles situées à Saint-Quay-Portrieux et à Lézardrieux

Concernant les mailles Stquai_i et Lezard_i, les écarts-types avec filtrage sont tous situés autour de 0.2 mm. Cet ordre de grandeur est très supérieur à l'écart-type (3 $\mu m$) systématiquement atteint avec les mailles CAO, mais cela correspond nécessairement à une dispersion réelle plus importante des épaisseurs de corrosion sur la surface de la maille : l'hypothèse de corrosion généralisée reste valide, mais l'épaisseur de corrosion n'est pas strictement constante sur toute la surface. Malgré cette majoration de l'écart-type obtenu, l'alignement semble tout de même satisfaisant. Les sections totales XY et celles XZ des cintres sont particulièrement explicites à ce sujet.

Les histogrammes associés à ces calculs possèdent des formes classiques : il est possible d'observer de très nombreuses distances autour de la moyenne, puis des quantités inférieures de distances élevées correspondant aux pertes de matière localisées. Il est par ailleurs manifeste que la distance de coupure utilisée ne filtre pas entièrement les points associés aux pertes de matière localisées. Ce filtre est néanmoins suffisant pour assurer la bonne convergence de la méthode WGC-ICP.

# V.3. EXEMPLES D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS

## V.3.1. Identification rigoureuse d'un repère local

Le repère local, tel que défini en Annexe A, permet d'envisager des études précises concernant, par exemple, l'identification des géométries paramétriques des mailles neuves ou usées. La méthode WGC-ICP peut être utilisée pour permettre la détermination rigoureuse de ce repère local. Il est proposé, ci-dessous, un algorithme comprenant 6 étapes et permettant d'atteindre cet objectif :

**1** – Alignement par la méthode ACP (voir II.3.3)

**2** – Suppression de tous les points appartenant aux soudures (suppression des surépaisseurs des bourrelets).

**3** – Détermination des dimensions théoriques de la maille obtenue (longueur, largeur, calibre) par lecture des coordonnées extrémales du nuage de points.

**4** – Construction automatique d'un modèle 3D de maille parfaite, de même dimension, et possèdant un repère local correctement positionné.

**5** – Registration par la méthode WGC-ICP du modèle 3D de maille réelle (sans soudures) sur le modèle 3D de maille parfaite. Identification de la transformation rigide associée.

**6** – Application de cette transformation sur le modèle 3D complet initial (après repositionnement par ACP).

La Figure V-13 permet d'illustrer ce qu'il est possible de réaliser une fois le repère local précisément défini : découpe des mailles suivant diverses sections paramétrées, et étude des formes obtenues afin de déduire des modèles analytiques de géométries de mailles usées.

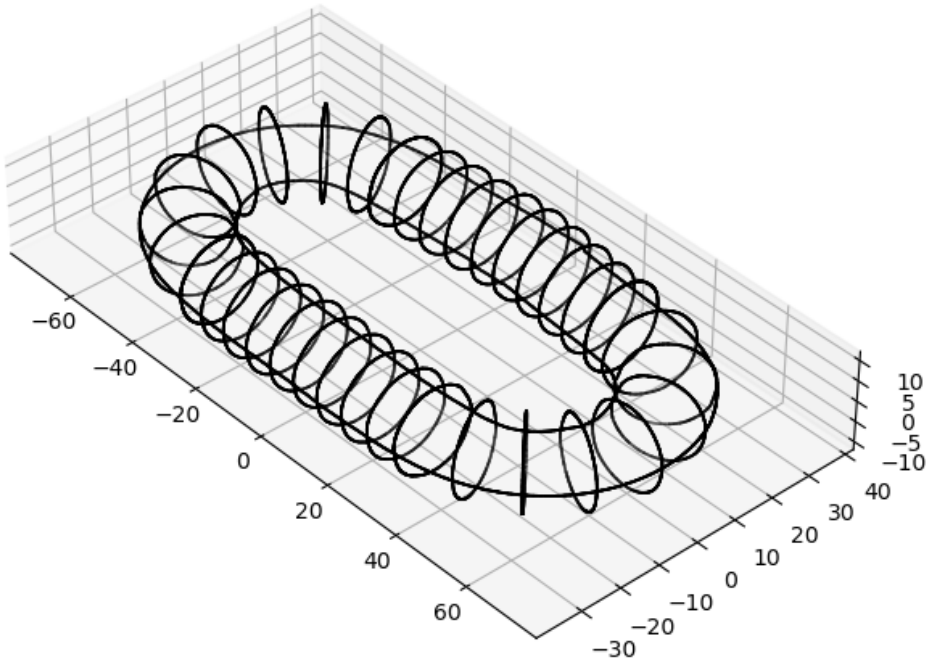



*Figure V-13 – Sections de la maille Stquai_1 après réécriture des coordonnées du maillage dans le repère général défini en Annexe A.*

## V.3.2. Observation des pertes de matière

Une fois les mailles usées, alignées sur les mailles neuves, il est possible de calculer toutes les distances entre les mailles par la méthode avec lissage telle que précédemment définie. Si le calcul est possible (voir III.3.2), à chaque nœud appartenant aux mailles usées est alors associée une distance calculée. Une couleur proportionnelle aux distances peut ainsi être affectée à chaque nœud, et une visualisation 3D colorée des pertes de matière peut ainsi être proposée. Si les histogrammes des distances permettent d'obtenir des informations générales sur les pertes de matières, ces tracés colorés permettent une observation facilitée de leur répartition spatiale.

Lors de la construction de ces modèles colorés, les points à partir desquels le calcul de distance avec lissage n'est pas possible sont traités numériquement de manière spécifique : pour chacun de ces points, une moyenne de couleur est réalisée sur les 10 points les plus proches. Dans le cas où la totalité des 10 points les plus proches ne permettent pas un calcul avec lissage, la couleur noire est alors renvoyée. La Figure V-18 illustre cette opération de lissage des couleurs.

Concernant les essais réels de vieillissement de chaînes, tels que définis au paragraphe V.1.2, chaque modèle 3D coloré des mailles Stquai2, Stquai3, Lezard2 et Lezard3 est présenté respectivement dans la Figure V-14, la Figure V-15, la Figure V-16 et la Figure V-17.

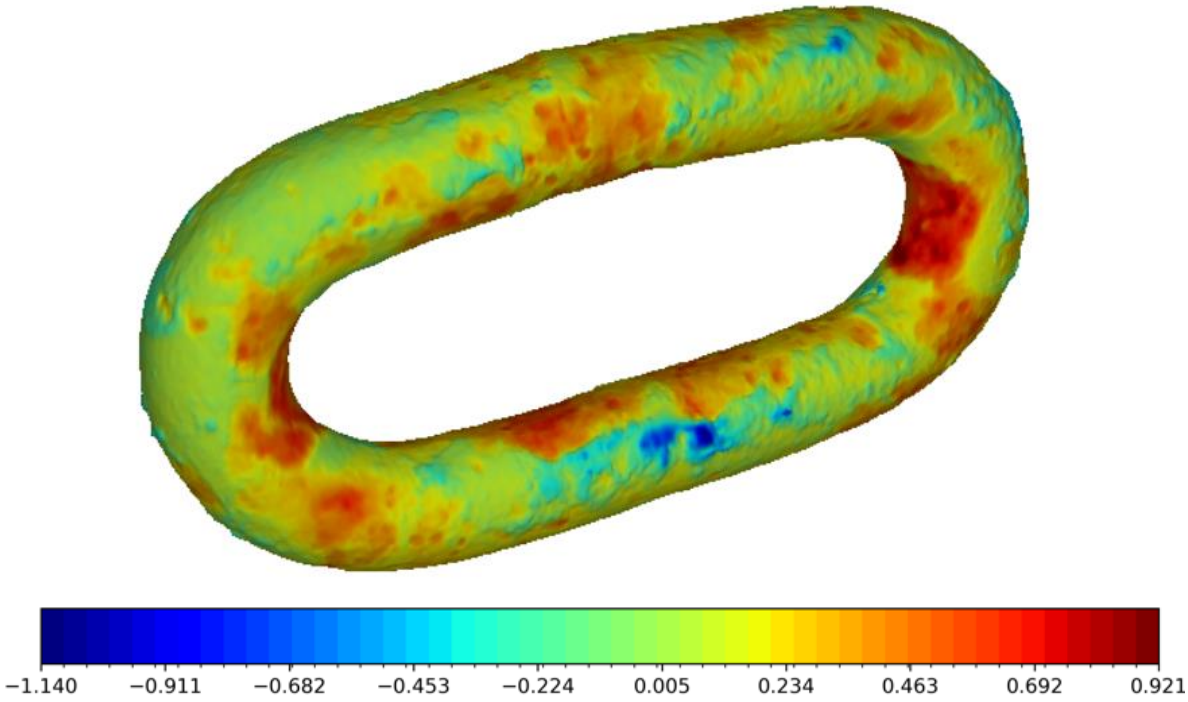



*Figure V-14 - Colorisation des distances pour la maille Stquai_2.*

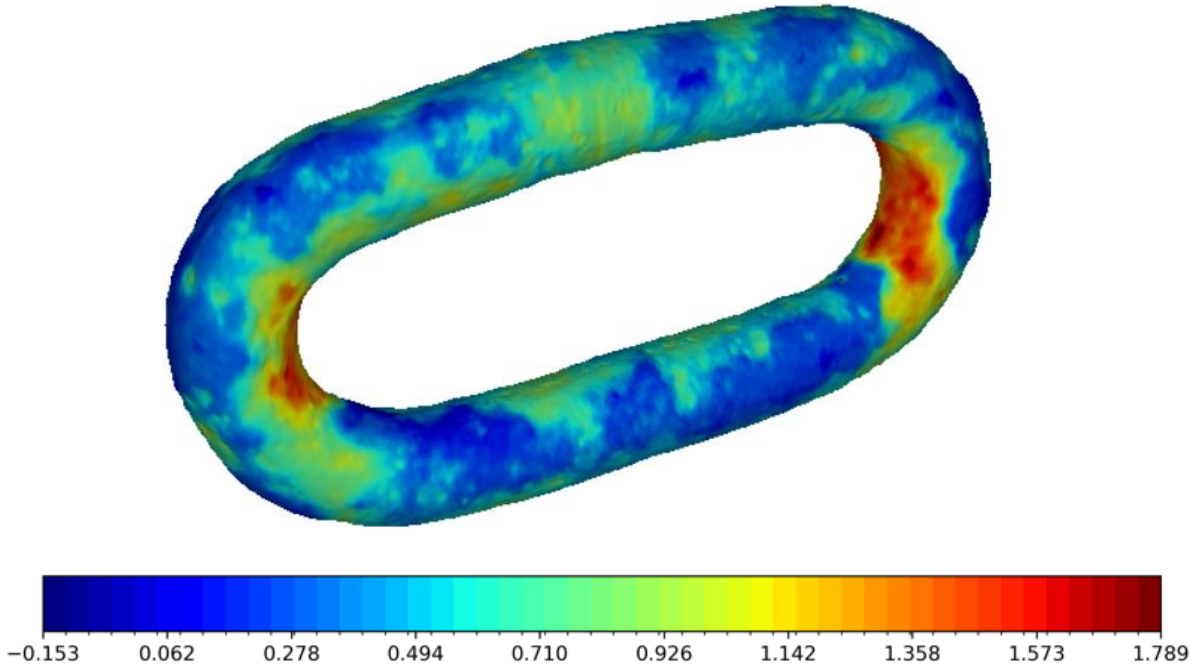



*Figure V-15 - Colorisation des distances pour la maille Stquai_3.*

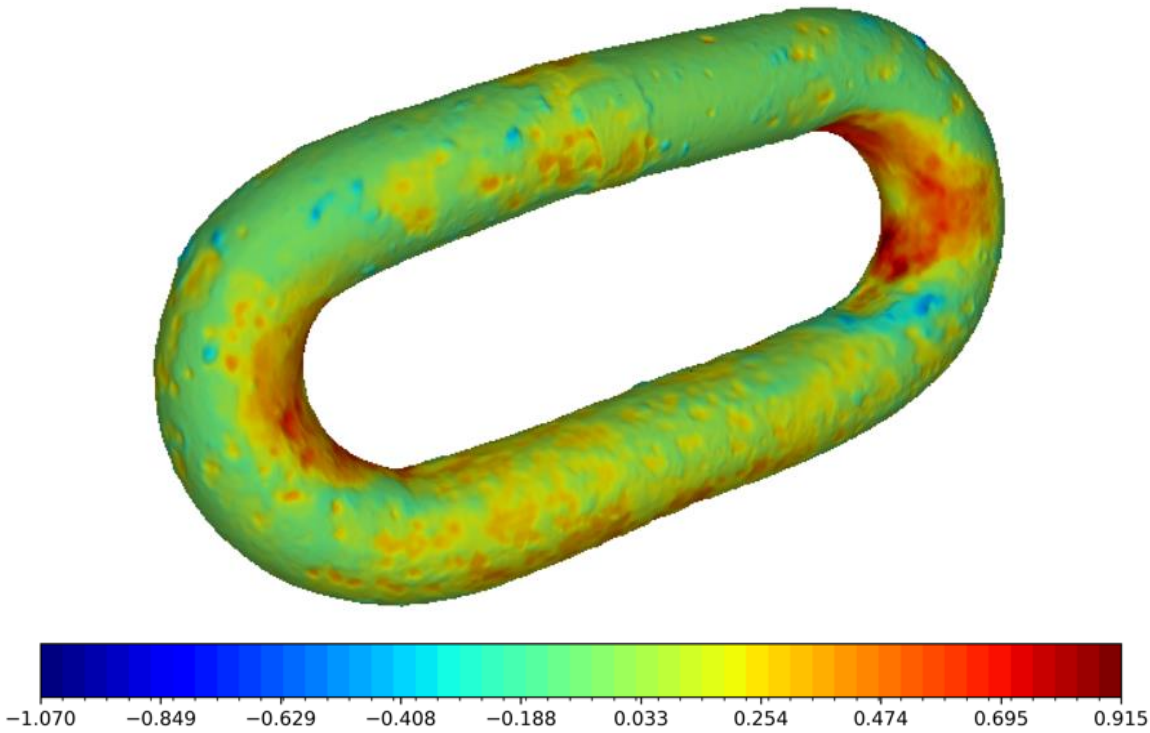



*Figure V-16 - Colorisation des distances pour la maille Lezard_2.*

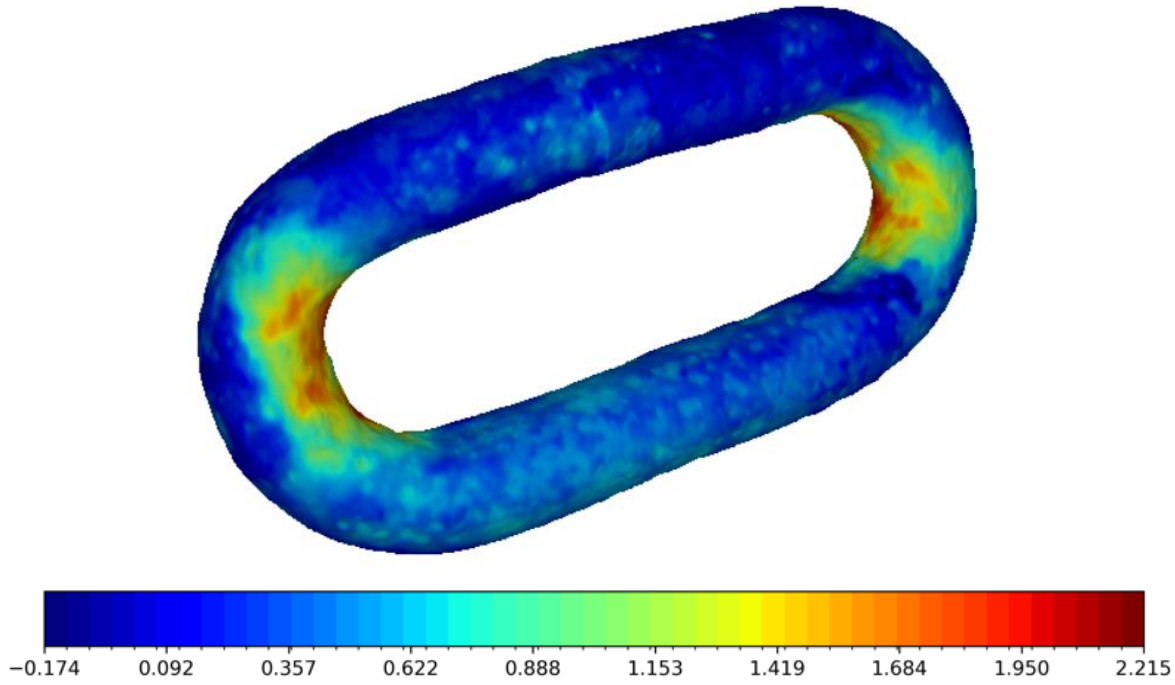
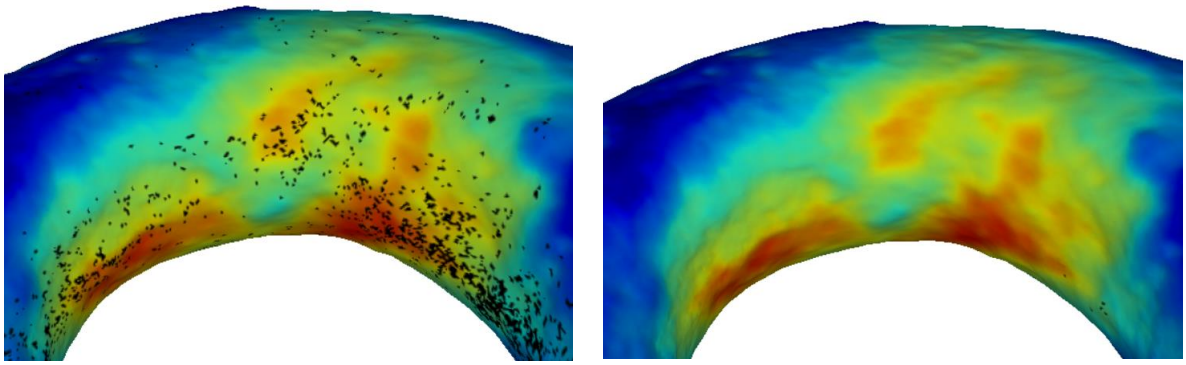



*Figure V-17 - Colorisation des distances pour la maille Lezard_3.*



(a) (b)

*Figure V-18 – Lissage des couleurs : (a) sans lissage, (b) avec lissage. À la suite du lissage sur les 10 points les plus proches, un très faible nombre de nœuds restent encore en défaut.*

### V.3.3. Détermination des zones usées dans le contact intermaille

L'identification des géométries tridimensionnelles des pertes de matière des mailles de chaînes vieillies en mer correspond à un objectif important de ce travail. En particulier, l'identification des pertes de matière dans les zones usées par contact permettra d'envisager de nouvelles études mécaniques spécifiques, dans le but de fiabiliser l'utilisation des chaînes d'ancrage (voir I.3.1). Une fois les mailles correctement registrées, il suffit de filtrer les distances afin de ne conserver que celles qui sont supérieures à une distance de coupure calculée. Les points associés à ces distances sont principalement les points situés sur les zones usées.

Afin d'identifier plus finement les zones usées par contact, le filtre précédemment utilisé a été modifié. Il a en effet été constaté au paragraphe V.2.2 que la distance de coupure définie au chapitre IV.4.1 n'était pas assez précise. Le nouveau filtre est basé sur un algorithme itératif qui supprime, à chaque étape, les points associés aux distances les plus extrémales, puis recalcule la médiane et l'écart absolu médian afin d'identifier la distance de coupure telle que définie par la relation (IV-15). Ce processus est nécessaire, car il a été constaté que malgré la robustesse de la médiane et de l'écart absolu médian, ceux-ci restent tout de même affectés par la présence des valeurs extrémales. Le processus itératif s'arrête quand le nombre d'itérations dépasse une certaine quantité ou quand la variation de la distance de coupure identifiée est inférieure à un seuil donné.

Concernant les tests sur les mailles réelles, le nombre d'itérations maximal a été fixé à 20, la variation minimale de la distance de coupure calculée est égale à 0.01 mm. Le seuil $thr$ associé au calcul de la distance de coupure $d_c$ a été abaissé à 2.5 pour supprimer 1% des valeurs extrémales. Cette valeur choisie est un paramètre influant de la méthode proposée. Elle est donc à choisir judicieusement, après différents tests, afin de correspondre au mieux à la typologie des vieillissements étudiés.

La Figure V-19 et la Figure V-20 représentent respectivement les usures de contact identifiées pour les mailles Stquai_3 et Lezard_3. La Figure V-21 et la Figure V-22 correspondent aux histogrammes respectifs associés à ces mailles avec, pour chaque cas, une représentation de la distance de coupure calculée par la méthode itérative.

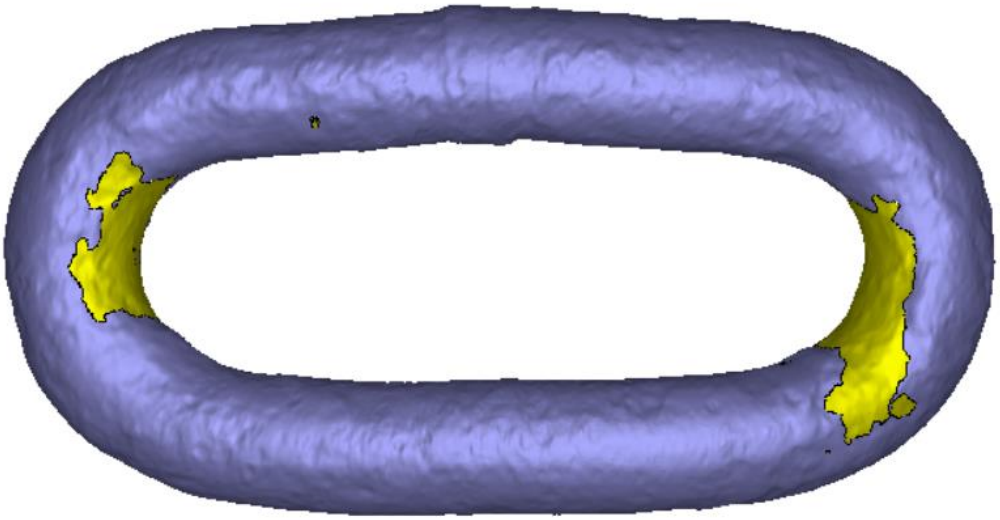


*Figure V-19 - Identification des usures de contact (en jaune) pour la maille Stquai_3. La distance de coupure calculée est égale à 1.05 mm.*

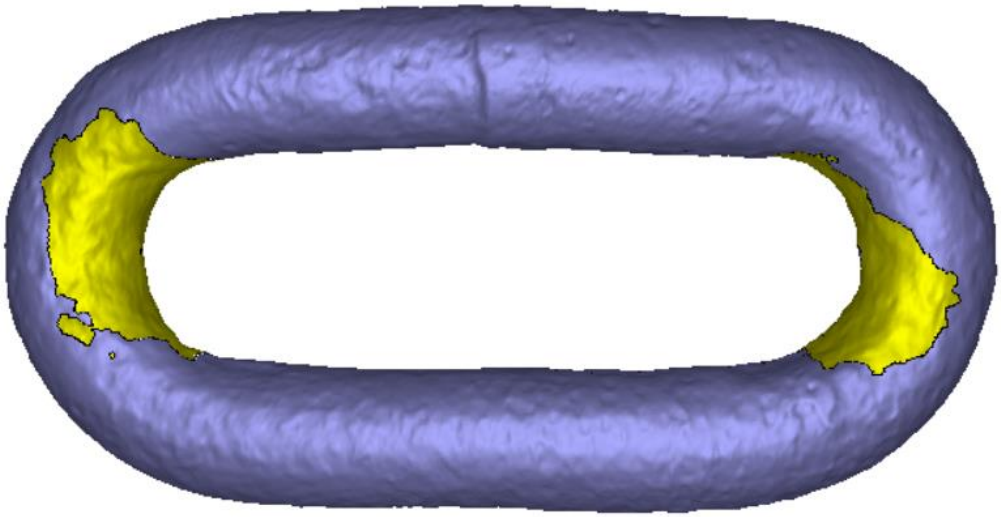


*Figure V-20 - Identification des usures de contact (en jaune) pour la maille Lezard_3. La distance de coupure calculée est égale à 0.86 mm.*

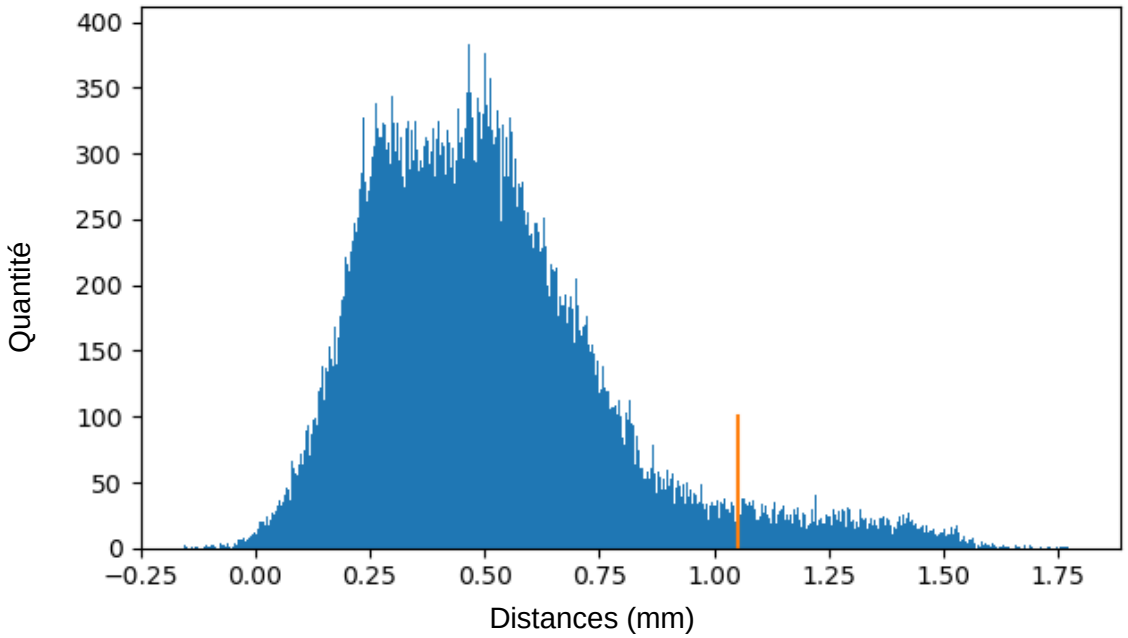



*Figure V-21 - Histogramme des distances pour Stquai_3 et distance de coupure associée en rouge.*

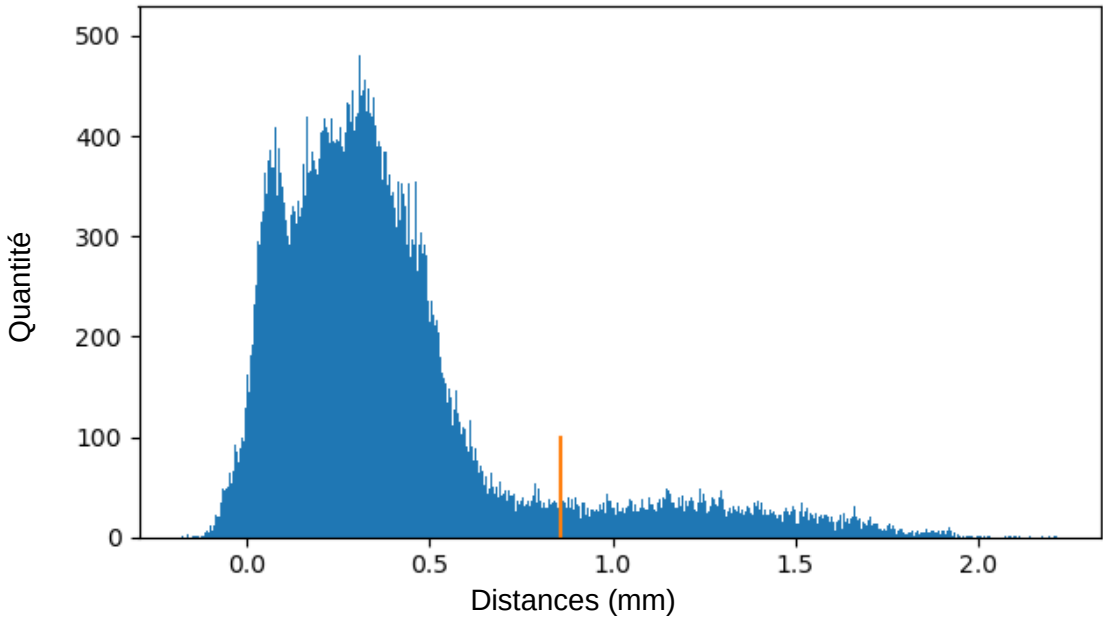



*Figure V-22 - Histogramme des distances pour Lezard_3 et distance de coupure associée en rouge.*

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Afin d'améliorer la fiabilité des ancrages marins, de diminuer les coûts de maintenance et les coûts d'installation, il est nécessaire de renforcer les connaissances actuelles sur le vieillissement des chaînes. En effet, les mailles de chaînes sont soumises à des agressions physico-chimiques qui altèrent de manière importante leur géométrie et donc leurs résistances. Un suivi temporel des pertes de matière peut alors être envisagé pour mieux comprendre leurs cinétiques et leurs origines. Par exemple, ceci est possible en identifiant périodiquement les évolutions des géométries 3D de mailles de chaînes immergées en mer ou altérées artificiellement en laboratoire. L'utilisation de scanners 3D optiques permet la capture de ces géométries qui seront ensuite comparées après superposition. Cependant, cette superposition n'est pas triviale, car l'intégralité des surfaces des mailles est altérée lors du vieillissement, et, car le processus d'acquisition produit des données écrites dans des repères différents. La problématique principale de cette thèse est donc de construire une méthode de calcul permettant d'aligner un scan de maille usée sur un scan de maille neuve, sans référence commune.

La problématique soulevée induit un préalable nécessaire : pour aligner deux scans, il est obligatoire de savoir mesurer des distances entre ces modèles 3D et ceci avec une précision suffisante. En effet, les alignements devant rapprocher au plus près les deux scans, la capacité à mesurer précisément une distance faible devient indispensable. Le premier objectif de ce travail a donc été de proposer une méthode de calcul fiable pour pouvoir réaliser une mesure entre un point et un nuage de point. Il a tout d'abord été constaté qu'une mesure basée sur des distances point-point n'était pas suffisamment précise, surtout dans le cas de distances faibles : l'erreur maximale obtenue peut atteindre la moitié de la résolution des scans. Afin d'améliorer la précision du calcul, il est alors proposé d'approcher localement la surface associée au nuage de points par une courbe de lissage polynomiale. À la suite des différents tests réalisés, il a été possible de conclure que la méthode avec lissages permet d'atteindre une précision de mesure importante : l'erreur de mesure est de l'ordre de quelques micromètres. Une troisième méthode alliant la rapidité de la distance point-point et la précision de la méthode avec lissages a ensuite

été proposée, mais les tests effectués montrent qu'une quantité très faible de points restent en défaut par rapport à la précision attendue. Cette méthode mixte peut néanmoins être intéressante pour accélérer certains traitements informatiques comportant des calculs de distances.

L'étape suivante a été d'implémenter et de tester une méthode classique de registration de type « Iterative Closest Point ». Les tests réalisés montrent de bons résultats concernant l'alignement de scans représentant des objets identiques. Cependant, les tests réalisés entre un scan représentant une pièce neuve et un scan représentant une pièce corrodée de manière généralisée montrent que la convergence n'est pas atteinte. Seule la moyenne des distances entre les scans converge rapidement vers l'épaisseur de corrosion attendue. Il a donc été possible de conclure que les méthodes classiques de registration de type ICP ne peuvent être appliquées en présence de corrosion généralisée. En effet, l'approximation du point terminal par le point le plus proche est inadaptée lorsque l'épaisseur de corrosion devient significative. Un autre algorithme de registration a donc dû être recherché.

La méthode qui a été développée propose de construire une surépaisseur de matière sur le scan corrodé. Cette surépaisseur est orientée perpendiculairement à la surface, ce qui implique d'identifier la normale à celle-ci au point considéré. Cette normale est facilement accessible, car déjà identifiée par les opérations de lissages qui permettent de calculer les distances. La surépaisseur n'est appliquée qu'au bout d'une quinzaine d'itérations, ce qui permet de calculer la moyenne des distances qui aura alors déjà convergé vers l'épaisseur de corrosion. Les tests réalisés par cette méthode GC-ICP montrent que le processus de calcul converge, et que la précision atteinte est inférieure au centième de millimètre avec le paramétrage choisi. Ces tests ont cependant été menés uniquement à partir de modèles CAO, car il n'existe pas de pièces étalons permettant de travailler sur des scans réels. Néanmoins, il est possible de conclure au bon fonctionnement de l'algorithme proposé, pour ce type de géométries 3D.

La méthode itérative utilisée minimisant une somme de distances au carré pour identifier la transformation géométrique attendue, il est notable que celle-ci est fortement influencée par la présence de points aberrants associés à des distances importantes par rapport à l'ensemble des mesures. C'est le cas par exemple des points situés sur les zones altérées par les usures de contact, qui perdent bien plus de matière que sur le reste de la maille. Pour prendre en compte ces altérations locales, la méthode WGC-ICP développée supprime du processus de registration les points concernés par ces altérations, en utilisant un filtre robuste statistiquement. Dans la mesure où l'on considère que la surface de ces zones reste limitée au regard de la surface totale de la maille analysée (ce qui est observé expérimentalement), la suppression des points situés sur les altérations locales permet de faire converger les résultats vers des erreurs tout aussi faibles que la méthode GC-ICP, pour des modèles 3D provenant de constructions CAO.

Les nouveaux processus d'alignement implémentés sont ensuite appliqués sur des scans de mailles réelles vieillies en mer. À condition que l'hypothèse de corrosion généralisée puisse être validée, les calculs réalisés convergent, et les résultats obtenus montrent des écart-types de distances relativement faibles. Cependant, dans le cas des mailles coaltarées, celles-ci possèdent

des épaisseurs initiales d'enduits bitumeux variables qui se désagrègent par plaques ou par écailles dans le temps. L'hypothèse de corrosion généralisée n'est pas donc vérifiée pour ce type de mailles, ce qui rend peu fiable les processus de registration proposés.

De manière générale, il est possible de conclure que les méthodes implémentées dans ce travail répondent à la problématique principale de cette thèse. Elles permettent d'identifier une transformation géométrique rigide alignant de manière efficace une maille corrodée sur une maille neuve. L'application de ces méthodes est cependant conditionnée par la validation de deux hypothèses : la corrosion est généralisée et la quantité des altérations locales reste limitée au regard de la surface totale de la maille. Afin de consolider cette conclusion générale, il peut être envisagé de fabriquer des pièces étalons afin de réaliser des tests sur des scans de pièces réelles, ceux-ci comportant ainsi les bruits de mesure et les imprécisions du scanner. En effet, l'influence de ces facteurs a été uniquement discutée, à défaut d'être mesurée dans ce travail. De plus, l'utilisation de ces méthodes étant conditionnée par la quantité d'altérations locales, il peut être aussi envisagé de réaliser des tests sur des mailles CAO, de plus en plus altérées localement, afin d'identifier un taux d'usure locale à partir duquel la méthode deviendrait imprécise.

La résolution de cette problématique permet d'ouvrir de nombreuses perspectives d'études, dont certaines ont été répertoriées dans cette thèse : contrôle de la conformité des géométries de fabrication, renforcement des modèles prédictifs de rupture quasi-statique et de fatigue actuellement basés sur des géométries neuves parfaites, proposition de modèles géométriques tridimensionnels temporels de perte de matière, amélioration de la prédiction de la résistance résiduelle à la rupture des chaînes au bout de la durée de vie envisagée pour l'installation, proposition de modèles analytiques légers pour estimer rapidement une résistance résiduelle en traction lors des opérations de maintenance, renforcement de la pertinence des modèles actuels de fatigue induite par les moments hors plan et par la torsion des chaînes.

Pour finir, il est important de rappeler dans cette conclusion que ces méthodes d'alignement ne sont pas uniquement adaptées aux spécificités géométriques des mailles de chaînes. Elles sont aussi adaptées à toute autre pièce mécanique qui subit les mêmes types d'agressions physico-chimiques.

# BIBLIOGRAPHIE


3Dnatives, 2019. Scanner laser 3D VS scanner à lumière structurée : lequel choisir ? [WWW Document]. 3Dnatives. URL https://www.3dnatives.com/scanner-laser-3d-ou-lumiere-structuree-08082019/ (accessed 4.26.24).

Ailes Marines, 2022. Arrivée des quatre premières fondations jackets à Brest [WWW Document]. Ailes Marines. URL https://ailes-marines.bzh/events/arrivee-des-quatre-premieres-fondations-jackets-a-brest/ (accessed 10.6.22).

Akers, R., 2014. Why Good Mooring Systems Go Bad 41.

Artec 3D, 2024. Artec 3D [WWW Document]. URL https://www.artec3d.com/ (accessed 5.3.24).

Audette, M.A., Ferrie, F.P., Peters, T.M., 2000. An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. Medical Image Analysis 4, 201–217. https://doi.org/10.1016/S1361-8415(00)00014-1

Awange, J.L., Bae, K.-H., Claessens, S.J., 2008. Procrustean solution of the 9-parameter transformation problem. Earth Planet Sp 60, 529–537. https://doi.org/10.1186/BF03353115

Bailey, S., 2012. Principal Component Analysis with Noisy and/or Missing Data. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 124, 1015–1023. https://doi.org/10.1086/668105

Bastid, P., Smith, S.D., 2013. Numerical Analysis of Contact Stresses Between Mooring Chain Links and Potential Consequences for Fatigue Damage, in: Volume 2B: Structures, Safety and Reliability. Presented at the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Nantes, France, p. V02BT02A037. https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11360

Bellekens, B., Spruyt, V., Berkvens, R., Penne, R., Weyn, M., 2015. A Benchmark Survey of Rigid 3D Point Cloud Registration Algorithms 11.

Bentley, J.L., 1975. Multidimensional binary search trees used for associative searching. Commun. ACM 18, 509–517. https://doi.org/10.1145/361002.361007

Besl, P.J., Jain, R.C., 1986. Invariant surface characteristics for 3D object recognition in range images. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 33, 33–80. https://doi.org/10.1016/0734-189X(86)90220-3

Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14, 239–256. https://doi.org/10.1109/34.121791

Blais, G., Levine, M.D., 1995. Registering multiview range data to create 3D computer objects. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 17, 820–824. https://doi.org/10.1109/34.400574

Boas, F., 1905. The Horizontal Plane of the Skull and the General Problem of the Comparison of Variable Forms. American Association for the Advancement of Science.

Bolt, H.M., Billington, C.J., Humphries, M.J., 1995. Anchor Chain - New Data, New Design Lines and Practical Details. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/7707-MS

Boop, 2024. WINDLASSES (Auxiliary equipment) [WWW Document]. URL https://en.bopp.fr/boutique-en-ligne/auxiliary-equipment/windlasses/bl,product,65,0 (accessed 8.22.24).

Bowyer, K.W., Chang, K., Flynn, P., 2006. A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D+2D face recognition. Computer Vision and Image Understanding 101, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2005.05.005

Brickisland, 2024. Principal curvature [WWW Document]. URL https://brickisland.net/cs177/wp-content/uploads/2011/10/ddg_principal_curvature.svg (accessed 5.29.24).

British Museum, 2024. kylix | British Museum [WWW Document]. URL https://www.britishmuseum.org/collection/object/G_1850-0302-3 (accessed 5.21.24).

Brown, M., Comley, A., Eriksen, M., Williams, I., Smedley, P., Bhattacharjee, S., 2010. Mooring System Integrity: Phase 2 Mooring Integrity JIP - Summary of Findings, in: All Days. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, USA, p. OTC-20613-MS. https://doi.org/10.4043/20613-MS

Bureau Veritas, 2018. NR 216 DT R10 E: Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units.

Bureau Veritas, 2015. NR 493 DT R03 E: Classification of Mooring Systems for Permanent and Mobile Offshore Units.

Bureau Vertitas, 2014. NI604 DT R00 E: Fatigue of Top Chain of Mooring Lines due to In-plane and Out-of-plane Bendings - Guidance Note.

Burel, G., Hénocq, H., 1995. Three-dimensional invariants and their application to object recognition. Signal Processing 45, 1–22. https://doi.org/10.1016/0165-1684(95)00039-G

Bursa, M., 1962. The theory for the determination of the non-parallelism of the minor axis of the reference ellipsoid and the inertial polar axis of the Earth, and the planes of the initial astronomic and geodetic meridians from the observation of artificial Earth satellites. Stud. Geophys. Geod. 6, 209–214.

Cai, F., Huang, Y., Xing, S., Xu, Y., Zhao, X., Wang, X., Wang, Z., Ringsberg, J.W., 2023. Characteristics and mechanisms of low-alloy high-strength steel corrosion behavior under barnacle adhesion based on a comparison experiment. Corrosion Science 217, 111146. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111146

Canul-Ku, M., Hasimoto-Beltran, R., Jiménez-Badillo, D., Ruiz-Correa, S., Román-Rangel, E., 2016. Classification of 3D Archaeological Objects Using Multi-View Curvature Structure Signatures. IEEE Access 4.

Carbono, A.J.J., Menezes, I.F.M., Martha, L.F., 2005. Mooring Pattern Optimization using Genetic Algorithms.

Carlier, 2024. Carlier chaines [WWW Document]. URL https://carlier-chain.com/ (accessed 2.12.24).

Carmichael, O., Huber, D., Hebert, M., 1999. Large data sets and confusing scenes in 3-D surface matching and recognition, in: Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.PR00062). Presented at the Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, IEEE Comput. Soc, Ottawa, Ont., Canada, pp. 358–367. https://doi.org/10.1109/IM.1999.805366

CEREMA, 2020. Manuel de corrosion et protection des ouvrages en sites aquatiques.

CEREMA, 2013. CCTP : Fourniture de chaines spéciales d'amarrage et d'accessoires de lignes de mouillage pour le balisage flottant.

CEREMA, 1997. Signalisation maritime - Documentation technique - Exploitation du balisage - Lignes de mouillage.

Charier, 2022. Travaux maritimes : un 2e ponton pour les frégates multi-missions de la Marine [WWW Document]. Charier. URL https://www.charier.fr/actualites/chantiers/travaux-maritimes-deuxieme-ponton-fremm-fregate-multi-missions-marine-nationale (accessed 10.6.22).

Chen, W., Wang, Y., Wang, M., Huang, Y., Xu, Y., 2023. Effects of Different Fouling Organisms on Corrosion Behavior of Carbon Steel in Dalian Seawater. Metals 13, 1503. https://doi.org/10.3390/met13091503

Chen, Y., Medioni, G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, Range Image Understanding 10, 145–155. https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C

Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., Chen, Y., 2018. Registration of Laser Scanning Point Clouds: A Review. Sensors 18, 1641. https://doi.org/10.3390/s18051641

Chow, C.K., Tsui, H.T., Lee, T., 2004. Surface registration using a dynamic genetic algorithm. Pattern Recognition 37, 105–117. https://doi.org/10.1016/S0031-3203(03)00222-X

Chua, C.S., Jarvis, R., 1997. Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition. https://doi.org/10.1023/A:1007981719186

CREAFORM, 2019. 3D scanning: Get the edge on the competition with faster time-to-market [WWW Document]. Creaform's Blog - News, Tips & Tricks about 3D technologies, 3D Scanning, QC/Inspection, Reverse Engineering & More. URL https://www.creaform3d.com/blog/get-competitive-edge-and-faster-time-to-market-with-3d-scanning/ (accessed 4.26.24).

Dawson-Haggerty, M., 2019. Trimesh.

De Laval, G., 1971. Fatigue tests on anchor chain-cable. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/1503-MS

Decurey, B., Schoefs, F., Barillé, A.-L., Soulard, T., 2020. Model of Bio-Colonisation on Mooring Lines: Updating Strategy Based on a Static Qualifying Sea State for Floating Wind Turbines. JMSE 8, 108. https://doi.org/10.3390/jmse8020108

Det Norske Veritas, 2010. DNV-OS-E301: Position Mooring.

Det Norske Veritas, 2009. DNV-OS-E302: Offshore Mooring Chain 30.

Díez, Y., Roure, F., Lladó, X., Salvi, J., 2015. A Qualitative Review on 3D Coarse Registration Methods. ACM Comput. Surv. 47, 1–36. https://doi.org/10.1145/2692160

D'Souza, R., Majhi, S., 2013. Application of Lessons Learned From Field Experience to Design, Installation and Maintenance of FPS Moorings. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/24181-MS

FARO, 2024. Scanner laser FARO Focus | FARO [WWW Document]. URL https://www.faro.com/fr-FR/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners (accessed 4.26.24).

Feldmar, J., Ayache, N., 1996. Rigid, affine and locally affine registration of free-form surfaces. Int J Comput Vision 18, 99–119. https://doi.org/10.1007/BF00054998

Fernández, J., Storesund, W., Navas, J., 2014. Fatigue performance of grade r4 and r5 mooring chains in seawater, in: ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, p. V01AT01A035-V01AT01A035.

Floatgen, 2019. Floatgen [WWW Document]. Floatgen. URL https://floatgen.eu/en/operation (accessed 10.6.22).

Fluck, O., Vetter, C., Wein, W., Kamen, A., Preim, B., Westermann, R., 2011. A survey of medical image registration on graphics hardware. Computer Methods and Programs in Biomedicine 104, e45–e57. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.10.009

Foley, J.D., 1996. Computer Graphics: Principles and Practice. Addison-Wesley Professional.

Fontaine, E., Kilner, A., Carra, C., Washington, D., Ma, K.T., Phadke, A., Laskowski, D., Kusinski, G., 2014. Industry Survey of Past Failures, Pre-emptive Replacements and Reported Degradations for Mooring Systems of Floating Production Units. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/25273-MS

Fontaine, E., Potts, A., Ma, K., Arredondo, A., Melchers, R.E., 2012. SCORCH JIP: Examination and Testing of Severely-Corroded Mooring Chains From West Africa, in: All Days. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, USA, p. OTC-23012-MS. https://doi.org/10.4043/23012-MS

Fontaine, Emmanuel, Rosen, J., Potts, A., Ma, K.-T., Melchers, R., 2014. SCORCH JIP - Feedback on MIC and Pitting Corrosion from Field Recovered Mooring Chain Links, in: Day 4 Thu, May 08, 2014. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, p. D041S047R004. https://doi.org/10.4043/25234-MS

Fontana, S., Cattaneo, D., Ballardini, A.L., Vaghi, M., Sorrenti, D.G., 2020. A Benchmark for Point Clouds Registration Algorithms 36.

Forest Collado, J., 2004. New Methods for Triangulation-based Shape Acquisition using Laser Scanners (Ph.D. Thesis). TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Universitat de Girona.

Forwater, 2024. 4WATER distribué par VDM - Reya [WWW Document]. URL https://www.vdm-reya.com/marques/4water?grid%5Bfrontend-product-search-grid%5D=i%3D1%26p%3D15%26f%255Bcategory%255D%255Bvalue%255D%255B%255D%3D3405%26c%3Dsku1.name1.shortDescription1.image1.names1.altImageText1.substitute_for_skus1.minimal_price1.minimal_price_sort1.montanttaxe1.typedetaxe1.referencearticle1%26v%3D__all__%26a%3Dgrid%26g%255BcontentVariantId%255D%3D5648%26g%255BoverrideVariantConfiguration%255D%3D0%26g%255BoriginalRoute%255D%3Doro_product_frontend_product_index (accessed 1.16.24).

Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2003. Geometrically stable sampling for the ICP algorithm, in: Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Presented at the Fourth International

Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003., IEEE, Banff, Alberta, Canada, pp. 260–267. https://doi.org/10.1109/IM.2003.1240258

Glira, P., Pfeifer, N., Briese, C., Ressl, C., 2015. A Correspondence Framework for ALS Strip Adjustments based on Variants of the ICP Algorithm. pfg 2015, 275–289. https://doi.org/10.1127/pfg/2015/0270

Global Wind Energy Council, 2022. Global wind report 2022.

Godin, G., Rioux, M., Baribeau, R., 1994. Three-dimensional registration using range and intensity information, in: El-Hakim, S.F. (Ed.), . Presented at the Photonics for Industrial Applications, Boston, MA, pp. 279–290. https://doi.org/10.1117/12.189139

Goldfeather, J., Interrante, V., 2004. A novel cubic-order algorithm for approximating principal direction vectors. ACM Trans. Graph. 23, 45–63. https://doi.org/10.1145/966131.966134

Goodenough, G.A., Moore, L.E., 1907. The strength of chain links, University of Illinois bulletin ;v. 5, no. 1. University of Illinois, Urbana.

Govindu, V.M., 2001. Combining two-view constraints for motion estimation, in: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001. Presented at the Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, p. II–II. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990963

Halma, A., ter Haar, F., Bovenkamp, E., Eendebak, P., van Eekeren, A., 2010. Single spin image-ICP matching for efficient 3D object recognition, in: Proceedings of the ACM Workshop on 3D Object Retrieval. Presented at the MM '10: ACM Multimedia Conference, ACM, Firenze Italy, pp. 21–26. https://doi.org/10.1145/1877808.1877814

Hamilton, W.R., 1843. On quaternions, or on a new system of imaginaries in algebra.

Harris, P., 2016. Chapter 21. Offshore hydrocarbon industries.

Hemingway, E.G., O'Reilly, O.M., 2018. Perspectives on Euler angle singularities, gimbal lock, and the orthogonality of applied forces and applied moments. Multibody Syst Dyn 44, 31–56. https://doi.org/10.1007/s11044-018-9620-0

Herrera-Navarro, A.M., Jiménez-Hernández, H., Terol-Villalobos, I.R., 2012. A Probabilistic Measure of Circularity, in: Barneva, R.P., Brimkov, V.E., Aggarwal, J.K. (Eds.), Combinatorial Image Analaysis, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 75–89. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34732-0_6

HEXAGON, 2024. Le monde se numérise [WWW Document]. Hexagon. URL https://hexagon.com/fr/resources/resource-library/world-goes-digital (accessed 4.26.24).

Hoaglin, D.C., Mosteller, F., Tukey, J.W., 2010. Understanding Robust and Exploratory Data Analysis, New e. édition. ed. Wiley, New York.

Hobbs, R.E., L Ridge, I.M., 2005. Torque in Mooring Chain. Part 1: Background and Theory. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 40, 703–713. https://doi.org/10.1243/030932405X30867

Homogeneous Coordinates [WWW Document], 2024. URL http://www.songho.ca/math/homogeneous/homogeneous.html (accessed 6.27.24).

Hong Kong Horizon Marine Industry, 2024. Système d'ancrage de pontons by Hong Kong Horizon Marine Industry Co. Limited | NauticExpo [WWW Document]. URL https://www.nauticexpo.fr/prod/hong-kong-horizon-marine-industry-co-limited/product-200387-585156.html (accessed 2.5.24).

Hough, N., 2017. Safety Flash 14/17. IMCA.

Hurley, J.R., Cattell, R.B., 1962. The procrustes program: Producing direct rotation to test a hypothesized factor structure. Behavioral Science 7, 258–262. https://doi.org/10.1002/bs.3830070216

IACS, 2016. W22: Offshore mooring chain.

IACS, 2010. Guidelines for the Survey of Offshore mooring Chain Cable in Use.

IACS, 2004. W18: Anchor chain cables and accessories including chafing chain for emergency towing arrangements.

IALA, 2010. Design of Floating Aid to Navigation Moorings 1066.

IEEE, 2024. IEEE Xplore [WWW Document]. URL https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp (accessed 5.15.24).

Ino-Rope, 2024. Cordage âme Dyneema - Faible allongement. Boutique en ligne Ino-Rope. URL https://shop.inorope.com/categorie-produit/cordages-performance/avec-gaine/cordage-ame-dyneema/ (accessed 1.16.24).

Jana, P., Dalibor, M., 2018. Notes on iterative closest point algorithm. Presented at the 17th Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018, Bratislava, Slovak Republic, p. 10.

Jayasinghe, K., Potts, A., Kilner, A., Melchers, R., 2018. Mooring Chain Wear Experiments and Findings. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/28737-MS

Jean, P., Goessens, K., L'Hostis, D., 2005. Failure of Chains by Bending on Deepwater Mooring Systems. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/17238-MS

Jiang, S., Ma, Y., Jiang, W., Li, Q., 2024. Efficient structure from motion for UAV images via anchor-free parallel merging. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 211, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.04.005

Johnson, A.E., 1997. Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213.

Johnson, A.E., Hebert, M., 1999. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 21, 433–449. https://doi.org/10.1109/34.765655

Johnson, A.E., Kang, S.B., 1999. Registration and integration of textured 3D data. Image and Vision Computing. https://doi.org/10.1016/S0262-8856(98)00117-6

Koenderink, J.J., van Doorn, A.J., 1992. Surface shape and curvature scales. Image and Vision Computing 10, 557–564. https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90076-F

Kraft, D., 1988. A software package for sequential quadratic programming.

Kraif, 2024. Bouées de signalisation [WWW Document]. URL https://www.anciens-ets-kraif.com/produit/bouees/bouees-de-signalisation/ (accessed 2.1.24).

Kvitrud, A., 2014. Lessons Learned From Norwegian Mooring Line Failures 2010–2013, in: Volume 4A: Structures, Safety and Reliability. Presented at the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, San Francisco, California, USA, p. V04AT02A005. https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23095

Lassen, T., Storvoll, E., Bech, A., 2010. Fatigue Life Prediction of Mooring Chains Subjected to Tension and Out of Plane Bending. Presented at the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of

Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 229–239. https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79253

Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quart. Appl. Math. 2, 164–168. https://doi.org/10.1090/qam/10666

Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., Licata, L., 2013. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. Journal of Experimental Social Psychology 49, 764–766. https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013

Loh, W.-Y., 2011. Classification and regression trees. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery 1, 14–23. https://doi.org/10.1002/widm.8

Lotfollahi Yaghin, A., Melchers, R.E., 2015. Long-term inter-link wear of model mooring chains. Marine Structures 44. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.08.001

Low, K.-L., 2004. Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration (No. TR04- 004). University of North Carolina at Chapel Hill,.

Luhmann, T., Wendt, K., 2000. Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-d measurement systems, in: Part B. Presented at the XIXth ISPRS Congress, Amsterdam, The Netherlands.

Lukomoliox, 2020. English: Abeille Bourbon.

Lyu, W., Ke, W., Sheng, H., Ma, X., Zhang, H., 2024. Dynamic Downsampling Algorithm for 3D Point Cloud Map Based on Voxel Filtering. Applied Sciences 14, 3160. https://doi.org/10.3390/app14083160

Ma, K., Shu, H., Smedley, P., L'Hostis, D., Duggal, A., 2013. A Historical Review on Integrity Issues of Permanent Mooring Systems. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/24025-MS

Maiseli, B., Gu, Y., Gao, H., 2017. Recent developments and trends in point set registration methods. Journal of Visual Communication and Image Representation 46, 95–106. https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2017.03.012

Mamiya, E.N., Castro, F.C., Ferreira, G.V., Nunes Filho, E.L.S.A., Canut, F.A., Neves, R.S., Malcher, L., 2019. Fatigue of mooring chain links subjected to out-of-plane bending: Experiments and modeling. Engineering Failure Analysis 100, 206–213. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.055

Maneewongvatana, S., Mount, D.M., 1999. Analysis of approximate nearest neighbor searching with clustered point sets. arXiv:cs/9901013.

Marine nationale française, 2019. CR visite BV1 lignes de mouillages CFE.

Marine nationale française, 2016. Instruction 2016-25934 - Vérifications périodiques ligne de mouillage.

Marit, 2024. MARIT - Fabricant de chaînes en acier, offshore et marines [WWW Document]. URL http://www.marit.fr/ (accessed 1.15.24).

Markelj, P., Tomaževič, D., Likar, B., Pernuš, F., 2012. A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions. Medical Image Analysis 16, 642–661. https://doi.org/10.1016/j.media.2010.03.005

Martinez Perez, I., Constantinescu, A., Bastid, P., Zhang, Y.-H., Venugopal, V., 2019. Computational fatigue assessment of mooring chains under tension loading. Engineering Failure Analysis 106, 104043. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.073

Massenet, G., Vallerey, J., Letalle, A., 1911. Gréement, manoeuvre et conduite du navire à voiles et à vapeur. A. Challamel.

Masuda, T., 2002. Registration and Integration of Multiple Range Images by Matching Signed Distance Fields for Object Shape Modeling. Computer Vision and Image Understanding 87, 51–65. https://doi.org/10.1006/cviu.2002.0982

Masuda, T., 2001. Generation of geometric model by registration and integration of multiple range images, in: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Presented at the Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 254–261. https://doi.org/10.1109/IM.2001.924447

Masuda, T., Yokoya, N., 1995. A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images. Comput. Vis. Image Underst. 61, 295–307. https://doi.org/10.1006/cviu.1995.1024

Melchers, R.E., 2010. Transient early and longer term influence of bacteria on marine corrosion of steel. Corrosion Engineering, Science and Technology 45, 257–261. https://doi.org/10.1179/174327809X397857

Melchers, R.E., 2007. The effects of water pollution on the immersion corrosion of mild and low alloy steels. Corrosion Science 49, 3149–3167. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.021

Melis, C., Jean, P., Vargas, P., 2005. Out-of-Plane Bending Testing of Chain Links, in: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 3. Presented at the ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASMEDC, Halkidiki, Greece, pp. 163–172. https://doi.org/10.1115/OMAE2005-67353

Météo France, 2022. Historique de la bouée Antilles [WWW Document]. URL http://esurfmar.meteo.fr/real-time/html/antilles.html (accessed 10.6.22).

Möbius, A.F., 1827. Der barycentrische Calcul ein neues Hülfsmittel zur analytischen Behandlung der Geometrie dargestellt und insbesondere auf die Bildung neuer Classen von Aufgaben und die Entwickelung mehrerer Eigenschaften der Kegelschnitte angewendet von August Ferdinand Mobius Professor der Astronomie zu Leipzig. Verlag von Johann Ambrosius Barth.

Morandini, C., Legerstee, F., 2009. Consistent Integrity of Mooring System. Presented at the The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, OnePetro.

Murugan, V.K., Mohanram, H., Budanovic, M., Latchou, A., Webster, R.D., Miserez, A., Seita, M., 2020. Accelerated corrosion of marine-grade steel by a redox-active, cysteine-rich barnacle cement protein. npj Mater Degrad 4, 20. https://doi.org/10.1038/s41529-020-0124-z

Musée mémorial de Camaret, 2024. Le musée mémorial de Pen Hir, à Camaret-sur-mer [WWW Document]. URL https://www.crozon-bretagne.com/tourisme/decouverte/camaret/musee-memorial-pen-hir.php (accessed 1.19.24).

Noble Denton, 2017. An assessment of proof load effect on the fatigue life of mooring chain for floating offshore installations (No. RR1093). HSE.

Noble Denton, 2006. Floating production system - JIP FPS mooring integrity (No. RR444). HSE.

Océan 3, 2024. Coffres d'amarrage - Océan 3 [WWW Document]. URL https://www.ocean3.fr/FR/coffres-d-amarrage-7-16.html (accessed 1.31.24).

Ouest-France, 2021. Landévennec. « Le cimetière des bateaux ne ferme pas » [WWW Document]. URL https://quimper.maville.com/actu/actudet_-landevennec.-le-cimetiere-des-bateaux-ne-ferme-pas-_6-4483051_actu.Htm (accessed 1.31.24).

Pauly, M., Gross, M., Kobbelt, L.P., 2002. Efficient Simplification of Point-Sampled Surfaces. https://doi.org/10.1109/VISUAL.2002.1183771

Pearson, K., 1901. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 2, 559–572. https://doi.org/10.1080/14786440109462720

Pederson, T., deGier, T., Hall, A., Allan, S., 2013. Mooring System Life Extension Using Subsea Inspection Technologies. https://doi.org/10.4043/24184-MS

Pluim, J.P.W., Maintz, J.B.A., Viergever, M.A., 2003. Mutual-information-based registration of medical images: a survey. IEEE Trans Med Imaging 22, 986–1004. https://doi.org/10.1109/TMI.2003.815867

Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., 2015. A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics. FNT in Robotics 4, 1–104. https://doi.org/10.1561/2300000035

Portas, A., Quillien, N., Culioli, G., Briand, J.-F., 2022. Eukaryotic diversity of marine biofouling from coastal to offshore areas. Frontiers in Marine Science. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.971939

Potts, A., Kurts, P., Jayasinghe, K., Kilner, A., Melchers, R., Lee, T., Chaplin, R., 2018. SCORCH JIP - Overview of Project and Summary of Findings, in: Day 3 Wed, May 02, 2018. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, USA, p. D032S092R002. https://doi.org/10.4043/29017-MS

Prix EDF Pulse Occitanie [WWW Document], 2023. URL https://www.edf.fr/pulse/prix-locaux/occitanie-edition-2023 (accessed 2.28.24).

Pulli, K., 1999. Multiview registration for large data sets, in: Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.PR00062). Presented at the Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, IEEE Comput. Soc, Ottawa, Ont., Canada, pp. 160–168. https://doi.org/10.1109/IM.1999.805346

Rampi, L., Dewi, F., Vargas, P., 2015. Chain Out of Plane Bending (OPB) Joint Industry Project (JIP) Summary and Main Results. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/25779-MS

Raunek, 2019. How Single Point Mooring (SPM) Offshore Operation Works? Marine Insight. URL https://www.marineinsight.com/offshore/how-single-point-mooring-spm-offshore-operation-works/ (accessed 1.29.24).

Ridge, I., Smedley, P., Hobbs, R., 2011. Effects of twist on chain strength and fatigue performance: small scale test results, in: Offshore Technology Conference. American Society of Mechanical Engineers, Houston, Texas, USA, pp. 183–189. https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49206

Ridge, I.M.L., Hobbs, R.E., Fernandez, J., 2006. Predicting the Torsional Response of Large Mooring Chains, in: Offshore Technology Conference. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA. https://doi.org/10.4043/17789-MS

Rolland, J., Blouch, P., 2002. Les bouées météorologiques - L'exemple de Météo-France. La Météorologie 2002, 83–88. https://doi.org/10.4267/2042/36252

Rousseeuw, P.J., Croux, C., 1993. Alternatives to the Median Absolute Deviation. Journal of the American Statistical Association 88, 1273–1283. https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10476408

Ruiz-Correa, S., Shapiro, L.G., Melia, M., 2001. A new signature-based method for efficient 3-D object recognition, in: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001. Presented at the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, IEEE Comput. Soc, Kauai, HI, USA, p. I-769-I–776. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990554

Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2001. Efficient variants of the ICP algorithm, in: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Presented at the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, IEEE Comput. Soc, Quebec City, Que., Canada, pp. 145–152. https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423

Sachan, A., 2019. Feature recognition and strength estimation of chain links using 3d inspection data for mooring integrity assessment 258. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108785

Sadjadi, F.A., Hall, E.L., 1980. Three-Dimensional Moment Invariants. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-2, 127–136. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1980.4766990

Salti, S., Tombari, F., Stefano, L.D., 2011. A Performance Evaluation of 3D Keypoint Detectors, in: Visualization and Transmission 2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing. Presented at the Visualization and Transmission 2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, pp. 236–243. https://doi.org/10.1109/3DIMPVT.2011.37

Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D., Forest, J., 2007. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. Image and Vision Computing 25, 578–596. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.05.012

Salvi, J., Pagès, J., Batlle, J., 2004. Pattern codification strategies in structured light systems. Pattern Recognition 37, 827–849. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002

SBM Offshore, 2016. Turret & mooring systems.

SCANTECH, 2023. MSCAN-L15 Photogrammetry System - ScanTech. URL https://www.3d-scantech.com/fr/mscan-l15-photogrammetry-system/ (accessed 4.26.24).

Schönemann, P.H., 1966. A generalized solution of the orthogonal procrustes problem. Psychometrika 31, 1–10. https://doi.org/10.1007/BF02289451

Schönemann, P.H., Carroll, R.M., 1970. Fitting one matrix to another under choice of a central dilation and a rigid motion. Psychometrika 35, 245–255. https://doi.org/10.1007/BF02291266

Scipy spatial KDTree [WWW Document], 2011. URL https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.KDTree.html (accessed 4.30.21).

Scopus, 2024. Scopus | Abstract and citation database | Elsevier [WWW Document]. www.elsevier.com. URL https://www.elsevier.com/products/scopus (accessed 5.15.24).

Segal, A., Haehnel, D., Thrun, S., 2009. Generalized-ICP, in: Robotics: Science and Systems V. Presented at the Robotics: Science and Systems 2009, Robotics: Science and Systems Foundation. https://doi.org/10.15607/RSS.2009.V.021

Sengupta, D., Gupta, P., Biswas, A., 2022. A survey on mutual information based medical image registration algorithms. Neurocomputing 486, 174–188. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.11.023

Sharp, G.C., Lee, S.W., Wehe, D.K., 2002. ICP registration using invariant features. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 24, 90–102. https://doi.org/10.1109/34.982886

Shoemake, K., 1985. Animating rotation with quaternion curves. SIGGRAPH Comput. Graph. 19, 245–254. https://doi.org/10.1145/325165.325242

Shoup, G.J., Mueller, R.A., 1984. Failure Analysis of a Calm Buoy Anchor Chain System, in: Offshore Technology Conference. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas. https://doi.org/10.4043/4764-MS

Shoup, G.J., Tipton, S.M., Sorem, J.R., 1992. The Influence of Proof Loading on the Fatigue Life of Anchor Chain. Presented at the Offshore Technology Conference, OnePetro. https://doi.org/10.4043/6905-MS

Soon-Yong Park, Subbarao, M., 2003. A fast point-to-tangent plane technique for multi-view registration, in: Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Presented at the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003., IEEE, Banff, Alberta, Canada, pp. 276–283. https://doi.org/10.1109/IM.2003.1240260

Sorkine-Hornung, O., Rabinovich, M., 2017. Least-Squares Rigid Motion Using SVD 5.

Sproull, R.F., 1991. Refinements to nearest-neighbor searching ink-dimensional trees. Algorithmica 6, 579–589. https://doi.org/10.1007/BF01759061

Stachowitsch, M., Kikinger, R., Herler, J., Zolda, P., Geutebrück, E., 2002. Offshore oil platforms and fouling communities in the southern Arabian Gulf (Abu Dhabi). Marine Pollution Bulletin 44, 853–860. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00085-1

Stanford University, 2024. The Stanford 3D Scanning Repository [WWW Document]. URL http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/ (accessed 5.20.24).

Steenkiste, D.V., Plasschaert, S., Baets, P.D., Pauw, J.D., Delgado, Y.P., Sukumaran, J., 2011. Abrasive wear of link chains. Presented at the Sustainable Construction & Design, Ghent, p. 9.

Taft, B., Teng, C.-C., Rutledge, T., 2009. Low load compliant mooring history and status update, in: OCEANS 2009. Presented at the OCEANS 2009, IEEE, Biloxi, MS, pp. 1–9. https://doi.org/10.23919/OCEANS.2009.5422447

Tam, G.K.L., Zhi-Quan Cheng, Yu-Kun Lai, Langbein, F.C., Yonghuai Liu, Marshall, D., Martin, R.R., Xian-Fang Sun, Rosin, P.L., 2013. Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid. IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics 19, 1199–1217. https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.310

Tomasi, C., Kanade, T., 1992. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. Int J Comput Vision 9, 137–154. https://doi.org/10.1007/BF00129684

Trapet Precision Engineering, 2024. trapet.de [WWW Document]. trapet.de. URL https://trapet.de/index.html (accessed 4.22.24).

Turk, G., Levoy, M., 1994. Zippered polygon meshes from range images. Presented at the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 311–318. https://doi.org/10.1145/192161.192241

Umeyama, S., 1991. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 13, 376–380. https://doi.org/10.1109/34.88573

Van Campenhoudt, M., 1997. Maille ou maillon : quand des terminographes négligent l'évolution de l'usage. Presented at the Journées scientifiques du réseau thématique Lexicologie, La mémoire des mots, Tunis.

Var-matin, 2023. Le programme des travaux du porte-avions Charles-de-Gaulle pour les mois à venir [WWW Document]. Var-Matin. URL https://www.varmatin.com/defense/le-

programme-des-travaux-du-porte-avions-charles-de-gaulle-pour-les-mois-a-venir-832069 (accessed 1.16.24).

VDI, 2008. VDI/VDE 2634 Blatt 3 - Optical 3D-measuring systems - Multiple view systems based on area scanning.

Vryhof Anchors, 2015. Vryhof manual - The guide to anchoring.

Wang, F., Zhao, Z., 2017. A survey of iterative closest point algorithm. 2017 Chinese Automation Congress (CAC) 4395–4399. https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243553

Watson, S.J., Ribó, M., Seabrook, S., Strachan, L.J., Hale, R., Lamarche, G., 2022. The footprint of ship anchoring on the seafloor. Sci Rep 12, 7500. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11627-5

Weik, S., 1997. Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information, in: Proceedings. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.97TB100134). Presented at the Proceedings. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.97TB100134), pp. 93–100. https://doi.org/10.1109/IM.1997.603853

Wolf, H., 1963. Geometric connection and re-orientation of three-dimensional triangulation nets. Bull. Geodesique 68, 165–169. https://doi.org/10.1007/BF02526150

Xue, X., Chen, N.-Z., Pu, Y., Gao, X., 2020. Fracture mechanics analysis for mooring chain links subjected to out-of-plane bending (OPB). Marine Structures 71, 102740. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102740

Yan, T., Yan, W., Dong, Y., Wang, H., Yan, Y., Liang, G., 2006. Marine fouling of offshore installations in the northern Beibu Gulf of China. International Biodeterioration & Biodegradation, Surface Adhesion and Biotechnological Applications 58, 99–105. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.07.007

Zhang, S., 2010. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques. Optics and Lasers in Engineering 48, 149–158. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.008

Zhong, Y., 2009. Intrinsic shape signatures: A shape descriptor for 3D object recognition, in: 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops. Presented at the 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, IEEE, Kyoto, Japan, pp. 689–696. https://doi.org/10.1109/ICCVW.2009.5457637

# TABLE DES FIGURES

Figure I-1 - Production mondiale de pétrole brut. Diagramme permettant la comparaison de la production onshore en gris, offshore peu profond en bleu clair ($< 100\ m$) et offshore profond en bleu foncé ($\geq 100\ m$) (Harris, 2016). ..... 6

Figure I-2 – Ancrages à point unique : (a) ancrage avec bouée externe (Raunek, 2019), (b) ancrage avec touret interne (SBM Offshore, 2016). ..... 6

Figure I-3 - Ancrage multipoint, 18 lignes (Carbono et al., 2005) : (a) représentation de la répartition angulaire, (b) représentation 3D de l'ancrage. ..... 7

Figure I-4 – Lignes d'ancrage (Vryhof Anchors, 2015) : (a) ancrage caténaire, (b) ancrage tendu à 45°, (c) Tension Leg Platform. ..... 8

Figure I-5 - Évolution historique des nouvelles installations éoliennes mondiales (en GW), onshore en vert, offshore en bleu (Global Wind Energy Council, 2022). ..... 9

Figure I-6 – Maintiens en position des éoliennes : (a) fondation de type "jacket" en baie de Saint-Brieuc - France (Ailes Marines, 2022), (b) Floatgen, projet de démonstrateur d'éolien flottant au large du Croisic - France (Floatgen, 2019).. 9

Figure I-7 – Spécificités des amarrages : (a) haussières du porte-avions « Charles de Gaule » dans le port de Toulon (Var-matin, 2023), (b) guindeaux et barbotins (Boop, 2024). ..... 10

Figure I-8 – Mouillages des navires : (a) ligne de mouillage du porte-avions « Charles de Gaule » (Marit, 2024), (b) ancre du cuirassé Courbet (Musée mémorial de Camaret, 2024). ..... 10

Figure I-9 – Illustration d'un bas de ligne de mouillage et vocabulaire associé (Massenet et al., 1911). ..... 11

Figure I-10 – Schéma de principe d'une ligne de type caténaire pour un mouillage de navire. La direction de la chaîne est tangentielle au fond marin, à proximité de l'ancre (Watson et al., 2022). ..... 11

Figure I-11 – Mouillage des navires à faible tonnage : (a) cordage, âme Dyneema® et gaine Polyester (Ino-Rope, 2024), (b) ligne de mouillage complète de marque 4Water®, ancre, chaîne et textile polyester sans gaine (Forwater, 2024). ..... 12

Figure I-12 – Bouées de signalisation maritime (Kraif, 2024) : (a) bouée cardinale, (b) bouée de signalisation latérale..... 13

Figure I-13 – Détails de corps-morts (CEREMA, 1997) : (a) corps-mort en béton avec sa tige scellée de liaison (cigale) et sa réservation pour améliorer l'effet ventouse, (b) ancrage multiligne (affourchage) permettant la diminution du rayon d'évitage. ..... 14

Figure I-14 - Fractionnement des lignes de mouillage (CEREMA, 1997). ..... 14

Figure I-15 – Bouées d'amarrage. (a) L'abeille Bourbon en alerte pour la surveillance du rail d'Ouessant (29). Le remorqueur est amarré sur un coffre situé devant le port du Stiff (Lukomoliox, 2020). (b) Cimetière des bateaux de Landévennec (29). Les unités désarmées sont amarrées dans le sens du courant par deux coffres d'amarrage (Ouest-France, 2021). ..... 15

Figure I-16 - (a) et (b) Coffre d'amarrage destiné à la Marine nationale française. Un puit à chaîne traversant permet de lier directement l'amarre du navire à la chaîne d'ancrage. La flottabilité nette de ce type de bouées peut atteindre 40 tonnes (Océan 3, 2024). ..... 15

Figure I-17 - Bouée météorologique « Antilles 1 », mer des Caraïbes, profondeur 5500 m environ (Météo France, 2022). ..... 16

Figure I-18 - Cosse de liaison entre la chaîne d'extrémité et la corde en Nylon® de l'ancrage de la bouée météorologique « Antilles 2 ». Photo prise au Centre de Météorologie Marine de Brest (CMM)..... 16

Figure I-19 – Caractéristiques des bouées météorologiques Antilles1 et 2 : corps-mort de 1,5 tonne, 55 m de chaînes en cul de bouée, 55 m de chaînes en bas de ligne, 4500 m de Nylon®, 1640 m de polypropylène (Rolland and Blouch, 2002)..... 17

Figure I-20 - Ponton flottant modulaire positionné sur ancrages par chaînes et corps-mort (Hong Kong Horizon Marine Industry, 2024). ..... 18

Figure I-21 - Ponton d'accostage pour les frégates multimissions de la base navale de Brest. Les chaînes d'amarrage (au premier plan) sont munies d'amortisseurs et relient le ponton au quai. (Charier, 2022). ..... 18

Figure I-22 - Configurations classiques de lignes d'ancrage en fonction de la profondeur d'eau (Taft et al., 2009). ..... 20

Figure I-23 – Mailles de chaînes. (a) Échantillon de maille neuve, sans étai, fourni par l'entreprise Carlier (Carlier, 2024). La soudure est visible dans sa partie inférieure, le bourrelet associé a été supprimé mécaniquement. (b) Mailles avec étais (Marit, 2024). ..... 21

Figure I-24 - Maille 6d de calibre 40 mm, cotes et tolérances en mm. ..... 24

Figure I-25 - Charges de rupture normalisées tracées en fonction du calibre. Cette charge minimale à atteindre est identique pour les mailles avec étais et pour les mailles sans étais. ..... 28

Figure I-26 – Distribution des contraintes dans une maille (Brown et al., 2010) : (a) distribution de contrainte dans une maille en tension, (b) contrainte résiduelle à la suite du déchargement. ..... 29

Figure I-27 - Surcharge due à la détente et à la mise en tension rapide d'une ligne d'ancrage. Le choc multiplie par 8 la charge moyenne (Akers, 2014)..... 31

Figure I-28 – Fouling présent sur une bouée cardinale de signalisation maritime après 19 mois de service sur la « Moulière de Saint Quay » – Côtes-d'Armor (22) – France. 32

Figure I-29 - Charge en kg sur la chaîne de bouée de signalisation maritime localisée à la « Moulière de Saint Quay » – Côtes-d'Armor (22) – France. Mesures réalisées par un capteur SF10 de marque NKE. Les données ont été relevées toutes les minutes, la courbe affichée propose un lissage des valeurs sur une semaine... 32

Figure I-30 - Exemples de ruptures par fatigue de chaînes de grade R4 ou R5, sous sollicitations de traction uniaxiale (Fernández et al., 2014)..... 33

Figure I-31 - Localisation des fissures pour des essais de fatigues menés lors du BOMEL JIP (Bolt et al., 1995). ..... 34

Figure I-32 – Moments de flexion complémentaires : (a) moment hors plan en jaune (OPB) dû au verrouillage de la rotation dans le contact intermaille (Jean et al., 2005), (b) IPB dans le plan principal de la maille, OPB dans son plan perpendiculaire (Xue et al., 2020). ..... 36

Figure I-33 – Moment hors plan : (a) moment hors plan sur la première maille mobile (bleue), après le blocage d'une partie de la chaîne (grise) en entrée d'écubier (Xue et al., 2020), (b) illustration d'une rotation relative entre mailles, au passage d'un barbotin (Mamiya et al., 2019). ..... 36

Figure I-34 - Rotations axiales entre mailles (Hobbs and L Ridge, 2005) : (a) sans rotation axiale $\gamma = 45°$, (b) en présence d'une rotation axiale $\gamma < 45°$, (c) rotation axiale maximale..... 37

Figure I-35 – Torsion des chaînes : (a) torsion d'une chaîne lors d'un relevage sur le pont d'un FPSO (Noble Denton, 2006, p. 90), (b) paquet de chaîne lors de la remontée d'une ancre (Hough, 2017). ..... 37

Figure I-36 – Courbes exprimant le moment de torsion adimensionné en fonction de l'angle de rotation en degrés. Trois types de mailles sont étudiées, largeurs W=3.22D, 3.35D et 3.6D, avec D le diamètre de la maille. Le moment de torsion est adimensionné par division avec le produit DP, P étant la charge de traction. (Hobbs and L Ridge, 2005). ..... 38

Figure I-37 - Schéma illustrant l'apparition de deux contacts (en rouge), lorsqu'une chaîne est soumise à une rotation axiale importante (Ridge et al., 2011). ..... 38

Figure I-38 – Corrosion de chaînes. (a) Mailles de chaînes indonésiennes situées au-dessus de la ligne d'eau. Observation d'une corrosion généralisée entraînant une perte de matière importante (Emmanuel Fontaine et al., 2014). (b) Corrosion généralisée importante sur des mailles d'une ligne de mouillage de navire, après seulement 8 mois d'utilisation (Marine nationale française, 2019). ..... 40

Figure I-39 - Corrosion en fonction de la profondeur en zone portuaire. Les épaisseurs de corrosion sont maximales dans la zone d'éclaboussures et dans la zone de basses eaux Ces observations sont semblables à celles observées pour les chaînes vieillies en pleine mer. (CEREMA, 2020)..... 40

Figure I-40 – Différents types de corrosion métallique (CEREMA, 2020) ..... 41

Figure I-41 – Mailles de chaînes utilisées pour l'ancrage de bouées de signalisation maritime. (a) Chaîne utilisée en mer, immersion permanente. La corrosion est généralisée : la surface est régulière et ne présente pas de cratères. (b) Chaîne utilisée en eau saumâtre, après 3 ans d'immersion. Observation de corrosion localisée prépondérante sous forme de multiples cratères. ..... 41

Figure I-42 – Modèle de perte de matière (Bureau Veritas, 2015, p. 29) : (a) géométrie d'une maille neuve, (b) géométrie d'une maille ayant perdu de la matière de manière uniforme par corrosion généralisée. La vérification des résistances des mailles en service est réalisée en prenant en compte cette géométrie usée qui ne modifie pas la fibre neutre de la maille initiale. ..... 42

Figure I-43 – Corrosion localisée (Emmanuel Fontaine et al., 2014) : (a) fouling présent sur une chaîne immergée en Afrique de l'Ouest, (b) trous (cratères), localisés et profonds, apparaissant sous le fouling après récupération de la chaîne et après nettoyage. ..... 44

Figure I-44 – Biocorrosion. (a) Fouling présent sur une chaîne associée à une bouée d'amarrage implantée en eau saumâtre dans la rivière du Trieuc (Côtes-d'Armor – France) et relevée en novembre 2019. (b et c) Présence de multiples cratères de couleur gris mat, juste après le nettoyage haute pression. (d) Corrosion rapide des cratères après quelques heures à l'air libre. On distingue une majoration de perte de matière au niveau de la soudure de la maille. ..... 44

Figure I-45 – Modèles proposés pour décrire les mécanismes de corrosion pour : (a) les balanes, (b) les ascidies et (c) les moules (Chen et al., 2023). ..... 45

Figure I-46 – Modèle mécanique tridimensionnel (Fontaine et al., 2012) : (a) géométrie tridimensionnelle de mailles de chaîne comportant des cratères profonds, (b) contraintes de von Mises obtenues par une Méthode Éléments Finis. ..... 46

Figure I-47 – Essais d'usure de mailles de chaînes (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015). (a) Pertes de matière mesurées en grammes, en fonction du nombre de cycles, pour une chaîne de calibre 16 mm, composée d'un matériau spécifique (AISI 1522). Une masse d'une tonne est suspendue à la chaîne, et un dispositif mécanique

impose un déplacement latéral alternatif. Les essais sont réalisés à sec et sous projection d'eau douce. (b) Photographie du dispositif d'essai associé. ..... 47

Figure I-48 –Maille de chaîne immédiatement sortie de l'eau de mer. (a) Les zones gris clair qui laissent entrevoir le métal à nu sont uniquement présentes dans les cintres, au niveau du contact intermaille. (b) Surface de contact agrandie avec microscope Keyence. L'acier nu apparaît nettement au contact entre des zones corrodées. ..... 48

Figure I-49 – Usures de chaînes dont les rotations axiales ne sont pas autorisées : (a) maille de ponton d'amarrage en zone portuaire (Brest), (b) usures réalisées en laboratoire (Lotfollahi Yaghin and Melchers, 2015). ..... 49

Figure I-50 – Usures dans des cintres de chaînes dont les rotations axiales sont autorisées. Mailles ayant servi à l'ancrage de bouées de signalisation maritime. ..... 49

Figure I-51 – Usures externes : (a) usure externe très importante sur un bras d'une maille de chaîne relevée (Steenkiste et al., 2011), (b) usure externe sur un bras d'une maille de chaîne toujours en fonctionnement (Sachan, 2019). ..... 50

Figure I-52 - Mesure du diamètre dans les zones de contact intermaille. Le diamètre est obtenu en divisant par deux la mesure indiquée (Bureau Veritas, 2015). ..... 52

Figure I-53 – Géométrie tridimensionnelle de mailles (Emmanuel Fontaine et al., 2014) : (a) opération de numérisation tridimensionnelle de mailles par photogrammétrie, (b) maille numérisée. ..... 53

Figure I-54 – Scanner de type LIDAR : (a) triangulation laser permettant l'obtention des coordonnées spatiales du point mesuré (3Dnatives, 2019), (b) scanner laser de type FARO Focus, monté sur trépied et utilisé dans le cadre d'applications de génie civil (FARO, 2024). ..... 57

Figure I-55 – Projection de lumière structurée : (a) motif de franges utilisé par un scanner de type HEGAGON SmartScan (HEXAGON, 2024), (b) motif de grille utilisé par un scanner de type CREAFORM HandySCAN 3D (CREAFORM, 2019)..... 58

Figure I-56 – Utilisation d'un scanner photogrammétrique SCANTECH MSCAN-L15 dans le cadre de la numérisation d'un réacteur d'avion. On peut noter la présence de motifs collés sur le réacteur qui permettent la simplification et l'amélioration du processus d'alignement des images (SCANTECH, 2023). ..... 59

Figure I-57 - Schéma explicatif concernant la précision et l'exactitude. ..... 60

Figure I-58 – Contrôle de précision : (a) sphères calibrées en diamètre et en position, fabriquées par Trapet Precision Engineering (Trapet Precision Engineering, 2024), (b) ball bar avec sphères amovibles (Luhmann and Wendt, 2000). ..... 61

Figure I-59 - Résultats de test pour un scanner 3D de type Artec Space Spider. Les cotes indiquées en orange sont les valeurs de références. Les chiffres utilisant les grandes polices sont les erreurs par rapport aux valeurs de référence. ..... 61

Figure I-60 - Cercle représenté par plusieurs images avec un nombre de pixel croissant (Herrera-Navarro et al., 2012). ..... 62

Figure I-61 - Scan d'une pomme : (a) résolution de 10 mm, (b) résolution de 5 mm, (c) résolution de 2 mm, (d) résolution de 1 mm. Plus la résolution est faible, plus les détails apparaissent. ..... 62

Figure I-62 – Artec Space Spider : (a) vue générale du scanner 3D optique, (b) identification des différents composants permettant l'acquisition 3D. ..... 64

Figure I-63 – Capture des couleurs. (a) Scan d'une pomme défini avec une résolution de 1 mm et visualisé en mode solide, c'est-à-dire faisant apparaître les facettes du maillage éclairées virtuellement par une source lumineuse. (b) Scan identique, visualisé en mode solide, mais faisant apparaître les couleurs capturées de la pomme, qui sont associées à chaque facette du maillage. ..... 64

Figure I-64 – Dispositif de maintien des mailles : (a) description des éléments du dispositif de maintien, (b) position des mailles sur le dispositif de maintien. Les mailles adjacentes (6) plaquent la maille à scanner (5) qui reste en équilibre sur le support (4). ..... 66

Figure I-65 – (a), (b), (c), (d), (e) et (f) : étapes successives utiles pour la construction d'une géométrie 3D complète de maille avec étai. ..... 69

Figure I-66 - Modèle tridimensionnel de maille de chaîne. ..... 70

Figure I-67 - Post-traitement des scans : séquencement nécessaire à la création d'un modèle 3D d'une maille de chaîne. ..... 71

Figure I-68 – Superposition des scans : (a) scans non superposés possédant des éléments géométriques communs, (b) déplacement du $scan_2$ sur le $scan_1$ après identification de la transformation rigide qui permet d'aligner les éléments communs. ..... 74

Figure II-1 – Exemple de registration : alignement du modèle incomplet $Bunny_1$ sur le modèle incomplet $Bunny_2$, pour d'obtenir le modèle complet $Bunny_3$. Modèle utilisé : Stanford Bunny (Stanford University, 2024). ..... 78

Figure II-2 - Thésée tuant Procruste : Kylix attique conservée au British Museum de Londres (British Museum, 2024). ..... 81

Figure II-3 – Représentation de correspondances de points : (a) nuages de points écrits sans correspondances implicites, (b) nuages de points écrits avec correspondances ligne à ligne. ..... 83

Figure II-4 - Alignement manuel, avec l'aide du logiciel Artec Studio 15, du scan correspondant à la partie inférieure d'un palier sur le scan de sa partie supérieure. (a) Trois points physiques sont identifiés manuellement sur les deux scans. Une transformation est alors calculée. (b) Scans superposés après application de la transformation. ..... 87

Figure II-5 – Paramétrage de l'environnement local du point $A$. ..... 89

Figure II-6 - Signature de : (a) un sommet, (b) un pont, (c) une selle de cheval (Chua and Jarvis, 1997). ..... 89

Figure II-7 -Analyse en composante principale pour : (a) un nuage de points 2D, et (b) un nuage de points 3D (Díez et al., 2015). ..... 91

Figure II-8 – Courbures principales : (a) illustration des directions principales $X1, X2$ et des courbures principales associées $k1, k2$ pour une surface en forme de sommet (Brickisland, 2024), (b) surface quadrique $S$ qui approche au mieux localement, autour du point $A$, une quantité $n$ imposée de points $Pi$. ..... 93

Figure II-9 – Comparaison de différentes signatures d'un modèle 3D, à partir des courbures $k1, k2$ calculées en chaque point (Canul-Ku et al., 2016) : (a) modèle sans coloration, (b) courbure maximale : $kmax = maxk1, k2$, (c) courbure minimale : $kmin = mink1, k2$, (d) courbure gaussienne : $kg = k1k2$, (e) index de forme $ks = 2\pi tan - 1k1 + k2k1 - k2$..... 93

Figure II-10 - Comparaison entre une signature calculée par courbures locales et par variation de surface (Pauly et al., 2002) : (a) modèle initial, (b) signatures estimées par la valeur moyenne des courbures, (c) signatures estimées par la variation de surface $\sigma 20$, (d) signatures estimées par la variation de surface $\sigma 50$..... 95

Figure II-11 - Illustration des coordonnées utilisées pour la définition de la signature cylindrique des points (Johnson, 1997). ..... 96

Figure II-12 – Spin images pour un modèle simple de canard (Johnson and Hebert, 1999). Le nuage de points du modèle 3D est représenté pour 3 points considérés par un graphique de coordonnées $\alpha$ et $\beta$. La quantité de points identifiée après avoir défini une discrétisation de l'espace 2D du graphique permet de construire les 3 spin-images associées aux 3 points considérés..... 97

Figure II-13 - Algorithme de la méthode ICP (Itérative Closest point). Le nuage de points source est déplacé de manière itérative vers le nuage de points cible. Quand les nuages de points sont suffisamment proches, l'algorithme est interrompu. ..... 100

Figure II-14 - Illustration des différentes étapes de la méthode Itérative Closest Point. La surface source est progressivement alignée sur la surface cible qui est fixe..... 101

Figure II-15 – Nuage de points décrivant une surface plane doublement rainurée, et comportant 10 201 points (Glira et al., 2015). ..... 102

Figure II-16 – Échantillonnage aléatoire à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015)..... 103

Figure II-17 – Méthode d'échantillonnage uniforme : (a) nuage de points source, (b) voxelisation uniforme du nuage de points, (c) calcul du barycentre de chaque voxel (en vert), (d) identification du point le plus proche (en rouge) de chaque barycentre. ..... 104

Figure II-18 - Échantillonnage uniforme à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015)..... 104

Figure II-19 - Échantillonnage isotropique à 10% sur une surface plane doublement rainurée (Glira et al., 2015)..... 105

Figure II-20 – Comparaison de 3 méthodes d'échantillonnage (Rusinkiewicz and Levoy, 2001) : (a) évolution de l'erreur d'alignement pour un échantillonnage aléatoire, uniforme et isotropique, (b) modèle 3D utilisé pour réaliser la registration avec les 3 méthodes d'échantillonnage étudiées..... 105

Figure II-21 – Après un alignement parfait, les positions terminales des points de contrôle du nuage source (en bleu) sont représentées en bleu clair sur le nuage cible. La méthode de correspondance choisie suppose que ces positions terminales sont proches des points les plus proches des points de contrôle dans le nuage cible (points verts désignés par les flèches noires)..... 107

Figure II-22 – Construction d'un arbre k-d : (a) l'espace 2D est divisé par un plan de normale $x$, positionné sur le nœud médian numéroté 2, (b) les sous-espaces obtenus sont divisés par des plans de normale $y$, positionnés sur les nœuds médians 8 et 9, (c) le partitionnement est poursuivi jusqu'à atteindre tous les points du nuage, (d) représentation de la partie initiale de l'arbre k-d obtenu. ..... 108

Figure II-23 – Correspondance par projection normale. ..... 109

Figure II-24 – Point correspondant euclidien versus point correspondant en 8D (Feldmar and Ayache, 1996) : (a) point le plus proche $N \in S2$ du point $M \in S1$ au sens euclidien, (b) point le plus proche $N \in S2$ du point $M \in S1$ en prenant en compte les coordonnées de la normale en $M$, ainsi que les courbures principales. .... 110

Figure II-25 – Invariants utilisés pour l'identification des points correspondants : courbures, moments tridimensionnels et harmoniques sphériques (Sharp et al., 2002)... 111

Figure II-26 – Histogramme des erreurs d'alignement pour 3 versions de méthode ICP (Johnson and Kang, 1999)..... 112

Figure II-27 – Modèles 3D avec non-recouvrement total des surfaces : (a) certains points de contrôle sont associés à des points les plus proches situés sur une frontière du modèle 3D cible, (b) ces points de contrôles sont donc situés sur des zones de non-recouvrement, ils sont alors supprimés du processus de registration..... 119

Figure II-28 – Bruit local situé autour d'un trou dans une tôle fine et situé sur le bord de cette tôle. ..... 119

Figure II-29 – Distance point-plan selon Chen et Médioni. L'erreur minimisée est la distance entre $TPs$, la transformée de $Ps$, et son point le plus proche $H$ sur le plan $\pi$. 122

Figure II-30 – Coordonnées homogènes d'un même point ("Homogeneous Coordinates," 2024)..... 125

Figure III-1 – Coïncidence de maillages : (a) nuage de points source et nuage de points cible construits à partir d'une même surface physique, (b) superposition exacte des deux surfaces, mais non coïncidence des nœuds des maillages. ..... 132

Figure III-2 - Erreur sur les distances calculées par la méthode point-point, entre 10 000 points aléatoires et le maillage d'une sphère de rayon 10 mm. La résolution maximale est égale à 0.207 mm. ..... 134

Figure III-3 - Approximation lors d'un calcul de distance point-point. Le point $HQi$ est ici le point le plus proche de $Qi$ sur $Sp$. La distance $dQi, Sp$ est différente de la distance $dQi, Pcp$..... 135

Figure III-4 - Schéma illustratif permettant la définition du lissage. ..... 137

Figure III-5 – Exemple de courbe Cp construite sur des points partiellement alignés. Au lieu d'une surface plane, le lissage possède une courbure inappropriée. ..... 138

Figure III-6 - Erreur sur les distances calculées entre 10 000 points aléatoires et une sphère de rayon 10 mm. La valeur $ep$ est égale à 0.005 mm. Le lissage est construit à partir des 12 points les plus proches..... 140

Figure III-7 – Modèles tridimensionnels de mailles : (a) maille $Li0$, construction CAO, désignation 30-6-3.4, (b) maille $Li4$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-7-3.4, (c) maille $Li5$, scan de maille réelle fortement usée, désignation 20-7-3.4. ..... 141

Figure III-8 – Erreurs maximales de calcul de distance en fonction de $m$, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $ep$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de construction CAO. En bleu les mailles $Li0/Li1$, en orange les mailles $Li0/Li2$ et en gris les mailles $Li0/Li3$. ..... 145

Figure III-9 – Erreurs maximales de calcul de distance en fonction de $m$, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $ep$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de scans de mailles réelles. En vert les mailles $Li4/Li4$ et en rouge les mailles $Li5/Li5$. ..... 145

Figure III-10 – Quantité de points rejetés en fonction de $m$, la quantité de points les plus proches utilisés pour le lissage polynomial, et avec $ep$ égal à 0.005 mm. Les maillages utilisés proviennent de scans de mailles réelles, car aucun calcul n'est rejeté dans le cas de modèles CAO. En vert les mailles $Li4/Li4$ et en rouge les mailles $Li5/Li5$. ..... 146

Figure III-11 – Schéma illustratif de la méthode de calcul mixte. ..... 147

Figure III-12 - Erreurs sur les distances calculées avec $ep$ égal à 5 $\mu m$, entre 10 000 points aléatoires et une sphère de rayon 10 mm. En dessous de la distance seuil, les distances sont calculées à partir de lissages sur 12 points. Au-dessus, les distances sont calculées par la méthode point-point. Quelques points de mesure induisent une erreur supérieure à l'erreur maximale attendue égale à 0.005 mm. ..... 149

Figure IV-1 - Points terminaux, points de contrôle et points les plus proches à chaque itération. ..... 154

Figure IV-2 - Mailles non corrodées - Distances moyennes pour $Li0$, $Li4$ et $Li5$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm$ ..... 157

Figure IV-3 - Mailles non corrodées - Écarts-types des distances pour $Li0$, $Li4$ et $Li5$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm.$ ..... 157

Figure IV-4 - Mailles CAO corrodées - Distances moyennes pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm$. Les distances attendues pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ sont respectivement égales à 0.05, 0.5 et 5 mm. ..... 159

Figure IV-5 - Mailles CAO corrodées – Écarts-types des distances pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm.$ ..... 159

Figure IV-6 - Surface corrodée et points terminaux après registration. Ces points, non situés sur $Sp$, ne peuvent pas être approché par les points les plus proches de $Qi$ sur $Sp$. ..... 160

Figure IV-7 - Augmentation d'une épaisseur $thk$ sur $Sq$ pour obtenir $Sq'$, puis registration de $Sq'$ sur $Sp$..... 161

Figure IV-8 – Méthode GC-ICP - Distances moyennes pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm$. Les distances attendues pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ sont respectivement égales à 0.05, 0.5 et 5 mm. ..... 162

Figure IV-9 - Méthode GC-ICP – écarts-types de distances pour $Li1$, $Li2$ et $Li3$ avec $Ry, Tx = 3°, 2\ mm.$ ..... 163

Figure IV-10 - Histogramme typique des distances entre une maille vieillie et une maille neuve. ..... 165

Figure IV-11 – Calcul de la médiane et suppression des distances supérieures à la médiane. On considère ici que les distances supérieures à la médiane sont trop affectées par les pertes de matière localisées pour permettre leur exploitation dans le but de calculer la distance de coupure. ..... 166

Figure IV-12 – Symétrisation des distances. Il est supposé que les bosses (peu nombreuses) affectent faiblement la partie inférieure de l'histogramme. En conséquence, l'histogramme des distances sans pertes de matière locale peut être reconstruit à partir de la symétrisation de sa partie inférieure, par rapport à la médiane.... 166

Figure IV-13 – Calcul de la distance de coupure $dc$ à partir de l'histogramme reconstruit. Par la suite, tous les points de contrôle, dont la valeur absolue de leur distance à $Sp$ sera supérieure à $dc$, seront supprimés de l'échantillon lors du processus itératif de registration. ..... 167

Figure IV-14 – Description des mailles CAO altérées localement. Les diminutions locales d'épaisseur sont représentées en jaune pour : (a) la maille $Li7$, (b) la maille $Li8$, et (c) la maille $Li9$. ..... 169

Figure IV-15 - Méthode WGC-ICP - Mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées - Distances moyennes pour $Li7$, $Li8$ et $Li9$ avec $Ry, Tx = 2°, 4\ mm$. ..... 169

Figure IV-16 - Méthode WGC-ICP - Mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées. Écarts-types des distances pour $Li7$, $Li8$ et $Li9$ avec $Ry, Tx = 2°, 4\ mm$. ..... 170

Figure IV-17 – Illustration d'un résultat de registration : (a) section XY de la superposition des mailles Li6 et Li9 avant registration, (b) section XY de la superposition des mailles Li6 et Li9 après registration par la méthode WGC-ICP. ..... 171

Figure IV-18 – Points de contrôle situés sur des pertes localisées de matière. Ces points sont identifiés par le filtre de la méthode WGC-ICP, et sont représentés en bleu : (a) et (b) maille $Li7$, (b) et (c) maille $Li8$, (c) et (d) maille $Li9$. ..... 172

Figure IV-19 – Mailles utilisées pour l'optimisation du nombre de points de contrôle. (a) Maille $Li0$, construction CAO, désignation 30-6-3.4. (b) Maille $Li4$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-7-3.4. (c) Maille $Li5$, scan de maille réelle fortement usée, désignation 20-7-3.4. (d) Maille $Dn01$, scan de maille réelle neuve, désignation 20-6-3.6. ..... 174

Figure IV-20 – Répartition aléatoire et répartition uniforme des points de contrôle pour les mailles $Li5$ et $Dn01$ : (a) et (b) 40 points de contrôle, (c) et (d) 400 points de contrôle. ..... 175

Figure IV-21 – Temps de calcul en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition uniforme. ..... 176

Figure IV-22 – Nombre d'itérations en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition uniforme. ..... 176

Figure IV-23 - Temps de calcul en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition aléatoire. ..... 177

Figure IV-24 - Nombre d'itérations en fonction de la quantité choisie de points de contrôle par la méthode de répartition aléatoire. ..... 177

Figure V-1 – Chaînes avant immersion : (a) chaîne brute, sans étai, de type 20-7-3.6, et utilisée par les Phares & balises, (b) chaîne coaltarée, avec étais, de type 14-6-3.6, et utilisée par la Marine nationale. ..... 181

Figure V-2 - Bouées associées aux chaînes étudiées : (a) Saint Quay-Portrieux, (b) Lézardrieux, et (c) Landévennec. ..... 181

Figure V-3 – Numérisation des mailles situées en cul de bouée, à l'état neuf : (a) maille Stquai_1, (b) maille Lezard_1 et (c) maille Lande_1. ..... 182

Figure V-4 – Coupe XY des mailles Lande1 (en noir) et lande2 (en rouge). ..... 185

Figure V-5 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Lande1 (en noir) et Lande2 (en rouge). ..... 185

Figure V-6 - Coupe XY des mailles Stquai1 (en noir), Stquai2 (en rouge) et Stquai3 (en vert). ..... 186

Figure V-7 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Stquai1 (en noir), Stquai2 (en rouge) et Stquai3 (en vert). ..... 186

Figure V-8 - Coupe XY des mailles Lezard1 (en noir), Lezard2 (en rouge) et Lezard3 (en vert). ..... 187

Figure V-9 - Coupe XZ (x>0) des cintres des mailles Lezard1 (en noir), Lezard2 (en rouge) et Lezard3 (en vert)..... 187

Figure V-10 - Histogramme des distances calculées entre Lande_2 et Lande_1 : (a) sans filtre et (b) avec filtre..... 188

Figure V-11 - Histogramme des distances calculées entre Stquai_3 et Stquai_1 : (a) sans filtre et (b) avec filtre..... 188

Figure V-12 - Histogramme des distances calculées entre Lezard_3 et Lezard_1 : (a) sans filtre, et (b) avec filtre..... 188

Figure V-13 – Sections de la maille Stquai_1 après réécriture des coordonnées du maillage dans le repère général défini en Annexe A. ..... 191

Figure V-14 - Colorisation des distances pour la maille Stquai_2..... 192

Figure V-15 - Colorisation des distances pour la maille Stquai_3..... 192

Figure V-16 - Colorisation des distances pour la maille Lezard_2..... 193

Figure V-17 - Colorisation des distances pour la maille Lezard_3..... 193

Figure V-18 – Lissage des couleurs : (a) sans lissage, (b) avec lissage. À la suite du lissage sur les 10 points les plus proches, un très faible nombre de nœuds restent encore en défaut. ..... 194

Figure V-19 - Identification des usures de contact (en jaune) pour la maille Stquai_3. La distance de coupure calculée est égale à 1.05 mm..... 195

Figure V-20 - Identification des usures de contact (en jaune) pour la maille Lezard_3. La distance de coupure calculée est égale à 0.86 mm..... 195

Figure V-21 - Histogramme des distances pour Stquai_3 et distance de coupure associée en rouge. ..... 196

Figure V-22 - Histogramme des distances pour Lezard_3 et distance de coupure associée en rouge. ..... 196

Figure A - Repère local d'une maille..... 229

Figure B - Vocabulaire associé à la géométrie d'une maille ..... 230

Figure C - Vocabulaire associé aux mouvements de la chaîne ..... 231

# TABLE DES TABLES

Table 1 - Avantages et inconvénients de l'utilisation des chaînes d'ancrage. ..... 19

Table 2 - Dimensions et tolérances des mailles avec et sans étai selon ISO 1704 et IACS W22. ..... 22

Table 3 - Tolérances géométriques admises selon ISO 1704 et IACS W22. ..... 23

Table 4 - Propriétés mécaniques (hors résilience et dureté) des aciers à chaînes selon IACS W22 et IACS W18..... 25

Table 5 - Dénominations des grades pour les chaînes de mouillage de navires et pour les chaînes d'ancrage offshore. ..... 25

Table 6 - Composition chimique préconisée pour les chaînes de mouillage des navires selon IACS W18. ..... 26

Table 7 – Coefficients de charge de rupture, coefficients de charge d'épreuve selon IACS W22 et W18, et ratio associé en %. Les valeurs pour les mailles sans étais sont indiquées entre parenthèses, si elles diffèrent des mailles avec étais. Les chargements en kN sont obtenus par la multiplication de ces coefficients par la valeur $d^2(44-0.08d)$ avec d, le calibre de la maille en mm. ..... 27

Table 8 - Vérification en fatigue selon le Bureau Veritas (Bureau Veritas, 2015) et selon le Det Norske Veritas (Det Norske Veritas, 2010), respectivement courbes T-N et S-N. ..... 34

Table 9 – Scan 3D d'une pomme : comparaison de la taille sur le disque des fichiers 3D paramétrés avec des résolutions différentes (format STL). ..... 63

Table 10 – Publications sur les 20 dernières années ayant pour objet une synthèse sur les méthodes d'alignement. ..... 79

Table 11 – Distances avec lissages : erreurs de calcul sur une sphère de rayon égal à 10 mm. ..... 139

Table 12 - Caractéristiques des mailles permettant l'application de la méthode de calcul de distances avec lissages. La résolution des maillages est notée $bs$. ..... 141

Table 13 – Résultats des calculs de distances réalisés avec lissages sur des mailles CAO (en bleu) et réelles (en orange). ..... 142

Table 14 - Erreur maximale en $\mu m$ obtenue pour 1000 points de calculs de distances par la méthode avec lissages et avec un nombre de points $m$ égal à 12. En bleu les maillages issus de modélisation CAO, en orange les maillages issus de scans réels. ..... 144

Table 15 – Nombre de points rejetés pour 1000 points de calculs de distances par la méthode avec lissages et avec un nombre de points $m$ égal à 12. Seuls les scans réels sont répertoriés, car aucun calcul n'est rejeté pour les maillages issus de modélisations CAO. ..... 144

Table 16 – Résultats avec la méthode de calcul de distance mixte pour 10 000 calculs de distance sur une sphère. ..... 148

Table 17 – Tests de la méthode ICP implémentée sur des mailles identiques, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances. ..... 157

Table 18 - Tests de la méthode ICP implémentée sur des mailles corrodées, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances. ..... 158

Table 19 – Tests de la méthode GC-ICP implémentée sur des mailles corrodées, faiblement déplacées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances. ..... 162

Table 20 - Caractéristiques des mailles $Li6$, $Li7$, $Li8$ et $Li9$ utilisées pour les tests de la méthode WGC-ICP, avec $bs$, la résolution des maillages, et $thk$, l'épaisseur de corrosion généralisée. ..... 168

Table 21 – Résultats de la méthode WGC-ICP pour des mailles CAO avec corrosion généralisée et altérations localisées. Quantité d'itérations, temps de calcul et résultats statistiques sur les distances. ..... 169

Table 22 - Caractéristiques des mailles $Li0$, $Li4$, $Li5$ et $Dni$. Les mailles $Dni$ sont construites à partir d'un scan de maille de chaîne réelle, mais avec des résolutions différentes. ..... 174

Table 23 – Détails associés aux chaînes immergées en 2019. Les chaînes C1 et C2 n'ont pas pu être étudiées, car elles ont été accidentellement détruites dès la première année d'immersion. ..... 180

Table 24 – Dénomination des mailles et durées d'immersion. ..... 182

Table 25 - Caractéristiques des scans utilisés pour l'application de la méthode WGC-ICP sur des mailles réelles : résolution $bs$, nombre de sommets du maillage $np$ et taille des fichiers associés. ..... 183

Table 26 – Résultats statistiques des tests réalisés par la méthode WGC-ICP sur des mailles réelles. Les lignes grises correspondent aux valeurs filtrées. ..... 184

# ANNEXE A Repère local

Le repère local orthonormé associé à une maille de chaîne est défini en Figure A.

- L'origine est située au centre géométrique de la maille.
- L'axe $\vec{x}$ est dirigé suivant la plus grande longueur de la maille et est orienté vers le fond de la mer.
- L'axe $\vec{y}$ est dirigé latéralement vers la soudure.
- L'axe $\vec{z}$ est l'axe complémentaire, déduit de $\vec{x}$ et $\vec{y}$.
- Le plan dit « principal » de la maille est le plan $(O, \vec{x}, \vec{y})$

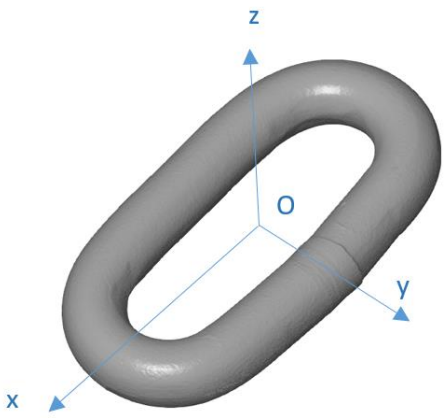



*Figure A - Repère local d'une maille.*

# ANNEXE B Vocabulaire associé à la géométrie d'une maille

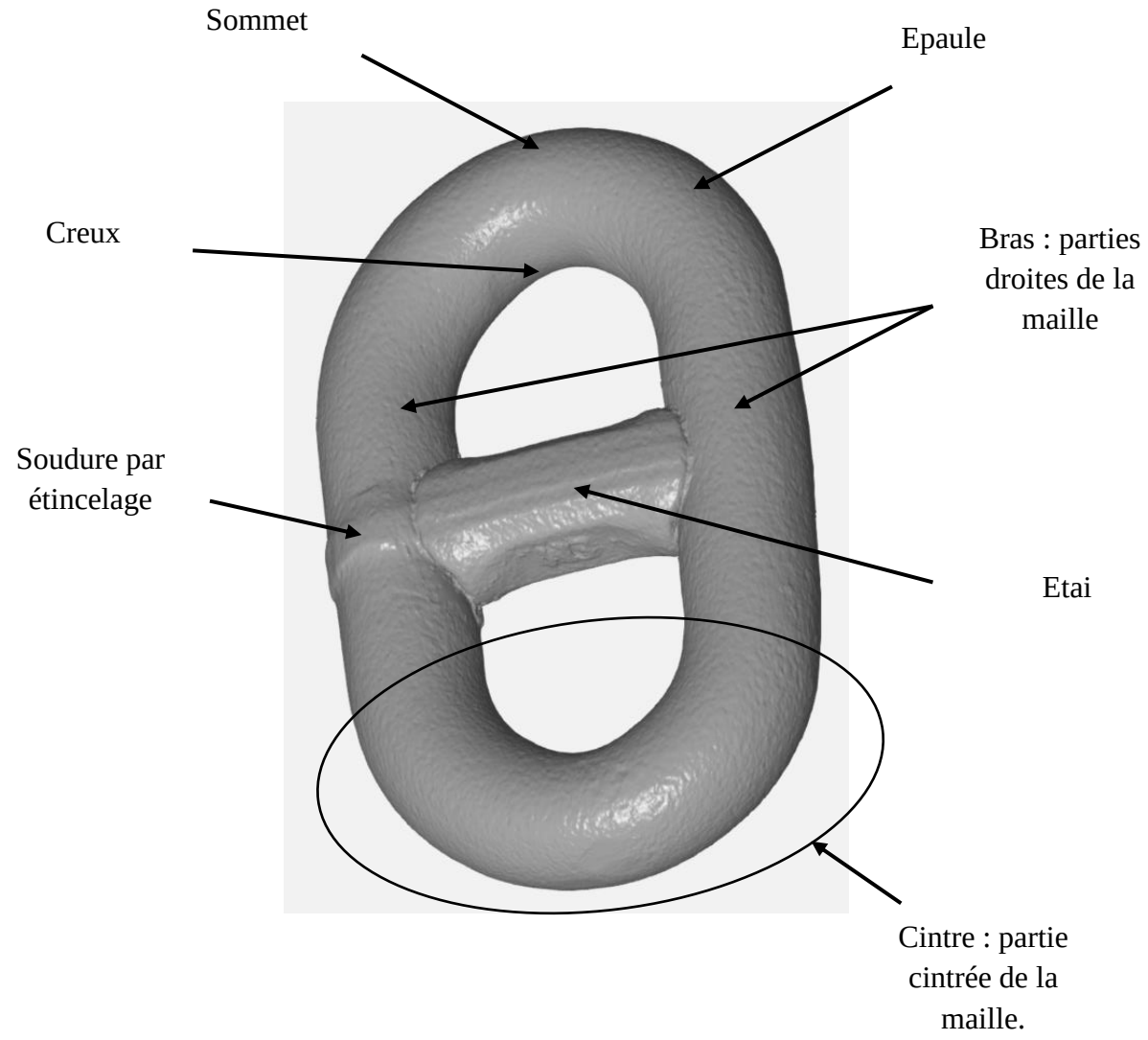



*Figure B - Vocabulaire associé à la géométrie d'une maille.*

# ANNEXE C Vocabulaire associé aux mouvements de la chaîne

Soit $R1(C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ un repère associé à la maille violette, considérée fixe. La base de ce repère est identique à celle proposée en Annexe A. Le point $C$ est le point de contact « au repos » entre la maille bleue et la maille violette. On s'intéresse ici aux mouvements de la maille bleue par rapport à la maille violette pour définir des typologies générales de mouvements de chaîne.

- « Torsion » de chaîne : rotation $R(C, \vec{x})$ de la maille bleue
- « Flexion uniaxiale » : rotation $R(C, \vec{z})$ ou $R(C, \vec{y})$ considérées seules. La chaîne se déforme alors dans un seul plan.
- « Flexion multiaxiale » : rotations $R(C, \vec{z})$ et $R(C, \vec{y})$ simultanément. La déformée est tridimensionnelle.

Notons que les définitions des mouvements ici décrits sont très simplifiées, car, en pratique, une maille roule ou glisse au niveau du contact.

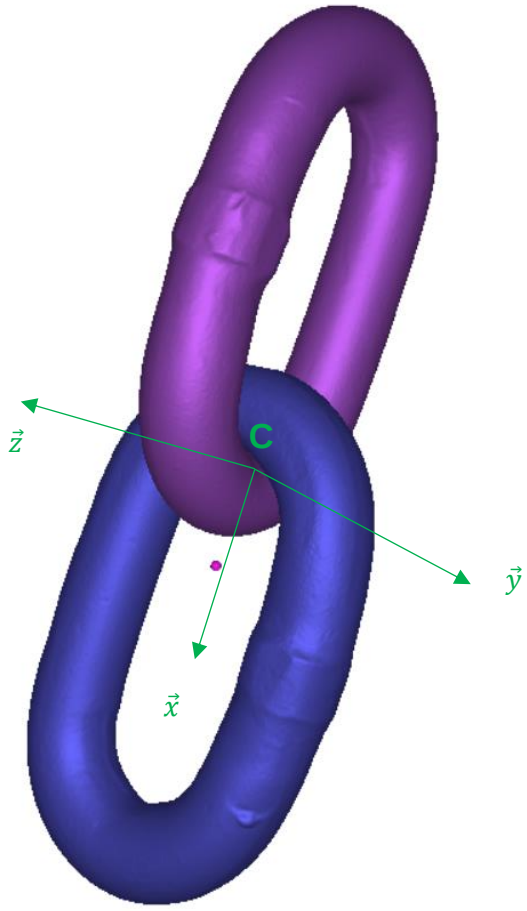



*Figure C - Vocabulaire associé aux mouvements de la chaîne.*

COLLEGES SCIENCES
BRETAGNE POUR L'INGENIEUR
LOIRE ET LE NUMERIQUE

ENSTA BRETAGNE

**Titre** : Développement d'une méthode de mesure tridimensionnelle pour l'identification de l'usure de contact et de la corrosion généralisée de mailles de chaines d'ancrage vieillies en milieu marin

**Mots clés :** Corrosion, Usure, Scanner 3D, Registration, Ancrage marin

**Résumé :** L'observation de l'évolution géométrique tridimensionnelle de mailles de chaînes d'ancrage ayant séjourné en milieu marin peut être réalisée par l'utilisation de scanners 3D. À la suite de relevés successifs, il est ainsi possible d'identifier précisément la localisation, les formes et les quantités de matière perdue par corrosion ou par usure. Cependant, ces identifications ne sont possibles qu'après alignement des scans obtenus, car ils ne sont pas exprimés dans les mêmes repères. Les algorithmes usuels d'alignement de nuages de points n'étant pas adaptés au problème rencontré, le travail réalisé met en œuvre un algorithme nouveau décliné de la méthode itérative du point le plus proche (ICP). Le processus itératif d'alignement développé déplace le nuage de point correspondant à la maille vieillie, sur la maille neuve, après détection et suppression des points situés dans les zones de pertes de matière localisées (corrosion par piqûre ou usure), et après augmentation en épaisseur des surfaces restantes d'une valeur correspondant à la perte de matière par corrosion généralisée, supposée constante.

Les tests réalisés à partir de maillages parfaits, provenant de constructions CAO, montrent une bonne convergence du processus d'alignement et une très bonne précision des positionnements obtenus. Les tests réalisés à partir de scans de pièces réelles montrent une bonne convergence du processus itératif et une précision suffisante au regard des objectifs de travail, mais à condition que l'hypothèse de corrosion généralisée puisse être réellement validée.

De futurs travaux peuvent être désormais envisagés pour améliorer les connaissances sur le vieillissement des chaînes d'ancrage, ou toute autre pièce mécanique ayant subi les mêmes types d'agressions physico-chimiques.

**Title :** Development of a three-dimensional measurement method to detect fretting and generalized corrosion of aged anchor chain links in a marine environment

**Keywords :** Corrosion, Wear, 3D Scanner, Registration, Marine anchoring

**Abstract :** The observation of the three-dimensional geometrical evolution of mooring chain links exposed to the marine environment can be achieved by using 3D scanners. Successive surveys make it possible to precisely identify the location, shapes and quantities of material loss by corrosion or fretting in interlink contact areas. However, these identifications are only possible after an alignment of the obtained scans, because they are not expressed in the same reference marks. The usual point cloud alignment algorithms not being adapted to the problem encountered, the carried-out work implements a new algorithm based on the iterative closest point method (ICP). The developed iterative process of alignment, moves the point cloud corresponding to the aged link onto the new link, after detecting and deleting the points located in the areas of localized material losses (pitting corrosion or wear), and after adding an extra layer on the remaining surfaces, of a value corresponding to the loss of material by a generalized corrosion assumed to be constant.

The tests carried out on perfect meshes from CAD designs show good convergence of the alignment process and very good accuracy of the positions obtained. The tests carried out using scans of real parts show good convergence of the iterative process and sufficient accuracy to meet the objectives of the work, provided that the generalised corrosion hypothesis can be validated.

Future work can now be envisaged to improve our knowledge of the ageing of anchor chains or any other mechanical part subjected to the same types of physico-chemical aggressions.