



Modélisation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe

Jawad Badreddine

► To cite this version:

Jawad Badreddine. Modélisation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes, 2014. Français. NNT : 2014TROY0015 . tel-03356102

HAL Id: tel-03356102

<https://theses.hal.science/tel-03356102>

Submitted on 27 Sep 2021

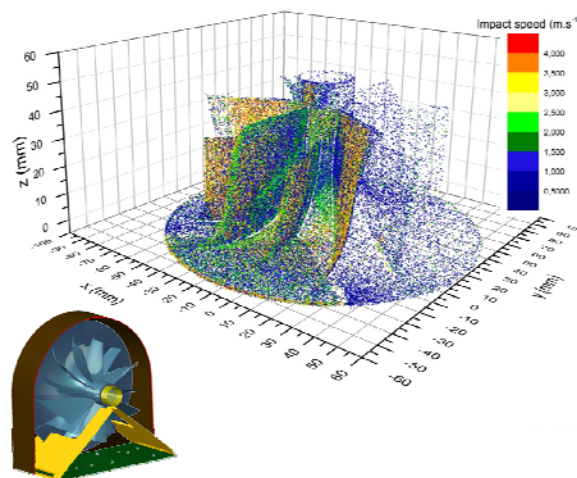
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Jawad BADREDDINE

Modélisation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe



Spécialité :
Systèmes Mécaniques et Matériaux

2014TROY0015

Année 2014

THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES Spécialité : SYSTEMES MECANQUES ET MATERIAUX

présentée et soutenue par

Jawad BADREDDINE

le 4 avril 2014

Modélisation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe

JURY

M. P. VIOT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. G. KERMOUCHE	PROFESSEUR ENSM SAINT ETIENNE	Rapporteur
M. M. LÉVESQUE	PROFESSEUR AGREGÉ	Examineur
M. M. MICOULAUT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Examineur
Mme C. NOUGUIER-LEHON	MAITRE DE CONFERENCES	Examineur
M. J.-P. PERNOT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. S. REMY	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directeur de thèse
Mme E. ROUHAUD	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directeur de thèse

Personnalités invitées

M. V. DESFONTAINE	INGENIEUR
M. P. RENAUD	DOCTEUR
M. J. TALBOT	DIRECTEUR DE RECHERCHE CNRS

Remerciement

Les présents travaux se sont déroulés au sein du Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS) de l'université de technologie de Troyes (UTT) et au sein de l'entreprise SONATS, en étroit partenariat avec le Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée (LPTMC) de l'université Pierre et Marie Curie (UPMC) et l'entreprise SNECMA du groupe SAFRAN.

Tout d'abord, j'exprime ma plus grande gratitude à Emmanuelle Rouhaud d'avoir cru en moi et de m'avoir donné l'opportunité et les moyens pour arriver là, ainsi que sa forte implication dans ces travaux. Je tiens également à remercier mes directeurs de thèse, Matthieu Micoulaut et Sébastien Remy pour leur encadrement, implication et soutien sans faille. Merci à vous trois de m'avoir fait confiance, soutenu dans les choix que j'ai pu entreprendre pendant la thèse et surtout pour tout ce que vous m'avez enseigné !

Je souhaite aussi remercier Vincent Desfontaine et Frédéric Chateau de SONATS, employeur pendant la thèse, pour leur encadrement et soutien infaillible tout au long de la thèse. Mes remerciements vont également à Pierre Renaud, Gaëlle Doubre-Baboeuf, Mathieu Prioul et Didier Le Saunier de SNECMA, second partenaire industriel, pour leur soutien constant et pour tous les échanges qui ont permis d'atteindre avec succès les objectifs scientifiques et techniques de la thèse.

J'adresse un grand merci à l'ensemble des membres du jury de thèse (président, rapporteurs, examinateurs et invités) d'avoir accepté d'examiner mes travaux, mais également pour leurs remarques constructives et pour tous les échanges très intéressants que nous avons eu.

Par cette même occasion, je remercie le LASMIS de m'avoir accueilli entre ses murs et l'ensemble de son personnel pour la super bonne humeur qui y règne : Laurent, Manuel, Delphine, Donato, Benoit, Alain, tous les Guillaumes, Pierre-Antoine, Nicole, Jérôme, Léa, Bruno, Pascal, Khémais, Carl..., ainsi que mes collègues doctorants que j'ai côtoyé : Wiem, Jérôme, MingChua, Souhail, Mahdi, Alix, Amélie, Guillaume, Yosr, Jawhar, Song... À cette longue liste s'ajoute l'ensemble des personnes de l'UTT (tous statuts confondus) que j'ai aussi eu le plaisir de côtoyer à travers différentes instances (ElliDoc, Conseils Scientifique, d'Administration, de l'Ecole Doctorale et de la documentation) et manifestations (Remise des diplômes, Forum des Doctorants, la Fête de la Science, Forum UTT-Entreprises, soirées ElliDoc...) aux quelles j'ai participé : Abeer, Nancy, Irene, Andre, Marcelina, Elias, Jérémie, Guillaume, Matthieu, Rémi, Julien, Delphine, Raphael, Sébastiane, Alex, Thomas, Florent, Cathel, Zineb, Margrette, Christine, Stéphanie, Laure...

Je tiens également à remercier mes collègues de SONATS : Charlie, Paul, Gwenan, Juliette, Thomas, Alexandre, Matthieu, Sébastien Baboneau et Chatelain, Bertrand, Philippe, Nathalie, Fabien, Ivan, Benoit, Lionel et tous ceux et celles qui ont fait de mon passage à SONATS une expérience enrichissante et mémorable !

Et enfin, une profonde pensée va à ma famille qui m'a soutenu dans mes choix tout au long de mes études. Miriam, ma moitié, merci à toi pour ton soutien formidable et de m'avoir supporté lors de la dernière ligne droite de ma thèse. Enfin, une pensée à Cunégonde, la machine à café du LASMIS, qui m'a maintenu éveillé jusqu'au bout.

À mes parents,

À Miriam,

À Cunégonde.

« I have no special talent. I am only passionately curious »

– *Albert Einstein* –

Résumé

Le grenaillage ultrason est un procédé mécanique de traitement de surfaces. Il consiste à projeter des billes à la surface de pièces métalliques, à l'aide d'un système acoustique vibrant ultrasonore. Lors du traitement, les billes sont contenues dans une enceinte spécialement conçue pour la pièce à traiter, et adoptent un comportement similaire à celui d'un gaz granulaire vibré. Le grenaillage ultrason sert à introduire des contraintes résiduelles de compression dans le matériau traité. Ces contraintes de compression sont bénéfiques pour la tenue en fatigue de la pièce et sa résistance à la corrosion sous contraintes.

L'objectif des présents travaux de thèse consiste à modéliser la dynamique des billes pendant le traitement, et pour des pièces et géométries complexes. En effet, depuis son industrialisation, la mise au point du procédé se fait de manière empirique qui, avec la complexification des pièces mécaniques traitées pousse cette approche à ses limites. La mise au point peut donc s'avérer coûteuse en temps et aboutir à une solution partiellement optimisée.

Ainsi, le modèle développé donne accès à une compréhension détaillée du grenaillage ultrason dans des conditions de traitement industrielles. Il constitue pour la première fois un outil d'aide à la conception des enceintes de traitement, offrant la possibilité d'une meilleure maîtrise et optimisation du traitement, tout en réduisant les coûts de mise au point. La seconde contribution est de fournir aux modèles de prédiction des contraintes des données fiables et réalistes.

Mots clés : Grenaillage de précontrainte, Mécanique statistique hors d'équilibre, Conception assistée par ordinateur, CATIA (logiciel).

Abstract

Ultrasonic shot peening is a mechanical surface treatment process. It consists on projecting spherical shot onto a metallic surface, using an ultrasonic accoustic system. During the treatement, the shot are contained in a chamber, specially designed for the peened part, and behave similarely to a vibrated granular gas. Ultrasonic shot peening is used to introduce compressive residual stresses in the peened material. These compressive stresses help increasing the fatigue life span of the part and its resistance to stress corrosion cracking.

The objectif of the present work consists on modeling the shot dynamics of the shot during the traitement, and for complex parts and geometries. Since its industrialization, the choice of the process parameters is done experimentally with trial and error. And with the ever increasing complexity of the peened parts, this approach is reaching its limits; thus becoming sometimes time consuming and providing partially optimized solutions.

Therefore, the developped model gives access to a detailed understanding of ultrasonic shot peening in industrial treatment conditions. It represents for the first time a support tool for the design of peening chambers. This offers the possibility of a better control and optimization of the process, while reducing development costs. The second contribution lies in the model capacity to provide reliable and realistic input data to residual stresses prediction models.

Key words: Shot peening, Nonequilibrium statistical mechanics, Computer-aided design, CATIA (Computer file).

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité SI
(X,Y,Z)	Système global de coordonnées	
(a,b,c)	Système de coordonnées local associé à une pièce tournante	
(t,o,n)	Système de coordonnées local associé à triangle de maillage	
A	Amplitude de vibration de la sonotrode	μm
B	Largeur de l'enceinte prismatique suivant Y	mm
$C_i(V_n)$	Coefficient de restitution normal de i , correspondant à une vitesse normale d'impact V_n	
C_i^0	Coefficient de restitution normal seuil de i , correspondant à des vitesses normales d'impacts inférieures à V_i^0	
D	Diamètre des billes	mm
dt	Intervalle de temps séparant deux positions successives d'une bille	s
dx	Distance suivant X séparant deux positions successives d'une bille	mm
dy	Distance suivant Y séparant deux positions successives d'une bille	mm
dz	Distance suivant Z séparant deux positions successives d'une bille	mm
Fr	Fréquence de vibration de la sonotrode	s^{-1}
H	Hauteur de l'enceinte suivant Z	mm
L	Longueur de l'enceinte prismatique suivant X	mm
L_P	Libre parcours moyen d'une bille	mm
M	Masse totale des billes	g
M_{bille}	Masse d'une seule bille	g
N	Nombre total de billes	
R	Recouvrement de la pièce grenailée, exprimé en pourcents	
R_{cyl}	Rayon de l'enceinte cylindrique	mm
V	Module du vecteur vitesse d'une bille	m.s^{-1}
V_n	Vitesse normale d'impact d'une bille	m.s^{-1}
V_k^0	Vitesse normale d'impact seuil, en dessous de laquelle une collision est considérée purement élastique	m.s^{-1}
V_{moy}	Vitesse normale d'impact moyenne, calculée sur la durée traitement	m.s^{-1}
V_{RES}	Vitesse de résonance des billes	m.s^{-1}
V_x	Vitesse d'une bille suivant X	m.s^{-1}
V_y	Vitesse d'une bille suivant Y	m.s^{-1}
V_z	Vitesse d'une bille suivant Z	m.s^{-1}
Symboles grecques	Définition	Unité SI
α	Angle d'inclinaison de la pièce grenailée pour l'enceinte prismatique	deg
β	Angle d'impact	deg
μ	Coefficient de restitution tangentiel	
Indices	Définition	Unité SI
k	Objet auquel sont appliqués les coefficients de restitution; $k = [\text{Billes}, \text{Sonotrode}, \text{Pièce}, \text{Enceinte}]$	

Acronymes	Définition
<i>GUS</i>	Grenailage ultrason
<i>GC</i>	Grenailage conventionnel
<i>CAO</i>	Conception assistée par ordinateur
<i>OPCODE</i>	Optimized collision detection – librairie C++ de détection des collisions
<i>MED</i>	Méthode des éléments discrets
<i>MEF</i>	Méthode des éléments finis
<i>DAM</i>	Disque Aubagé Monobloc

Table des matières

INTRODUCTION	1
1. CONTEXTE GENERAL	1
1.1. <i>Partenaires industriels</i>	2
1.1.1. SONATS – Groupe Europe Technologies	2
1.1.2. SNECMA – Groupe SAFRAN	2
1.2. <i>Partenaires académiques</i>	2
1.2.1. ICD-LASMIS, UMR CNRS 6281	2
1.2.2. LPTMC, UMR CNRS 7600	3
2. ENJEUX ET BESOIN	3
3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	5
4. STRUCTURE DU MANUSCRIT	5
CHAPITRE I – BIBLIOGRAPHIE	7
1. GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTES	7
1.1. <i>Historique des procédés mécaniques de traitement de surface</i>	7
1.2. <i>Grenaillage conventionnel</i>	11
1.2.1. Principe de fonctionnement	11
1.2.2. Technologies existantes	11
1.2.3. Paramètres procédé	12
1.3. <i>Grenaillage ultrason</i>	12
1.3.1. Principe de fonctionnement	12
1.3.2. Paramètres procédé	13
1.4. <i>Critères de contrôle du grenaillage</i>	14
1.4.1. Recouvrement	14
1.4.2. Flèche et intensité Almen	14
1.4.3. Contraintes résiduelles	16
2. GAZ GRANULAIRES	17
2.1. <i>Propriétés physiques</i>	18

2.2.	<i>Quel intérêt pour le grenailage ultrasons ?</i>	19
3.	TRAVAUX EXISTANTS SUR LA MODELISATION DU GRENAILLAGE ULTRASON	19
3.1.	<i>Modélisation de Pilé et al. (2005)</i>	20
3.1.1.	Hypothèses	20
3.1.2.	Possibilités offertes par le modèle	20
3.1.3.	Principaux résultats obtenus	21
3.1.4.	Limitations et inconvénients	21
3.2.	<i>Modélisation de Micoulaut et al. (2007)</i>	21
3.2.1.	Hypothèses	21
3.2.2.	Possibilités offertes par le modèle	22
3.2.3.	Principaux résultats obtenus	23
3.2.4.	Limitations et inconvénients	23
3.3.	<i>Modélisation de Thümmeler et al. (2012)</i>	23
3.3.1.	Hypothèses et paramètres	23
3.3.2.	Possibilités offertes par le modèle	24
3.3.3.	Principaux résultats obtenus	25
3.3.4.	Limitations et inconvénients	25
3.4.	<i>Modélisation de Nouquier-Lehon et al. (2012)</i>	25
3.4.1.	Paramètres de simulation	25
3.4.2.	Possibilités offertes par le modèle	26
3.4.3.	Principaux résultats obtenus	26
3.4.4.	Limitations et inconvénients	27
4.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	27
4.1.	<i>Rappel des problématiques et besoins évoqués</i>	27
4.2.	<i>Démarche adoptée</i>	28
	CHAPITRE II – MODELISATION DU GUS POUR DES GEOMETRIES SIMPLES	29
1.	MODELE 3D ANALYTIQUE	29
1.1.	<i>Algorithme évènementiel – ‘Event-Driven’</i>	29
1.2.	<i>Description géométrique</i>	30

1.3.	<i>Détection et gestion des collisions</i>	31
1.3.1.	Coefficients de restitution	32
1.3.2.	Collisions entre billes	32
1.3.3.	Collisions Bille – Paroi immobile	33
1.3.4.	Collisions Bille – Sonotrode	34
1.3.5.	Calcul du pas de temps	35
2.	SENSIBILITE AUX CONDITIONS INITIALES	35
3.	COEFFICIENTS DE RESTITUTION NORMAUX	38
3.1.	<i>Quel intérêt pour ces coefficients ?</i>	38
3.2.	<i>Configuration de l'étude numérique</i>	40
3.3.	<i>Collisions Bille-Enceinte</i>	40
3.4.	<i>Collisions Bille-Pièce</i>	41
3.5.	<i>Collisions Bille-Sonotrode</i>	42
3.6.	<i>Collisions Bille-Billes</i>	43
4.	INFLUENCE DES PARAMETRES PROCEDE SUR LA DYNAMIQUE DES BILLES	44
4.1.	<i>Études numériques approfondies</i>	45
4.2.	<i>Distribution des impacts</i>	46
4.3.	<i>Vitesses d'impact</i>	49
4.3.1.	Distributions statistiques	49
4.3.2.	Distributions spatiales	51
4.4.	<i>Angles d'impact</i>	54
4.4.1.	Distributions statistiques	54
4.4.2.	Distributions spatiales	55
4.5.	<i>Corrélation angle-vitesse d'impact</i>	56
4.6.	<i>Trajectoires des billes</i>	57
4.7.	<i>Libre parcours moyen</i>	59
5.	CONCLUSIONS DU CHAPITRE	61
CHAPITRE III – MODELISATION DU GUS POUR DES GEOMETRIES COMPLEXES		63
1.	MODELE 3D	63

Table des matières

1.1.	<i>Cahier des charges</i>	63
1.2.	<i>Hypothèses du modèle</i>	64
1.3.	<i>Algorithme</i>	67
2.	ÉTUDE DE PERFORMANCES NUMERIQUES	71
2.1.	<i>Dépendance au maillage</i>	71
2.2.	<i>Temps global de simulation</i>	72
2.3.	<i>Comparaison avec les travaux de Nouguier-Lehon et al. (2012)</i>	76
3.	INTÉGRATION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DES ENCEINTES	78
3.1.	<i>Démarche globale</i>	79
3.2.	<i>Préparation de la mise en donnée</i>	80
3.2.1.	Modèle CAO	80
3.2.2.	Extraction des surfaces fonctionnelles	81
3.2.3.	Regroupement et structuration des surfaces extraites	81
3.2.4.	Maillages	82
3.2.5.	Données matériaux	82
3.3.	<i>Interfaces utilisateurs dans CATIA® v5 R18</i>	82
3.3.1.	Lancer une nouvelle étude	83
3.3.2.	Éditer/relancer une étude existante	84
3.3.3.	Post-traitement des résultats de calcul	85
3.4.	<i>Module de simulation : GUSimu</i>	86
3.4.1.	‘Mode_Console’	86
3.4.2.	‘Mode_3D’	86
3.4.3.	Données accessibles en temps-réel	87
3.4.4.	Données brutes de sortie	87
3.5.	<i>Module de post-traitement : GUSanalysis</i>	88
4.	SYNTHÈSE DU CHAPITRE	89
CHAPITRE IV – ÉTUDES EXPERIMENTALES		91
1.	QUE MESURE-T-ON ET COMMENT ?	91
1.1.	<i>Recouvrement</i>	91

Table des matières

1.1.1.	Techniques d'évaluation existantes	91
1.1.2.	Technique d'évaluation proposée	93
1.2.	<i>Trajectoires de billes</i>	94
1.2.1.	Techniques d'évaluation existantes	94
1.2.2.	Technique expérimentale proposée	97
2.	ÉTUDES DE FAISABILITE DES METHODES EXPERIMENTALES PROPOSEES	99
2.1.	<i>Essais réalisés et résultats obtenus</i>	100
2.2.	<i>Recouvrement expérimental</i>	101
2.3.	<i>Distribution des vitesses normales d'impact</i>	102
2.4.	<i>Discussions et améliorations</i>	103
3.	ESSAIS SUR UNE ROUE DENTEE A DENTURE DROITE	104
3.1.	<i>Détail du montage expérimental</i>	104
3.2.	<i>Détail de simulation</i>	104
3.3.	<i>Résultats obtenus</i>	105
3.3.1.	Étude initiale : coefficients « arbitraires »	105
3.3.2.	Étude corrigée : coefficients expérimentaux	107
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES		111
1.	CONCLUSIONS D'ORDRE NUMERIQUE	111
1.1.	<i>Modèle analytique pour géométries simples</i>	111
1.2.	<i>Modèle pour géométries complexes</i>	111
2.	CONCLUSIONS D'ORDRE EXPERIMENTAL	112
3.	PERSPECTIVES GENERALES	113
3.1.	<i>Coefficients de restitution</i>	113
3.2.	<i>Prédiction des contraintes résiduelles</i>	113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		115
ANNEXES		123

Introduction

Le grenaillage ultrason est un procédé mécanique de traitement de surfaces. Le procédé consiste à projeter des billes de forte dureté à la surface de pièces métalliques, à l'aide d'un système acoustique vibrant à des fréquences ultrasonores. Lors du traitement, les billes sont contenues dans une enceinte, spécialement conçue pour la pièce à traiter, et adoptent un comportement similaire à celui d'un gaz granulaire vibré. Quant à son utilité, le grenaillage ultrason sert à introduire des contraintes résiduelles de compression en surface du matériau traité, sous l'effet des impacts de billes. L'effet de ses contraintes de compression est bénéfique pour la tenue en fatigue de la pièce et pour sa résistance à la corrosion sous contraintes.

L'objectif des présents travaux de thèse consiste à modéliser la dynamique des billes pendant le traitement, et pour des pièces et géométries complexes. En effet, depuis son industrialisation, la mise au point du procédé se fait de manière empirique qui, avec la complexification des pièces mécaniques traitées, pousse cette approche à ses limites. La mise au point peut donc s'avérer coûteuse en temps et aboutir à une solution partiellement optimisée.

1. Contexte général

Le présent mémoire est le fruit de trois années de recherche réalisées au sein du **Laboratoire de Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (ICD-LASMIS, UMR CNRS 6281)** de l'**Université de Technologie de Troyes (UTT)**, dans le cadre d'une thèse CIFRE en partenariat avec l'entreprise **SONATS** du groupe **Europe Technologies**. Ce projet s'inscrit dans un projet de recherche plus large qui regroupe les deux organismes cités ci-dessus, mais également le **Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée (LPTMC, UMR CNRS 7600)** de l'**Université Pierre et Marie Curie (UPMC)** et l'entreprise **SNECMA** du groupe **SAFRAN**. Afin de bien situer le contexte lié aux présents travaux de thèse, une présentation des activités des partenaires industriels puis académiques s'impose.

1.1. Partenaires industriels

1.1.1. SONATS – Groupe Europe Technologies

SONATS¹, filiale du groupe Europe Technologies, est fabricant de machines de grenaillage ultrason et prestataire pour la réalisation des traitements sur site ou *in-situ*. Le grenaillage ultrason (GUS) est un procédé de traitement de surface mécanique, développé et commercialisé par SONATS (Technologie Stressonic®) [1], qui améliore les caractéristiques mécaniques, la durée de vie en fatigue [2,3], la résistance à la corrosion sous contraintes [4] de pièces métalliques à forte valeur ajoutée, comme les **disques aubagés monoblocs (DAM)**, les pignons de boîtes de vitesses, ou encore les cuves de réacteurs de centrales nucléaires. Le procédé est présenté plus en détail dans le Chapitre I.1.

1.1.2. SNECMA – Groupe SAFRAN

SNECMA², filiale du groupe SAFRAN, est fabricant de moteurs d'avions civils et militaires. Utilisateur du GUS, le procédé sert à l'amélioration de la tenue mécanique et en fatigue de pièces aéronautiques, telles que les **disques aubagés monoblocs (DAM)**. En effet, l'écrouissage superficiel du matériau traité et l'introduction de contraintes résiduelles de compression sont les principaux facteurs produisant les améliorations visées. Un meilleur état de surface de la pièce, après traitement, constitue également un facteur important dans l'augmentation de la durée de vie en fatigue des DAMs traités.

1.2. Partenaires académiques

1.2.1. ICD-LASMIS, UMR CNRS 6281

Le **Laboratoire de Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS³)** est une équipe de recherche de l'Institut Charles Delaunay (ICD), unité mixte de recherche du CNRS⁴ (UMR 6281), de l'Université de Technologie de Troyes (UTT). Une des thématiques principales de cette équipe concerne « l'ingénierie de précontraintes ». Elle repose, en partie, sur la prise en compte de procédés de fabrication dès la phase de conception de produits mécaniques. Il s'agit d'élaborer un chainage entre le choix des procédés et des paramètres et

¹ Site web : <http://www.sonats-et.com/>

² Site web : <http://www.snecma.com/>

³ Site web : <http://lasmis.utt.fr/fr/index.html>

⁴ Centre National de la Recherche Scientifique

le produit final, en passant par leurs effets sur le produit. De plus, les procédés de mise en compression, tel que le grenailage ultrason, suscitent un fort intérêt scientifique et industriel autour de la modélisation des effets induits dans le matériau. Beaucoup reste encore à faire quant à la prédiction de ces effets dans le cas d'une pièce mécanique complexe.

1.2.2. LPTMC, UMR CNRS 7600

Le Laboratoire de **Physique Théorique de la Matière Condensée** (LPTMC⁵) est une unité mixte de recherche CNRS (UMR 7600) de l'université de l'Université **Pierre et Marie Curie** (UPMC). Les activités autour de la physique statistique, au sens large, constituent un des axes majeurs de recherche au sein du laboratoire. La méthode de dynamique moléculaire est utilisée pour l'étude de la réponse de molécules/cristaux aux diverses sollicitations (mécanique, thermique, électromagnétique, etc.), mais également du comportement de matériaux granulaires sous différentes sollicitations et conditions de confinement. Cette dernière compétence en milieux granulaires, plus précisément en gaz granulaires vibrés, s'avère indispensable pour étudier le comportement d'un ensemble de billes confinées et énergisées par des membranes vibrantes.

2. Enjeux et besoin

Il est admis que les procédés de fabrication influencent de façon bénéfique ou dommageable la résistance à la fatigue et à la rupture de la pièce mécanique concernée. Pourtant, si la géométrie, le matériau et les sollicitations de service sont naturellement utilisés lors du dimensionnement d'une structure, l'influence des procédés de fabrication n'est pas prise en compte à cette étape de la conception. Les bénéfices possibles en termes de réduction de masse, de mise en forme, d'influence sur la contrainte en service ne sont pas évalués. Il n'existe pas non plus, aujourd'hui au niveau industriel, de démarche globale et cohérente permettant de relier les paramètres de ces procédés aux performances en service, en fatigue ou à la rupture. Cette démarche n'est possible que si le lien entre les paramètres du procédé de fabrication concerné et les caractéristiques induites sur le produit est connu ; la démarche est donc conditionnée par l'existence de modèles pour le procédé. Cela nécessite dans l'idéal une connaissance fine de la physique de chaque procédé qui permet la modélisation au niveau de

⁵ <http://www.lptl.jussieu.fr/>

complexité souhaitée et atteindre, à terme, la possibilité de modéliser la chaîne complète de fabrication.

Lors d'une opération de grenaillage ultrason (GUS), les quelques grammes de billes utilisées pour traiter une pièce rebondissent de manière chaotique dans l'enceinte. Les trajectoires de billes semblent donc aléatoires et rendent les observations expérimentales difficiles, dû aux interactions complexes et répétitives qui ont lieu entre les billes et avec le dispositif de grenaillage⁶. Tout ceci conduit à adopter une approche empirique pour la conception des enceintes, et qui repose en grande partie sur l'expérience des concepteurs et l'élaboration de prototypes coûteux en temps et en argent. Il en est de même pour le choix des paramètres procédé. Il est important de noter que la conception des enceintes (choix des géométries et matériaux) et le choix des paramètres procédé agissent directement sur la dynamique⁷ des billes. Cette dernière conditionne à son tour les caractéristiques finales de la pièce grenaillée, comme illustré dans la *Figure 1*.

D'un point de vue industriel, les enjeux majeurs tournent autour (a) d'une meilleure maîtrise et prédiction des effets induits par le procédé ; (b) d'une réduction des temps de conception d'outillages de GUS et des coûts de prototypage associés ; (c) d'une réduction des temps de traitement. Il est enfin important de souligner qu'il existe une relation directe entre le procédé décrit ci-dessus et les gaz granulaires vibrés (*cf.* Chapitre I.2) pour lesquels la modélisation des propriétés fait habituellement appel aux outils de la mécanique statistique. Il est donc possible de faire le lien entre ces propriétés obtenues par modélisation, et les paramètres du procédé. Un tel outil pourra également aider à la conception et à l'optimisation des enceintes de grenaillage ultrason et à mieux choisir les paramètres procédé associés à des conditions de traitement spécifiques.

⁶ Le dispositif de grenaillage fait référence à la pièce à traiter, l'enceinte de traitement et la (les) sonotrode(s).

⁷ La dynamique des billes correspond à leur mouvement lors du traitement. Elle englobe les trajectoires, vitesses d'incidence et de rebond, ainsi que les angles d'impact.

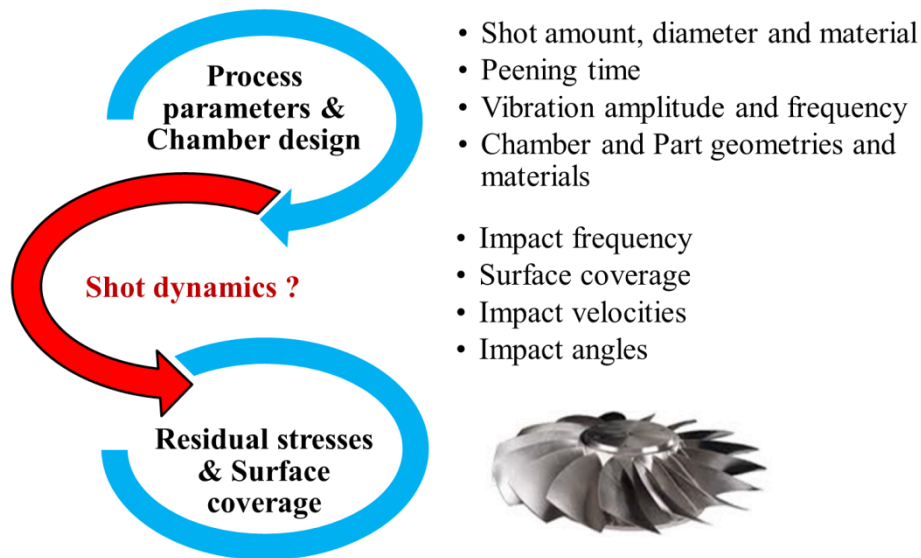


Figure 1 : Dépendance des contraintes résiduelles induites par rapport aux paramètres procédé, à travers la dynamique des billes [5].

3. Problématique et objectifs

Ainsi, le manque de connaissances sur la dynamique des billes, dans le cadre du grenaillage ultrason, provient d'un manque d'informations sur ce qui se passe à l'intérieur l'enceinte au cours du traitement, ainsi que de la difficulté d'y accéder par des moyens de mesure expérimentaux. Les quelques approches numériques capables de simuler la dynamique des billes peuvent s'avérer très coûteuses en temps de calcul ou inadaptées pour l'étude de configurations industrielles.

L'objectif du présent travail est donc d'étudier la dynamique des billes lors d'une opération de grenaillage ultrason pour des pièces mécaniques à géométrie complexe, et dans des conditions réelles de traitement. Pour y arriver, il sera vital de développer les outils numériques nécessaires à la simulation du procédé, à l'analyse des résultats et à l'intégration de ces outils informatiques dans l'environnement de conception des enceintes de traitement. Ce faisant, il faudra mettre au point les instrumentations nécessaires aux confrontations expérimentales.

4. Structure du manuscrit

Le **chapitre I** présente un état de l'art relatif aux thèmes clés abordés dans le présent manuscrit. Une première partie détaille le procédé de grenaillage ultrason, en le comparant au grenaillage conventionnel, et présente les critères d'évaluation et de contrôle du procédé

communément utilisés dans l'industrie. Une seconde partie traite des milieux granulaires, de manière générale, et des gaz granulaires vibrés, plus spécifiquement. Un ensemble d'applications concrètes permet de montrer le fort intérêt de ces milieux. La troisième partie présente l'ensemble des modélisations existantes de la dynamique des billes, dans le cadre du grenaillage ultrason. Les hypothèses, les points forts et faibles, ainsi que les principaux résultats obtenus sont détaillés.

Le **chapitre II** traite de la modélisation du GUS pour des géométries simples. La première partie présente le modèle 3D analytique, issu d'un modèle de gaz granulaires développé au LPTMC [6], adapté à la simulation du GUS dans une enceinte prismatique. La seconde partie porte sur l'effet d'une variation des coefficients de restitution sur la dynamique des billes. Dans la troisième partie, plusieurs études numériques permettent de déterminer l'influence des paramètres procédés sur la dynamique des billes ; d'autres renseignent sur l'influence de la sensibilité du modèle aux conditions initiales.

En première partie du **chapitre III**, le modèle destiné à la simulation du GUS pour des géométries complexes est présenté. La seconde partie teste les performances numériques du modèle développé, en termes de temps de calcul. La troisième partie du chapitre présente une approche destinée à l'intégration du modèle dans le processus de conception des enceintes. Une démarche de mise en donnée est proposée, ainsi que les modules de simulation et de post-traitement, et des interfaces utilisateurs. Ensuite, l'exemple d'une opération de grenaillage ultrason sur un engrenage à denture droite met en évidence le potentiel offert par le modèle par rapport à l'optimisation du procédé et des conceptions d'enceintes.

Le **chapitre IV** est consacré à la confrontation entre les résultats numériques, issus des modèles présentés, et expérimentaux. Une première partie présente des moyens de mesures expérimentaux existants et les contributions personnelles apportées pour la mesure du recouvrement et des trajectoires de billes. Dans la seconde partie, les méthodes proposées sont testées dans des conditions de grenaillage ultrason, ainsi que leur utilité dans la mesure du recouvrement (moyen et cartographie spatiale), de la dynamique des billes (vitesses dans l'enceinte, vitesses et angles d'impact). Dans la troisième partie, une confrontation expérimentale permet d'évaluer les performances du modèle présenté dans le Chapitre III. Pour ce faire, une opération de grenaillage ultrason est réalisée sur une roue dentée à denture droite. Des mesures de diamètres de cratères, sur plusieurs dents, permet de remonter à des distributions de vitesses expérimentales. Celles-ci sont ensuite comparées à celles fournies par le modèle et montrent une bonne corrélation entre l'expérience et la simulation.

Chapitre I – Bibliographie

Dans ce chapitre, un état de l’art est effectué autour des domaines touchant à mes travaux de thèse. La première partie traite du grenaillage de précontraintes qui englobe, entre autres, le grenaillage conventionnel et le grenaillage ultrason. Ensuite, l’intérêt est porté aux milieux granulaires, et plus précisément aux gaz granulaires vibrés. En effets, ces derniers présentent de fortes similitudes avec le comportement des billes dans le cadre du grenaillage ultrason. Dans la troisième partie, l’ensemble des travaux existants sur la modélisation du grenaillage ultrason, en termes de dynamique des billes, sont présentés.

1. Grenaillage de précontraintes

Le grenaillage de précontraintes réfère, de manière générale, aux procédés mécaniques de mise en compression des surfaces. Dans le cas du grenaillage conventionnel ou ultrason, des médias⁸ sont projetés vers la pièce à traiter. Quant à la méthode de projection des médias, elle diffère d’un procédé à l’autre. Il existe également d’autres procédés de mise en compression, dits sans contact, qui utilisent des ondes de choc afin d’introduire les contraintes résiduelles.

1.1. Historique des procédés mécaniques de traitement de surface

L’histoire des procédés de mise en compression débute à la fin des années 20 [7], avec la découverte que les procédés mécaniques de nettoyage de surfaces (sablage ou « Shot Blasting » en anglais) amélioraient la durée de vie des pièces nettoyées, sous certaines conditions. La première publication scientifique à ce sujet a été publiée par Foepppl (1929) [8] et le premier brevet déposé par Vorwerk (1934) [9], en Allemagne. La première application industrielle du procédé a vu le jour aux États-Unis en 1930, indépendamment des travaux allemands, lorsque des ingénieurs chez Buick se sont aperçus que les ressorts d’amortisseurs automobile nettoyés au grenaillage présentaient une meilleure résistance à la fatigue [7]. Le procédé fut ensuite rapidement adopté dans le secteur automobile, avant d’être introduit dans le secteur aéronautique par J.O Almen pendant la seconde guerre mondiale (1941-1945). Les effets bénéfiques engendrés par le grenaillage sont par la suite attribués à la génération de contraintes résiduelles de compression dans les matériaux traités.

⁸ Les médias correspondent à la grenaille utilisée dans le grenaillage conventionnel ou aux billes utilisées dans le grenaillage ultrason.

En 1950, Borger invente le XXX – « peen forming » en anglais – [10] qui consiste à utiliser le grenailage dans le but de mettre en forme les ailes de l'avion « *Super Constellation* », illustré dans la *Figure I- 1*, développé par Lockheed.



Figure I- 1 : Avion « Super Constellation »⁹ développé par Lockheed dans les années 50.

Toujours dans les années 50, une nouvelle manière d'impacter une pièce métallique afin d'y introduire des contraintes résiduelles voit le jour ; c'est le martelage ultrasonore – « Ultrasonic (Hammer) peening » en anglais – [11]. Un indenteur, mis en vibration à des fréquences ultrasonores, est en contact direct avec la surface de la pièce à traiter. En 1955 en Allemagne, Blaha et Langenecker [12] publient le premier article scientifique sur l'effet des ultrasons sur la durée de vie et caractéristiques mécaniques. En 1959, les travaux du russe Mordvintseva [13] constituent la première utilisation du procédé pour l'amélioration des caractéristiques de cordons de soudure.

Une trentaine d'année plus tard, au début des années 80, le grenailage ultrason – « Ultrasonic shot peening » en anglais – voit le jour [14] en Russie. Inventé par A.V. Koulemine en 1980 [15], année de dépôt du premier Brevet, le procédé est utilisée secrètement en URSS dans l'aéronautique et le nucléaire. En 1992, après la chute de l'URSS, la société Teknoson introduit le procédé en France. Quelques années plus tard, en 1996, SONATS rachète les brevets de Teknoson et développe davantage le grenailage ultrason.

À la même période en Allemagne, M. Mathias [16] fait le rapprochement entre les effets induits par la cavitation à celles induites par le grenailage. C'est la naissance du procédé de cavitation – « Cavitation peening » en anglais – qui consiste à utiliser les ondes de choc

⁹ Online, < http://maquette72.free.fr/amis/Aerophil/2009_01_constellation/index_p01.php >, visité le 06/11/2013.

générées par la cavitation comme moyen mécanique pour l'introduction de contraintes résiduelles. En 1993, le japonais Yamauchi et ses collaborateurs [17] proposent, pour la première fois, la cavitation comme alternative possible au grenaillage. Par la suite, en 1996, K. Hirano et K. Enomoto [18] réalisent les premières études sur l'amélioration de la résistance à la corrosion sous contraintes et à la fatigue, apportée par le procédé de cavitation.

Au début des années 70, une nouvelle technique de mise en compression mécanique sans contact a également vu le jour ; c'est le choc laser – « Laser peening » en anglais – [19]. L'introduction de contraintes résiduelles s'effectue à l'aide d'ondes de choc générées par un plasma, produit par un laser à haute puissance. J.A Fox [20] est le premier à proposer, en 1974, le choc laser comme alternative pour l'introduction des contraintes résiduelles. Cependant, il faut attendre 1995 avant que J.F. Dulaney propose la première application industrielle viable de ce procédé, et cela grâce à d'importantes avancées technologiques dans le domaine des lasers.

Plus récemment, en 2006, C. Horsch et ses collaborateurs [21] mettent au point le grenaillage ultrason par voie humide – « Ultrasonic wet peening » en anglais. Une sonotrode, vibrant à des fréquences ultrasonores, est submergée dans un bassin d'eau. Ses vibrations génèrent de la cavitation à proximité de la surface extrême de la sonotrode. La *Figure I- 2* résume les dates clés et illustre les différents procédés évoqués ci-dessus, de manière chronologique.

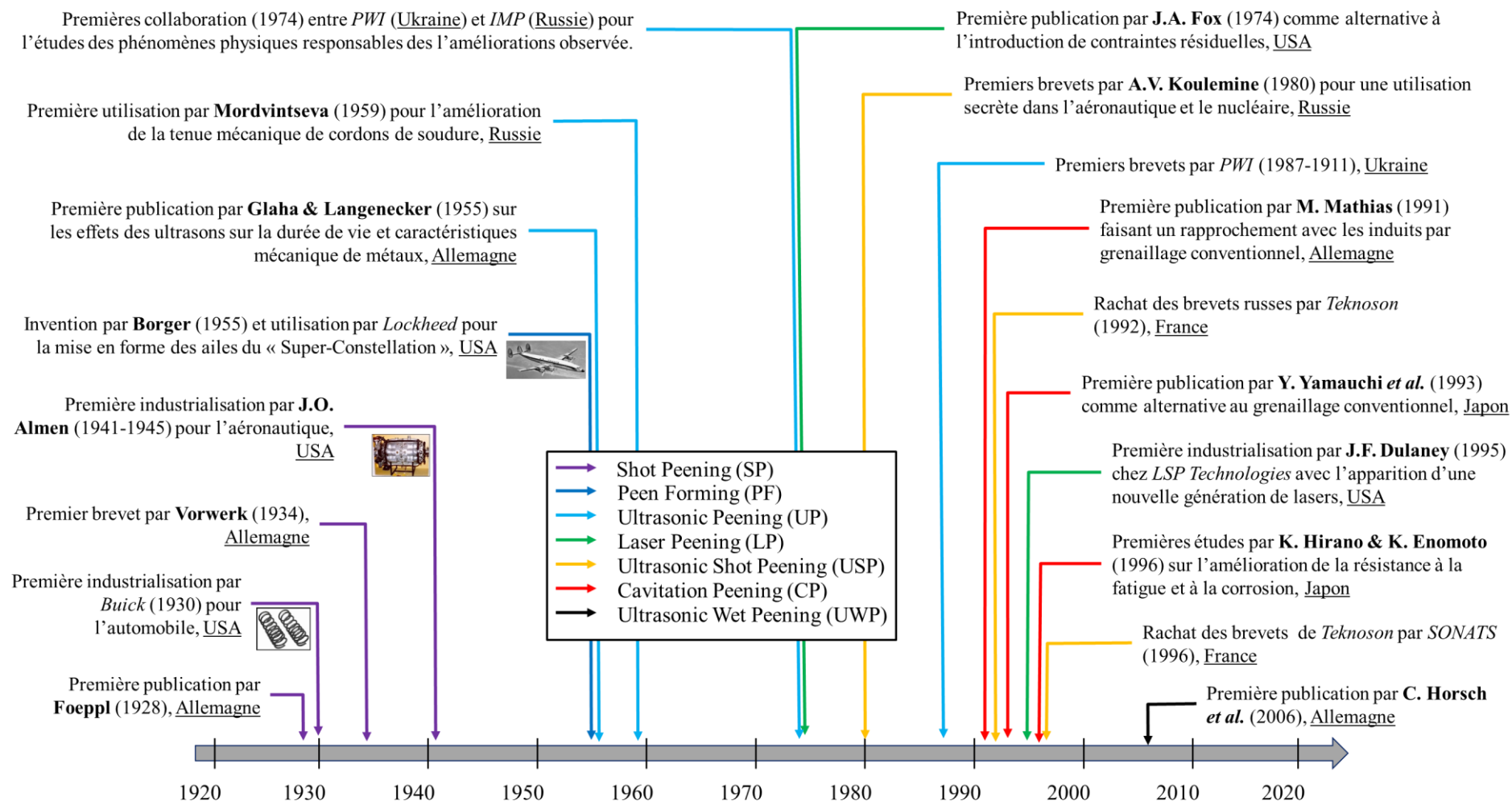


Figure I- 2 : Historique des procédés de mise en compression des surfaces.

1.2. Grenaillage conventionnel

1.2.1. Principe de fonctionnement

Le grenaillage conventionnel (GC), également connu sous le nom de grenaillage de précontrainte, est le procédé de mise en compression le plus répandu dans l'industrie mécanique. Le grenaillage consiste à projeter en flux continu de la grenaille¹⁰, de taille comprise entre 0.18 mm et 2.0 mm, à très grandes vitesses vers la pièce à traiter. Les vitesses de projection peuvent aller de 20 à 120 m/s, en fonction de la technologie utilisée et du type de grenaille choisi. Quant au débit de grenaille projeté, il se compte généralement en kilogrammes par minute.

1.2.2. Technologies existantes

Sur le marché, deux technologies existent ; la première correspond aux grenailleuses à air comprimé, tandis que la seconde correspond aux grenailleuses à turbine.

La première famille de machines utilise de l'air comprimé afin de projeter un flux continu de grenaille sur la pièce à traiter. Une buse, communément montée sur un système robotisé, permet de contrôler et d'orienter le flux de grenaille en direction de la pièce (*Figure I- 3*).

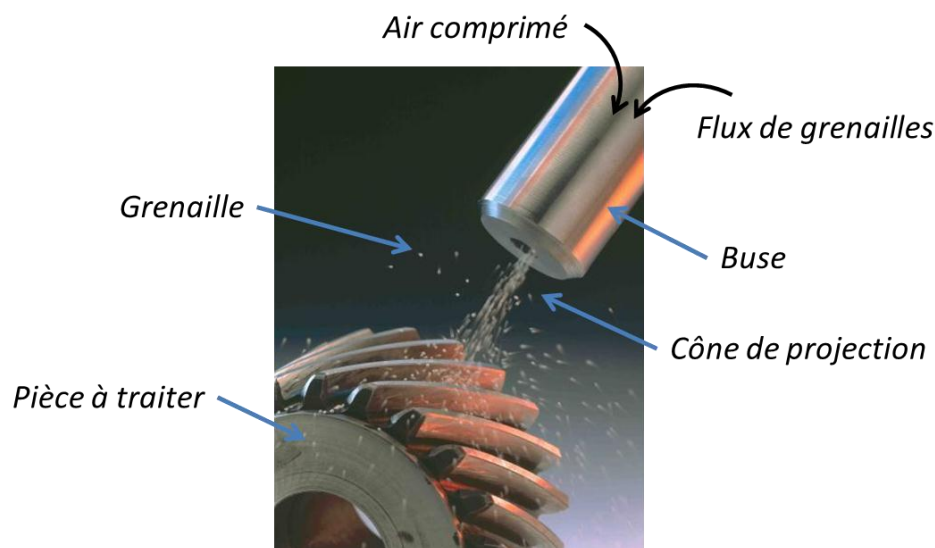


Figure I- 3 : Système de propulsion des machines de grenaillage à air comprimé grenaillage à air comprimé ¹¹.

¹⁰ Particules de différentes tailles et matériaux, communément obtenus par découpe de fils métalliques « Cut Wire ».

¹¹ Online, issu du site web de ICSP-9, < <http://icsp9.iitt.com/> >, visité le 06/11/2013.

La seconde famille de machines utilise une turbine en rotation qui grâce, à l'effort centrifuge généré, permet de propulser la grenaille à grande vitesse (*Figure I- 4*).

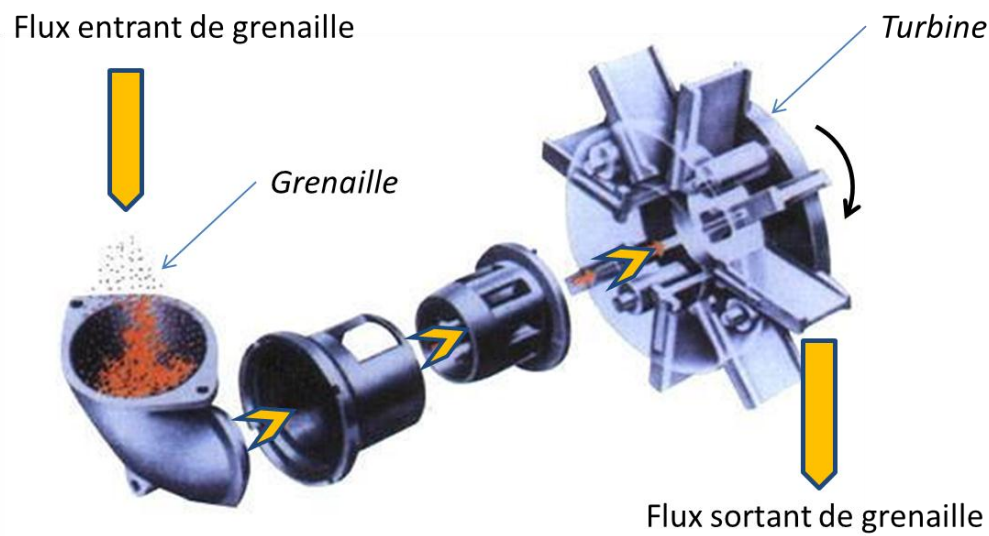


Figure I- 4 : Système de propulsion des machines de grenaillage à turbine ¹²

1.2.3. Paramètres procédé

Dans le cadre du grenaillage conventionnel, les principaux paramètres procédé qui agissent sur les intensités de traitement sont la vitesse et l'angle d'ouverture du cône de projection [22], [23] (*Figure I- 3*), la nature et la forme des grenailles, ainsi que le temps d'exposition [24]. Dans le cas des grenailluses à air comprimé, la vitesse et l'angle d'ouverture du cône de projection dépendent de la géométrie de la buse [25], ainsi que de la pression de l'air comprimé et du débit de grenaille [26], [27]. Dans le cas des grenailluses à turbine, ces deux paramètres dépendent principalement de la vitesse de rotation de la turbine et de la géométrie des pales.

1.3. Grenaillage ultrason

1.3.1. Principe de fonctionnement

Le grenaillage ultrason (GUS) est un procédé de traitement de surface mécanique qui consiste à projeter des billes parfaitement sphériques, de diamètre compris entre 0.6 mm à 3 mm, sur une structure métallique. Les différences majeures avec le grenaillage conventionnel

¹² Online, < http://www.diytrade.com/china/pd/5006264/offer_spare_parts_of_shot_blasting_machine.html >, visité le 06/11/2013

se situent au niveau de la manière dont les billes sont mises en mouvement, de la quantité et le type de billes utilisées, ainsi que la conception des enceintes de traitement.

Un générateur délivre un signal électrique sinusoïdal, de fréquence ultrasonore, à un ensemble acoustique. Ce dernier est constitué d'un émetteur piézo-électrique qui transforme le signal électrique en vibrations mécaniques ; lesquelles sont ensuite amplifiées successivement par au moins un booster, puis par la sonotrode. Ainsi, les vibrations de la sonotrode mettent en mouvement les billes, contenues dans une enceinte de traitement hermétique, spécialement conçue pour la pièce à traiter. L'enceinte a pour rôle principal de contenir les billes et de contrôler leur mouvement pendant le traitement (*Figure I- 5*). Dans le cas du GUS, seuls quelques grammes de billes suffisent pour traiter une pièce. Contrairement au flux continu du grenaillage conventionnel, les billes adoptent un comportement semblable à un gaz de particules.

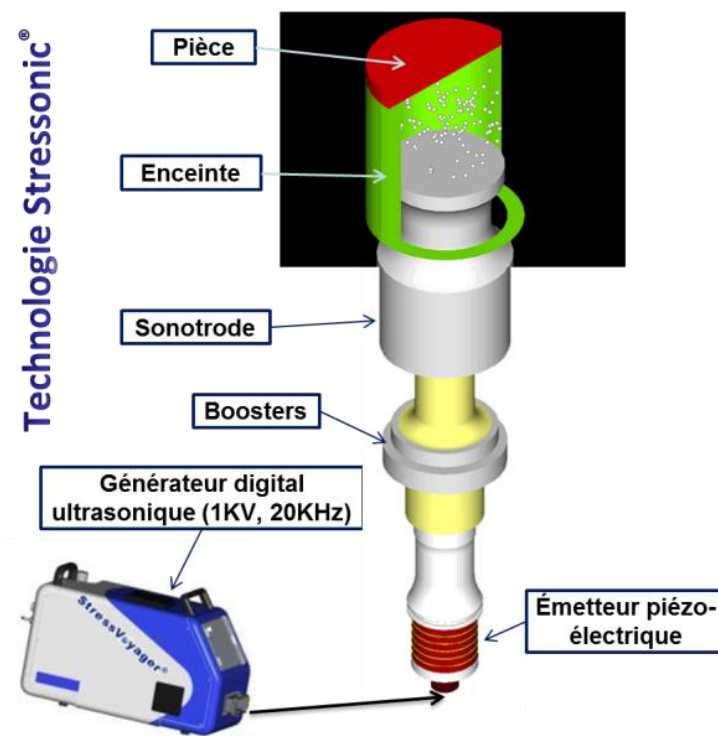


Figure I- 5 : Illustration de la technologie STRESSONIC® (à gauche) et d'un traitement de GUS sur site.

1.3.2. Paramètres procédé

Dans le cadre du grenaillage conventionnel, les principaux paramètres procédé qui agissent sur les intensités de traitement sont l'amplitude et la fréquence de vibration de la sonotrode, le diamètre et le matériau des billes, la distance pièce – sonotrode, ainsi que le temps de traitement [28].

1.4. Critères de contrôle du grenaillage

Comme présenté jusqu'ici, les procédés de précontraintes servent à introduire des contraintes résiduelles de compression en surface du matériau traité (se référer à la section II.1.4.3), dans le but d'améliorer principalement ses caractéristiques mécaniques et sa durée de vie en fatigue. Afin de contrôler la qualité, la répétabilité et les effets générés par ces différents procédés, plusieurs critères existent. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à un article de J. Champaigne [29].

1.4.1. Recouvrement

Le recouvrement correspond au pourcentage de surface impactée par rapport à la surface totale à grenailler, comme exprimé dans l'équation I-1. Ce critère industriel, gouverné par la norme SAE J2277 [30], permet de juger de l'homogénéité d'une opération de grenaillage.

$$Recouvrement [\%] = 100 * \frac{Surface_{impactée}}{Surface_{totale\ grenaillée}} \quad (I-1)$$

Un recouvrement supérieur à 100 % est généralement recherché sur l'ensemble de la zone à traiter. Son évaluation se fait principalement à l'œil, à l'aide de binoculaires assurant un grossissement supérieur ou égale à 8. Des techniques de mesures plus poussées existent (cf. III.1.1) mais ne permettent pas une mesure fiable du recouvrement qui soit indépendante de l'opérateur ou applicable à tout type de pièces et de matériaux. Le recouvrement, quant à lui, dépend fortement du temps de grenaillage [31], [32], mais aussi de la fréquence d'impact vue par la pièce, les vitesses d'impact et la géométrie des particules projetées [25].

1.4.2. Flèche et intensité Almen

La répétabilité des procédés de mise en compression se contrôle à l'aide d'éprouvettes Almen normalisées, qui subissent le même traitement que la pièce à traiter. Il existe trois types d'éprouvettes Almen (N, A et C), caractérisées par des épaisseurs différentes (Figure I-6). Ces éprouvettes sont fixées, par quatre vis, sur un support dédié pendant le traitement. Lorsque l'éprouvette est retirée du support, elle fléchit sous l'effet des contraintes résiduelles générées par le traitement. La flèche Almen est ensuite mesurée. Elle correspond à la déformée de l'éprouvette après traitement. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un comparateur également normalisé, comme illustré dans la Figure I-6.

Cependant, il ne faut pas confondre la flèche Almen avec l'intensité Almen. L'intensité du traitement, associé à un temps de saturation T (Figure I- 7), se détermine à partir d'une courbe de saturation, obtenue avec au moins cinq flèches Almen, relevées à différents temps de grenaillage. Ensuite, il suffit de déterminer la valeur de T , tel que l'écart avec la flèche correspondante à $2T$ soit inférieure ou égale à 10 %. Les éprouvettes Almen, la mesure de la flèche Almen et la détermination de l'intensité Almen sont encadrées par les normes SAE J442 [33] et SAE J443 [34]. Il est important de noter qu'une même flèche Almen peut être obtenue à partir de conditions de traitement différentes [35] ; les paramètres les plus influents étant les vitesses d'impacts [22], les matériaux utilisés (pièce et grenaille), la taille des particules projetées ainsi que les contraintes résiduelles induite [35], [36].

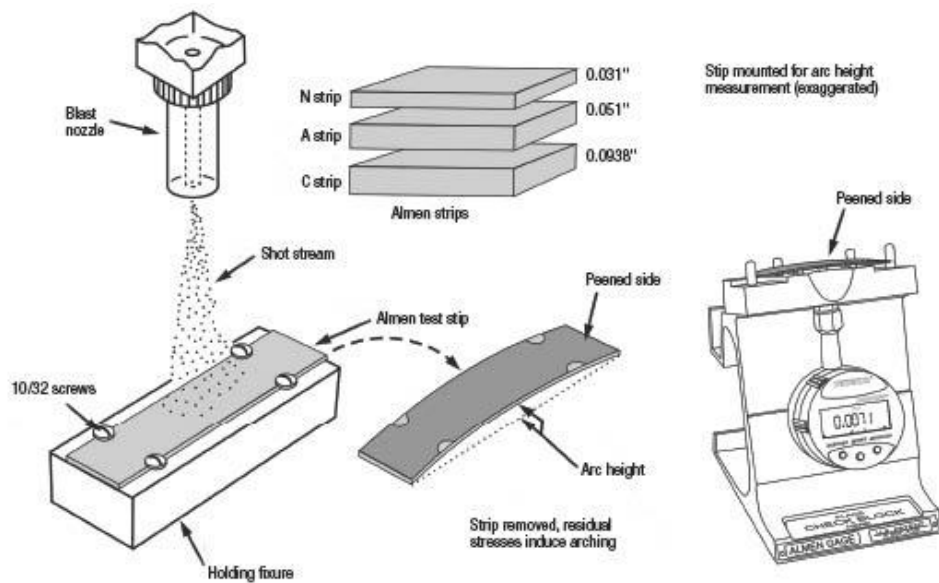


Figure I- 6 : Méthode normalisé pour la mesure de la flèche Almen ¹³.

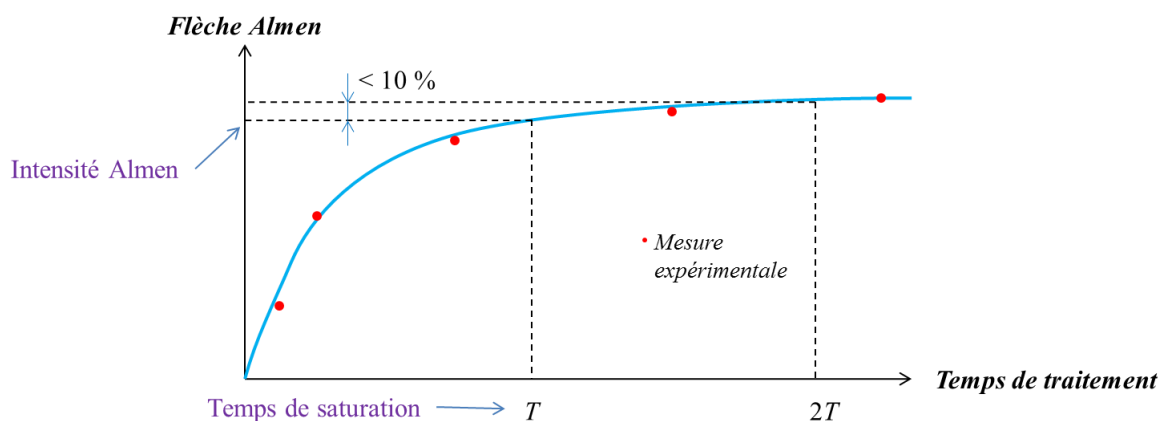


Figure I- 7 : Détermination du temps de saturation et de l'intensité Almen associée.

¹³ Online, < http://www.ctemag.com/aa_pages/2009/0908_PartsFinishing.html >, visité le 06/11/2013.

1.4.3. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles de compression [37]–[39], générées en surface de la pièce grenillée, jouent un rôle bénéfique sur les caractéristiques mécaniques et la durée de vie en fatigue [2], [3], [40]–[45] du matériau traité. Elles permettent également de lutter contre les phénomènes de corrosion sous contraintes [4], [46]–[48]. Lors d'un impact, une zone de plastification (déformations plastiques irréversibles) est générée dans la pièce, sous le lieu d'impact (*Figure I- 8*). La répétition de ces impacts sur la pièce cause une élongation de celle-ci en surface ; la mettant ainsi en traction. Afin de maintenir un état d'équilibre, le matériau de la pièce se comprime près de la surface, générant ainsi des contraintes résiduelles de compression. Plus en profondeur, le matériau s'étire, ce qui génère des contraintes résiduelles de traction.

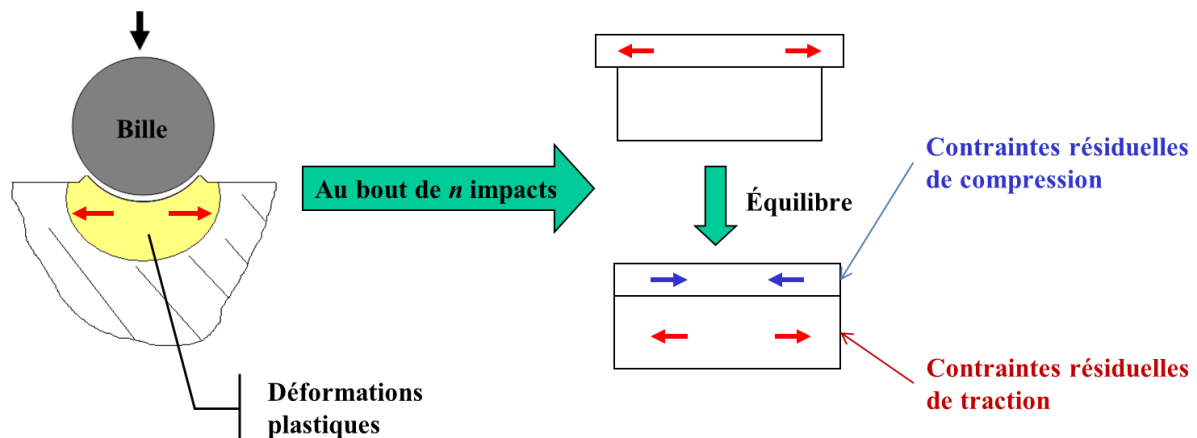


Figure I- 8 : Génération de contraintes résiduelles de compression par impact.

Le profil typique des contraintes résiduelles associées aux procédés de mise en compression est schématisé dans la *Figure I- 9*. Il est caractérisé par une contrainte de compression surfacique, une contrainte de compression maximale en sub-surface, une profondeur maximale en compression et une contrainte de traction maximale. Ces cinq grandeurs physiques sont elles-mêmes influencées par des paramètres procédé, tels que la taille et le matériau de grenaille, les vitesses et les angles d'impacts associées, ainsi que les caractéristiques matériaux de la pièce traitée.

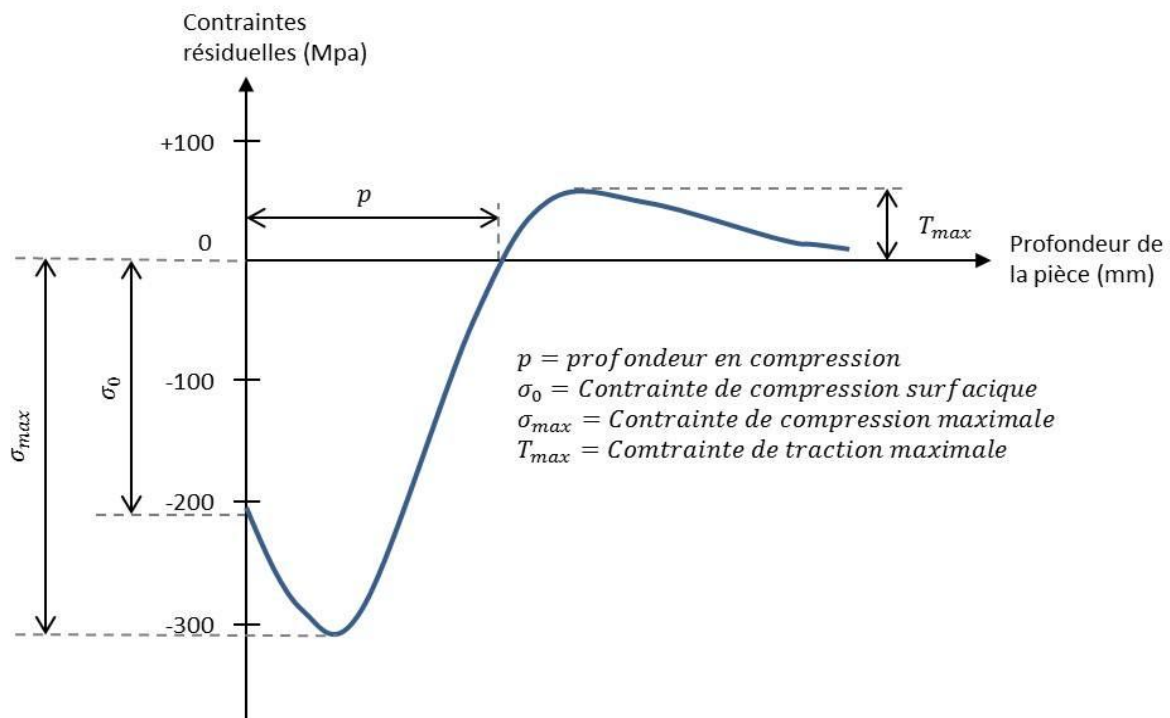


Figure I- 9 : Profil des contraintes résiduelles généralement obtenu en grenaille de précontraintes dans le matériau grenailée.

2. Gaz granulaires

Les milieux, dits granulaires, sont des milieux constitués de grains macroscopiques rugueux, peu déformables et relativement peu cohésifs. Il se trouve que ces caractéristiques sont à l'origine d'un grand nombre de phénomènes observés dans ces milieux. L'aspect fondamental de ces milieux dits *granulaires* est la présence de mécanismes de dissipation d'énergie par le contact (impacts inélastiques, glissement avec frottement, propagation d'ondes, échanges de chaleur, etc.). Ces milieux existent sous trois formes : solide, liquide et gaz granulaires [49].

On parle de solide granulaire lorsque le milieu est laissé à lui-même dans une enceinte inerte, aboutissant à une configuration statique. Ainsi, le milieu perd son énergie cinétique et son état se rapproche de celui d'un solide. Un liquide granulaire, quant à lui, se forme lorsque le milieu granulaire est perturbé par un apport d'énergie régulier, lui procurant ainsi une énergie cinétique non nulle. Cet état est dense et a pour caractéristiques une réorganisation constante des grains. On parle de gaz granulaire lorsque seule la gravité limite le volume de l'empilement des grains. Ainsi, une excitation extérieure au système permet de faire décoller une partie des grains, aboutissant à un état dilué de ces derniers. Dans ce milieu, les grains suivent des trajectoires balistiques et subissent des collisions inélastiques isolées.

Pour des systèmes confinés, comme pour le grenaillage ultrason, les effets de bord au voisinage des parois introduisent souvent une hétérogénéité des distributions de densité et du champ de vitesse à l'échelle de quelques diamètres de grain. D'une manière générale, lorsqu'un apport d'énergie extérieur amène un système granulaire dans un état stationnaire indépendant des conditions initiales, on récupère des notions statistiques : celle de moyenne temporelle, celle de moyenne d'ensemble et celle d'état macroscopique conditionné par les paramètres extérieurs fixant l'apport d'énergie.

2.1. Propriétés physiques

Une bonne compréhension des divers aspects du comportement de ces trois types de systèmes (solides, liquides et gaz) est essentielle. Dans de tels systèmes dissipatifs, il n'est pas possible de parler d'équilibre, mais seulement d'état stationnaire hors d'équilibre. Dans le cadre de la théorie cinétique des gaz [50], [51], l'équation de Boltzmann permet de décrire le comportement de particules atomiques d'un gaz moléculaire hors d'équilibre. Les principales particularités résident dans la nature élastique des collisions. L'évolution du gaz, quant à lui, repose principalement sur les principes de la thermodynamique [49]. Or, pour un matériau granulaire, ses propriétés physiques sont gouvernées par la force gravitationnelle, les frontières externes au système, et la nature inélastique des collisions. Les énergies mises en jeu sont 10^{12} supérieures à celles d'un gaz atomique, rendant ainsi les effets thermiques négligeables [49].

Des trois états de la matière granulaire évoqués plus haut, le "gaz" est celui qu'on rapproche le plus facilement de la mécanique statistique classique [51]–[54]. La raison en est simple et tient aux hypothèses fondamentales faites sur le système : un libre parcours moyen¹⁴ supérieur aux dimensions des particules, et un temps de libre parcours moyen très supérieur à la durée des collisions. Il devient donc possible de s'affranchir des éventuelles collisions à trois particules et des contacts multiples [54], qui sont caractéristiques des matériaux granulaires denses, i.e. les liquides et les solides granulaires décrits plus haut. Puisqu'il est possible de raisonner sur des collisions binaires [55], un bilan détaillé sur la façon dont ces collisions modifient les distributions des vitesses est donc possible. Le second aspect prépondérant dans les gaz granulaires réside dans la nature dissipative des collisions [54]. Ces

¹⁴ Distance moyenne parcourue par une particule avant de rentrer en contact avec d'autres particules ou des parois du système.

dissipations sont principalement prises en compte à travers des coefficients de restitution, définis comme étant le rapport entre les vitesses relatives de rebond et d'impact. Une étude plus détaillée de ces coefficients se trouve dans la section 1.3.1 du chapitre II.

2.2. Quel intérêt pour le grenaillage ultrasons ?

Dans le domaine des applications industrielles, l'attention a principalement été portée sur les propriétés des matériaux granulaires [56], mettant ainsi de côté la possibilité d'utiliser un média granulaire comme agent d'interface pour d'autres matériaux d'intérêt industriel. Un exemple bien connu de ce type d'alternatives se trouve en tribologie. Par exemple, l'usure à la surface d'un matériau est produite par de l'abrasion ou des frottements, générés par une collections de grains [57]. En mécanique, il a été montré que les gaz granulaires peuvent être identifiés au média (grenaille) du grenaillage de précontraintes ou conventionnel, utilisé dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique [6], [58].

Un jet de particules millimétriques est projeté à la surface d'une pièce métallique, ce qui génère des contraintes résiduelles de compression en surface et en profondeur du matériau, et améliore sa durée de vie en fatigue. Une variante de ce procédé, le grenaillage ultrason [37], consiste à projeter des billes sphériques à l'aide d'un système acoustique ultrasonore (20 kHz). Le mouvement des billes, contenues dans une enceinte de traitement, présente un comportement très semblable à celui des gaz granulaires vibrés.

3. Travaux existants sur la modélisation du grenaillage ultrason

À l'heure actuelle, les modèles qui traitent des procédés de mise en compression, comme le grenaillage conventionnel ou ultrason, se focalisent principalement sur la modélisation des effets induits dans les matériaux traités. Dans le cas du grenaillage ultrason, ceci se fait avec peu de connaissances sur le procédé lui-même. Or, la dynamique des billes (vitesses et angles d'impact, recouvrement, etc.) gouverne directement le chargement vu par la pièce grenaillée, et donc les contraintes résiduelles induites dans celle-ci [28], [59]. Cette dynamique de billes est gouvernée par des paramètres procédé (facilement ajustables), ainsi que par les matériaux utilisés et les géométries de la pièce grenaillée et de l'enceinte (plus difficiles à ajuster). Ainsi, dans le but d'améliorer la prédiction des contraintes résiduelles, la dynamique des billes doit tout d'abord être comprise et maîtrisée.

La présente partie traite des travaux existants sur la modélisation du grenaillage ultrason, exclusivement. Il est important de noter que seuls les modèles relatifs à la dynamique des billes sont présentés. Les modèles relatifs à la prédiction des contraintes résiduelles ne seront donc pas abordés. Pour plus d'informations sur ceux-ci, le lecteur peut se référer aux publications suivantes [59]–[63].

3.1. Modélisation de Pilé *et al.* (2005)

Céline PILÉ a effectué ses travaux de thèse, au sein de l'Université de Technologie de Troyes (UTT), sur « Le grenaillage par ultrasons : caractérisation du procédé et influence sur la fatigue d'alliages TiAl » [64]. Un modèle à une dimension (1D) de la dynamique des billes est proposé [14], [65].

3.1.1. Hypothèses

Le modèle représente l'interaction entre une bille et la sonotrode, animée d'un mouvement sinusoïdal, et a pour hypothèses que :

- L'énergie gravitationnelle est négligée
- Les dissipations dues aux frottements de l'air sont négligées
- L'énergie cinétique de la bille est la plus influente
- La durée du contact est estimée de manière théorique puis considérée comme instantanée, par rapport à la période d'oscillation de la sonotrode
- Les dissipations d'énergies lors des chocs sont prises en compte à l'aide de coefficients de restitutions normaux constants

3.1.2. Possibilités offertes par le modèle

Malgré la simplicité du modèle, les études menées constituent un premier pas vers la compréhension de la dynamique des billes, lors d'une opération de grenaillage ultrason. Il est donc possible de :

- Simuler plusieurs allers retours, d'une même bille, entre la sonotrode et la pièce
- Étudier l'influence des coefficients de restitution sur la distribution statistique des vitesses d'impact

3.1.3. Principaux résultats obtenus

Même si le modèle 1D ne prend en compte qu'un seul paramètre, il permet de mettre en évidence les résultats suivants :

- L'importance de prendre en compte les dissipations au niveau de l'ensemble des chocs et leur influence sur la distribution des vitesses d'impacts
- Dans des conditions de traitement données, la vitesse moyenne d'impact converge vers une même valeur, peu importe les vitesses initiales imposées aux billes
- Il est stipulé, par l'étude du libre parcours moyen, qu'il est impossible pour une bille de faire un aller-retour direct pièce-sonotrode

Or ce dernier point ne s'avère pas toujours vrai. Tout dépend, en effet, de la géométrie de l'enceinte et du libre parcours moyen choisi, comme détaillé dans le Chapitre II-3.6 et II-3.7.

3.1.4. Limitations et inconvénients

Cependant, le modèle reste néanmoins insuffisant pour la réalisation de prédictions représentatives d'une opération de GUS. En effet, bon nombre de paramètres procédé et grandeurs physiques se sont pas prises en compte, comme :

- Le diamètre et la quantité de billes
- La distance sonotrode-pièce
- Les duretés de la pièce, sonotrode, billes et parois de l'enceinte
- L'évolution des coefficients de restitution court du traitement (écrouissage)
- Déplacement latéraux des billes (modélisation à trois dimensions)

3.2. Modélisation de Micoulaut *et al.* (2007)

Des travaux de recherche conjoints, entre le laboratoire de physique théorique de la matière condensée (UPMC) et le laboratoire de systèmes mécaniques et d'ingénierie simultanée (UTT), ont permis d'aboutir à un modèle analytique en trois dimensions (3D) de la dynamique des billes, dans le cadre du grenaillage ultrason [6], [58], [66].

3.2.1. Hypothèses

Ce dernier est issu d'un modèle de gaz granulaires vibrés, développé initialement à l'UPMC, et qui a été modifié afin de correspondre à une opération de grenaillage ultrason. Il

permet ainsi de simuler le procédé dans une enceinte cylindrique (*Figure I- 10*), et a pour hypothèse que :

- L'énergie gravitationnelle qui permet de ramener les billes vers la sonotrode, dans le cas où la pièce se trouve à une grande distance de la sonotrode
- Les collisions sont binaires et inélastiques pour l'ensemble des chocs possibles.
- Les dissipations énergétiques, dues aux frottements et à la transformation d'énergie cinétique en énergie rotationnelle lors des chocs, sont prises en compte à l'aide de coefficients de restitution tangentiels constants
- Les dissipations énergétiques, dues aux déformations plastiques, échauffements au lieu de contact et vibrations, sont pris en compte à l'aide de coefficients de restitution normaux, dépendant de la vitesse d'impact
- L'oscillation de la sonotrode correspond à un signal triangulaire, pour une résolution analytique du problème

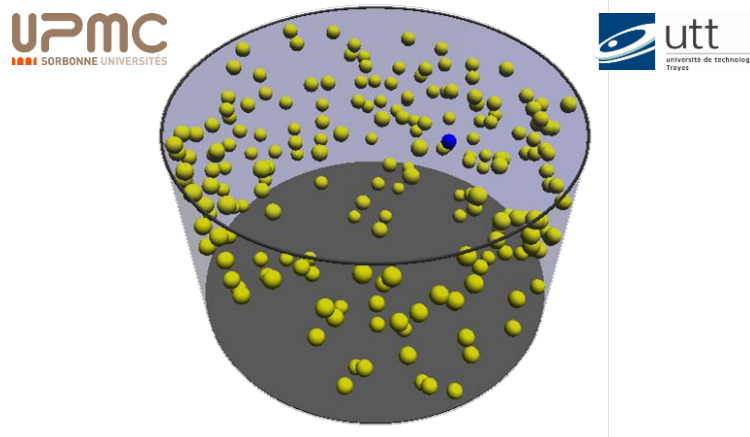


Figure I- 10 : Simulation effectuée avec le modèle de Micoulaut et al. (2007) [6].

3.2.2. Possibilités offertes par le modèle

Pour la première fois, il est possible de visualiser en 3D les trajectoires de chaque bille au cours du traitement et de simuler de longs temps de grenailage, en de très faibles temps de calcul. Le modèle permet aussi de faire varier :

- Le diamètre et le nombre de billes
- La distance pièce–sonotrode (hauteur du cylindre)
- La taille de l'enceinte (rayon du cylindre)
- Le libre parcours moyen (volume du cylindre et nombre de billes)
- Les coefficients de restitution attribués à chaque type de collision

3.2.3. Principaux résultats obtenus

Les études menées avec le modèle ont permis de mettre en évidence :

- L'effet du coefficient de restitution, attribué aux chocs bille–enceinte, sur la distribution spatiale des impacts au niveau de la pièce (hétérogénéités dues à des effets de bord)
- L'influence de la fraction volumique (nombre et diamètre de billes) sur les angles et vitesses d'impact.
- Une structuration possible des distributions statistiques, Ce qui indique que la dynamique des billes n'est pas toujours dans une configuration aléatoire.

3.2.4. Limitations et inconvénients

Les principaux points faibles du modèle ont pour origine :

- Une seule configuration géométrique disponible. La simulation du GUS dans d'autres configurations nécessite une description analytique des géométries souhaitées, ainsi qu'un développement informatique spécifique
- Oscillation triangulaire de la sonotrode, ce qui résulte en uniquement deux vitesses de vibration possibles. Or, ceci n'est pas forcément représentatif des conditions industrielles.

3.3. Modélisation de Thümmeler *et al.* (2012)

Philipp Thümmeler¹⁵ a effectué ses travaux dans le cadre d'un partenariat entre l'entreprise MTU Aero Engines (Allemagne) et l'Université de Karlsruhe. Ses travaux de thèse ont porté sur la description du procédé de grenaillage ultrason, avec prise en compte du mouvement des billes [67], [68]. D'un point de vue numérique, P. Thümmeler a développé un modèle MATLAB, permettant de simuler le mouvement des billes dans des enceintes complexes (à l'aide de maillages), et d'en déduire des grandeurs représentatives du procédé de grenaillage ultrason sur une éprouvette Almen.

3.3.1. Hypothèses et paramètres

Le modèle proposé, illustré dans la *Figure I- 11*, se base sur les hypothèses suivantes :

¹⁵ Seconde orthographe du nom : Thuemmler

- Les collisions sont binaires et inélastiques pour l'ensemble des chocs possibles.
- Les dissipations d'énergie sont prises en compte à l'aide de coefficients de restitution normaux et tangentiels. Ces derniers sont déterminés par calculs EF
- L'oscillation de la sonotrode suit un mouvement sinusoïdal

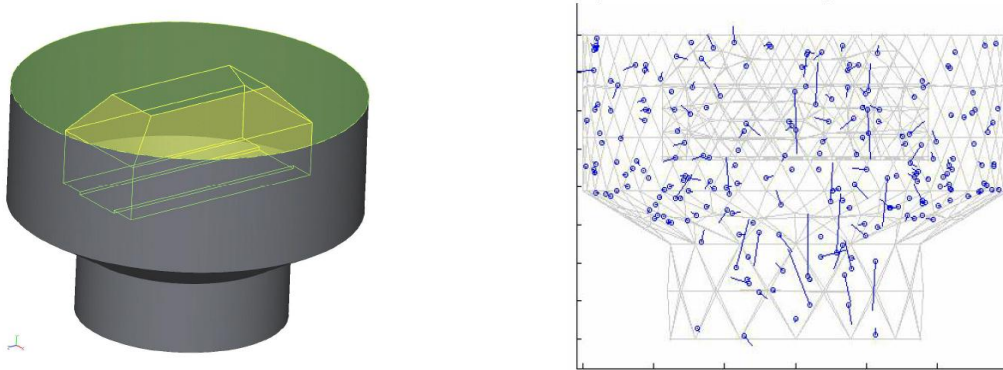


Figure I- 11 : Géométrie du montage de traitement des éprouvette Almen (à gauche) et une vue instantanée des positions et vitesses de billes à un instant donné de la simulation (à droite) [67].

3.3.2. Possibilités offertes par le modèle

L'utilisation de maillages confère au modèle la possibilité de simuler une opération de grenaillage ultrason, pour n'importe quelles géométries d'enceinte et de pièce statique. Il est ainsi possible d'en déduire les distributions spatiales :

- D'énergie cinétique dissipée (Figure I- 12)
- De densité d'impacts
- De vitesses et d'angles d'impacts

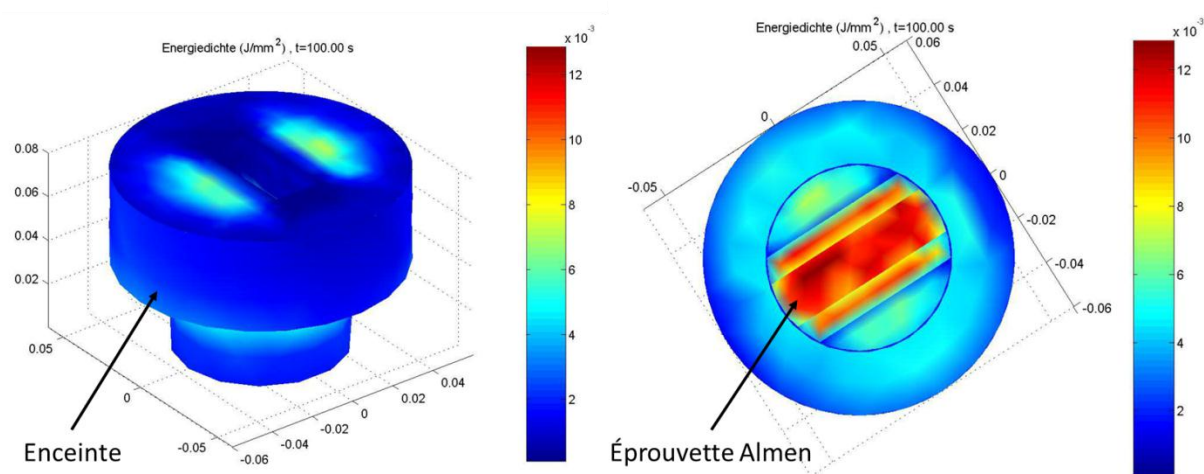


Figure I- 12 : Distribution spatiale de l'énergie cinétique cumulée (J/mm^2) au niveau de l'enceinte (à gauche) et de l'éprouvette Almen (à droite) [67].

3.3.3. Principaux résultats obtenus

P. Thümmel a ainsi pu aboutir, entre autres, à :

- Une relation entre l'intensité Almen, mesurée expérimentalement, et la densité d'énergie cinétique obtenue numériquement.
- Des cartographies détaillées des distributions spatiales, listée dans la section I.3.3.2, sur une éprouvette Almen.

3.3.4. Limitations et inconvénients

Les limitations du modèle ont pour origine :

- Une forte dépendance des temps de calcul à la taille du maillage. Ceci peut limiter fortement la complexité géométrique des configurations simulées.
- Une simulation de faibles temps de traitement, puis l'obtention des cartographies finales par simple extrapolation sur des temps de maillage élevés.
- Les vitesses atteintes par la sonotrode découlent de l'étude effectuée par C. Pilé *et al.* [64].
- Pas de pièces tournantes pendant le traitement. Or un grand nombre de pièces traitées par GUS sont mises en rotation.

3.4. Modélisation de Nougier-Lehon *et al.* (2012)

Une étude numérique de la dynamique des billes, par la méthode des éléments discrets (MED) [69], a été récemment publiée par C. Nougier-Lehon *et al.* [70]. Elle résulte d'un travail conjoint entre des chercheurs de l'école Centrale de Lyon et de l'entreprise Areva. Les auteurs ont utilisé la plateforme LMGC90¹⁶ afin d'effectuer leurs simulations.

3.4.1. Paramètres de simulation

L'étude a porté sur le GUS d'une barre en cuivre, positionnée dans une enceinte parallélépipédique, comme illustré dans la *Figure I- 13*. Quant à la MED, elle permet l'étude de la dynamique des billes et la prise en compte de géométries complexes (maillages). Lors des simulations :

¹⁶ Online, < http://www.lmgc.univ-montp2.fr/LMGC90/LMGC90/Welcome_!.html >, visité le 28/01/2014.

- Les dissipations d'énergies lors des chocs sont prises en compte à travers des coefficients de restitution constants.
- Le pas de temps est constant et fixé à $1.25 \mu\text{s}$.
- 512 billes, de diamètre 2 mm, sont utilisées.
- L'oscillation de la sonotrode suit un mouvement sinusoïdal.

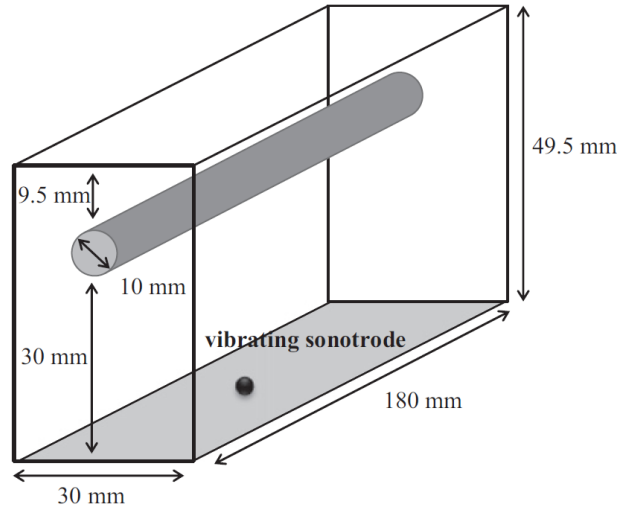


Figure I- 13 : Géométrie du dispositif de grenaillage ultrason, tel que défini par les auteurs [70].

3.4.2. Possibilités offertes par le modèle

À nouveau, le modèle proposé permet :

- De modéliser la dynamique des billes, dans le cadre d'une opération de GUS.
- D'accéder aux vitesses, angles et densités d'impact sur la pièce.

3.4.3. Principaux résultats obtenus

Dans la configuration étudiée, le modèle a permis de mettre en évidence des distributions de vitesses, d'angles et de densités d'impacts inhomogènes sur la circonférence de la barre. De fortes disparités sont observées entre le bas de la pièce (partie face à la sonotrode) et le haut. Il en est de même entre ces deux parties et les côtés latéraux de la barre. Ces disparités sont d'autant plus vraies pour les vitesses et les angles d'impacts.

À l'origine des hétérogénéités la géométrie de la pièce et le fait qu'elle soit statique pendant le traitement. C'est d'ailleurs pour cette raison que les pièces de révolution sont mises en rotation dans l'industrie.

3.4.4. Limitations et inconvénients

Les limitations du modèle sont les suivantes :

- Des coefficients de restitution indépendants des vitesses d'impacts.
- Des temps de calculs très importants, limitant très fortement la durée du traitement simulée.

4. Conclusions du chapitre

4.1. Rappel des problématiques et besoins évoqués

D'un point de vue procédé, afin de maîtriser les effets du GUS, il est nécessaire de connaître le lien entre dynamique des billes et les paramètres procédé. Or jusqu'à très récemment, peu d'études permettaient de faire le lien entre les paramètres procédé et les propriétés d'impacts, au sens large. Cependant, il apparaît que des liens existent dans le cadre des gaz granulaires vibrés. En effet, ce cadre constitue une solide base théorique pour la résolution de la problématique.

D'un point de vue numérique, les différents modèles existant présentent des limitations et inconvénients particuliers, comme résumé par la *Table I- 1*. Aucun d'entre eux ne semble capable, individuellement, de modéliser la dynamique des billes dans des configurations complexes, proches des conditions industrielles, et dans des temps de calculs adaptés à une utilisation industrielle quotidienne.

Table I- 1 : Tableau comparatif des modèles existants de dynamique des billes.

Modèle	Géométries	Coefficients de restitution	Pour simuler 1 seconde	Géométries complexes	Pièce en rotation	Oscillation de la sonotrode
C. Pilé <i>et al.</i>	Analytique 1D	Constants	Instantané	Non	Non	Sinusoïdale
M. Micoulaut <i>et al.</i>	Analytique 3D	Dépendants de la vitesse	Quelques secondes	Non	Non	Triangulaire
P. Thümmeler <i>et al.</i>	Maillage 3D	Dépendants de la vitesse	-	Oui	Non	Sinusoïdale
C. Nougulier-Lehon <i>et al.</i>	Maillage 3D	Constants	Plusieurs heures	Oui	Oui	Sinusoïdale

4.2. Démarche adoptée

Afin de répondre à la problématique industrielle et en vue des limitations propres aux modèles existants (I.3), il a été convenu de développer un modèle de la dynamique des billes, conçu pour une utilisation industrielle. Cela signifie que le modèle doit, tout d'abord, supporter des géométries complexes et quelconques de sonotrodes, d'enceintes et de pièces à traiter. Il est également important de pouvoir simuler le procédé sur des pièces mises en rotation durant le traitement, ce qui correspond à une grande partie des applications industrielles. De plus, les temps de calculs liés aux simulations devront être le plus faible possible.

Afin d'y parvenir, la première étape (Chapitre II) a consisté à étudier de manière détaillée l'influence des paramètres matériaux et de la géométrie d'enceinte, à l'aide d'un modèle dérivé de celui utilisé par Micoulaut *et al.* [6]. En effet, celui-ci s'avère très performant pour étudier la dynamique des billes dans des configurations peu complexes. La seconde étape (Chapitre III) a consisté à étendre la modélisation à des configurations industrielles complexes. Ceci a donc nécessité de repenser l'approche à adopter afin de répondre à la problématique et de respecter les critères que nous nous sommes imposés. En parallèle de la partie numérique, une approche expérimentale (Chapitre IV) a été mise en place afin de disposer de moyens de validation, capables de mesurer le recouvrement d'une surface grenailée, les trajectoires de billes dans l'enceinte et les vitesses d'impacts sur la pièce à traiter.

Chapitre II – Modélisation du GUS pour des géométries simples

Le présent chapitre traite de la modélisation du GUS pour des géométries simples. La première partie présente le modèle 3D analytique, issu d'un modèle de gaz granulaires développé au LPTMC [6], adapté à la simulation du GUS dans une enceinte prismatique. La seconde partie sur l'effet d'une variation des coefficients de restitution sur la dynamique des billes. Dans la troisième partie, des études numériques permettent de déterminer l'influence des paramètres procédés sur la dynamique des billes ; d'autres renseignent sur l'influence de la sensibilité du modèle aux conditions initiales.

1. Modèle 3D analytique

Comme indiqué dans le Chapitre I, il existe un lien entre les gaz granulaires vibrés et le grenailage ultrason. Ainsi, un modèle (initial) de gaz granulaires, développé au sein du LPTMC, servira comme **brique de base** dans la modélisation du GUS pour des géométries d'enceintes et de pièces simples. Ce modèle, décrit en détail par Micoulaut *et al.* (2007) [6] et présenté dans la section I.3.2, permet de simuler la dynamique d'un ensemble de billes rigides, contenues dans une enceinte cylindrique. Les premières études numériques sur le grenailage ultrason ont eu lieu en 2005, dans le cadre d'une collaboration entre le LPTMC et le LASMIS [58], [66].

1.1. Algorithme évènementiel – ‘Event-Driven’

L'algorithme sur lequel repose le modèle, dit ‘initial’, est un algorithme évènementiel ou « Event-Driven » [71], [72]. Cela signifie que la simulation est incrémentée d'un évènement à un autre. Dans le cadre de la dynamique des billes, un évènement correspond à une collision instantanée entre deux billes ou entre une bille et une paroi. Afin d'y parvenir, il faut pouvoir calculer le plus petit prochain temps d'impact. En d'autres termes, cela revient à calculer, pour chaque bille, les temps nécessaires pour entrer en collision avec les d'autres billes et avec les parois, si cela a lieu.

L'algorithme, schématisé dans la *Figure II- 1*, est découpé en trois phases. La première (de couleur bleue) correspond à l'initialisation de la simulation. Lors de cette phase, les paramètres procédés et géométriques, relatifs au dispositif de grenailage, sont lues à partir de

fichiers d'entrée. Ensuite, l'ensemble des billes est généré dans l'enceinte. Une fonction dédiée positionne aléatoirement chaque bille, tout en assurant l'absence d'interférences avec les autres billes et les parois, et lui attribue une vitesse initiale faible. La seconde phase de l'algorithme correspond au cœur du modèle, *i.e.* la boucle principale. À chaque itération, le prochain temps d'impact est calculé (section II.1.3). Ensuite, les positions et vitesses de billes sont mises à jour. Une condition de sortie sur la durée de traitement simulé permet de mettre fin à la simulation, lorsque celle-ci est vérifiée. Dans ce cas, l'algorithme passe à la troisième et dernière phase : l'extraction et le post-traitement des résultats.

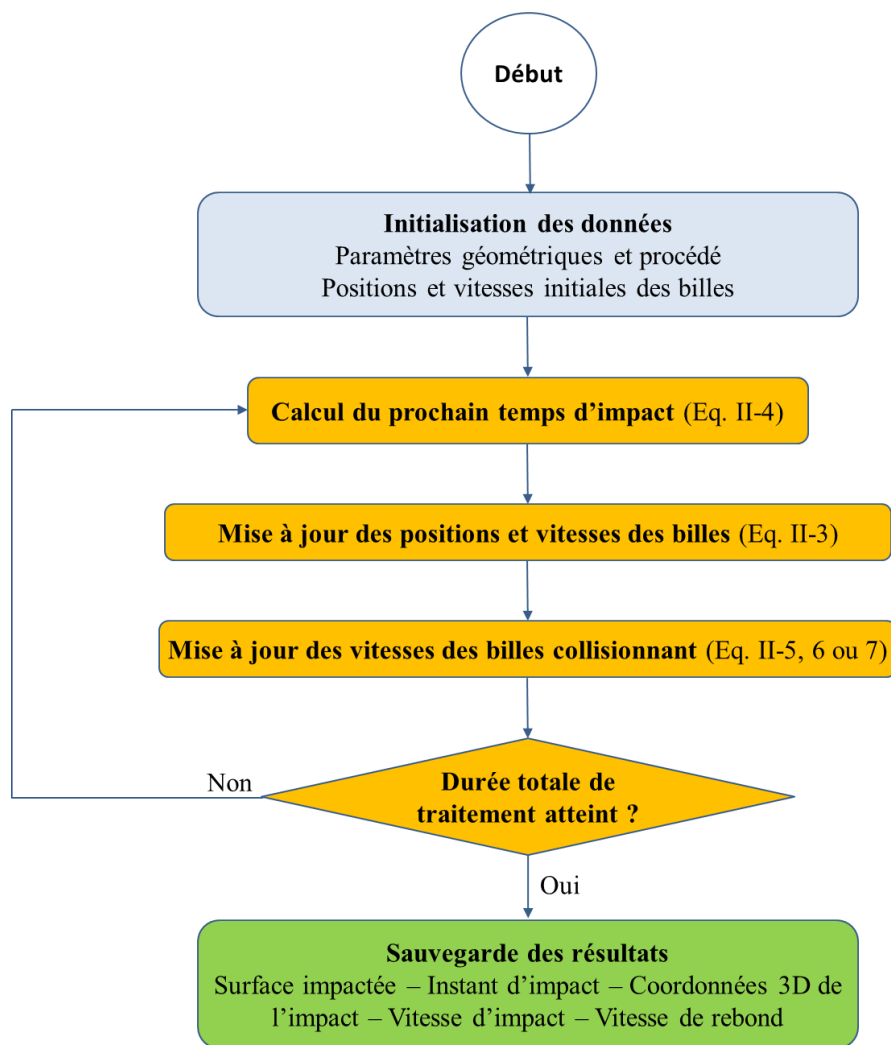


Figure II- 1 : Algorithme événementiel du modèle

1.2. Description géométrique

Dans le modèle initial (*cf.* Chapitre I.3.2), les différentes parois constituant l'enceinte, la pièce et la sonotrode sont décrites de manière analytique, comme illustré dans la Figure II- 2.

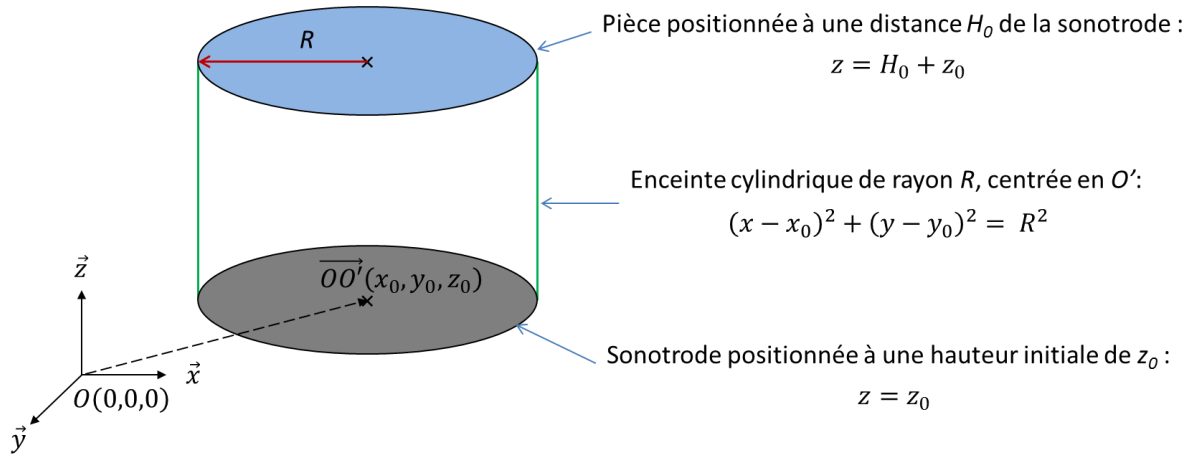


Figure II- 2 : Description mathématique du modèle de gaz granulaires, pour enceinte cylindrique.

Cependant, dans le cadre des activités de SNECMA, les pièces soumises au GUS peuvent prendre plusieurs orientations, par rapport à la sonotrode. Afin de modéliser le procédé, dans les conditions industrielles souhaitées (Figure II- 3), des développements supplémentaires ont été apportés au modèle initial. Il s'agit, en fait, de modéliser la dynamique des billes dans le cadre d'une enceinte à section rectangulaire, et dont la surface supérieure correspond à la pièce à traiter ; cette dernière pouvant être inclinée d'angle α . Ce qui résulte en une enceinte en forme de prisme, comme illustré à droite de la Figure II- 3.

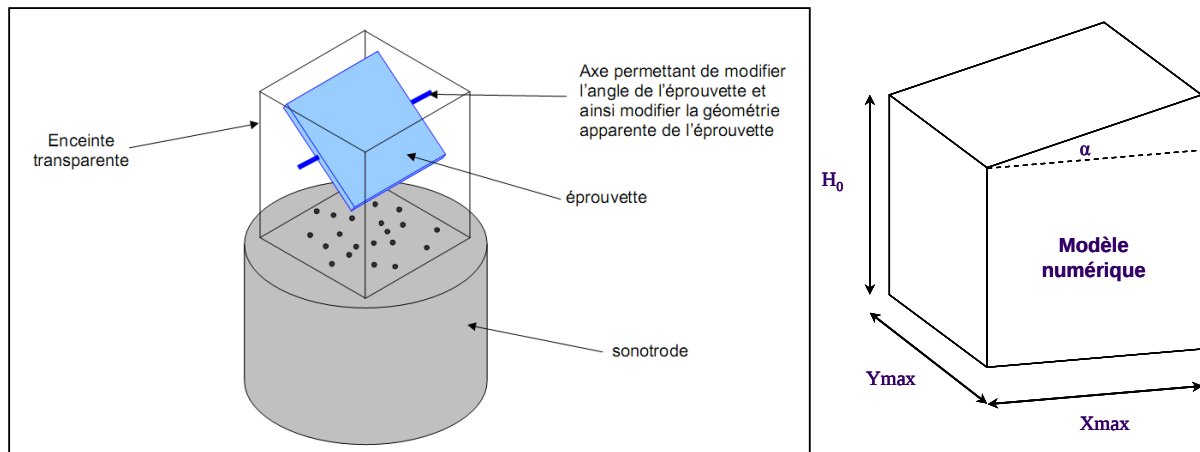


Figure II- 3 : Présentation de la problématique industrielle (à gauche) et du modèle proposé (à droite).

1.3. Détection et gestion des collisions

Dans le cadre du GUS, tout comme les gaz granulaires, une grande partie des collisions sont inélastiques, et donc énergétiquement dissipatives. Ces dissipations (mécaniques, vibratoires, thermiques, etc.) sont prises en compte à l'aide de coefficients de restitution. Ces

coefficients, présentés plus en détail dans la section 1.3.1, permettent de calculer les vitesses de rebond des billes, en fonction de la nature du choc et des matériaux utilisés.

1.3.1. Coefficients de restitution

Les coefficients de restitution sont des paramètres matériaux, utilisés dans les simulations de grenailage ultrason, qui renseignent la quantité d'énergie restituée à une bille lors d'une collision avec un autre objet $k = \{\text{billes ; enceinte ; sonotrode ; pièce}\}$. Ainsi, à chaque couple de matériaux, susceptibles d'entrer en contact, un coefficient de restitution tangentiel et normal leur est attribué.

Le coefficient de restitution tangentiel μ^k permet de rendre compte, lors d'une collision, de l'énergie dissipée, principalement, sous forme de frottement et en transformation d'énergie cinétique en énergie rotationnelle. Sa valeur est comprise entre 0 (dissipation totale d'énergie) et 1 (restitution totale d'énergie). Afin de simplifier les calculs, ce coefficient sera considéré comme constant.

Le coefficient de restitution normal permet de rendre compte, lors d'une collision, de l'énergie dissipée, principalement, sous forme de déformations plastiques. Cette énergie est souvent liée à la création d'un cratère d'impact et de la génération des contraintes résiduelles de compression. Comme le prouvent plusieurs publications [73]–[76], ce coefficient $C^k(V)$ dépend principalement de la vitesse normale d'impact relative V et s'exprime de la manière suivante :

$$C^k(V) = \begin{cases} C_0^k & \text{Si } V < V_0^k \text{ (Élastique)} \\ C_0^k \cdot \left(\frac{V}{V_0^k}\right)^{-0.25} & \text{Si } V \geq V_0^k \text{ (Inélastique)} \end{cases} \quad (\text{II- 1})$$

avec C_0^k le coefficient de restitution normal seuil relatif à un impact élastique ; V_0^k la vitesse normale seuil de plasticité. Ainsi, le coefficient de restitution normal peut donc être estimé à la fois pour des impacts viscoélastiques et des impacts inélastiques. Sa valeur est comprise entre 0 (dissipation totale d'énergie) et 1 (restitution intégrale d'énergie).

1.3.2. Collisions entre billes

Entre les collisions, les billes suivent une trajectoire parabolique, sous l'action seule de l'accélération gravitationnelle $\vec{g} = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix}$. À partir de la seconde loi de Newton [77] (Eq. II-

2), la somme des forces extérieures $\vec{F}_{ext \rightarrow bille}$ agissant sur une bille k , de masse m_b , est proportionnelle à son accélération $\vec{a}$.

$$\sum \vec{F}_{ext \rightarrow bille} = m_b \cdot \vec{a} = m_b \cdot \vec{g} \quad (II- 2)$$

L'équation horaire de la trajectoire d'une bille k s'écrit donc (Eq. II-3) :

$$\vec{U}_k(t + \Delta t) = \frac{1}{2} \vec{g} \cdot (\Delta t)^2 + \vec{V}_k(t) \cdot \Delta t + \vec{U}_k(t) \quad (II- 3)$$

Où $\vec{V}_k(t)$ et $\vec{U}_k(t)$ sont respectivement la vitesse et la position de la bille, à un instant donné t . Δt est le temps séparant deux positions consécutives.

Il est ainsi possible de prédire analytiquement les collisions, de manière à avancer le système (l'ensemble des billes) jusqu'à l'instant de la prochaine collision détectée. Le problème revient alors à déterminer si deux trajectoires paraboliques, appartenant aux billes i et j , donnent lieu ou non à une collision ; étant donné leur diamètre D , leurs position $\vec{dU}$ et vitesse $\vec{dV}$ relatives. Il s'agit ainsi de déterminer Δt , en résolvant l'équation ci-dessous :

$$(\vec{dV} \cdot \Delta t + \vec{dU})^2 = (D/2)^2 \quad (II- 4)$$

avec $\vec{dV} = \vec{V}_j(t) - \vec{V}_i(t)$ et $\vec{dU} = \vec{U}_j(t) - \vec{U}_i(t)$

Lorsqu'une collision a lieu entre deux billes i et j , le principe de conservation de la quantité de mouvement permet de calculer la vitesse de rebond de chacune des billes [54], [58].

$$\vec{V}'_{i,j} = \vec{V}_{i,j} - \frac{1}{2} \cdot [1 + C^{BB}(\Delta V_{ji})] \cdot \Delta V_{ji} \cdot \vec{r} \quad (II- 5)$$

avec $\Delta V_{ji} = (\vec{V}_j - \vec{V}_i) \cdot \vec{r}$

Où les primes dénotent les quantités post-collision ; $\vec{V}_{i,j}$ est la vitesse d'impact de la bille i ou j ; $\vec{V}_i$ et $\vec{V}_j$ sont la vitesse de la bille i et j au moment du choc, respectivement ; $\vec{r}$ est le vecteur unité reliant les centres des billes i et j ; C^{BB} est le coefficient de restitution normal associé aux collisions entre billes.

1.3.3. Collisions Bille – Paroi immobile

Les collisions, de type Bille – Paroi immobile (BPI), correspondent aux chocs qui ont lieu entre les billes et les surfaces qui définissent l'enceinte et la pièce grenailée. Cela se traduit par la résolution d'une équation du second degré qui consiste à déterminer le temps qu'il faut pour que la trajectoire d'une bille intersecte une surface donnée. La vitesse de rebond des billes, quant à elles, se calcule de la manière suivante :

$$\vec{V}_i' = \left(\mu^{BPI} \cdot (\vec{V}_i - V_n \cdot \vec{n}) \right) \cdot \vec{t} - (C^{BPI}(V_n) \cdot V_n) \cdot \vec{n} \quad (\text{II- 6})$$

avec $V_n = \vec{V}_i \cdot \vec{n}$

Où les primes dénotent les quantités post-collision ; $\vec{V}_i$ est la vitesse d'impact de la bille i ; μ^{BPI} et C^{BPI} sont, respectivement, les coefficients de restitution tangentiel et normal attribués à chaque couple Bille – Paroi immobile ; les quantités $\vec{t}$ et $\vec{n}$ correspondent, dans l'ordre, au vecteur tangentiel et normal à la surface impactée.

1.3.4. Collisions Bille – Sonotrode

Abstraction faite de la déformation plastique des parois de l'enceinte et de la pièce elle-même, la sonotrode est la seule paroi mobile du dispositif. Son mouvement est modélisé par un signal triangulaire (*Figure II- 4*). Ce choix de modélisation, au lieu d'un signal sinusoïdal proche des conditions réelles, permet une résolution analytique (encore une équation du second degré) de l'instant d'impact entre une bille et une paroi animée d'un mouvement vertical uniforme.

Soit Z_0 la position verticale de la sonotrode au repos. Lorsqu'elle est mise en mouvement, sa position oscille d'une amplitude maximale de $\pm A_0$, autour de la position Z_0 . La période est ainsi définie comme l'intervalle de temps séparant deux tels maxima, comme illustré en *Figure II- 4*. La détection de collisions, dans le cas présent, consiste tout d'abord à déterminer l'instant à partir d'où le prolongement de la trajectoire (parabolique) d'une bille intersecte l'altitude maximale, atteinte par la sonotrode ($Z_0 + A_0$). La demi-période, pendant laquelle le contact aura lieu, est ensuite déterminé. Enfin, le temps d'impact s'obtient analytiquement, étant donné le diamètre de la bille, sa positions et vitesse, ainsi que la position de la sonotrode au moment du choc. Les vitesses de rebond, dans le cadre de collisions de type Bille – Sonotrode (BS), s'écrivent ainsi :

$$\vec{V}_i' = \vec{V}^s + \vec{\Delta V} \cdot [\mu^{BS} \cdot \vec{t} - C^{BS}(\vec{\Delta V} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}] \quad (\text{II- 7})$$

avec $\vec{\Delta V} = \vec{V}_i - \vec{V}^s$

Où les primes dénotent les quantités post-collision ; $\vec{V}_i$ est la vitesse d'impact de la bille i ; $\vec{V}^s$ est la vitesse de la sonotrode au moment de l'impact ; μ^{BS} et C^{BS} sont, respectivement, les coefficients de restitution tangentiel et normal attribués à chaque couple Bille – Sonotrode ; les quantités $\vec{t}$ et $\vec{n}$ correspondent, dans l'ordre, au vecteur tangentiel et normal à la surface de la sonotrode.

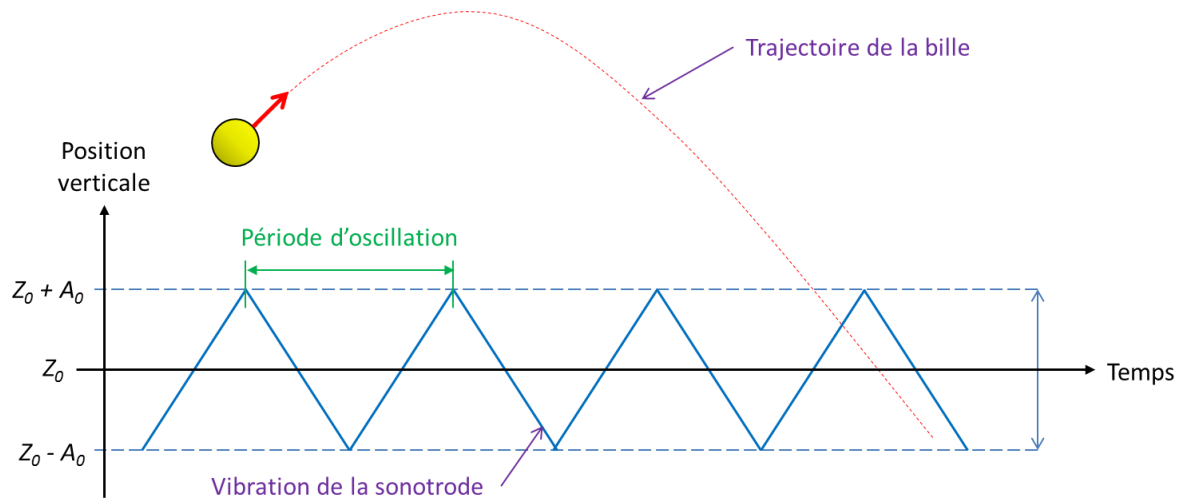


Figure II- 4 : Détection de collision entre une bille et la sonotrode.

1.3.5. Calcul du pas de temps

La détection des collisions, tout type confondu, passe par le calcul du prochain temps d'impact, qui sépare chaque bille des autres billes et parois du dispositif de grenaillage ultrason. Ainsi, en conservant l'ensemble de ces données et les couples collisionnant concernés, il est possible d'en extraire le plus petit prochain temps d'impact qui est retenu. Ce dernier servira à incrémenter la simulation et passer ainsi d'un évènement à l'autre.

2. Sensibilité aux conditions initiales

Comme mentionné dans la section II.1.1, une position et vitesse initiale sont attribuées aléatoirement à chacune des billes. De ce fait, il est important d'étudier la sensibilité du modèle aux conditions initiales. L'enceinte cylindrique est considérée pour cette étude. Cependant, les conclusions sont les mêmes pour l'enceinte prismatique. Les paramètres choisis pour l'étude sont listés dans la *Table II- 1*.

Table II- 1 : Paramètres constants utilisés dans l'étude de sensibilité aux conditions initiales.

Paramètres	Valeurs
Enceinte cylindrique	
Rayon de l'enceinte (R)	35 mm
Hauteur de l'enceinte (H)	40 mm
Procédé	
Fréquence de vibration de la sonotrode (F)	20 kHz
Amplitude de vibration de la sonotrode (A)	25 μm
Temps de grenaillage simulé	> 20 s
Diamètre de billes (D)	3 mm
Masse totale de billes (M)	(Variable)
Coefficients de restitution (Eq. II- 1)	
Collisions sphère – sphère et	$C_0 = 0.9$
sonotrode – sphère	$V_0 = 1.2 \text{ cm/s}$
Collisions pièce – sphère et	$C_0 = 0.9$
enceinte – sphère	$V_0 = 1.2 \text{ cm/s}$

Le nombre d'impacts cumulé à la surface de la pièce est analysé en fonction du temps de traitement simulé. Les résultats de six calculs, ayant des paramètres identiques mais des conditions initiales différentes, sont présentés dans la *Figure II- 5*. En échelle linéaire, aucune influence des conditions initiales n'est détectable. Pour cette raison, les mêmes données sont tracées en échelle logarithmique afin d'amplifier toute influence pouvant avoir lieu pendant les premiers instants de traitement. Ainsi, il devient possible de distinguer une phase transitoire et une phase stationnaire. La figure montre également que la phase transitoire est composée de deux sous-phases :

- La première ($t < 10^{-1} \text{ s}$) correspond aux instants des tous premiers impacts pendant lesquels l'évolution du nombre cumulé d'impact est similaire pour les six calculs.
- Dans la seconde ($10^{-1} \text{ s} < t < 10 \text{ s}$), l'effet des conditions initiales devient clairement perceptible.

Ces observations permettent de définir un temps critique, à partir duquel l'évolution du nombre cumulé d'impact devient linéaire en fonction du temps de traitement. Sur la *Figure II- 5*, ce temps critique est atteint au bout de 12 secondes de traitement, et correspond à plus de 10 000 impacts à la surface de la pièce grenaillée. Ces mêmes conclusions restent valides si

des vitesses initiales sont imposées aux billes. Se référer à l'Annexe 1 pour plus de détails.

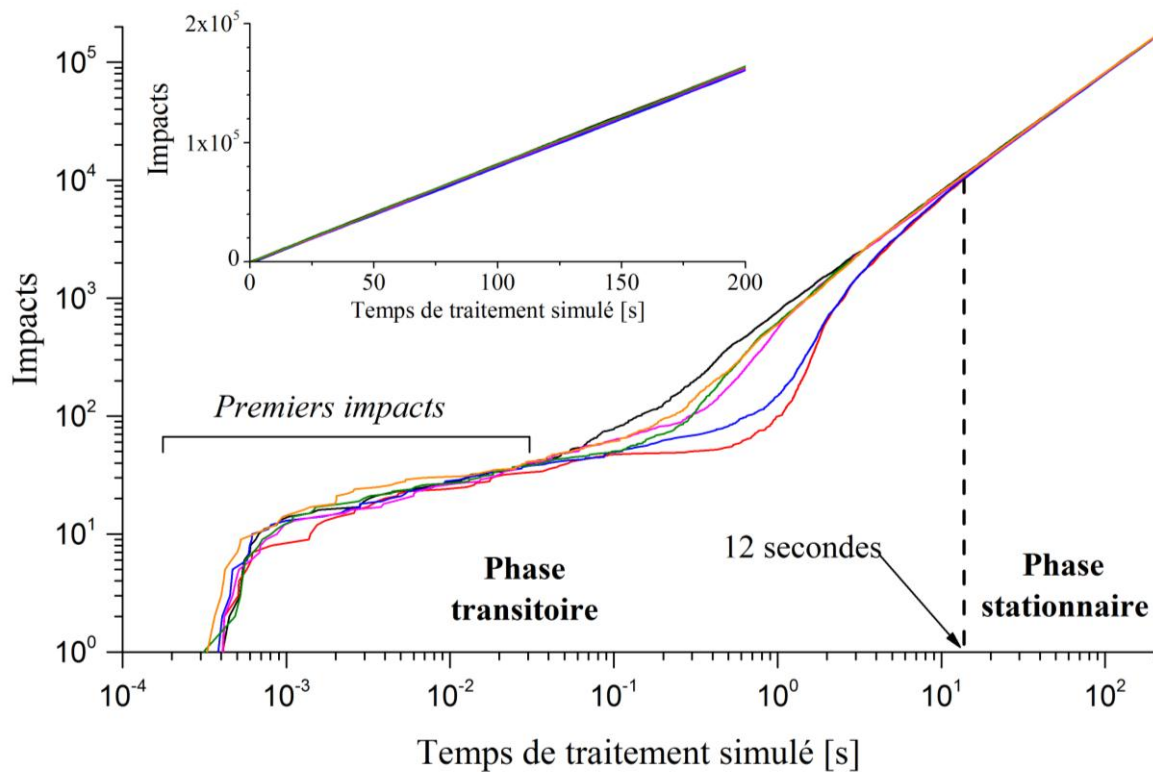


Figure II- 5: Nombre cumulé d'impacts sur la pièce grenaillée. Le graphe principal est tracé avec une échelle Log-Log et le secondaire avec une échelle linéaire. Une masse totale de billes de 3.3 g (30 billes) a été utilisée.

La prochaine étape consiste à étudier l'influence de paramètres procédés sur le temps critique. En première approche, l'attention est portée sur le nombre N de billes. La Figure II- 6 présente l'évolution du nombre cumulé d'impacts en fonction du temps de traitement, pour cinq quantités de billes. Ce temps critique, avec une représentation en échelle Log-Log des mêmes données, montre une sensibilité au nombre de billes utilisé. Des résultats similaires ont été obtenus lorsque l'amplitude de vibration de la sonotrode varie.

Dans l'industrie, les billes sont versées dans l'enceinte. Leurs positions initiales sont inconnues et peuvent donc être considérées comme aléatoires. La phase transitoire mise en évidence par le modèle permet ainsi une prédiction qualitative de la dynamique des billes, dès les premières collisions. La transition entre les phases transitoire et stationnaire dépend donc des paramètres procédé. Il est donc important d'évaluer cette grandeur pour chaque configuration de grenaillage ultrason, afin de garantir la répétabilité du procédé d'une pièce à l'autre.

Malgré le fait que les positions initiales des billes soient aléatoirement choisies, le modèle présente clairement une stabilité et une convergence des résultats obtenus. Il a également été remarqué que la phase stationnaire est généralement atteinte au-delà de 10 000 impacts à la surface de la pièce grenaillée. Ceci correspond à un temps inférieur à 15 secondes. Dans la suite du manuscrit, les résultats présentés seront extraits de la phase stationnaire afin d'assurer l'indépendance avec les conditions initiales.

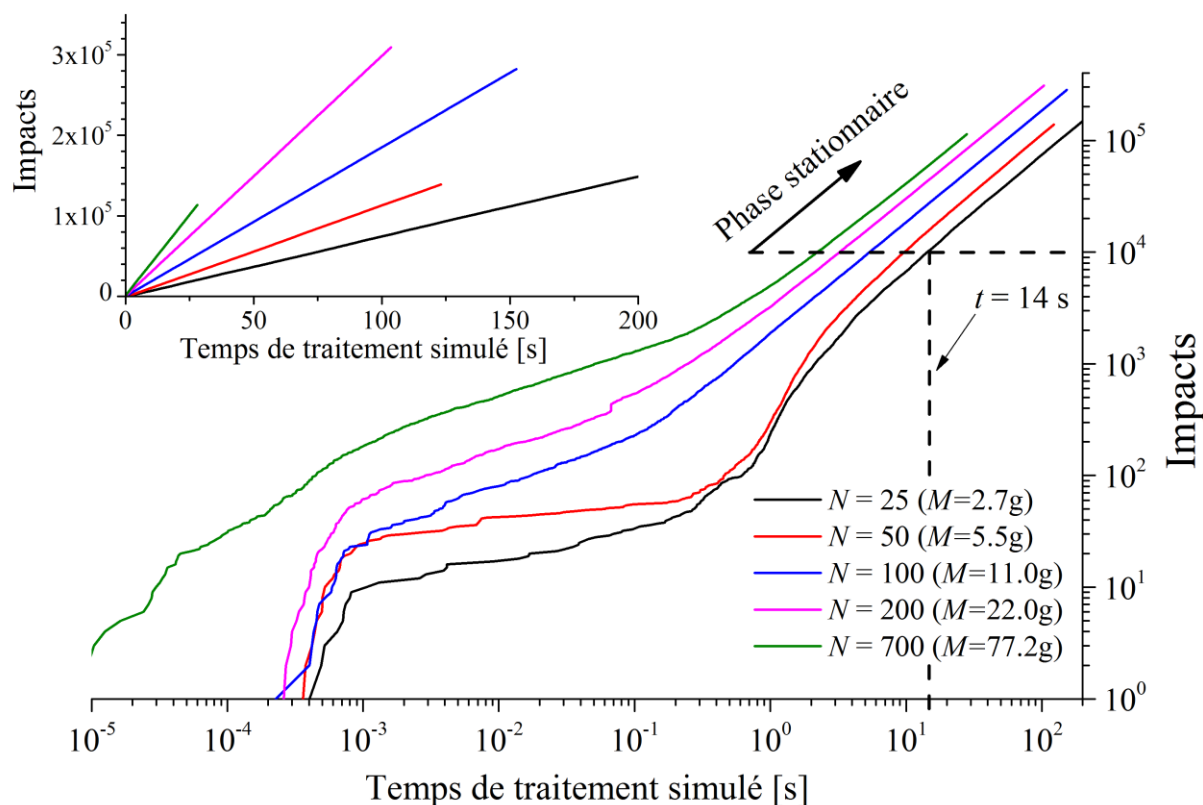


Figure II- 6: Nombre cumulé d'impacts sur la pièce grenaillée, pour cinq nombre de billes N . Le graphe principal est tracé avec une échelle Log-Log et le secondaire avec une échelle linéaire.

3. Coefficients de restitution normaux

3.1. Quel intérêt pour ces coefficients ?

Lors d'un traitement de GUS, les propriétés matériaux des billes, de l'enceinte, de la sonotrode et de la pièce évoluent. En effet, sous l'effet des collisions répétitives, les matériaux s'écrouissent (durcissement ou adoucissement) modifiant la quantité d'énergie restituée aux billes ou absorbée par le matériau impacté. Or, cette évolution n'est pas prise en compte dans le modèle. Il est donc important d'étudier l'influence de telles variations sur la dynamique des

billes. Les études sont faites dans le cadre de l'enceinte prismatique, avec une inclinaison de pièce nulle. Cela revient donc à une enceinte parallélépipédique. Les grandeurs étudiées sont :

- La fréquence d'impact surfacique (FIS) : cette grandeur correspond à un nombre d'impacts par millimètres carrés et par seconde [$\text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] et peut être reliée à l'évolution du recouvrement au cours du traitement. Elle sera évaluée le long de la longueur (FIS_x) et de la largeur (FIS_y) de la pièce, comme illustré dans la Figure II- 7.
- La vitesse d'impact moyenne (V_{moy})
- L'angle d'impact moyen (β_{moy}) : l'angle est calculé par rapport à la normale de la surface impactée. Un angle de 0° correspond donc à un impact normal, tandis que 90° correspond à un impact rasant (Figure II- 8).

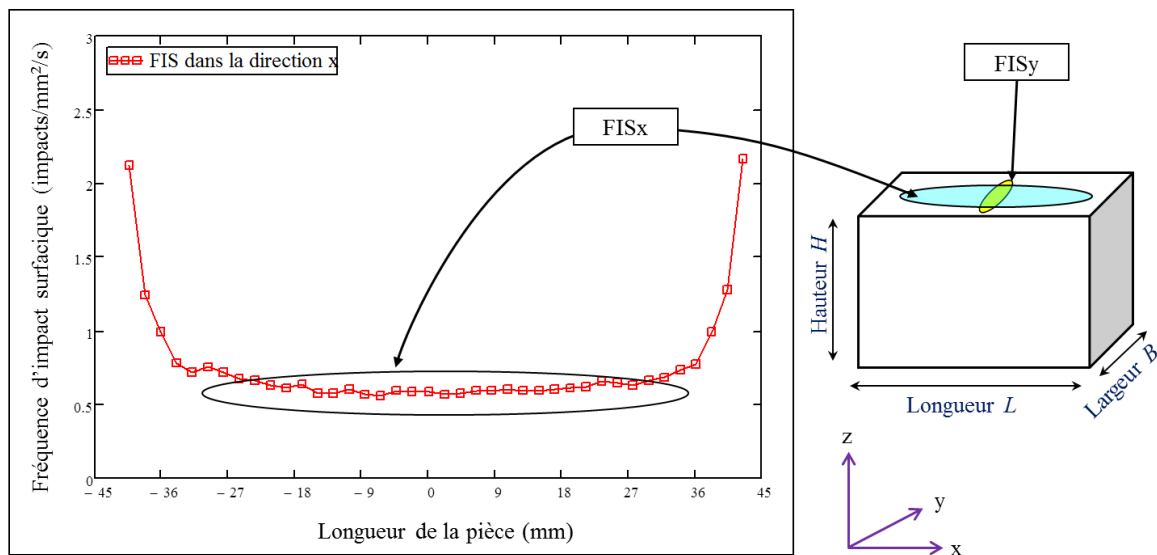


Figure II- 7 : Définition et localisation des variables FIS_x et FIS_y caractéristiques de la fréquence d'impact surfacique suivant les axes x et y , dans le cadre de l'étude effectuée.

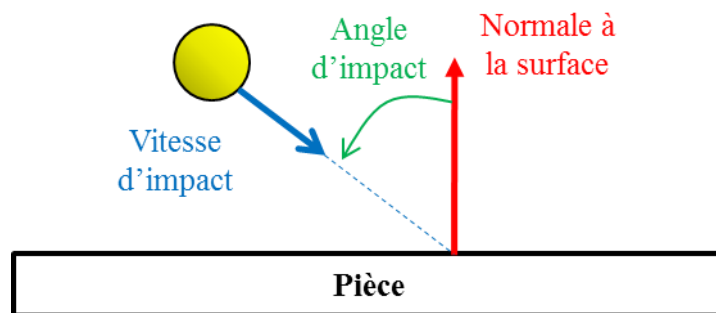


Figure II- 8 : Définition de l'angle d'impact β_{moy} .

3.2. Configuration de l'étude numérique

La présente étude consistera à quantifier l'effet de la variation des coefficients de restitution seuils de l'enceinte ($C_0^{enceinte}$), de la pièce à traiter ($C_0^{pièce}$), de la sonotrode ($C_0^{sonotrode}$) et des billes (C_0^{billes}) sur les grandeurs physiques présentées ci-dessus (section II.3.1). Cette démarche vise à comprendre l'effet de l'écroutissage, ou d'éventuelles erreurs de mesure des coefficients de chaque composant du dispositif de grenaillage, sur le chargement que voit la pièce traitée. L'ensemble des calculs a été réalisé avec les paramètres d'entrée suivants :

- Masse totale de billes $M = 11,5$ g (104 billes)
- Diamètre des billes $D = 3$ mm
- Amplitude de vibration $A_0 = 25$ μ m (0/crête)
- Fréquence d'amplitude $Fr = 20$ kHz
- Longueur de l'enceinte $L = 85$ mm
- Largeur de l'enceinte $B = 36$ mm
- Hauteur de l'enceinte $H = 45$ mm

La valeur de chacun des coefficients de restitution seuils ($C_0^{enceinte}$, $C_0^{pièce}$, $C_0^{sonotrode}$ et C_0^{billes}) est fixée à une valeur référence de 0.6. À tour de rôle, cette valeur référence est variée de ± 10 %, ± 30 % et ± 50 %. Les distributions statistiques de la FIS, vitesses et angles d'impact ont été comparées, mais n'exhibent pas de variations importantes. Pour cette raison, l'étude de sensibilité se basera uniquement sur les valeurs moyennes de ces grandeurs. Elles permettront ainsi de mieux quantifier l'influence de chaque coefficient. Les vitesses seuils de plasticité $V_0^{enceinte}$ et $V_0^{pièce}$ ont été fixées à 1.2 mm/s ; et ceux de $V_0^{sonotrode} = V_0^{billes}$ à aux valeurs suivantes :

- $V_0^{enceinte} = V_0^{pièce} = 0.0012$ m/s
- $V_0^{sonotrode} = V_0^{billes} = 0.12$ m/s

3.3. Collisions Bille-Enceinte

On s'intéresse à présent à la variation du coefficient de restitution normal seuil $C_0^{enceinte}$, qui gouverne les chocs entre les billes et les parois de l'enceinte. Les autres coefficients de

restitution normaux seuils ont été fixés à 0.6 pour $C_0^{\text{pièce}}$ et 0.91 pour C_0^{billes} et $C_0^{\text{sonotrode}}$.

La Figure II- 9 représente l'évolution en pourcents des grandeurs physiques étudiées, i.e. $FISx$, $FISy$, V_{moy} et β_{moy} , en fonction de la variation de la valeur de C_0^{enceinte} . Par exemple, une variation de +50 % de la valeur de C_0^{enceinte} induit une augmentation de 4 % de la vitesse d'impact moyenne, au niveau de la pièce grenaillée. Les résultats des différentes simulations montrent que l'évolution des grandeurs physiques croît lorsque la variation de la valeur du coefficient de restitution augmente. En revanche, il apparait clairement que C_0^{enceinte} possède une influence négligeable sur les grandeurs observées. Cela signifie que si les matériaux composant l'enceinte se durcissent ou s'adoucissent durant le traitement, les effets de telles variations sont négligeables sur ce que reçoit la pièce à traiter.

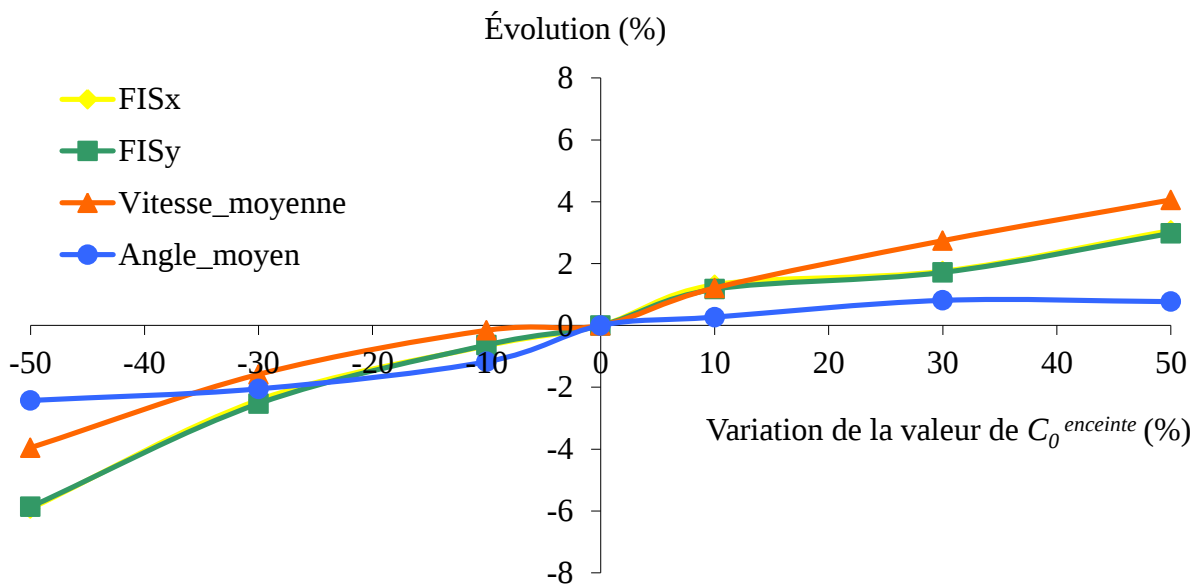


Figure II- 9 : Effets de la variation du coefficient de restitution seuil $C_0^{\text{enceinte}} = 0.6$.

3.4. Collisions Bille-Pièce

Nous nous intéressons à présent à la variation du coefficient de restitution normal seuil $C_0^{\text{pièce}}$ qui gouverne les chocs entre les billes et la pièce. Les autres coefficients de restitution normaux seuils ont été fixés à 0.6 pour C_0^{enceinte} et 0.91 pour C_0^{billes} et $C_0^{\text{sonotrode}}$.

La Figure II- 10 représente l'évolution en pourcents des grandeurs physiques étudiées, i.e. $FISx$, $FISy$, V_{moy} et β_{moy} , en fonction de la variation de la valeur de $C_0^{\text{pièce}}$. Par exemple, une variation de +50 % de la valeur de $C_0^{\text{pièce}}$ induit une diminution de 6 % de l'angle d'impact moyen, au niveau de la pièce grenaillée. Les résultats montrent que l'évolution des grandeurs physique décroît lorsque la variation de la valeur du coefficient de restitution augmente, sauf

pour la vitesse d'impact moyenne qui exhibe une tendance inversée. En revanche, il apparaît également que $C_0^{pièce}$ possède une influence négligeable sur les grandeurs observées. Cela signifie que même lorsque le matériau grenaillé s'écrouit sous l'effet des impacts, les effets de telles variations semblent négligeables sur la dynamique des billes et par conséquent sur ce que voit la pièce, elle-même, par la suite.

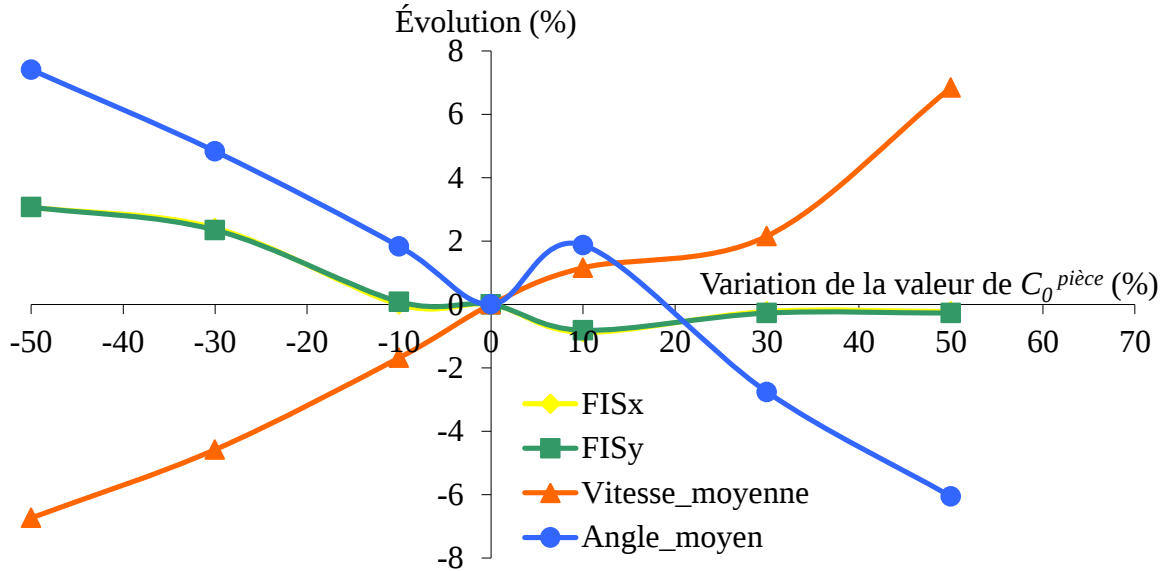


Figure II- 10 : Effets de la variation du coefficient de restitution seuil $C_0^{pièce} = 0.6$.

3.5. Collisions Bille-Sonotrode

On s'intéresse à présent à la variation du coefficient de restitution normal seuil $C_0^{sonotrode}$ qui gouverne les chocs entre les billes et la sonotrode. Les autres coefficients de restitution normaux seuils ont été fixés à 0.91 pour C_0^{bille} et 0.6 pour $C_0^{enceinte}$ et $C_0^{pièce}$.

La Figure II- 11 représente l'évolution en pourcents des grandeurs physiques étudiées, i.e. $FISx$, $FISy$, V_{moy} et β_{moy} , en fonction de la variation de la valeur de $C_0^{sonotrode}$. Par exemple, une variation de +50 % de la valeur de $C_0^{sonotrode}$ induit une augmentation de 20 % des fréquences d'impact surfaciques ($FISx$ et $FISy$), au niveau de la pièce grenaillée. Les résultats des différentes simulations montrent que l'évolution des grandeurs physiques croît lorsque la variation de la valeur du coefficient de restitution augmente. D'après les résultats, il est clair que $C_0^{sonotrode}$ possède une influence non-négligeable sur les grandeurs observées. Cela signifie que si les propriétés matériaux de la sonotrode évoluent (durcissement ou adoucissement sous l'effet de l'écrouissage ou de l'endommagement) durant le traitement, cela impactera de manière significative la dynamique des bille. Ce que voit la pièce en termes

de recouvrement et de vitesses d'impact en est donc fortement affecté. Ceci reste moins vrai en ce qui concerne l'angle d'impact moyen, qui semble peu influencé.

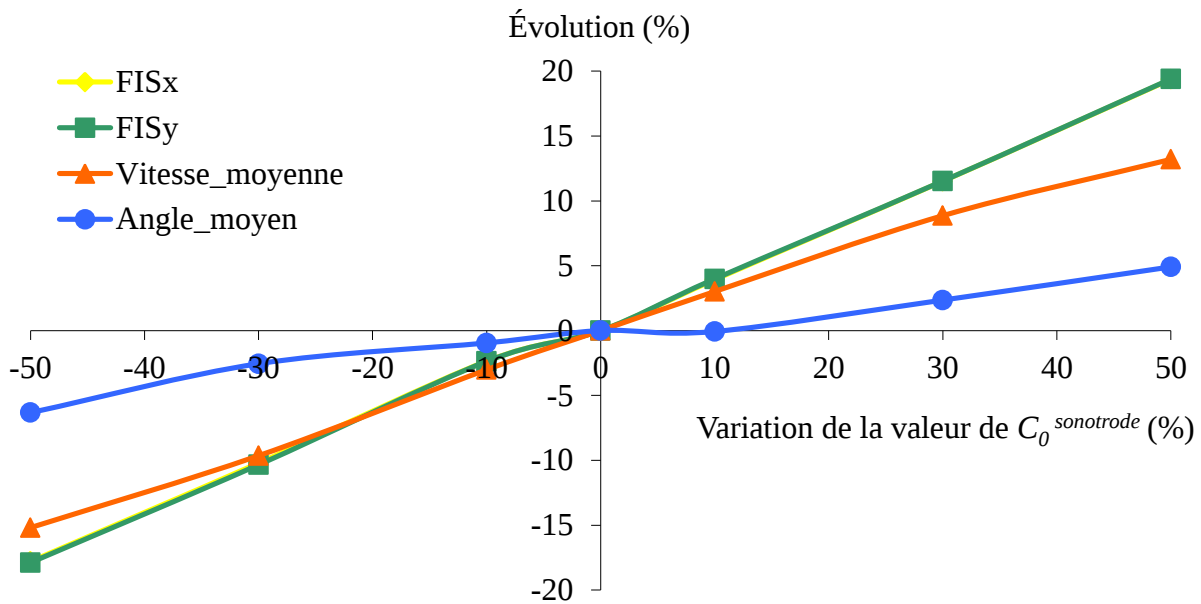


Figure II- 11 : Effets de la variation du coefficient de restitution seuil $C_0^{sonotrode} = 0.6$.

3.6. Collisions Bille-Billes

On s'intéresse à présent à la variation du coefficient de restitution normal seuil C_0^{billes} , qui gouverne les chocs entre billes. Les autres coefficients de restitution normaux seuils ont été fixé à 0.91 pour $C_0^{sonotrode}$ et 0.6 pour $C_0^{enceinte}$ et $C_0^{pièce}$.

La Figure II- 12 représente l'évolution en pourcents des grandeurs physiques étudiées, *i.e.* $FISx$, $FISy$, V_{moy} et β_{moy} , en fonction de la variation de la valeur de C_0^{billes} . Par exemple, une variation de -50 % de la valeur de C_0^{billes} induit une augmentation de 20 % de l'angle d'impact moyen, au niveau de la pièce grenaillée. Les résultats montrent que l'évolution des grandeurs physiques décroît lorsque la variation de la valeur du coefficient de restitution augmente, sauf pour la vitesse d'impact moyenne qui exhibe une tendance inversée. En revanche, il apparaît que C_0^{billes} possède une influence quasi-nulle sur les grandeurs observées, lorsque sa valeur augmente. Cela signifie qu'un durcissement des billes pendant le traitement n'affecte pas le chargement que voit la pièce. En revanche, si les billes sont amenées à s'adoucir, sous l'effet d'un vieillissement ou d'un endommagement, l'effet sur la dynamique des billes devient non-négligeable. Ces résultats suggèrent donc de favoriser l'utilisation de billes durcissantes et de les remplacer avant qu'elles ne s'endommagent afin de garantir une répétabilité du procédé.

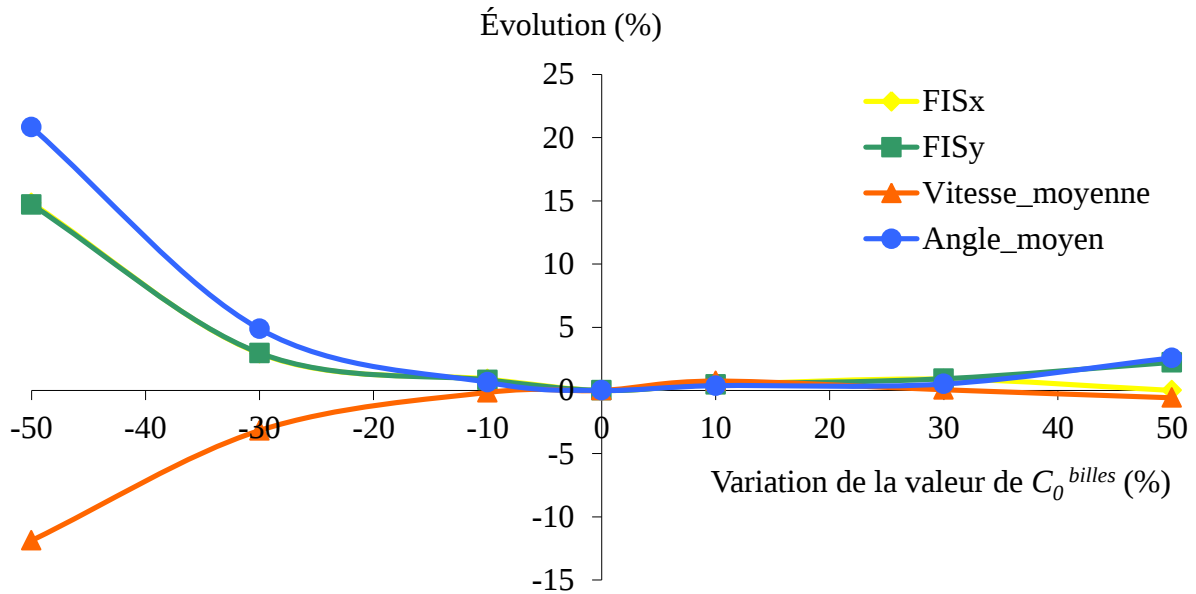


Figure II- 12 : Effets de la variation du coefficient de restitution seuil $C_0^{billes} = 0.6$.

4. Influence des paramètres procédé sur la dynamique des billes

Nous nous intéressons à présent à sur l'influence des paramètres procédé et de la géométrie d'enceinte sur la dynamique des billes. Une enceinte prismatique est utilisée dans l'étude. Il est important de noter que l'ensemble des conclusions des sections II.2 et II.3 restent valides. La sonotrode est positionnée à la base de l'enceinte. La pièce à traiter est plane et est positionnée au-dessus de l'enceinte. Son inclinaison peut être variée (Figure II- 13). Ceci donne la possibilité d'étudier l'influence de la position et orientation de la pièce, par rapport à la sonotrode.

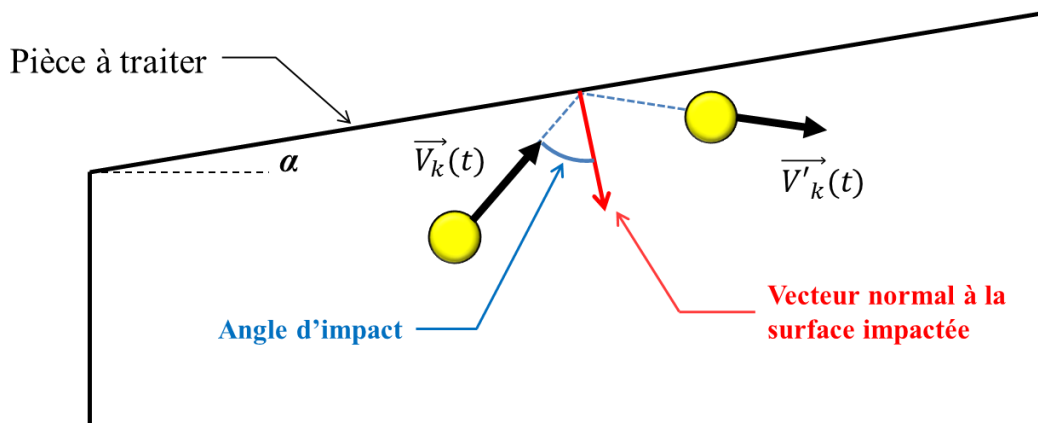


Figure II- 13: Définition de l'angle d'impact and de l'inclinaison α de la pièce à traiter, pour une enceinte prismatique.

4.1. Études numériques approfondies

Les paramètres constants de l'étude sont listés dans la *Table II- 2*. L'ensemble des analyses sont réalisées sur des données qui correspondent à 30 secondes de traitement, et extraites de la phase stationnaire. Le choix des coefficients de restitution est basé sur les travaux de Micoulaut *et al.* [6]. Les paramètres procédé étudiés sont l'amplitude de vibration de la sonotrode A , le diamètre de billes D , la masse totale de billes M placée dans l'enceinte (correspondant à un nombre N de billes) et l'inclinaison α de la pièce par rapport à la sonotrode. La

Table II- 3 présente les valeurs et les symboles attribués à chacun des quatre paramètres. Quant à l'analyse des résultats, elle se focalise sur la distribution des impacts, celle des vitesses et des angles d'impacts, ainsi que sur les trajectoires de billes dans l'enceinte. L'intérêt porté à l'égard de ces grandeurs provient de leur effet sur la génération des contraintes résiduelles et la modification de la microstructure du matériau grenaillé.

Table II- 2 : Paramètres constants utilisés dans les études de la section 4.

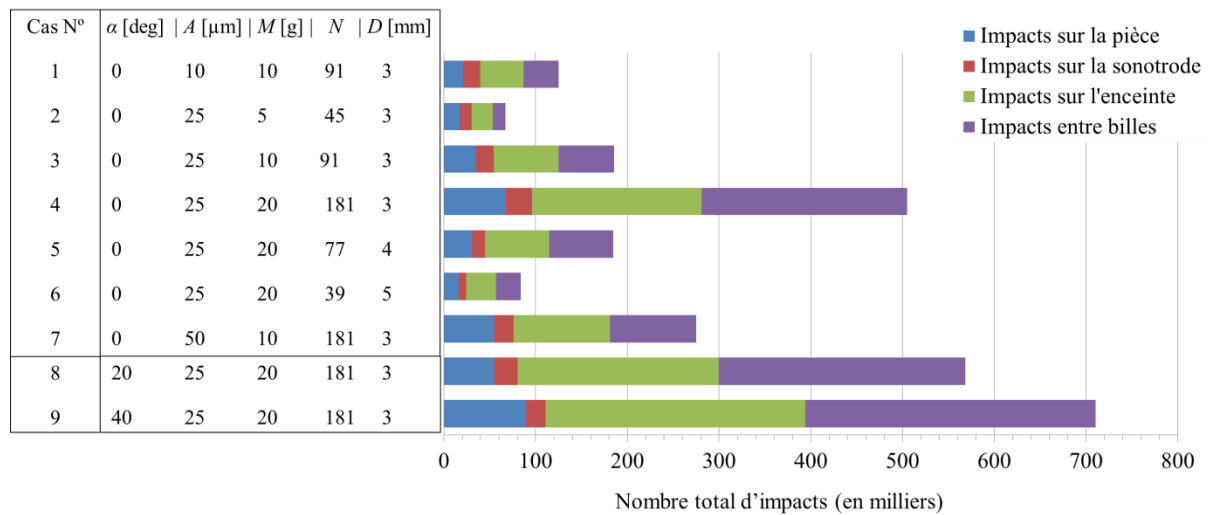
Paramètres	Valeurs
Enceinte prismatique	
Longueur de l'enceinte (L)	85 mm
Largeur de l'enceinte (W)	36 mm
Volume interne de l'enceinte	137 700 mm ³
Inclinaison de la pièce (α)	(Variable)
Procédé	
Fréquence de vibration de la sonotrode (F)	20 kHz
Amplitude de vibration de la sonotrode (A)	(Variable)
Temps de grenaillage simulé	30 secondes
Diamètre de billes (D)	(Variable)
Masse totale de billes (M)	(Variable)
Coefficients de restitution (Eq. II- 1)	
Collisions sphère – sphère et sonotrode – sphère	$C_0 = 0.9$ $V_0 = 1.2$ cm/s
Collisions pièce – sphère et enceinte – sphère	$C_0 = 0.6$ $V_0 = 1.2$ mm/s

Table II- 3 : Valeurs et symboles associés aux paramètres procédé étudiés.

Amplitude de vibration A [μm]		Diamètre de billes D [mm]		Masse totale de billes M [g]		Inclinaison de la pièce α [deg]	
10	Bleu	3	No symbol	5	—	0	—
25	Vert	4	●	10	—	20	---
50	Rouge	5	●	20	—	40	

4.2. Distribution des impacts

Le modèle donne accès aux coordonnées de chaque impact, ce qui permet d'en déduire des distributions spatiales et statistiques. La *Figure II- 14* présente, pour chaque cas étudié, le nombre et le pourcentage d'impacts en fonction de leur nature. Les collisions peuvent correspondre à des chocs entre deux billes, entre une bille et la pièce, l'enceinte ou la sonotrode. Il apparaît clairement que l'inclinaison de la pièce (la géométrie de l'enceinte) et le nombre totale de bille influencent le plus le nombre total d'impacts. Le diamètre de bille possède également une forte influence. Pour l'ensemble des neuf configurations, il s'avère que les impacts entre billes et avec l'enceinte correspondent à environ 60%, voire 80% dans certains cas. Les impacts sur la sonotrode correspondent au plus faible pourcentage d'impacts. Leur nombre tend à augmenter lorsque le nombre de billes diminue. Quant aux impacts sur une pièce horizontale ($\alpha = 0^\circ$), l'amplitude de vibration semble avoir très peu d'influence. Cependant, lorsque la pièce est inclinée, le pourcentage d'impacts à la surface de la pièce présente un comportement complexe, avec une valeur plus faible pour $\alpha = 20^\circ$.



Cas N°	Impacts sur la pièce [%]	Impacts sur la sonotrode [%]	Impacts sur l'enceinte [%]	Impacts entre billes [%]
1	16.5	15.1	37.6	30.8
2	26.0	18.8	35.1	20.2
3	18.9	10.3	38.1	32.6
4	13.4	5.6	36.6	44.4
5	16.6	7.7	37.7	37.9
6	19.3	10.0	38.6	32.1
7	19.9	7.8	38.3	34.1
8	9.6	4.5	38.6	47.3
9	12.6	3.0	39.9	44.6

Figure II- 14 : Nombre d'impacts ayant lieu sur la pièce (bleu), la sonotrode (rouge), l'enceinte (vert) et entre billes (magenta), pour chaque cas étudié.

Afin de mieux analyser ces données, la densité d'impacts surfaciques est présentée pour trois inclinaisons (Figure II- 15). Elle se calcule en subdivisant la surface de la pièce en cellules de $1.5 \times 2 \text{ mm}^2$. Le nombre total d'impacts recensé dans chaque cellule est ensuite divisé par l'aire de celle-ci. Étant donné que la pièce recouvre entièrement le haut de l'enceinte, sa longueur évolue avec l'inclinaison imposée. Les zones de la pièce qui ne sont pas atteignables par les billes ne sont pas prises en compte dans l'analyse. Les illustrations, localisées sur la droite de la Figure II- 15, présentent la distribution spatiale des billes dans l'enceinte pour chacun des trois cas considérés. Globalement, la densité d'impact semble identique, dans les trois cas, au niveau de la zone centrale de la pièce. Proche des parois de l'enceinte, la densité d'impacts augmente. Cette évolution est d'autant plus accentuée avec l'inclinaison de la pièce, au niveau de l'angle obtus formé par l'enceinte et la pièce. Des billes s'y retrouvent coincées, comme illustré par les distributions de billes, et ne participent plus activement au grenailage de la pièce. Ce comportement est clairement visible pour une inclinaison de 40° .

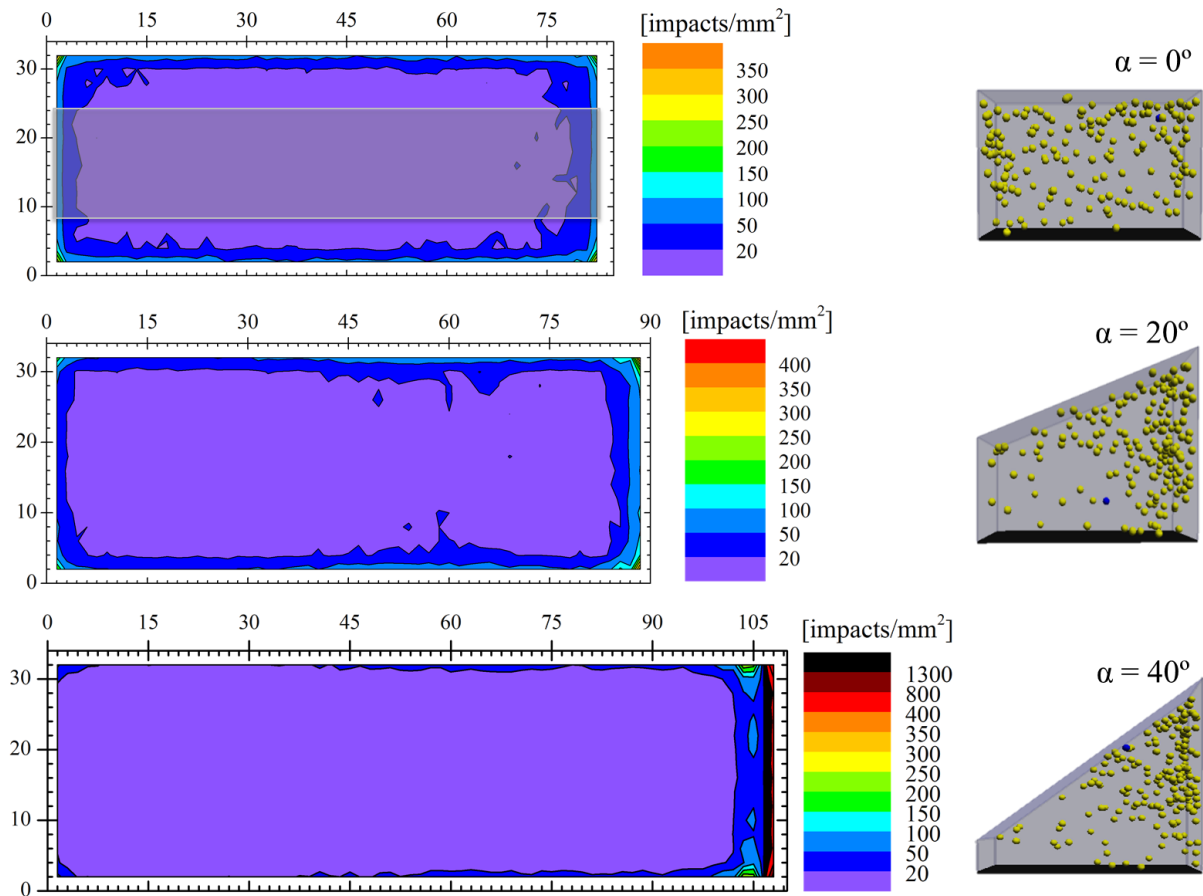


Figure II- 15 : Cartographies de la densité d'impacts sur la pièce, pour trois inclinaisons $\alpha = \{0^\circ; 20^\circ; 40^\circ\}$, et obtenues avec 20 g de billes de diamètre 3 mm et une amplitude de 25 μm . La distribution typique de billes dans l'enceinte est affichée à côté de chaque cartographie.

Quant aux paramètres procédés, leur influence sur la densité d'impact est étudiée pour une inclinaison de pièce nulle (Figure II- 16). Les densités sont évaluées sur une zone de 15 mm, centrée le long de la pièce (zone grise dans la Figure II- 15). Cette zone est ensuite subdivisée en bandes de 1 mm de largeur, dans lesquelles la densité d'impact est calculée. Les résultats obtenus sont ensuite tracés en fonction de la longueur de la pièce. La Figure II- 16 permet de quantifier plus finement les différences de densité entre le centre et les bords de la pièce. Ces différences s'étalent sur environ une fois et demie le diamètre de bille. Loin des parois de l'enceinte, la densité d'impacts est relativement constante, malgré une légère diminution en se rapprochant du centre de la pièce. Après analyse, il apparaît que le diamètre des billes est le plus influent, suivi de la masse totale de billes. Quant à l'amplitude de la sonotrode, ses effets ne sont pas négligeables, même si c'est le moins influent des paramètres.

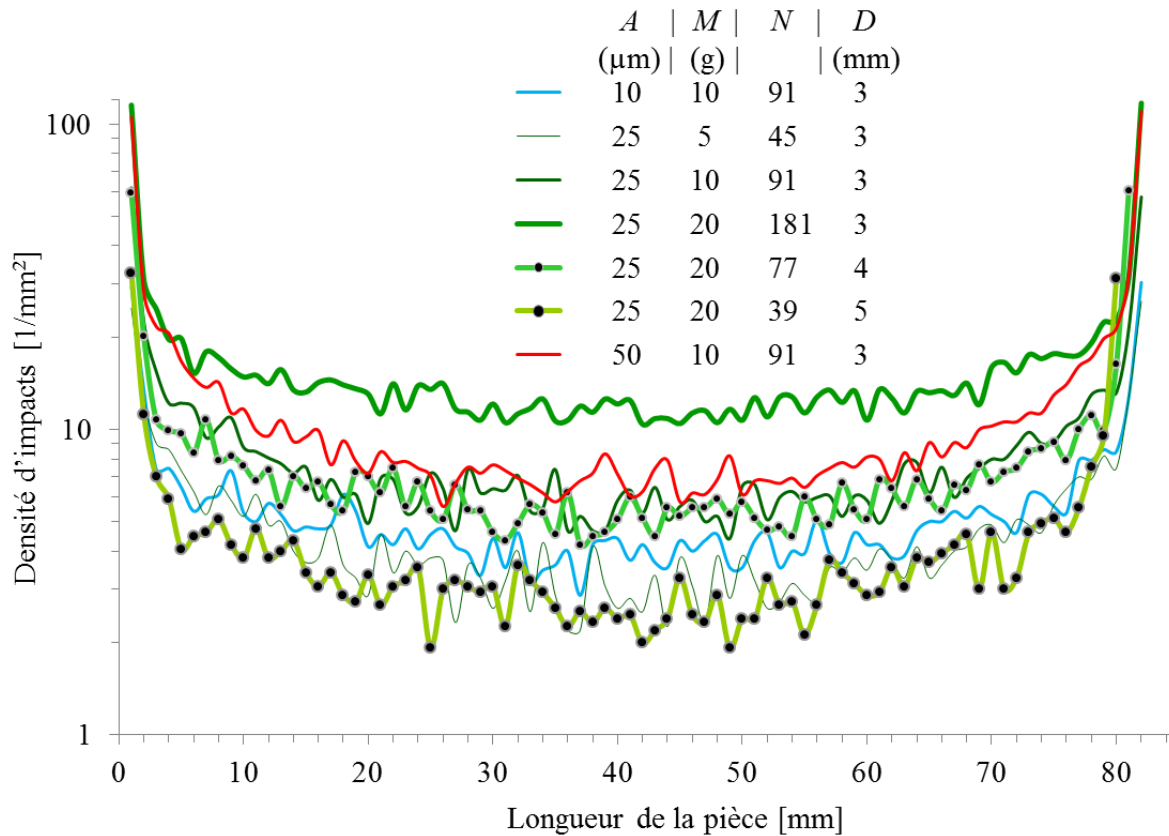


Figure II- 16 : Distribution de la densité d'impacts sur la pièce grenaillée, pour différentes combinaisons de diamètre D et de masse totale M de billes, et d'amplitude de vibration A . L'inclinaison de la pièce est fixée à $\alpha = 0^\circ$.

4.3. Vitesses d'impact

Le modèle donne également accès aux vitesses d'impacts des billes, sur la pièce grenaillée. Or cette grandeur est importante dans la prédiction des contraintes résiduelles induite dans le matériau et les éventuelles évolutions de la microstructure, engendrée par le grenaillage ultrason. Il est donc important d'étudier l'influence des paramètres procédé sur cette grandeur.

4.3.1. Distributions statistiques

La Table II- 4 présente les valeurs moyennes et maximales de la norme de la vitesse d'impact et de sa composante normale. Tout d'abord, il est possible d'observer, pour des pièces non-inclinées, que les moyennes de la vitesse d'impact et sa composante normale ont des valeurs proches. Il en est de même pour les valeurs maximales atteintes. Ceci indique que les impacts sur la pièce sont principalement normaux. Il est également important de souligner que les valeurs maximales dépendent uniquement de l'amplitude de vibration de la sonotrode. De plus, à paramètres procédé constants (cas 4, 8 et 9), les plus grandes vitesses sont obtenues à une inclinaison $\alpha = 20^\circ$.

Table II- 4 : Liste des valeurs moyennes de la vitesse d'impact V , de sa composante normale V_n et de leurs valeurs maximales respectives V^{max} et V_n^{max} .

Cas N°	α [deg]	A [μm]	M [g]	N	D [mm]	V [m/s]	V^{max} [m/s]	V_n [m/s]	V_n^{max} [m/s]
1	0	10	10	91	3	1.37	2.60	1.24	2.58
2	0	25	5	45	3	3.21	5.24	3.00	5.21
3	0	25	10	91	3	2.33	5.48	2.10	5.46
4	0	25	20	181	3	1.61	5.25	1.33	5.19
5	0	25	20	77	4	1.95	5.26	1.67	5.25
6	0	25	20	39	5	2.24	5.58	1.98	5.44
7	0	50	10	91	3	3.45	9.79	3.02	9.75
8	20	25	20	181	3	1.74	5.51	1.42	5.42
9	40	25	20	181	3	1.09	5.49	0.73	5.01

La Figure II- 17 présente le pourcentage d'impacts, vues par une pièce non-inclinée, en fonction de la vitesse d'impact. Par exemple, la figure indique que 15% de tous les impacts ont une vitesse de 2.2 m/s, avec les paramètres du cas n° 1 (courbe bleue). Dans l'ensemble, les distributions obtenues couvrent une large gamme de vitesses, qui ne peut pas être décrite uniquement à l'aide de valeurs moyenne et maximale (Table II- 4). De plus, toutes les distributions présentent un pic large aux faibles vitesses. Un second pic, plus prononcé, apparaît aux grandes vitesses d'impact. Ceci montre qu'une vitesse spécifique est « sélectionnée » par le système, pour un jeu de paramètres donné, ressemblant fortement à un effet de résonance observé expérimentalement par Leconte *et al.* [78]. Quant à la position du second pic, elle est clairement dictée par l'amplitude de vibration de la sonotrode. Une augmentation de l'amplitude déplace le pic vers des vitesses plus élevées. Lorsque les autres paramètres sont modifiés, le pourcentage atteint par le second pic est modifié.

Dans la Figure II- 18, l'effet de l'inclinaison de la pièce sur la distribution des vitesses d'impact est étudié. Une augmentation de l'inclinaison, au-delà de 20°, produit une forte augmentation du pourcentage d'impacts à faibles vitesses ; réduisant ainsi le pourcentage atteint par le second pic (grandes vitesses). Il apparaît également, pour $\alpha = 20^\circ$, que le second pic atteint les plus hauts niveaux par rapport aux deux autres distributions. De plus, les distributions obtenues pour $\alpha = 0^\circ$ et 20° semblent relativement proches, comparées à celle obtenue pour $\alpha = 40^\circ$. Or, de telles variations ne sont pas détectables à partir des seules valeurs moyennes et maximales atteintes par les vitesses d'impacts. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à la référence [79].

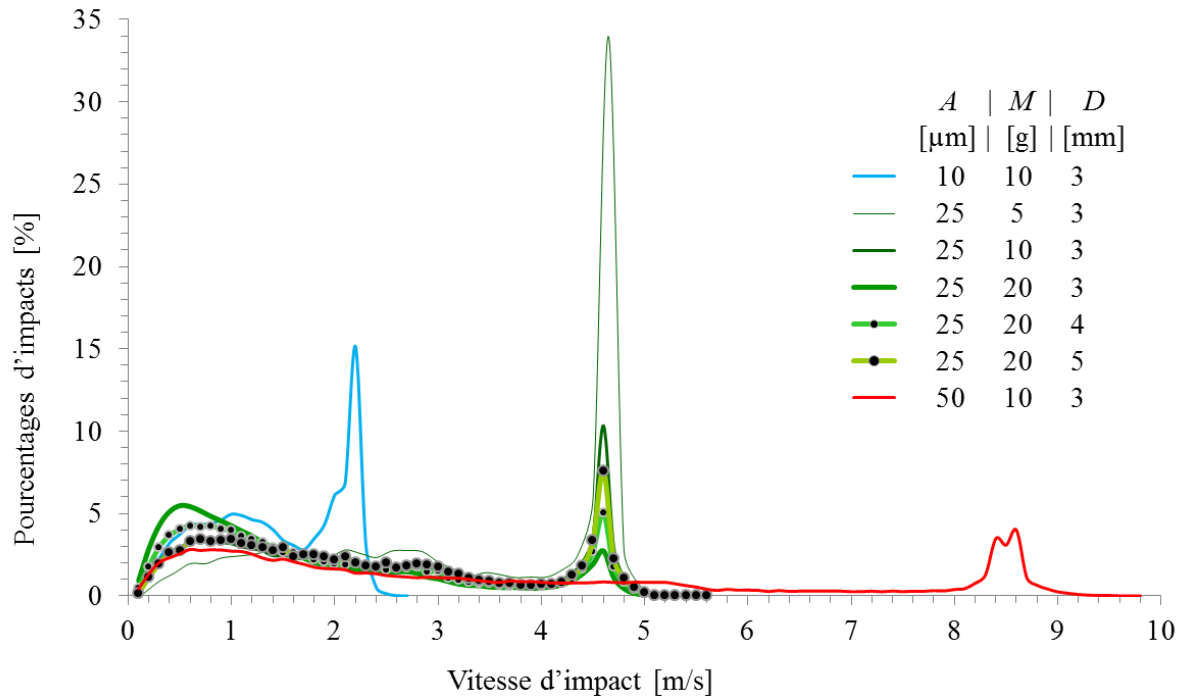


Figure II- 17 : Distribution des vitesses d'impact sur la pièce grenaillée, pour différentes combinaisons de diamètre D et de masse totale M de billes, et d'amplitude de vibration A . L'inclinaison de la pièce est fixée à $\alpha = 0^\circ$.

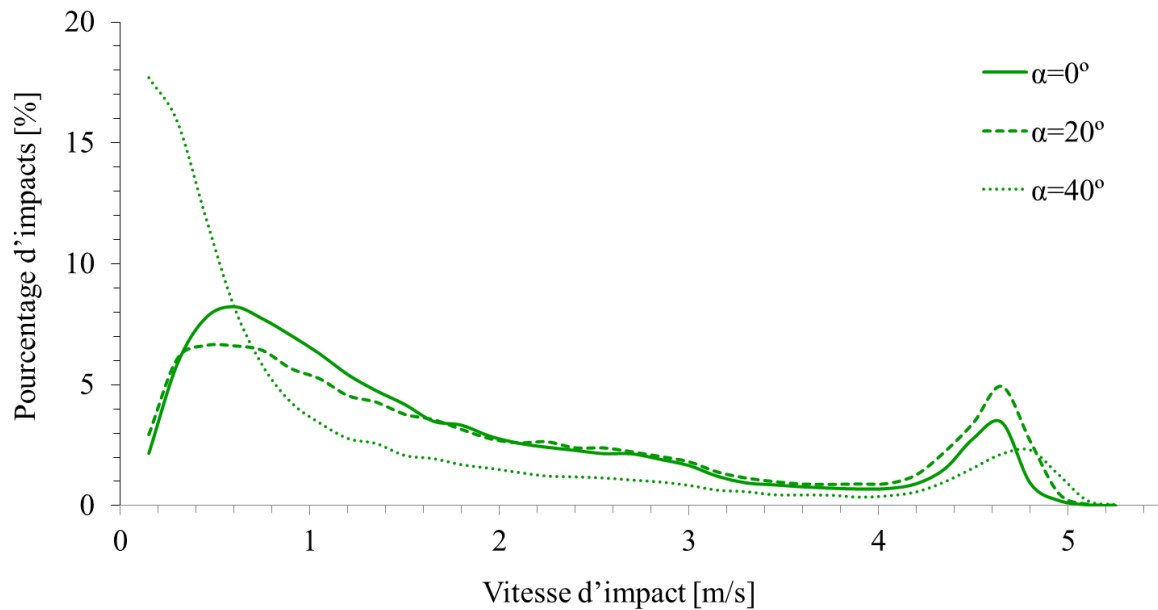


Figure II- 18: Distribution des vitesses d'impact sur la pièce grenaillée, pour trois inclinaisons $\alpha = \{0^\circ; 20^\circ; 40^\circ\}$, et obtenues avec 20 g de billes de diamètre 3 mm et une amplitude de 25 μm .

4.3.2. Distributions spatiales

L'intérêt est ensuite porté aux distributions spatiales des vitesses d'impacts et à leur composante normale. Cette dernière est généralement considérée comme le paramètre corrélé aux contraintes résiduelles induites, tel que démontré par Zarka *et al.* [80], Zinn & Scholtes

[36]. Ces distributions sont obtenues en divisant la surface de la pièce en cellules de 3.5×3.5 mm². Il devient ainsi possible de calculer, dans chaque cellule, les valeurs moyennes et maximales des vitesses d'impacts et de leur composante normale.

La *Figure II- 19* présente la distribution spatiale des valeurs moyennes atteintes par les vitesses d'impacts et leur composante normale, pour différentes inclinaisons et masses totales de billes. Concernant les vitesses normales, leur distribution n'est pas homogène et les valeurs atteintes diminuent en se rapprochant des parois de l'enceinte. Dans l'ensemble, les valeurs atteintes sont supérieures à la vitesse seuil de plasticité (cf. *Table II- 2* et *Eq. II-1*) sur l'ensemble de la surface traitée. Pour des pièces non-inclinées, les impacts les plus intenses se situent dans la zone centrale de la pièce, loin des parois de l'enceinte. Cependant, ceci pourrait ne pas être vrai aux abords de l'angle obtus ($\alpha = 40^\circ$). Dans cette zone, les vitesses normales ne dépassent pas les 0.5 m/s et les grandes valeurs sont localisées à l'opposé de l'angle obtus. Ceci s'explique par le fait que les billes sont piégées dans cette zone, comme illustré par la distribution des billes dans l'enceinte (*Figure II- 19*). Il en résulte une forte augmentation des collisions bille-enceinte et bille-bille (voir la *Figure II- 14*) ; diminuant ainsi le nombre de billes atteignant la pièce avec de grandes vitesses. Ainsi, plus l'angle formé par la pièce et l'enceinte est obtus, plus la quantité de billes prise au piège augmente. Dans le cas de pièces non-inclinées, les distributions des vitesses d'impacts et les niveaux atteints sont très proches de celles des composantes normales. La contribution des vitesses tangentielles est donc négligeable. En revanche, pour $\alpha = 40^\circ$, l'écart observé entre la distribution des vitesses d'impact et leur composante normale devient important. Dans ce cas, la contribution des vitesses tangentielles ne peut plus être négligée.

La *Figure II- 20* présente les distributions spatiales des valeurs maximales atteintes par les vitesses d'impacts et leur composante normale, pour la pièce inclinée présenté dans la *Figure II- 19*. L'intérêt porté aux valeurs maximales réside dans la dépendance des contraintes résiduelles des impacts les plus énergétiques [59]. Lorsque la pièce n'est pas inclinée (cas deux et trois de la *Figure II- 19*), les vitesses normales d'impacts et leur composante normale occupent une distribution spatiale homogène et atteignent des valeurs comprises entre 4.5 et 5 m/s. De telles distributions devraient produire des distributions homogènes des contraintes résiduelles de compression. En revanche, lorsque la pièce est inclinée, la distribution devient hétérogène le long de la pièce, avec une vitesse normale maximale d'environ 4 m/s, contre 5m/s pour la norme des vitesses.

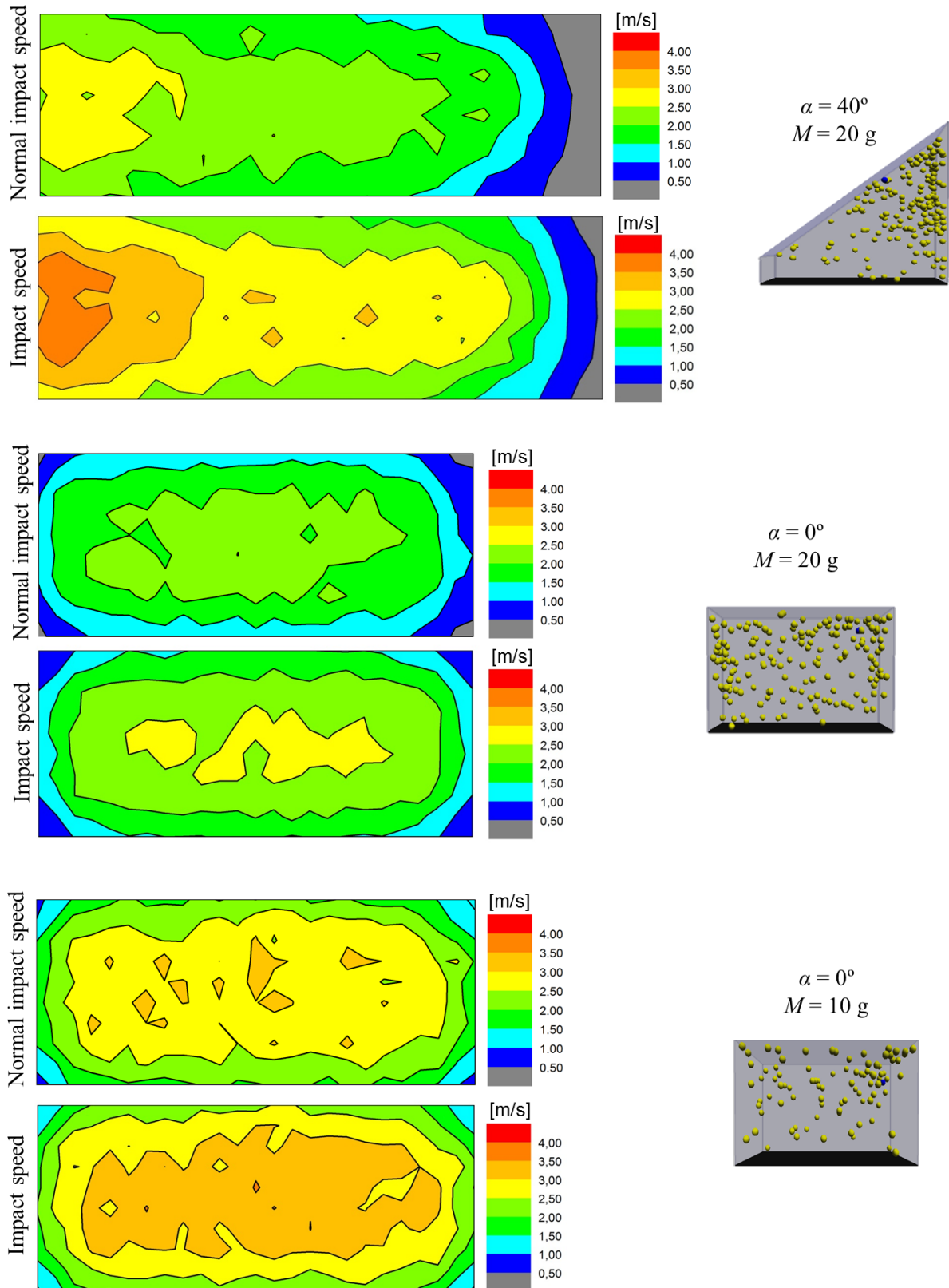


Figure II- 19: Distribution spatiale des vitesses d'impacts et de leur composante normale, sur la pièce grenaillée, pour différentes inclinaisons α et masses totales de billes M . Les paramètres constant sont le diamètre des billes $D = 3\text{ mm}$ et l'amplitude de vibration $A = 25\text{ }\mu\text{m}$.

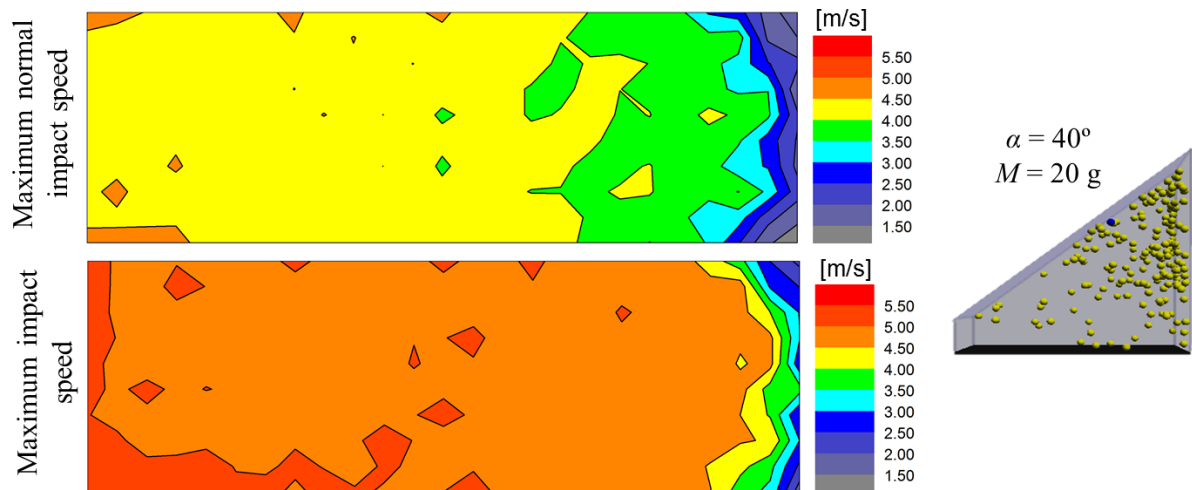


Figure II- 20: Distribution spatiales des maximales atteintes par les vitesses d'impacts et de leur composante normale, sur la pièce grenaillée, pour une inclinaison de 40° , une masses totales de billes de 20 g, un diamètre des billes de 3mm et une amplitude de vibration de $25 \mu\text{m}$.

4.4. Angles d'impact

Dans la présente section, l'attention est portée sur l'angle d'impact incident à la surface de la pièce, comme illustré dans la Figure II- 13. Un angle d'incidence de 0° correspond à un impact normal.

4.4.1. Distributions statistiques

La Table II- 5 présente la distribution statistique des angles d'impacts pour des incidences proches de la normale (impacts dont la vitesse normale correspond à au moins 90% de la vitesse totale), des incidences quasi-tangentiels, ainsi que l'angle moyen d'impact. Il apparait que les paramètres les plus influents sont l'inclinaison de la pièce et le nombre de billes présents dans l'enceinte. Quant à l'amplitude de vibration et le diamètre des billes, leur effet est très limité. Il est clair qu'une augmentation de la quantité de billes favorise les impacts entre billes et bille-enceinte. Le résultat est un accroissement de la proportion de billes déviées de leur trajectoire originale (depuis la sonotrode vers la pièce). Arrivées au niveau de la pièce, ces billes déviées ont généralement un angle d'incidence plus élevé.

Table II- 5 : Répartition des angles d'impacts pour chacun des cas étudié.

Cas N°	α	A	M	N	D	Angles d'impacts		
	[deg]	[μm]	[g]		[mm]	< 26°	> 45°	Moyenne
1	0	10	10	91	3	58.75 %	20.43 %	25.4°
2	0	25	5	45	3	69.11 %	12.91 %	18.6°
3	0	25	10	91	3	50.94 %	25.52 %	29.3°
4	0	25	20	181	3	36.69 %	37.57 %	37.4°
5	0	25	20	77	4	43.78 %	31.39 %	33.4°
6	0	25	20	39	5	50.53 %	25.71 %	29.7°
7	0	50	10	91	3	42.16 %	32.54 %	33.3°
8	20	25	20	181	3	40.33 %	35.53 %	39.3°
9	40	25	20	181	3	10.87 %	58.95 %	54.6°

4.4.2. Distributions spatiales

Quant aux distributions spatiales des angles d'impacts, elles s'avèrent homogènes pour des pièces non-inclinées, sauf à proximité des parois de l'enceinte où leur valeur augmente. Or qu'en est-il pour une pièce inclinée ? La *Figure II- 21* présente la distribution spatiale des angles d'impacts, pour une inclinaison de 40°. La distribution est obtenue en subdivisant la surface de la pièce grenaillée en cellules de 3.5×3.5 mm², dans lesquelles l'angle moyen d'impact est calculé. La distribution obtenue n'est pas homogène.

En se basant sur les résultats de la *Figure II- 15* (cartographie du bas), le nombre d'impacts situé au niveau de l'angle obtus est le plus élevé, comparé au reste de la surface considérée. De plus, la *Figure II- 21* montre que les angles d'incidence, au niveau de l'angle obtus, sont supérieurs à 50°. Et d'après la *Figure II- 19*, cette même zone recense les impacts de plus faible intensité, *i.e.* inférieur à 0.5 m/s. En d'autres termes, les impacts tangentiels semblent corrélés avec des vitesses d'impacts très faibles. Leur effet sur le matériau grenaillé pourrait donc être limité.

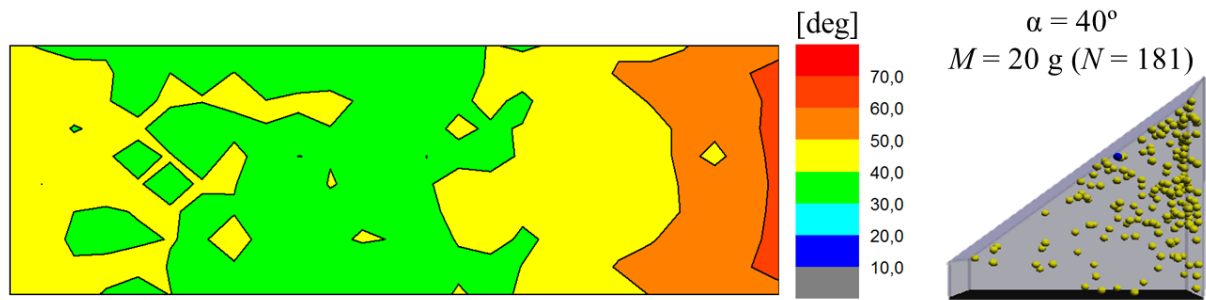


Figure II- 21: Distribution spatiales des angles d'impacts, sur la pièce grenaillée, pour une inclinaison de 40° , une masses totales de billes de 20 g, un diamètre des billes de 3mm et une amplitude de vibration de $25 \mu\text{m}$.

4.5. Corrélation angle-vitesse d'impact

Les résultats présentés ci-dessus (Section II.4.4.2) semblent indiquer une forte corrélation entre les vitesses et les angles d'impacts. Afin de vérifier l'exactitude de cette hypothèse, la distribution statistique du cas n° 3 (Table II- 4 et Figure II- 17) est considérée. Elle est retracée dans la Figure II- 22 (trait plein). Ensuite, les données ayant servi à sa construction sont séparées en deux groupes. Le premier (tirés) correspond aux incidences quasi-normales ($\beta < 26^\circ$) et le second (pointillés) aux angles incidents quasi-tangentiels ($\beta > 45^\circ$). Il apparaît clairement que les impacts normaux sont exclusivement associés aux grandes vitesses d'impact. Ces collisions correspondent à des billes ayant des trajectoires directes, entre la sonotrode et la surface de la pièce. De manière similaire, les impacts tangentiels sont principalement associés à de faibles vitesses d'impacts. Ceci a pour origine des billes déviées, au moins une fois, de leur trajectoire initiale par d'autres billes ou par les parois de l'enceinte. Cette analyse a été conduite sur les autres cas étudiés et présente toujours le même type de comportement [79].

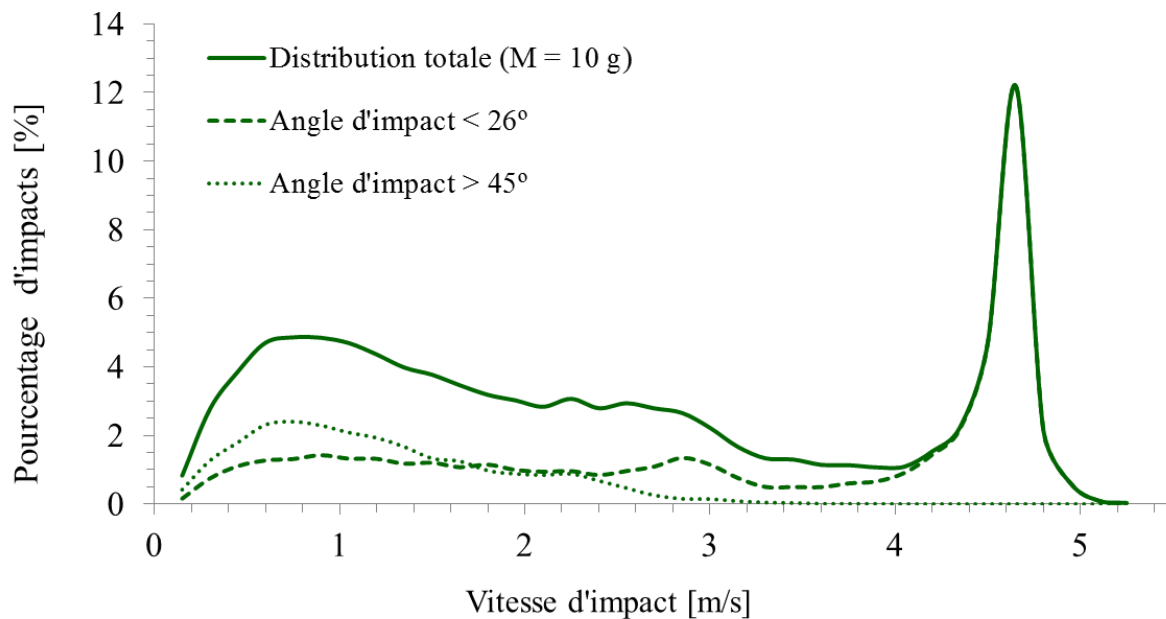


Figure II- 22: Corrélation entre les vitesses et les angles d'impacts, réalisée à partir de la distribution : $\alpha = 0^\circ$, $A = 25 \mu\text{m}$, $M = 10 \text{ g}$ and $D = 3 \text{ mm}$.

4.6. Trajectoires des billes

À l'aide du modèle, il est également possible d'étudier l'influence de la géométrie de l'enceinte sur les trajectoires de billes. Pour ce faire, le champ de vitesses du nuage de bille est calculé, suivant la longueur et la hauteur de l'enceinte, pour les trois inclinaisons de pièce : $\alpha = 0^\circ$ (Figure II- 23.a), $\alpha = 20^\circ$ (Figure II- 23.b), $\alpha = 40^\circ$ (Figure II- 23.c). Il apparaît clairement que la modification de l'inclinaison de la pièce, et donc la géométrie de l'enceinte, influence drastiquement le champ de vitesse des billes. En effet, dans le cas où la pièce est horizontale ($\alpha = 0^\circ$), les vitesses de billes sont, en moyenne, ascendantes. Lorsque la pièce est inclinée, un effet de convection apparaît. Ce dernier s'accroît avec la valeur de α ; ce qui est directement lié à l'apparition de l'angle aigu qui « piège » les billes au cours du traitement. Ceci est confirmé par la Figure II- 23.d qui correspond aux impacts entre billes, ayant lieu sur une période de 0.5 secondes dans la phase stationnaire, et qui montre la très grande densité d'impacts bille-bille dans la zone correspondant au sommet du prisme.

La Figure II- 24 présente la distribution spatiale des vitesses relatives d'impacts entre billes, pour $\alpha = 40^\circ$, sur une durée de traitement de 30 secondes. En comparaison avec les résultats de la Figure II- 23.d, les zones de l'enceinte, où les vitesses relatives d'impacts sont les plus faibles, correspondent aux zones les plus denses. Et inversement, les zones les plus diluées présentent les vitesses d'impacts entre billes les plus élevées.

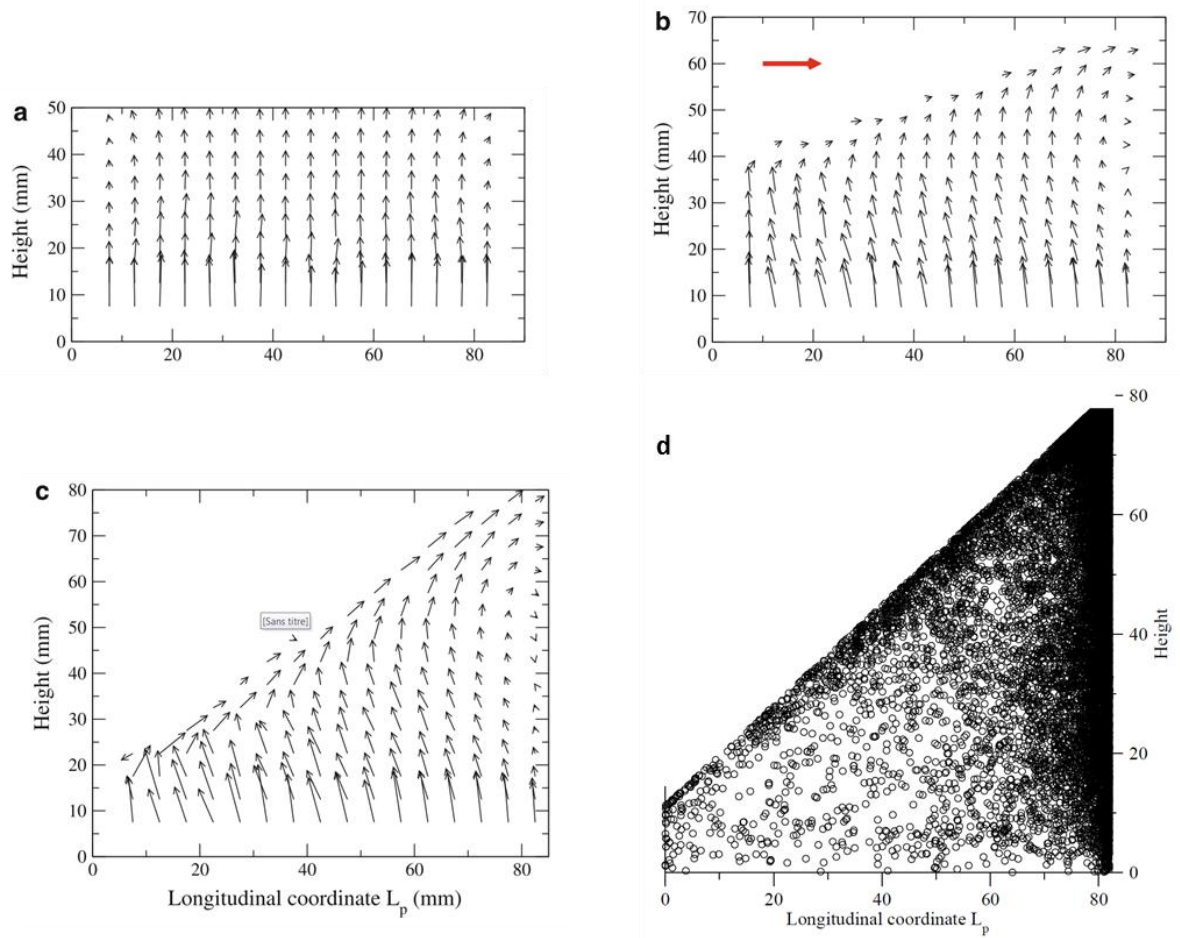


Figure II- 23 : Champ vectoriel des vitesses de billes au sein de l'enceinte prismatique, pour les inclinaisons 0° (a), 20° (b) et 40° (c). Position des impacts entre billes (d) sur un intervalle de temps de 0.5 s, pour une inclinaison de 40°. La flèche rouge représente 2.0 m/s.

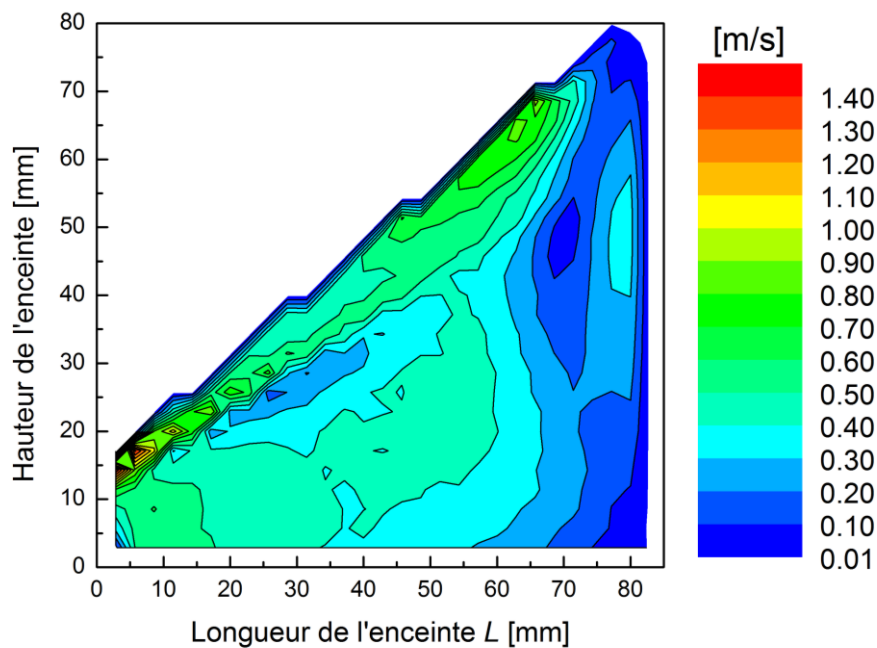


Figure II- 24 : Distribution spatiale des vitesses relatives d'impacts entre billes, calculée sur 30 secondes de traitement et pour $\alpha = 40^\circ$.

4.7. Libre parcours moyen

Dans le domaine du grenaillage de précontraintes, il est possible d'obtenir une même intensité de traitement à partir de combinaisons différentes de paramètres procédé. Ceci est particulièrement vrai pour le grenaillage conventionnel, mais également pour le grenaillage ultrason. Il est donc fort probable que la pièce perçoive des chargements équivalents. En termes de dynamique de billes, cela pourrait se refléter sur les densités d'impacts, de vitesses et d'angles d'impact, par exemple. Afin d'étudier cet aspect, la notion de libre parcours moyen [81] d'une bille L_p (Eq. II-8) est utilisée, comme exprimé ci-dessous :

$$L_p = \frac{1}{\rho \cdot \emptyset} \quad \text{avec } \rho = \frac{N}{V_{enceinte}} \text{ et } \emptyset = \pi \cdot D^2 \quad (\text{II- 8})$$

La grandeur ρ correspond à la fraction volumique des billes dans l'enceinte (nombre de billes par unité de volume), et $\emptyset$ représente la section efficace d'une bille, comme illustré dans la Figure II- 25. Lors de son déplacement, une bille de diamètre D entrera en collision avec toute autre bille, de même diamètre et dont le centre se situe dans un cylindre de rayon D . Ainsi, le libre parcours moyen permet de lier le volume occupé par les trajectoires de billes par rapport au volume de l'enceinte de grenaillage qui les contient. Cela donne une information directe sur la probabilité qu'une bille fasse un aller-retour entre la sonotrode et la pièce sans être déviée par une autre bille. Et inversement, il est donc possible de définir la quantité de billes à utiliser ou leur diamètre afin de garantir un certain libre parcours initialement choisi, par exemple la hauteur de l'enceinte.

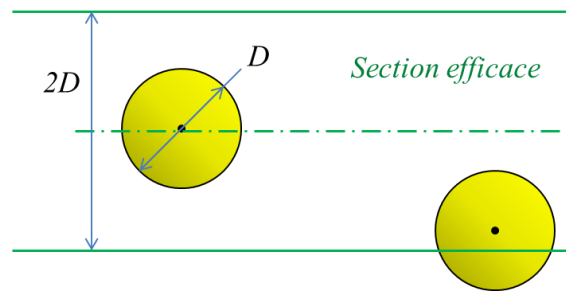
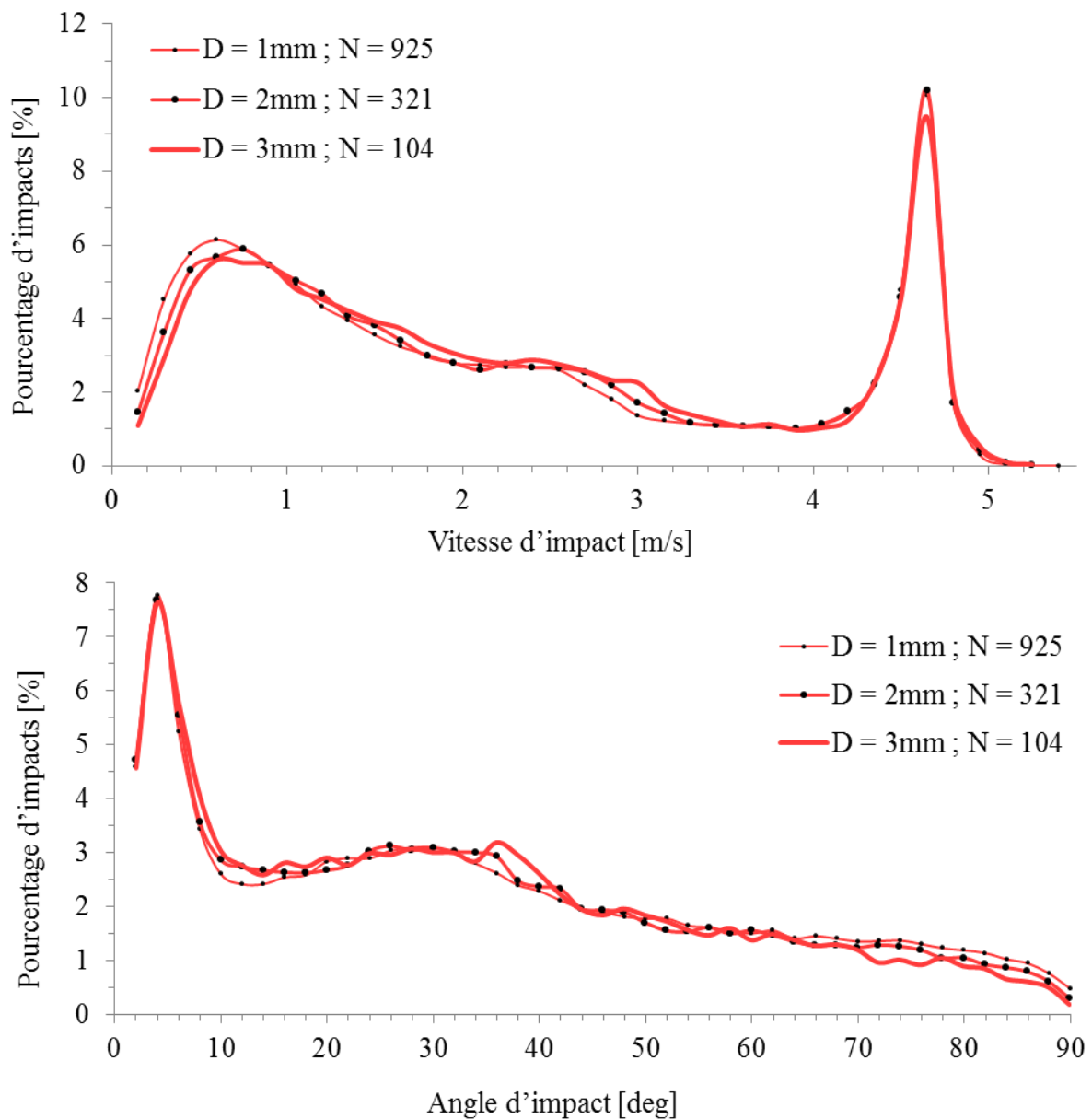


Figure II- 25 : Section efficace d'une bille de diamètre D .

Le cas de l'enceinte prismatique sera considéré, en imposant une inclinaison de pièce $\alpha = 0^\circ$ et une distance pièce-sonotrode de 45 mm. La longueur et la largeur de l'enceinte restent inchangées et valent respectivement 85 mm et 36 mm. L'amplitude de la sonotrode est fixée à 25 μm , et le libre parcours moyen à 45 mm (hauteur de l'enceinte). Trois diamètres de billes sont considérés $D = \{1 ; 2 ; 3\}$ mm, ce qui conduit aux nombres de billes suivants $N = \{925 ;$

321 ; 104}, à l'aide de l'équation II-8. Les analyses qui seront présentés par la suite correspondent aux 30 premières secondes de traitement, issues de la phase transitoire.

Tout d'abord, les distributions de vitesses et d'angles d'impacts sont étudiées et présentées dans la *Figure II- 26*. Il est important de souligner que les trois jeux de paramètres produisent les mêmes distributions. Cela confirme bien qu'il est bien possible d'obtenir un même chargement, en vitesses et angles d'impacts, avec différentes combinaisons de diamètre et de quantité de billes. Ainsi, cela permettrait donc d'ajuster, en théorie, certains paramètres procédés en fonctions de contraintes géométriques (accessibilité des billes), tout en garantissant un traitement équivalent. Cependant, qu'en est-il des densités d'impacts ?



Ces dernières sont présentées dans la *Figure II- 27*, le long de la pièce, pour chacun des trois cas étudiés. À ce niveau, les distributions obtenues sont assez différents. Et il semble que le paramètre influent soit le nombre total de billes présent dans l'enceinte. En effet, plus le nombre de billes présents dans l'enceinte est élevé, et plus la densité d'impacts l'est aussi. À partir de ces constatations, et malgré l'équivalence observée entre les distributions de vitesses et d'angles d'impacts (*Figure II- 26*), il faudra adapter le temps de traitement afin d'atteindre des densités d'impacts équivalentes. Pour ce faire, il suffit de calculer la fréquence d'impact surfacique. Or d'après les résultats des *Figure II- 5* et *Figure II- 6*, l'évolution du nombre d'impact en fonction du temps de traitement est linéaire dans la phase stationnaire. Ainsi, la fréquence d'impact surfacique s'obtient en divisant la densité d'impacts par la durée de traitement correspondante à l'analyse (30 secondes). À partir de ces données, il donc possible de déterminer, pour chaque cas, le temps de traitement nécessaire pour atteindre une densité d'impacts donnée.

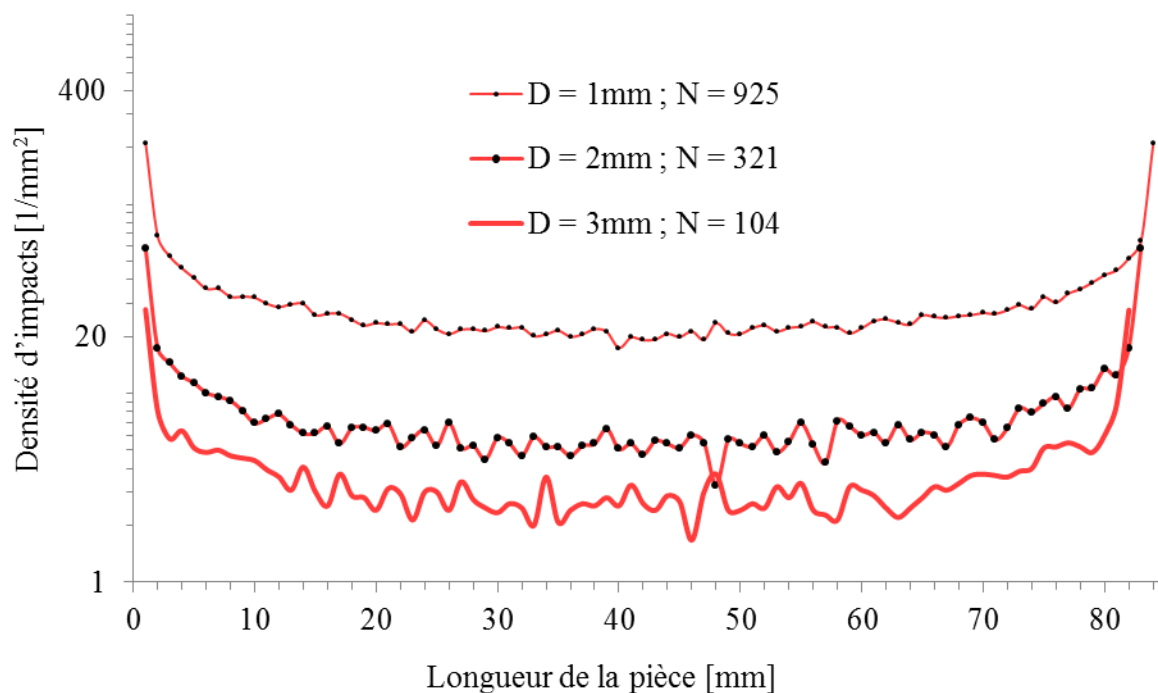


Figure II- 27: Distributions statistiques des densités d'impacts, pour un libre parcours moyen $L_p = 45$ mm, obtenues le long de la pièce pour différents diamètres D et masses totales M de billes.

5. Conclusions du chapitre

Dans le présent chapitre, un modèle analytique 3D, issu des travaux de Micoulaut *et al.* [6], est présenté. Il permet de simuler la dynamique des billes dans le cas d'une enceinte

prismatique. Une étude numérique a permis de montrer que les résultats fournis par le modèle sont indépendants des conditions initiales. Cette même étude a également permis de mettre en évidence l'existence d'une phase transitoire et stationnaire de la dynamique des billes. Malgré les atouts du modèle, certaines limitations identifiées dans le chapitre I.3.2 subsistent. Il s'agit en particulier de la difficulté à intégrer des géométries plus complexes, semblables à celles rencontrées dans l'industrie (roue dentée, compresseur, alésages, etc.). Des études de sensibilité sur l'influence des coefficients de restitution normaux, quant à elles, identifient le rôle que joue chacun de ces coefficients sur la dynamique des billes ; et cela en fonction de la nature des collisions considérées.

À ceci, s'ajoutent des études paramétriques de paramètres procédés. À travers l'étude de la densité d'impacts, il apparaît que des angles aigus au sein d'une géométrie peuvent conduire à d'importantes hétérogénéités, par rapport à des zones plus éloignées. Les angles aigus influencent également la distribution des billes dans l'enceinte en « emprisonnant » certaines d'entre elles. Ceci pousse à l'apparition d'une masse de billes qui ne participe plus activement au traitement de la pièce, appelée « masse morte » dans le jargon industriel. Cependant, les zones de la pièce, éloignées de l'enceinte, reçoivent un traitement relativement homogène et l'analyse des vitesses et des angles d'impacts montre une forte corrélation entre ces deux grandeurs. En effet, il apparaît que les impacts les plus énergétiques, au niveau de la pièce, correspondent exclusivement à des impacts normaux.

Des résultats issus du présent chapitre ont fait l'objet de deux publications dans des revues scientifiques [79], [82], d'un troisième article de journal soumis [83] et à des participations à une conférence nationale [84] et internationale [85].

Chapitre III – Modélisation du GUS pour des géométries complexes

À la suite des travaux présentés dans le chapitre II, un second modèle de la dynamique des billes a été développé, afin de modéliser le GUS dans des configurations de traitement industrielles complexes. Dans le présent chapitre, ce second modèle est présenté de manière détaillée. Dans une seconde partie, des études numériques sont effectuées afin d'évaluer les performances de celui-ci, en termes de temps de calcul. Une comparaison est également effectuée avec des travaux issus de la littérature scientifique. La troisième partie de ce chapitre décrit les outils numériques développés, ainsi que la démarche utilisée afin d'intégrer le modèle dans le processus de conception des enceintes de traitement.

1. Modèle 3D

1.1. Cahier des charges

Afin de représenter de procédé de GUS de manière conforme aux conditions industrielles, le modèle doit intégrer et respecter les conditions suivantes:

- *Représentation 3D du dispositif de GUS* : la géométrie de chaque composant du dispositif (sonotrode, enceinte de traitement et pièce à traiter) doit être modélisée de manière fidèle.
- *Pièce en rotation* : certaines pièces grenillées, comme les DAMs, sont mis en rotation durant le traitement afin d'assurer l'homogénéité du traitement. Ce mouvement doit donc pouvoir être pris en compte.
- *Paramètres procédé réalistes* : la quantité et le diamètre des billes, l'amplitude et la fréquence de vibration de la sonotrode, ainsi que le temps de traitement.
- *Collisions* : les dissipations d'énergies et les propriétés matériaux doivent être intégrées dans le modèle pour chaque couple d'objets en collision. Ces couples impliquent toujours une bille avec une bille, une paroi statique ou une paroi en mouvement.
- *Visualisation 3D en temps réel* : Il est important de rappeler que la visualisation 3D des billes et géométries peut nécessiter des ressources CPU importants. En conséquent,

deux versions du modèle sont proposées. La première '*mode_3D*' dispose de la visualisation 3D. Même si cela peut ralentir les calculs, son utilité est importante dans les phases exploratoires d'une étude. La seconde version '*mode_console*' ne propose aucun affichage graphique mais permet de réaliser des simulations en temps de calculs très faibles.

- *Durée globale de calcul* : étant donné que l'outil sera utilisé de manière intensive, les temps de calcul doivent être réduits du mieux que possible. Ainsi, simuler 60 secondes de GUS, dans la plupart des cas, devrait nécessiter moins de 12 heures de calcul en '*mode_console*'. Ceci permettra de réaliser plusieurs simulations pendant la nuit (en temps masqué) et avoir accès aux résultats le lendemain.

À la fin d'une simulation, les informations relatives aux impacts au niveau de la pièce traitée sont sauvegardées dans un fichier texte '*Sample.txt*'. Ce fichier recense pour chaque impact : le numéro du triangle impacté, l'instant de collision, les coordonnées spatiales de l'impact, ainsi que les vitesses d'impact et de rebond. Ces données peuvent ensuite être analysées de différentes manières (spatiale, statistique...) afin d'apporter un éclairage sur les critères de contrôle du procédé, comme :

- Le *recouvrement* : correspond au ratio entre la surface impactée et la surface à traiter. Son évaluation est gouvernée par la norme SAE J2277 [30].
- L'*intensité Almen* : est déterminée en mesurant la flèche d'une éprouvette *Almen*, faite en Acier SAE 1070, après une opération de GUS. La valeur de la flèche est liée aux contraintes résiduelles de compression induites [22], [27]. Son évaluation est gouvernée par des normes SAE [33], [34].

1.2. Hypothèses du modèle

Le modèle développé prend en compte les phénomènes physiques couramment décrits dans les modèles de gaz granulaires vibrés. En particulier, le modèle présenté par Micoulaut *et al.* [6] a été utilisé comme base au présent modèle ; à savoir :

- *Billes rigides* : toutes les billes sont rigides, et donc indéformables, et possèdent la même masse et le même diamètre.
- *Forces externes* : en vol libre, les billes ne sont soumises qu'à l'accélération gravitationnelle $\vec{g}$. Leur trajectoire décrit donc une parabole et s'exprime de manière analytique, comme noté ci-dessous :

$$\vec{U}_k(t + \Delta t) = \frac{1}{2} \vec{g} \cdot (\Delta t)^2 + \vec{V}_k(t) \cdot \Delta t + \vec{U}_k(t) \quad (\text{III- 1})$$

Où $\vec{V}_k(t)$ et $\vec{U}_k(t)$ sont respectivement la vitesse et la position d'une sphère k , à un instant donné t , et Δt le temps séparant deux positions consécutives.

- *Collisions binaires* : pas d'impacts entre 3 billes ou plus
- *Point de contact singulier* : vu que l'ensemble des collisions sont binaires et impliquent des contacts de type sphère-sphère et sphère-plan, la surface de contact se réduit donc à un point.
- *Impacts inélastiques* : pour chaque couple d'objets entrant en collision, la dissipation d'énergie due aux déformations plastiques, vibrations, transferts thermiques, frottement, etc., ainsi que les propriétés matériaux sont pris en compte à travers :
 - *Coefficient de restitution tangentiel* μ^k : est appliqué à la composante tangentielle du vecteur vitesse d'impact. De valeur constante, il est attribué aux couples Sphère–Maillage.
 - *Coefficient de restitution normal* $C^k(V)$: concerne les couples Sphère–Sphère et Sphère–Maillage. Sa valeur dépend de la vitesse d'impact [86], [87] et s'applique à la composante normale du vecteur vitesse d'impact [88], comme exprimé dans l'équation II-1.
 - *Coefficient de frottement de Coulomb* f^k : est appliqué à la composante tangentielle de la vitesse d'une bille, par rapport à la surface du triangle concerné, dans le cas d'une bille qui roule sans glisser sur le maillage. De valeur constante, il est attribué aux couples Sphère–Maillage.

Où $k = \{S, MS, MD\}$ correspond à la nature de l'objet impacté (Sphère, Maillage Statique, Maillage Dynamique).

- *Contact instantané* : le rebond des billes est conditionné par des règles de collision propres à chaque type d'impact, comme exprimé ci-dessous :
 - *Collisions Sphère – Sphère* :

$$\vec{V}'_{j,i} = \vec{V}_{j,i} \pm \frac{1}{2} (1 + C^S(\Delta V_{ij})) \Delta V_{ij} \cdot \vec{r} \quad (\text{III- 2})$$

avec $\Delta V_{ij} = (\vec{V}_j - \vec{V}_i) \cdot \vec{r}$

- *Collisions Sphère – Maillage Statique* :

$$\vec{V}'_i = (\mu^{MS} \cdot \vec{V}_i \cdot \vec{t}) \vec{t} + (\mu^{MS} \cdot \vec{V}_i \cdot \vec{o}) \vec{o} - (C^{MS} (V_n) \cdot V_n) \vec{n} \quad (\text{III- 3})$$

avec $V_n = \vec{V}_i \cdot \vec{n}$

○ *Collisions Sphère – Maillage Dynamique :*

$$\vec{V}'_i = \vec{V}^{MD} + [\mu^{MD} \cdot (\vec{t} + \vec{o}) - (C^{MD} (\Delta \vec{V} \cdot \vec{n}) \vec{n})] \Delta \vec{V} \quad (\text{III- 4})$$

avec $\Delta \vec{V} = \vec{V}_i - \vec{V}^{MD}$

Où les primes dénotent les quantités post-collision ; $\vec{V}_{j,i}$ est la vitesse de la bille j ou i ; $\vec{V}_i$ et $\vec{V}_j$ sont la vitesse de la bille i et j , respectivement ; $\vec{r}$ est le vecteur unité reliant les centres des billes i et j ; $\vec{V}^{MD}$ la vitesse du maillage en mouvement au point d'impact et exprimé dans le repère local du triangle impacté (Figure III- 1). C^S , C^{MS} , C^{MD} correspondent aux coefficients de restitution normaux, tandis que μ^{MS} et μ^{MD} correspondent aux coefficients de restitution tangentiels, pour chaque couple. Et enfin, $\vec{n}$, $\vec{t}$ et $\vec{o}$ correspondent aux vecteurs normal et tangentiels du repère local attribué à un triangle impacté BCD (Figure III- 1).

- *Schéma d'intégration à pas de temps variable :* est utilisé à la place du schéma d'intégration événementiel (*Event-Driven*) présent dans le modèle de Micoulaut et al. [6]. Le pas de temps Δt est calculé de manière à ce que la distance parcourue par la bille la plus rapide n'excède pas le quart de son rayon. Cette distance s'obtient en résolvant l'équation III-5. Ainsi, le pas de temps dépend du diamètre des billes D et de la vitesse de la bille la plus rapide V_{max} , comme exprimé dans l'équation III-6. En faisant ainsi, il est assuré qu'aucune collision n'est manquée. Ceci résulte en des pas de temps de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} secondes, en fonction de la dynamique des billes.

$$\frac{1}{2} \|\vec{g}\| (\Delta t)^2 + V_{max} \Delta t - \frac{1}{8} D = 0 \quad (\text{III- 5})$$

$$\Delta t = \frac{-V_{max} + \sqrt{(V_{max})^2 + \frac{1}{4} D \cdot \|\vec{g}\|}}{\|\vec{g}\|} \quad (\text{III- 6})$$

- *Pièces en rotation :* les pièces de révolution, telles que les roue dentées, disques aubagés monoblocs et compresseurs, sont mis en rotation avec une vitesse angulaire constante ω , afin d'assurer un traitement homogène. Dans ces cas de figure, la pièce est définie dans un repère local $(A, \vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ qui lui est propre, comme illustré dans la

Figure III- 1. Une matrice de rotation $[B_I]$, dite aussi de passage, est ensuite utilisée afin d'exprimer les coordonnées des billes dans le repère local de la pièce et de mettre à jour l'orientation de la pièce dans le repère global $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

$$[B_I] = \begin{pmatrix} (u_x)^2 + (1 - (u_x)^2)C & u_x \cdot u_y (1 - C) - u_z \cdot S & u_x \cdot u_z (1 - C) + u_y \cdot S \\ u_x \cdot u_y (1 - C) + u_z \cdot S & (u_y)^2 + (1 - (u_y)^2)C & u_y \cdot u_z (1 - C) - u_x \cdot S \\ u_x \cdot u_z (1 - C) - u_y \cdot S & u_y \cdot u_z (1 - C) + u_x \cdot S & (u_z)^2 + (1 - (u_z)^2)C \end{pmatrix}_{(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad (\text{III- 7})$$

où $C = \cos(\omega \Delta t)$ et $S = \sin(\omega \Delta t)$; u_x, u_y, u_z sont respectivement les coordonnées du vecteur unité de rotation $\vec{u}$, exprimé dans le repère global (Figure III- 1).

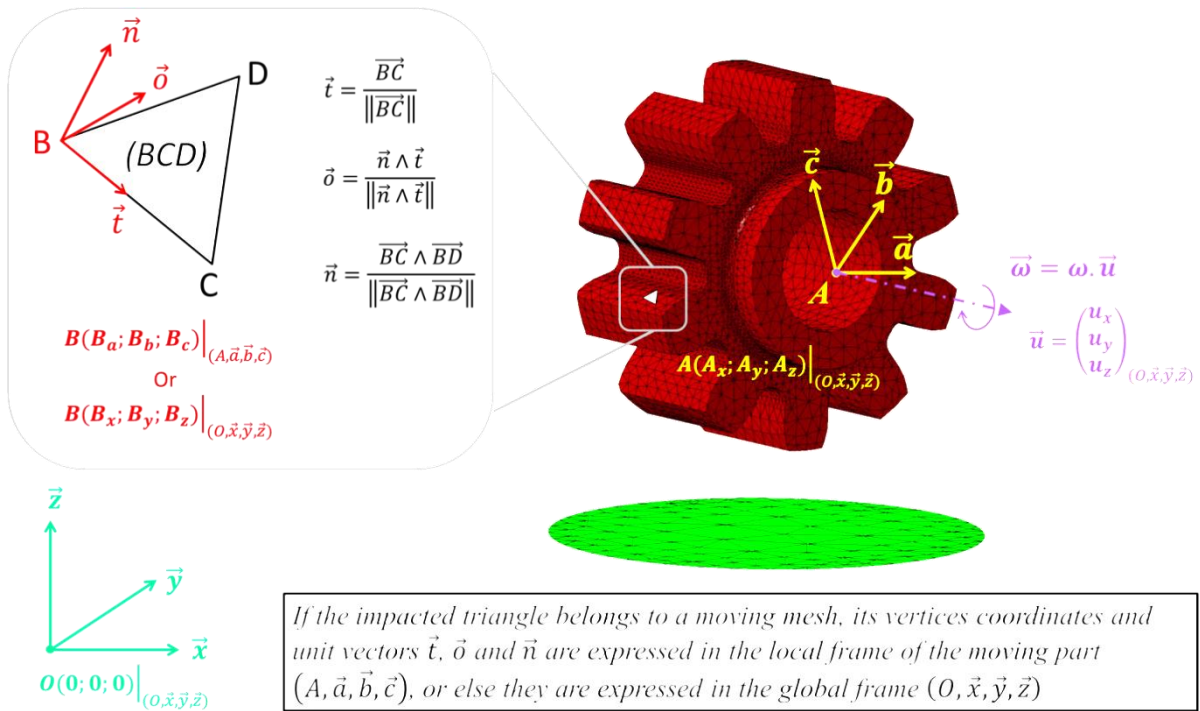


Figure III- 1 : Illustration du repère global (axes verts), du repère local attribué à la pièce en rotation (axes jaunes) et du repère local attribué à chaque triangle (axes rouges).

1.3. Algorithme

L'algorithme du modèle, présenté dans la Figure III- 2, est divisé en 4 grandes étapes: initialisation (bleu), le rendu 3D (rouge), la boucle principale (orange) et l'extraction des données (vert). La première étape consiste à lire tous les paramètres requis et à générer les structures nécessaires à la conduite de la simulation. La deuxième étape est implémentée uniquement dans la version '3D_mode' du modèle, dans lequel le rendu 3D est disponible. La troisième étape correspond au cœur de l'algorithme. C'est là que toutes les détections et la gestion des collisions sont effectuées. La dernière étape permet d'extraire les données brutes

requis, générées par la simulation, dans des fichiers pour une analyse ultérieure. Chacune des quatre étapes est détaillée ci-dessous.

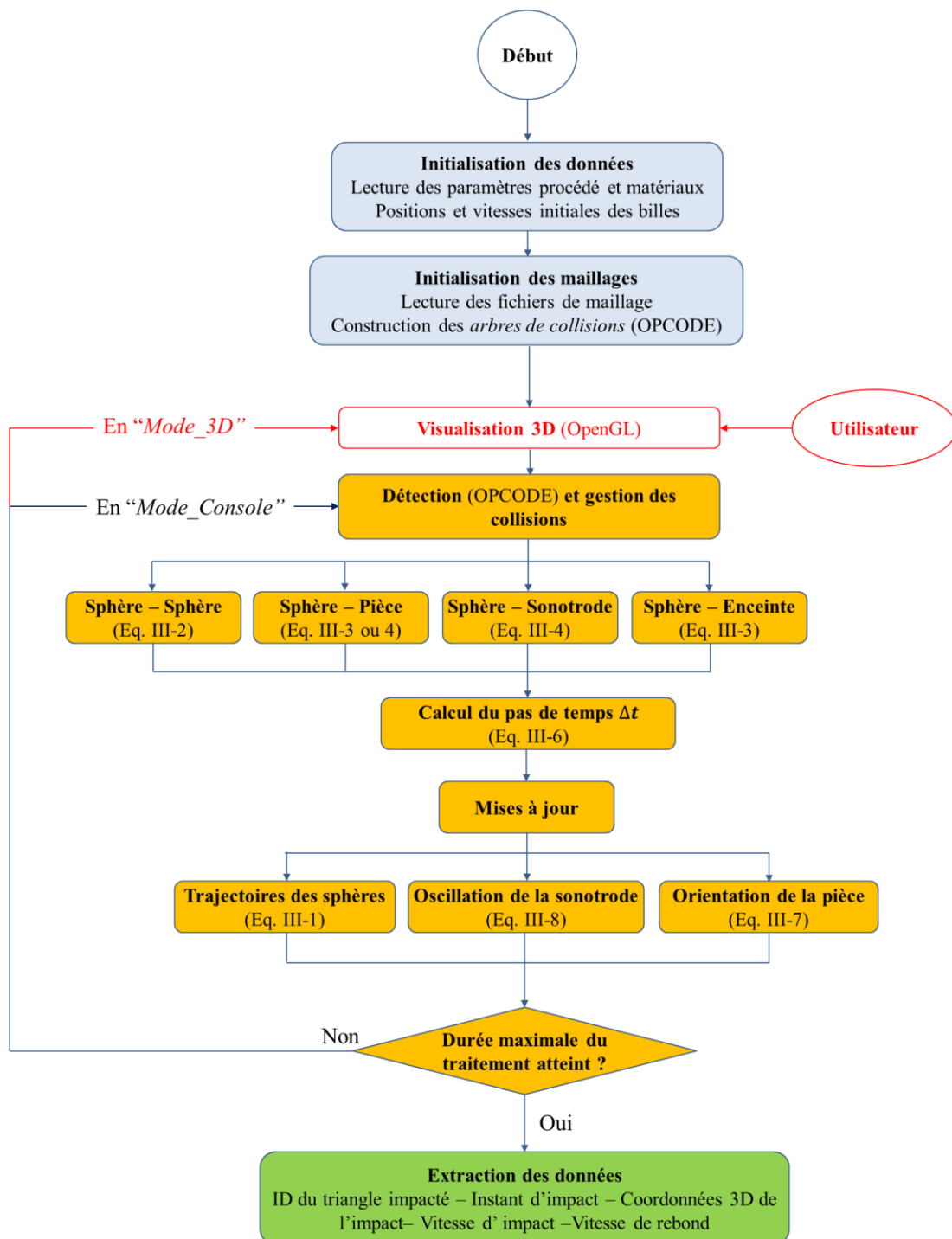


Figure III- 2 : Algorithme à pas de temps variable.

L'**Initialisation** est divisée de la manière suivante :

- a. *Lecture des fichiers de maillage* : chaque composant du dispositif de GUS (sonotrode, enceinte et pièce) est discrétisé en maillage triangulaire (Figure III- 1). Cette solution

répond à la première exigence du cahier des charges (section III.1.1) et a l'avantage d'être facilement implémentable.

b. *Construction des arbres de collision* : le choix d'une représentation géométrique à base de maillage confère aussi la possibilité d'utiliser des algorithmes efficaces de détection de collisions [89], [90] et de découpage de l'espace [91]. La librairie C++ *OPCODE*¹⁷ a été utilisée à ces fins dans le modèle. Elle permet de construire une arborescence à base de Aligned Axis Bounding Box (AABB) [90], pour et à partir de chaque maillage. Ceci permet par la suite de réaliser rapidement des détections de collisions de type Sphère – Maillage. Pour plus d'informations, se référer au site web de *OPCODE* [92] pour plus de détails sur la librairie et ses performances [93].

c. *Lecture des données d'entrée relatives aux* :

i. Paramètres procédé –

- Durée globale à simuler T
- Coordonnées du centre de rotation A de la pièce, exprimé dans le repère global
- Vitesse angulaire ω et le vecteur de rotation unitaire $\vec{u}$
- Nombre de billes N et leur diamètre D
- La vibration de la sonotrode $A_{\text{sono}}(t)$ est de forme sinusoïdale, de même que les équipements industriels, de fréquence F et d'amplitude A , comme exprimé ci-dessous :

$$A_{\text{sono}}(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t) \quad (\text{III- } 8)$$

ii. Matériaux – Des coefficients de restitution et de frottement sont attribués à chaque couple de matériaux susceptibles d'entrer en collision.

d. *Application d'une AABB à chaque bille* : ceci sert à réaliser des détections de collisions grossières, mais rapides, entre les billes, à l'aide des algorithmes de *OPCODE*. Leur taille est légèrement supérieure au diamètre des billes (10 %).

e. *Conditions initiales* : les sphères sont aléatoirement positionnées à la surface de la sonotrode, tout en assurant qu'aucun chevauchement n'existe. Dans certains cas, de l'air comprimé est injecté dans l'enceinte afin de mettre en mouvement les billes. Ceci est

¹⁷ Même si développé à la base pour être économe en utilisation de mémoire vive (RAM), *OPCODE* peut s'avérer plus performant que d'autres algorithmes de détection de collisions, comme *RAPID* [110].

modélisé en attribuant des vitesses initiales aux billes, dans le but de se rapprocher le plus possible des conditions réelles de traitement.

Le **Rendu 3D** est réalisé à l'aide de la librairie graphique OpenGL [94], [95]. Cette librairie permet de visualiser les maillages (pièce, sonotrode et enceinte), les billes et leurs vitesses, ainsi que les impacts inélastiques qui ont lieu sur la pièce traitée. Des options de visualisation peuvent être rajoutées par la suite si nécessaire.

La **boucle principale** se compose des étapes suivantes :

- a. *Collisions Sphère – Sphère* :
 - i. Détection grossière – *OPCODE* réalise des détections rapides de collisions bipartites entre les boites AABBs, précédemment attribuées à chaque bille. Une liste de paires AABB est ainsi générée.
 - ii. Détection fine – Les paires de billes correspondantes sont ensuite testées afin de déterminer si elles s'intersectent réellement.
 - Si le test est positif, les interférences sont éliminées et l'équation 4 est appliquée afin de calculer la vitesse de rebond de chaque bille.
 - Si le test est négatif, la paire suivante de billes est examinée.
- b. *Collisions Sphère – Maillage* : Pour chaque bille, une requête¹⁸ de détection de collision est effectuée avec :
 - i. Enceinte – en cas de collision, appliquer l'équation III-3.
 - ii. Sonotrode – en cas de collision, appliquer l'équation III-4.
 - iii. Pièce –
 - Si rotation : la position et vitesse de la bille sont exprimées dans le repère local de la pièce, à l'aide de la matrice de passage $[B_l]$ (équation III-7). La requête est ensuite réalisée, suivie de l'équation III-4 en cas de contact avéré. Enfin, exprimer à nouveau la position et la vitesse de la bille dans le repère global.
 - Si statique : en cas de collision, appliquer l'équation III-3.
- c. *Calcul du pas de temps Δt* : à l'aide de l'équation Eq. III-6.
- d. *Mise à jour des trajectoires de billes* : à l'aide de l'équation III-1 et de sa dérivée.
- e. *Mise à jour de l'oscillation de la sonotrode* : à l'aide de l'équation III-8 et de sa dérivée.

¹⁸ Les requêtes de détection de collisions effectuées par *OPCODE* retournent l'identifiant de l'ensemble des triangles touchés, listés dans l'ordre dans lequel ils ont été intersectés.

- f. *Mise à jour de l'orientation de la pièce* : si la pièce est en rotation, son orientation est mise à jour à l'aide de la matrice de rotation $[B_t]$ (équation III-7).
- g. *Fin de la simulation*: tester si la durée simulée est supérieure à la valeur de T , imposée par l'utilisateur.
 - i. Si le test est positif :
 - La fin de la simulation est atteinte et l'algorithme passe directement à la dernière étape (extraction des données).
 - ii. Si le test est négatif :
 - La simulation continue et l'algorithme passe directement au début de la boucle principale (a).

L'**extraction des données** consiste à exporter, dans des fichiers, l'ensemble des données relatives aux impacts, comme celles listées dans la *Figure III- 2*. Ces données peuvent être extraites pour chaque type de collision.

2. Étude de performances numériques

Suite à la présentation du modèle et de son algorithme, plusieurs études numériques, liées aux performances du modèle, sont effectuées puis présentées ci-dessous.

2.1. Dépendance au maillage

La première étude se focalise sur le temps '*query-time*' nécessaire pour réaliser une requête '*query*' de détection de collisions entre l'ensemble des billes et les maillages, à chaque itération. Pour cette étude, les billes sont positionnées entre deux maillages rectangulaires : un maillage supérieur plat et un maillage inférieur de type terrain et dont le comportement s'apparente à celui d'une sonotrode (illustration dans la *Figure III- 3*). Des conditions limites latérales sont rajoutées afin de contenir les billes entre les maillages et éviter qu'elles ne se dispersent au-delà.

Ensuite, le '*query-time*' est tracé dans la *Figure III- 3* en fonction de la densité des maillages, *i.e.* du nombre total de triangles, et cela pour différentes quantités de billes. Chaque point du graphe correspond à une moyenne des temps de requête, calculée sur plusieurs milliers d'itérations. Les résultats montrent qu'une augmentation du nombre de billes induit une augmentation du temps de requête moyen, pour une densité de maillage donnée. Ceci

s'explique par le fait qu'avec l'augmentation du nombre de billes, le nombre de requêtes à chaque itération augmente, se répercutant ainsi sur le 'query-time'.

En revanche, pour un nombre de billes donné, le 'query-time' est constant. Cela signifie que l'utilisation de maillages très denses n'affecte pas la détection des collisions, et par conséquent les temps de calcul. Des maillages raffinés peuvent donc être utilisés afin de décrire au mieux les géométries. Néanmoins, le rendu 3D des maillages peut nécessiter d'importantes ressources de calcul, augmentant ainsi le temps global de simulation. Ainsi, il est possible de conclure que la densité des maillages (nombre de triangles) n'a pas d'influence sur les temps de simulation, à condition de réaliser les calculs en 'mode_Console', i.e. sans visualisation 3D.

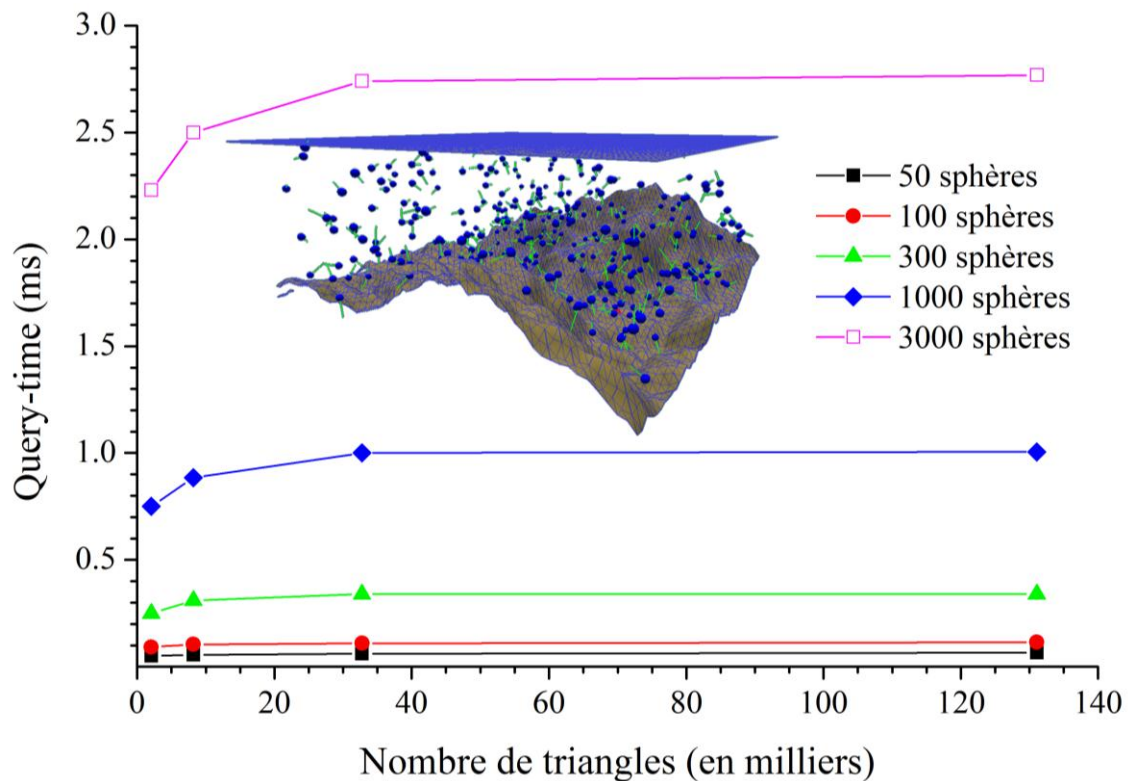


Figure III- 3 : Temps de requête moyen 'query-time' de détection des collisions en fonction de la densité des maillages (nombre de triangles), obtenu pour différentes quantités de billes de 1 mm de diamètre.

2.2. Temps global de simulation

L'ensemble des calculs réalisés dans cette sous-section correspond à une simulation de grenailage ultrason sur une roue dentée à denture droite (maillage rouge), monté sur un axe support (maillage horizontal bleu). Le tout est ensuite placé dans une enceinte cylindrique (maillage vertical bleu), en dessous de laquelle une sonotrode à section circulaire est

positionnée (maillage vert), comme illustré dans la *Figure III- 4*. La liste des coefficients ayant servi dans les simulations se trouve dans la *Table III- 1*.

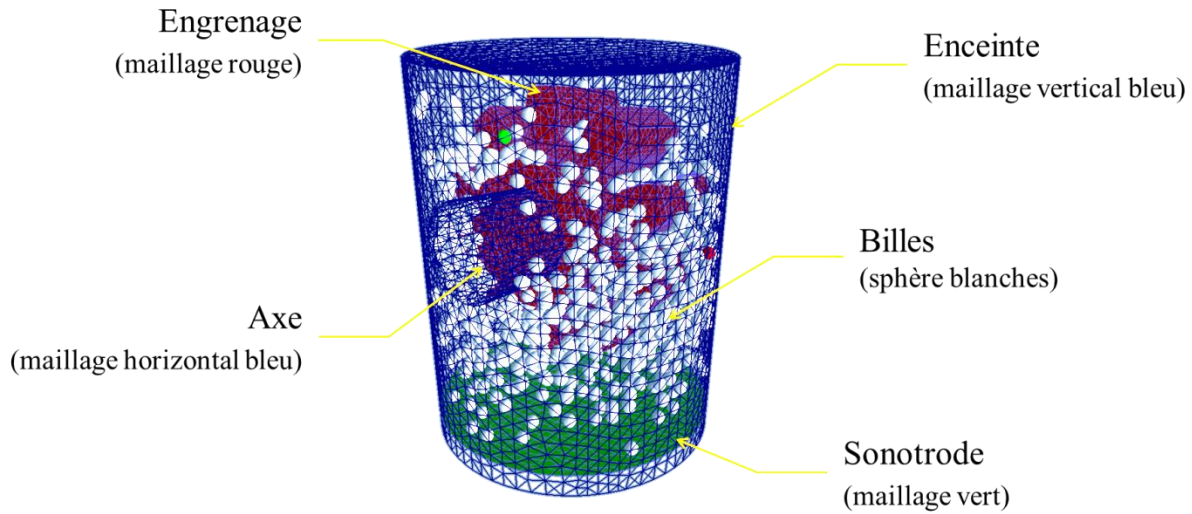


Figure III- 4 : Maillages composant le dispositif de grenailage ultrason.

Table III- 1 : Liste des coefficients de restitution et du frottement de Coulomb utilisés dans les simulations.

Paire en collision	C_0	V_0 (m/s)	μ	f
Sphère – Sphère	0.9	0.5	-	-
Sphère – Sonotrode	0.9	0.5	0.71	0.1
Sphère – Roue dentée	0.6	0.3	0.71	0.1
Sphère – Enceinte	0.9	0.5	0.71	0.1
Sphère – Axe	0.6	0.4	0.71	0.1

La seconde étude se focalise sur le temps de calculs que nécessite différentes sections de l'algorithme en fonction du nombre de billes N . Ces sections correspondent à : la détection et la gestion des collisions Sphère – Sphère (S-S) et Sphère – Maillage (S-M), avec et sans *OPCODE*, la mise à jour des trajectoires de billes et leur visualisation 3D. Dans la *Figure III- 5*, le temps de calcul nécessaire à la détection des collisions entre sphères à l'aide de *OPCODE* (courbe verte) est d'environ deux ordres de grandeurs plus petites qu'avec une approche directe (courbe noire), *i.e.* en réalisant $N(N-1)/2$ tests. La figure montre également que la détection de collisions S-M avec *OPCODE* (courbe rouge) requiert des temps de calculs similaires à S-S. Le nombre de triangles dans un maillage étant toujours plus

important que le nombre de billes, une approche directe dans ce cas de figure nécessiterait des temps de calculs à plusieurs ordres de grandeur que ceux obtenus avec *OPCODE*.

La mise à jour des trajectoires de billes (courbe bleue), quant à elle, requiert très peu de ressources de calcul. Il en est de même pour la mise à jour de l'oscillation de la sonotrode et de l'orientation de la pièce, si cette dernière est en rotation. Quant à l'affichage 3D des billes (courbe magenta), cette étape peut requérir d'importants temps de calcul suivant le nombre de billes à modéliser. D'ailleurs, le temps alloué au rendu 3D peut atteindre un ordre de grandeur supérieur à celui nécessaire à la détection des collisions avec *OPCODE*. Des résultats similaires sont également attendus pour la visualisation 3D des maillages.

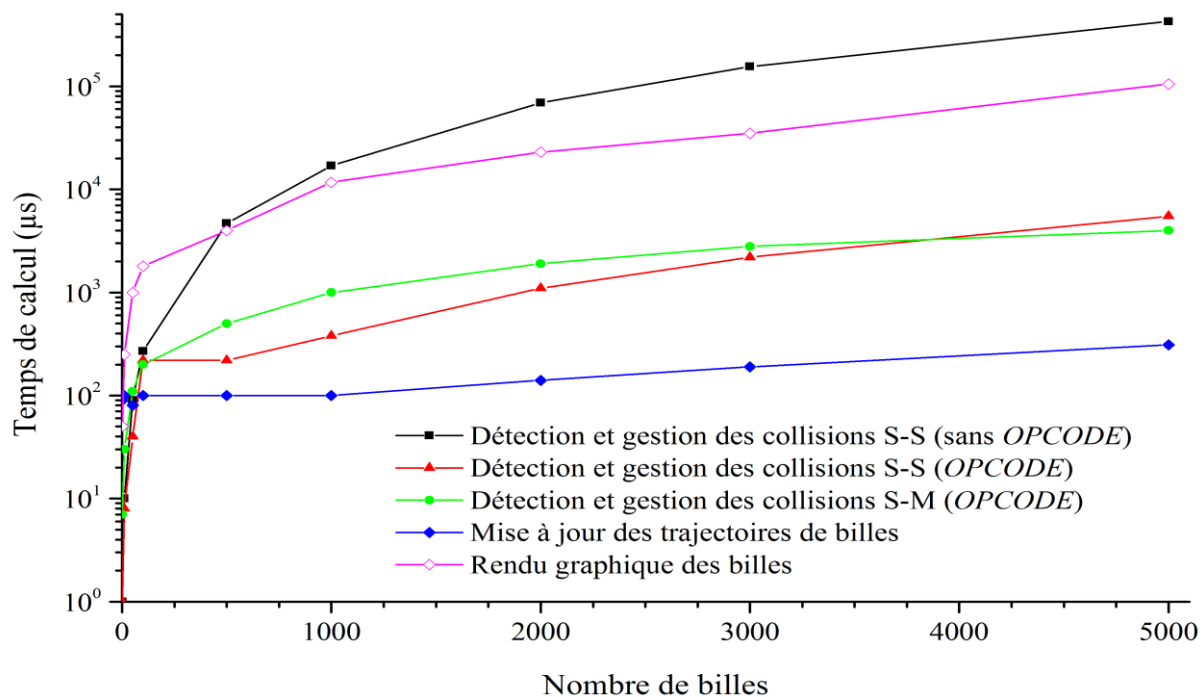


Figure III- 5 : Temps de calcul nécessaires à la détection et gestion des collisions de type S-S sans *OPCODE* (noir), S-S avec *OPCODE* (rouge) et S-M avec *OPCODE* (vert), la mise à jour des trajectoires de billes (bleu) et le rendu 3D des billes (magenta).

La dernière étude se focalise sur l'évolution du temps global de simulation, *i.e.* le temps que nécessite une simulation du début jusqu'à la fin, en fonction du diamètre D et nombre N des billes ; de l'amplitude de vibration de la sonotrode A et du temps de GUS à simuler T . L'objectif d'une telle étude est d'évaluer le comportement du modèle dans des configurations industrielles, *i.e.* géométries et paramètres procédé. Les Figure III- 6.a et Figure III- 6.b présentent le temps global de simulation en fonction du nombre de billes et du temps de GUS à simuler, respectivement. Les deux graphes montrent une évolution linéaire, où le fait de doubler N et T double le temps global de simulation. Les Figure III- 7.a et Figure III- 7.b

présentent, quant à elles, l'évolution du temps global de simulation en fonction du diamètre des billes D et de l'amplitude de vibration de la sonotrode A . Lorsque le diamètre des billes augmente, le temps de calcul diminue suivant une loi de puissance. En revanche, une augmentation de l'amplitude de vibration de la sonotrode entraîne une augmentation des temps de calcul de manière logarithmique. Ceci s'explique par la dépendance qui existe entre ces deux paramètres et le calcul du pas de temps Δt . D'ailleurs, ce dernier dépend directement de D et de la vitesse de la bille la plus rapide. Or, cette vitesse est principalement gouvernée par l'oscillation de la sonotrode ; à savoir l'amplitude A et la fréquence F (généralement fixe).

Pour conclure, simuler de longues durées de grenaillage ultrason, en utilisant un grand nombre de billes à faible diamètre et une forte amplitude de vibration, conduit à de longs temps de calcul. Il faut, par exemple, 1600 secondes (27 minutes) pour simuler 10 secondes de GUS, en utilisant 512 billes de 1 mm de diamètre et une amplitude de 80 μm . Conformément aux résultats des *Figure III- 6* et *Figure III- 7*, l'utilisation de 3072 billes du même diamètre que précédemment (six fois plus de billes) nécessitera 9600 secondes de calcul (2 heures et 40 minutes). Ainsi, simuler 60 secondes dans ces conditions prendrait 16 heures, si effectué sur un processeur CPU Intel® Core™ i7 cadencé à 1.73 GHz. Tout de même, il est important de noter que l'utilisation d'un processeur deux fois plus puissant (3.4 GHz), facilement accessible dans le commerce, divisera par deux les temps de calculs. Ainsi, le temps de calcul passerait à 8 heures, ce qui est largement en dessous des 12 heures mentionnées dans la section III.1.1.

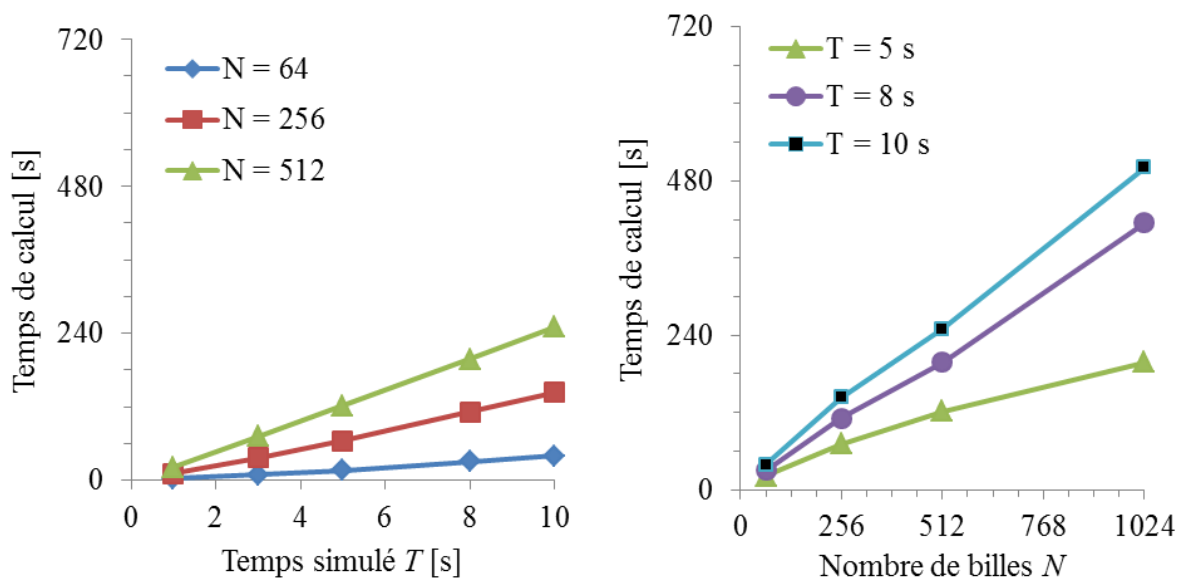


Figure III- 6 : Influence du nombre de billes N (à gauche) et de la durée à simuler T (à droite) sur le temps global de calcul, pour $A = 25 \mu\text{m}$ et $D = 3 \text{ mm}$.

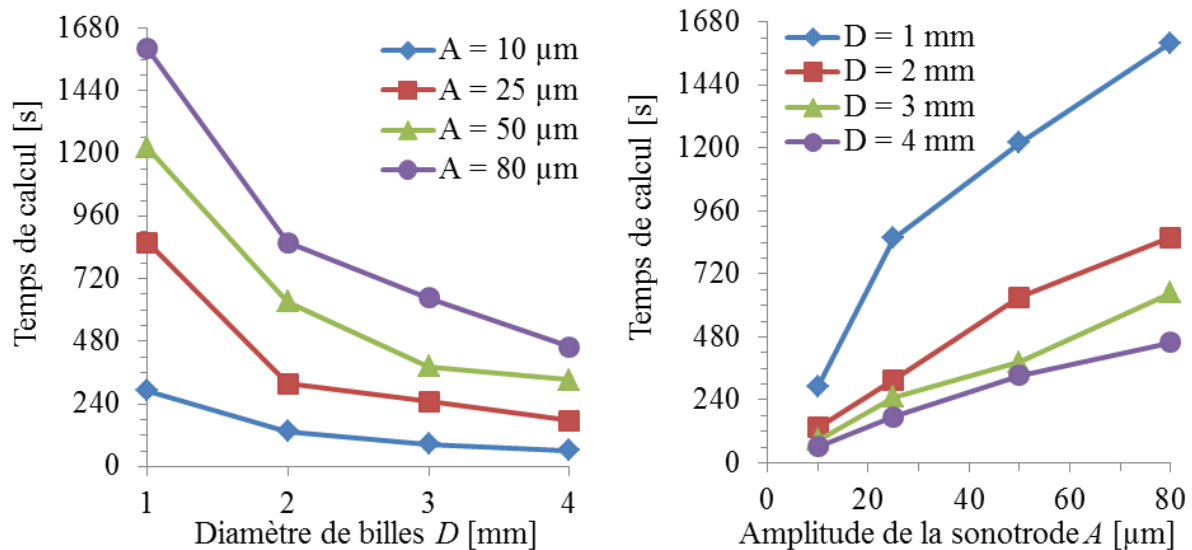


Figure III- 7 : Influence a) diamètre des billes D (à gauche) de l'amplitude de la sonotrode A (à droite) sur le temps global de calcul, pour $N = 512$ et $T = 10$ s.

2.3. Comparaison avec les travaux de Nougier-Lehon *et al.* (2012)

Dans la présente section, une comparaison est faite entre le modèle développé et un calcul par la méthode des éléments discrets (MED), réalisé par Nougier-Lehon *et al.* [70], à l'aide de la plateforme LMGC90¹⁹. La comparaison se focalise sur le temps global de calcul et de la distribution des vitesses d'impact. Dans leur article, les auteurs ont simulé une opération de GUS sur une barre en cuivre, positionnée dans une enceinte de traitement en acier trempé et à section rectangulaire (Figure III- 8.a). Les paramètres procédé se résument à 512 billes de 2 mm, une amplitude de vibration de 40 μm et une durée de traitement simulée de 1 seconde.

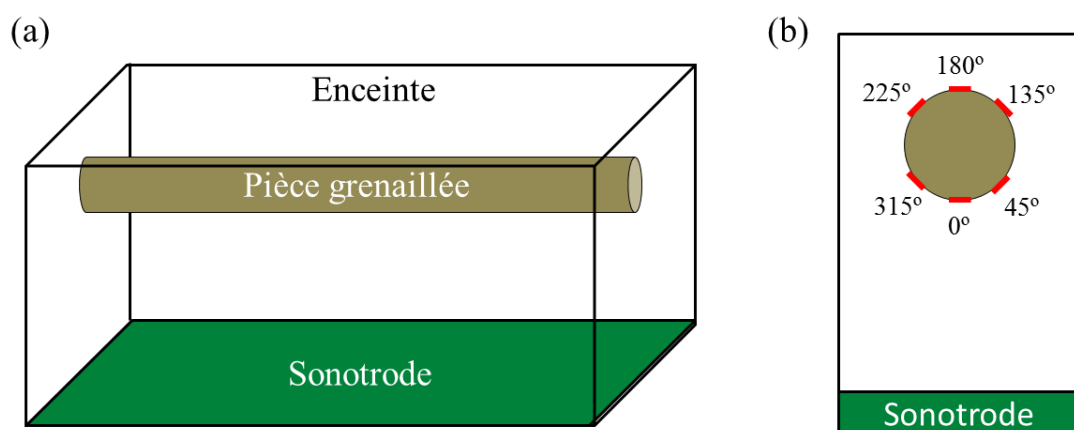


Figure III- 8 : Présentation du dispositif de GUS (a) et des zones d'analyses (b) définits par Nougier-Lehon *et al.*

¹⁹ Site web : < <http://www.lmgc.univ-montp2.fr/LMGC90/LMGC90/Welcome!.html> >, visité le 08/10/2013.

Quant à la simulation par la MED, elle a nécessité aux auteurs plusieurs heures de calcul. En comparaison avec notre modèle, présenté en section III.1, la même²⁰ simulation a nécessité 45 secondes de calcul en ‘mode_console’, contre 13 minutes et 44 secondes en ‘mode_3D’ (Figure III- 9). Dans les deux cas, le calcul MED nécessite nettement plus de temps `de calcul.

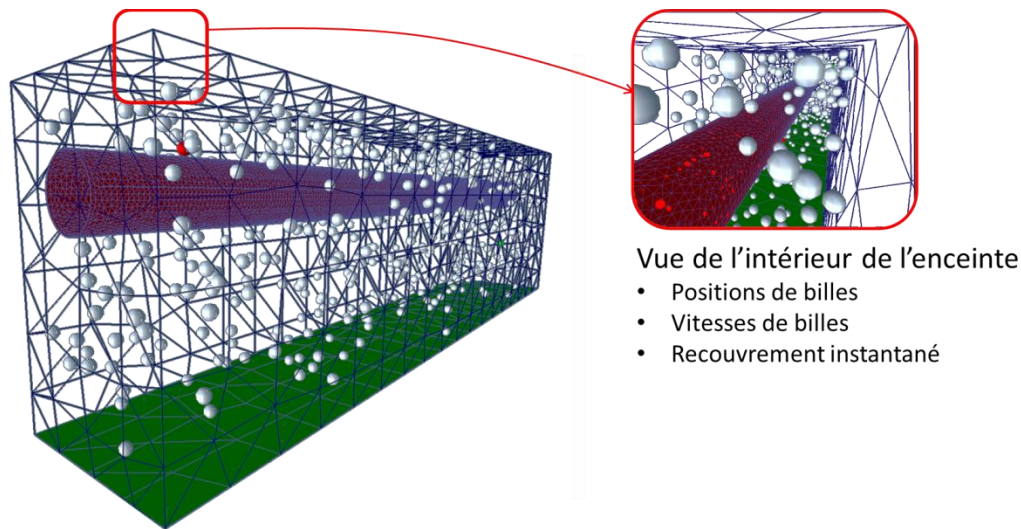


Figure III- 9 : Illustration de la dynamique des billes et du recouvrement numérique, issue du modèle développé.

En revanche, qu'en est-il de la prédiction des vitesses d'impacts ? Afin de répondre à cette question, l'analyse se base sur l'approche adoptée par les auteurs. Ces derniers définissent six zones d'étude rectangulaires ($2.5 \times 180 \text{ mm}^2$), marquées en rouge dans la Figure III- 8.b, et qui longent la barre grenaillée. Ensuite, dans chacune des six zones, les auteurs calculent la vitesse moyenne d'impact. Les résultats qu'ils obtiennent sont reportés dans la Figure III- 10 et représentés par des points noirs. Une analyse identique a également été réalisée à partir des données fournis par notre modèle. Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure III- 10 par un trait plein. Les axes radiaux du graphe correspondent aux vitesses d'impacts. Il est possible de constater que les deux approches aboutissent à des résultats semblables.

²⁰ Les mêmes géométries et paramètres que ceux utilisés par Nouguier-Lehon *et al.* (2012), dans la simulation MED, ont été repris à l'identique dans le modèle développé.

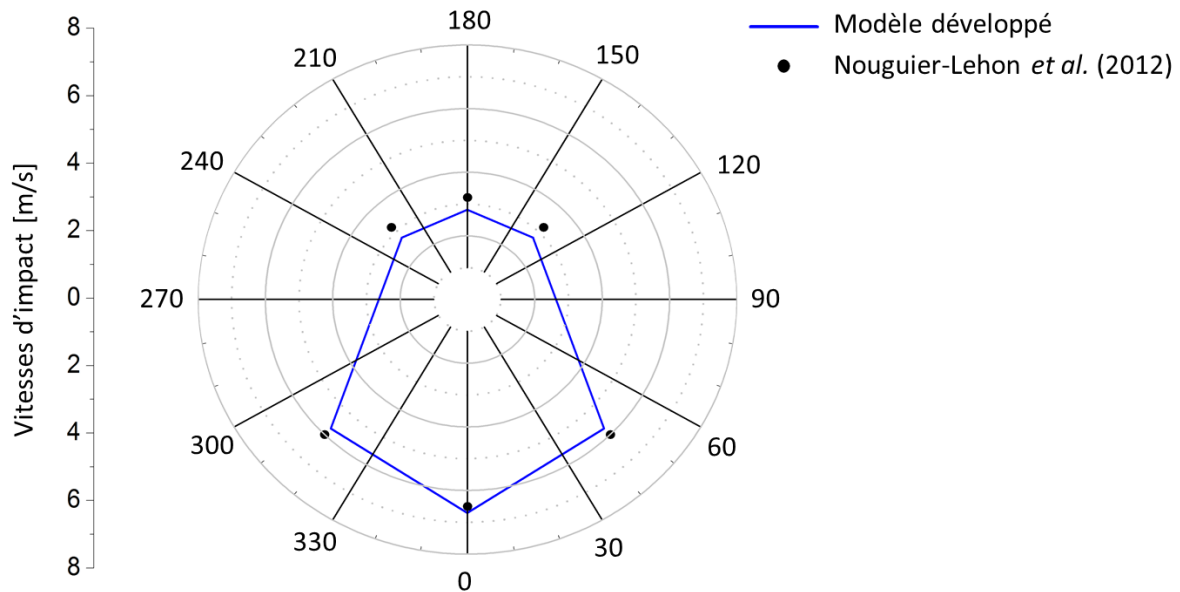


Figure III- 10 : Comparaison entre les distributions de vitesses d'impacts, à la circonférence de la barre grenailée, obtenues avec le modèle développé et un calcul MED [70].

3. Intégration dans le processus de conception des enceintes

Pour les partenaires industriels, le modèle développé servira, en premier lieu, à optimiser la conception des enceintes de GUS et les paramètres procédés. Ainsi, il a été convenu d'intégrer le modèle dans le processus de conception des enceintes. En d'autres termes, le concepteur doit pouvoir mettre en donnée la simulation, lancer le calcul, puis analyser les résultats obtenus depuis son environnement de conception. L'environnement choisi correspond au logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) CATIA® v5 r18, largement utilisé dans le secteur aéronautique. Cela signifie donc qu'il sera nécessaire de disposer, non seulement du modèle de grenailage ultrason (section III.1), mais également d'un module de post-traitement des résultats de simulations. À ceci, s'ajouteront des interfaces utilisateur qui permettront au concepteur, à partir du modèle CAO du dispositif de GUS, de renseigner les paramètres procédé, ainsi que les géométries et matériaux utiles à la réalisation des simulations. Afin d'illustrer ces propos, le traitement d'une roue dentée par grenailage ultrason (Figure III- 11) servira comme exemple dans le reste de la présente section.

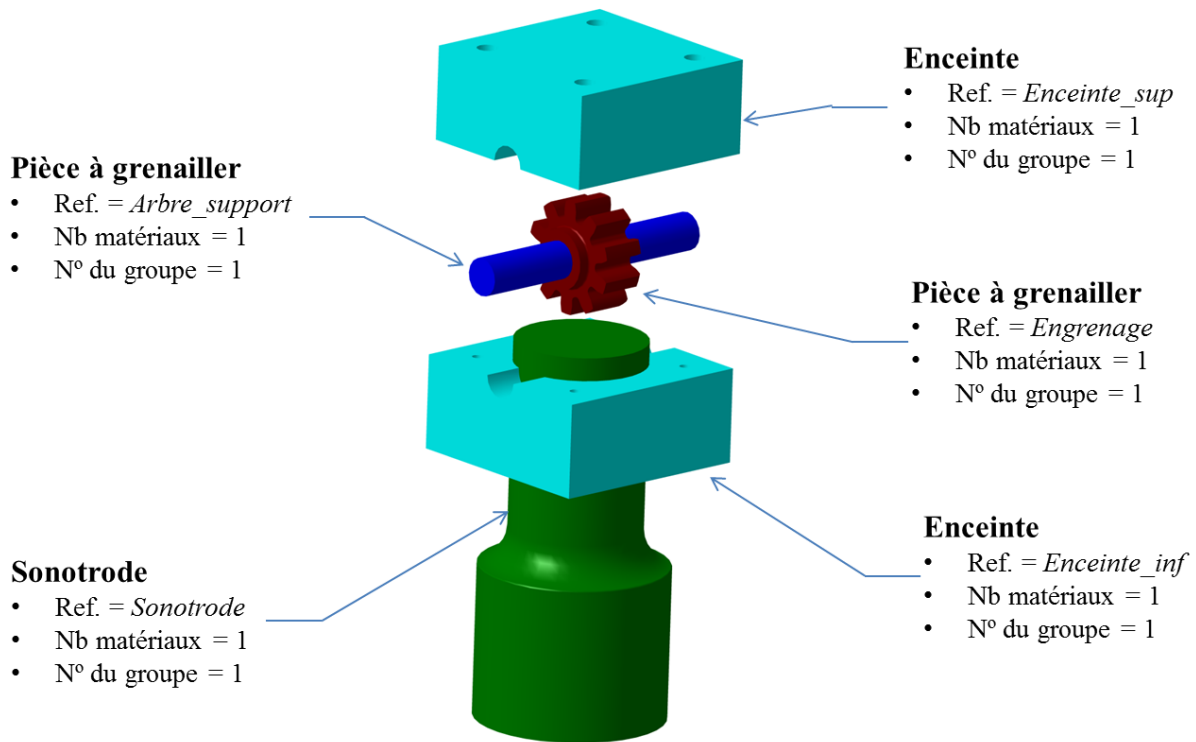


Figure III- 11 : Exemple qui servira dans cette section.

3.1. Démarche globale

La Figure III- 12 présente la démarche globale, dans laquelle s’imbriquent les différents éléments présentés ci-dessus. Cette démarche a pour but, dans un premier temps, d’intégrer la modélisation du grenaillage ultrason dans le processus de conception des enceintes de traitement. La stratégie adoptée consiste à développer des modules de simulation (Sections III.1 et III.3.4) et de post-traitement (Section III.3.5) indépendants. Ces derniers sont ensuite interfacés avec le logiciel CATIA® v5 afin de permettre au concepteur de préparer la mise donnée (Section III.3.2), lancer une simulation et analyser les résultats ; et ceci depuis son environnement de conception. Les interfaces créées à ce but (Section III. 3.3) ont été développées en langage VBA. Il devient donc possible au concepteur de visualiser et de quantifier, lors du calcul ou en post-traitement, les effets directs de ces choix de conception (géométries et matériaux) sur le procédé lui-même ; et cela avant tout prototypage et essai physique.

Parallèlement, le fait d’interfacer le modèle, au lieu de l’intégrer dans CATIA® v5, donne la possibilité d’étendre le modèle à d’autres environnements et logiciels CAO supportant le langage VBA ; et ceci pour un coût de développement informatique très faible.

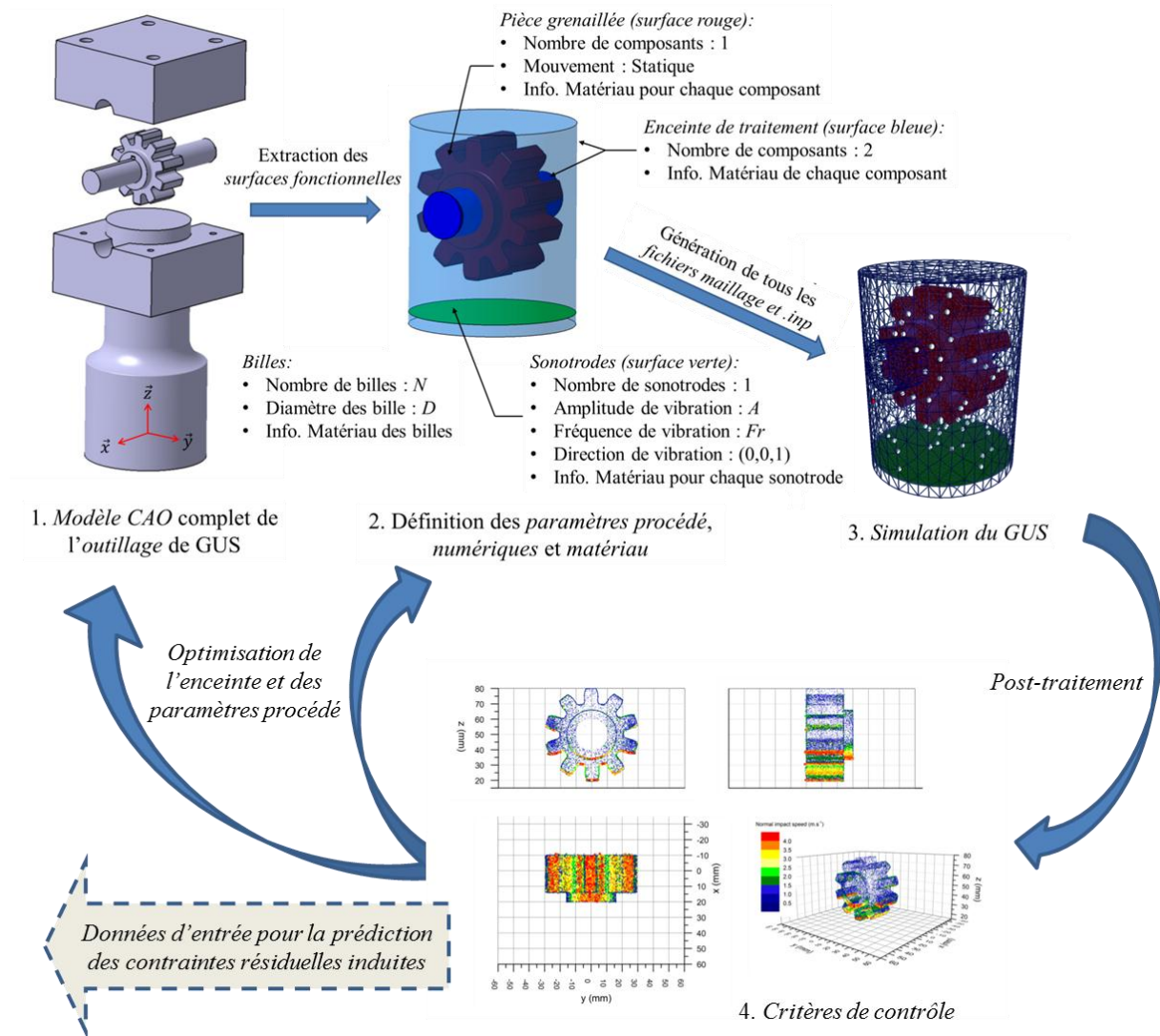


Figure III- 12 : Démarche d'intégration dans le processus de conception et de mise au point du GUS.

3.2. Préparation de la mise en donnée

3.2.1. Modèle CAO

Le prérequis pour toute simulation de grenaillage est de disposer du modèle CAO de la pièce à traiter, ainsi que celui du dispositif de grenaillage. Le dispositif correspond à l'ensemble des éléments constituant l'enceinte de traitement (outillage), ainsi que la sonotrode²¹. Comme illustré dans la Figure III- 11, l'ensemble des éléments du dispositif doivent être assemblés au préalable, dans l'atelier « *Assembly Design* » de CATIA® v5.

²¹ La plus part du temps, la sonotrode peut être modélisée par une simple surface plane (rectangulaire ou circulaire) par l'utilisateur. La disponibilité de son modèle CAO n'est donc pas obligatoire.

3.2.2. Extraction des surfaces fonctionnelles

L'outil de simulation nécessite la création de maillages afin de représenter les différentes géométries du dispositif de grenailage ultrason. La génération des différents fichiers de maillage passe tout d'abord par une phase d'extraction des surfaces fonctionnelles, soit celles qui seront potentiellement en contact avec les billes lors du traitement, à partir de la CAO.

Comme il a été montré dans la Section II.2.1, le nombre d'éléments constituant chaque maillage n'influence pas les temps de calcul, en « *Mode_Console* ». En conséquence, l'utilisateur final a la possibilité de :

- **Extraire l'ensemble des surfaces qui forment le dispositif de grenailage** – Ce choix permet une extraction rapide mais résultera en des maillages à grand nombre d'éléments et se traduit donc par des fichiers volumineux. Même si le temps de calcul ne sera pas affecté (« *Mode_Console* »), cette option peut s'avérer lourde en termes d'affichage 3D (« *Mode_3D* »).
- **Extraire uniquement les surfaces qui seront en contact direct avec les billes** – Ce choix peut demander plus de temps à l'utilisateur (si aucune automatisation n'existe) mais permet d'extraire le juste nécessaire. Les fichiers de maillages générés par la suite sont moins volumineux et moins impactant sur la visualisation 3D lors des simulations, par exemple.

L'extraction des surfaces, mentionnée ci-dessus, peut s'effectuer de deux manières : manuellement ou assistée par une macro VBA²², intégrée dans les interfaces utilisateurs. Dans tous les cas, il est fortement conseillé de créer préalablement une nouvelle pièce dans l'arborescence du modèle de produit (assemblage CAO).

3.2.3. Regroupement et structuration des surfaces extraites

On appellera 'groupe' une surface complexe, générée à partir d'une fusion d'un ensemble de surfaces. Dans le cadre du modèle, un groupe correspond à un matériau donné ou à une zone particulière, et appartient à l'une des entités suivantes : la pièce à traiter, l'enceinte de traitement ou la sonotrode. Lors de la mise en donnée d'un calcul, la définition des différents groupes géométriques/matériaux passe au préalable par l'identification des surfaces correspondantes. Dans le cas où plusieurs sonotrodes sont utilisées, autant de groupes que de

²² Visual Basic for Applications

sonotrodes sont à créer. Cette opération peut s'effectuer manuellement par l'utilisateur, avant la mise en donnée de la simulation, ou par l'intermédiaire des interfaces utilisateurs, présentées par la suite (cf. Section III.3.3).

3.2.4. Maillages

Le modèle ne supporte, pour l'instant, qu'un seul format de maillage '*.dat' (cf. Annexe 2 pour plus de détails). Il correspond au format Pastran/Nastran généré par le mailleur intégré de CATIA® (atelier « *Advanced Meshing Tools* »). Le modèle nécessite de disposer d'un maillage par entité (pièce à traiter, enceinte et sonotrodes). Chaque maillage peut être constitué de plusieurs groupes, d'où l'attention particulière apportée à la création des groupes (extraction des surfaces et structuration des données).

3.2.5. Données matériaux

Les données matériaux correspondent en premier lieu aux coefficients de restitution et de frottement nécessaires au bon déroulement des simulations. Ils s'appliquent à des couples de matériaux de type bille-paroi ou bille-bille. À ces paramètres viennent s'ajouter de plus classiques, comme la densité, le module de Young, le coefficient de Poisson et la limite d'élasticité. Ces derniers ne sont pas utilisés directement lors des simulations, mais servent pour le calcul de certaines grandeurs physiques, lors du post-traitement des résultats, comme l'estimation du diamètre des cratères d'impacts, en fonction de la vitesse normale d'impact.

3.3. Interfaces utilisateurs dans CATIA® v5 R18

Une fois le modèle CAO prêt, il devient possible de lancer une *nouvelle étude*, éditer/relancer une *étude existante* ou *post-traiter* les résultats numériques, à l'aide des interfaces utilisateurs créées à ce but. Ces interfaces sont intégrées dans une barre d'outils (*Figure III- 13*) dédiée, disponible dans l'environnement CATIA® ; plus particulièrement dans les ateliers suivants :

-  **Part Design** – permet de concevoir des pièces volumiques
-  **Assembly Design** – permet de créer un assemblage de pièces
-  **Wireframe and Surface Design** – permet de concevoir des pièces surfaciques, ou en générer à partir de pièces volumiques

Ces interfaces permettent de guider l'utilisateur dans la mise en donnée des calculs lors de l'utilisation des outils développés. La génération des fichiers d'entrée et de maillage, quant à

elle, se fait de manière transparente pour l'utilisateur. L'approche repose donc sur les connaissances et les compétences techniques du concepteur, ainsi que l'intégration de la démarche dans son environnement de travail habituel. L'hypothèse principale est qu'une meilleure intégration des outils maximisera leur utilité lors de la conception des enceintes de grenaillage ; fournissant ainsi un feedback quasi immédiat relatif à l'effet des choix de conception sur le procédé et sa mise en œuvre.

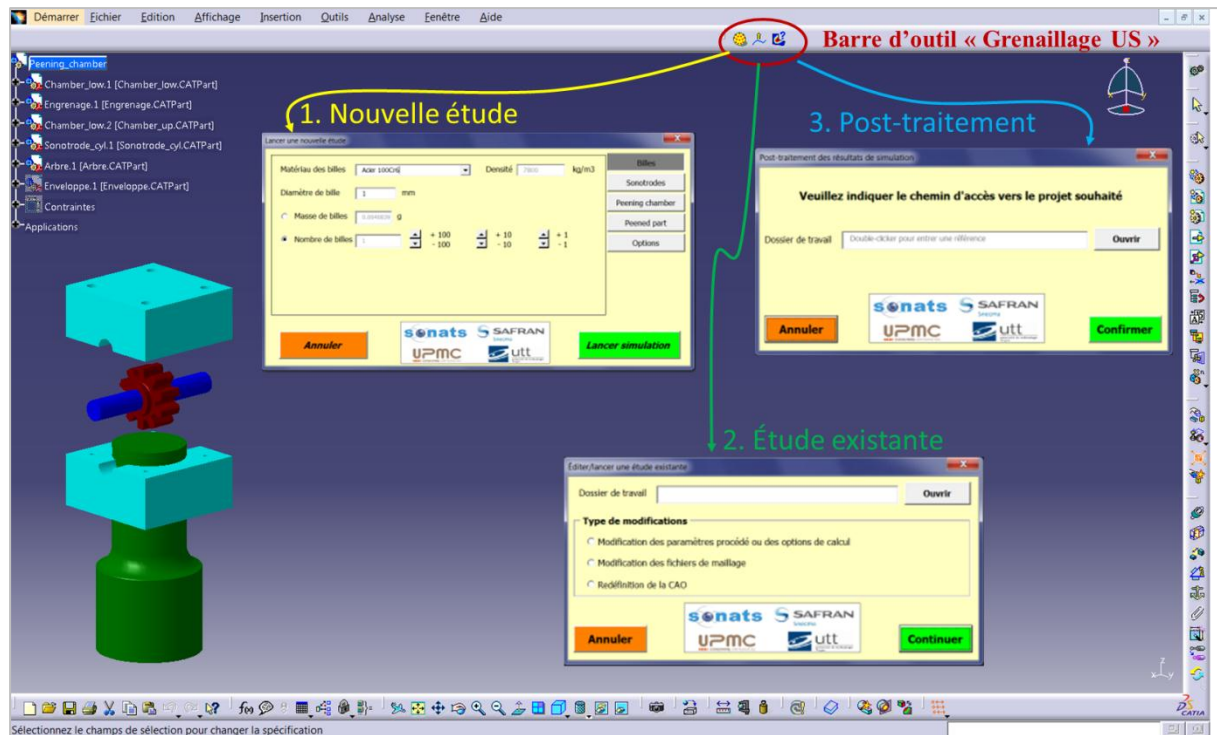


Figure III- 13 : Présentation de la barre d'outils dédiée au Grenaillage Ultrason, dans l'environnement CATIA® V5, et des interfaces utilisateur développées.

3.3.1. Lancer une nouvelle étude

La mise en donnée d'une nouvelle étude s'effectue en cliquant sur le bouton 'NewStudy' , depuis l'environnement CATIA®. L'interface qui apparaît est illustrée dans la Figure III- 14. Elle permet à l'utilisateur de définir un dossier de travail pour l'étude en cours, le mode d'exécution ('Mode_console' ou 'Mode_3D') et de spécifier les données à sauvegarder lors de la simulation, ainsi que de choisir les paramètres relatifs aux billes (masse totale, diamètre, matériaux) et à la simulation (temps de traitement à simuler et mouvement de la pièce). L'interface permet également de définir autant de sonotrodes que souhaité, d'indiquer le positionnement initial des billes, de définir l'ensemble des groupes/matériaux relatifs à l'enceinte et à la pièce à traiter, et de lancer le module de simulation GUSimu (cf. section III.3.4), comme illustré dans la Figure III- 15.

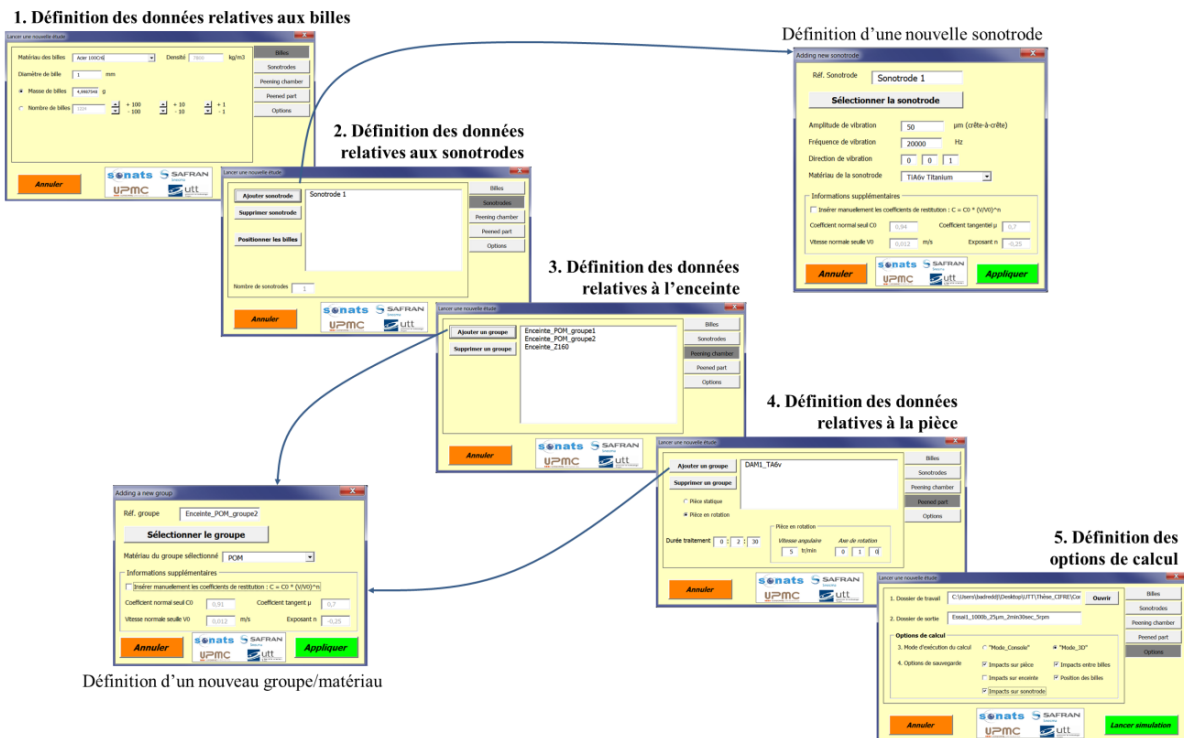


Figure III- 14 : Étapes à suivre afin de lancer une nouvelle simulation depuis CATIA®.

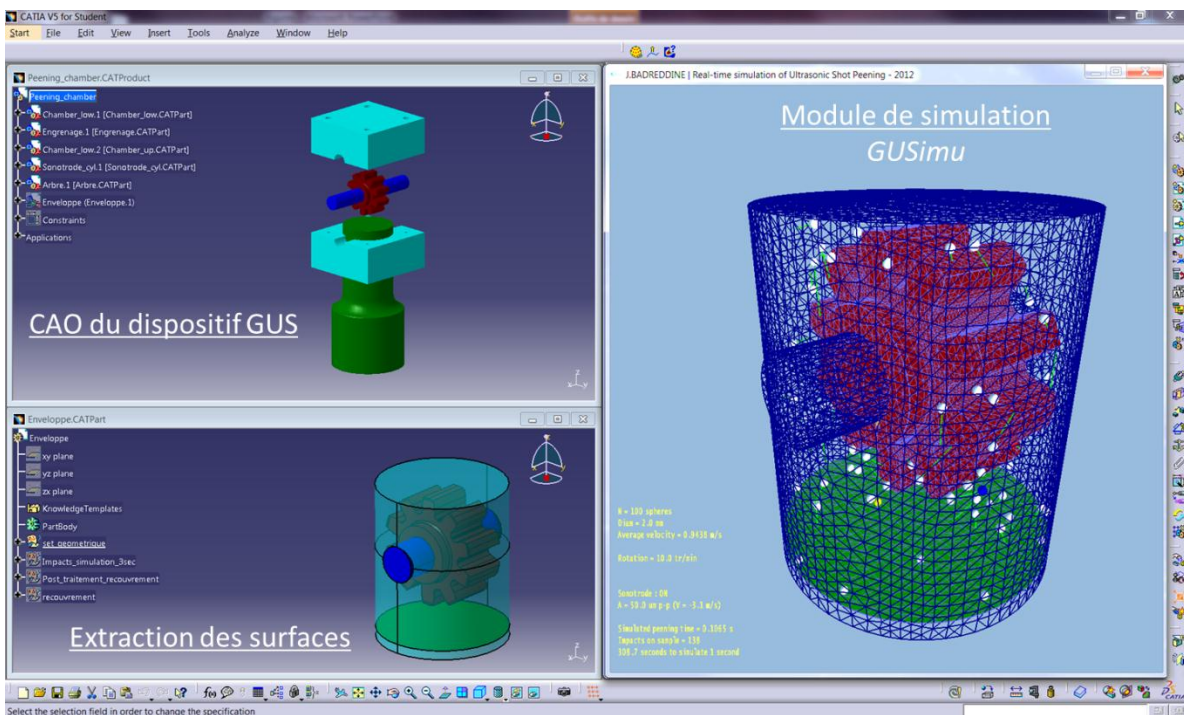


Figure III- 15 : Lancement du module de simulation GUSimu à partir du logiciel CATIA®.

3.3.2. Éditer/relancer une étude existante

Dans le cadre où plusieurs configurations de paramètres procédé, matériaux ou de conceptions d'enceintes sont à tester. Une première mise en donnée est à effectuer à l'aide de l'interface 'Nouvelle étude', présentée dans la section III.3.4. Par la suite, il sera possible d'utiliser cette première mise en donnée afin de lancer de nouvelles études présentant des

configurations différentes, à partir de l'étude initiale. Dans le cas présent, une seconde interface utilisateur est à utiliser (Figure III- 16), en cliquant sur le bouton 'Existant study'

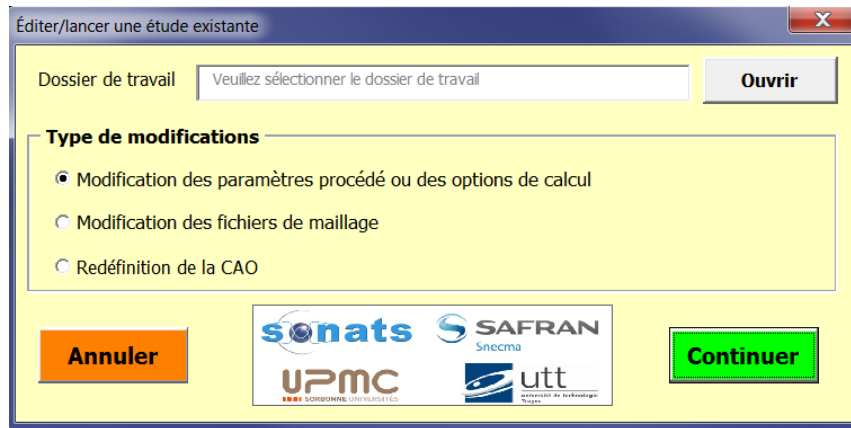


Figure III- 16 : Interface utilisateur relative au lancement d'une simulation à partir d'une étude déjà existante.

3.3.3. Post-traitement des résultats de calcul

Une fois un calcul terminé, il devient possible de lancer le module de post-traitement à partir d'une troisième interface utilisateur CATIA® (Figure III- 17), en cliquant sur le bouton 'Post-traitement' . Il suffit ensuite de spécifier le dossier de travail, relatif à l'étude concernée, avant de cliquer sur le bouton *Confirmer*. Cette action lance le module de post-traitement *GUSanalysis*, présenté dans la section III.3.5.

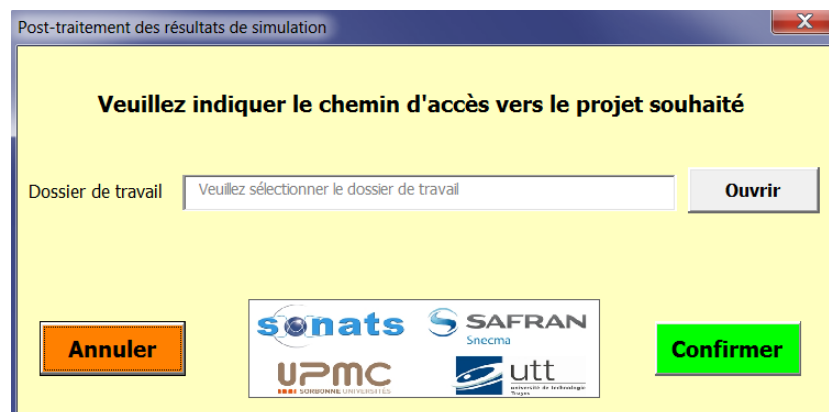


Figure III- 17 : Interface utilisateur relative au post-traitement des résultats de simulation.

3.4. Module de simulation : GUSimu

Le module de simulation, baptisé *GUSimu*, se décline en deux versions, comme indiqué dans la section III.1. L'utilisateur a la possibilité de choisir entre le '*Mode_Console*' et le '*Mode_3D*'.

3.4.1. 'Mode_Console'

Si l'utilisateur sélectionne le '*Mode_Console*', la simulation sera lancée et une fenêtre de commandes MS-DOS apparaîtra. Cette version du modèle ne propose pas de visualisation 3D au cours du calcul et permet donc de minimiser les temps de calcul.

3.4.2. 'Mode_3D'

En revanche, le '*Mode_3D*' est sélectionné, une fenêtre *OpenGL* s'affichera à l'écran (Figure III- 18). Elle permet à l'utilisateur de visualiser, pendant le calcul, la dynamique des billes, leurs vitesses, ainsi que les cratères d'impacts inélastiques laissés sur la pièce. Le module permet également d'interagir avec la simulation, à l'aide de la souris et de multiples raccourcis claviers, et de naviguer virtuellement en 3D autour de la pièce.

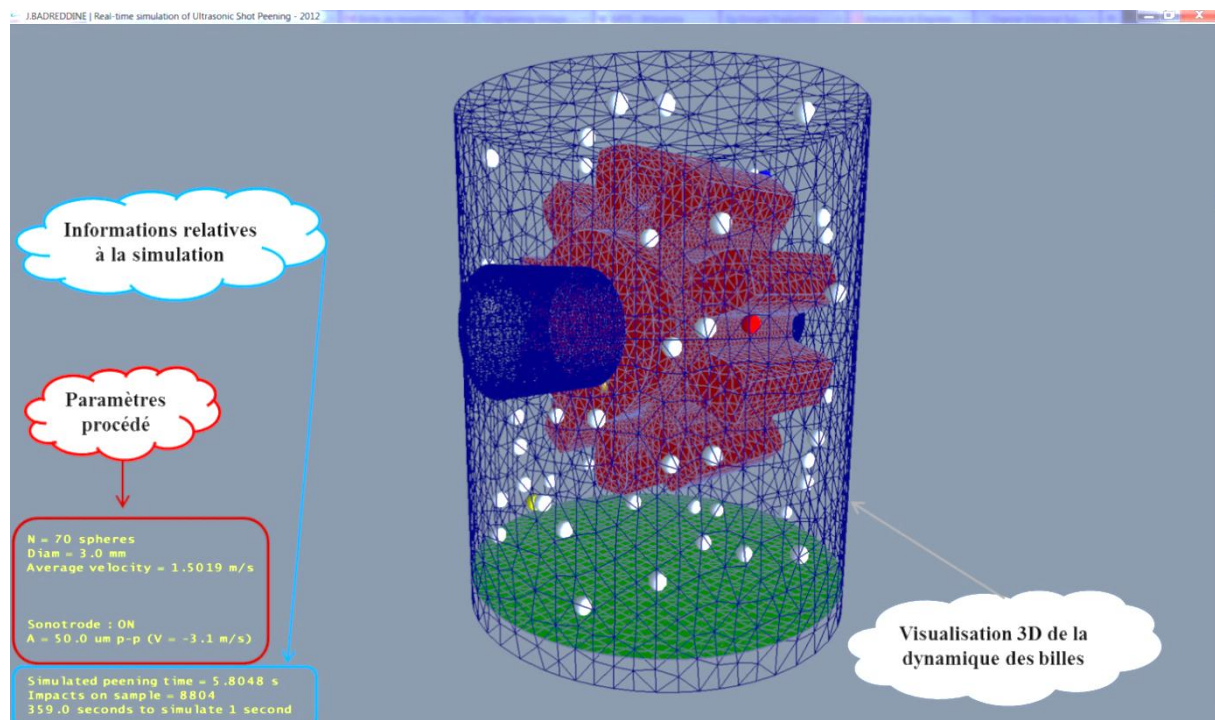


Figure III- 18 : Simulation lancée en '*Mode_3D*'.

3.4.3. Données accessibles en temps-réel

Comme précisé précédemment, le code de simulation permet un affichage en temps-réel de la simulation en cours. Cette fonctionnalité utilise la librairie OpenGL²³ [96], [97] pour produire le rendu graphique et permet de visualiser :

1. Les éléments du dispositif de GUS (sonotrodes, pièce, enceinte et billes)
 - a. Individuellement
 - b. Tous ensembles (*Figure III- 19.a*)
2. La vitesse de chaque bille (*Figure III- 19.b*) afin de mieux visualiser les flux dans l'enceinte et d'éventuels effets de convection
3. Le recouvrement de la pièce au cours du temps (*Figure III- 19.c*). Chaque impact est représenté par un disque rouge, dont le diamètre est calculé à partir de la vitesse normale d'impact et des données matériaux renseignées par l'utilisateur.

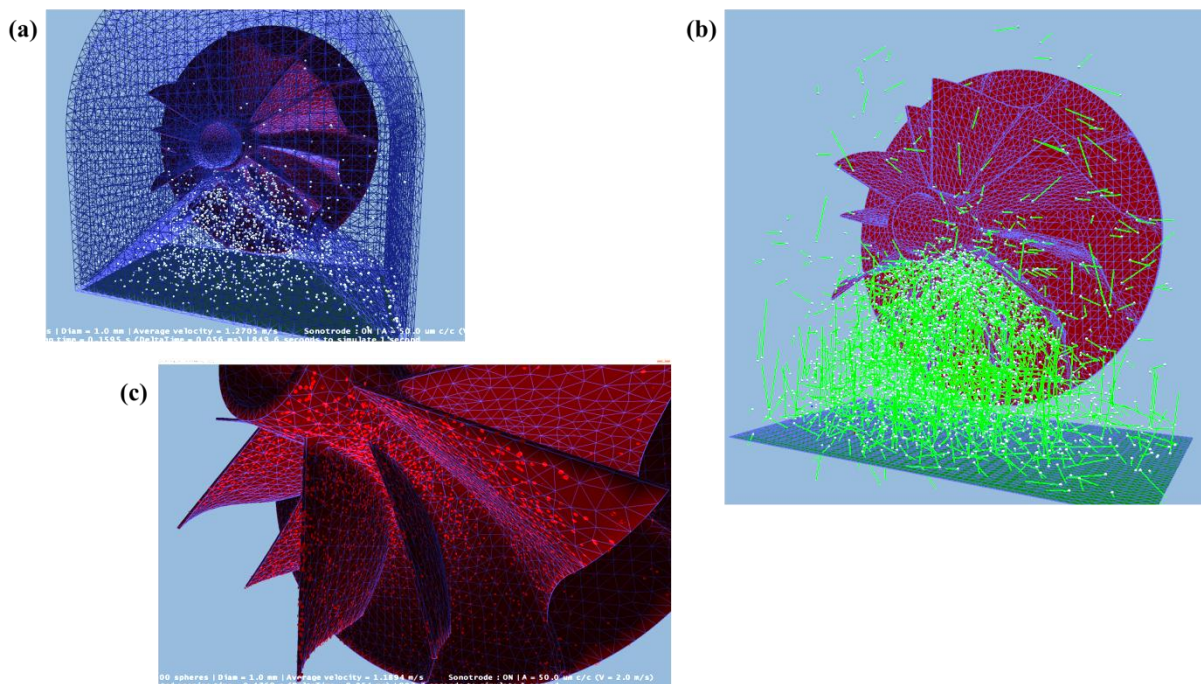


Figure III- 19 : Information visuelles accessibles pendant le calcul, en 'Mode_3D'. Exemple d'une opération de grenaillage ultrason sur un compresseur.

3.4.4. Données brutes de sortie

Le module *GUSimu* fournit en fin de calcul les données de sortie suivantes, pour chaque impact avec la pièce :

²³ Site officiel d'OpenGL : www.opengl.org/

- ID du triangle impacté
- Instant auquel l'impact a eu lieu [s]
- Coordonnées 3D de l'impact [mm]
- Trois composantes de la vitesse d'impact [m/s]
- Trois composantes de la vitesse de rebond [m/s]

3.5. Module de post-traitement : *GUSanalysis*

Le module de post-traitement '*GUSanalysis*' permet d'analyser les données issues des simulations et de les afficher directement sur la géométrie de la pièce, comme illustré dans la Figure III- 20 pour la distribution des angles d'impacts. Le module de post-traitement *GUSanalysis* permet ainsi d'accéder en 3D :

- Au recouvrement de la pièce
- À la distribution spatiale des valeurs maximales et moyennes de
 - la norme des vitesses d'impact
 - la composante normale des vitesses d'impact
- À la distribution spatiale des valeurs minimales, maximales et moyennes des angles d'impact (par rapport à la normale à la surface)
- À la distribution spatiale de la densité d'impact
- À la distribution spatiale des énergies cinétiques dissipées

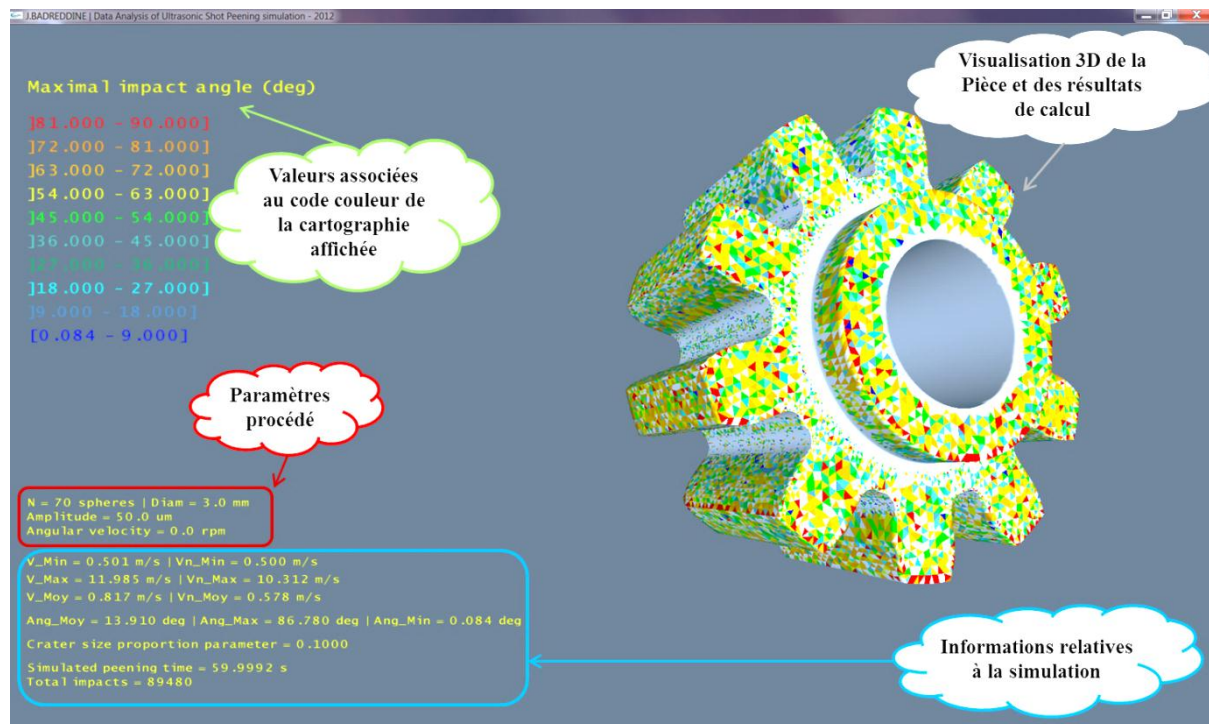


Figure III- 20 : Fenêtre d'affichage associée au module de post-traitement '*GUSanalysis.exe*'.

Il est également possible de réaliser des analyses statistiques, globales ou localisées à l'échelle de la pièce, à partir des données brutes de simulation (section III.3.4.4) ; et cela à l'aide de logiciels d'analyse de données tierces. Cela permet de remonter à des grandeurs physiques, telles que :

- L'évolution du nombre d'impact en fonction du temps (*Figure III- 21*)
- Les distribution statistiques des vitesses et angles d'impacts
- La distribution statistique des angles d'impacts

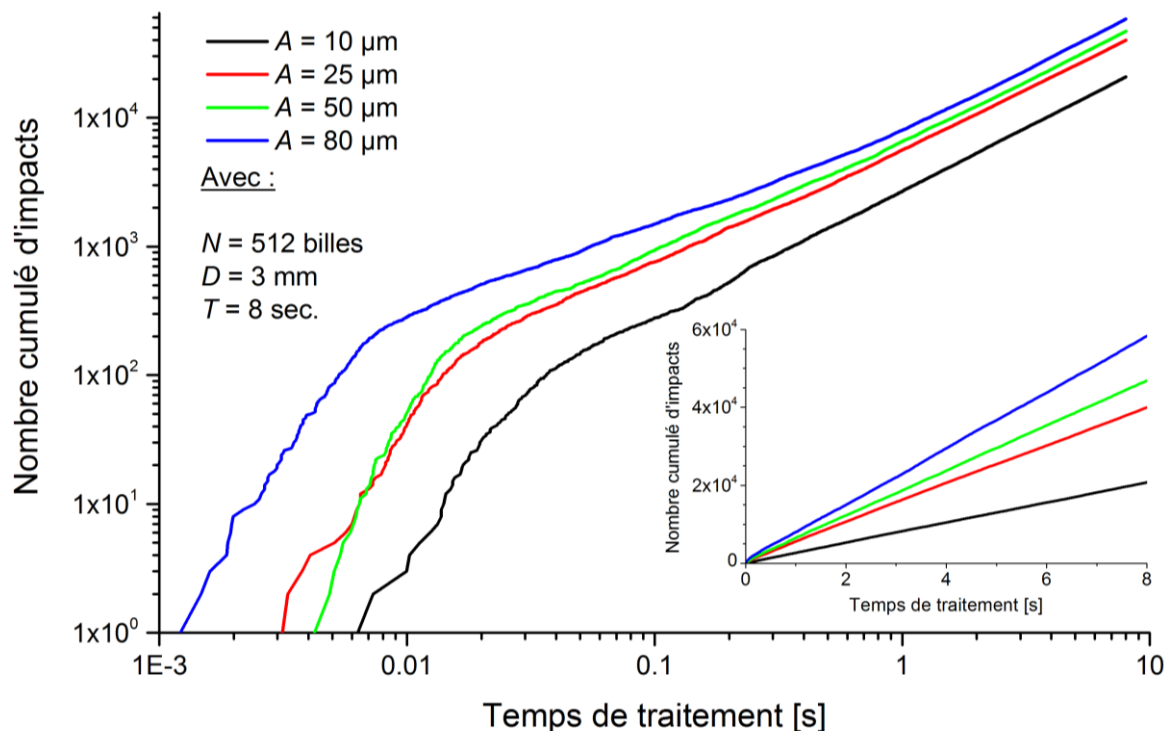


Figure III- 21 : Évolution du nombre cumulé d'impact en fonction du temps de traitement, sur l'ensemble d'une roue dentée, obtenue pour différentes amplitudes de vibration.

4. Synthèse du chapitre

Dans le présent chapitre, un modèle 3D de la dynamique des billes, dans le cadre du grenaillage ultrason, est présenté. Ses principales spécificités résident dans sa capacité à modéliser le procédé pour la plupart des configurations industrielles. En d'autres termes, le modèle supporte n'importe quelle géométrie d'enceinte, de pièce et de sonotrode, à condition de disposer de leur maillage. Il est également possible de mettre en rotation la pièce pendant le traitement et de définir autant de matériaux et sonotrodes que souhaité, afin de représenter au mieux les conditions réelles de traitement.

De plus, des études de performances numériques, relatives au temps de calcul, permettent d'attester des bonnes performances du modèle développé. En effet, les temps de calcul sont raisonnables et bien inférieur à ceux correspondant, par exemple, à des simulations par la méthode des éléments discrets. Un second point fort du modèle réside dans son indépendance à la taille des maillages (nombre de nœuds et de triangles). Ceci implique qu'il est possible de générer des maillages précis des géométries concernées, sans perte de performances. Cependant, une des limitations du modèle peut provenir du fait que la rotation des billes n'est pas prise en compte. Il serait donc important de quantifier les effets rotationnels des billes et leur impact sur la dynamique des billes. Le but étant de savoir si leur prise en compte dans la modélisation est nécessaire ou pas.

Enfin, une démarche globale est présentée pour l'utilisation du modèle dans le processus de conception des enceintes de traitement. En effet, ceci correspond à la première utilisation du modèle. Une seconde utilité viendrait de sa capacité à fournir des données d'entrée relatifs et cohérents aux divers modèles de prédiction des contraintes résiduelles, comme présenté dans les perspectives générales du manuscrit. Concernant la démarche proposée, elle se traduit par le développement de modules de simulation et d'analyse des résultats, ainsi que d'interfaces utilisateurs. Cela permet donc au concepteur d'accéder à ces modules, depuis son environnement de conception, et d'obtenir un retour sur ses choix de conception vis-à-vis du procédé lui-même. Or jusqu'à présent, seule l'expérience en entreprise, la réalisation de prototypes et d'essais physiques permettent d'obtenir des informations sur le choix des paramètres procédé et de conception des enceintes.

Des résultats issus du présent chapitre ont fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique [5], d'un article de journal en cours de reviewing [98] et des participations à une conférence internationale [99] et à deux conférences nationales [100], [101].

Chapitre IV – Études expérimentales

Le présent chapitre est consacré à la confrontation entre les résultats numériques, issus des modèles présentés, et expérimentaux. Une première partie présente des moyens de mesures expérimentaux existants et les contributions personnelles apportées pour la mesure du recouvrement et des trajectoires de billes. Dans la seconde partie, les méthodes proposées sont testées dans des conditions de grenailage ultrason, ainsi que leur utilité dans la mesure du recouvrement (moyen et cartographie spatiale), de la dynamique des billes (vitesses dans l'enceinte, vitesses et angles d'impact). Dans la troisième partie, une confrontation expérimentale permet d'évaluer les performances du modèle présenté dans le Chapitre III. Pour ce faire, une opération de grenailage ultrason est réalisée sur une roue dentée à denture droite. Des mesures de diamètres de cratères, sur plusieurs dents, permet de remonter à des distributions de vitesses expérimentales. Celles-ci sont ensuite comparées à celles fournies par le modèle et montrent une bonne corrélation entre l'expérience et la simulation.

1. Que mesure-t-on et comment ?

Avant d'effectuer une quelconque mesure, il est important de s'interroger sur les grandeurs physiques qui sont pertinentes. Dans le cas des présents travaux de thèse, les modèles développés donnent accès aux trajectoires de billes (distributions de vitesses et d'angles d'impacts), ainsi qu'à la distribution spatiale des impacts. Une validation expérimentale devra donc se baser sur au moins une de ces grandeurs.

1.1. Recouvrement

1.1.1. Techniques d'évaluation existantes

Peu de méthodes existent pour la mesure du recouvrement, défini dans le Chapitre I.1.4.1. Les principales techniques sont présentées ci-dessous.

Norme SAE J2277

Suivant la norme SAE J2277 [30], l'évaluation du recouvrement doit se faire à l'aide binoculaire avec un grossissement d'au moins 8. Ce type d'évaluation se fait à l'œil et dépend donc de l'acuité visuelle et de l'expérience de l'opérateur qui effectue l'évaluation. En d'autres termes, pour une même pièce grenillée il est possible d'obtenir des évaluations différentes du recouvrement d'un opérateur à l'autre. Ceci est ennuyeux puisqu'une

répétabilité de la mesure ne peut pas être certifiée. Cependant, il existe des méthodes de mesure qui procurent une meilleure répétabilité en réduisant ou en éliminant l'impact du facteur humain sur la manière d'évaluation du recouvrement.

Peenscan®

Une de ces méthodes consiste à appliquer un substrat/feutre fluorescent, visible sous certaines longueurs d'onde, sur la pièce à grenailler et avant grenaillage. Chaque impact, au-delà d'une certaine intensité, enlève le substrat de la surface de la pièce. Ainsi, après grenaillage, il devient plus facile de différencier les zones grenaillées de celles non impactées. À noter tout de même que l'évaluation du recouvrement se base toujours sur l'opérateur qui compare la surface grenaillée à celles d'échantillons de référence.

CoverageChecker®

Un autre dispositif industriel plus récent, CoverageChecker®, s'affranchit du biais dû à l'observateur en utilisant une caméra numérique et un logiciel de post-traitement qui permet l'évaluation du recouvrement. Ce dispositif ne requiert pas de dépôt de substrat à la surface de la pièce, mais une prise de photo de la surface d'intérêt avant grenaillage. De plus, un étalonnage doit être fait par l'opérateur pour chaque nouveau matériau traité. Or pour ce faire, l'opérateur doit disposer d'échantillons grenaillés à différents recouvrements, et renseigner lui-même des niveaux correspondants.



Figure IV- 1 : Illustration du CoverageChecker® ²⁴.

Ces deux méthodes fonctionnent relativement bien pour des matériaux de faible et moyenne dureté, mais atteignent rapidement leurs limites pour des matériaux très durs comme

²⁴ Toyo Seiko, < <http://www.toyoseiko.co.jp/english/product/product08.html> >, visité 10/01/2014

les alliages de titane utilisés dans l'aéronautique. Cependant, il aurait été intéressant de pouvoir accéder à une mesure, et non pas une évaluation, du recouvrement moyen de la pièce, ainsi qu'une cartographie plus détaillée du recouvrement.

1.1.2. Technique d'évaluation proposée

Dans ce but, une **Méthode d'Évaluation du Recouvrement (MER)** a été développée et s'inspire des deux dernières méthodes présentées ci-dessus. Elle permet de calculer le recouvrement moyen et de réaliser une cartographie détaillée de la surface traitée. L'approche proposée consiste à recouvrir la surface de l'échantillon, avant traitement, d'un substrat coloré visible à l'œil nu. Il s'agira dans le cas présent d'un marqueur de couleur bleu pour tableau blanc. À chaque impact de bille, le substrat est éliminé de la zone de contact, faisant ressortir la géométrie de l'indentation. Une fois le traitement terminé, une image sera prise de la surface à étudier puis analysée afin de déterminer le recouvrement. Pour ce faire, un traitement d'image permet de séparer les zones impactées et la surface à étudier du reste de l'image. La qualité de l'image et un bon niveau de contraste entre le substrat déposé et le métal traité conditionne la précision de la mesure. Une fois cette opération réalisée, notre algorithme calcule le recouvrement de la pièce en se basant sur l'image traitée. Cette méthode est appliquée à une éprouvette en Aluminium et produit des résultats prometteurs, comme le montre la *Figure IV- 2*.

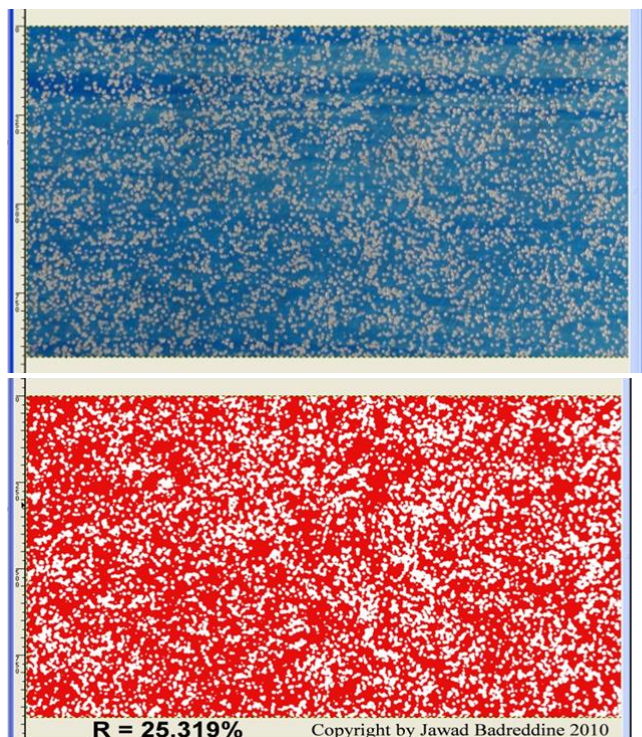


Photo de la zone à étudier :

- Extraire la zone d'intérêt

Traitement d'image :

- Isoler la totalité des zones non-impactées (en bleu dans la photo)
- Appliquer à ces zones une couleur unique (ci-contre en rouge)
- Lancer l'algorithme de calcul du recouvrement moyen R

→ Ici R = 25,319%

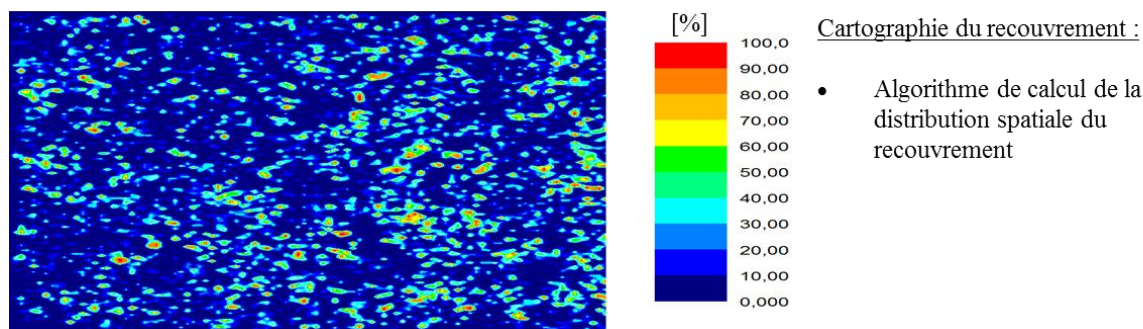


Figure IV- 2 : Méthode de calcul du recouvrement appliquée à une plaque en Aluminium.

1.2. Trajectoires de billes

1.2.1. Techniques d'évaluation existantes

Dans le cadre des travaux de thèse, les trajectoires de billes se limiteront uniquement aux positions et aux vitesses des billes. Différentes approches et dispositifs existant permettent d'accéder, soit à l'une des deux grandeurs d'intérêt, soit aux deux. En ce qui concerne les trajectoires et les vitesses des projectiles, il existe plusieurs méthodes qui permettent de mesurer la vitesse de projectiles. Celles qui sont présentées par la suite ne correspondent pas à une liste exhaustive de l'ensemble des moyens de mesures existants.

Mesures sonores

Une de ces méthodes, développée par Hribernik et Bombek [102], s'applique au grenaillage conventionnel et se sert du déphasage entre les signaux de deux ou plusieurs microphones, décalés les uns des autres, pour calculer la vitesse de projection de la grenaille. Ces signaux sont produits par les impacts de billes sur les différents microphones (*Figure IV-3*). Cette approche applicable au grenaillage conventionnel, du fait que les trajectoires de billes sont généralement connues, n'est pas applicable au GUS où les trajectoires des billes sont aléatoires et le fruit de nombreuses collisions.

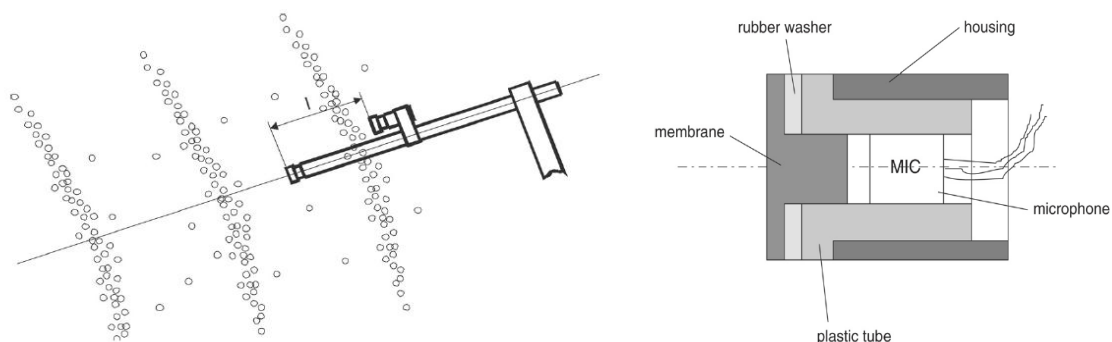


Figure IV- 3 : Disposition des microphones dans le flux de la grenaille [102].

Mesures optiques

Il existe également des moyens de mesures optiques des vitesses de billes, comme « ISIC 2 », développée par Könitzer et Polanetzki [103] et illustré dans la *Figure IV- 4*. L'approche, appliquée au grenaillage conventionnel, repose sur l'utilisation de faisceaux lasers émis perpendiculairement vers le flux de grenaille. Connaissant les propriétés du flux, la mesure de la fréquence d'interruption du faisceau entre l'émetteur et le récepteur, permet de remonter à la vitesse de projection moyenne des grenailles. Ce dispositif est utilisé avec succès par MTU Aero Engines pour le contrôle continu du procédé. Cependant, de par la nature des trajectoires de billes, ce type d'approche est difficilement transposable au grenaillage ultrason.

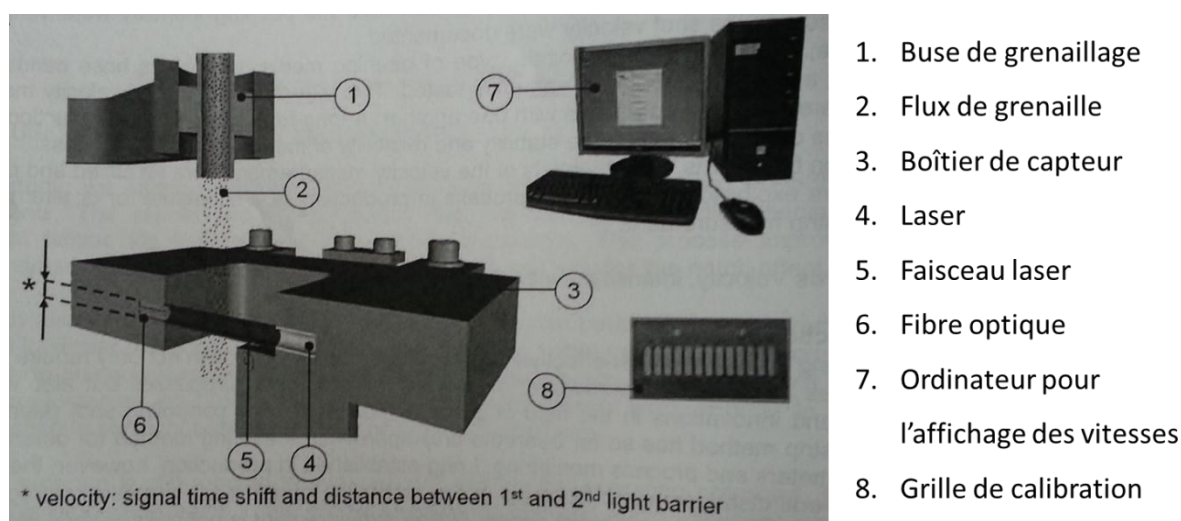


Figure IV- 4 : Illustration du dispositif « ISIC 2 », développé par MTU Aero Engines [103].

Dans le but d'étudier l'effet de la rugosité d'une paroi sur la trajectoire d'une particule qui l'impacterait, Sommerfeld et Huber [104] proposent une méthode utilisant un laser pulsé, à effet stroboscopique, qui permet d'observer la trajectoire d'une bille suivant la composante longitudinale de la zone d'observation, comme illustré dans la *Figure IV- 5*. Même si cette approche ne peut être appliquée directement au grenaillage ultrason, l'utilisation d'une enceinte transparente et d'une source de lumière stroboscopique, par exemple, pourrait permettre la visualisation des trajectoires des billes lors d'une opération de GUS.

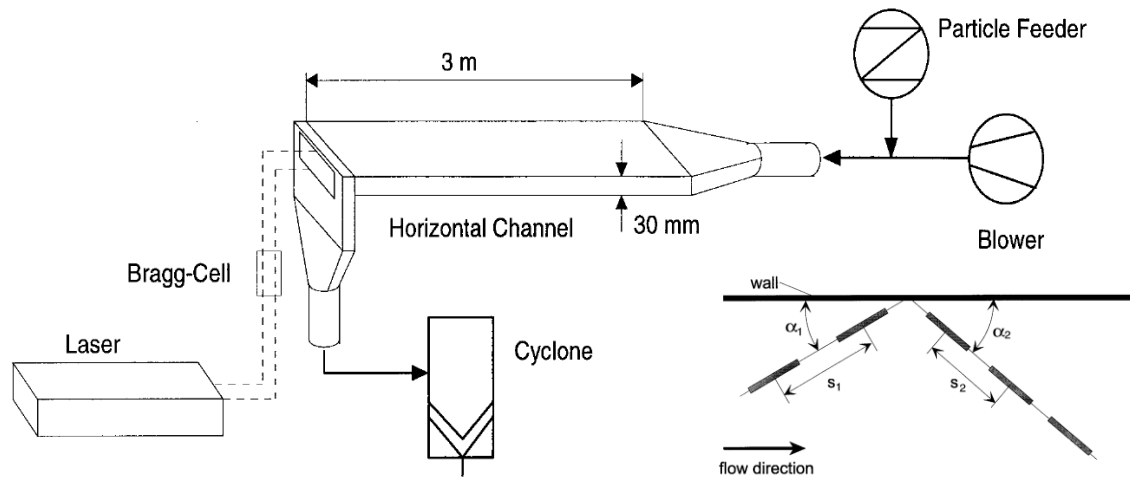


Figure IV- 5 : Schéma du montage expérimental et de la visualisation des trajectoires de particules (billes en verre) [104].

Mesures par capteurs piézoélectriques

Lors de ces travaux de thèse, Hervé Chardin [105] a utilisé un capteur piézoélectrique pour mesurer les vitesses d'impact de billes, lors d'une opération de GUS, et a réussi à en déduire des distributions de vitesses normales d'impact. Les résultats qu'il a obtenu seront comparés, dans la section suivante, à ceux obtenus par le modèle analytique, et cela pour les mêmes paramètres. L'inconvénient majeur de cette approche est son côté destructif vis-à-vis de la paroi à étudier. Pour être opérationnel, ce type de capteur doit être encastré sur/dans la pièce, comme le montre la Figure IV- 6. De plus, les informations recueillies par le capteur ne concernent malheureusement que sa zone active, qui représente une très faible surface comparée à celle de la surface étudiée.

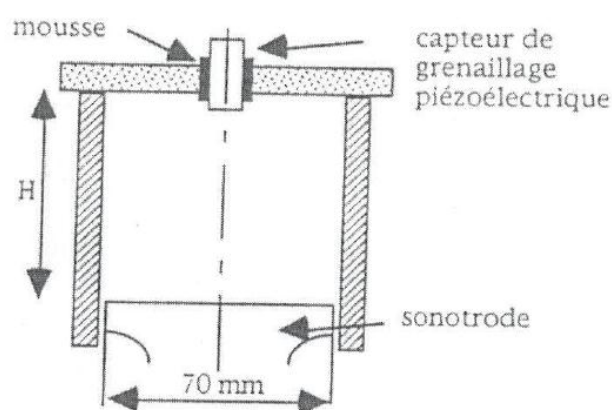


Figure IV- 6 : Eléments du montage et position du capteur de grenailage piézoélectrique [105].

1.2.2. Technique expérimentale proposée

La méthode développée se base sur des mesures optiques. Elle utilise deux appareils photos, ainsi qu'un stroboscope afin de capturer les trajectoires de billes dans une enceinte transparente (*Figure IV- 7*). Les appareils photos sont positionnés de manière orthogonale, l'un par rapport à l'autre, et peuvent être actionnés simultanément. Le but est d'obtenir une projection en deux dimensions (2D) des trajectoires sur deux plans orthogonaux (X,Z) et (Y,Z), comme illustré par la *Figure IV- 7*. L'utilisation d'un stroboscope, à fréquence d'éclairage variable, permet d'obtenir plusieurs positions prises par les billes au cours de leur déplacement, sur un même cliché. Le nombre de positions successives des billes dépend du temps d'obturation (durée de prise de photo) et de la fréquence du stroboscope. En fonction des vitesses de billes, cette fréquence peut être modifiée afin d'augmenter ou de réduire le nombre de positions observées par bille. Le temps dt , qui sépare deux positions successives $\vec{U}_1$ et $\vec{U}_2$ d'une même bille, dépend directement de la fréquence d'éclairage du stroboscope F_s (en flashes par minute), comme exprimé ci-dessous :

$$dt = \frac{60}{F_s} [s] \quad (\text{IV- 1})$$

Ensuite, il suffit de mesurer sur les clichés obtenus la distance qui sépare deux positions successives afin de remonter aux vitesses de billes dans l'enceinte, mais également aux vitesses d'impact et de rebond, le cas échéant (voir la *Figure IV- 8*).

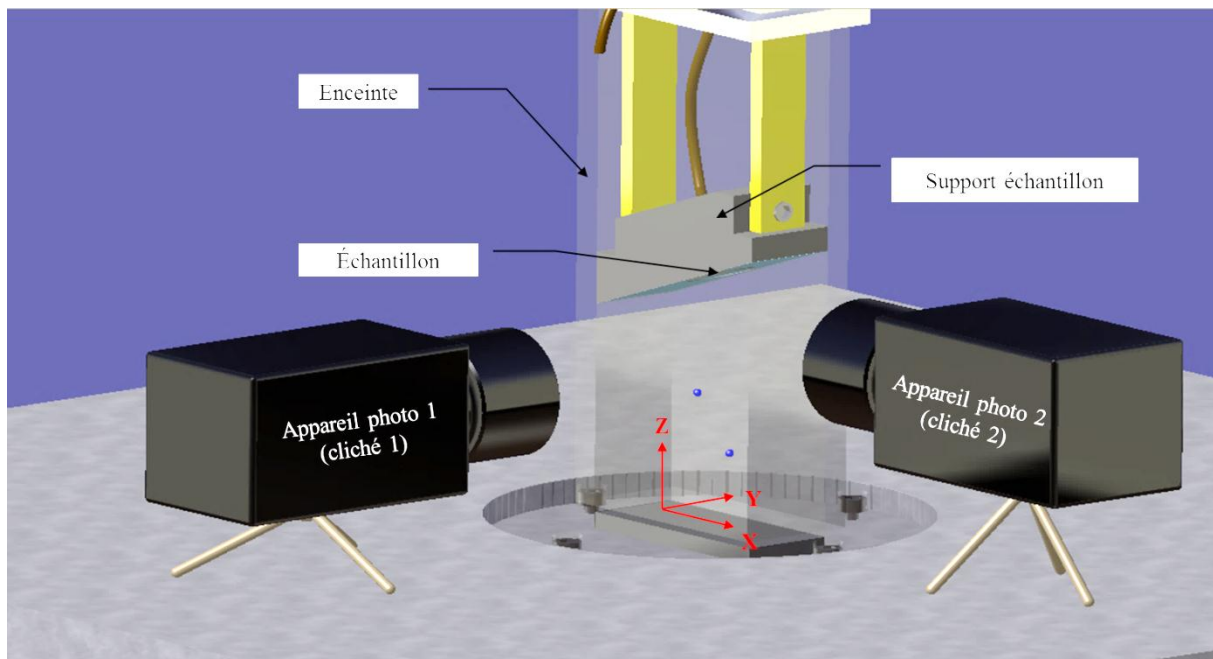


Figure IV- 7 : Positionnement des appareils photos et définition du repère global (X,Y,Z).

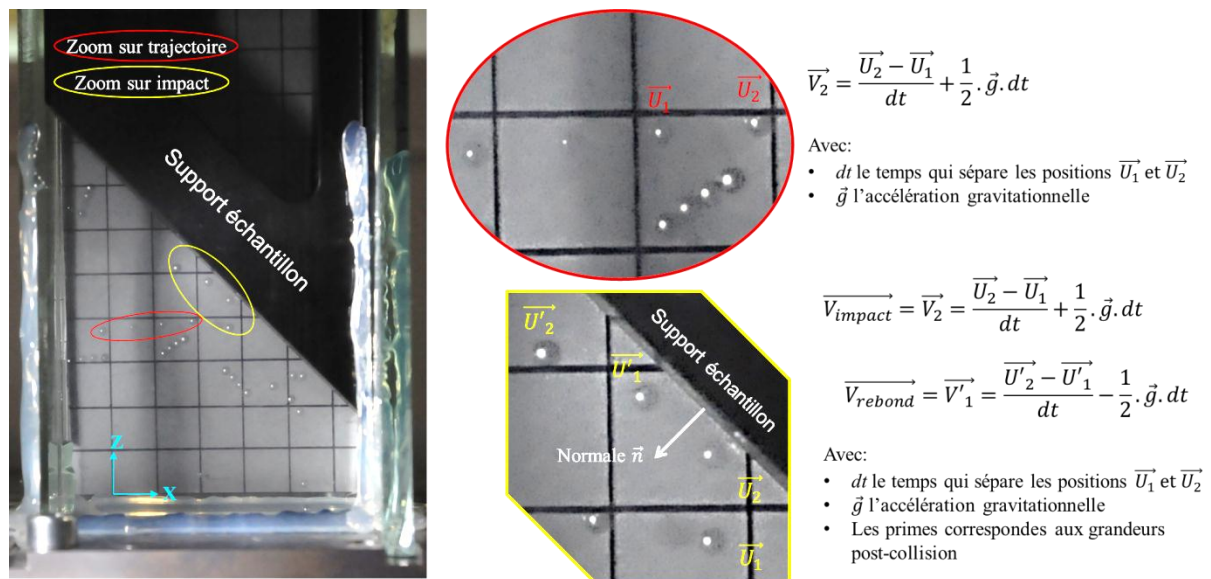


Figure IV- 8 : Calcul de la vitesse instantanée d'une bille dans l'enceinte (cadre rouge) et des vitesses d'impact et de rebond (cadre jaune). Sur ce cliché, chaque trajectoire est constituée de 4 positions successives.

En parallèle, afin de faciliter l'analyse des clichés obtenus, pour une qualité de mesure constante d'une image à l'autre, un algorithme d'analyse a été créé. Cet algorithme permet d'extraire les zones d'intérêt de chaque cliché et de les combiner en une seule image, comme illustré dans la Figure IV- 9. Ensuite, après définition de l'échelle, il est possible de relever les positions 3D des billes (Figure IV- 10). Une fois l'ensemble des positions extraites, et connaissant le temps séparant deux positions successives, il devient possible d'en déduire les vitesses dans l'enceinte, mais également lors de collisions.

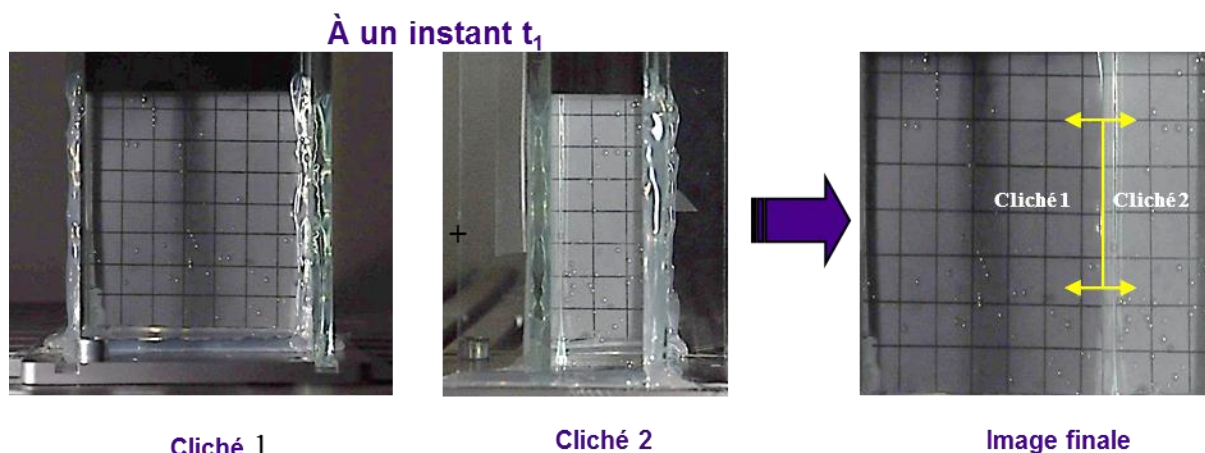


Figure IV- 9 : Illustration des étapes d'extraction des zones d'études et de combinaison des clichés.

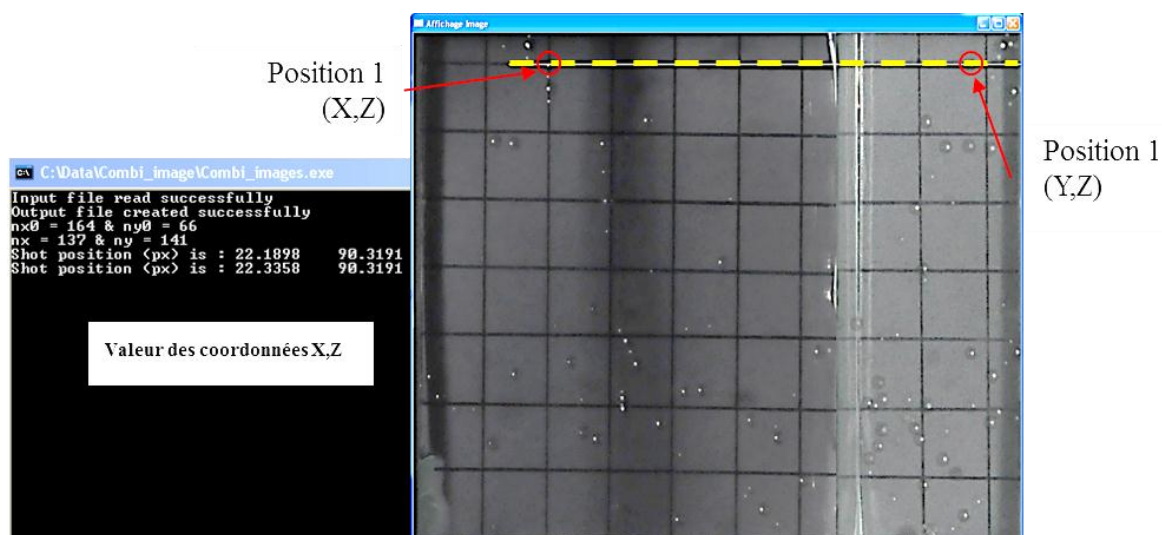


Figure IV- 10 : Illustration de l'étape d'extraction des positions de billes.

2. Études de faisabilité des méthodes expérimentales proposées

Dans la présente section, les deux approches expérimentales proposées sont testées. Pour ce faire, une enceinte de grenailage, faite en verre, est utilisée. Sa section interne est rectangulaire, de longueur L et de largeur B égales respectivement à 67 mm et 26 mm. Un support échantillon, en polyoxyméthylène (POM), vient se glisser par le dessus de l'enceinte (Figure IV- 11). Sa hauteur, par rapport à la sonotrode, est réglable à l'aide de deux tiges filetées. Trois supports ont été conçus afin de pouvoir étudier 3 inclinaisons α de la surface à traiter ; α pouvant prendre les valeurs suivantes 0° , 20° et 45° . La surface inférieure des supports, en contact avec les billes, contient un trou de 19 mm de diamètre, centré sur la surface considérée et qui peut accueillir des échantillons cylindriques. Dans notre cas, ces derniers sont en Aluminium série 2000 ; avec un module de Young 72.5 GPa, une limite d'élasticité de 145 MPa et une densité de 2810 kg/m^3 . Le dispositif expérimental de capture des trajectoires de billes, présenté dans la section IV.1.2.2, est illustré dans la Figure IV- 12.

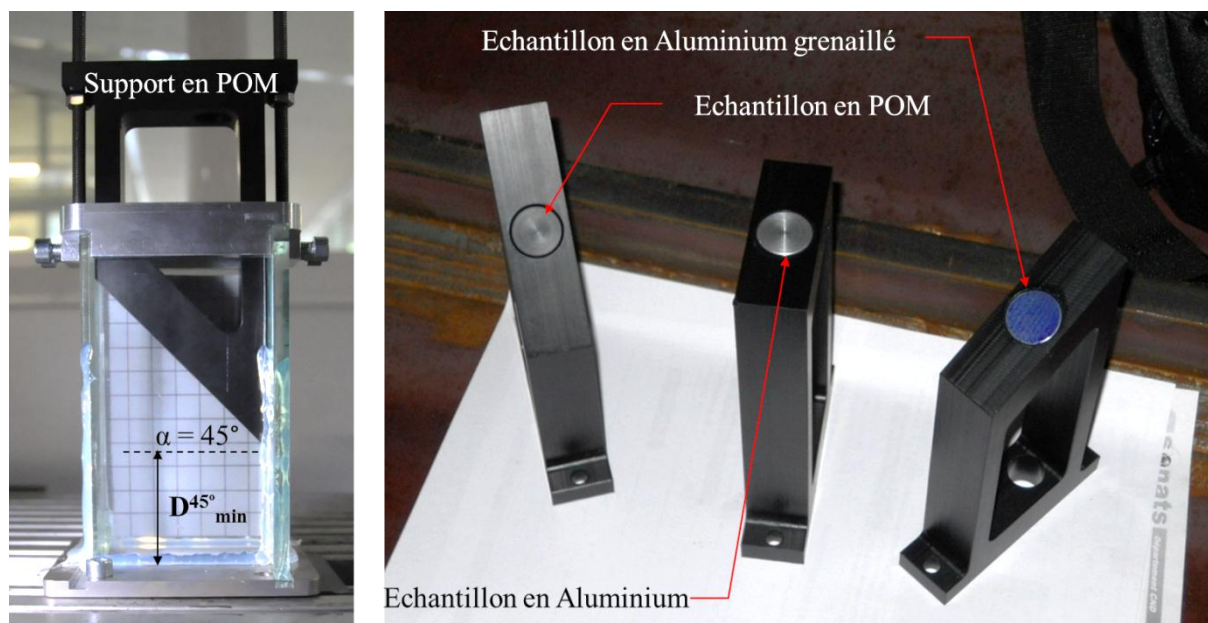


Figure IV- 11 : Vu d'ensemble de l'enceinte de grenailage et des supports échantillon : a) montage avec le support à 45° , b) les trois portes échantillon 45° , 0° , 20° (dans l'ordre) contenant respectivement un échantillon en POM, en aluminium avant traitement et en aluminium grenailé (MER).



Figure IV- 12 : Dispositif expérimental utilisé pour la réalisation des essais de validation.

2.1. Essais réalisés et résultats obtenus

Tous les essais ont été réalisés avec des billes en acier 100Cr6, de diamètre 2mm. La Table IV- 1 contient la liste des essais et leurs paramètres procédé respectifs. Les trois premiers essais sont réalisés à volume d'enceinte constante V_E (cf. équation IV-2), avec $V_E = 110\,617\text{ mm}^3$. Sa valeur est calculée pour une inclinaison de 45° et une distance D_{min}^a de 30 mm, entre le support et la sonotrode pour une enceinte prismatique (Figure IV- 11). Ces essais servent par la suite à mesurer le recouvrement des échantillons en aluminium, pour trois inclinaisons

différentes. Dans le quatrième essai, les vitesses de billes sont mesurées afin de remonter à une distribution de vitesses normales d'impacts, au niveau du support échantillon.

$$V_E = V_E(45^\circ) = L.B. \left(D_{min}^{45} + \frac{L}{2} \cdot \tan(45) \right) \quad (IV-2)$$

Table IV- 1 : Liste des essais réalisés et de leurs paramètres respectifs.

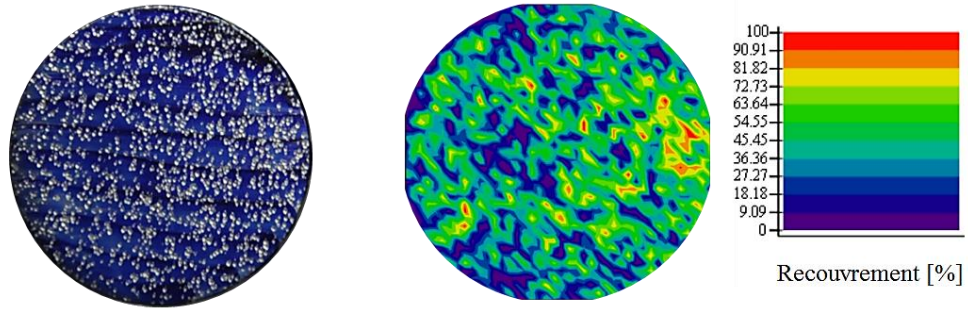
Essai n°	N	A	α	D_{min}^α	Durée du traitement	Type de mesure
1	20	25 μm	0°	63.5 mm	50 s	Recouvrement
2	20	25 μm	20°	51.3 mm	50 s	Recouvrement
3	20	25 μm	45°	30.0 mm	50 s	Recouvrement
4	20	10 μm	0°	82 mm	120 s	Vitesses d'impacts

2.2. Recouvrement expérimental

La *Figure IV- 13* présente, pour chacun des essais 1 à 3, le recouvrement expérimental moyen et local. Le recouvrement local correspond à une distribution spatiale de ce dernier. À partir des images des échantillons grenailés, un algorithme dédié subdivise la surface d'intérêt en cellules carrées. Les cartographies de la *Figure IV- 13* ont été obtenues avec une taille de cellule de $0.7 \times 0.7 \text{ mm}^2$. Ensuite, dans chacune de ces cellules, un recouvrement moyen est calculé. D'après les études numériques du Chapitre II.4.2, une augmentation de l'inclinaison de l'échantillon devrait réduire le nombre d'impacts, à l'emplacement des échantillons ; conduisant ainsi à une diminution du recouvrement. Il en est de même pour les densités d'impacts ; grandeur qui influence le recouvrement. Or, c'est bien ce que montre les résultats de la *Figure IV- 13*.

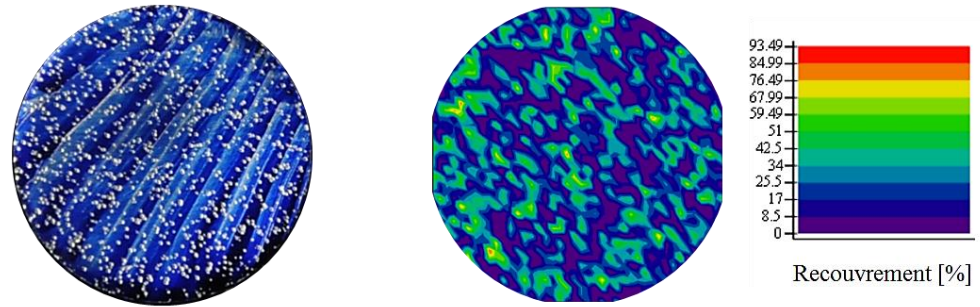
Essai 1

$$R_{exp} = 40,4 \%$$



Essai 2

$$R_{exp} = 24,6 \%$$



Essai 3

$$R_{exp} = 20,1 \%$$

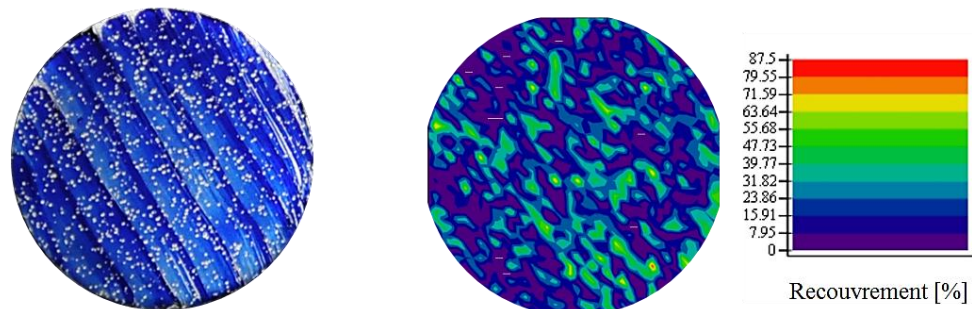


Figure IV- 13 : Recouvrement expérimental moyen (à gauche) et local (à droite), obtenus pour les essais 1 à 3, avec la MER.

2.3. Distribution des vitesses normales d'impact

Grâce à l'algorithme d'analyse des trajectoires de billes, présenté en Section IV.1.2.2, une distribution expérimentale des vitesses normales d'impact (courbe rouge) a pu être obtenue pour l'essai 4. Cette distribution est présentée dans la Figure IV- 14. Elle exhibe des caractéristiques très semblables aux distributions de vitesses numériques du Chapitre II.4.3, et plus particulièrement celle du cas n° 1 de la Figure II- 17. On y retrouve les deux pics. Le premier correspond aux faibles vitesses d'impacts, et est associé aux vitesses avoisinant 1 m/s. Quant au second, il correspond aux fortes vitesses d'impacts et est associé aux vitesses proches de 2.5 m/s.

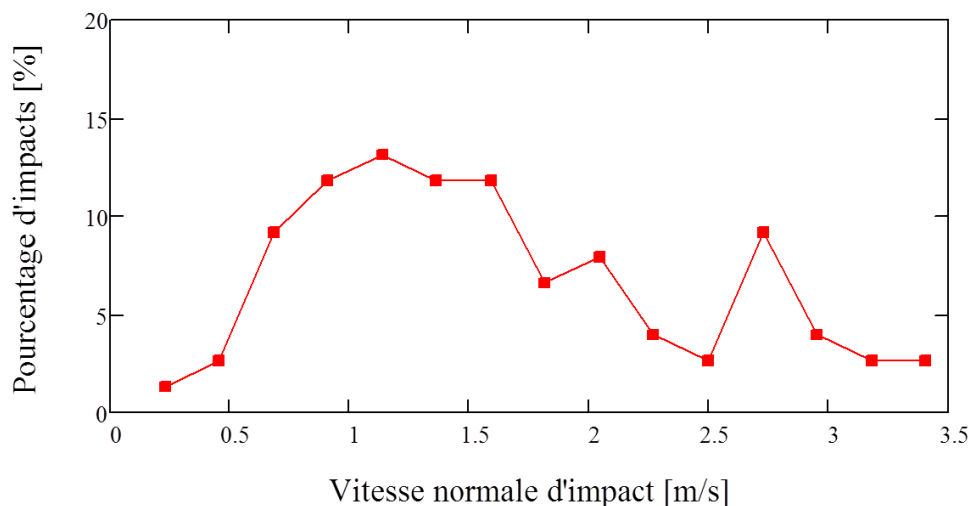


Figure IV- 14 : Distribution expérimentale des vitesses normales d'impacts, obtenue avec les paramètres de l'essai 4.

2.4. Discussions et améliorations

La Figure IV- 15 place côte à côte une même zone grenailée ; à gauche avec le feutre bleu et à droite après avoir enlevé manuellement le feutre. La différence de diamètre de cratères mesurée est comprise entre 25% et 50%. Cette estimation n'a été faite que sur 11 cratères. L'erreur commise est assez importante, et peut provenir d'une pauvre statistique mais aussi d'une imprécision dans la mesure des cratères. En effet, sans le feutre, le manque de contraste entre les zones non-impactées et le bord du cratère rend la mesure difficile. Malgré ces écarts, l'utilisation du feutre permet une bonne visualisation et caractérisation qualitative du recouvrement.

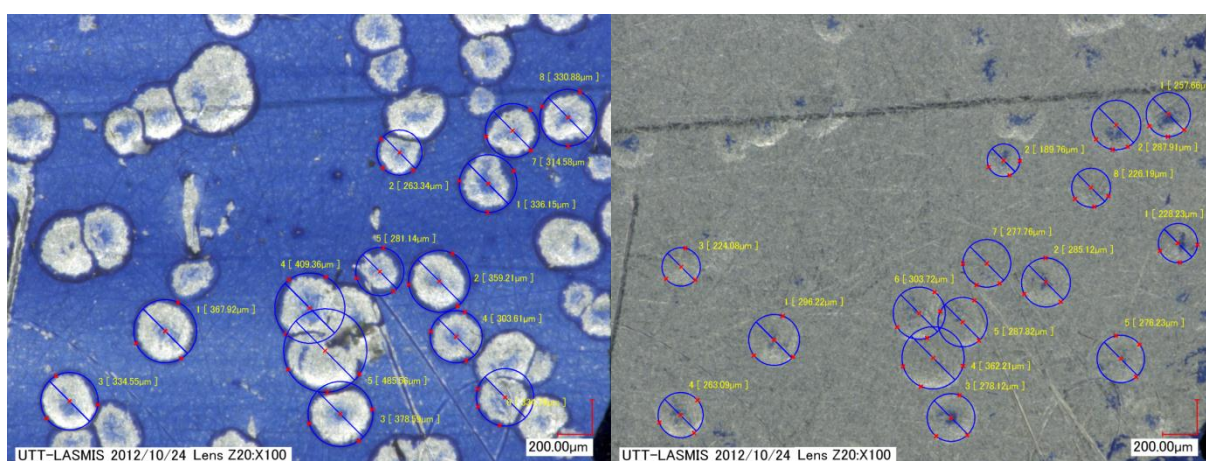


Figure IV- 15: Comparaison entre les diamètres de cratères d'impacts avec (à gauche) et sans (à droite) feutre bleu, vue au microscope numérique (grandissement $\times 100$).

3. Essais sur une roue dentée à denture droite

3.1. Détail du montage expérimental

Afin de tester le modèle développé, une opération de grenaillage ultrason sur une roue dentée à denture droite en aluminium est considérée. Un aluminium (série 2000) est choisi pour ses propriétés ductiles qui permettent de visualiser clairement les indentations laissées par les impacts de billes. La roue dentée est montée serrée sur un axe support en polyéthylène haute-densité (PEHD), puis placée dans une enceinte de traitement cylindrique, composé de deux parties, en acier trempé. Les cinq dentures inférieures de l'engrenage (numérotées de 1 à 5 sur la *Figure IV- 16*) sont peintes en bleu, pour une meilleure visibilité des indentations, et positionnées face à la sonotrode. Cette dernière, de section circulaire, est positionnée en dessous de l'enceinte. La durée totale du traitement, pendant laquelle l'engrenage demeure immobile, est fixée à 5 secondes afin d'obtenir un recouvrement inférieur à 100 %. Le montage expérimental est illustré dans la *Figure IV- 16*, ainsi que les paramètres procédés utilisés.

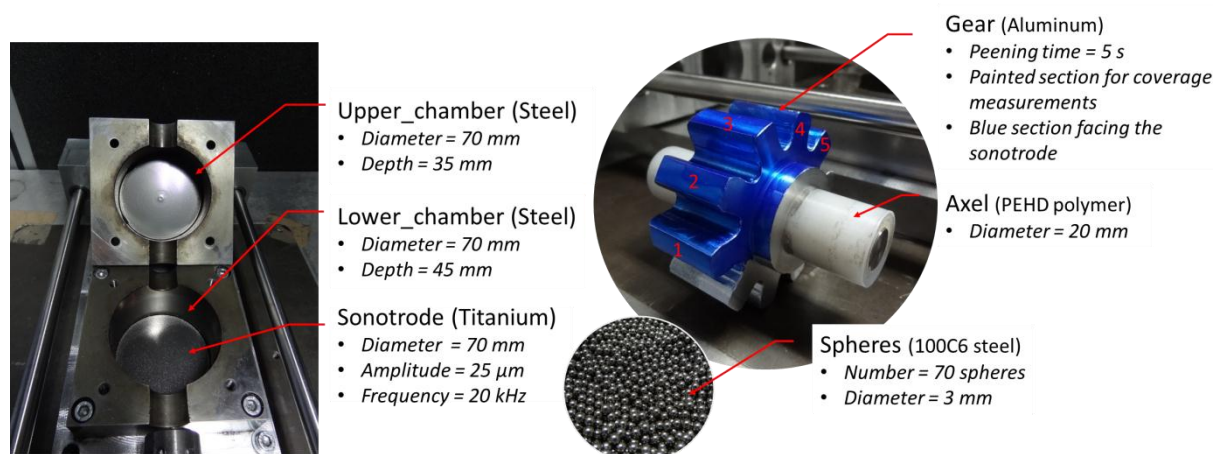


Figure IV- 16 : Vue détaillée du dispositif de GUS et des paramètres procédés. Les dents de l'engrenage peintes en bleu sont positionnées face à la sonotrode.

3.2. Détail de simulation

La *Figure IV- 17* présente la démarche à suivre afin de lancer la simulation. La première étape consiste à disposer de l'assemblage CAO complet du dispositif de GUS ; chose qui est toujours le cas d'un point de vue industriel. Lors de la seconde étape, l'extraction et le maillage des surfaces fonctionnelles sont réalisées, suivi par la définition des paramètres procédés. Dans le cas présent, l'entité « sonotrode » ne contient qu'un seul groupe. Il en revient de même pour l'entité « chamber ». Quant à l'entité « sample », elle est constituée de

deux groupes : l'engrenage d'un côté et l'axe support de l'autre. La troisième étape représente l'exécution de la simulation.

Les 5 secondes de GUS ont été simulées sur un seul cœur CPU d'un ordinateur portable, équipé d'un processeur Intel® Core™ i7, cadencé à 1.73 GHz. En 'Mode_Console' (sans visualisation 3D), la simulation nécessite au total 30 secondes de calcul. En 'Mode_3D' (avec visualisation 3D), cela nécessite au total 7.5 minutes de calcul.

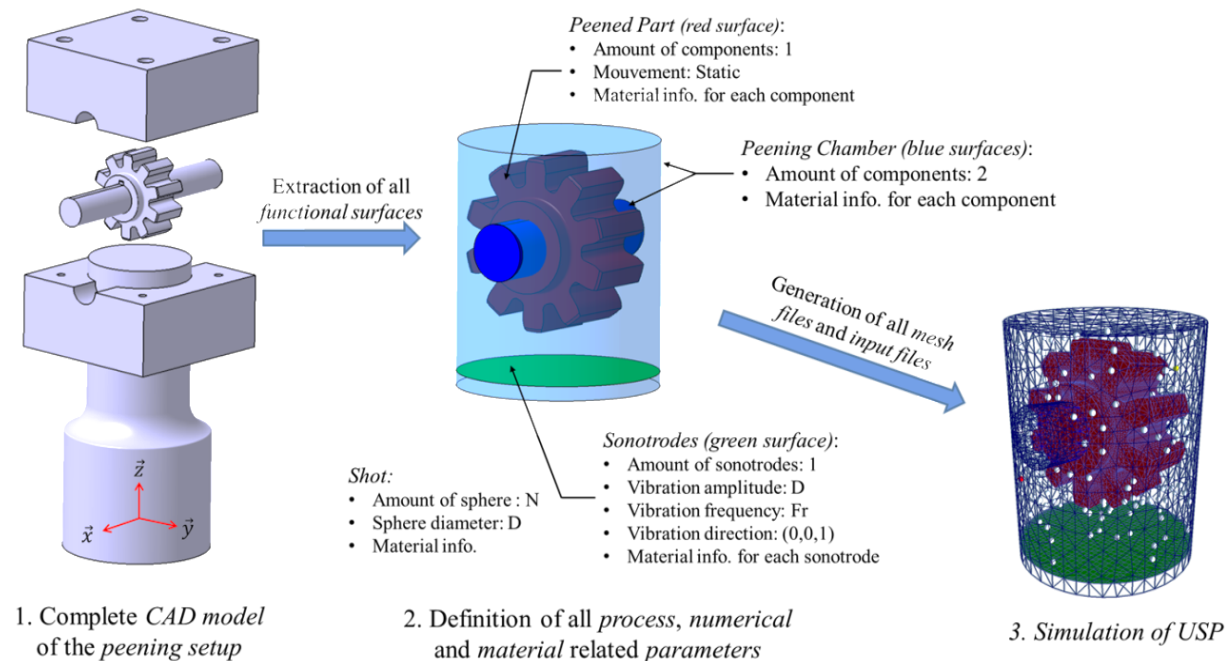


Figure IV- 17 : Démarche à suivre pour lancer une simulation de grenaillage ultrason.

3.3. Résultats obtenus

L'analyse des résultats se focalise sur le recouvrement (nombre d'indentations visibles) et les vitesses d'impacts (distribution des diamètres d'indentation), et ne concerne que les dents peintes en bleu (Figure IV- 16).

3.3.1. Étude initiale : coefficients « arbitraires »

Les coefficients de restitutions utilisés lors des simulations sont listés dans la Table III- 1. La Figure IV- 18 confronte les résultats numériques et expérimentaux. L'analyse est, à ce stade, qualitative et se base sur la répartition spatiale des impacts et des tailles de d'indentation. L'attention est ainsi portée sur les dentures peintes en bleu (Figure IV- 16). Le cadran de la Figure IV- 18 correspond à la projection de l'ensemble des impacts inélastiques (3595 au total) sur trois plans orthogonaux. Un disque est ensuite attribué à chaque impact,

dont le diamètre et la couleur dépendent de la vitesse normale d'impact. Tout autour se trouvent des photographies, numérotées de (a) à (e), correspondant à chacune des cinq dents. D'après la simulation, les impacts qui résulteraient en des cratères de grand diamètre, correspondants aux grandes vitesses normales d'impact, se situent au niveau des parois exposées à la sonotrode, i.e. (cf. Figure IV- 18) :

- Dent 1 : T_{1-L}
- Dent 2 : T_2 et T_{2-L}
- Dent 3 : T_3
- Dent 4 : T_{4-R} et T_4
- Dent 5 : T_{5-R}
- Entre les dents 2-3 et 3-4

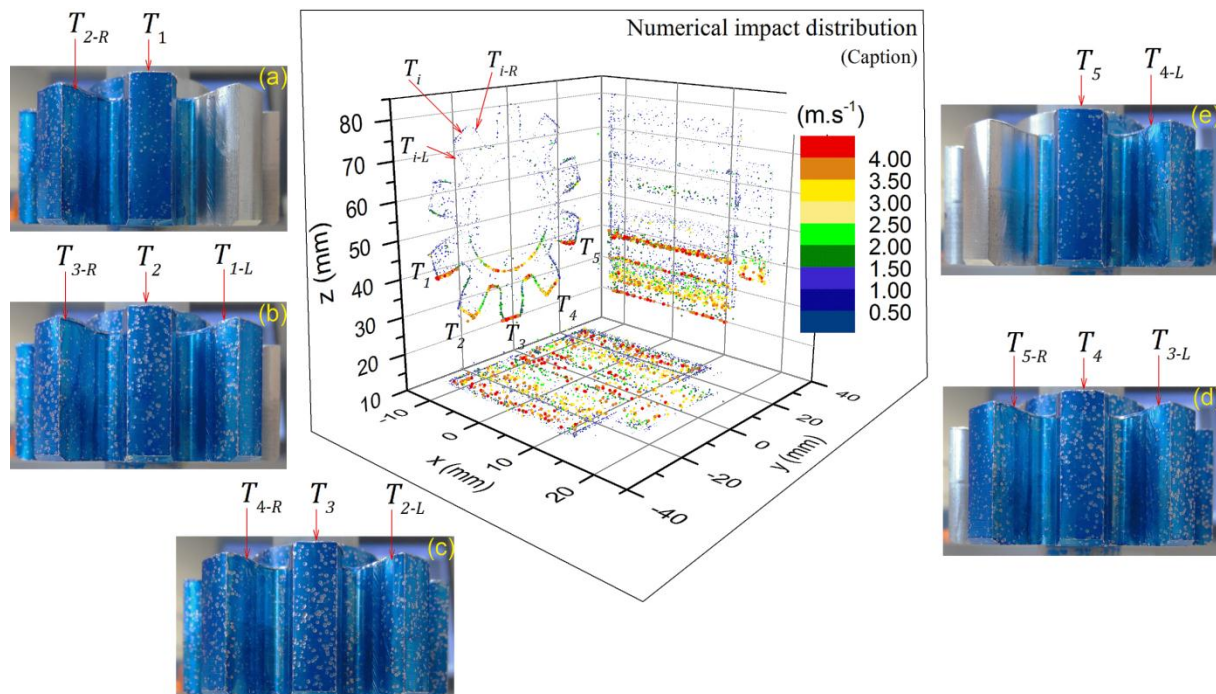


Figure IV- 18 : Comparaison entre les distributions d'impacts numériques (cadrant) et expérimentaux, obtenus après 5 secondes de GUS. La taille et la couleur des impacts numériques est proportionnelle aux vitesses normales d'impact.

Si les prédictions du modèle sont correctes, les faces correspondantes sur l'engrenage réel devraient être marquées par des indentations de grande taille (diamètre). Et ceci est bien observé expérimentalement. Pour une comparaison quantitative, le nombre d'indentations visibles sur les trois premières dents (T_1 , T_2 et T_3) est analysé. Les résultats sont confrontés aux prédictions du modèle et présentés dans la Figure IV- 19. Les résultats numériques obtenus présentaient des écarts importants entre les données expérimentales et numériques. En effet, l'erreur commise sur la prédiction du nombre d'impacts augmente, en partant de la dent T_1 vers la dent T_3 . En effet, l'erreur commise passe de -4.1 % au niveau de la dent T_1 , ce

qui est acceptable, à -59.8 % au niveau de la dent T_3 . Cette forte variation dans l'erreur commise indique que la prédiction du modèle n'est pas très fiable. La différence peut provenir du choix des coefficients de restitution qui ne représentent que partiellement les matériaux utilisés.

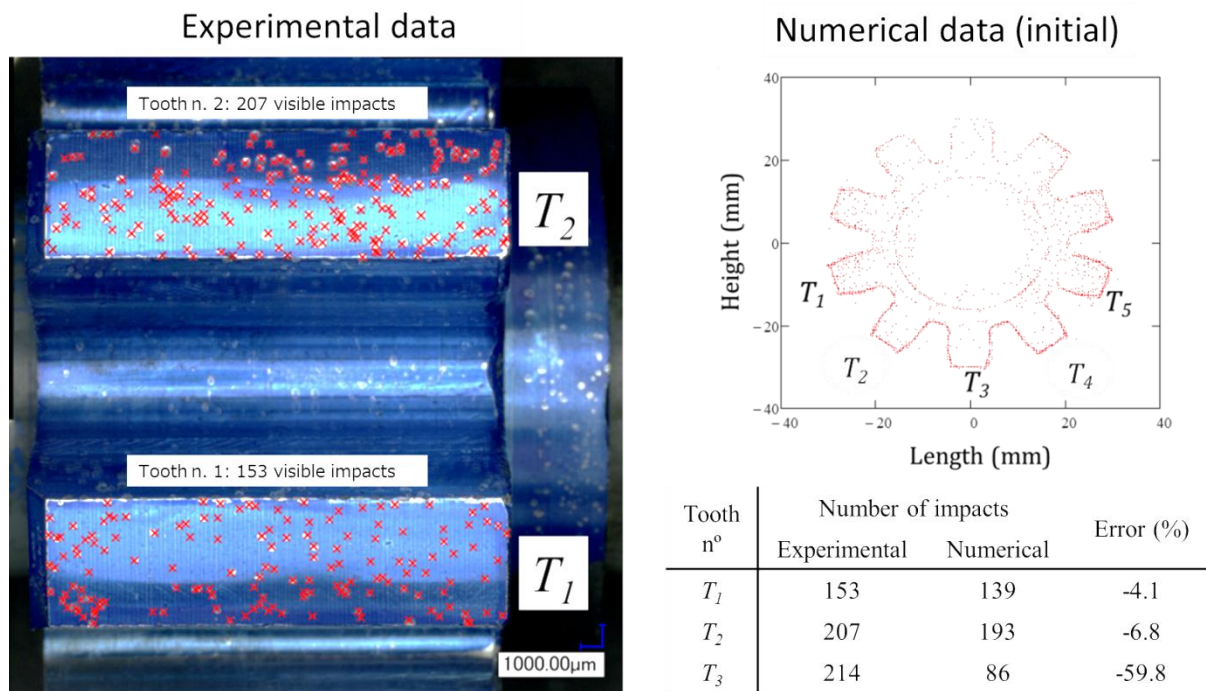


Figure IV- 19 : Comparaison entre les distributions d'impacts numériques et expérimentaux, après 5 secondes de GUS.

3.3.2. Étude corrigée : coefficients expérimentaux

Au vu des écarts obtenus entre l'expérience et la simulation précédente (initiale), présentée section IV.3.3.1, une seconde simulation est réalisée avec cette fois-ci des coefficients issus de mesures expérimentales, réalisées au sein de SONATS. La Figure IV- 20 présente la projection de l'ensemble des impacts inélastiques (7450 au total) sur trois plans orthogonaux. Même si la distribution obtenue est qualitativement similaire à celle présentée en section IV.3.3.1 (Figure IV- 18), d'importants écarts apparaissent (un facteur 2 environ) au niveau du nombre total d'impact simulé et des niveaux de vitesses normales d'impact. Lorsque le nombre d'impacts inélastique (étude corrigée) est comparé aux mesures expérimentales (Table IV- 2), l'erreur commise par le modèle est inférieure à 5 %, pour les trois dentures analysées.

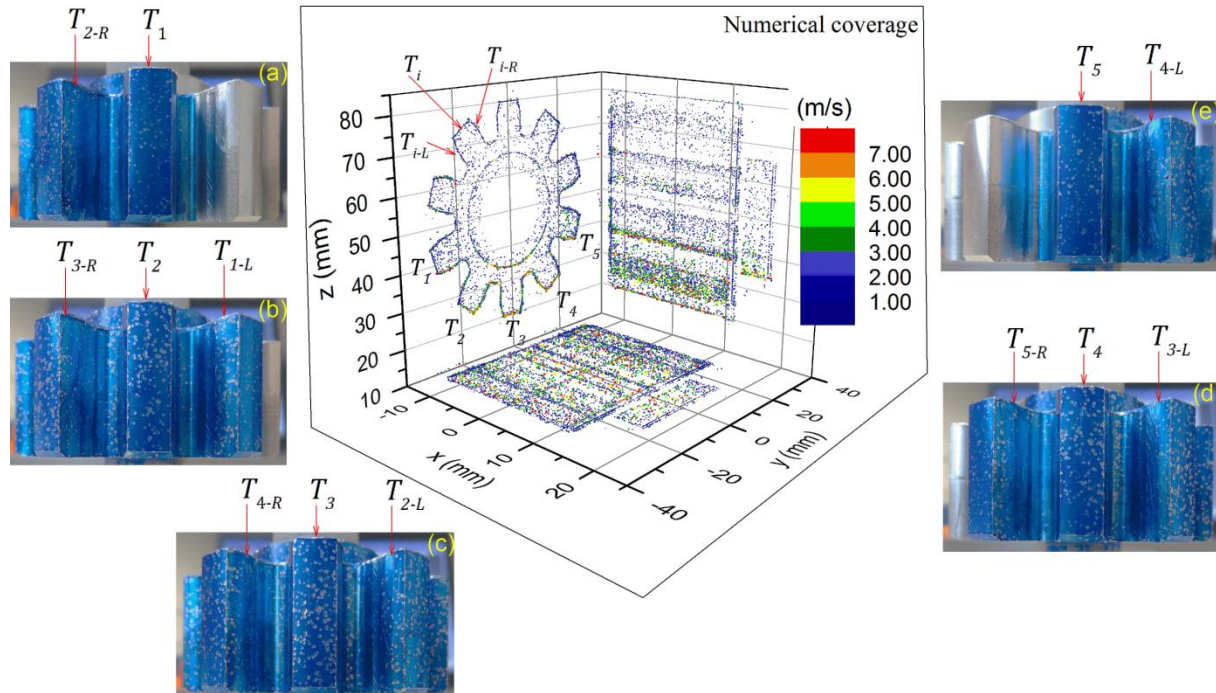


Figure IV- 20 : Comparaison entre les distributions d'impacts numériques (cadrant) et expérimentaux, obtenus après 5 secondes de GUS. La taille et la couleur des impacts numériques est proportionnelle aux vitesses normales d'impact.

Table IV- 2 : Comparaison entre le nombre d'indentations mesuré expérimentalement et simulé, pour les dents 1, 2 et 3.

Dent	Nombre d'indentations		Erreur (%)
	Expérimental	Numérique (Corrigé)	
T_1	153	146	-4.5
T_2	207	199	-3.9
T_3	214	207	-3.3

Il est clair, à ce stade de l'étude, qu'un meilleur choix des coefficients de restitution améliore fortement la prédictibilité du modèle. Les données expérimentales donnent accès, non seulement au nombre d'impacts visibles, mais également à leur diamètre. Il est ainsi possible de déduire, pour chaque dent, une distribution de diamètre de cratère. En parallèle, le modèle donne accès à l'ensemble des vitesses d'impact, ayant eu lieu sur l'engrenage. Or, il est possible de lier le diamètre de cratère à la vitesse normale d'impact. Dans l'idéal, cette relation provient de mesures expérimentales, plus représentatives de la réalité. Dans le cas présent, de telles données ne sont malheureusement pas disponibles. Ceci pousse à s'orienter vers des modèles phénoménologiques, comme celui proposé par Johnson (1984) [106] et exprimé dans l'équation 10. Ce modèle s'applique à des indentations élastoplastiques à faibles vitesses (inférieure à 100 m/s) entre une sphère et un massif semi infini. Les matériaux de la

sphère et de la cible sont considérés comme isotropes et vierges de toute contrainte résiduelle initiale.

$$\phi_{num} = D \cdot \left(\frac{8 \cdot \rho \cdot V^2}{9 \cdot \sigma_y} \right)^{1/4} \quad (IV- 3)$$

Où ϕ_{num} est le diamètre de cratère prédit ; D est le diamètre de la bille, ρ sa densité et V sa vitesse normale d'impact ; σ_y correspond à la limite élastique du matériau impacté. L'aluminium utilisé possède une limite d'élasticité de 145 MPa et la densité de la bille est de 7850 kg/m³.

À l'aide du modèle de Johnson, il devient possible de comparer les distributions numériques (initiale et corrigée) aux distributions expérimentales de diamètres de cratères, au niveau de chaque dent étudiée. Les résultats sont présentés dans la *Figure IV- 21*, le graphique supérieurs correspondent à la dent n° 1, celui du milieu à la dent n° 2 et celui du bas à la dent n° 3. Expérimentalement, les distributions montrent un pic principal qui se déplace vers la droite (grands diamètres), en partant de la dent n° 1 à 3. Cela traduit le fait que les vitesses d'impacts normales sont les plus importantes au niveau de la dent n° 3, du fait de la proximité et l'orientation de cette dernière. D'un point de vue numérique, il apparait clairement que les distributions issues de l'étude initiale ne correspondent absolument pas à la réalité. En effet, ni les tendances, ni les plages de diamètres de cratères (et donc les vitesses prédites) ne correspondent aux observations expérimentales. En revanche, l'utilisation de coefficients de restitutions adéquats (étude corrigée) permet de remonter à des distributions qui se rapprochent très fortement de l'expérimental. Les prédictions reflètent fidèlement les tendances, ainsi que les plages de diamètre. Quelques légers écarts subsistent et peuvent probablement être dus à un nombre insuffisant d'indentations mesurées. Cependant, il n'en demeure pas moins que le modèle est capable de prédictions consistantes et représentatives de la réalité, à condition d'utiliser les bons coefficients de restitution. De plus, les faibles temps de calcul, associés aux simulations, présentent un fort atout dans le cadre d'une utilisation industrielle quotidienne et intensive.

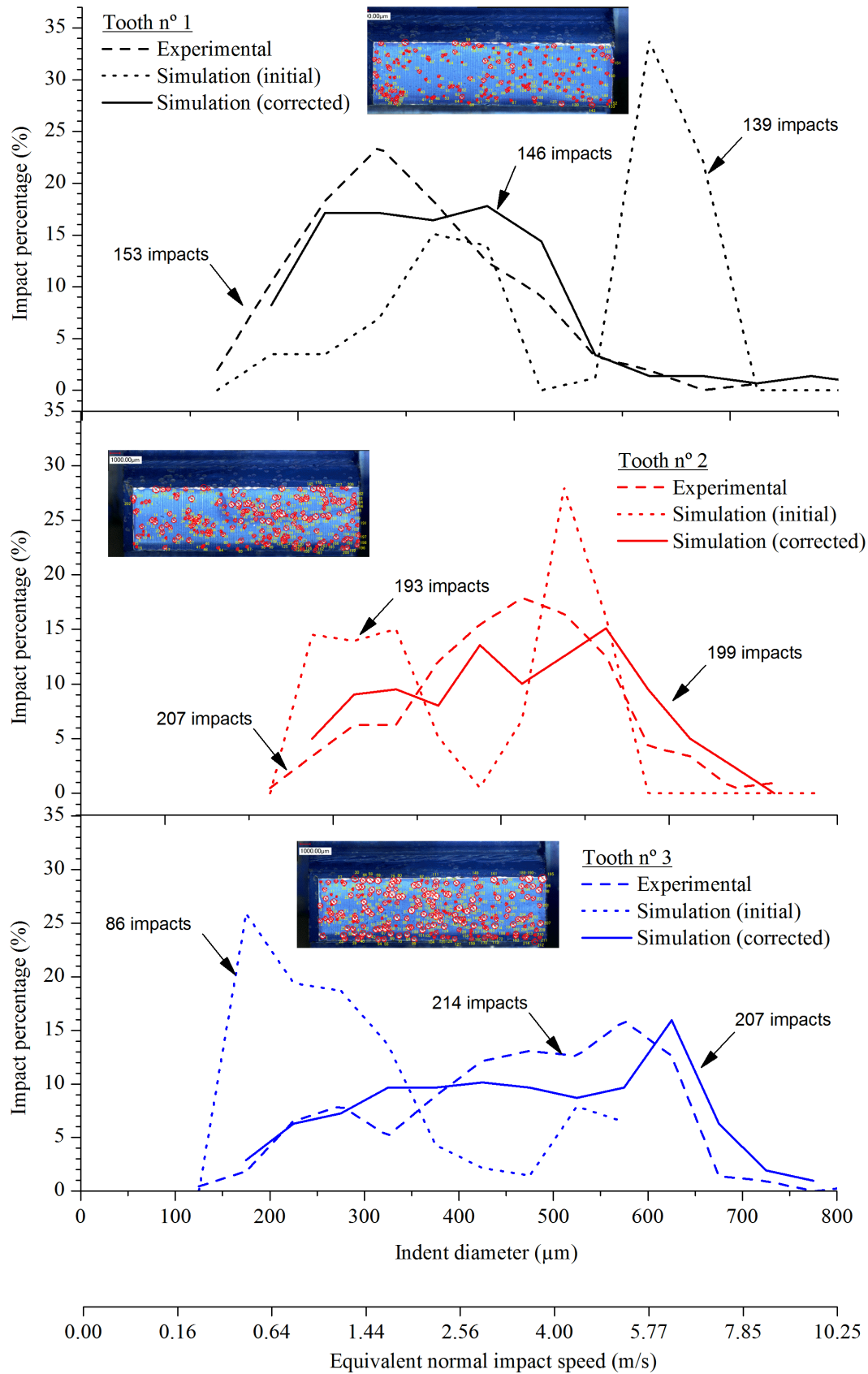


Figure IV- 21 : Comparaison entre les distributions de diamètres de cratères expérimentale (- - -), simulation initiale (. . .) et simulation corrigée (-----), pour les dents 1, 2 et 3. Chaque flèche indique le nombre d'impacts correspondant à chaque distribution.

Conclusions générales et perspectives

1. Conclusions d'ordre numérique

1.1. Modèle analytique pour géométries simples

Un modèle analytique 3D, issu des travaux de Micoulaut *et al.* [6], est présenté. Il permet de simuler la dynamique des billes dans le cas d'une enceinte prismatique. Une étude numérique, utilisant un modèle de sphères dures reproduisant un gaz granulaire, a permis de montrer que les résultats fournis par le modèle sont indépendants des conditions initiales. Cette même étude a également permis de mettre en évidence l'existence d'une phase transitoire et stationnaire de la dynamique des billes. Malgré les atouts du modèle, certaines limitations identifiées dans le chapitre I.3.2 subsistent. Il s'agit en particulier de la difficulté à intégrer des géométries plus complexes, semblables à celles rencontrées dans l'industrie (roue dentée, compresseur, alésages, etc.). Des études de sensibilité sur l'influence des coefficients de restitution normaux, quant à elles, identifient le rôle que joue chacun de ces coefficients sur la dynamique des billes ; et cela en fonction de la nature des collisions considérées.

À ceci, s'ajoutent des études paramétriques de paramètres procédé. À travers l'étude de la densité d'impacts, il apparaît que des angles obtus au sein d'une géométrie peuvent conduire à d'importantes hétérogénéités, par rapport à des zones plus éloignées. Les angles obtus influencent également la distribution des billes dans l'enceinte en piégeant certaines. Ceci pousse à l'émergence d'une masse « inutile » de billes qui ne participe plus activement au traitement de la pièce. Cependant, les zones de la pièce, éloignées de l'enceinte reçoivent un traitement relativement homogène. L'analyse des vitesses et des angles d'impacts montre une forte corrélation entre ces deux grandeurs. En effet, il apparaît que les impacts les plus énergétiques, au niveau de la pièce, correspondent exclusivement à des impacts normaux.

1.2. Modèle pour géométries complexes

Un modèle 3D de la dynamique des billes, dans le cadre du grenailage ultrason, a ensuite été présenté. Ses principales spécificités résident dans sa capacité à modéliser le procédé pour la plupart des configurations industrielles. En d'autres termes, le modèle supporte n'importe quelle géométrie d'enceinte, de pièce et de sonotrode, à condition de disposer de leur maillage, tiré de la CAO. Il est également possible de mettre en rotation la pièce pendant le

traitement et de définir autant de matériaux et sonotrodes que souhaité, afin de représenter au mieux les conditions réelles de traitement.

De plus, des études de performances numériques, en matière de temps de calcul, permettent d'attester des bonnes performances du modèle développé. En effet, les temps de calcul sont raisonnables et bien inférieurs à ceux correspondant à des simulations par la méthode des éléments finis, par exemple. Un second point fort du modèle réside dans son indépendance à la taille des maillages (nombre de nœuds et de triangles). Ceci implique qu'il est possible de générer des maillages précis des géométries concernées, sans perte de performances. Cependant, une des limitations du modèle peut provenir du fait que la rotation des billes n'est pas prise en compte. Il serait donc important de quantifier les effets rotationnels des billes et leur impact sur la dynamique des billes. Le but étant de savoir si leur prise en compte dans la modélisation est nécessaire ou pas.

Enfin, une démarche globale est présentée pour l'utilisation du modèle dans le processus de conception des enceintes de traitement. Ceci correspond à la première finalité du modèle. Une seconde utilité vient de sa capacité à fournir des données d'entrée, représentatives des conditions réelles de traitement, à des modèles de prédiction des contraintes résiduelles. Un exemple est présenté dans les perspectives générales du manuscrit. Concernant la démarche proposée, elle se traduit par le développement de modules de simulation et d'analyse des résultats, ainsi que d'interfaces utilisateurs. Cela permet donc au concepteur d'accéder à ces modules, depuis son environnement de conception, et d'obtenir un retour sur ses choix de conception vis-à-vis du procédé en lui-même. Or jusqu'à présent, seule l'expérience de l'entreprise, la réalisation de prototypes et d'essais physiques permettraient d'obtenir des informations sur le choix des paramètres procédé et de conception des enceintes.

2. Conclusions d'ordre expérimental

Deux méthodes expérimentales ont été proposées. La première permet de calculer un recouvrement moyen et local, à partir d'une photographie de la surface grenillée. La seconde permet d'accéder aux vitesses de billes dans l'enceinte et aux vitesses d'impacts, lorsqu'elles sont détectées. Ces deux méthodes ont ensuite été testées dans le cadre de l'enceinte prismatique. Les résultats expérimentaux reflètent les observations et conclusions obtenues numériquement. En effet, les prédictions faites par le modèle semblent bien représenter ce qui se passe dans l'enceinte. À ce stade, les comparaisons sont qualitatives.

À la suite des premières études expérimentales, le grenaillage ultrason d'une roue dentée est considéré. Cela permet de révéler les capacités prédictives du modèle développé, tant qualitativement que quantitativement. Les résultats obtenus montrent que l'erreur sur la prédiction du nombre d'impacts, par denture étudiée, est inférieure à 5 % par rapport aux mesures expérimentales. Les distributions de diamètres de cratères prédites par la simulation, à partir des vitesses normales d'impact, sont très proches de celles mesurées expérimentalement. Les prédictions du modèle sont fiables et représentatives de la réalité expérimentale, à condition d'utiliser les bons coefficients de restitution.

L'ensemble des publications scientifiques, issues des présents travaux de thèse, sont listés en Annexe 3.

3. Perspectives générales

3.1. Coefficients de restitution

Le dispositif de capture des trajectoires de billes, présenté dans le Chapitre IV.1.2.2, permet également de mesurer les coefficients de restitution. Ce dispositif ouvre la possibilité d'étudier l'influence des paramètres procédé, matériau et géométrie sur les coefficients de restitution normaux et tangentiels. Cela permettrait donc d'identifier le coefficient de restitution seuil C_0 et la vitesse normale seuil de plasticité V_0 (cf. Chapitre II.3), mais également le coefficient de restitution tangentiel. Les résultats qui en découleront amélioreront la définition des coefficients de restitution et donc la capacité prédictive du modèle. À l'aide de ces données expérimentales, il sera ensuite possible de constituer une base de données qui alimentera les modèles avec des coefficients de restitution réalistes.

3.2. Prédiction des contraintes résiduelles

Les procédés de mise en compression suscitent un fort intérêt industriel, comme le grenaillage ultrason, du fait des effets bénéfiques qu'ils engendrent. S'il est vrai que les présents travaux de thèse se focalisent principalement sur la dynamique des billes, et non pas sur les effets du procédé sur le matériau traité, les études réalisées ici peuvent constituer de précieuses données d'entrée pour les modèles de prédiction des contraintes résiduelles existants [59]–[63].

Plusieurs stratégies sont possibles. Parmi elles, il existe une méthode de chainage (*Figure 2*) développé au sein du laboratoire ICD-LASMIS à l'UTT. L'approche consiste à prédire les

contraintes résiduelles, induite par une opération de GUS, de manière rapide et dans l'ensemble d'une pièce mécanique à partir des paramètres procédés. Pour ce faire, la dynamique des billes est tout d'abord effectuée. Celle-ci permet d'obtenir les distributions spatiales relatives aux grandeurs qui influencent les contraintes résiduelles parmi lesquelles, les vitesses d'impacts. Ensuite, un modèle²⁵, basé sur une analyse dimensionnelle [107], [108], permet de remonter au tenseur des contraintes résiduelles induit dans un massif semi-infini. Il devient ainsi possible de remonter au champ complet de contraintes résiduelles par simple calcul de rééquilibrage, par la méthode des éléments finis [109]. Ce chainage constitue donc une voie prometteuse pour une maîtrise complète des effets du procédé sur le matériau traité, et cela à l'échelle d'une pièce mécanique.

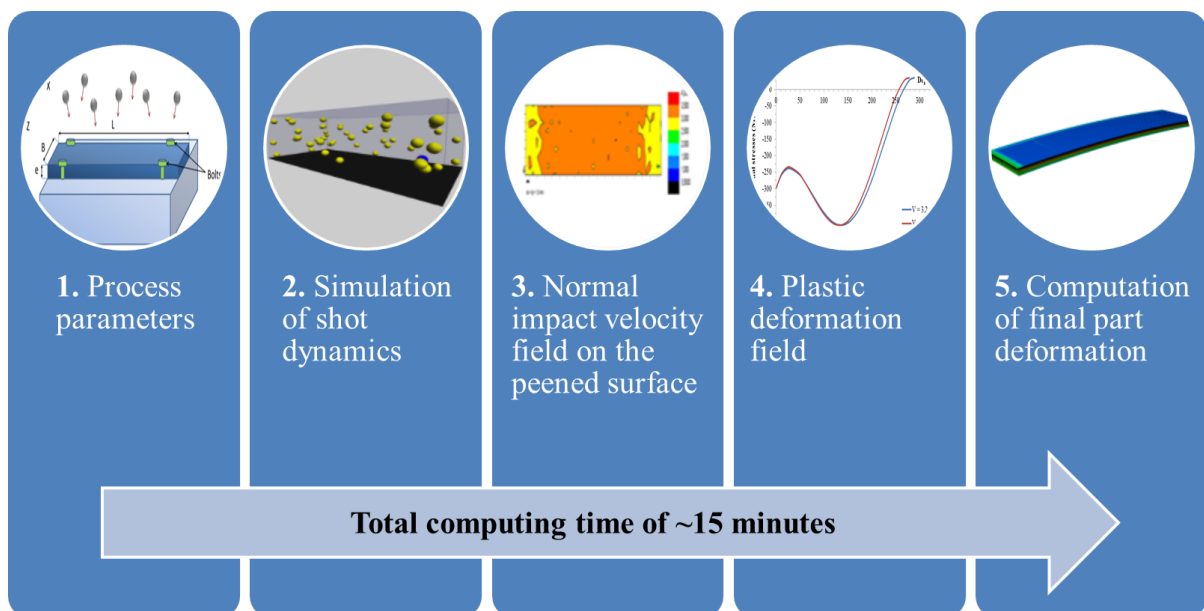


Figure 2: Les cinq étapes de la méthode de chainage [107].

²⁵ Travaux de recherche réalisés par Dr. Emmanuelle ROUHAUD.

Références bibliographiques

- [1] SONATS, “STRESSONIC(R).” [Online]. Available: http://www.sonats-et.com/page_12-stressonic.html. [Accessed: 17-Sep-2012].
- [2] Y. Watanabe, K. Hattori, M. Handa, N. Hasegawa, K. Tokaji, M. Ikeda, and J. M. Duchazeaubeneix, “Effect of Ultrasonic Shot Peening on Fatigue Strength of High Strength Steel,” in *10th International conference on shot Peening (ICSP10)*, 2002, pp. 305 – 310.
- [3] A. Benrabah, C. Langlade, and A. B. Vannes, “Residual stresses and fretting fatigue,” *Wear*, vol. 224, no. 2, pp. 267–273, Feb. 1999.
- [4] S. Kawano, A. Kawagishi, N. Suezono, K. Ueno, K. Okuda, M. Obata, I. Kameyama, and Y. Watanabe, “Development of ultrasonic shot peening technique for reactor components to improve structural integrity against stress corrosion cracking,” in *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE*, 2009, pp. 543–547.
- [5] J. Badreddine, E. Rouhaud, M. Micoulaut, S. Remy, V. Desfontaine, and P. Renaud, “3D model of shot dynamics for ultrasonic shot peening,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 768–769, pp. 503–509, 2013.
- [6] M. Micoulaut, S. Mechkov, D. Retraint, P. Viot, and M. François, “Granular gases in mechanical engineering: on the origin of heterogeneous ultrasonic shot peening,” *Granul. Matter*, vol. 9, pp. 25–33, Aug. 2007.
- [7] H. O. Fuchs and P. E. Cary, “History of Shot Peening,” in *First International Conference on Shot Peening*, 1981, pp. 4–6.
- [8] O. Foepppl, “Das Druecken Der Oberflaeche von Bauteilen Aus Stahl,” *Sthal und Eisen*, vol. 49, pp. 575–577, 1929.
- [9] P. O. F. Vorwerk, “Spring having its surface layers compacted,” U.S. Patent 1,946,3401934.
- [10] J. C. Borger, “Method of cold forming sheets,” U.S. Patent 2,701,4081955.
- [11] Y. F. Kudryavtsev, “Ultrasonic (Hammer) Peening,” in *Handbook on Residual Stress, Vol. 1*, 2005, pp. 160–169.
- [12] F. Blaha and B. Langenecker, “Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration,” *Naturwissenschaften*, vol. 42, pp. 556–556, 1955.
- [13] A. V. Mordvintseva, “Ultrasonic treatment of welded joints to relieve the residual stresses. Application of ultrasound in welding engineering,” in *Transact. of N.E. Bauman MVTU*, 1959, pp. 32–43.
- [14] D. Retraint, C. Pilé, C. Garnier, and J. Lu, “Ultrasonic Shot Peening,” in *Handbook on Residual Stress, Vol. 1*, 2005, pp. 146–159.

- [15] A. Koulemine, “No Title,” Russian patent n° 7780451980.
- [16] M. Mathias, A. Göcke, and M. Pohl, “The residual stress , texture and surface changes in steel induced by cavitation,” *Wear*, vol. 150, pp. 11–20, 1991.
- [17] Y. Yamauchi, “Impinging Erosion induced by Ultra-High-Speed Submerged Water-Jet,” in *Symposium on Impact Engineering*, 1993, pp. 389–394.
- [18] K. Hirano, K. Enomoto, E. Hayashi, and K. Kurosawa, “En japonais,” *J. Soc. Mater. Sci. Japan*, vol. 45, no. 7, pp. 740–745, 1996.
- [19] P. Peyre, E. Bartnicki, L. Berthe, and R. Fabbro, “Laser Shock Processing,” in *Handbook on Residual Stress, Vol. 1*, 2005, pp. 170–176.
- [20] J. A. Fox, “Effect of water and paint coatings on laser-irradiated targets,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 461–464, 1974.
- [21] C. Horsch, V. Schulze, and D. Löhe, “Deburring and surface conditionning of micro milled structures by micro peening and ultrasonic wet peening,” *Microsyst. Techn.*, vol. 12, pp. 691–696, 2006.
- [22] M. Guagliano, “Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 110, no. 3, pp. 277–286, Apr. 2001.
- [23] T. Hong, J. Y. Ooi, and B. Shaw, “A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 8, pp. 1097–1110, Dec. 2008.
- [24] S. B. Mahagaonkar, P. K. Brahmkar, and C. Y. Seemikeri, “Effect of shot peening parameters on microhardness of AISI 1045 and 316L material: an analysis using design of experiment,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 5–6, pp. 563–574, Sep. 2007.
- [25] S. B. Mahagaonkar, P. K. Brahmkar, and C. Y. Seemikeri, “Some investigations into development of nozzle and suction system for air blast shot peening machine,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 3–4, pp. 306–317, Nov. 2008.
- [26] Z. M. Xiao, W. C. Fok, and D. T. Lwin, “Effects of air-blast pressure and exposure time on the shot-peening process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 39, no. 1–2, pp. 13–20, 1993.
- [27] H. Y. Miao, D. Demers, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, “Experimental study of shot peening and stress peen forming,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2089–2102, Nov. 2010.
- [28] A. Sandá, V. G. Navas, O. Gonzalo, and V. García Navas, “Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 2213–2220, Apr. 2011.

- [29] J. Champaigne, “Key Terms in Intensity Control for the New Shot Peening Technician,” *shot Peen.*, pp. 12–16, 2011.
- [30] SAE Standard J2277, “Surface Enhancement Division — Shot Peening Coverage Determination.” 2009.
- [31] M. Y. Abyaneh and D. Kirk, “Fundamental aspects of shot peening coverage control part three: coverage control versus fatigue,” in *6th International Conference on Shot peening (ICSP-6)*, 1996, pp. 456–463.
- [32] T. Ludian and L. Wagner, “COVERAGE EFFECTS IN SHOT PEENING OF AL 2024-T4,” in *9th International Conference on Shot Peening (ICSP9)*, 2005, pp. 296–301.
- [33] SAE Standard J442, “SAE Surface Enhancement Division — Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening.” 2008.
- [34] SAE Standard J443, “SAE Surface Enhancement Division — Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip.” 2003.
- [35] B. Bhuvaraghan, S. M. Srinivasan, and B. Maffeo, “Numerical simulation of Almen strip response due to random impacts with strain-rate effects,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 53, no. 6, pp. 417–424, Jun. 2011.
- [36] W. Zinn and B. Scholtes, “Influence of shot velocity and shot size on Almen intensity and residual stress depth distributions,” in *9th International Conference on Shot Peening (ICSP9)*, 2000, no. 20, pp. 379–384.
- [37] J. Lu, P. Peyre, C. O. Nonga, A. Benamar, and J. F. Flavenot, “Residual Stress and Mechanical Surface Treatments,” in *Society of Experimental Mechanics*, 1994.
- [38] M. Kobayashi, T. Matsui, and Y. Murakami, “Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening,” *Int. J. Fatigue*, vol. 20, no. 5, pp. 351–357, May 1998.
- [39] E. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovic, J. Peters, and H. K. Tönshoff, “Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes,” *Ann. CIRP*, vol. 31, pp. 491–510, 1982.
- [40] M. A. S. Torres and H. J. C. Voorwald, “An evaluation of shot peening , residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel,” *Int. J. Fatigue*, vol. 24, pp. 877–886, 2002.
- [41] I. Stoll, D. Helm, H. Polanetzki, and L. Wagner, “Ultrasonic Shot Peening (USP) on Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Aero Engine Components,” in *11th International Conference on Shot Peening (ICSP11)*, 2011, pp. 371–376.
- [42] F. P. Zimmerli, “Shot blasting and its effects on fatigue life,” *Am. Soc. Met.*, vol. 51, 1940.
- [43] J. O. Almen, “Fatigue failures are tensile failures,” *Prod. Eng.*, vol. 22, no. 9, pp. 101–124, 1951.

- [44] M. C. R. J. R. Tarpani, M. T. Milan, D. Spinelli, and W. W. Bose, “The effect of warm shot peening on the fatigue performance of a SAE 5160 spring steel,” *Spring*, no. 2002.
- [45] H. J. C. Voorwald, M. P. Silva, M. Y. P. Costa, and M. O. H. Cioffi, “Improvement in the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel by shot peening,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 32, pp. 97–104, Feb. 2009.
- [46] B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, M. a. Vasylyev, and M. O. Iefimov, “Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 458, no. 1–2, pp. 253–261, Jun. 2007.
- [47] S. Jelliti, C. Richard, D. Retraint, T. Roland, M. Chemkhi, and C. Demangel, “Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behavior of Ti–6Al–4V titanium alloy,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 224, pp. 82–87, Mar. 2013.
- [48] K. A. Brandenburg, D. J. Hornbach, and P. W. Mason, “Use of Engineered Compressive Residual Stresses to Mitigate Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue in Sensitized 5XXX Series Aluminum Alloys,” in *Department of Defence Virtual Corrosion Conference*, 2013.
- [49] H. M. Jaeger, S. R. Nagel, and R. P. Behringer, “Granular solids, liquids, and gases,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 68, no. 4, pp. 1259–1273, Oct. 1996.
- [50] T. Pöschel, “Structures in Granular Gases,” in *Friedrich Alexander Universität*, 2009.
- [51] K. Saitoh, “Kinetic Theory of Granular Gases,” in *University of Twente*, 2012.
- [52] D. Chandler, *Introduction to modern statistical mechanics*. New York, New York, USA: Oxford University Press, Inc., 1976.
- [53] D. C. Young, “Fundamental Principles,” in *Computational Chemistry: A practical Guide for Applying Techniques to Real-World Problems*, 2001st ed., vol. 9, I. John Wiley & Sons, Ed. 2001, pp. 7–18.
- [54] I. Goldhirsch, S. H. Noskowitz, and O. Bar-Lev, “Theory of granular gases: some recent results and some open problems,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 17, no. 24, pp. S2591–S2608, Jun. 2005.
- [55] S. Luding and A. Goldshtein, “Collisional cooling with multi-particle interactions,” *Granul. Matter*, vol. 5, no. 3, pp. 159–163, Dec. 2003.
- [56] J. A. M. Ferreira, L. F. P. Borrego, and J. D. M. Costa, “EFFECTS OF SURFACE TREATMENTS ON THE FATIGUE OF NOTCHED BEND SPECIMENS,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 19, no. 1, pp. 111–117, 1996.
- [57] K. H. Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*. 1987, p. 559.
- [58] M. Micoulaut, D. Retraint, P. Viot, and M. François, “Heterogeneous ultrasonic shot peening: Experiment and Simulation,” in *9th International Conference on Shot Peening (ICSP9)*, 2005, pp. 119–124.

- [59] E. Rouhaud, D. Deslaef, J. Lu, and J. L. Chaboche, "Modeling of Shot Peening," in *Handbook on Residual Stress*, Vol. 2, Second edi., J. Lu, Ed. Society of Experimental Mechanics, 2005, pp. 116–148.
- [60] V. Schulze, M. Klemenz, and M. Zimmermann, "State of the Art in Shot Peening Simulation," 2005.
- [61] H. Y. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 10, pp. 1023–1038, Oct. 2009.
- [62] M. Zimmermann, M. Klemenz, and V. Schulze, "Literature review on shot peening simulation," *Int. J. Comput. Mater. Sci. Surf. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 289–310, 2010.
- [63] S. Bagherifard, R. Ghelichi, and M. Guagliano, "On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 259, pp. 186–194, Oct. 2012.
- [64] P. Céline, "Le grenaillage par ultrasons : Caractérisation du procédé et influence sur la fatigue d'alliages TiAl," 2005.
- [65] C. Pilé, M. François, D. Retraint, E. Rouhaud, and L. Jian, "Modelling of ultrasonic shot peening process," *Mater. Sci. Forum*, vol. 490–491, pp. 67–72, 2005.
- [66] M. Micoulaut, D. Retraint, P. Viot, and M. François, "Grenaillage ultrasonore hétérogène," in *17eme Congres Francais de Mécanique*, 2005, pp. 1–6.
- [67] P. Thuemmler, H. Polanetzki, and V. Schulze, "Simulation of the Ultrasonic Shot Peening Process," in *11th International Conference on Shot Peening (ICSP11)*, 2011.
- [68] P. Thümmeler, "Beschreibung der Vorgänge beim Ultraschallkugelstrahlen unter Berücksichtigung der Strahlintensität und der Kugelbewegungen bei Parameteränderungen.," Bradenburgischen Technischen Universität, 2012.
- [69] J. R. William, G. Hocking, and G. G. W. Mustoe, "Theoretical Basis of the discrete element method," in *Numerical Methods in Engineering: Theory and Applications*. NUMETA 85, 1985, pp. 897–906.
- [70] C. Nouguié-Lehon, M. Zarwel, C. Diviani, D. Hertz, H. Zahouani, and T. Hoc, "Surface impact analysis in shot peening process," *Wear*, vol. 302, no. 1–2, pp. 1058–1063, Nov. 2012.
- [71] J. B. Alder and T. E. Wainwright, "Phase Transition for a Hard Sphere System," *J. Chem. Phys.*, vol. 27, no. 5, pp. 1208–1209, 1957.
- [72] B. J. Alder and T. E. Wainwright, "Studies in Molecular Dynamics. I. General Method," *J. Chem. Phys.*, vol. 31, no. 2, pp. 459–466, 1959.
- [73] R. Seifried, W. Schiehlen, and P. Eberhard, "Numerical and experimental evaluation of the coefficient of restitution for repeated impacts," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1–4, pp. 508–524, Dec. 2005.

- [74] M. Frija, T. Hassine, R. Fathallah, C. Bouraoui, and a. Dogui, "Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 426, no. 1–2, pp. 173–180, Jun. 2006.
- [75] G. Constantinides, C. a. Tweedie, N. Savva, J. F. Smith, and K. J. Vliet, "Quantitative Impact Testing of Energy Dissipation at Surfaces," *Exp. Mech.*, vol. 49, no. 4, pp. 511–522, Dec. 2008.
- [76] T. Chaise, D. Nélías, and F. Sadeghi, "On the Effect of Isotropic Hardening on the Coefficient of Restitution for Single or Repeated Impacts Using a Semi-Analytical Method," *Tribology Trans.*, vol. 54, no. November, pp. 714–722, 2011.
- [77] Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. 1687, pp. 12–25.
- [78] M. Leconte, Y. Garrabos, F. Palencia, C. Lecoutre, P. Evesque, and D. Beysens, "Inelastic ball-plane impact: An accurate way to measure the normal restitution coefficient," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 24, pp. 243518–1–3, 2006.
- [79] J. Badreddine, M. Micoulaut, E. Rouhaud, S. Remy, D. Retraint, and F. Manuel, "Effect of the confinement on the properties of ultrasonic vibrated granular gases," *Granul. Matter*, vol. 15, no. 3, pp. 367–376, 2013.
- [80] J. Zarka, J. Frelat, and P. Kasmai-Navidi, *A new approach in inelastic analysis of structures*, 1st ed. CadLM, 1990.
- [81] A. Bachelierie, "Conservation de l'énergie - Théorie cinétique des gaz," in *Thermodynamique 1*, A. Colin., 1991, pp. 100–118.
- [82] J. Badreddine, E. Rouhaud, M. Micoulaut, D. Retraint, S. Remy, M. François, P. Viot, G. Doubre-Baboeuf, D. Le Saunier, and V. Desfontaine, "Simulation and experimental approach for shot velocity evaluation in ultrasonic shot peening," *Mécanique Ind.*, vol. 12, no. 3, pp. 223–229, Jul. 2011.
- [83] J. Badreddine, E. Rouhaud, M. Micoulaut, and S. Remy, "Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: the effects of process parameters on the characteristics of the impact field," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. Submitted.
- [84] J. Badreddine, E. Rouhaud, M. Micoulaut, D. Retraint, S. Remy, M. François, P. Viot, G. Doubre-Baboeuf, D. LeSaunier, and V. Desfontaine, "Grenailage ultrason : expériences et simulations," in *20eme Congres Francais de Mecanique*, 2011, no. 1, pp. 3286–3291.
- [85] J. Badreddine, M. Micoulaut, E. Rouhaud, D. Retraint, M. François, and S. Remy, "Impact velocity and distribution in ultrasonic shot peening," in *11th International Conference on Shot Peening (ICSP11)*, 2011, pp. 99–104.
- [86] J. M. Lifshitz and H. Kolsky, "Some experiments on anelastic rebound," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 12, no. 1, pp. pp. 35–43, Feb. 1964.

- [87] R. M. Brach, "Impact dynamics with application to solid particle erosion," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–53, 1988.
- [88] S. McNamara and E. Falcon, "Simulations of vibrated granular medium with impact-velocity-dependent restitution coefficient," *Phys. Rev. E*, vol. 71, no. 3, pp. 031302–1–6, Mar. 2005.
- [89] G. Van Den Bergen, "Efficient Collision Detection of Complex Deformable Models using AABB Trees," *J. Graph. Tools*, vol. 2, no. 4, pp. 1–13, 1997.
- [90] D. S. Coming and O. G. Staadt, "Kinetic sweep and prune for multi-body continuous motion," *Comput. Graph.*, vol. 30, no. 3, pp. 439–449, Jun. 2006.
- [91] H. Sundar, R. S. Sampath, and G. Biros, "Bottom-Up Construction and 2:1 Balance Refinement of Linear Octrees in Parallel," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 30, no. 5, pp. 2675–2708, 2008.
- [92] P. Terdiman, "OPCODE library," 2001. [Online]. Available: <http://www.codercorner.com/Opcode.htm>. [Accessed: 26-Feb-2013].
- [93] P. Terdiman, "OPCODE 1.0 vs RAPID 2.01," 2001. [Online]. Available: <http://www.codercorner.com/OpcodeDemo.htm>. [Accessed: 13-Feb-2013].
- [94] SGI, "OpenGL." [Online]. Available: <http://www.opengl.org/>. [Accessed: 26-Apr-2013].
- [95] Z. Soferman, D. Blythe, and N. W. John, "Advanced graphics behind medical virtual reality: evolution of algorithms, hardware, and software interfaces," *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 3, pp. 531–554, Mar. 1998.
- [96] L. Bavoil, "Rendering Huge Triangle Meshes with OpenGL Triangle meshes," in *University of Utah*, 2005, pp. 1–35.
- [97] M. Trapp, "OpenGL-Performance and Bottlenecks," in *Hasso Plattner Institut - Universität Potsdam*, 2004, p. 15 pages.
- [98] J. Badreddine, S. Remy, M. Micoulaut, E. Rouhaud, V. Desfontaine, and P. Renaud, "CAD based model of ultrasonic shot peening for complex industrial parts," *Adv. Eng. Softw.*, vol. Submitted.
- [99] J. Badreddine, S. Remy, M. Micoulaut, E. Rouhaud, V. Desfontaine, F. Chateau, and P. Renaud, "CAD BASED SIMULATION OF ULTRASONIC SHOT PEENING PROCESS," in *12th International Design Conference (DESIGN 2012)*, 2012, pp. 373–380.
- [100] J. Badreddine, S. Remy, M. Micoulaut, E. Rouhaud, V. Desfontaine, and P. Renaud, "Simulation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométries complexes," in *21ème Congrès Français de Mécanique*, 2013.

- [101] J. Badreddine, M. Micoulaut, S. Remy, E. Rouhaud, V. Desfontaines, and P. Renaud, "Simulation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométries complexes," in *11ème Colloque National en Calcul des Structures*, 2013.
- [102] A. Hribernik and G. Bombek, "Improved method for shot particle velocity measurement within a shotblasting chamber," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 17, no. 2, pp. 99–105, Apr. 2006.
- [103] A. M. Konitzer and H. Polanetzki, "Implementation of velocity measurement as intensity verification in serial production," in *11th International Conference on Shot Peening*, 2011, pp. 19–24.
- [104] M. Sommerfeld and N. Huber, "Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 25, no. 6–7, pp. 1457–1489, Sep. 1999.
- [105] H. Chardin, "Etude de la densification par grenaillage ultrasons d'un matériau métallique poreux élaboré par métallurgie des poudres," Ecole des Mines de Paris, 1996.
- [106] K. L. Johnson, *Contact mechanics*. Cambridge University Press, 1985, p. 362.
- [107] J. Badreddine, D. Gallitelli, E. Rouhaud, M. Micoulaut, S. Remy, M. François, V. Desfontaine, F. Chateau, P. Renaud, and G. Doubre-Baboeuf, "Complete simulation of Ultrasonic Shot Peening process," in *26th International Conference on Surface Modification Technologies (SMT26)*, 2012, pp. 11–17.
- [108] D. Gallitelli, E. Rouhaud, D. Retraint, J. Badreddine, C. Labergère, and F. Manuel, "Modélisation du grenaillage de précontrainte via l'analyse dimensionnelle : du profil de contraintes vers la pièce déformée," in *21ème Congrès Français de Mécanique*, 2013.
- [109] E. Rouhaud, M. A., and J. Lu, "Introduction of residual stress fields in finite elements three-dimensional structures," in *5th International Conference on Shot Peening (ICSR5)*, 1997, vol. 1, pp. 386–391.
- [110] S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha, "OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection," in *Computer Graphics Proceedings*, 1996, pp. 171–180.

Annexes

ANNEXE 1 – INFLUENCE DES VITESSES INITIALES	124
ANNEXE 2 – STRUCTURE D’UN FICHIER DE MAILLAGE ‘.DAT’	125
ANNEXE 3 – LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	127

Annexe 1 – Influence des vitesses initiales

La Figure 1.1 présente l'évolution du nombre cumulé d'impacts en fonction du temps de grenaillage simulé, au niveau de la pièce traitée et pour deux vitesses initiales imposées aux billes. Le but de cette analyse est de déterminer si ces vitesses initiales, imposées au démarrage de chaque simulation, affectent les résultats de simulation. Les deux valeurs choisies sont 0.24 m/s et 60 m/s. Chacune représente la norme maximale que peut prendre le vecteur vitesse de chaque bille. Les résultats montrent l'existence d'une phase transitoire, sensible aux vitesses initiales, et d'une phase stationnaire. Il est possible de voir que la phase stationnaire est atteinte pour un nombre d'impacts supérieur à 10 000. Ces résultats, combinés à ceux du Chapitre II.2, montrent que la transition entre les phases transitoire et stationnaire est indépendante des positions et vitesses initiales attribuées aux billes en début de chaque calcul. Ainsi, tant que les analyses se font dans la phase stationnaire, les mêmes résultats seront obtenus d'un calcul à l'autre.

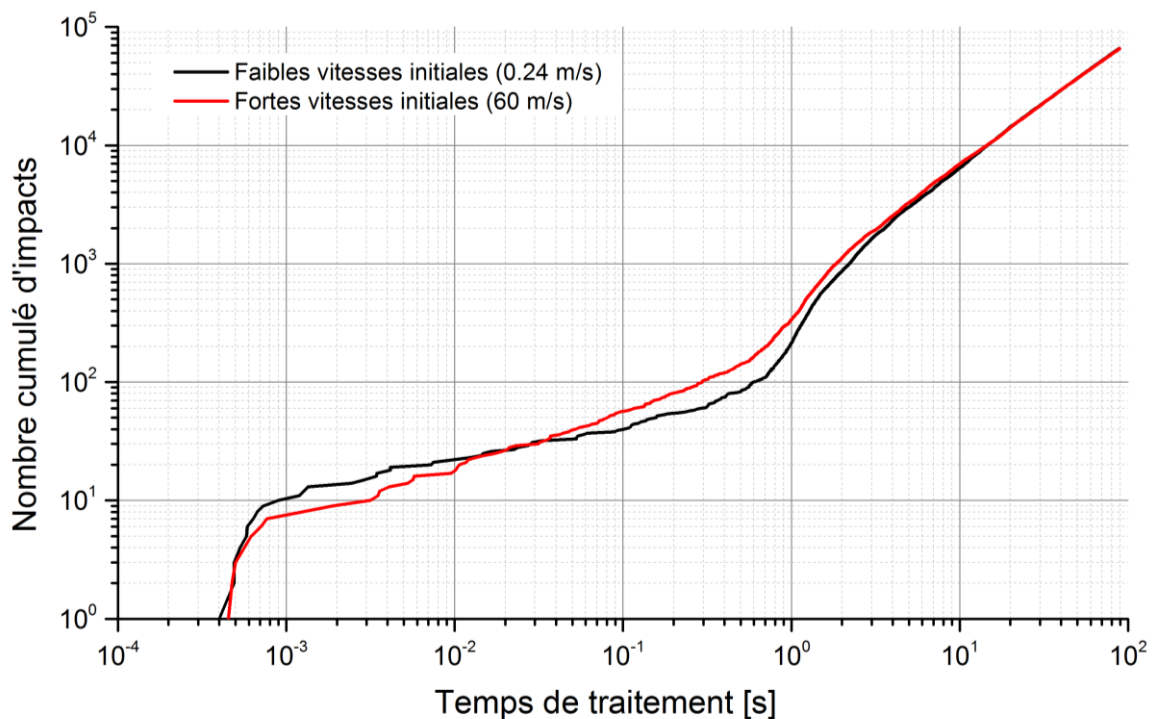


Figure 1.1 : Évolution du nombre cumulé d'impacts sur la pièce grenaillée, pour différentes vitesses initiales, dans le cas d'une enceinte cylindrique. Les paramètres utilisés correspondent à 30 billes de 3mm de diamètres, une amplitude de 25 μ m et une hauteur pièce-sonotrode de 40 mm.

Annexe 2 – Structure d'un fichier de maillage '.dat'

<pre> \$.. \$----- \$.. \$.. BULK DATA CARDS \$.. BEGIN BULK \$.. \$----- \$.. \$.. NODES \$.. </pre>	<i>Nature</i> : Lignes de commentaires But : Début de la liste des vertices
<pre> GRID* 1 30.000000000 40.000000000 1 * 1 -32.000000000 GRID* 2 -25.000000000 40.000000000 2 * 2 -32.000000000 GRID* 3 35.000000000 40.000000000 3 * 3 -32.000000000 GRID* n x_n y_n n * n z_n </pre>	<i>Nature</i> : Liste des n vertices du maillage But : Numéro + coordonnées de chaque vertice
<pre> \$.. \$----- \$.. \$.. ELEMENTS \$.. \$.. \$----- \$.. \$.. MESH PART: MSHPartOctree2D.11 \$.. </pre>	<i>Nature</i> : Lignes de commentaires But : Fin de la liste des vertices + Début de la liste des triangles
<pre> CTRIA3 1 1 1 60 686 CTRIA3 2 1 1 32 3123 CTRIA3 3 1 59 828 686 CTRIA3 7801 1 2386 2339 2338 CTRIA3 7802 1 2386 2381 2380 </pre>	<i>Nature</i> : Liste des triangles du maillage, appartenant au groupe 1 But : Numéros du triangle et du groupe d'appartenance + indice des 3 vertices du triangle
<pre> CTRIA3 7803 2 4888 4933 5086 CTRIA3 7804 2 4889 5086 5088 CTRIA3 7805 2 4934 5089 5086 . . . </pre>	<i>Nature</i> : Liste des triangles du maillage, appartenant au groupe 2 But : Numéros du triangle et du groupe d'appartenance + indice des 3 vertices du triangle

.						
CTRIA3	8803	2	5460	5463	5459	
CTRIA3	8804	2	4988	5477	4987	
CTRIA3	8805	3	4115	4829	4828	
CTRIA3	8806	3	4829	4830	4825	
CTRIA3	8807	3	4055	4829	4115	
.						
.						
.						
.						
CTRIA3	10240	3	4728	4312	4311	
CTRIA3	10241	3	4324	4735	4325	
\$..						
ENDDATA						

Nature : Liste des triangles du maillage, appartenant au groupe 3

But : Numéros du triangle et du groupe d'appartenance + indice des 3 vertices du triangle

Nature : Lignes de commentaires

But : Fin de la liste des triangles

Annexe 3 – Liste des publications scientifiques

Publication dans des journaux internationaux référencés

- Badreddine, J., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Remy, S., Retraint, D. and Manuel, F., **2013**. *Effect of the confinement on the properties of ultrasonic vibrated granular gases*. Granular Matter, **15**(3), pp.367–376.
- Badreddine, J., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Remy, S., Desfontaine, V., Renaud, P., **2013**. *3D model of shot dynamics for ultrasonic shot peening*. Materials Science Forum, **768-769**, pp. 503-509.
- Badreddine, J., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Remy, S. *Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: The effects of process parameters on the characteristics of the impact field*. International Journal of Mechanical Sciences, **Accepté le 15 avril 2014**.
- Badreddine, J., Remy, S., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Desfontaine, V., Renaud, P. *CAD based model of ultrasonic shot peening for complex industrial parts*. Advances in Engineering Software, **Accepté le 30 mai 2014**.

Publication dans des journaux nationaux référencés

- Badreddine, J., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Retraint, D., Remy, S., François, M., Viot, P., Doubre-Baboeuf, G., Le Saunier, D., Desfontaine, V., **2011**. *Simulation and experimental approach for shot velocity evaluation in ultrasonic shot peening*. Mécanique & Industries, **12**(3), pp.223–229.

Publication dans des congrès internationaux avec articles étendus (> 3 pages)

- Badreddine, J., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Retraint, D., François, M. and Remy, S., **2011**. *Impact velocity and distribution in ultrasonic shot peening*. In 11th International Conference on Shot Peening (ICSP-11). South Bend – Indiana (USA), pp. 99–104.
- Badreddine, J., Remy, S., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Desfontaine, V., Château, F., Renaud, P., **2012**. *CAD based simulation of ultrasonic shot peening process*. In 12th International Design Conference (DESIGN 2012). Cavtat – Croatie, pp. 373–380.
- Badreddine, J., Gallitelli, D., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Remy, S., François, M., Desfontaine, V., Château, F., Renaud, P., Doubre-Baboeuf, G., **2012**. *Complete simulation of Ultrasonic Shot Peening process*. In 26th International Conference on Surface Modification Technologies (SMT26). Lyon – France, pp. 11–17.
- Badreddine, J., Micoulaut, M., Remy, S., Rouhaud, E., Renaud, P., Château, F., Desfontaine, V., **2014**. *A model for ultrasonic shot peening: optimization of chamber design in an industrial context*. In 12th International Conference on Shot Peening (ICSP-12). Goslar – Allemagne, **Accepté le 04 juin 2014**.

Publication dans des congrès nationaux avec articles étendus (> 3 pages)

- Badreddine, J., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Retraint, D., Remy, S., François, M., Viot, P., Doubre-Baboeuf, G., Le Saunier, D., Desfontaine, V., **2011**. *Grenaillage ultrason : expériences et simulations*. In 20^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM 2011). Besançon - France, pp. 3286–3291
- Badreddine, J., Remy, S., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Desfontaine, V. and Renaud, P., **2013**. *Simulation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométries complexes*. In 21^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM 2013). Bordeaux – France, pp. 1–8.
- Badreddine, J., Micoulaut, M., Remy, S., Rouhaud, E., Desfontaines, V. and Renaud, P., **2013**. *Simulation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométries complexes*. In 11^{ème} Colloque National en Calcul des Structures (CSMA13). Giens – France, pp. 1–8.

Publication dans des congrès internationaux avec articles résumés (< 3 pages)

- Badreddine, J., Micoulaut, M., Rouhaud, E., Retraint, D. and François, M., **2009**. *Modeling of ultrasonic shot peening : dynamic of shot during the peening process*. In 8th European Conference on Residual Stresses (ECRS8). Riva Del Garda – Italie.
- Gallitelli, D., Badreddine, J., Rouhaud, E., Minoulaut, M., Labergere, C., François, M., **2012**. *From process parameters to residual stress field: complete ultrasonic shot peening simulation*. In 9th International Conference on Residual Stresses (ICRS9). Garmisch-Patenkirchen – Allemagne.

Jawad BADREDDINE

Doctorat : Systèmes Mécaniques et Matériaux

Année 2014

Modélisation du grenaillage ultrason pour des pièces à géométrie complexe

Le grenaillage ultrason est un procédé mécanique de traitement de surfaces. Il consiste à projeter des billes à la surface de pièces métalliques, à l'aide d'un système acoustique vibrant ultrasonore. Lors du traitement, les billes sont contenues dans une enceinte spécialement conçue pour la pièce à traiter, et adoptent un comportement similaire à celui d'un gaz granulaire vibré. Le grenaillage ultrason sert à introduire des contraintes résiduelles de compression dans le matériau traité. Ces contraintes de compression sont bénéfiques pour la tenue en fatigue de la pièce et sa résistance à la corrosion sous contraintes.

L'objectif des présents travaux de thèse consiste à modéliser la dynamique des billes pendant le traitement, et pour des pièces et géométries complexes. En effet, depuis son industrialisation, la mise au point du procédé se fait de manière empirique qui, avec la complexification des pièces mécaniques traitées pousse cette approche à ses limites. La mise au point peut donc s'avérer coûteuse en temps et aboutir à une solution partiellement optimisée.

Ainsi, le modèle développé donne accès à une compréhension détaillée du grenaillage ultrason dans des conditions de traitement industrielles. Il constitue pour la première fois un outil d'aide à la conception des enceintes de traitement, offrant la possibilité d'une meilleure maîtrise et optimisation du traitement, tout en réduisant les coûts de mise au point. La seconde contribution est de fournir aux modèles de prédiction des contraintes des données fiables et réalistes.

Mots clés : grenaillage de précontrainte - mécanique statistique hors d'équilibre - conception assistée par ordinateur – CATIA (logiciel).

Modelling of Ultrasonic Shot Peening for Parts with Complex Geometry

Ultrasonic shot peening is a mechanical surface treatment process. It consists on projecting spherical shot onto a metallic surface, using an ultrasonic acoustic system. During the treatment, the shot are contained in a chamber, specially designed for the peened part, and behave similarly to a vibrated granular gas. Ultrasonic shot peening is used to introduce compressive residual stresses in the peened material. These compressive stresses help increasing the fatigue life span of the part and its resistance to stress corrosion cracking.

The objectif of the present work consists on modeling the shot dynamics of the shot during the treatment, and for complex parts and geometries. Since its industrialization, the choice of the process parameters is done experimentally with trial and error. And with the ever increasing complexity of the peened parts, this approach is reaching its limits; thus becoming sometimes time consuming and providing partially optimized solutions.

Therefore, the developed model gives access to a detailed understanding of ultrasonic shot peening in industrial treatment conditions. It represents for the first time a support tool for the design of peening chambers. This offers the possibility of a better control and optimization of the process, while reducing development costs. The second contribution lies in the model capacity to provide reliable and realistic input data to residual stresses prediction models.

Keywords: shot peening – nonequilibrium statistical mechanics - computer-aided design – CATIA (computer file).

Thèse réalisée en partenariat entre :

