



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

CONCEPTION D'UNE MACHINE POUR ESSAIS D'IMPACT

Préparé par :

CHAREF Maroua et CHAIB Fatima

Soutenu publiquement le : 28 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Mme MAKHFI Souad	Maître de conférences « A »(Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Président
M. DEBBIH Senousi	Maitre-assistant « A » (Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Examineur
M. BENALOUACH Khaled Mohamed Amin	Maitre-assistant « A » (Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Examineur
M. GUEMMOUR Mohamed	Maître de conférences « B »(Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Encadrant
M HOUARI Amin	Maître de conférences « B »(Université M'hamed Bougara -Boumerdes))	Co-encadrant

En premier lieu, nous tenons à remercier Allah le tout puissant, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement Monsieur **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, Maître de conférences classe "B" à l'université de Tiaret ainsi que Monsieur **HOUARI Amin** Maître de conférences classe "B" à l'université de Boumerdes de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, ils ont su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. Nous les remercions non seulement pour la qualité de leur encadrement mais également pour l'incalculable qualité humaine dont il a toujours fait preuve.

Nous sommes reconnaissants de l'honneur que nous ont fait Monsieur **DEBBIH Senousis** , Maître assistant "A" à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret et Monsieur **BENALOUACH Khaled Mohamed Amin**, Maître assistant classe "A" à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour avoir accepté de prendre part au jury. Nous les remercions vivement d'avoir accepté la tâche d'évaluer notre mémoire en qualité d'examinateur, en consacrant de leur précieux temps à l'examen, à l'évaluation de notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Nous les remercions également pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document afin de l'expertiser et estimer sa valeur scientifique.

Nous remercions tout autant Mme **MAKHFI Souad** , Maître de conférences classe "A" à l'université Ibn Khaldoun de tiaret, pour avoir accepté de prendre part au jury, de le présider et de proclamer le résultat de la délibérations du jury ma soutenance.

Enfin, nous tenons également à remercier l'équipe pédagogique, constituée de l'ensemble des enseignants permanents et vacataires qui ont assurés notre formation durant notre cycle de master. Sans oublier l'équipe de formation, constituée du responsable de filière et du responsable de la spécialité qui ont assurés la promotion de la spécialité construction mécanique , sans oublier le staff administratif du département de génie mécanique qui a veillé à l'organisation, la planification, le contrôle et le suivi des activités pédagogiques et à leur tête Monsieur le chef de département.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mes chers parents et à toute ma famille, pour leur amour
inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au
long de mon parcours.*

*À mes frères Faiçel et Mohamed, najib et sœurs Chahrazed, Asma ,Linda, pour leur présence,
leurs encouragements
et les moments de réconfort partagés.*

*À mes amis proches Hattab Belgacem, Dallia Sid Ahmed, Khettab
Khaled, Makhloufi Abdo, pour leur bienveillance, leur écoute et leur
aide précieuse dans les moments de doute.*

*Et enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont
soutenus, encouragés, ou simplement cru en nous durant cette
aventure. Leur confiance et leurs mots ont été une source
précieuse de motivation.*

Charef Maroua

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mes chers parents et à toute ma famille, pour leur amour
inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au
long de mon parcours.*

*À mes frères et sœurs, pour leur présence, leurs encouragements
et les moments de réconfort partagés.*

*À mes amis proches, pour leur bienveillance, leur écoute et leur
aide précieuse dans les moments de doute.*

*Et enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont
soutenus, encouragés, ou simplement cru en nous durant cette
aventure. Leur confiance et leurs mots ont été une source
précieuse de motivation.*

CHAIB Fatima

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Machine d'impact	4
Figure 1.2 Machine d'essai au choc de pendule d'izod pour charpy	6
Figure 1.3 Machine d'essai de chute de poids	7
Figure 1.4 Machines à chute libre	8
Figure 1.5 Machines électromagnétiques	8
Figure 1.6 Machines hydrauliques et pneumatiques.....	9
Figure 1.7 Formes de l'impacteur : a) Plan, b) Sphérique, c) ogival, d) Conique.....	11
Figure 1.8 Schéma des méthodes d'essai d'impact	13
<hr/>	
Figure 2.1 : Schématisation des trois familles de contacts.....	18
Figure 2.2 : Aire A_0 du contact apparent en pointillés et aire A de contact réel en noir pour une interface lisse et une interface rugueuse.....	21
Figure 2.3 : Modèle du contact de Hertz entre une sphère et un plan rigide.....	23
Figure 2.4 : Schéma du contact entre deux solides élastiques. (a) intention sphérique non rigide et échantillon plat et non rigide; (b) deux sphères non rigides identiques; (c) inventeur sphérique non rigide et échantillon plat et rigide; (d) Rigide, indentiment sphérique et spécimen plat, non rigide	24
Figure 2.5 : Contact bille-plan sous charge appliquée	25
Figure 2.6 : Profondeur de pénétration d'une bille sur une surface plane	25
<hr/>	
Figure 3.1 : Paramètres pris en compte lors de la conception d'un produit	32
Figure 3.2 Organigramme de la conception	33
<hr/>	
Figure 4.1 : Relation voie de calcul et voie expérimentale.....	38
Figure 4.2 : Fonction globale du banc d'essai d'impact.....	39
Figure 4.3 : Structure générale d'une machine	40
Figure 4.4 : Structure organisationnelle du banc d'essai impacteur	40
Figure 4.5 : Schéma cinématique minimale de la solution retenue	44
Figure 4.6 : quelques prototypes CAO des pièces de la machine d'impact.....	45
Figure 4.7 : quelques prototypes CAO des pièces de la machine d'impact.....	45
Figure 4.8 : Vue en perspective du prototype de la machine à impacter.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : caractéristiques des formes les principales	11
Tableau 1.2 : Effets associé à la forme de l'impacteur	1
Tableau 1.3 : French Translation.	13
<hr/>	
Tableau 2.1 : Quelques contacts employés dans les laboratoires.....	19
Tableau 2.2 : Équations pour les distributions de pression de surface sous l'indenteur pour différents types d'indentations	25
Tableau 4.1 : Classification des sources d'énergie électrique	41
Tableau 4.2 : Classification des systèmes de transmission de puissance.....	42
Tableau 4.3 : Classification des Formes impacteur.....	43

SOMMAIRE

Introduction générale.....	2
Chapitre 01 : Généralités sur les machines d'impact	
1.1 Introduction	4
1.2. Définition d'une machine d'impact.....	4
1.3. Principe de fonctionnement	5
1.4 Types de machines d'impact.....	6
1.4.1 Machines d'essai d'impact Charpy	6
1.4.2 Machines d'essai de chute de poids	7
1.4.3 Machines à chute libre.....	7
1.4.4 Machines électromagnétiques.....	8
1.4.5 Machines hydrauliques et pneumatiques.....	8
1.4.6 Simulateurs d'impact pour l'automobile et l'aéronautique	9
1.5 Applications des machines d'impact.....	9
1.5.1 Applications dans le secteur aéronautique	9
1.5.2 Applications dans l'industrie automobile.....	10
1.5.3 Applications en électronique	10
1.5.4 Applications en recherche scientifique et développement	10
1.5.5 Autres applications industrielles.....	10
1.6 Formes de l'impacteur.....	10
1.7 L'effet de la forme impacteur.....	11
1.7.1 Mode d'absorption de l'énergie.....	12
1.7.2 Vitesse et durée de l'impact.....	12
1.8 Méthodes d'essai d'impact.....	12
1.9. Normes ASTM et ISO.....	15
1.10. Conclusion.....	16
Chapitre 02 : Théorie d'impact	
2.1. Introduction	18
2.2 Système de Contact	18
2.2.1 Mode de contact	18
2.2.2. La charge	19
2.2.3. Vitesse	20
2.2.4. Etat de Surface	20
2.2.5. Environnement	20

2.2.6. Type des Matériaux	20
2.3. Principe de l'analyse d'un système de contact	21
2.4. Théorie de mécanique du contact	21
2.4.1. Théorie du contact de Hertz	23
2.4.2. Contraintes et déformations résultant du contact entre deux solides	24
2.4.3. Contraintes de contact	24
2.4.4. Déformations résultantes	25
2.5. Relation entre Machine d'impact a théorie de contact	26
2.5.1. Phases du contact lors l'action d'impact	26
2.5.2. Paramètres importants	26
2.6 Conclusion.....	27

Chapitre 03 : Processus de conception d'un produit

3.1. Introduction.....	29
3.2. Etapes de la conception.....	29
3.2.1. Analyse du besoin client	29
3.2.2 Etude de faisabilité.....	29
3.2.3. Avant-projet	31
3.3. Paramètres de conception d'un produit.....	32
3.4. Conception assistée par ordinateur.....	32
3.4.1. Etapes de la CAO.....	33
3.4.2. Avantages de la CAO.....	34
3.5. Logiciel de CAO	35
3.6. Conclusion	36

Chapitre 04 : Conception de la machine à impact

4.1 Introduction	38
4.2 Etude de conception	38
4.2.1 Enoncé du besoin	39
4.2.2 Solution et modèle conceptuel	39
4.2.3 Recherche et choix des solutions.....	40
4.2.3.1 Solutions pour sources d'énergie électrique	41
4.2.3.2 Solutions pour transmission de puissance	41
4.2.3.3 Solutions pour chariot d'impact.....	43
4.2.4 Présentation de la solution.....	43
4.3 Etude de définition	44

4.3.1 Prototype pièce en CAO.....	44
4.3.2 Prototype sous-ensemble	45
4.3.3 Prototype assemblage en CAO.....	46
4.4 Conclusion.....	46
Conclusion générale	48
Références bibliographiques.....	50

NOMOCCLATURE

Symbol	Désignation	Unité
a	Rayon de la surface de contact circulaire entre les deux corps	m
ν	Coefficient de Poisson du matériau	/
FN	Force normale appliquée (force d'écrasement)	N
R	Rayon de courbure de la surface en contact	m
E	Module d'élasticité de Young du matériau	Pa
δ	Enfoncement (approfondissement) maximal	m
$p(\mathbf{r})$	Pression de contact à une distance r du centre	Pa
p_0	Pression de contact maximale au centre de la zone de contact	Pa
r	Distance radiale à partir du centre de la zone de contact	m
E	Énergie cinétique transférée pendant le choc	J
F	Force maximale appliquée sur la surface du matériau.	N
Δt	Durée pendant laquelle l'impacteur est en contact avec le matériau	S
σ_z	Contrainte normale suivant l'axe z	Pa
P_m	Pression maximale au centre de la zone de contact	Pa

***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***

Dans un contexte marqué par l'évolution rapide des technologies et l'augmentation constante des exigences en matière de performance, l'étude du comportement des matériaux soumis à des sollicitations dynamiques devient cruciale pour garantir la fiabilité et la qualité des produits industriels. Les machines d'impact jouent, un rôle fondamental. Elles constituent des outils indispensables dans l'évaluation de la résistance des matériaux, en fournissant des données expérimentales permettant d'analyser leur capacité à absorber l'énergie et à résister aux ruptures. Ces équipements sont particulièrement importants dans le cadre des recherches académiques, car ils permettent de comprendre les mécanismes de rupture, d'optimiser les choix des matériaux et de contribuer à l'amélioration des normes de sécurité. Ils représentent ainsi une passerelle essentielle entre les connaissances théoriques acquises durant la formation et les exigences pratiques du monde industriel.

L'analyse des phénomènes d'impact repose principalement sur les fondements de la mécanique du contact, une discipline qui étudie les interactions entre deux surfaces en contact, souvent non conformes. Bien que la zone de contact soit généralement très limitée par rapport à la taille des corps concernés, elle est le siège de fortes concentrations de contraintes, susceptibles d'initier des endommagements. Il est donc indispensable de modéliser et de comprendre cette zone critique pour anticiper le comportement global du matériau ou de la structure.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous proposons d'étudier en profondeur les différents types de machines d'impact, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs domaines d'application. Nous aborderons également les aspects théoriques liés à la mécanique du contact et à sa modélisation analytique. Enfin, une attention particulière sera portée au processus de conception d'un système d'impact, en mettant en avant les outils modernes tels que la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), qui joue aujourd'hui un rôle central dans la gestion efficace des projets complexes.

Ce travail vise ainsi à combiner l'approche théorique et l'expérimentation pratique, dans le but de développer une compréhension approfondie du comportement des matériaux sous impact, tout en maîtrisant les différentes étapes de la conception, du dimensionnement et de la validation expérimentale.

Chapitre 01

Généralités sur les machines d'impact

1.1 INTRODUCTION

Les machines d'impact jouent un rôle central dans le contrôle qualité : elles permettent de valider les performances des matériaux, de sélectionner les solutions les plus adaptées, et d'optimiser les conceptions. Elles sont également essentielles en recherche et développement, pour analyser en profondeur le comportement des matériaux sous contrainte dynamique et améliorer leur performance[1]. Enfin, l'importance des machines d'impact s'étend à la recherche académique, où elles permettent d'explorer les mécanismes de rupture et de dissipation d'énergie dans divers matériaux, contribuant ainsi à l'amélioration des normes de sécurité et des standards industriels. Ce chapitre explore en détail les machines d'impact, leurs principes de fonctionnement, les différents types ainsi que leurs principales applications dans l'industrie et la recherche scientifique [2].

1.2. DEFINITION D'UNE MACHINE D'IMPACT

Une machine d'impact est un système mécanique conçu pour appliquer une force soudaine et intense sur un matériau, un composant ou une structure, afin d'évaluer sa résistance aux chocs. Ces machines sont essentielles dans divers domaines, de la recherche et développement à l'assurance qualité industrielle [3]. Une machine d'impact génère un impact contrôlé pour étudier le comportement des matériaux et des structures sous des charges dynamiques (**figure 1.1**). Elle permet de mesurer des propriétés telles que la résistance aux chocs, la ténacité et la ductilité

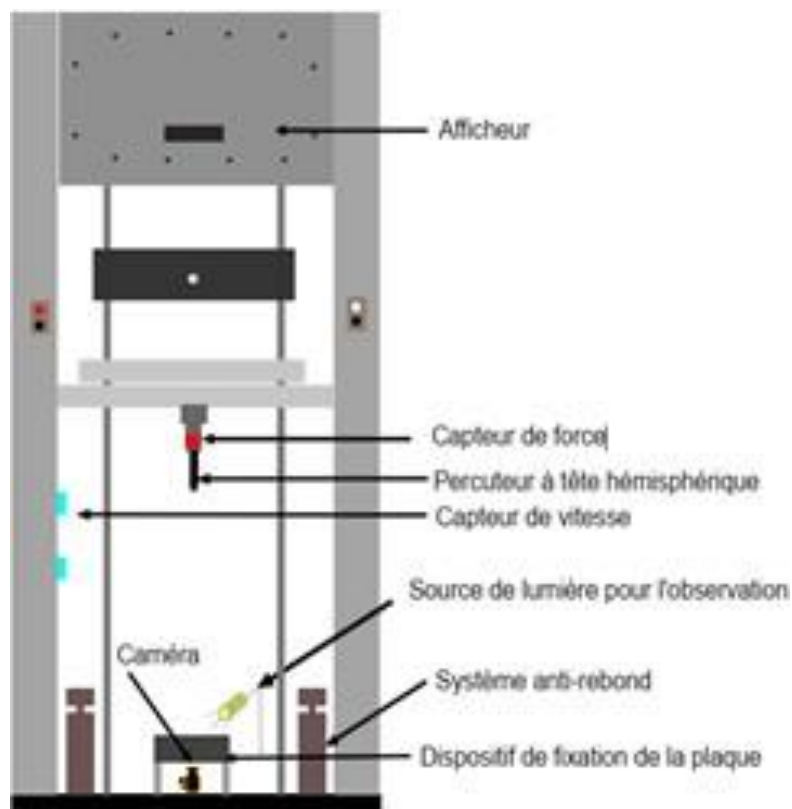


Figure 1.1 : Machine d'impact [4]

1.3. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement d'une machine d'impact repose sur plusieurs principes fondamentaux :

1. **Libération rapide d'énergie** : L'énergie stockée est convertie en énergie cinétique et appliquée à l'échantillon sous forme de choc.
2. **Transmission de l'impact** : Un percuteur ou un marteau entre en contact avec l'échantillon, générant une force d'impact contrôlée. [5]
3. **Mesure et analyse des résultats** : Les capteurs et systèmes de mesure enregistrent des paramètres tels que la force, la vitesse, la déformation et l'absorption d'énergie pour caractériser le comportement du matériau soumis à l'impact.[5]
4. **Accumulation d'énergie** : L'énergie est stockée sous forme potentielle (gravité, ressorts, air comprimé, champ électromagnétique, etc.). L'accumulation d'énergie est une phase essentielle dans le fonctionnement des machines d'impact. Elle peut se faire de différentes manières :
 - **Énergie gravitationnelle** : Utilisée dans les machines à chute libre et les pendules, où une masse est élevée à une certaine hauteur avant d'être relâchée. Cette énergie potentielle gravitationnelle est directement proportionnelle à la masse de l'objet et à la hauteur de chute selon la relation : où est l'énergie potentielle (en joules), la masse (en kg), l'accélération due à la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$) et la hauteur de chute (en mètres)[5].
 - **Énergie pneumatique ou hydraulique** : Utilisée dans les machines à air comprimé ou à fluide sous pression. Cette énergie est stockée dans un réservoir sous forme d'air ou de liquide sous haute pression, puis libérée de manière contrôlée pour propulser un percuteur. Les systèmes pneumatiques utilisent de l'air comprimé stocké dans un cylindre pour générer un mouvement rapide et puissant, tandis que les systèmes hydrauliques exploitent un fluide incompressible, généralement de l'huile, pour transmettre une force avec précision et constance. Les machines hydrauliques sont souvent préférées pour les applications nécessitant une force élevée et une bonne maîtrise de la vitesse [5] .
 - **Énergie électromagnétique** : Exploitée dans certaines machines modernes où un champ magnétique propulse un projectile à grande vitesse. Cette énergie est générée par des bobines électromagnétiques qui créent un champ puissant capable d'accélérer un percuteur en très peu de temps.

Ces machines sont utilisées dans des applications nécessitant des impacts ultra-rapides et précis, comme les essais balistiques ou les expériences sur les matériaux avancés. L'efficacité du processus d'accumulation d'énergie influence directement la précision et la reproductibilité des essais d'impact. Une bonne maîtrise de cette phase garantit des tests fiables et représentatifs des conditions réelles d'utilisation des matériaux [5].

1.4 TYPES DE MACHINES D'IMPACT

Les machines d'impact sont des outils essentiels dans de nombreux secteurs industriels, utilisés pour marquer, graver ou tester la résistance des matériaux. Voici une présentation détaillée des différents types de machines d'impact [6].

1.4.1 Machines d'essai d'impact Charpy

Ces machines mesurent la résistance des matériaux aux chocs en appliquant un coup de marteau pendulaire (**figure1.2**). Elles sont utilisées pour évaluer la fragilité et la ténacité des matériaux.[6]. L'échantillon est soutenu aux extrémités et frappé au centre. Cet essai est particulièrement utilisé pour évaluer la transition ductile-fragile des matériaux [7].



Figure 1.2: Machine d'essai au choc de pendule d'izod pour charpy [8]

Les Caractéristiques principales de la machines d'impact charpy sont :

- Énergie mesurée : Ces essais déterminent l'énergie nécessaire pour provoquer la rupture du matériau
- Forme des échantillons : Les éprouvettes ont généralement une entaille en V ou en U pour concentrer les contraintes.
- Vitesse d'impact : Le pendule frappe l'échantillon avec une vitesse spécifique normalisée.
- Normes applicables : **ISO 148**, **ASTM E23**, pour l'essai Charpy ; **ASTM D256** pour l'essai Izod sur les polymères.

1.4.2 Machines d'essai de chute de poids

Ces machines mesurent la résistance des matériaux aux chocs en laissant tomber un poids sur un échantillon (**figure1.3**). Elles sont utilisées pour tester la résistance des matériaux aux chocs à haute énergie[8].



Figure 1.3: Machine d'essai de chute de poids[8]

Les caractéristiques principales de ces machines sont :

- Forme des échantillons : Les éprouvettes ont généralement une entaille en V ou en U pour concentrer les contraintes[5].
- Vitesse d'impact : Le pendule frappe l'échantillon avec une vitesse spécifique normalisée[5].
- Normes applicables : **ISO 148** , **ASTM E23**, pour l'essai Charpy ; **ASTM D256** pour l'essai Izod sur les polymères[5].

Les matériaux concernés par les essais sur les machines d'essai de chute de poids sont :

- Métaux : Évaluation de la résilience des aciers et alliages dans des conditions de température variées.
- Plastiques : Test de résistance aux chocs pour les polymères et composites.
- Composites : Étude de la ténacité et de la propagation des fissures.

Ces essais sont essentiels dans l'industrie pour garantir la robustesse des matériaux utilisés dans les infrastructures, les véhicules et les équipements soumis à des contraintes mécaniques importantes[5].

1.4.3 Machines à chute libre

Ces machines utilisent un poids lâché d'une hauteur déterminée pour générer un impact sur l'échantillon (**figure1.4**). L'énergie est calculée en fonction de la masse du poids et de la hauteur de chute[5].

Leur avantage se résume dans leur simplicité et leur coût réduit. Ce type de machine convient pour les essais sur matériaux plastiques, composites, et biomatériaux.

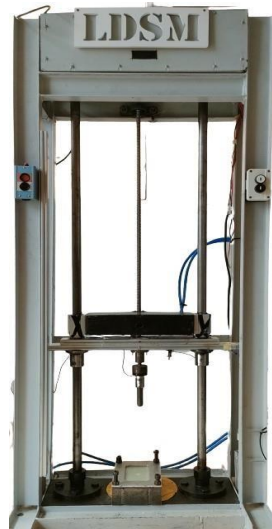


Figure1.4 : Machines à chute libre

1.4.4 Machines électromagnétiques

Ces machines contrôlent précisément la vitesse et l'énergie d'impact en accélérant un percuteur dans la direction de l'échantillon à l'aide d'un champ magnétique (**figure1.6**). Leur répétabilité exceptionnelle, leur haute précision et leur capacité à modifier précisément les conditions de test les distinguent. Ils sont particulièrement utilisés dans les tests à grande vitesse sur les matériaux avancés et les tests de composants électroniques [6].

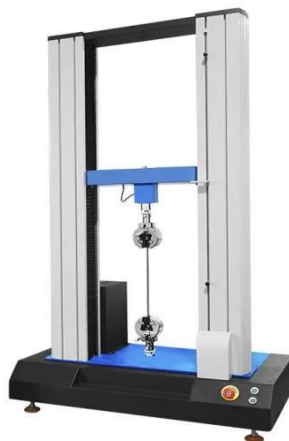


Figure1.6 : Machines électromagnétiques[6].

1.4.5 Machines hydrauliques et pneumatiques

Ces machines utilisent un fluide sous pression, comme de l'air comprimé ou de l'huile, pour actionner un piston ou un frappeur, produisant un impact. Elles offrent une excellente résistance aux charges lourdes, un contrôle précis des chocs, et une force qui peut être ajustée en fonction des

besoins. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés aux tests de métaux et de polymères, aux tests de fatigue et aux simulations de collision [6].



Figure 1.7 : Machines hydrauliques et pneumatiques[6].

1.4.6 Simulateurs d'impact pour l'automobile et l'aéronautique

Ces machines sont conçues pour reproduire des scénarios d'impact réalistes à grande échelle. Bancs de crash-test : Utilisés dans l'industrie automobile pour tester la sécurité des véhicules[5]. Permettent d'étudier les effets des débris spatiaux sur les matériaux[5].

1.5 APPLICATIONS DES MACHINES D'IMPACT

Les machines d'essai d'impact jouent un rôle crucial dans l'évaluation de la résistance des matériaux face à des contraintes soudaines. Elles sont conçues pour reproduire des conditions de choc mécanique ou thermique, permettant ainsi d'étudier le comportement dynamique des matériaux ou des composants lorsqu'ils sont soumis à des forces rapides et intenses. Ces tests permettent d'identifier la fragilité, la ténacité ou la résilience d'un matériau, ce qui est fondamental pour garantir la sécurité et la fiabilité des produits finis.

1.5.1 Applications dans le secteur aéronautique

Dans l'industrie aéronautique, la sécurité est une priorité absolue. Les matériaux utilisés pour les fuselages, ailes, trains d'atterrissage et autres composants structurels doivent pouvoir résister à des impacts violents (chocs d'oiseaux, fragments de débris, etc.). Les essais d'impact permettent **(figure1.8):**

- Simuler les conditions d'accident ou de collision.
- Évaluer la performance des matériaux composites et alliages légers.
- Optimiser les conceptions structurelles en fonction des contraintes d'impact.

1.5.2 Applications dans l'industrie automobile

Les essais d'impact sont essentiels dans le développement des véhicules afin de garantir la sécurité des passagers. On les utilise pour :

- Tester la résistance des pare-chocs, airbags, et châssis.
- Étudier les effets des collisions à différentes vitesses.
- Développer des matériaux absorbant l'énergie pour la sécurité passive.

1.5.3 Applications en électronique

Les appareils électroniques, tels que les téléphones portables, ordinateurs ou composants embarqués, doivent résister à des chocs lors de leur utilisation quotidienne ou lors de leur transport.

Les tests d'impact sont utilisés pour :

- Vérifier la résistance des boîtiers et circuits imprimés.
- Évaluer la durabilité des composants soumis à des chutes ou vibrations.
- Certifier la conformité aux normes de robustesse.

1.5.4 Applications en recherche scientifique et développement

Dans les laboratoires de recherche, les machines d'impact sont utilisées pour :

- Étudier le comportement de nouveaux matériaux (polymères, alliages, composites, etc.).
- Modéliser les mécanismes de rupture à différentes températures.
- Comparer la performance de différentes formulations de matériaux sous chocs thermiques ou mécaniques.

1.5.5 Autres applications industrielles

Les industries telles que le **bâtiment**, les **équipements sportifs** ou les **emballages** utilisent également ces essais pour :

- Tester la résistance aux chocs des vitrages de sécurité, casques, équipements de protection.
- Évaluer les matériaux d'emballage face aux contraintes de transport.
- Certifier les produits selon des normes internationales (ISO, ASTM, etc.)[9].

1.6 LES FORMES DE L'IMPACTEUR

Lors des essais d'impact, la forme de l'extrémité de l'impacteur joue un rôle crucial dans la manière dont l'énergie est transmise au matériau. Voici les principales formes utilisées, avec leurs caractéristiques (**Tableau 1.1**)



Figure 1.13: Formes de l'impacteur : a) Plan, b) Sphérique, c) ogival, d) Conique[6].

Tableau 1.1 : caractéristiques des formes les principales			
Formes de l'impacteur	Description	Effet sur le matériau	Utilisation typique
Impact plan	L'impacteur possède une surface plate	<i>L'énergie est répartie sur une large surface, ce qui provoque un écrasement ou une déformation superficielle importante.</i>	<i>Idéal pour observer la résistance globale à la déformation.</i>
Impact sphérique	<i>L'extrémité est en forme d'hémisphère ou de boule</i>	<i>Le contact initial est localisé, ce qui permet de simuler des impacts doux ou progressifs, provoquant une déformation localisée.</i>	<i>Représente des conditions d'impact à haute vitesse, comme celles causées par des projectiles.</i>
Impact ogival	<i>L'impacteur a une forme allongée et profilée, similaire à une ogive (comme un projectile).</i>	<i>Moins de résistance à la pénétration grâce à sa forme aérodynamique, ce qui permet d'observer des dommages profonds ou perforants.</i>	
Impact conique	<i>L'extrémité forme un cône pointu.</i>	<i>L'énergie est concentrée en un point très précis, provoquant une perforation nette et rapide.</i>	<i>Adapté aux essais de pénétration ou aux tests de résistance aux perforations.</i>

1.7 L'effet de la forme impacteur

La forme de l'impacteur joue un rôle fondamental dans la manière dont l'énergie de l'impact est transférée au matériau. Elle influence directement les éléments tel que :

- *La distribution des contraintes (forces internes)*
- *La localisation de l'endommagement*
- *Le type de rupture ou de déformation*

L'effet d'un impacteur sur une pièce d'essai est résumé dans le **tableau 1.2** [10].

Tableau 1.2 : L'effet d'un impacteur.

Les impacteurs	caractéristique	Résultat	Type de dommage
larges	<i>La pression est répartie sur une grande surface.</i>	<i>Déformation globale sans concentration de contraintes.</i>	<i>Déformation plastique ou élastique généralisée.</i>
plats	<i>La pression est répartie sur une grande surface.</i>	<i>Déformation globale sans concentration de contraintes.</i>	<i>Déformation plastique ou élastique généralisée.</i>
pointus	<i>La pression est concentrée sur une petite surface.</i>	<i>Forte concentration de contraintes. Perforation ou fissuration locale.</i>	<i>Dommages localisés avec risque de perforation ou fracture.</i>
coniques	<i>La pression est concentrée sur une petite surface.</i>	<i>Forte concentration de contraintes. Perforation ou fissuration locale.</i>	<i>Dommages localisés avec risque de perforation ou fracture.</i>
hémisphérique	<i>Le contact commence par une petite surface et s'élargit progressivement pendant l'impact.</i>	<i>Concentration locale de contraintes → Déformation locale, fissuration possible, risque de perforation selon l'énergie d'impact.</i>	<i>Déformation locale, fissures, indentation, possible perforation .</i>

1.7.1 Mode d'absorption de l'énergie

Les impacteurs plats permettent au matériau d'absorber l'énergie sur une grande zone d'où une meilleure capacité d'amortissement. Les impacteurs pointus limitent l'amortissement ce qui concentre l'énergie en un point d'où augmentation du risque de rupture rapide.

1.7.2 Vitesse et durée de l'impact

Les impacteurs plats provoquent un impact plus "long" avec une montée de force plus progressive. Les impacteurs pointus causent un impact rapide et brutal d'où dommages plus soudains. En général, la forme plate amortit l'impact, la forme hémisphérique a un effet modéré, tandis que La forme conique génère un impact agressif avec un effet de pénétration[11].

1.8 Méthodes d'essai d'impact

Comprendre comment un matériau réagit lorsqu'il est soumis à un choc soudain est essentiel, surtout lorsqu'il est utilisé dans des domaines critiques comme l'aéronautique, l'automobile ou le bâtiment. Pour cela, on utilise ce qu'on appelle des essais d'impact, réalisés à l'aide de machines spécialement conçues pour simuler différentes conditions de choc. La (**figure1.10**) présente les cinq types principaux de dispositifs utilisés pour ce genre de tests.

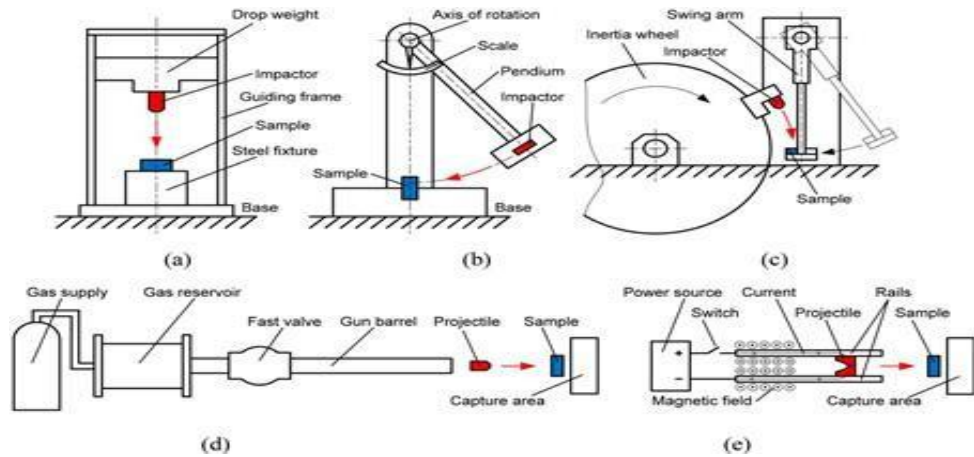


Figure 1.10: Schéma des méthodes d'essai d'impact[6].

English Term	French Translation
Drop weight	Poids de chute
Impactor	Impacteur
Guiding frame	Cadre de guidage
Sample	Échantillon
Steel fixture	Fixation en acier
Base	Base
Axis of rotation	Axe de rotation
Scale	Échelle
Pendulum	Pendule
Swing arm	Bras oscillant
Inertia wheel	Roue d'inertie
Gas supply	Alimentation en gaz
Gas reservoir	Réservoir de gaz
Fast valve	Soupape rapide
Gun barrel	Canon
Projectile	Projectile
Capture area	Zone de capture
Power source	Source d'alimentation
Switch	Interrupteur
Current	Courant
Rails	Rails
Magnetic field	Champ magnétique

Tableau 1.3 : French Translation.

L'appareil de test d'impact est composé de plusieurs éléments essentiels qui assurent le bon déroulement de l'essai. La masse de chute (Drop Weight) génère l'impact par un mouvement de chute libre. L'impacteur (Impactor) est la pièce qui entre en collision directe avec l'échantillon. Ce mouvement est guidé verticalement grâce au cadre de guidage (Guiding Frame), garantissant une trajectoire précise. L'échantillon (Sample), représenté en bleu, est la pièce soumise à l'essai. Il est solidement maintenu en place par une fixation en acier (Steel Fixture), qui assure sa stabilité pendant l'impact. L'ensemble du dispositif repose sur une base (Base) robuste, qui soutient toute la structure de l'équipement[12].

(a) L'essai par pendule

Un pendule est utilisé pour frapper l'échantillon. Ce type d'essai permet de calculer l'énergie absorbée par la pièce lors de la rupture. Il est souvent utilisé dans les essais Charpy ou Izod, très courants dans l'industrie. C'est une méthode rapide, efficace et facile à mettre en œuvre pour évaluer la ténacité des matériaux.

Le bon fonctionnement du dispositif de choc du pendule est assuré par une série de composants essentiels. Le bras oscillant qui accumule de l'énergie potentielle lorsqu'il est élevé et la libère sous forme d'énergie cinétique lorsqu'il descend est connu sous le nom de pendule. Au point d'impact, la masse d'impact ou impacteur qui est attachée à ce bras entre en contact direct avec l'échantillon. L'énergie absorbée par l'échantillon pendant le test peut être mesurée à l'aide de l'échelle de mesure. Le mouvement du pendule est guidé par un axe de rotation central. La base garantit la stabilité et la fixation de tout l'appareil, tandis que l'échantillon est placé précisément au point d'impact[13].

(b) L'essai par roue d'inertie

Une roue tournant à très grande vitesse stocke de l'énergie pour le test de la roue d'inertie, une technique d'essai dynamique. Le bras oscillant un bras articulé qui transfère l'énergie à une masse de frappe (l'impacteur) est propulsé par l'énergie accumulée une fois qu'il atteint le niveau souhaité. Il frappe très fort l'échantillon cible (Sample). Ce mécanisme permet d'atteindre des vitesses d'impact nettement supérieures à celles des méthodes classiques. En conséquence, cet appareil est particulièrement bien adapté pour étudier le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes de chargement rapide, comme les chocs violents ou les forces impulsives. Le bras oscillant, l'impacteur, l'échantillon et la roue d'inertie sont les principales parties de ce système[14].

(c) L'essai par canon à gaz

Cette méthode utilise un gaz (l'hélium, l'azote ou simplement de l'air comprimé) comprimé pour propulser un petit projectile contre un échantillon. Il est particulièrement utilisé pour simuler des impacts rapides, similaires à ceux que les matériaux peuvent subir lors de collisions ou

d'explosions. Ce type de test permet de mieux comprendre le comportement des matériaux composites et des polymères soumis à des vitesses élevées. L'appareil se compose de plusieurs éléments : l'alimentation en gaz qui fournit le gaz nécessaire, un réservoir de gaz comprimé qui stocke le gaz sous pression, une vanne rapide qui permet au gaz d'être libéré soudainement, un canon à travers lequel le projectile est propulsé, le projectile lui-même qui entre en collision avec l'échantillon, et enfin une zone de capture qui permet de récupérer le projectile après l'impact[15].

(d) L'essai par lanceur électromagnétique

Cette technologie accélère un projectile en utilisant un champ magnétique plutôt que des composants mécaniques mobiles. Il est fréquemment utilisé dans des environnements de recherche de pointe ou pour l'étude de phénomènes physiques complexes car il permet d'atteindre des vitesses extraordinairement élevées. Les rails guident le projectile au moment de l'accélération, le projectile lui-même est propulsé vers l'échantillon, une zone de capture permet de récupérer le projectile après impact pour analyse, un interrupteur permet de contrôler le déclenchement, un courant électrique circule à travers le système pour générer un champ magnétique, et une source d'alimentation fournit l'énergie nécessaire[16].

Chaque méthode d'essai d'impact a ses avantages et est choisie en fonction du type de matériau testé et des conditions réelles que l'on souhaite reproduire. Ces dispositifs permettent non seulement de mesurer la résistance des matériaux, mais aussi de mieux comprendre leur comportement sous des conditions extrêmes, afin de garantir leur fiabilité dans des applications réelles.

1.9. Normes ASTM et ISO

Les matériaux composites et leurs essais nécessitent une normalisation pour garantir un niveau de qualité constant, indispensable au libre-échange et aux aspects de responsabilité. Avec les progrès de la mondialisation, les différents systèmes de normalisation utilisés par différents pays sont de plus en plus harmonisés. Par exemple, dans le domaine des essais d'impact des matériaux composites, de nombreuses normes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ont été harmonisées. Bien que ces normes soient représentées par des codes différents, leur contenu technique partage des spécifications et des paramètres communs. L'harmonisation permet des économies de coûts, une simplification de l'évaluation et une meilleure comparabilité. Au fil du temps, les normes EN des pays européens ont été remplacées par des normes ISO équivalentes. Les pays occidentaux ont tendance à suivre l'ASTM ou l'ISO, tandis que les pays asiatiques préfèrent l'ISO ou leurs normes nationales (Raj et al. 2021; Sims1999)[17]. Tableau 2 répertorie les normes ASTM et ISO pertinentes pour les essais

d'impact. L'ASTM D256 et son équivalent ISO 180 recommandent l'Izod comme méthode d'essai standard plutôt que Charpy pour les essais d'impact à faible vitesse (Raj et al. 2021). Pour les essais d'impact à grande vitesse, la surface endommagée est plus localisée, la réponse structurelle est donc moins importante, et un dimensionnement uniforme n'est donc pas pertinent. Il n'existe donc aucune normalisation des dimensions des éprouvettes utilisées dans les essais d'impact à grande vitesse (Duell).2004). Outre la description détaillée des normes ASTM et ISO relatives aux essais d'impact, il est impératif de reconnaître leurs limites. L'une d'elles réside dans leur portée, qui peut ne pas englober tous les types de composites ou scénarios d'impact, ce qui peut entraîner des lacunes dans les protocoles d'essai.

De plus, les difficultés pratiques liées à la mise en œuvre des normes, telles que le besoin d'équipements spécialisés ou la complexité des procédures, peuvent freiner leur adoption généralisée. Les critiques formulées par les milieux universitaires et industriels soulignent également le manque de flexibilité de ces normes, qui risquent de ne pas suivre le rythme rapide des avancées technologiques dans le domaine des matériaux composites[18] .

1.10. CONCLUSION

Les machines d'impact sont essentielles pour analyser le comportement des matériaux soumis à des charges dynamiques. Les essais d'impact permettent d'évaluer les propriétés des matériaux composites, cruciaux pour des applications aérospatiales, automobiles et marines. On distingue plusieurs méthodes selon la vitesse d'impact : faible vitesse (Charpy, Izod, chute de masse), moyenne vitesse (roue d'inertie, systèmes servo-hydrauliques), et haute vitesse (canons à gaz, électromagnétiques).

Les normes ASTM sont largement utilisées, mais parfois limitées en portée et adaptabilité. Les simulations numériques, via des logiciels FEM comme Abaqus/Explicit, LS-DYNA ou Ansys Explicit Dynamics, complètent les tests expérimentaux en offrant des analyses moins coûteuses, variées et détaillées, bien qu'approximatives. Une corrélation expérimentale est souvent nécessaire. L'approche hybride (expériences + simulation) est recommandée pour une compréhension complète du comportement à l'impact. Les recherches futures devraient viser à développer des normes plus inclusives, explorer des solveurs alternatifs, et étudier les composites moins représentés (MMC, CMC), ainsi que l'effet de surfaces inclinées ou courbes sur les dommages.

Chapitre 02

THEORIE D'IMPACT

2.1. Introduction

Les théories d'impact en générale basée sur la mécanique du contact. Ce phénomène QUI définit la relation entre les surfaces non conformes est devenu un sujet à part entière dans le domaine de la mécanique appliquée. Les contraintes de contact deviennent aussi une partie intégrée de la distribution générale des contraintes dans les corps, et ne peuvent être séparées. Dans ce chapitre on va expliquer la notion des mécaniques de contact et leur modélisation analytique à savoir les différents principes de contacts qui sont mis en jeu et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent la nature et le fonctionnement de chaque contact.

La zone de contact entre les corps non-conformes est généralement petite par rapport aux dimensions des corps eux-mêmes ; les contraintes sont fortement concentrées dans la région proche de la zone de contact et sont peu influencées par la forme des corps à distance du point de contact. Ce sont ces circonstances qui seront principalement traitées dans ce chapitre[19].

2.2 Système de Contact

Pour caractériser une situation de contact mécanique, il importe dans un premier temps d'identifier les différents contacts qui sont mis en jeu et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent la nature et le fonctionnement de chaque contact.

2.2.1 Mode de contact

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participent à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. La géométrie du contact caractérise la forme générale des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. Les contacts rencontrés en génie mécanique se regroupent en trois grandes familles :

- les contacts de type ponctuel, (sphère/plan, roues/rails, roulements à billes,) [20].
- les contacts linéiques (par exemples, cylindre/plan, roulements à rouleaux...).
- les contacts surfaciques (par exemples, parallélépipède/plan, emmanchements serrés, étanchéités faciales, contacts garnitures/disque de freins...).

Ces familles sont schématisées (**figure 2.1**).

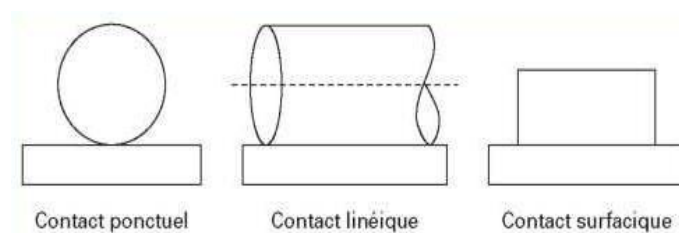


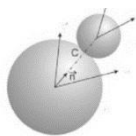
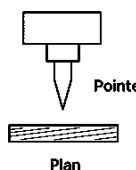
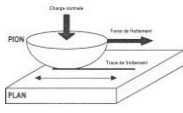
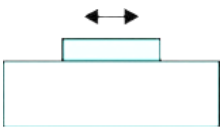
Figure 2.1: Schématisation des trois familles de contacts

2.2.2. La charge

Il s'agit de déterminer le **tenseur dynamique**, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auxquels est soumis le contact. La charge (ou effort normal) et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. Le champ de contraintes qui se développe dans les couches superficielles des solides en contact est toujours triaxial et comporte, suivant les zones considérées, des contraintes de différentes natures (tensions, compressions, contraintes de cisaillement ou scissions), même si le tenseur dynamique se réduit à une force uni axiale normale à la surface de contact.

Ce champ de contraintes va permettre de déterminer la limite en charge que peut supporter le contact (**Tableau 2.1**). Cette limite est imposée par la résistance mécanique des matériaux. Au-delà de cette limite, il se produira des déformations irréversibles (dites plastiques) dans les matériaux à caractère ductile, et il existe des possibilités de rupture dans les matériaux à caractère fragile. De nombreux types charge du contact sont couramment utilisés pour étudier les phénomènes des impacts, le tableau ci-dessus en présente quelques exemples des charge du contact[21] :

Tableau 2.1 : Quelques contact employés dans les laboratoires[22].

Principe	Vitesse de glissement m/s	Charge du contact (N)	Procédure
<p>Sphère / Sphère</p> 	0.01 à 1	0.1 à 500	<ul style="list-style-type: none"> Étude de la déformation et du contact élastique. Mesure du frottement et de l'usure. Utilisé dans les essais de collision.
<p>Pointe / Plan</p> 	0.001 à 0.1	1 à 200	<p>Essais de pénétration et de dureté. Mesure de la résistance à l'indentation. Essai de rayure (scratch test).</p>
<p>Sphère/ plan</p> 	0.0002 à 0.1	0.002 à 200	<ul style="list-style-type: none"> Mesure du coefficient de frottement. Mesure de l'usure. Mesure de la température de contact. Température contrôlée (jusqu'à 1000° c)
<p>Plan/plan</p> 	2.10⁻⁵	Pression 0.05/0.3MPa	<ul style="list-style-type: none"> Mesure du coefficient de frottement.

2.2.3. Vitesse

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact (voir le tableau.2.2), c'est-à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant les composantes de ce torseur mises en jeu au niveau du contact, le déplacement peut s'effectuer en glissement, roulement, pivotement, impact, ou par une combinaison de ces quatre mouvements relatifs de base[23].

2.2.4. Etat de Surface

Le paramètre *état de surface* recouvre deux aspects fondamentaux de la description du contact l'état de surface micro géométrique et -l'état de surface physico-chimique. La micro géométrie est l'un des éléments d'appréciation de l'aire réelle de contact, des raideurs normales et tangentielles du contact, des résistances mécanique, électrique et thermique de l'interface, de l'aptitude à l'adhésion et de la perméabilité du contact dans le cas de l'étanchéité. Son rôle est capital en ce qui concerne le facteur de frottement. Les paramètres à prendre en compte sont accessibles par la topographie des surfaces[24].

2.2.5. Environnement

Il identifie le milieu dans lequel évolue le contact qui intervient sur le comportement tribologique du système par sa nature (liquide ou gaz), sa composition chimique, sa température, son débit éventuel, ses propriétés mécaniques et physiques, ses propriétés chimiques.

2.2.6. Type des Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux mais une propriété d'usage, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que métallurgiques, structurales et physicochimiques [25]. En générale, Un système impacté est relativement complexe du fait de la multiplicité des paramètres et des interactions possibles entre eux :

- conditions de sollicitations (rigidité d'impacteur, géométrie du contact, mode de mouvement, force, vitesse...),
- environnement : température, atmosphère (air à taux d'humidité variable, argon, azote, oxygène, vide),
- propriétés des matériaux (composition chimique, microstructure, orientation, température de fusion, module et limite d'élasticité, résistance à la rupture, dureté...) et des surfaces (rugosité, contamination, passivation)

2.3. Principe de l'analyse d'un système de contact

L'analyse un système impacté à atteindre la connaissance la plus précise possible des paramètres caractérisant un contact en adoptant la démarche suivante :

- Identification des différents contacts qui interviennent dans le mécanisme.
- Extraction, pour chacun des contacts, des *paramètres fonctionnels ou variables opérationnelles*. Ces paramètres seront quantifiés ou évalués de la manière la plus précise possible. Au cours du fonctionnement, ces paramètres sont en général affectés par des facteurs d'influence qui peuvent complètement modifier les valeurs initiales. Il sera donc nécessaire d'une part d'identifier ces facteurs, et d'autre part d'évaluer l'intensité de leur influence.
- Identification des *effets résultants* générés par le fonctionnement et évaluation de leur influence sur le contact.
- Détection des *processus physiques* qui peuvent se produire dans le contact et conduire à *l'endommagement* des surfaces. Il s'agit d'une phase fondamentale car elle est déterminante dans les orientations du choix des matériaux constitutifs des surfaces du contact.
- Affectation à chaque contact d'une ou plusieurs *fonctions impact* à remplir par ce contact.

Le choix final des matériaux de surface sera ensuite orienté de manière à assurer l'adéquation entre leurs propriétés superficielles et volumiques et les impératifs exigés par les fonctions mécaniques, thermiques et tribologiques des composants[26].

2.4. Théorie de mécanique du contact.

Lorsque l'on impacté deux solides sous charge normale F_N , l'aire A_0 de la zone de contact apparent dépend à la fois des propriétés mécaniques des deux solides et de leur forme au voisinage du contact (figure.2.2a). Dans de nombreuses situations pratiques, du fait de la rugosité des surfaces en regard, le contact réel (pour lequel la distance entre les deux objets est d'ordre moléculaire) est constitué d'une assemblée diluée de microcontacts de taille micrométrique. Son aire A est alors très inférieure à celle du contact apparent A_0 (voir Figure.2.2b) et contrôle pour une large part les phénomènes de frottement et d'adhésions [27]. Dans la plupart des situations pratiques, $A \ll A_0$

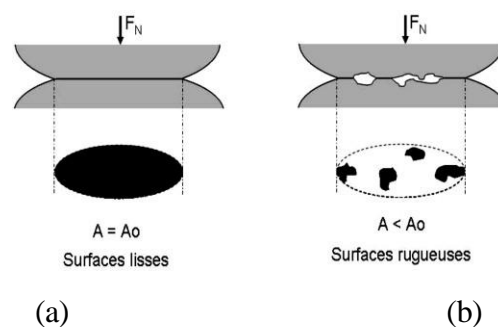


Figure 2. 2 : Aire A_0 du contact apparent en pointillés et aire A de contact réel en noir pour une interface lisse et une interface rugueuse.

De façon générale, l'étude des propriétés mécaniques du contact implique une double approche associée à deux échelles spatiales distinctes.

A l'échelle macroscopique, il s'agit de d'écrire l'équilibre mécanique des objets en contact. Cette approche nécessite d'introduire une équation constitutive empirique pour la réponse mécanique du contact (en pression et en cisaillement) qui traduit en moyenne le comportement microscopique de la jonction. Ainsi par exemple, le calcul classique de Hertz qui prédit les champs de contrainte et de déplacement de deux ellipsoïdes élastiques au contact sous charge normale [28]. A l'échelle microscopique, de nombreux modèles théoriques se sont attachés à d'écrire les processus à l'origine du comportement rhéologique moyen de la jonction.

Dans les modèles de Tabor et Greenwood précédemment évoqués, celle-ci est fixée par la taille des aspérités. Les propriétés de compressibilité de la couche résultent de la réponse élastique de chaque aspérité supposée sphérique et de la répartition statistique des hauteurs des sommets. Pour des matériaux durs, les phénomènes dissipatifs sont confinés dans une couche d'épaisseur moléculaire [29] où se localise le cisaillement lors du glissement : la réponse mécanique du contact reflète alors directement les propriétés rhéologiques de cette couche vitreuse quasi-bidimensionnelle. L'échelle pertinente est alors fixée par la distance entre points de réticulation du réseau polymères.

La seconde approche consiste à mesurer la réponse force/déplacement globale pour un contact étendu [30]. L'interprétation de ces mesures impose de faire une hypothèse d'homogénéité des contraintes ou de postuler une forme particulière de leur répartition spatiale au sein du contact. Ces mesures très indirectes ne peuvent donc pas rendre compte de phénomènes impliquant des variations rapides des champs mécaniques. Cette limitation pose problème pour plusieurs raisons :

- La géométrie de fracture des contacts conduit naturellement à des singularités des champs de contraintes en leur bord.
- Les lois de type Coulomb sont discontinues et sont donc elles-mêmes à l'origine de champs mécaniques non réguliers [31].
- Plusieurs modes de frottement mettent en jeu des échelles de déformations de petite taille par rapport au contact [32].

Afin de faire le lien entre échelles macroscopique et microscopique, il semble donc essentiel de réaliser des mesures mécaniques résolues spatialement à l'échelle d'un contact étendu et suffisamment précises pour rendre compte de modifications des propriétés microscopiques de la jonction.

Ce type de mesures, que nous qualifierons de mésoscopiques, a été jusqu'à présent peu d'enveloppé. Récemment, Rubinstein, Cohen et Fine berg [33] ont développé une méthode d'imagerie originale pour observer a des échelles de la fraction du contact la dynamique interfaciale d'un contact rugueux formé par la jonction de deux blocs de PMMA (Poly-Methylmethacrylate). Par interférométrie, ils ont pu reconstituer le profil de la distance bille/substrat qu'ils ont comparé au profil des contraintes prédit par la théorie de Hertz.

2.4.1. Théorie du contact de Hertz

En 1896, Hertz a calculé le champ des contraintes associées à un contact élastique sans frottement entre deux objets lisses, dont on connait la forme et les propriétés mécaniques. Ce problème peut se ramener à l'étude du contact entre un plan rigide et un ellipsoïde élastique. Pour simplifier, nous présenterons les résultats dans le cas particulier d'une sphère élastique de module de Young E , de coefficient de Poisson ν et de rayon de courbure R au contact avec un plan rigide (**Figure 2.3**). Lorsque la sphère est pressée contre le plan rigide sous charge normale F_N , elle s'enfonce d'une distance δ pour former une Zone de contact circulaire de rayon a . Lorsque $a \ll R$, pour des solides de taille $L \gg a$,

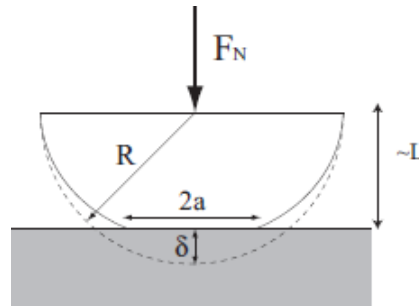


Figure 2.3 : Modèle du contact de Hertz entre une sphère et un plan rigide [34].

Théorie de Hertz a démontré les relations suivantes :

$$a = \left(\frac{3(1-\nu^2)F_N R}{4E} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9(1-\nu^2)^2 F_N^2}{16R E^2} \right)^{1/3} \quad (2.2)$$

$$p(r) = p_0(1-(r/a)^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$p_0 = \left(\frac{6F_N E^2}{\pi^3 R^2 (1-\nu^2)^2} \right)^{1/3} \quad (2.4)$$

2.4.2. Contraintes et déformations résultant du contact entre deux solides

Lorsqu'une force normale est appliquée entre deux solides, elle ne s'exerce pas en un point, mais sur une **zone de contact** limitée (figure 2.4) . Cette zone donne lieu à des **contraintes de contact** et à des **déformations internes**, décrites avec précision par la **théorie de Hertz** dans le cas de matériaux élastiques et d'un contact sans frottement.

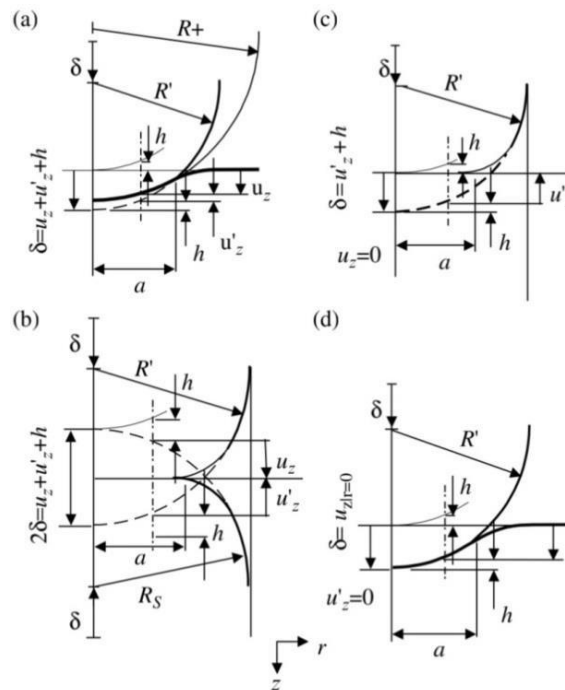


Figure 2.4 : Schéma du contact entre deux solides élastiques. (a) indentation sphérique non rigide et échantillon plat et non rigide; (b) deux sphères non rigides identiques; (c) indentateur sphérique non rigide et échantillon plat et rigide; (d) Rigide, indentation sphérique et spécimen plat, non rigide[34] .

2.4.3. Contraintes de contact

La **contrainte maximale** apparaît au **centre de la zone de contact** et diminue progressivement vers les bords (figure 2.5). La distribution des contraintes suit un profil semi-elliptique, donné par la relation :

$$p(r) = p_0 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^{1/2} \tag{2.5}$$

Où :

- $p(r)$ est la pression à une distance du centre,
- (p_0) est la pression maximale,
- (a) est le rayon de la zone de contact.
- Ces contraintes sont tridimensionnelles et peuvent induire des concentrations de contraintes critiques à l'intérieur des matériaux.

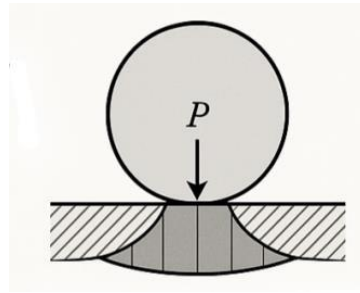


Figure 2.5: Contact bille-plan sous charge appliquée [34]

Tableau 2.1 Équations pour les distributions de pression de surface sous l'indenteur pour différents types d'indentations [34]:

Type de pénétrateur	Equation pour la distribution de pression normale
Sphère	$\frac{\sigma_z}{p_m} = -\frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}$
Cylindre 2-D	$\sigma_z = -\frac{2P}{\pi a} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{1/2}$
Poinçon cylindrique plat	$\frac{\sigma_z}{P_m} = -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{-1/2}$
Pression uniforme	$\sigma_z = -p_m$
Cône	$\frac{\sigma_z}{p_m} = -\cosh^{-1} \frac{a}{r}$

2.4.4. Déformations résultantes

Sous l'effet de la pression, un enfoncement élastique se produit entre les deux corps. L'approche verticale (δ) peut être calculée à partir de la formule (Figure 2.6) :

$$\delta = \frac{a^2}{R} \tag{2.6}$$

Où : (a) est le rayon de contact et (R) est le rayon de courbure équivalent des deux surfaces.

Les déformations sont réversibles tant que le matériau reste dans son domaine élastique. Toutefois, elles peuvent affecter les performances mécaniques (précision, frottement, usure...)[35].

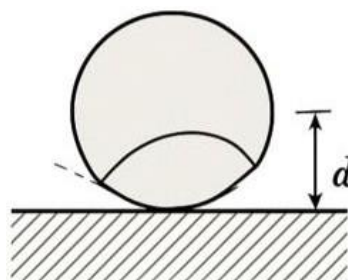


Figure 2.6 : Profondeur de pénétration d'une bille sur une surface plane [36] .

Il existe différents types de déformation, citer comme suivant :

- Déformation élastique : réversible.
- Déformation plastique : irréversible.
- Fracture ou perforation : rupture complète.

2. 5. Relation entre Machine d'impact a théorie de contact

2.5.1. Phases du contact lors l'action d'impact

Principes fonctionnement une machine d'impact dans la mécanique de contact base sur phases du contact lors d'un impact c-a-d l'impacteur se rapproche du matériau avec une certaine vitesse qui généré une force de réaction, avec augmentation de cette force créé une déformation de matériau. Donc, l'impacteur rebondit ou s'arrête, l'énergie se dissipe (par absorption, déformation, ou rupture)[37].

2.5.2. Paramètres importants :

La mécanique de contact dans le cadre des machines d'impact s'intéresse à l'étude des interactions entre l'impacteur et la surface du matériau testé lors d'un choc. Elle permet de comprendre comment calculée la force, la pression, la vitesse et l'énergie sont transmises et réparties pendant l'impact [38].

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.7)$$

- **Énergie d'impact (E)** : Énergie cinétique transférée pendant le choc.
- **Vitesse d'impact (V)** : La vitesse de l'impacteur au moment du contact.
- **Force de contact (F)** : Force maximale appliquée sur la surface du matériau.
- **Temps de contact (Δt)** : Durée pendant laquelle l'impacteur est en contact avec le matériau.

Afin de Calculs d'absorption d'énergie, La méthode traditionnelle de mesure de l'absorption d'énergie consistait à Calculer l'énergie cinétique avant et après l'impact. Cependant, une machine d'impact mesure la charge en fonction du temps de manière plus précise et plus exacte et illustre l'historique de l'absorption d'énergie. Les différents modes de défaillance Causés par l'impact peuvent être étudiés à partir du graphique charge-temps obtenu à partir de la machine [39]. La variation de l'énergie cinétique est calculée à l'aide des équations 2.8 :

$$\frac{1}{2}mv_{1^2} - \frac{1}{2}mv_{2^2} = \int F \cdot dy \quad (2.8)$$

où m est la masse de l'impacteur, F est la force, y est le déplacement, 1 v et 2 v sont les vitesses de l'impacteur avant et après l'impact, respectivement. Le déplacement en fonction du temps y(t) est obtenu par double intégration de l'accélération.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'importance de la mécanique du contact en tant que fondement essentiel pour la compréhension des phénomènes liés aux impacts entre corps solides. L'étude du contact entre des surfaces non conformes a montré que, malgré sa petite taille relative, la zone de contact constitue un point critique où les contraintes sont fortement concentrées, influençant directement le comportement global du matériau lors de la collision. La modélisation analytique de ces phénomènes a permis d'identifier les variables clés qui gouvernent la nature du contact, telles que la forme de la surface, la pression générée et la déformation locale. Ces éléments permettent de prévoir avec précision la réponse du matériau en cas d'impact. Ces données s'avèrent indispensables dans toute démarche de conception ou de développement de dispositifs ou de structures soumis à des charges dynamiques.

Chapitre 03

Processus de conception d'un produit

3.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons entamer le processus de conception d'un produit à mesure que l'envergure et la complexité des projets augmentent, chacune des étapes et des moyens mis en œuvre deviennent plus élaborés et nécessitent une certaine spécialisation. Dans chacune des étapes, le concepteur fait appel à des "intermédiaires" qui restreignent, ralentissent et augmentent le temps et le coût d'un design. Pire encore, alors qu'il travaille avec le même objet, il le communique par différents médias à différents "intermédiaires" (dessins ou coordonnées chiffrées). Donc maintenant, le développement de la technologie impose une nouvelle procédure de conception, c'est la Conception Assistée par Ordinateur « **CAO** » et il est prévu que l'informatique sera pour le travail intellectuel ce qu'a été le moteur pour le travail manuel.

3.2. Etapes de la conception

Il existe trois étapes de la conception, cité comme suivant :

3.2.1. Analyse du besoin client

À partir d'une demande client initiale, il est nécessaire d'initialiser un Cahier des Charges Fonctionnel qui définit le produit en termes de besoin et en aucun cas en termes de moyen. Ce document est complété par le client qui fournit ainsi toutes les précisions manquantes pour mener à bien la conception. Il valide la bonne compréhension du besoin par le concepteur. Un Cahier des Charges Fonctionnel est relativement facile à rédiger et ne doit pas prendre plus d'une demi-journée de travail au projeteur. Le plus délicat est la perception qu'en fait le client selon s'il est habitué ou non à ce type de pratique. Quoi qu'il en soit, ce document est indispensable pour une bonne compréhension du besoin et doit être établi avant tout démarrage de recherche de solutions. Il faut que le projeteur se force à ne pas réfléchir à la façon dont il va concevoir le produit mais à se concentrer sur ce que doit faire le produit. En cas de refus de la part du client de valider officiellement ce document, c'est la hiérarchie qui statue sur le sujet. Un planning d'étude compatible avec le temps alloué et comportant une marge pour aléas est alors créé. Il est primordial de renseigner le réalisé du planning quotidiennement en fin de journée et d'analyser régulièrement les écarts éventuels avec le prévisionnel [40].

3.2.2 Etude de faisabilité

La recherche de solutions peut alors commencer en prenant soin de ne pas aller trop vite pour éviter de passer à côté de solutions intéressantes, ni de se « précipiter » vers des conceptions déjà réalisées qui pourrait s'adapter au besoin. Il faut auparavant faire une recherche de solutions théoriques en s'affranchissant consciemment de toutes solutions « évidentes », existantes ou qui nous passeraient par la tête.

C'est seulement après cette phase de réflexion qu'on doit avoir une approche plus classique basée sur l'analyse de l'existant. Le tout, évidemment, en conformité avec le planning. L'étude de faisabilité est la phase la plus délicate de la conception. On entre dans le vif du sujet de la créativité avec les contraintes de délai et l'impossibilité de planifier qu'on doit avoir la bonne idée tel jour entre telle heure et telle heure. Ce sera plutôt en pleine nuit, à 3 heures du matin ou au cours d'une soirée entre amis un samedi soir. C'est là que se situe la spécificité du métier de concepteur. Il est intéressant de s'y attarder :

- **Enjeu** : l'étude de faisabilité est la base de la réussite d'un projet en termes de coût, de délai de réalisation et de performance. Tout repose sur le bureau d'études et sur le concepteur en particulier.
- **Objectif** : Le projeteur doit être capable, dans un temps imparti qui a tendance, à tort, à se réduire, de trouver un maximum de solutions pour satisfaire la demande du client et de les gérer afin de s'assurer de choisir, in fine, la solution optimale, notamment en termes de coût.
- **Difficultés**
 - Une activité de création est difficilement planifiable en ce sens qu'elle dépend de l'état d'esprit du concepteur.
 - Les projets peuvent être très différents les uns des autres. La problématique est de savoir comment aborder un projet. S'il n'existe pas de recettes, il n'en demeure pas moins qu'il y a lieu de suivre une méthodologie et d'avoir certains réflexes.
 - Il faut être capable d'avoir tout d'abord une approche systémique avant d'avoir une approche analytique.
 - Pour ne pas confondre vitesse et précipitation, il y a lieu, dans un premier temps, de ne pas penser à des solutions types ou « évidentes » qui passent par la tête. Un des défauts du technicien est de vouloir connaître le résultat avant même de savoir parfaitement ce qu'on lui demande.

À partir du moment où le besoin client est bien compris, le concepteur doit mettre en place une méthodologie lui permettant de développer, en un temps compatible avec le délai du projet, un ensemble de solutions. Le nombre et l'homogénéité de développement de ces solutions doivent permettre de s'assurer d'une certaine exhaustivité dans cette recherche. Autrement dit, à l'issue de ce travail, on est à peu près sûr d'avoir envisagé tous les cas possibles et donc de proposer une solution optimale. Ne pas permettre au projeteur de réaliser ce travail en toute sérénité est contre-productif et se paie très cher par la suite. Une modification à ce stade de l'étude est transparente en termes de coût et de délai par rapport à une modification qui a lieu quand on est en phase de fabrication.

La synthèse de cette étude de faisabilité doit être rédigée et argumentée au moment même où l'étude se fait. Si le concepteur n'est pas capable d'écrire ce qu'il fait sur le moment, en un temps raisonnable, c'est qu'il ne maîtrise pas sa conception. Ainsi, en plus d'assurer la traçabilité de ce qui a été fait, sa capacité à rédiger permet de vérifier qu'il maîtrise bien son sujet.

3.2.3. Avant-projet

À partir de l'étude de faisabilité, il y a lieu de choisir la solution définitive, si plusieurs sont possibles, et de la concrétiser sous forme de dessin d'avant-projet avec tous les documents justificatifs incluant les éventuels tests ou essais de validations.

C'est au cours de cette phase que vont être créés tous les documents définissant et justifiant l'avant-projet et qui vont servir de base pour l'étude détaillée. Ici s'arrête normalement le travail du concepteur en tant que tel. Il doit néanmoins piloter le reste de l'étude, que ce soit à l'intérieur de l'entreprise en encadrant techniquement un dessinateur d'études ou bien en pilotant une sous-traitance externe. Dans tous les cas, il est amené à vérifier les travaux d'études réalisés ; ce qui implique un transfert de responsabilité. Toutes les études et les travaux à réaliser sont consignés dans le dossier de reprise.

Le dossier d'avant-projet est la spécification technique du produit étudié à partir de la demande client. À ce stade, le produit n'est pas défini intégralement mais sa définition est suffisamment précise pour s'assurer que les études, à réaliser ensuite par un dessinateur, ne poseront pas de problèmes particuliers. Pour ce faire, il faut fournir les documents suivants : un dessin d'avant-projet : c'est un dessin qui définit le produit en termes de solutions technologiques, à un niveau détaillé compatible avec la complexité de la fonction à réaliser. C'est ce qui caractérise l'homogénéité de l'étude. Chaque fonction est étudiée à un niveau de détail permettant de s'assurer qu'aucun problème particulier ne devrait intervenir dans la suite de l'étude. On peut donc très bien avoir une partie du concept de la machine étudiée totalement définie et une autre sous forme d'idée générale ; la spécification technique du produit : c'est un document qui explique en détail de quoi est composé le système conçu ;

- Une étude de risques techniques (sous forme d'AMDEC de conception) ;
- Une pré-notice de montage visant à vérifier la montabilité du système ;
- Une spécification des essais d'intégration ;
- Les spécifications de développement des ensembles et sous-ensembles ; une évaluation du coût du produit ;
- Les spécifications des produits manufacturés ; une recherche et évaluation de fournisseurs.

Ces documents doivent être suffisamment complets et précis pour qu'un dessinateur d'études n'ayant pas participé à la conception du produit soit capable d'en assurer sa définition.

3.3. Paramètres de conception d'un produit

Pour optimiser la conception et la mise en place d'un produit, une analyse préliminaire a été réalisée afin d'identifier les besoins expérimentaux, les configurations d'essai adaptées et les paramètres influençant les résultats. Cette démarche permet d'ajuster le dispositif dès sa conception pour répondre précisément à ces exigences. Pour chaque paramètre identifié dans la checklist illustrée par le diagramme d'Ishikawa (**Figure 3.1**), une méthode de traitement a été définie lorsque son impact potentiel a été jugé important [41].

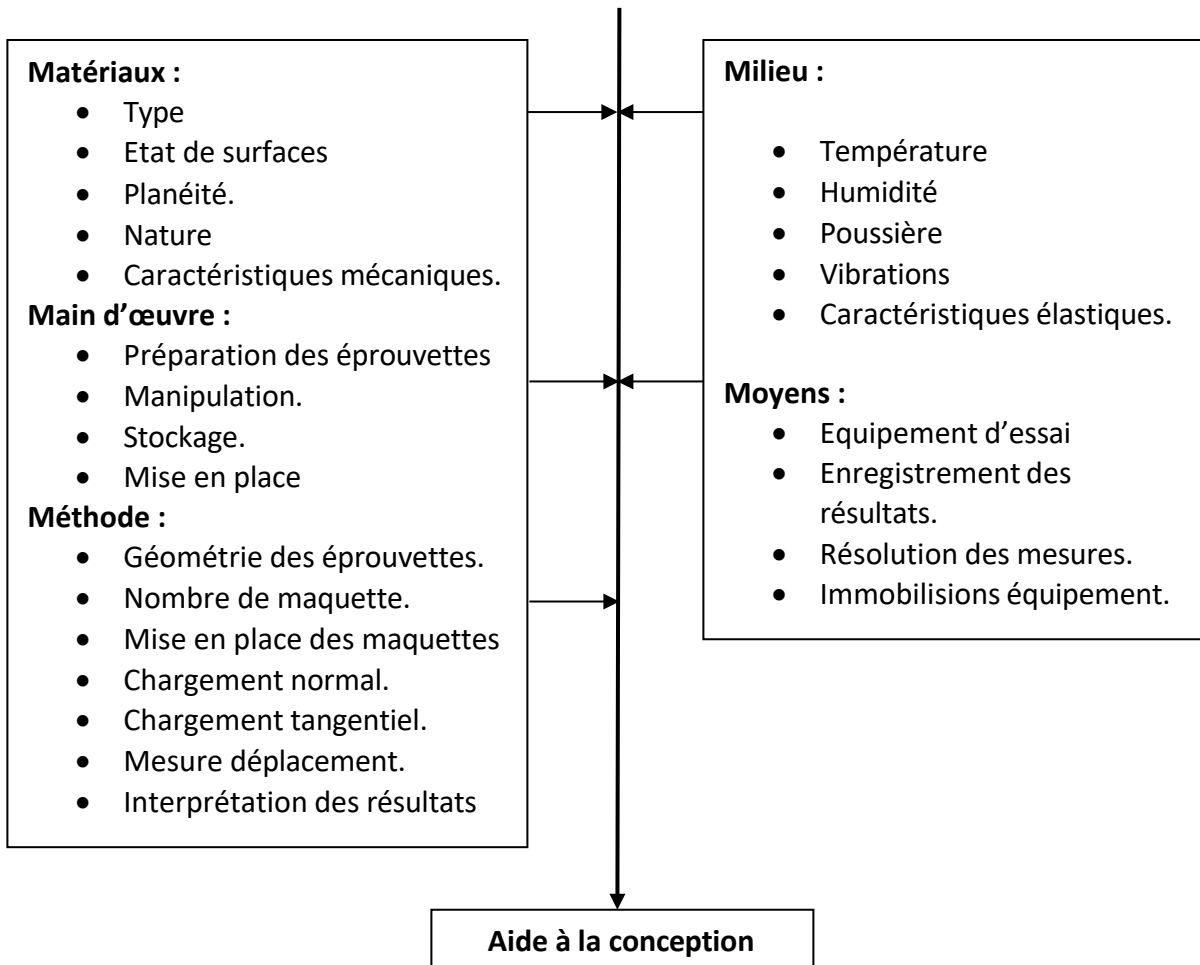


Figure3.1 : Paramètres pris en compte lors de la conception d'un produit.

3.4. Conception assistée par ordinateur

La recherche d'une définition de la conception assistée par ordinateur est un exercice plutôt futile, et nous avons préféré une explication plus proche du vécu du travail de l'ingénieur. Il s'agit d'imaginer, de formuler des solutions pour remplir des fonctions bien définies à l'intérieur d'un ensemble de contraintes. Généralement, l'atteinte d'une solution (d'un design) n'est pas directe sauf pour des problèmes extrêmement simples.

De façon simpliste, on distingue d'abord le choix d'un modèle représentant le phénomène physique du problème. Ensuite, un premier design est élaboré et, on vérifie si les contraintes sont satisfaites. On modifie le design et on répète jusqu'à ce que le design vérifie les contraintes. On peut décrire la conception ou le design comme un processus itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes [42].

3.4.1. Etapes de la CAO

On identifie plusieurs étapes dans cette démarche (figure 3.2) :

- Création d'un modèle de l'objet.
- Analyses, essais et simulation
- Construction de prototypes
- Modifications.
- Réalisation de l'objet.

À quelques variantes près dans l'enchaînement de ces étapes, la méthodologie est la même que l'objet, soit un barrage, un circuit électrique, une pièce mécanique, etc.

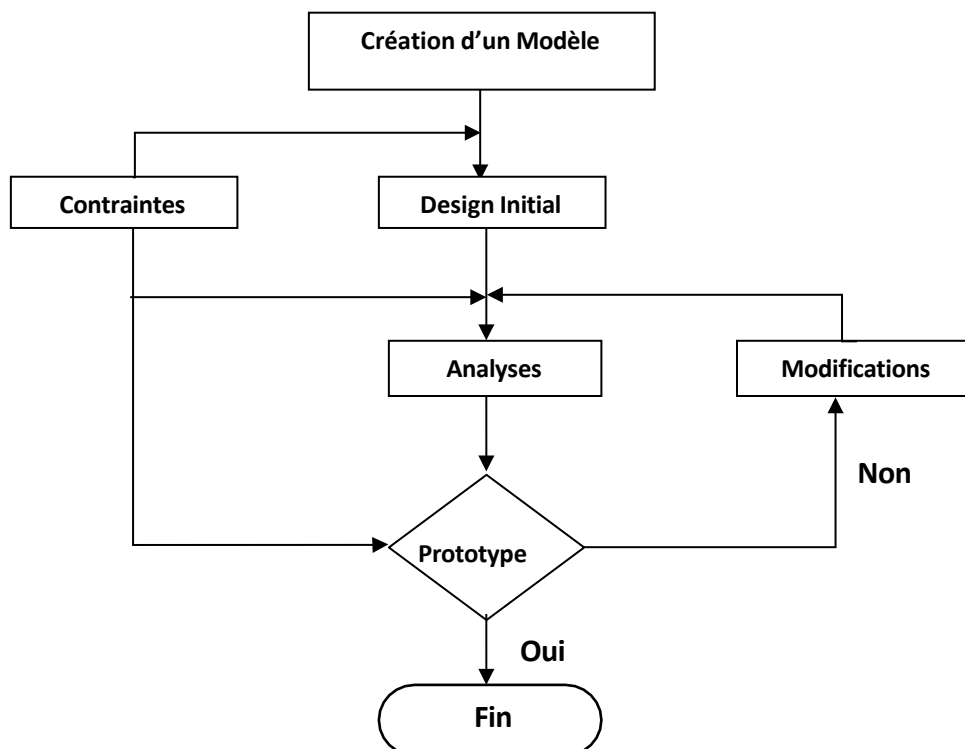


Figure 3.2 : Organigramme de la conception

Autres caractéristiques communes à l'ensemble des activités de conception sont les moyens ou média utilisés par le concepteur [42]. On distingue :

- **Outils analytiques** : formules empiriques et équations issues de modèles mathématiques. Ceux-ci sont utilisés aussi bien lors de la création d'un modèle, lors de son analyse, ou des modifications[43].
- **Information** : propriétés et caractéristiques de toutes sortes, designs antérieurs, etc. Ces informations auxquelles l'ingénieur fait appel sont contenues dans des manuels, dans sa propre mémoire, dans des plans, etc. Leurs formes sont variées : chiffrées, graphiques, textuelles. On a recours aux informations également à toutes les phases du processus de conception.
- **Communication** : l'ingénieur doit communiquer ou consacrer les résultats de son travail à l'une ou l'autre des phases. Par exemple, il lui faut communiquer la forme du modèle pour la réalisation d'un prototype, ou bien les résultats d'un calcul de contraintes pour réaliser certaines modifications. Les modes de communication sont graphiques, chiffrés ou bien textuels. On utilise la capacité de calcul, de stockage et de traitement de l'ordinateur, alliés aux capacités de reconnaissances de formes, d'évaluation, de jugement de situations complexes (conflictuelles) et les possibilités de l'intuition de l'humain pour imaginer de nouvelles solutions. Les avantages sont immédiatement apparus aux industriels et on a assisté au cours des quelques dernières années à une intégration de l'informatique dans les méthodes de calcul et de conception de l'ingénieur.

3.4.2. Avantages de la CAO

Sous l'effet de fortes pressions provenant de la compétition, de la conjoncture économique, de diverses contraintes du public et des organismes gouvernementaux pour de meilleurs produits (et à meilleur marché), l'industrie est forcée de hausser la productivité du personnel technique. Il est vite apparu qu'à l'aide de l'informatique, des économies appréciables sont possibles pour chacune des différentes phases du processus de design :

- **Création d'un modèle** : À l'aide des systèmes CAO disponibles sur le marché, la création géométrique d'un objet (pièce, circuit, etc.) est grandement facilitée. On peut également étudier l'objet sous divers angles et en tirer des copies à volonté à différents niveaux de réalisme [44] .
- **Analyse** : Les caractéristiques de l'objet, une fois créé, sont immédiatement disponibles pour des programmes d'analyse ou de simulation (éléments finis, vibrations, réponses en fréquence..) et, en retour, l'utilisateur reçoit les résultats de ces calculs sous forme graphique pour évaluer si l'objet est conforme aux contraintes[45].

- **Modifications** : Suite à l'analyse ou à la simulation, des modifications sont faciles et rapides à incorporer, au modèle informatique. Avec un tel outil, il est possible d'envisager plusieurs solutions et de choisir la plus adéquate. A titre d'exemple, on cite dans l'industrie de l'automobile pour la mise au point d'un nouveau modèle. Il est évident que la CAO n'est qu'un outil, mais un outil qui modifie l'exercice de la profession de l'ingénieur et permet de faire un meilleur travail. Par exemple, dans le domaine des structures, les programmes d'analyses sont devenus très précis et complets de manière à ce que le comportement d'éléments telles les poutres, etc., peut être analysé avec beaucoup plus de fiabilité et de détails qu'avec les formules empiriques utilisées auparavant. Il est alors envisageable d'optimiser un design par l'utilisation itérative de ces outils et de déceler des comportements qui ne seraient apparus que lors de la réalisation du prototype (ou pire, lors du produit fini).

Cette approche est en vigueur depuis plusieurs années dans les domaines de haute technologie (aviation, nucléaire, électronique ...) où les méthodes traditionnelles sont devenues désuètes[45].

3.5. Logiciel de CAO

Les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), sont très utilisés en domaine mécanique. De tels logiciels fournissent une large gamme de solutions intégrées pour couvrir tous les aspects de design et de fabrication. Parmi les nombreuses fonctionnalités de base, on peut citer :

- conception de pièces
- assemblages
- rendu réaliste
- dessin interactif et génératif
- interfaces.

Ils permettent ainsi de concevoir des pièces et des assemblages de pièces directement en 3 dimensions sans dessiner de plan. Lorsqu'on parle de la version 2021, il inclut de nombreuses améliorations et nouveautés qui ont été apportées pour répondre aux demandes des clients. Cette version est axée sur les fonctions suivantes:

- Conception plus rapide et plus efficace
- Amélioration de la collaboration et de la visualisation
- Meilleure prise en charge pour la fabrication

Ce terme désigne l'ensemble des données informatiques qui permet de manipuler un objet aussi bien ou mieux qu'on ne pourrait le faire avec une maquette réelle ou un prototype.

On peut tester sa résistance à diverses contraintes, vérifier qu'un sous-ensemble est montable ou démontable, s'assurer que la mobilité des composants les uns par rapport aux autres ne génère pas de collision,...

La maquette numérique permet de diminuer les coûts, les délais et d'augmenter la qualité car on évite de passer par une phase de prototype ou de maquette réelle. De plus, les modifications ultérieures sur les pièces sont beaucoup plus faciles à réaliser. Grâce au module de fabrication, on peut simuler l'usinage des pièces sur des machines à commande numérique et on peut générer automatiquement le fichier d'usinage qui est utilisé par la machine numérique réelle [46].

3.6. CONCLUSION

La conception mécanique est un processus méthodique et structuré visant à trouver des solutions efficaces et économiques. La réussite de tout projet de conception repose avant tout sur une compréhension précise des besoins du client, suivie de l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel clair, d'une planification réfléchie et de l'utilisation d'outils modernes tels que la simulation et l'analyse fonctionnelle. Cela confirme que la conception mécanique ne se limite pas à un simple dessin technique, mais constitue un processus global de résolution de problèmes techniques, reposant sur la créativité, la rigueur et une évaluation continue afin d'obtenir les meilleurs résultats.

Chapitre 04

**CONCEPTION CAO
DE LA MACHINE À IMPACT**

4.1 Introduction

Les chapitres précédents de ce mémoire nous ont permis de mettre la lumière sur les machines à impact ainsi que sur le problème du contact solides-solides qui a lieu lors des phénomènes tel que l'indentation par un pénétrateur ou le choc et l'impact d'un projectile sur la paroi d'une structure mince. La compréhension de ces phénomènes requière une approche expérimentale qui est nécessaire pour les raisons suivantes : déterminer les performances de la structure dans les conditions de fonctionnement, connaître la précision des calculs ou déterminer les caractéristiques dynamiques. Cela se fait par comparaison entre une approche analytique ou numérique et une approche expérimentale basée sur une campagne de mesures (**figure 4.1**):

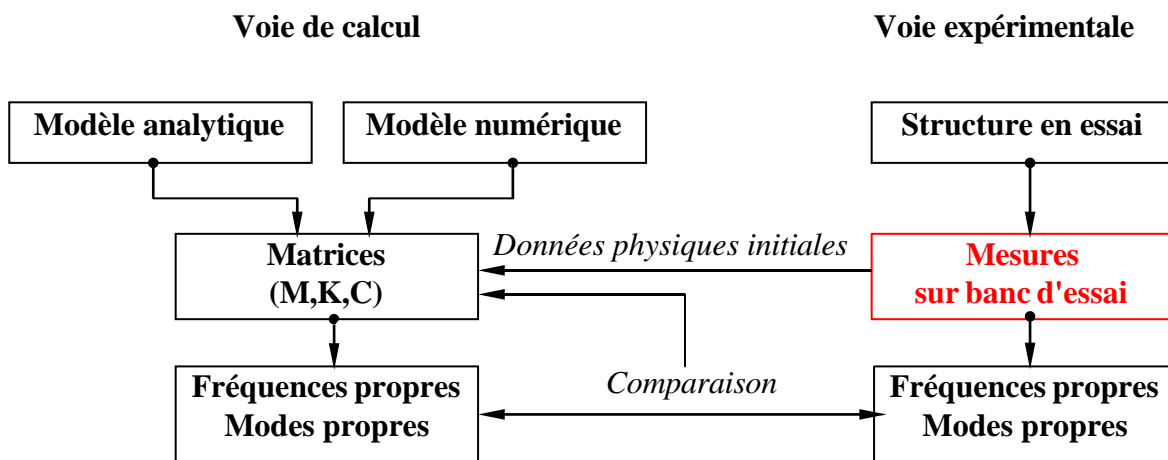


Figure 4.1 : Relation voie de calcul et voie expérimentale

Dans l'optique de passer à l'étape de la réalisation du prototype physique de cette machine à impact, une étape de pré-développement de ce produit est requise. Cette dernière sera menée en deux phases : étude de conception et étude de définition dans le but d'obtenir sous environnement CAO d'un prototype numérique de notre impacteur pour plaques minces.

4.2 Etude de conception

A partir du cahier des charges fonctionnel, l'étude de conception a pour but d'établir le dossier de l'avant-projet, donc le choix définitif du concept et des exigences fonctionnelles des performances attendues. Les méthodes de créativité, de calcul, d'évaluation, les essais, ainsi que les moyens de conception assistée par ordinateur (CAO) constituent des aides précieuses pour mettre en œuvre les phases qu'elle contient, à savoir : rechercher des idées et des solutions ; étudier les solutions ; évaluer les solutions.

4.2.1 Enoncé du besoin

Faisant suite à la décision de lancer le développement d'un dispositif d'impact, cette première étape marque le début du processus de conception. Son objectif est de dégager, sur base de la définition initiale du problème, l'ensemble des spécifications auxquelles doit satisfaire le nouveau produit. Ces spécifications, réparties en trois catégories que sont les fonctions, les performances et les contraintes, sont reprises dans un cahier des charges permettant d'identifier par qui et à quel moment elles ont été introduites. Afin de laisser la plus grande latitude possible durant les étapes ultérieures de la conception, ce cahier des charges doit être fonctionnel. Autrement dit, il doit éviter toute allusion, explicite ou implicite, à des solutions particulières.

Dans notre cas, les recherches effectuées sur les plaques minces faites de différents matériaux ont fait apparaître le besoin d'un banc d'essai pour impact, de fabrication locale ayant des fonctionnalités de son équivalent fabriqué ailleurs. Une fois le besoin clarifié, il a été formulé comme suit : "conception d'une machine à impacter comprenant trois organes : un organe moteur, un organe intermédiaire de transformation de mouvement qui transforme le mouvement de rotation en un mouvement de translation rectiligne alternatif et un organe effecteur mobile en translation rectiligne qui va assurer l'indentation de la plaque ". La décision effective d'entamer la conception de ce banc d'essai a été prise suite à la validation et l'attribution de ce problème en tant que projet de fin d'études par le comité scientifique de département de génie mécanique.

4.2.2 Solution et modèle conceptuel

Dans sa conception élémentaire, notre banc d'essai d'impact est une machine non-automatisée résultat du montage de plusieurs organes mécaniques reliés et agencés entre eux pour assurer une fonction globale (**Figure 4.2**).

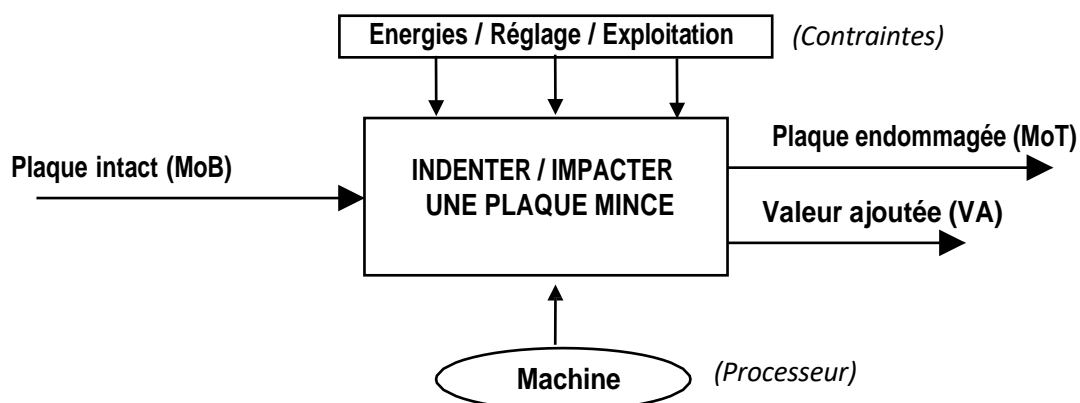


Figure 4.2 : Fonction globale du banc d'essai d'impact

Pour une machine industrielle non-automatisée, sa structure organisationnelle comprend quatre grandes catégories d'organes (**Figure 4.3**) :

- **Organe moteur** : Organe d'entrée qui génère l'action initiale (actionneur)
- **Organe effecteur** : Organe terminal qui agit sur la matière d'œuvre à transformer
- **Organe intermédiaire** : Organes qui assurent la transmission des actions entre l'organe moteur et l'organe effecteur.
- **Organe support (ou bâti)** : C'est l'ensemble des pièces fixes dans une machine. Le bâti constitue un système rigide et immobile qui joue le rôle du support sur lequel sont suspendues les liaisons. En plus le bâti est considéré comme pièce de référence.

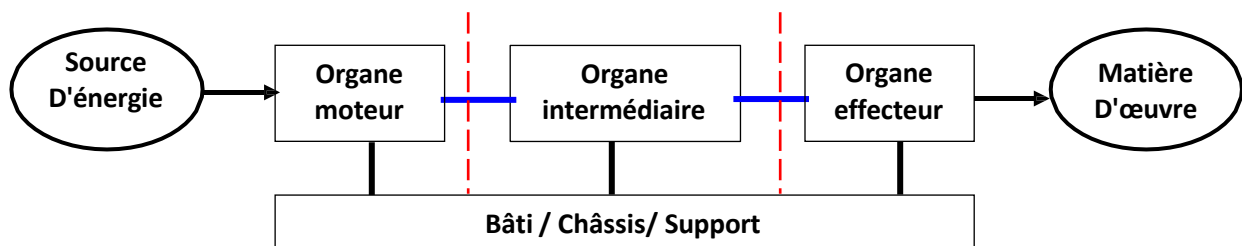


Figure 4.3 : Structure générale d'une machine

Selon les exigences mentionnées dans la partie énoncée du besoin, la projection de l'organisation machine donnée par la **figure 4.3** permet de dégager la structure organisationnelle de notre future banc d'essai (**figure 4.4**).

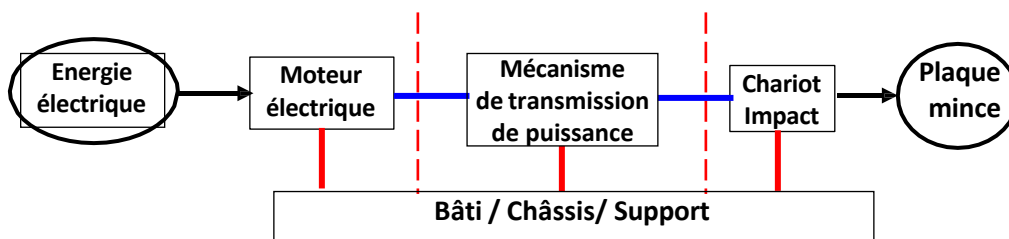


Figure 4.4 : Structure organisationnelle du banc d'essai impacteur

4.2.3 Recherche et choix des solutions

L'étape de la recherche des solutions doit utiliser les méthodes de "*créativité*" et de recherche d'idées qui permettent de trouver des idées novatrices en évitant l'a priori. Cette étape doit permettre d'élargir au maximum les possibilités de choix et recenser un maximum de solutions constructives. En premier temps, les séances de réflexion réservées à la recherche des solutions doivent être des moments libre de tout jugement, de façon est ce que le tri, la critique ainsi que la sélection des solutions viennent en deuxième temps.

4.2.3.1 Solutions pour sources d'énergie électrique

Une source électrique est un système technique à dominante électrotechnique capable de fournir de l'énergie électrique à un circuit. Cette énergie peut provenir de diverses formes d'énergie primaire : mécanique, chimique, thermique, lumineuse, etc.

Le **tableau 4.1** expose différentes solutions pouvant être adoptées comme sources d'énergie électrique pour alimenter notre banc d'essais.

Tableau 4.1 : Classification des sources d'énergie électrique

Source	Usage typique	Courant	Remarques
Réseau triphasé	Source principale	AC (400 V)	Normalisé, fiable
Groupe électrogène	Secours ou sites isolés	AC	Autonome mais coûteux
Solaire + batterie	Secours léger / énergie verte	DC → AC	Intéressant en mix énergétique
Éolien / hydraulique	Fourniture indirecte	AC	Connecté au réseau national

Dans notre cas, la machine à impact nécessite une source d'énergie électrique moyenne, fiable et continue, adaptée à ses conditions d'exploitation (charges, environnement difficile, fonctionnement en continu, etc.). A cet effet et selon le cahier des charges, nous avons adopté la source d'énergie principale, le réseau électrique triphasé AC (400V).

4.2.3.2 Solutions pour transmission de puissance

Dans une machine industrielle, le mouvement cinématique le plus rencontré est le mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Les organes transformateurs d'énergie tels que moteur électriques, embrayages, réducteurs de vitesse et variateurs de vitesse ; ainsi que les organes et mécanismes transmetteurs d'énergie tels que poulie-courroie, pignon-chaîne et engrenages sont tous des éléments de machines animés d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe. En technologie de construction mécanique, lors de la conception-construction d'un groupe fonctionnel de pièces pour un organe de machine, les solutions constructives sont recherchées à travers les fonctions mécaniques tel que : assemblage de deux pièces mécaniques, guidage en translation et guidage en rotation, transmission de puissance, lubrification et étanchéité mécanique

Du point de vue conceptuel et fonctionnel, la fonction transmission de puissance est une fonction technique qui trouve son existence dans la chaîne d'énergie des objets ou des systèmes techniques à dominante mécanique.

Du point de vue constructive et matériel, elle sera assurée par des groupes fonctionnels ou des organes mécaniques qui permettent d'une part de transmettre ou convertir (sans ou avec modification de mouvements) une puissance mécanique entre un organe moteur et un organe récepteur et d'autre part d'adapter le couple et la vitesse entre l'organe moteur et l'organe entraîné.

Selon la solution constructive adoptée, la transmission de puissance sera dimensionnée selon les critères suivants : la quantité de puissance à transmettre ; les mouvements souhaités ; les efforts ou les couples recherchés ; la position de l'organe moteur par rapport à l'organe récepteur ; la fiabilité, la maintenabilité, le coût de réalisation, etc.... Le **tableau 4.2** résume les différentes solutions constructives pour la fonction mécanique de transmission de puissance.

Tableau 4. 2 : Classification des systèmes de transmission de puissance

Transmission	Position moteur/récepteur	Transmission recherchée	Solutions constructives
Sans modification de mouvement	EN PROLONGEMENT	- Permanente - sans modification des vitesses - Sans modification des efforts	- Accouplements rigides. - Accouplements élastiques.
		- Provisoire - Avec progression ou instantané	- Embrayages progressifs - Embrayages instantanés.
		- Permanente - Avec ralentissement ou arrêt	- Freins.
	NON EN PROLONGEMENT	Permanente sans modification des vitesses ni modification des efforts	- Transmission par joints homocinétique.
			- Transmission par roues de friction.
			- Transmission par flexibles.
			- Transmission par chaînes.
			- Transmission par engrenages.
			- Transmission par inverseur de marche.
			- Transmission par réducteur de vitesses.
- Transmission par boîte de vitesses.			
- Transmission par variateur de vitesses.			
Avec modification de mouvement	REVERSIBLE	- Permanente - Avec modification des vitesses - Avec modification des efforts	- Systèmes vis-écroues. - Système bielle-manivelle. - Système pignon-crémaillère.
		IRREVERSIBLE	- Système à excentrique.
			- Système de cames disques. - Système de cames cylindriques - Système de cames coniques. - Système de cames à tambour.

Dans notre cas et selon le cahier des charges, on a opté pour une transmission de puissance en deux parties :

1. Transmission de puissance sans modification de mouvement qui comprend : un moteur électrique comme organe moteur et un système poulie-courroie.
2. Transmission de puissance avec modification de mouvement qui comprend : bielle-manivelle avec coulisse oscillante.

3.2.3.4 Solutions pour chariot d'impact

Les têtes d'impact, ou impacteurs, jouent un rôle fondamental dans les essais de choc, car elles assurent le transfert direct de l'énergie vers l'échantillon testé. Le choix de la forme de l'impacteur influence fortement la distribution des contraintes, le mode de rupture et le comportement global du matériau lors de l'impact. Chaque géométrie produit un effet mécanique spécifique, adapté à un type d'analyse particulier : perforation, délamination, fissuration, ou absorption d'énergie. Le **tableau 4.3** résume les différentes solutions des formes d'impacteurs, leurs effets sur l'échantillon.

Forme	Effet sur l'échantillon
Hémisphérique	-Répartition uniforme -Pénétration douce
Conique -Pointue	-Concentration des contraintes -Endommagement localisé
Plats – Cylindriques	-Impact brutal -Transmission directe de l'énergie

3.2.4 Présentation de la solution

La présentation des solutions fait partie de la phase de la conception préliminaire c'est la phase de conception de l'ensemble (*Embodiment design*) des concepts associés au produit sont développés pour la définition de la description technique complète et pour la structure finale du produit (**Figure 4.5**).

Les concepteurs élaborent la structure physique du produit par le choix, le dimensionnement et l'agencement d'un ensemble de composants. La solution produite se raffine concrètement par des représentations et des vues géométriques d'ensemble de plus en plus évoluées et par une nomenclature de composants. Ici, les concepteurs évaluent souvent plusieurs solutions possibles de structures et d'architectures.

Pendant cette phase de conception les outils de conception proposent des valeurs sur des critères afin d'aider les concepteurs à faire des choix sur les aspects techniques du produit: type de technologie, type d'architecture, pourcentages de composants à changer dans le produit ...

Les concepteurs évaluent plusieurs solutions possibles de structures ou d'architectures parmi lesquelles sera choisi le meilleur compromis.

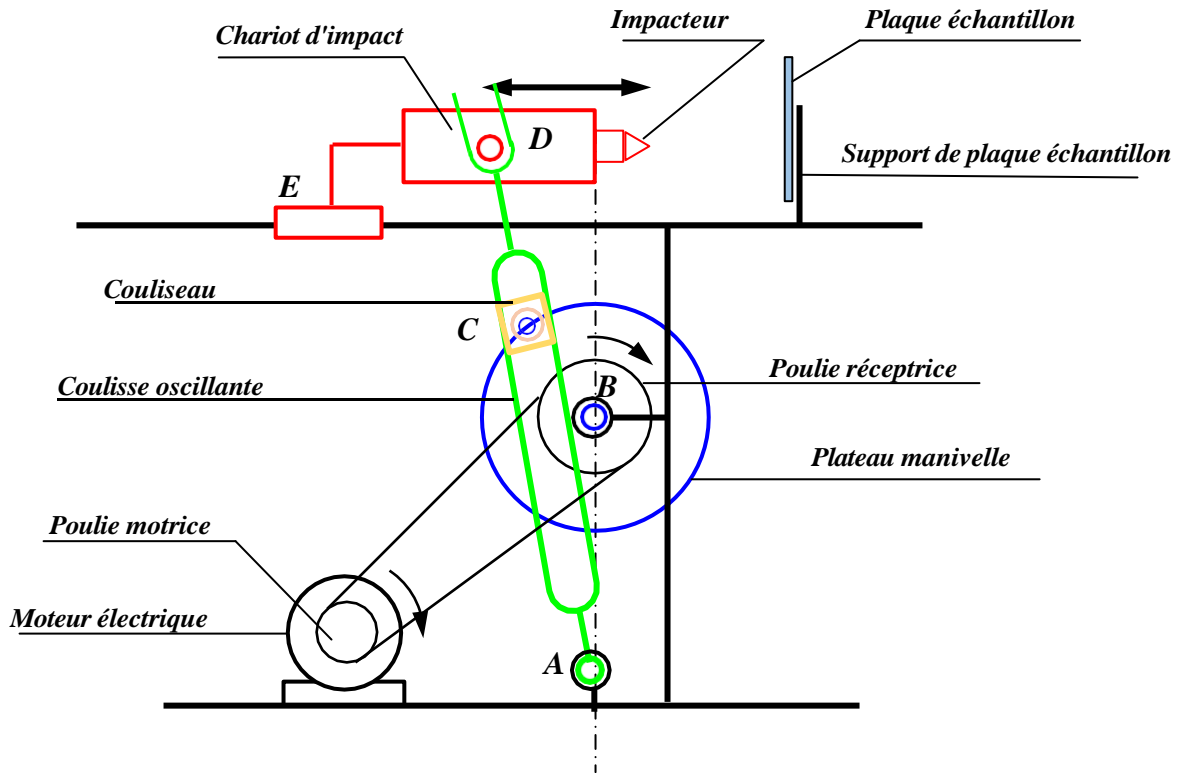


Figure 4.5 : Schéma cinématique minimale de la solution retenue

4.3 Etude de définition

C'est l'aboutissement traditionnel du travail effectué dans la phase étude. L'avant-projet est complété par une définition exacte de la solution finale ; en particulier, les composants à fabriquer qui font l'objet de dessins de définition.

4.3.1 Prototype pièce en CAO.

Un prototype d'une pièce mécanique en Conception Assistée par Ordinateur est une modélisation numérique tridimensionnelle (3D) d'une pièce ou d'un ensemble mécanique, créée à l'aide de logiciels spécialisés. Cela signifie :

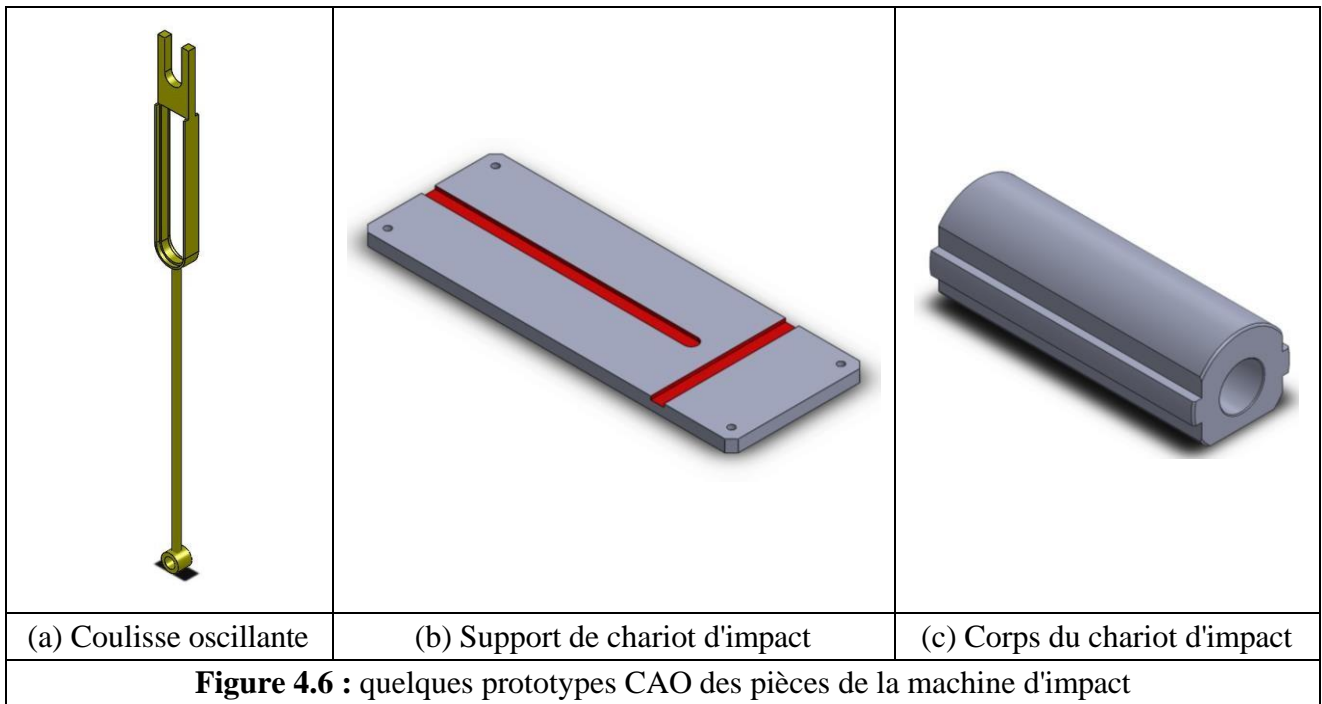
Ce n'est pas encore la pièce physique, mais une version virtuelle qui permet :

- de **visualiser** la pièce avant sa fabrication,
- de **tester** son fonctionnement ou son intégration dans un système,
- de **détecter d'éventuelles erreurs de conception**.

Le prototype CAO sert notamment à :

- **Valider le design** avant réalisation
- **Communiquer** avec d'autres membres d'un projet.
- **Créer les plans techniques** nécessaires à l'usinage ou à l'impression 3D,
- **Réduire les coûts** et les délais en évitant des erreurs en réalisation réelle.

Dans notre cas, la **figure 4.6** présente les modèles CAO de quelques pièces faisant partie de notre machine à impact

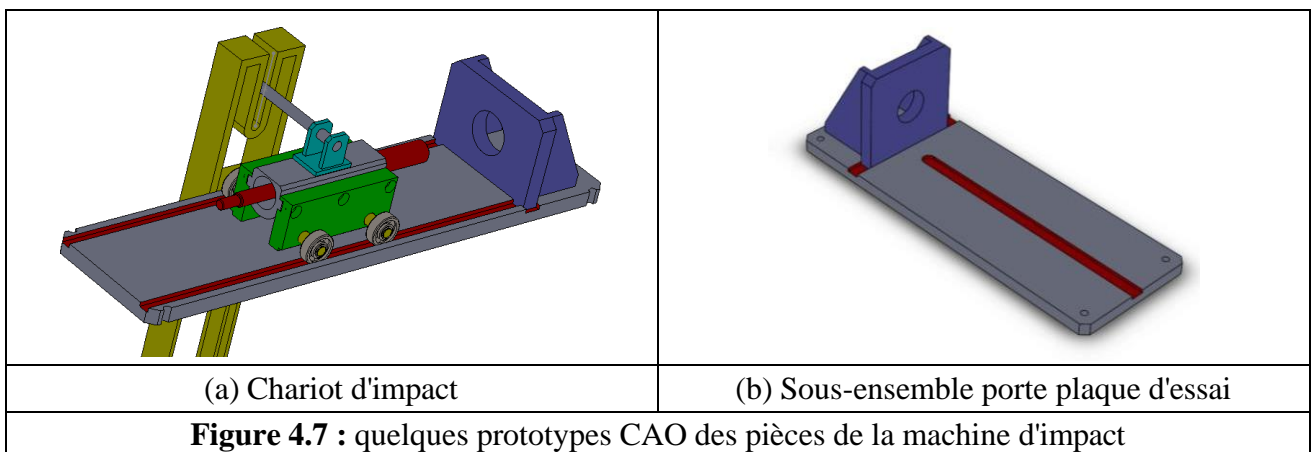


3.3.2 Prototype assemblage en CAO

Un prototype d'un assemblage mécanique en CAO est une modélisation numérique 3D complète d'un système constitué de plusieurs pièces mécaniques, réalisée à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur. Le prototype CAO d'un assemblage a pour objectifs :

1. **Vérifier l'ajustement** et la compatibilité entre les pièces.
2. **Tester les mouvements** (rotation, translation, engrenage...).
3. **Détecter les interférences** (pièces qui se chevauchent par erreur).
4. **Analyser le fonctionnement global** du mécanisme (simulation).
5. **Préparer la fabrication** ou le montage en atelier (plans, nomenclatures, tolérances...).

La **figure 4.7** présente les modèles CAO de quelques sous-ensemble notre projet de machine à impact.



La **figure 4.8** présente les modèles CAO complet du prototype CAO notre projet de machine à impact.

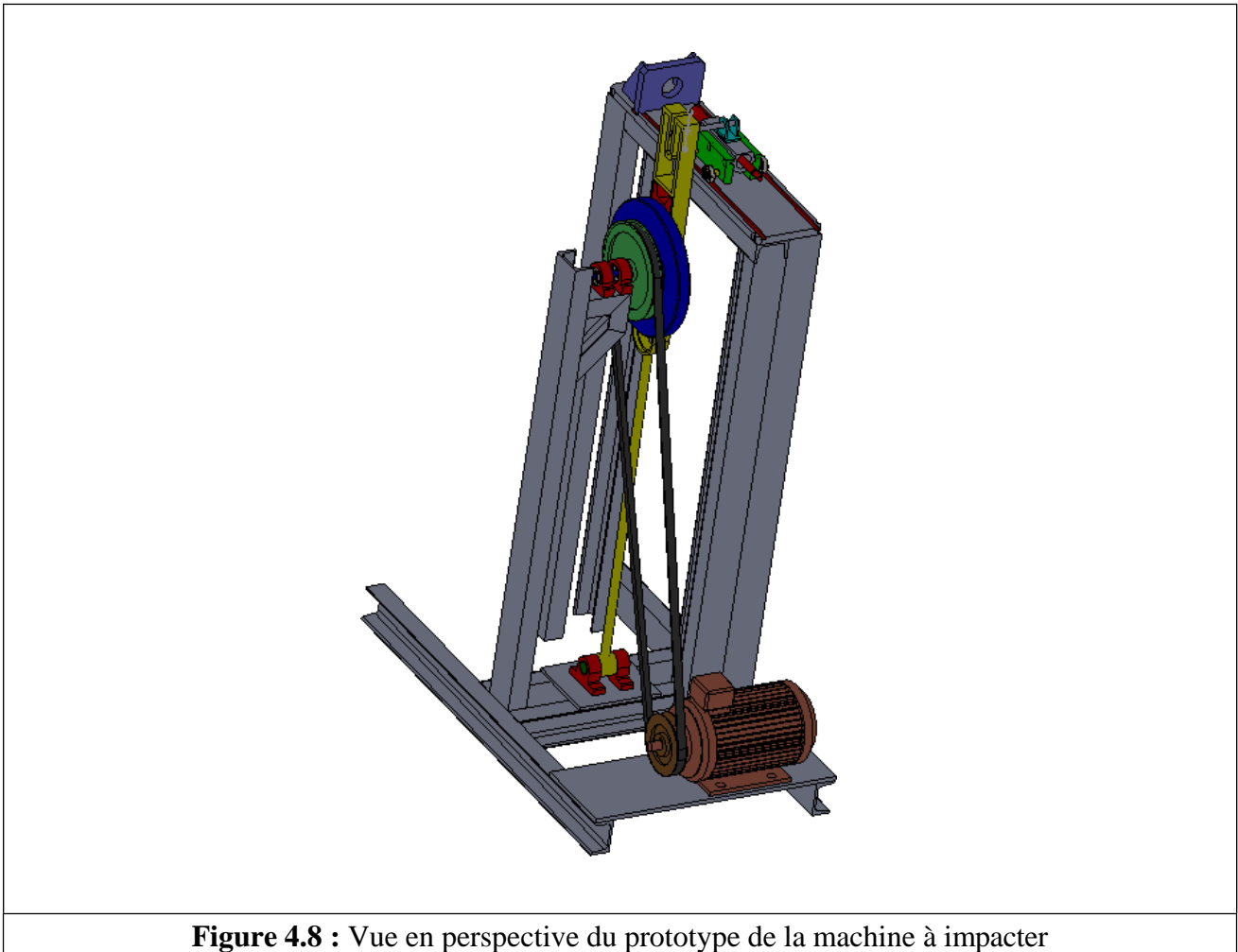


Figure 4.8 : Vue en perspective du prototype de la machine à impacter

3.4 Conclusion

La CAO apparait comme un outil qui offre un environnement de travail virtuel où les ingénieurs et les concepteurs peuvent créer des modèles 3D détaillés, analyser les interactions et effectuer des simulations sans avoir à produire immédiatement un prototype physique. Dans ce chapitre, un prototype numérique réalisé à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) nous a permis de concevoir, visualiser, tester et modifier des objets ou des systèmes avant leur fabrication physique. Notre prototype obtenu par CAO permet d'explorer différents scénarios sans intervention directe sur le système physique, elle réduit les coûts, le temps de recherche et améliore la prise de décision.

*CONCLUSION
GÉNÉRALE*

À travers ce travail, nous avons mis en évidence l'importance cruciale de l'étude du comportement des matériaux soumis aux sollicitations d'impact, en particulier dans le cadre des applications industrielles où la fiabilité et la performance sont des exigences majeures. Les machines d'impact se sont révélées être des outils essentiels, permettant de caractériser la résistance des matériaux, d'évaluer leur capacité d'absorption d'énergie et de mieux comprendre les mécanismes de rupture.

L'analyse basée sur la mécanique du contact a montré que, bien que la zone de contact soit généralement très réduite, elle concentre des contraintes élevées pouvant conduire à l'endommagement ou à la défaillance des structures. La compréhension et la modélisation de ces phénomènes sont donc indispensables pour prévoir et optimiser le comportement global des matériaux et des assemblages soumis aux chocs.

Ce projet nous a également permis de souligner l'importance des outils numériques modernes, tels que la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), qui offrent des solutions efficaces pour la conception, le dimensionnement et l'optimisation des systèmes mécaniques complexes.

En conclusion, cette étude a permis de combiner de manière complémentaire l'approche théorique et l'expérimentation pratique, offrant ainsi une vision globale et approfondie du comportement des matériaux sous impact. Ce travail ouvre également des perspectives pour des recherches futures visant à améliorer la conception des matériaux et des systèmes soumis à des sollicitations dynamiques de plus en plus sévères.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hosford, William F, *Mechanical Behavior of Materials*, 2e éd. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [2] Courtney, Thomas H, *Mechanical Behavior of Materials*, 2e éd. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [3] M. F. Ashby et D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design*, 4e éd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [4] ASM International, *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Materials Park, OH: ASM International, 2002.
- [5] Matmatch, « Charpy and Izod Impact Tests ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://matmatch.com/learn/process/charpy-and-izod-impact-tests>
- [6] DirectIndustry, « Machine d'essai d'impact - DirectIndustry ». 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/machine-essai-impact-67922.html>
- [7] W. D. Callister et D. G. Rethwisch, 10e éd, 2018.
- [8] W. D. Callister et D. G. Rethwisch, *Science et ingénierie des matériaux : une introduction*, 10e éd. Wiley, 2018.
- [9] M. J. Abad, S. Sánchez-Séez, E. Barbero, et C. Navarro, « Influence of impactor shape on the damage tolerance of composite laminates », *Compos. Part B Eng.*, vol. 32, no 8, p. 635-643, 2001, doi: 10.1016/S1359-8368(01)00050-9.
- [10] ASTM International, *ASTM D7136 / D7136M-20: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*. ASTM International, 2020. doi: 10.1520/D7136_D7136M-20.
- [11] W. D. Callister et D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9e éd. Hoboken, NJ: Wiley, 2018
- [12] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 4th éd. Wiley, 2010.
- [13] B. Z. Gama et J. W. Gillespie Jr, *High Velocity Impact Testing of Polymers and Composites*. New York: Springer, 2009.
- [14] A. J. Piekutowski, « Electromagnetic Launchers for Hypervelocity Impact Testing », *Int. J. Impact Eng.*, vol. 23, no 1, p. 723-734, 1999, doi: 10.1016/S0734-743X(99)00117-4.
- [15] R. Raj, P. Sharma, et V. Kumar, « Impact behavior of composite materials under high strain rate loading: A review », *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no 5, p. 715-738, 2021, doi: 10.1177/0021998320966703.
- [16] R. Raj, V. Sharma, et S. Kumar, *Composite Materials: Testing, Design and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021.
- [17] R. Raj, P. Sharma, et V. Kumar, « Impact behavior of composite materials under high strain rate loading: A review », *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no 5, p. 715-738, 2021, doi: 10.1177/0021998320966703
- [18] DirectIndustry, « Machine d'essai d'impact - DirectIndustry ». 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/machine-essai-impact-67922.html>
- [19] A. C. Ugural et S. K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*. Prentice Hall, 2003.
- [20] T. Morawietz et N. Artrith, « Machine learning-accelerated quantum mechanics-based atomistic simulations for industrial applications », *J. Comput. Aided Mol. Des.*, vol. 35, no 4, p. 557-586, avr. 2021, doi: 10.1007/s10822-020-00346-6.
- [21] L. S. K. Goh et Y. M. Wu, *Impact Testing and Structural Analysis: A Practical Approach*. Elsevier, 2015.
- [22] J. W. Gardner, *Microsensors: Principles and Applications*. John Wiley & Sons Ltd, 1994.
- [23] D. Tabor, « Friction: The Present State of Our Understanding », *J. Lubr. Technol.*, vol. 103, no 2, p. 169-179, 1981.
- [24] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985.

- [25] J. A. Greenwood et J. H. Tripp, « The elastic contact of rough spheres », *Trans. ASME Ser. E J. Appl. Mech.*, vol. 34, p. 153-159, 1967
- [26] I. M. Hutchings et P. Shipway, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 2e éd. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [27] B. N. J. Persson, O. Albohr, U. Tartaglino, A. I. Volokitin, et E. Tosatti, « On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion », *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 17, no 1, p. R1-R62, 2005, doi: 10.1088/0953-8984/17/1/R01.
- [28] L. D. Landau et E. M. Lifchitz, *Theorie de l'élasticité*. éditions Mir, 1967.
- [29] T. Baumberger et C. Caroli, « Solid friction from stick-slip down to pinning and aging », *Adv. Phys.*, vol. 55, no 3, p. 279-348, 2006, doi: 10.1080/00018730600732186.
- [30] J. N. Israelachvili, « Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours », *Surf. Sci. Rep.*, vol. 14, p. 109-159, févr. 1992, doi: 10.1016/0167-5729(92)90015-4.
- [31] R. D. Mindlin, « Compliance of elastic bodies in contact », *Trans. ASME Ser. E J. Appl. Mech.*, vol. 16, p. 259-268, 1949.
- [32] A. Schallamach, « How does rubber slide? », *Wear*, vol. 17, p. 301-312, avr. 1971, doi: 10.1016/0043-1648(71)90033-0.
- [33] S. M. Rubinstein, G. Cohen, et J. Fineberg, « Detachment fronts and the onset of dynamic friction », *Nature*, vol. 430, p. 1005-1009, août 2004, doi: 10.1038/nature02830.
- [34] J. Scheibert, « Mécanique du contact aux échelles mesoscopiques », *Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris, France, 2007. [En ligne]. Disponible sur: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00172935>*
- [35] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
- [36] W. J. Stronge, *Impact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [37] W. Goldsmith, *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. London: Edward Arnold Ltd., 1960.
- [38] W. D. Callister et D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9e éd. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [39] A. J. Piekutowski, « Electromagnetic Launchers for Hypervelocity Impact Testing », *Int. J. Impact Eng.*, vol. 23, no 1, p. 723-734, 1999, doi: 10.1016/S0734-743X(99)00117-4.
- [40] Analyse du besoin client et étapes de la conception. Document interne de formation en conception industrielle, 2020
- [41] J. R. M. Rojas et F. S. Zuniga, *Design and Modelling of Impact Test Machines: A Systems Approach*. Wiley-IEEE Press, 2017.
- [42] P. Brunet et C. M. Hoffmann, « CAD Systems and the Design Process », in *Geometric Modeling for Product Engineering*, R. Bidarra et W. F. Bronsvort, Éd., Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, p. 1-28.
- [43] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, et K. H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd éd. London: Springer, 2007.
- [44] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, et K. H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd éd. London: Springer, 2007
- [45] D. C. Planchard, *Engineering Design with SolidWorks 2011*. SDC Publications, 2010.
- [46] P. Boisseau, *La conception mécanique?: méthodologie et optimisation*, 2^e édition. in *Technique et ingénierie. Mécanique et matériaux*. Paris: Dunod, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://stm.cairn.info/la-conception-mecanique--9782100754793>

الملخص:

أثبتت اختبارات الصدمات أنها ضرورية لفهم قوة المواد وقدرتها على امتصاص الطاقة. كما أدت الأدوات الرقمية مثل التصميم بمساعدة الحاسوب (CAO) إلى تحسين تصميم الأنظمة الميكانيكية. يقترح هذا المشروع النظري تصميمًا جديدًا للتصميم بمساعدة الحاسوب لآلة الصدم، مما يحسن فهمنا لسلوك هياكل المواد ويمهد الطريق لتحسين أدائها في مواجهة الأحمال الديناميكية.

الكلمات المفتاحية: آلة الصدم، التصميم بمساعدة الحاسوب، المواد، الديناميكيات.

Abstract

Impact tests have proved indispensable for understanding the strength of materials and their capacity to absorb energy. Digital tools, such as Computer Aided Design (CAD), have also improved the design of mechanical systems. This theoretical project proposes a new CAD design for an impact machine, improving understanding of the behavior of material structures and paving the way for optimizing their performance in the face of dynamic loads.

Keywords: impact machine, CAD, materials, dynamics.

Résumé

Les essais d'impact se sont avérés indispensables pour comprendre la résistance des matériaux et leur capacité d'absorption d'énergie. Les outils numériques, tels que la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), ont également permis d'améliorer la conception des systèmes mécaniques. Ce projet théorique propose une nouvelle conception CAO d'une machine d'impact, améliorant la compréhension du comportement des structures matérielles et ouvrant la voie à l'optimisation de leurs performances face aux charges dynamiques.

Mots-clés : machine d'impact, CAO, matériaux, dynamique.