

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA -JIJEL
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Études

*Pour l'Obtention du Diplôme
De Master Académique en Génie Mécanique
Option construction mécanique*

Thème

*Simulation du procédé de compactage
des déchets métalliques*

Les membres du jury :

*Dr. W. BOUKHAROUBA Président
Dr. Y. SAADALAAH Examineur
Mr. T. SEDRAT Encadreur*

Présenté par :

*Mohammed CHOUIAL
Lamine KEDDAR*

Promotion 2018

Université de Jijel



Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à tous ceux que j'aime et surtout ma mère et mon père qui ont toujours été les étoiles de mon ciel et ont illuminé mon Chemin depuis ma naissance, je ne les remercierai jamais assez (ma mère et mon père que Dieu me les garde).

Je le dédie également à mon frère toufik, mes soeurs, ma chère nièce sidra, « MARRA » et à toute ma famille ainsi qu'à tous mes amis.

Sans oublier de dédier ce présent travail à tous les enseignants qui m'ont accompagné durant mes études, ainsi qu'à tous mes collègues de la promotion 2018.

En un mot à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.



KEDDAR LAMINE



Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à ma mère et à la mémoire de mon père. qui ont toujours été les étoiles de mon ciel et ont illuminé mon Chemin depuis ma naissance, je ne les remercierai jamais assez (ma mère que Dieu me la garde).

Je le dédie également à mes frères, mes soeurs et leurs enfants et à toute ma famille ainsi qu'à tous mes amis.

Sans oublier de dédier ce présent travail à tous les enseignants qui m'ont accompagné durant mes études, ainsi qu'à tous mes collègues de la promotion 2018.

En un mot à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.



CHOUIAL MOHAMED

Remerciements

Nous remercions notre dieu qui nous a donné le courage et la volonté de poursuivre nos études, ainsi que nos parents, qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite.

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements et le plus grand respect à notre encadreur **M. Toufik Sedrat** pour sa compréhension, sa disponibilité, son savoir-faire, ses conseils Judicieux et toute l'aide qu'il nous a apportés.*

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et de nous avoir honorés par leurs présences.

Nous remercions toute la famille, tous les amis pour leurs encouragements.

Nous remercions tous qui ont contribué de près ou de loin à la mise en oeuvre de ce travail.

Keddar Lamine

Chouial Mohammed

ملخص

اصبحت عملية الضغط ضرورية للغاية بسبب زيادة النفايات الصناعية ونقص في أماكن التفريغ، ويهدف تحسين هذه العملية قمنا بمحاكاتها ببرنامج Abaqus وسيناريو Python من اجل التوزيع العشوائي للنفايات .

يتكون هذا العمل بشكل رئيسي من محاكاة عملية ضغط النفايات المعدنية. في نهاية دورة إعادة التدوير، درسنا تأثير سمك النفايات والقوة المطبقة بواسطة الضاغطة على معدل الضغط (تقليل حجم النفايات في مراكز التفريغ).

الكلمات المفتاحية : الضغط . نفايات . أباكوس . ضاغط . بيتون

Résumé

L'opération de compactage est devenue très essentiel lors de l'augmentation des déchets industrielle et le manque des espaces dans les déchèteries, au but de bien métriser (enrichir les informations de ce domaine) cette opération avec logiciel abaqus en utilisant script phyton pour la distribution aléatoire des déchets.

Ce travail consiste principalement à la simulation du procédé de compactage des déchets métalliques. A fin d'optimises la démanche de recyclage, on a étudié l'influence de l'épaisseur des déchets et de la force appliquée par le compacteur sur le taux de compactage (réduire le volume des déchets dans les déchèteries).

Mots clé : compactage, déchets, abaqus, compacteur, phyton

Abstract

The compacting operation has become very essential when increasing industrial waste and the lack of spaces in the waste disposal centers, the purpose of well metering (enrich the information of this area) this operation with Abaqus software using phyton script for the random distribution of waste.

This work consists mainly of the simulation of the metal waste compaction process. At the end of the recycling cycle, we studied the influence of the thickness of the waste and the force applied by the compactor on the compaction rate (reduce the volume of waste in the waste centers).

Key words : compacting, waste, ABAQUS, compactor, Python.

Liste des figures

Figure I.1: Déchets ménagers.....	3
Figure I.2: Déchets industriels	3
Figure I.3 : Déchets dangereux	4
Figure I.4 : Déchets liquides	5
Figure I.6 : Déchets avant et après le compactage	11
Figure I.7 : Presse-cisaille	12
Figure I.8 : Presse à balle verticale	13
Figure I.9 : Presse à balle horizontal.....	13
Figure I.10 : Presse des futs des déchets.....	14
Figure I.11: Vue en profil du prototype ainsi que les positions des vérins.....	15
Figure I.12 : Mode de fonctionnement du prototype	16
Figure I.13 : Version final du compacteur « COMPAC 001-M »	16
Figure II.1 : Essai de compression (ou de traction) uni-axiale d'un matériau	18
Figure II.2 : élasto-plasticité parfaite	19
Figure II.3 : élasto-plasticité avec écrouissage	20
Figure II.4 : Evolution de la surface de charge dans l'espace des contraintes principales. pour un matériau présentant des propriétés d'écrouissage.....	21
Figure II.5 : Schématisation de l'écrouissage isotrope	22
Figure II.6 : Schématisation de l'écrouissage cinématique.....	23
Figure II.7 : Critère de Tresca -domaine d'élasticité dans l'espace des contraintes Principales.....	25
Figure II.8 : Critère de Von Mises -domaine d'élasticité dans l'espace des contraintes Principales.....	26
Figure III.1 : Interface d'Abaqus	32
Figure III.2 : Create Part	33
Figure III.3 : Create Material	33
Figure III.4 : Create Section.....	34
Figure III.5 : Assign Section.....	34
Figure III.6 : Instance Part	35
Figure III.7 : Create Step.....	35
Figure III.8 : Create Interaction	35
Figure III.9 : Create Interaction property	35
Figure III.10 : Create Load	36
Figure III.11 : Create Boundary Condition.....	36
Figure III.12 : Create Field	36
Figure III.13 : Différents modules d'Abaqus.....	37
Figure III.14 : Dimensions de la boîte	38
Figure III.15 : Organigramme de distribution aléatoire des boîtes	39
Figure III.16 : Caisson	40
Figure III.17 : Poinçon.....	40
Figure III.18 : Assemblage des pièces	41

Figure III.19 : Condition aux limites et chargement.....	42
Figure III 20 : Assemblage maillé.....	43
Figure III.21 : Comportement des déchets pendant le compactage	43
Figure III.22 : Variation de taux de compactage en fonction de la force	44
Figure III.23 : Volume compacté par 5000 N.....	45
Figure III.24 : Volume compacté par 10000 N.....	45
Figure III.25 : Volume compacté par 15000 N.....	46
Figure III.26 : Volume compacté par 20000 N.....	46
Figure III.27 : Volume compacté par 5000 N.....	47
Figure III.28 : L'influence de l'épaisseur sur le taux de compactage.....	48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Récapitulatif des techniques de gestion des déchets.....	10
Tableau III.1 : Maillage des pièces	42
Tableau III.2 : Déplacement du poinçon sous la force appliquée	43
Tableau III.3 : Déplacement du poinçon sous l'épaisseur	47

Liste des symboles

D.I.B : Les déchets industriels banals.

C/N : Le rapport des teneurs en carbone et azote.

D.I.S : Déchets industriels spéciaux.

PET : Poly Téréphtalate D'éthylène.

PEHD : Poly Ethylène Haute Densité.

V₁, V₂, V₃, V₄ : Vérins.

LRP : LABORATOIRE de recherche en productique.

ECM-NAILI : L'entreprise de construction métallique NAILI.

ϵ : La déformation.

ϵ^p : La déformation plastique.

E^{ep} : Module élasto-plastique tangent.

F : La surface de charge.

R : L'ensemble des paramètres d'écrouissage.

σ : Tenseur des contraintes.

ϵ^e : la déformation élastique.

G (σ_{ij}) : potentiel plastique.

F (σ_{ij}) : charge plastique.

λ : multiplicateur plastique.

K : variable d'écrouissage.

τ_{max} : contrainte maximale de cisaillement.

$\bar{\sigma}$: Contrainte maximal.

σ_{t1} : Limite élastique en traction initial.

σ_{t2} : Limite élastique en traction.

I_1, I_2, I_3 : Invariants.

S: Matrice de souplesse.

μ : Coefficient de frottement interne.

ϕ : L'angle de frottement interne.

c : Représente la cohésion du matériau.

C.A.O : Conception assisté par ordinateur.

CAE : Complet abaqus environnement.

σ_n : Contrainte normale.

ϵ_0 : Déformation initial.

ρ : La densité.

n : nombre des fibres (boites de boissons).

L : longueur de fibre (boites de boissons).

R : Rayon de fibre (boites de boissons).

V_i : Volume initial.

V_f : Volume finale.

F : La force.

Z : Déplacement.

T : Taux de compactage.

C : Coefficient de compression.

E_p : Epaisseur.

↪ SOMMAIRE

Dédicaces	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des symboles	vii

<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
--	-----------------

Chapitre I : Etude bibliographique et Généralités

I.1.Introduction.....	2
I.2.Généralités sur les déchets.....	2
I.2.1.Définition des déchets.....	2
I.2.2.Types des déchets	2
I.2.2.1.Déchets ménagers	2
I.2.2.2.Déchets industriels.....	3
I.2.2.3.Déchets dangereux.....	4
I.2.2.4.Déchets liquides.....	4
I.2.3.Classification des déchets.....	5
I.2.3.1.Classement selon l'origine des déchets	5
I.2.3.2.Classement selon la nature des déchets	6
I.2.4.Caractéristiques des déchets	6
I.2.4.1.Densité	6
I.2.4.2.Degré d'humidité	6
I.2.4.3.Pouvoir calorifique	6
I.2.4.4.Rapport des teneurs en carbone et azote.....	6
I.2.5.Impacts des déchets sur l'environnement	7
I.2.5.1.Pollution atmosphérique	7
I.2.5.2.Pollution de sol	7
I.2.5.3.Pollution de l'eau.....	7
I.2.6.Méthodes de traitement des déchets	7
I.2.6.1.Valorisation de matière.....	8
I.2.6.2.Compostage	8
I.2.6.3.Valorisation énergétique.....	8
I.2.6.4.L'enfouissement	9
I.2.7.Gestion des déchets.....	9
I.3.Déchets métalliques	10
I.4.Compactage des déchets.....	11
I.4.1.Définition.....	11
I.4.2.Principe de compactage	11

I.4.3. Compacteur	11
I.4.4. Quelques types des compacteurs	12
I.4.4.1. Presse-cisaille	12
I.4.4.2. Presse à balles	12
I.4.4.3. Presse pour compactage des fûts de déchets.....	14
I.4.4.4. COMPAC 001-M (ECM-NAILI)	14
I.4.5. Avantages et inconvénients du compactage des déchets.....	17
I.5. Conclusion	17

Chapitre II : Comportement élasto-plastique des matériaux

II.1. Introduction	18
II.2. Comportement élasto-plastique	18
II.3. Modélisation du comportement élasto-plastique.....	19
II.4. Notion de base fondamentale	20
II.4.1. Surface de charge	20
II.4.2. Règle d'écrouissage.....	21
II.4.2.1. Ecrouissage isotrope.....	22
II.4.2.2. Ecrouissage cinématique	22
II.4.3. Règle d'écoulement.....	23
II.4.3.1. Loi d'écoulement associée	23
II.4.3.2. Loi d'écoulement nom associée	24
II.5. Critères de la plasticité	24
II.5.1. Critère de Tresca (1868).....	24
II.5.2. Critère de Von-Mises	25
II.5.3. Critère de Mohr-Coulomb	26
II.5.4. Critère de HILL	27
II.6. Conclusion.....	27

Chapitre III : Présentation du code de calcul ABAQUS et simulation du procédé de compactage

III.1. Introduction.....	29
III.2. Généralités sur le code de calcul Abaqus.....	30
III.2.1. Modules principaux.....	30
III.2.2. Complément du module	30
III.2.3. Fichiers.....	30
III.2.4. Définition du logiciel Abaqus	31
III.2.5. Bases de l'interface d'ABAQUS	32
III.2.5.1. Organisation de l'interface.....	32
III.2.6. Présentation du logiciel ABAQUS CAE	32
III.2.6.1. Modules.....	32
III.3. Simulation de procédé du compactage.....	37
III.3.1. Génération des différentes pièces	37

III.3.2.Assemblage des pièces.....	41
III.3.3.Configuration de l'analyse et spécification des résultats.....	41
III.3.4.Définition du contact.....	41
III.3.5.Condition aux limites.....	41
III.3.6.Maillage des pièces.....	42
III.3.7.Résultats et discussion.....	43
III.3.7.1.Variation du taux de compactage en fonction de la force du poinçon.....	43
III.3.7.2.L'influence de l'épaisseur sur le taux de compactage de la boite de boisson.....	47
III.4.Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49

Introduction générale

Depuis le début des années 1990, la protection de l'environnement est devenue une Préoccupation collective. La question des déchets est quotidienne et touche chaque individu tant sur le plan professionnel que familial.

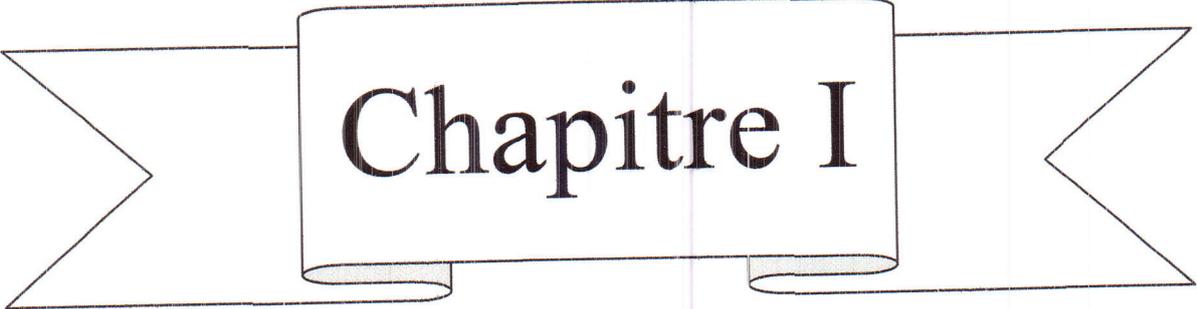
Le compactage est une étape principale dans le procédé de recyclage. Il réduit ainsi le volume occupé par des ordures en augmentant leur densité. Cette technique est utilisable pour tous les déchets solides : comme les déchets métalliques

Les métaux ferreux et non-ferreux sont traditionnellement recyclés de manière économique et écologique sans perte de qualité par de nombreux entrepreneurs. Ci-après sont inventoriés les déchets le plus souvent rencontrés, et proposés différentes pistes d'actions de traitement potentiel, notamment au travers de filières de valorisation alternatives et financièrement intéressantes.

Dans le premier chapitre nous définissons les déchets et leurs caractéristiques ainsi que leurs différents types. Par la suite, nous décrivons les impacts de ces déchets industriels sur l'environnement (sur l'air, d'eau et de sol) et nous expliquons tous les techniques de gestion et de traitement des déchets on commençant par la valorisation de matière, le compostage, la valorisation énergétique et l'enfouissement. A la fin on a parlé un peu sur le compactage et leur principe et les différents compacteurs existant à l'étranger de façon générale et ceux existant dans l'industrie locale, qui nous a permis d'avoir une idée sur ce type de déchets.

Le deuxième chapitre donne un aperçu général du comportement élasto-plastique des matériaux, et sur sa modélisation en présentant les concepts fondamentaux sur lesquels il s'appuie; ainsi une schématisation de l'écrouissage aussi différents critères et modèles du comportement mécanique élasto-plastique ont été présentés.

Le troisième chapitre concerne la simulation du procédé de compactage des déchets métalliques sous forme de boites de boissons en utilisant le code de calcul Abaqus, qu'on a présenté, et à l'aide du langage Python aussi. Après, on a étudié l'influence de la variation de la force appliquée et de l'épaisseur du matériau qui constitue les boites de boissons sur le taux de compactage qui est un élément fondamental dans le procédé du recyclage.



Chapitre I

Etude bibliographique et Généralités

I.1.Introduction

Il a été constaté ces dernières années une croissance accrue des quantités de déchets produits par les unités industrielles de production dans notre pays, ainsi que l'impact néfaste de ces déchets sur notre environnement d'où l'importance du traitement de ces déchets. Le compactage est un moyen incontournable pour la valorisation des déchets dits déchets industriels banales (D.I.B.). Il s'impose non seulement du point de vue écologique, mais aussi du point de vue économique, car il permet un gain sur les surfaces de stockage et tout ce que ça engendre, et une facilité d'acheminement aux unités de recyclage où sera récupérée la matière première pour un autre usage ce qui participe à l'utilisation rationnelle des ressources naturelles ainsi qu'à la préservation de l'environnement.[1]

I.2.Généralités sur les déchets

I.2.1.Définition des déchets

Larousse définit le déchet comme ce qui est perdu dans l'emploi d'une matière. Du point de vue juridique, le déchet représente tout produit sans valeur et destiné à l'abandon. Du point de vue sociologique, un déchet est défini comme un produit dont on ne sait pas se servir, une ressource en attente d'utilisation ou une lacune du potentiel technologique. Il ressort de ces définitions que la notion de déchet est très large.[1]

Les déchets sont donc un ensemble de résidus se présentant sous forme solide, voire liquide quand ils sont contenus dans des récipients réputés étanches. Ces déchets résultent des différentes activités humaines : domestiques, industrielles et agricoles.

I.2.2.Types des déchets [2][3]

Les déchets peuvent être classés en quatre types :

I.2.2.1.Déchets ménagers

Un déchet ménager est un déchet issu de la vie quotidienne des ménages, de certaines collectivités et de certains commerçants. C'est un déchet qu'un individu va produire tout au long de sa vie, sur son lieu d'habitation ou de travail, sans caractère dangereux pour l'homme ou l'environnement.

On distingue trois types de déchets ménagers : les **ordures ménagères**, tels que les aliments, les plastiques non recyclables, les emballages souillés..., les **journaux / magazines et emballages recyclables ménagers**, tels que les bouteilles en verre, les cartons, bouteilles et

flacons plastique, canettes et boites de conserves et les **déchets ménagers spéciaux** tels que les ampoules, batteries, piles, pot de peintures.



Figure I.1: Déchets ménagers

I.2.2.2. Déchets industriels

Un déchet industriel banal tels que le bois, chutes diverses, papiers, cartons, ferraille, déchets verts, polystyrène, gravats, est un déchet généré par une entreprise qui n'est dangereux ni pour l'homme, ni pour l'environnement. Bien qu'il ne soit pas toxique, il doit être traité, valorisé ou recyclé. En effet, il peut tout de même brûler, fermenter, rouiller ou mettre des centaines d'années à se décomposer et polluer l'environnement.



Figure I.2: Déchets industriels

I.2.2.3. Déchets dangereux

Ce sont les déchets qui mettent en danger non seulement la santé de l'homme et des animaux, mais aussi celle de l'environnement. Ceux-ci sont issus des usines industrielles, agricoles et pharmaceutiques, ou encore des centres hospitaliers et des laboratoires. De même, l'armée peut produire massivement des déchets toxiques, en ce sens qu'elle utilise des explosifs et une artillerie lourde dont l'utilisation provoque des effets radioactifs nuisibles. N'oublions pas non plus que de nos produits ménagers peuvent émaner des déchets toxiques. Ceux-ci sont entre autres les compositions cosmétiques, les produits de nettoyage et de désinfection de la maison, etc.



Figure I.3 : Déchets dangereux

Fort heureusement, il existe des spécialistes du recyclage de ces déchets toxiques. Comme tout déchet cependant, certains d'entre eux ne peuvent être réutilisés. Ces derniers doivent donc être enfouis dans une déchetterie spéciale destinée à les accueillir.

I.2.2.4. Déchets liquides

Le déchet liquide regroupe les déchets des eaux usées. Il provient des eaux de pluies, des fosses septiques...



Figure I.4 : Déchets liquides

I.2.3. Classification des déchets [4]

Les déchets industriels sont variés. Ils peuvent être classés selon leur origine, leur nature. Si on fait une classification du moins nocif au plus nocif, Toutefois, que le déchet soit nocive ou pas, des traitements s'imposent pour réduire les effets sur l'environnement.

I.2.3.1. Classement selon l'origine des déchets

a. Déchets municipaux: Ils comportent :

- **Déchets ménagers :** constitués pour l'essentiel d'ordures ménagères auxquelles s'ajoutent les déchets de jardinage, de bricolage, les encombrants, les déchets liés à l'usage de l'automobile, les déchets ménagers spéciaux (aérosols, acides, peintures, vernis, piles, etc.).
- **Déchets des collectivités :** déchets du nettoyage, déchets des espaces verts publics, déchets de l'assainissement public (boues de station d'épuration des eaux usées, boues de curage d'égouts).
- **Déchets d'origine commerciale ou artisanale :** assimilables aux ordures ménagères.

b. Déchets des entreprises: Il s'agit des déchets produits par les entreprises Industrielles, commerciales et artisanales. Ils comprennent des matériaux de natures divers (déchets de fabrication, emballages vides, sous-produits de production, etc....). Ils sont souvent classés dans trois grandes catégories : déchets inertes, déchets banals (assimilables aux ordures ménagères) et déchets dangereux.

c. Déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires : Ils sont composés de déchets essentiellement organiques, les autres déchets (films plastiques, emballages, etc.).

d. Déchets d'activités de soin: Souvent dénommés de façon réductrice « Déchets Hospitaliers », ces déchets comprennent les déchets des établissements de soins ou déchets hospitaliers et les déchets des laboratoires médicaux.

I.2.3.2. Classement selon la nature des déchets

a. Déchets non dangereux ou banals: Déchets non toxiques souvent assimilés aux ordures ménagères qui proviennent de l'ensemble des activités économiques.

b. Déchets dangereux ou spéciaux: Déchets qui peuvent générer des nuisances pour l'homme ou l'environnement.

c. Déchets inertes : Déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables.

I.2.4. Caractéristiques des déchets [5]

On caractérise les déchets par quatre paramètres essentiels suivants :

I.2.4.1. Densité

La connaissance de la densité est d'une grande importance pour le choix des moyennes décollectes et de stockage. C'est pourquoi on peut avoir une densité en poubelle, une densité en benne, une densité en décharge, une densité en fosse, etc.

I.2.4.2. Degré d'humidité

Les ordures renferment une suffisante quantité d'eau variant en Fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la décomposition des matières qu'elles renferment et sur le pouvoir calorifique des déchets.

I.2.4.3. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids en ordures brutes.

I.2.4.4. Rapport des teneurs en carbone et azote

Le rapport C/N a été choisi comme critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets, car l'évolution des déchets en fermentation peut être suivie par la détermination régulière de ce rapport.

I.2.5.Impacts des déchets sur l'environnement [6]

De nos jours l'utilisation intensive et abusive des ressources et le rejet des déchets dans l'environnement contribuent à détériorer notre milieu ce changement a un impact sur l'atmosphère, l'eau, sol et l'être humaine.

I.2.5.1.Pollution atmosphérique

L'élimination inconsidérée des déchets a pour conséquence la pollution atmosphérique, de l'eau et du sol. Ainsi ces déchets rejetés polluent fortement l'air que nous respirons et ce de façons différentes. L'air que l'on respire tous les jours est contaminé à cause de nos actes inconsidérés prévalant depuis déjà des années. Cette pollution atmosphérique est responsable de la mort de 2.4 millions de personnes par an dans le monde entier. L'air pollué diminue l'espérance de vie des hommes, cause des troubles cardiaques, respiratoires ou reproductifs.

I.2.5.2.Pollution de sol

Aujourd'hui on estime que 70% des déchets sont enfouis, notamment les déchets nucléaires, cette pollution a des effets négatifs nombreux comme l'érosion et la contamination des sols, la diminution des matières organiques ou le fait que le sol devienne imperméable.

I.2.5.3.Pollution de l'eau

Les rejets humains sont la première cause de la pollution de l'eau douce. En conséquence 900.000 personnes en Amérique souffrent de maladies gastriques et de plus dans les pays pauvres, beaucoup de personnes meurent suite à une diarrhée due à de l'eau sale. Dans le même temps, chaque année plus de 6 millions de tonnes de déchets différents sont rejetés dans les océans.

I.2.6.Méthodes de traitement des déchets [7]

Le traitement des déchets sa peut-être débuté depuis que l'homme a découvert que là où il jetait ses ordures, les plantes poussaient mieux. Il n'avait aucun souci à se faire puisque cela se faisait de façon naturelle. Tout ce qu'il jetait était soit inerte ou biodégradable. Bien plus tard certains individus ont trouvé dans la récupération de certains produits comme du chiffon ou du métal une activité rentable.

Donc il y a plusieurs procédés pour le traitement des déchets pour récupérer ces produits, on peut citer :

I.2.6.1. Valorisation de matière

Mode de traitement de déchets visant à leur utilisation en substitution à d'autres matières ou substances selon trois procédés.

a. Le recyclage : Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement totale ou partielle d'une matière première naturelle.

-Les principes de recyclage : on distingue trois types principaux :

•**Réduire** : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.

•**Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.

•**Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

b. La réutilisation : est une opération qui permet à un déchet d'être utilisé à nouveau en détournant éventuellement son usage initial.

c. Le réemploi : est une opération qui permet à des biens qui ne sont pas des déchets d'être utilisés à nouveau sans qu'il y ait modification de leur usage initial.

I.2.6.2. Compostage

Est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques (substrats) organiques, sous forme solide ou semi Solide et d'origines végétales et animales, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobies, entraînant une montée en température et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et le produit ainsi obtenu est appelé compost (matériau stable et granulaire).

I.2.6.3. Valorisation énergétique

Elle consiste à récupérer et à valoriser l'énergie produite lors du traitement des déchets sous forme de chaleur, d'électricité, de carburant .on peut distinguer deux types de valorisation énergétique.

-La valorisation par traitement thermique (incinération, Co-incinération, pyrolyse...)

-La valorisation du biogaz : issu notamment des installations de stockage des déchets non dangereux et de la méthanisation des déchets organique.

I.2.6.4.L'enfouissement

Le dernier mode de traitement des déchets est l'enfouissement, méthode la moins écologique de toute puisque le déchet n'est ni réutilisé, ni valorisé, ce mode de gestion s'applique essentiellement aux déchets ultime dont aucune solution, à l'heure actuelle n'été trouvée.

I.2.7.Gestion des déchets [8]

Afin de réduire les effets néfastes des déchets sur l'environnement et sur la santé humaine, l'accent a été mis sur la gestion des déchets : la collecte, le transport, le traitement et l'élimination des déchets. D'habitude, la gestion des déchets consiste à les récupérer puis à les stocker. Une grande variété de techniques peut être utilisée pour stocker et gérer les déchets. Ces dernières décennies, le critère des 3R (Réduction, Réutilisation et Recyclage) devient le principe dominant de gestion des déchets.

Ainsi, le déchet peut être vu comme une ressource potentielle à exploiter et à valoriser. Depuis quelques années, de nombreux pays travaillent à la revalorisation des déchets afin de les réutiliser comme matière première dans les domaines du génie civil, de la papeterie, des plastiques. Les moyens et les techniques se diversifient et progressent de jour en jour.

A l'heure actuelle, les techniques de la gestion des déchets utilisent les méthodes suivantes : décharge, incinération, compost et fermentation, traitement biologique et mécanique, pyrolyse et gazéification. La méthode de stockage des déchets la plus utilisée en Australie est la décharge, la densité de population étant faible devant la grande superficie du pays. A l'opposé au Japon, la méthode la plus répandue est l'incinération des déchets à cause de la petite taille du Japon. Au Canada, le tri sélectif est la méthode la plus fréquemment utilisée. Les techniques utilisées dans les différents pays sont résumées dans le tableau 1. On remarque que les approches de gestion des déchets varient en fonction du temps, du pays et des types des polluants.

Tableau I.1 : Récapitulatif des techniques de gestion des déchets

Pays	Technique de gestion des déchets
Chine	Décharge, incinération, compost
France	Incinération
Australie	Décharge
Japon	Incinération
Canada	Tri sélectif
Etats-Unis	Décharge, incinération, compost

I.3.Déchets métalliques [9]

Les métaux sont facilement identifiables et recyclables. Leur mise en décharge, telle qu'elle se pratique pour une partie des déchets ménagers, constitue un gaspillage économique facilement évitable.

Les déchets de métaux ferreux sont divisés en 3 grandes catégories :

- les chutes propres de la sidérurgie qui sont quasi intégralement recyclées au sein même de l'usine qui les a produites ;
- les chutes des usines de transformation ;
- la ferraille de récupération provenant des objets mis au rebut ou destinés à l'abandon : épaves automobiles, électroménager, divers matériels métalliques collectés en déchetterie, ...

Les déchets de métaux non ferreux comprennent tous les autres métaux. Ils sont issus :

- des chutes « neuves » de fabrication ou de transformation.
- des matériels usagés, notamment les matériels électriques.
- des composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le contenu valorisable.

I.4.Compactage des déchets [10]

I.4.1.Définition

Le compactage est une technique utilisable pour tous les types de déchets solides. Il est principalement utilisé pour les ordures ménagères, dans les décharges, et dans de nombreuses industries pour réduire aussi bien leur volume de D.I.B (déchets industriels banals) que de D.I.S (déchets industriels spéciaux), elle s'effectue avec un dispositif prévu pour cet effet appelé compacteur.

I.4.2.Principe de compactage

Le but du compactage est d'augmenter la densité des déchets, c'est à dire réduire le volume occupé par une certaine quantité de déchets. La densité passe, durant le compactage, de 0.2 ou 0.3 t/m³ à environ 1 t/m³. Cela permet ainsi d'augmenter les capacités de stockage.



Figure I.6 ; Déchets avant et après le compactage

I.4.3.Compacteur [1]

Est un appareil qui comprime les déchets dans un container entièrement fermé au moyen d'un poussoir ou d'un piston à mouvement alternatif. Ce type d'appareil permet d'obtenir des réductions de volume importantes, notamment pour les déchets industriels banals.

Pour choisir votre compacteur, vous pouvez vous baser sur plusieurs critères :

- La capacité de stockage.
- L'encombrement.
- L'étanchéité, notamment pour les déchets humides.

I.4.4. Quelques types des compacteurs [1]

I.4.4.1. Presse-cisaille

Utilisée pour réduire les dimensions des ferrailles de grande longueur afin d'en faciliter la manipulation, le stockage et le transport.

Son usage conduit à des produits feuilletés présentant des coupes qui ne sont pas franches. Cet aspect peu valorisant convient néanmoins à un recyclage des ferrailles réduites en four électrique.



Figure I.7 : Presse-cisaille

I.4.4.2. Presse à balles

Initialement, les presses à balles adoptaient une structure verticale ou horizontale. Elles étaient actionnées manuellement par des vis et se trouvaient principalement utilisées dans le secteur textile. Elles se sont progressivement étendues au secteur du papier carton, puis aux déchets (boîtes de boissons en aluminium, bouteilles en plastique...).

a. Presse à balle verticale

La presse à balle verticale permet d'obtenir des balles de déchets d'emballages denses avec des poids allant de 25 kg jusqu'à 500 kg selon la matière compressée (Déchets cartons, plastiques, cageots, bidons, bouteilles PET, PEHD et autres matériaux d'emballages).



Figure I.8 : Presse à balle verticale

b. Presse à balle horizontale

La presse à balles horizontale vous permettra de faciliter les opérations de tri sélectif, de recyclage et d'optimiser la valorisation de vos déchets, qui deviendront alors des matières premières de récupération négociables.

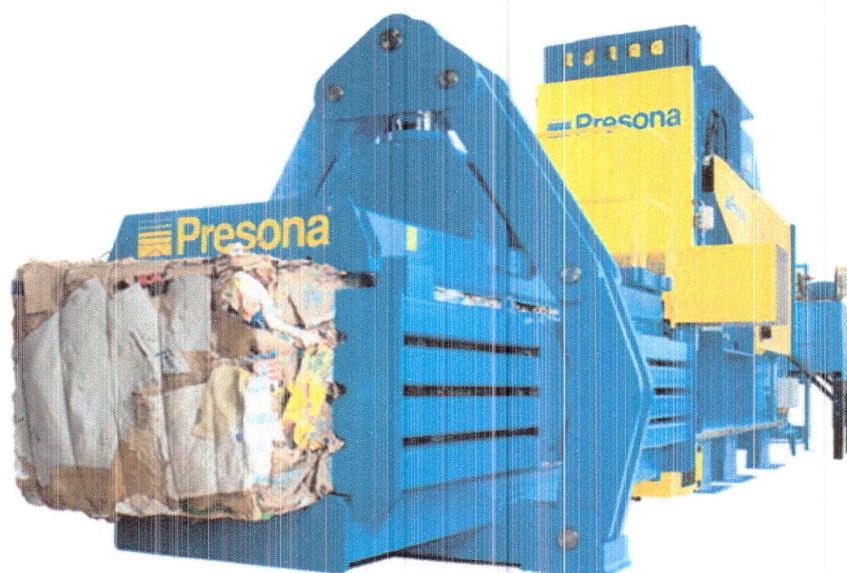


Figure I.9 : Presse à balle horizontal

I.4.4.3. Presse pour compactage des fûts de déchets

Compactage de fûts de déchets avec une presse de 150 tonnes. Manipulation des fûts et galettes en télé-opération et cycles automatiques.

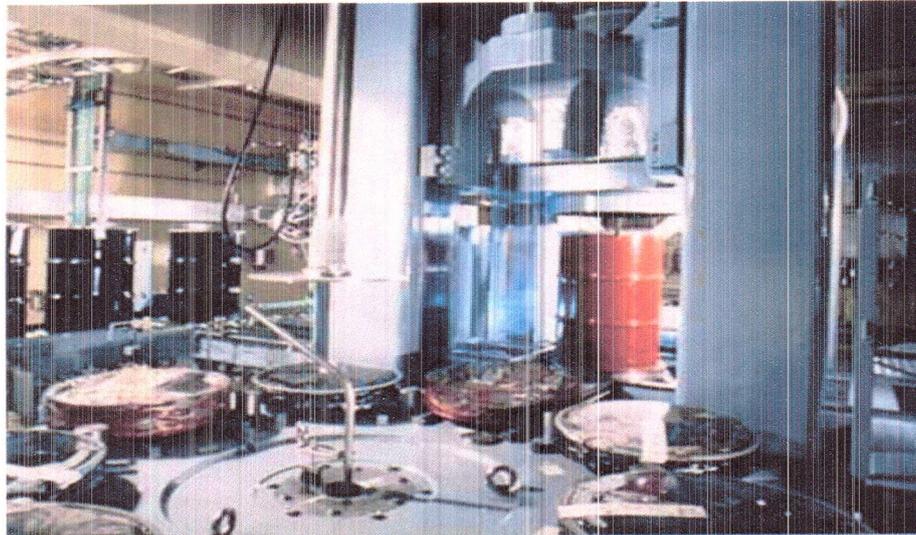


Figure I.10 : Presse des fûts des déchets

I.4.4.4. COMPAC 001-M (ECM-NAILI)

Ce compacteur a été réalisé en collaboration avec l'entreprise de construction métallique (ECM-NAILI) par l'équipe mécanisme et robotique du laboratoire de recherche LRP de l'Université de Batna sous la direction du Dr. BARKAT B dans le cadre d'un sujet de fin d'études ingénieur. Après l'étude des résultats donnés par les tests préliminaires de compactage, il a été décidé de fabriquer un prototype pouvant compacter sur deux flancs. Cette décision s'appuie sur le fait que le compactage sur deux flancs exécuté lors des expériences a donné un bon taux de compactage pour ce type de déchets (déchets de la société BENPACK) de l'ordre de 80%.

Il a été jugé qu'il n'était pas nécessaire de compacter sur le 3^{ème} flanc vu que le taux de compactage n'a varié que sensiblement lors du compactage sur le troisième flanc. Il faut ajouter aussi que la géométrie de la balle après compactage sur deux flancs seulement était régulière et conforme au cahier des charges.

Une réflexion a abouti et elle est montrée ci-dessous :

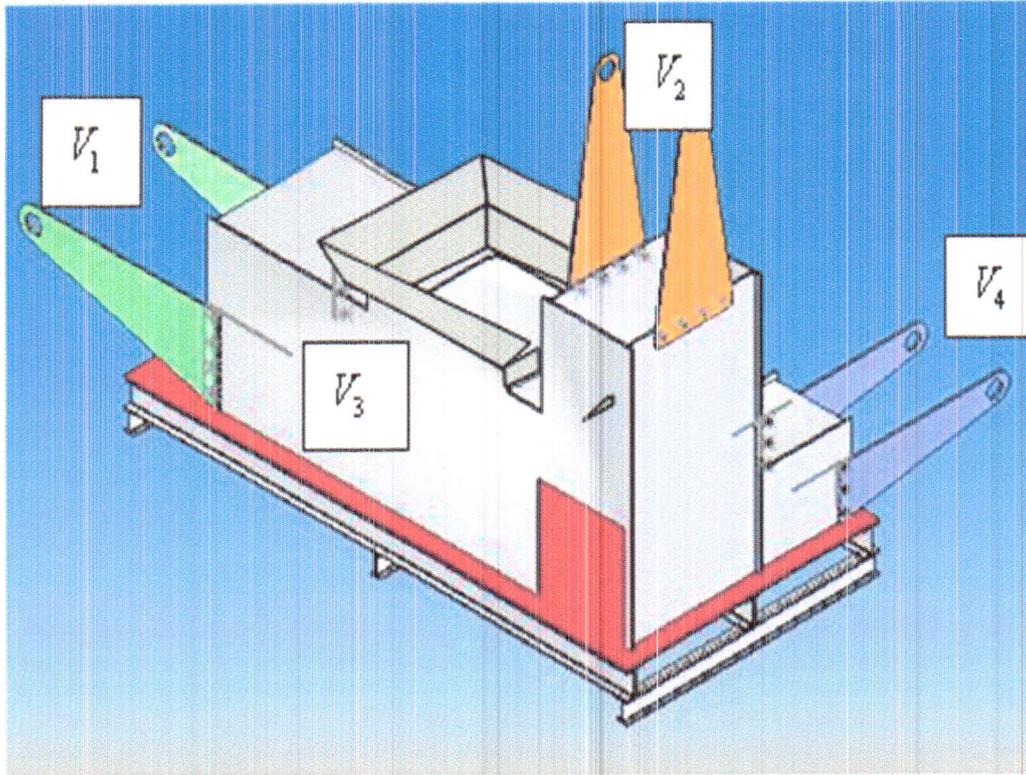


Figure I.11: Vue en profil du prototype ainsi que les positions des vérins

Le prototype est composé d'une coque soutenue en dessous par des profilés. Cette même coque servira d'enceinte au compactage et permettra la fixation des vérins.

Mode de fonctionnement du prototype

Après remplissage des déchets dans l'entonnoir, ces derniers seront compactés suivant le premier flanc (selon l'axe X) grâce à un piston actionné par un vérin V_1 prévu à cet effet, un deuxième piston positionné perpendiculairement au premier c'est à dire selon l'axe (Y), comprimera les déchets sur le deuxième flanc grâce à un vérin V_2 . Après l'ouverture de la trappe d'extraction qui sera manipulée par un vérin V_3 positionné à l'extérieur de la porte, un autre piston raclera la balle grâce au vérin V_4 qui basculera à l'extérieur. Le mode de fonctionnement est schématisé sur la figure ci-dessous :

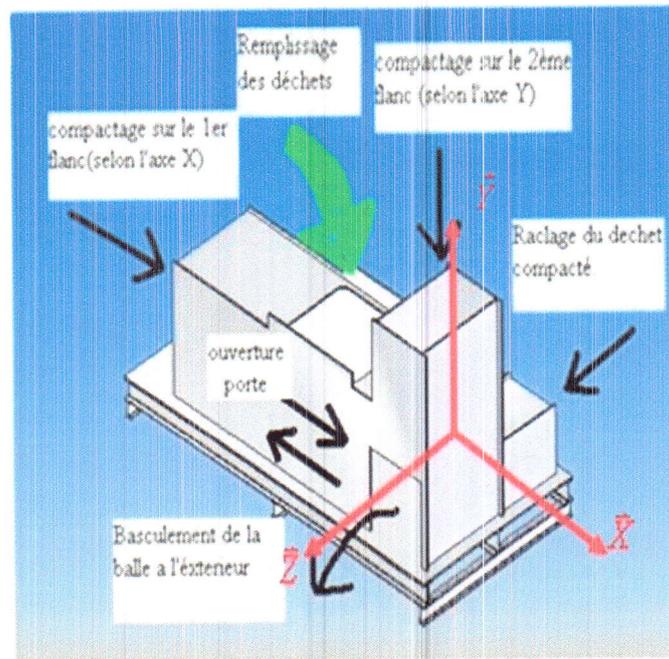


Figure I.12 : Mode de fonctionnement du prototype



Figure I.13 : Version final du compacteur « COMPAC 001-M »



Chapitre II

Comportement élasto-plastique des matériaux

I.4.5. Avantages et inconvénients du compactage des déchets

a. Les avantages

- Réduction de l'émission de CO₂ à cause du transport
- Gain de place déplacements moins fréquents aux containers
- Diminution de la fréquence du ramassage (moins de transport)
- Economie de carburant.

b. Les inconvénients

- Plus de déchets à stocker en décharge
- Manipulations supplémentaires
- Difficultés de trier l'emballage compacté (machine incapable de séparer les bouteilles compactées des déchets plats)
- Plus de déchets non recyclés qui partent en décharge (enfouissement, incinération...).
- Difficultés de tri donc frais supplémentaires car retour des déchets recyclables non triés.

I.5. Conclusion

La politique de gestion des déchets et leur recyclage n'est pas au bout dans notre pays, pour cette raison nous étions confrontée à un problème d'information sur ce type d'installation et de matériel ainsi que sa non disponibilité dans notre secteur industriel. Les stations de recyclage et du traitement des déchets sont presque inexistantes, de ce fait nous étions obligés de faire une recherche via Internet dans les sociétés étrangères.

A travers cette recherche bibliographique nous avons pu regrouper quelques connaissances générales sur les déchets en particuliers les déchets métalliques et les différents types des dispositifs de compactage.

II.1.Introduction

L'étude du comportement mécanique des matériaux a pour but de connaître leur réponse à une sollicitation donnée. Les variables mises en jeu dans ce domaine sont les contraintes et les déformations.

Dans ce deuxième chapitre nous faisons appel à quelques notions utiles dans le domaine élasto-plastique. Pour cela, nous commencerons tout d'abord par une modélisation du comportement élasto-plastique. Puis, nous donnons un aperçu sur les critères de plasticité.

II.2.Comportement élasto-plastique

Un matériau élasto-plastique ou plastique se caractérise par l'apparition de déformation irréversible au-delà d'un certain seuil de contrainte, dans ces matériaux apparaissent des déformations plastique. Ces déformations et ces contraintes obéissent à des lois bien précises. Le temps n'intervient pas explicitement dans la relation contrainte-déformation d'un matériau élasto-plastique, la réponse à une sollicitation est indépendante de l'âge du matériau [11].

On définit d'abord un critère de plasticité qui est une fonction des contraintes, éventuellement écrouissables avec les déformations. Ce critère ne peut être dépassé en aucun point. Lorsqu'il est atteint, débutent les déformations irréversible ou plastique. Ces déformations sont régies par la loi dite loi d'écoulement. L'essai classique de traction (fig II.1) sur une éprouvette d'un matériau ayant un comportement élasto-plastique avec écrouissage permet de mettre en évidence le non linéarité et le phénomène d'irréversibilité caractérisant le comportement plastique [12].

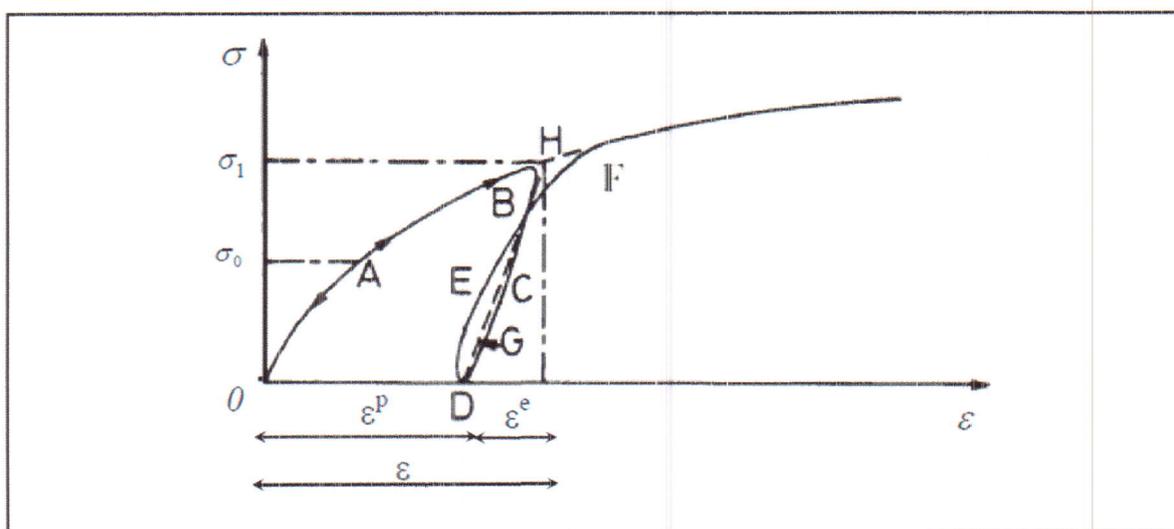


Figure II.1: Essai de compression (ou de traction) uni-axiale d'un matériau

Le long du chemin OA le comportement est élastique, c'est-à-dire que, quand on décharge on revient en O. Le point A, représentant le point limite au-delà duquel on n'a plus de comportement élastique, correspond à une contrainte caractéristique dite « seuil » de plasticité initial ou « limite élastique ». Après l'avoir franchi, et si, étant au point B par exemple, on décharge, le chemin de déchargement ne sera pas BAO mais BCD. La déformation qui reste $OD = \varepsilon^P$ est une déformation irréversible, dite plastique. On est donc entré dans le domaine plastique. Si on recharge, le chemin sera DEF, F étant le prolongement du chemin OAB. Il rejoint alors le chemin du premier chargement.[13]

On peut assimiler en général la courbe BCDEF à la droite DGH et admettre que les déformations sont réversibles le long de cette ligne. Le nouveau seuil de plasticité est alors le point H qui est plus élevé que le précédent A. C'est justement cette élévation du seuil de plasticité qui s'appelle écrouissage.

Si le seuil actuel est constant, le matériau est dit parfaitement plastique

S'il est toujours croissant ou décroissant le matériau est dit écrouissable sa écrouissage positif ou négatif respectivement.

II.3.Modélisation du comportement élasto-plastique [14]

Le comportement réel est modélisé soit par la courbe élasto-plastique parfaite (sans effet Baushinger), soit par celle avec écrouissage (linéaire ou non) et donc un module élasto-plastique tangent E^{ep} linéaire ou non. Ce dernier cas est plus général :

Donc : si $E^{ep} = 0$ c'est le cas de l'élasto-plasticité parfaite.

Si $E^{ep} > 0$ c'est le durcissement (écrouissage positif) et si $E^{ep} < 0$ c'est l'adoucissement (écrouissage négatif). [13]

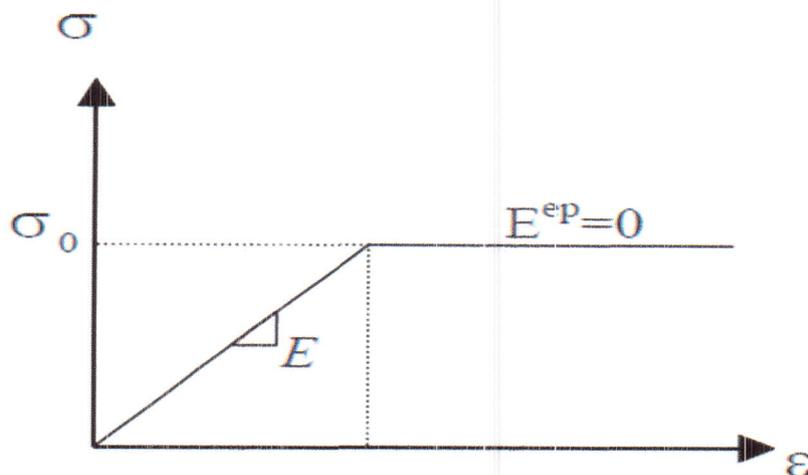


Figure II.2: Elasto-plasticité parfaite

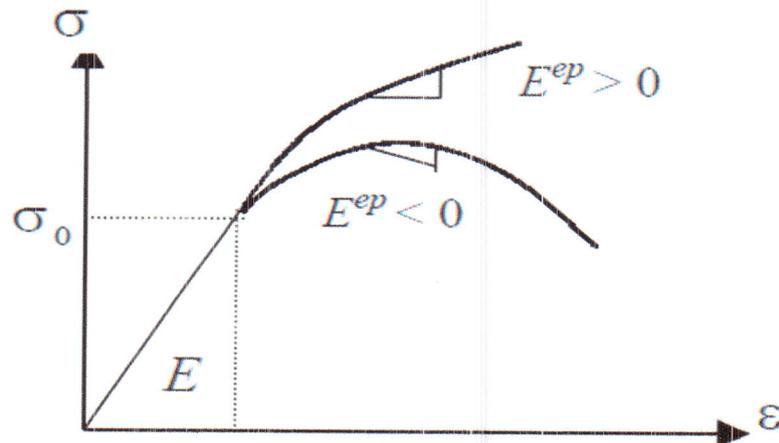


Figure II.3: élasto-plasticité avec écrouissage

II.4. Notion de base fondamentale

Les modèles de comportement élasto-plastique sont basés sur trois notions fondamentales :

- ✓ La surface de charge.
- ✓ La règle d'écrouissage.
- ✓ La règle d'écoulement.

II.4.1. Surface de charge

Dans le cas de sollicitation multiaxiale, le seuil de plasticité est remplacé par une surface caractérisée par une fonction scalaire appelée fonction de charge.

$$F(\sigma, R) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec σ : Tenseur des contraintes

R : L'ensemble des paramètres « cachés » ou « d'écrouissage ».

Cette fonction décrit dans l'espace des contraintes-déformations une surface dite communément surface d'état limite dont la projection dans le plan des contraintes est une courbe dite courbe d'état limite.

La surface de charge divise l'espace des contraintes en deux parties : l'intérieure de la surface, correspond à un état de déformation réversible (élastique) et sur la surface de charge elle-même correspond à un état de déformation pouvant se décomposer à une partie réversible comme précédemment et une partie de déformation irréversible (plastique). [15]

En résumé trois états de chargement sont possibles :

Pour $F < 0$: C'est l'intérieur de la surface, ce domaine est élastique.

Pour $F = 0$: Plastification.

Pour $F > 0$: Est un état de contraintes physiquement impossibles en élasto-plasticité.

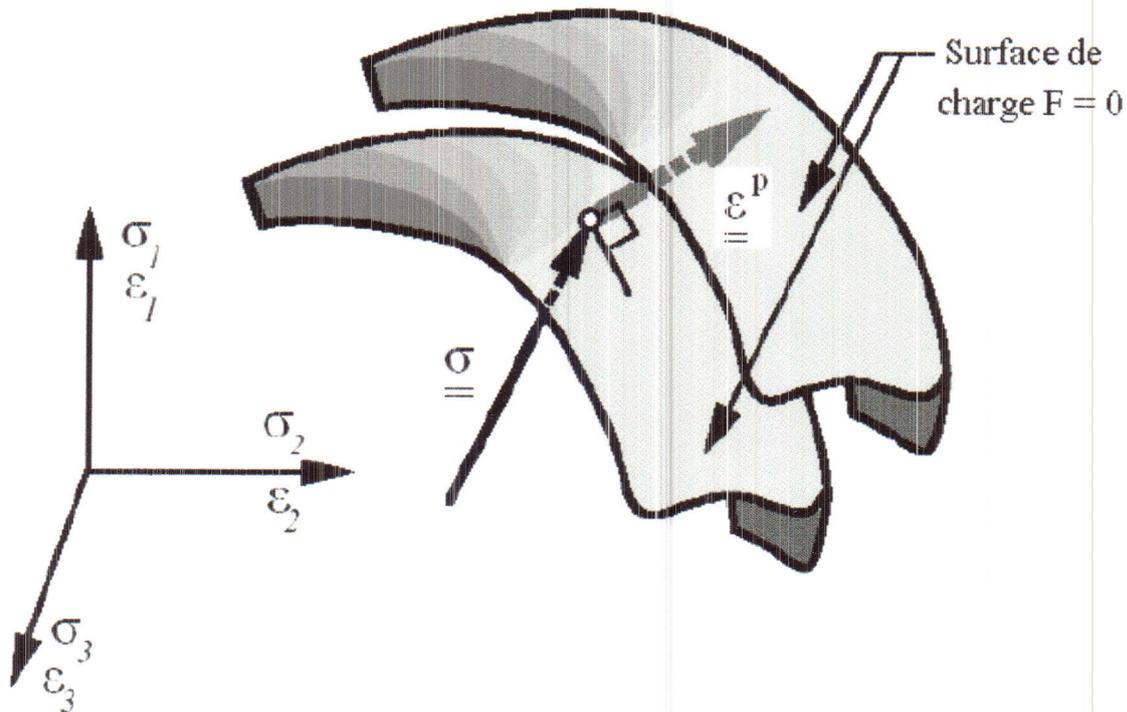


Figure II.4: Evolution de la surface de charge dans l'espace des contraintes principales pour un matériau présentant des propriétés d'écrouissage [16].

II.4.2. Règle d'écrouissage

L'écrouissage d'un matériau se traduit par l'évolution de la surface de la charge. On introduit donc une ou plusieurs variables supplémentaires, appelées variables d'écrouissage « K ». ces variables peuvent être choisies de façon arbitraire à condition qu'elles permettent de traduire l'évolution de l'état interne du milieu qui a subi des déformations plastiques. ces variables peuvent être des fonctions scalaires des déformations plastiques comme pour le modèle de Cam Clay (Rascoe & Burland 1968, Shofield & Worth 1968) [17].

II.4.2.1. Ecrouissage isotrope [18]

Un matériau peut être considéré à écrouissage isotrope si son domaine d'élasticité ne dépend que d'une variable scalaire, c'est à dire si les lieux des points représentant la limite d'élasticité dans l'espace des contraintes se déduisent les uns des autres par une homothétie de centre O (figure). Ainsi, si on comprime une éprouvette ayant initialement la même limite d'élasticité en traction et en compression jusqu'à une valeur σ_c puis que l'on fasse une traction, on retrouvera pour la limite en traction cette valeur σ_c .

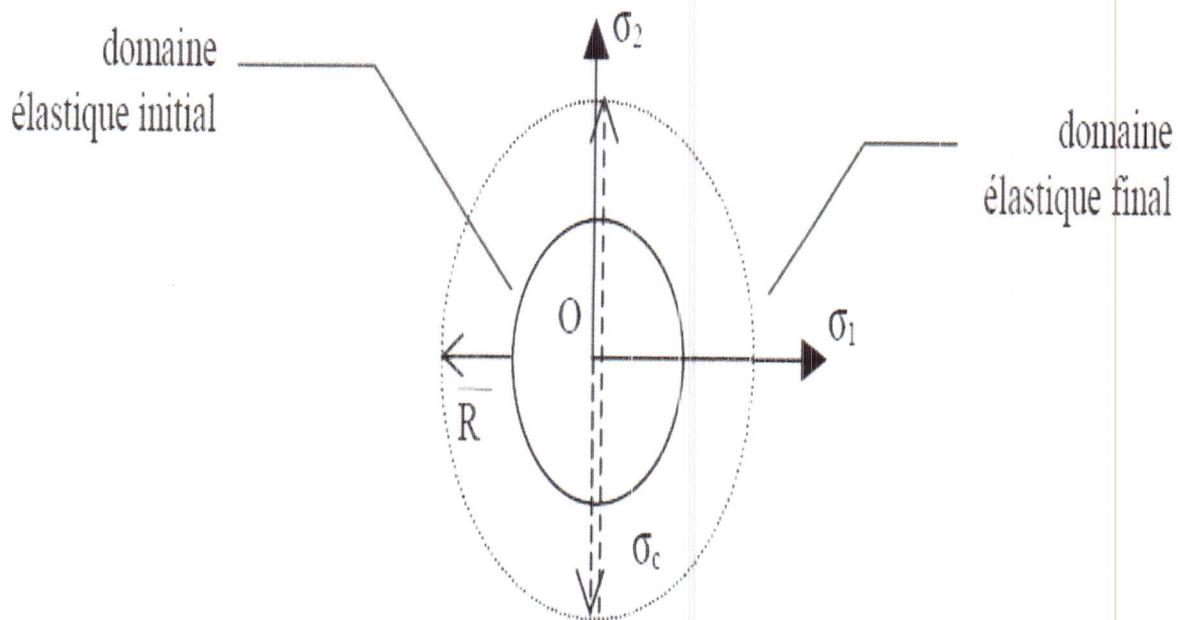


Figure II.5: Schématisation de l'écrouissage isotrope

II.4.2.2. Ecrouissage cinématique

Dans le cadre de l'écrouissage cinématique, le domaine d'élasticité garde une taille constante, mais il se déplace dans l'espace des contraintes. Si on effectue un essai de traction sur une éprouvette vierge, on trouve une limite d'élasticité en traction initiale σ_{t1} . Si ce même essai est effectué après avoir comprimé l'éprouvette jusqu'à une valeur σ_c inférieure à la limite d'élasticité en compression, on trouve alors une limite d'élasticité en traction σ_{t2} inférieure à σ_{t1} (figure II.6). C'est l'effet Bauschinger, souvent observé dans les métaux.

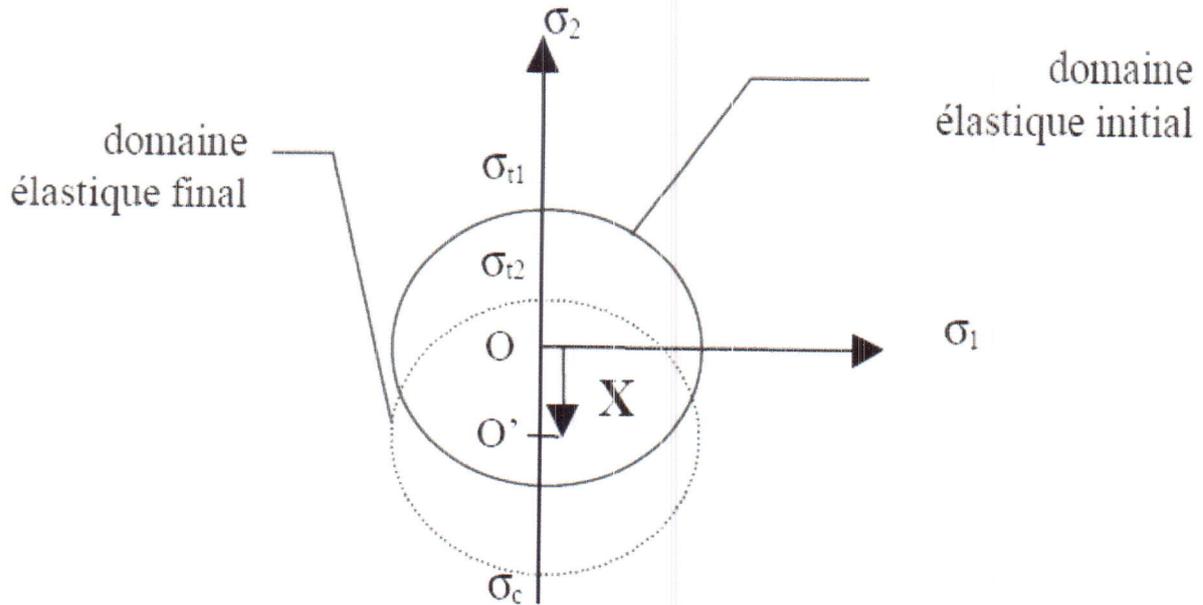


Figure II.6: Schématisation de l'écrouissage cinématique

On distingue l'écrouissage cinématique linéaire de l'écrouissage cinématique non-linéaire. Le premier correspond à une relation linéaire entre le centre du domaine élastique (dans l'espace des contraintes) et le tenseur des déformations plastiques. L'écrouissage cinématique non linéaire est plus complexe et sort du cadre de la plasticité associée.

II.4.3. Règle d'écoulement [19]

L'incrément de déformation plastique est caractérisé par sa direction et son amplitude, la direction de l'incrément de déformation plastique est perpendiculaire à la surface définissant le potentiel plastique $G(\sigma_{ij}) = 0$, la forme générale de l'incrément de déformation plastique est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (\text{II.2})$$

La loi d'écoulement est dite soit associée, soit non associée.

II.4.3.1. Loi d'écoulement associée

La loi d'écoulement est dite associée à la surface de charge quand cette dernière est confondue avec la surface représentative du potentiel plastique, ce qui revient naturellement à considérer $F=G$.

La direction du vecteur de déformation plastique dans l'espace des déformations principales (confondu avec celui des contraintes principales) est ainsi perpendiculaire à la

surface de charge $F=0$, c'est-à-dire au vecteur gradient, normale à cette surface. Cela conduit à une loi d'écoulement de la forme :

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{F}{\sigma_{ij}} \quad (\text{II.3})$$

Où λ : est le multiplicateur plastique (scalaire positif).

II.4.3.2. Loi d'écoulement non associée

Dans le cas des sols flottants, les lois d'écoulement sont non associées, dans ce cas la direction du vecteur de déformation plastique et perpendiculaire à la surface représentative du potentiel plastique $G = (\sigma_{ij}) = 0$ qui est distincte de celle représentative de la fonction de charge plastique $F(\sigma_{ij}) = 0$ [18].

II.5. Critères de la plasticité

Lors d'un essai de traction ou de compression unidimensionnel, la limite d'élasticité est définie comme étant la contrainte pour laquelle apparaissent les premières déformations plastiques. En deçà de cette limite, toutes les déformations générées pendant le chargement de l'éprouvette peuvent être recouvrées. Cette définition du domaine élastique pour un essai uniaxial doit être généralisée dans le cas d'un chargement complexe. Cette généralisation tridimensionnelle est appelée *critère de Plasticité*. Elle permet de définir, dans l'espace des contraintes, la région pour laquelle le matériau aura un comportement élastique. Nous nous bornerons ici à la définition des deux critères isotropes les plus utilisés pour les métaux, les critères de Von Mises et de Tresca.: [18]

II.5.1. Critère de Tresca [20][21]

Ce critère stipule que l'écoulement plastique commence quand la contrainte maximale de cisaillement atteint une valeur critique, et peut s'exprimer en fonction des contraintes principales :

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = K \quad (\text{II.4})$$

Avec $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

Où k est un paramètre qui dépend du matériau et se détermine expérimentalement. Dans l'espace et contraintes principales, la surface de plasticité définie par le critère de Tresca est représentée par un cylindre infini à base hexagonale et d'axe d'équation $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

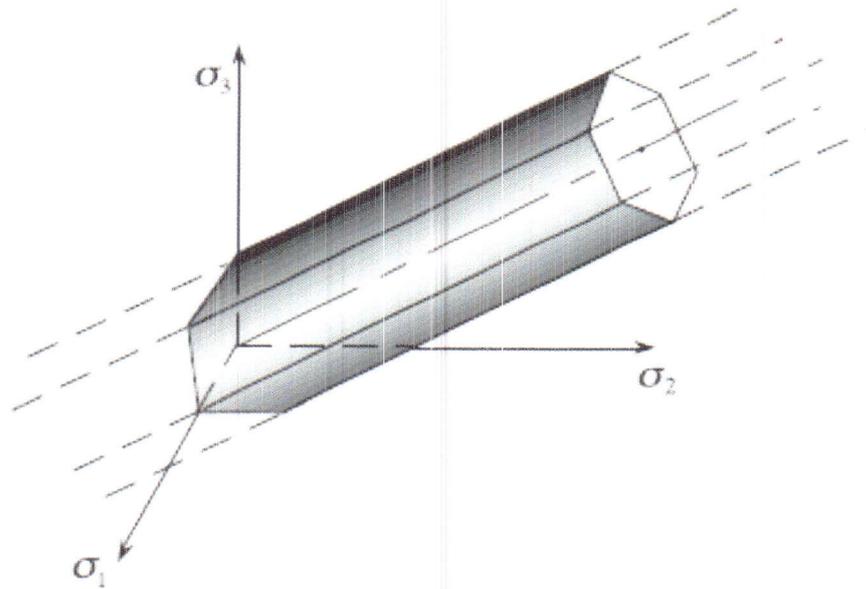


Figure II.7: Critère de Tresca -domaine d'élasticité dans l'espace des contraintes
Principales-[22]

II.5.2. Critère de Von-Mises

Le critère isotrope de Von-Mises permet la détermination de la contrainte équivalente, on exprime ce critère avec des invariants du tenseur des contraintes parce qu'il est insensible au changement de repère.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yx}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

(II.5)

$$I_1 = \text{trace}(\sigma)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} [\text{trace}(\sigma)^2 - \text{trace}(\sigma^2)]$$

$$I_3 = \det(\sigma)$$

Le critère est écrit comme suit :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}} \quad (\text{II.6})$$

Tels que:

$$\mathbf{S} = \sigma - \frac{1}{3} \text{trace}(\sigma) \quad (\text{II.7})$$

Cela est dû à l'insensibilité du critère de Von-Mises au chargement sphérique qui correspond à une pression.

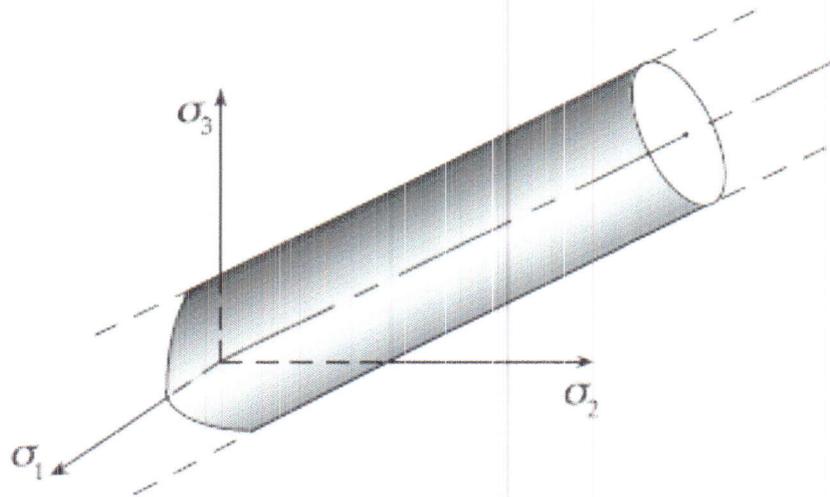
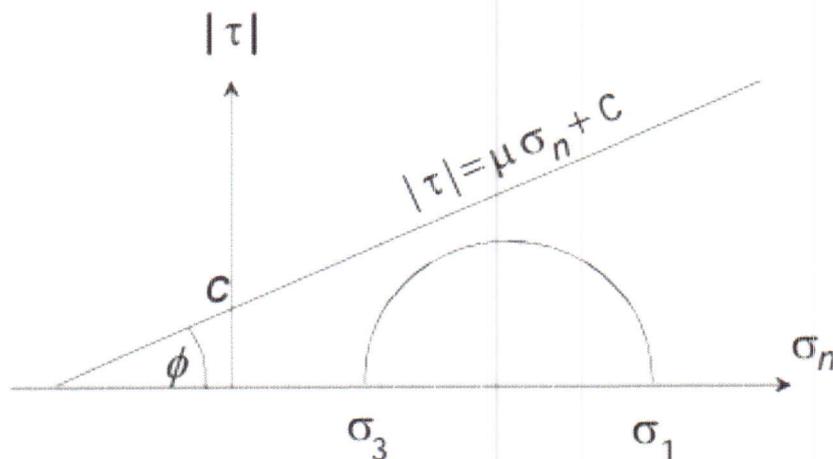


Figure II.8: Critère de Von Mises -domaine d'élasticité dans l'espace des contraintes
Principales- [22]

II.5.3. Critère de Mohr-Coulomb [23]

Les deux critères précédents ne dépendent pas de la pression ou de la contrainte normale, aucune irréversibilité n'est donc possible sous un état de contrainte qui limite hydrostatique. De plus, les seuils en traction ou en compression sont les mêmes. Ils sont pour cette raison peu adaptés aux roches et aux sols. Un critère pouvant être vu comme la généralisation de celui de Tresca est le critère de Mohr-Coulomb qui limite l'étendue des demi cercles de Mohr à une zone comprise entre l'axe $O\sigma_n$ et une droite de pente $\mu = \tan\phi$:



Ce critère s'écrit donc:

$$f(\sigma) = \tau - \mu\sigma_n - C \leq 0 \quad (\text{II.8})$$

Lorsqu'il y a égalité le plus grand cercle de *Mohr* est tangent à la droite.

La pente de cette droite, $\mu = \tan\phi$, est appelé coefficient de frottement interne, ϕ est l'angle de frottement interne. L'ordonnée à l'origine, c , représente la cohésion du matériau.

En utilisant les expressions de σ_n et de τ en fonction des contraintes principales lorsque l'on se trouve sur le grand cercle de *Mohr*, on peut exprimer le critère de *Mohr-Coulomb* en fonction des contraintes principales :

$$\sigma_1 (1 - \sin \phi) - \sigma_3 (1 + \sin \phi) - 2c \cos \phi \leq 0 \quad (\text{II.9})$$

Remarquons que dans ce critère la contrainte intermédiaire, σ_2 , ne joue aucun rôle [22].

II.5.4. Critère de HILL [20][21]

Les premières études sur les critères anisotropes ont été réalisées par Jackson et al (1948), Hill (1948) et Dorn (1949). Initialement, ils modifièrent les critères de Tresca ou Von Mises en y ajoutant des constantes supplémentaires, intrinsèques au matériau. On peut citer en exemple le critère de Hill (1950) concernant les matériaux orthotropes :

$$F = (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H (\sigma_{11} - \sigma_{22}) + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - 1 = 0 \quad (\text{II.10})$$

Où F, G, H, L, M, N sont des paramètres à déterminer expérimentalement et s'expriment en fonction des seuils de plasticité en traction et cisaillement, respectivement suivant les directions principales d'orthotrope. D'autres critères ont été proposés, notamment par Barlat&Lian (1989), Hill (1950), applicables pour des conditions de contraintes planes.

II.6. Conclusion

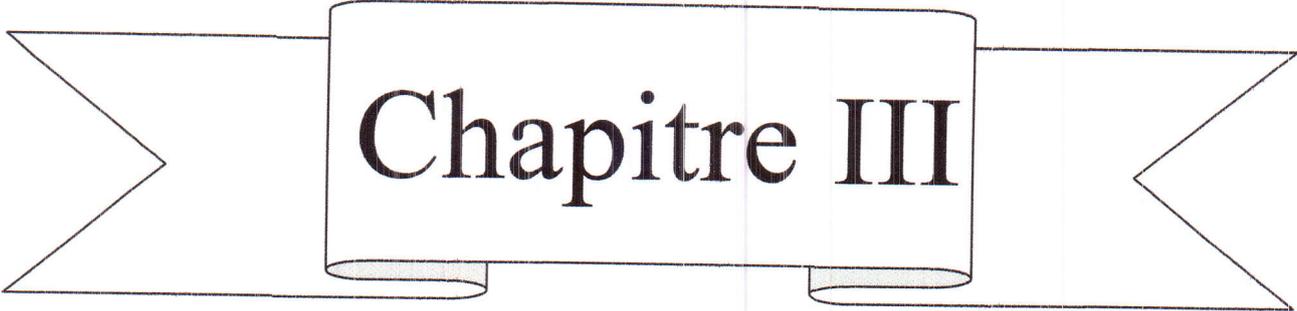
Dans ce chapitre, différents modèles du comportement mécanique élasto-plastique ont été présentés.

En complément de la déformation élastique définie par la loi de Hooke, les modèles élasto-plastiques intègrent un degré de déformation plastique permanent. Le matériau présente donc une élasticité linéaire jusqu'à un certain seuil (limite élastique) puis on note une

déformation permanente du matériau. La déformation totale se décompose alors en deux parties une élastique et une autre plastique.

Un critère de plasticité, ou critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique. De nombreux essais ont montré que l'on pouvait utiliser deux critères principaux les plus utilisées : le critère de Tresca ou le critère de Von Mises.

Lorsqu'il y a un écrouissage, il faut se donner un modèle pour représenter l'évolution du domaine d'élasticité. Les deux modèles les plus simples sont l'écrouissage isotrope et l'écrouissage cinématique. Ils sont basés sur l'utilisation de la courbe d'écrouissage du chargement monotone.



Chapitre III

**Présentation du code
de calcul ABAQUS
et simulation du procédé
de compactage**

III.1. Introduction

La simulation numérique est une représentation de phénomènes physiques complexes. C'est le moyen de simuler de manière virtuelle un produit dans son environnement final.

Cette méthode permet de répondre à de multiples enjeux industriels :

- anticiper les écueils de conception ;
- réduire les prototypes ;
- favoriser l'innovation.

Pour que la simulation numérique soit réellement effective et puisse prédire correctement le comportement de nos conceptions, la simulation a besoin d'être réaliste. En effet, votre simulation devient alors un prototype à part entière.

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi, elle simule et améliore les performances des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...).

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit.

Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test...).

Notre travail consiste à simuler le procédé de compactage d'un déchet métallique représenté en boîtes de boisson et de conserve sur le code de calcul Abaqus tout en intégrant le langage de programmation *Python*.

III.2.Généralités sur le code de calcul Abaqus

III.2.1.Modules principaux

A. Abacus/standard

-Code générale d'analyse par élément finis

-Résolution de problème :

- linéaire et non- linéaire
- géométrie 1D, 2D, AXI ou 3D

B. Abaqus /explicit :

-Analyse non-linéaire, transitoire et dynamique de structure

-Méthode explicite d'intégration du temps

III.2.2.Complément du module

A.ABAQUS/CAE : environnement complet pour :

-la création des modèles, le lancement d'une analyse et le traitement des résultats

B. ABAQUS/POST : post traitement :

-Affichage déformée, iso-contour, graphiques.

C.ABAQUS/Viewer : environnement interactif du-traitement ABAQUS

D.ABAQUS/Design : paramétrage des modèles ABAQUS et analyses de sensibilité

E.ABAQUS /Safe : durée de vie d'une structure

III.2.3.Fichiers

-Fichier (test) de données :

- Extension : .inp
- Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites

-Fichier de résultats :

- Extension : .odb
- Contenu : contours et courbe résultats.

Existe autre fichier créés pendant le calcul :

-Fichier.com : exécutable de votre calcul.

-Fichier.dat :

- Fichier résumé de votre modélisation.
- Message d'erreur concernant votre modélisation.
- Temps de calcul.

-Fichier.msg :

- Fichier résumé du calcul en cours.
- Message d'erreur lors du déroulement du calcul.

III.2.4. Définition du logiciel Abaqus

Abaqus a été développé par Hibbit, Karlsson&Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS, Inc.) depuis 30 ans avec le début de la théorie des éléments finis. Ensuite, amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et les besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005. Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Le cœur du logiciel Abaqus est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données caractérisé par le suffixe .inp, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .Odb. Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier. Odb (post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, des matériaux, les descriptions des maillages, des chargements, etc....., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. Le module ABAQUS/CAE, interface graphique, permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation : la génération du fichier de données, le lancement du calcul proprement dit, l'exploitation des résultats.

III.2.5. Bases de l'interface d'ABAQUS

III.2.5.1. Organisation de l'interface

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivants :

- La fenêtre d'affichage graphique
- Une première barre de menus en haut : ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve
- Une deuxième barre horizontale d'outils : y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)
- Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

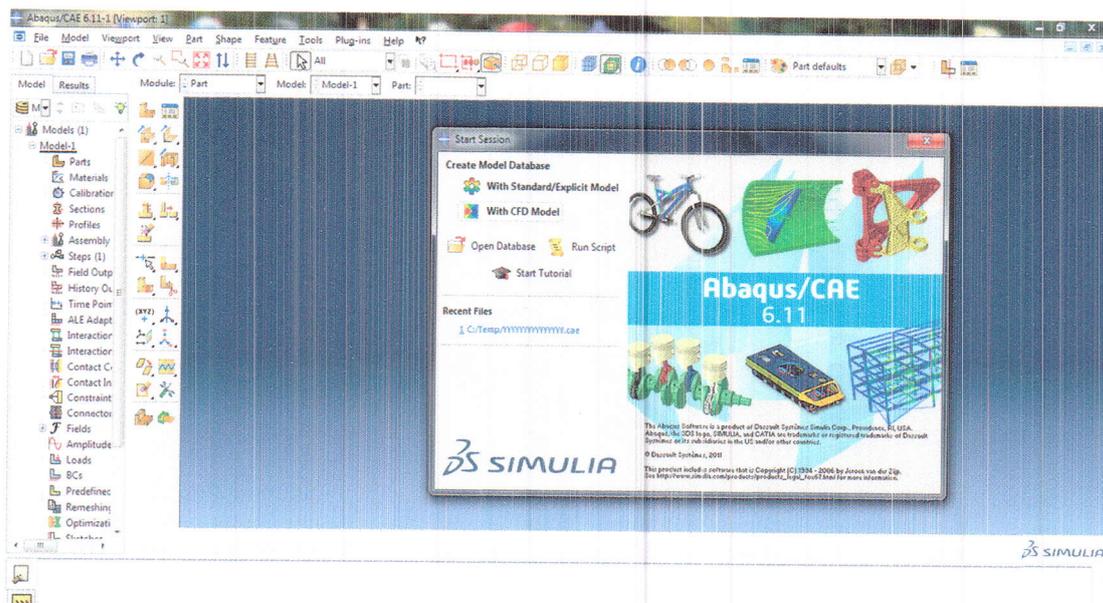


Figure III.1: Interface d'Abaqus

III.2.6. Présentation du logiciel ABAQUS CAE

III.2.6.1. Modules

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

A. Module Part

C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Elles comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides. Pour les créer, il faut utiliser l'icône de création en haut à gauche (Figure III.2).



Figure III.2: Create Part

Il ne reste plus qu'à sélectionner convenablement :

- L'espace de modélisation : *3D* par exemple.
- Le type d'entité à générer : *deformable* ou *analytical rigid*
- La forme de l'entité

Dans tous les cas on peut passer dans un autre environnement de type CAO où on dessine ses pièces.

Dans le cas d'un solide rigide, il est nécessaire de définir un point de référence. C'est en fait en ce point que sont définis les degrés de liberté du solide sur lesquels on imposera des conditions aux limites par la suite. Ceci se fait dans le menu *Tools*, grâce à la commande *Reference point*.

B. Module Property

On y définit les propriétés du ou des matériaux (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans le cas présent, on a à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques. Pour créer un matériau, il suffit de cliquer sur l'icône en haut à gauche (Figure III.3).

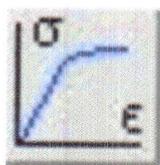


Figure III.3: Create Material

Il vaut mieux ensuite donner un nom spécifique à chacun des matériaux ce qui permet éventuellement la création d'une base de données. Ensuite, il reste à définir :

-Les propriétés élastiques via *Mechanical, Elasticity, Elastic* (module d'Young et le coefficient de Poisson pour un matériau isotrope).

-Les propriétés plastiques via *Mechanical, Plasticity, Plastic*. (Sous l'hypothèse d'un écrouissage isotrope, la courbe d'écrouissage est entrée sous la forme : limite d'élasticité/déformation plastique).

Il faut ensuite affecter les propriétés matériau à une entité du maillage : pour cela il est nécessaire de créer tout d'abord une section avec l'icône en forme de poutre en I (Figure III.4). On a à faire référence à un matériau et il ne restera plus qu'à donner une valeur à l'épaisseur.

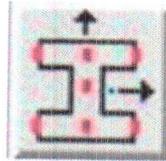


Figure III.4: Create Section

Ensuite, on associe la section précédemment définie à une entité créée dans le module Part, en activant l'icône située en dessous de la précédente, où sont représentés un I et un L (Figure III.5).



Figure III.5: Assign Section

C. Module Assembly

Dans ce module, il s'agit de créer une (voir plusieurs) instance(s) à partir des entités qu'on a définies dans le module Part. Ces instances seront celles qu'on manipulera par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche (Figure III.6), pour créer une instance on sélectionnera tous les éléments créés dans Part. On peut dans le cas échéant faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace.



Figure III.6: Instance Part

D. Module Step

C'est ici qu'on choisira (Figure III7), dans le cas d'études de crash ou d'impact, le module « Dynamics explicit ». On remarquera au passage les nombreuses autres possibilités qui sont offertes par ce code de calcul.

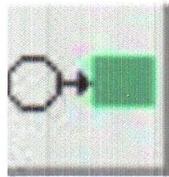


Figure III.7: Create Step

E. Module Interaction

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

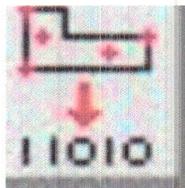


Figure III.8: Create Interaction

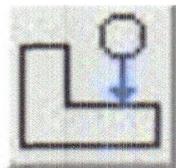


Figure III.9: Create Interaction property

F. Module Load

On définit ici le chargement (Figure III.10), les conditions aux limites (Figure III. 11), les vitesses initiales (Figure III.12)

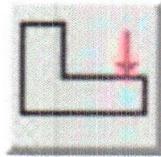


Figure III.10: Create Load

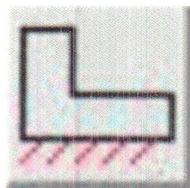


Figure III.11: Create Boundary Condition

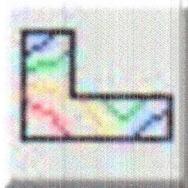


Figure III.12: Create Field

G. Module Mesh

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

H. Module Job

Le « lancement » du calcul est classique. Après avoir lancé le calcul, on peut suivre l'évolution du procès en cliquant sur *Monitor* : on peut ainsi avoir en temps réel l'évolution des incréments de chargement et apprécier la convergence des calculs.

I. Le module Visualisation

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations.

J. Le module SKETCH

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

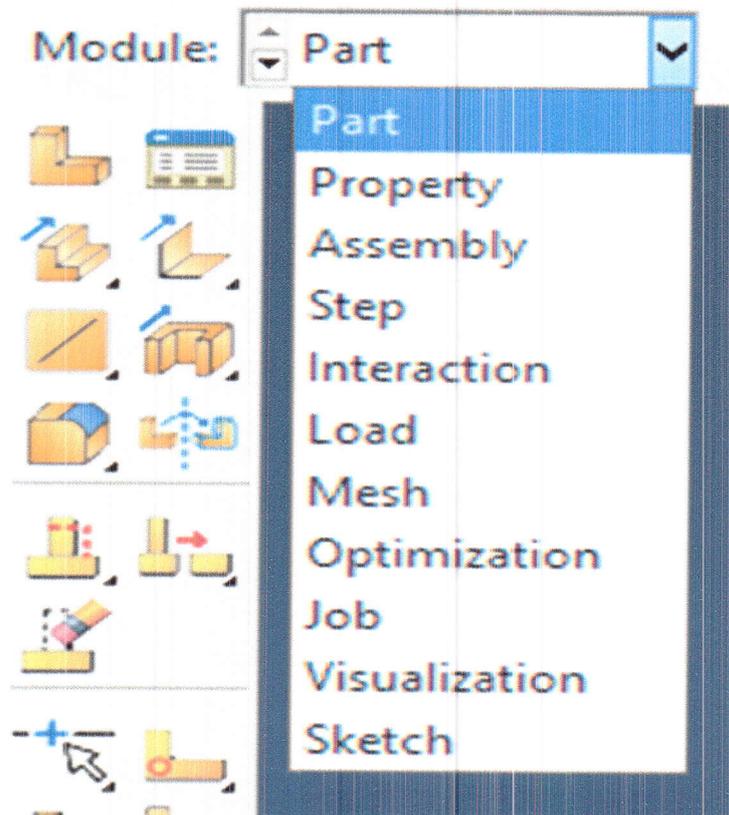


Figure III.13: Différents modules d'Abaqus

III.3.Simulation de procédé du compactage

Notre travail a comme objectif de simuler le procédé de compactage de déchets métalliques (sous forme boîte de boisson et de conserve) à l'aide du logiciel Abaqus et du langage Python, et définir la variation du taux de compactage en fonction de la force appliquée, ainsi l'influence de l'épaisseur des déchets sur celui-ci.

III.3.1.Génération des différentes pièces

a. Déchet (boîte de boisson)

Pour nos simulations, on a choisi comme déchet des boîtes de boisson ayant les propriétés suivantes :

-Propriétés mécaniques :

Le matériau de la tôle est un acier doux : $E = 206000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, courbe d'écrouissage de Swift : $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n$, $K = 326.84 \text{ MPa}$, $\varepsilon_0 = 0.0002933$ et $n = 0.2063$, La densité $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

-Propriétés géométriques (dimensions en mm) :

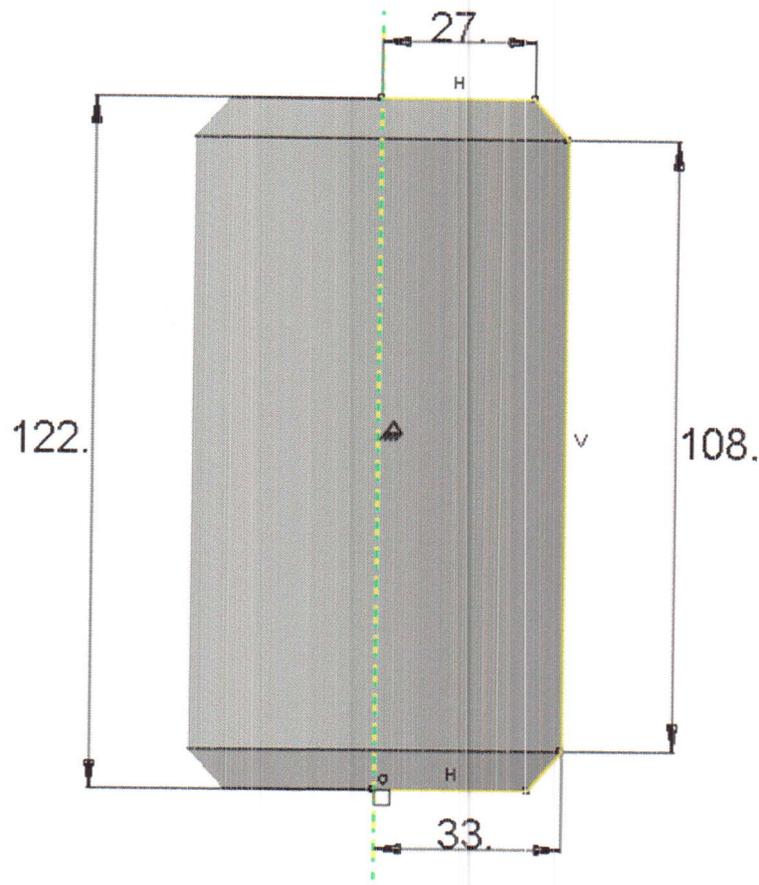


Figure III.14 : Dimensions de la boîte

La distribution aléatoire des boîtes dans le caisson se fait par l'exécution d'un script en langage Python de telle sorte que les boîtes ne se touchent pas. L'organigramme de ce script est monté sur la figure III.15.

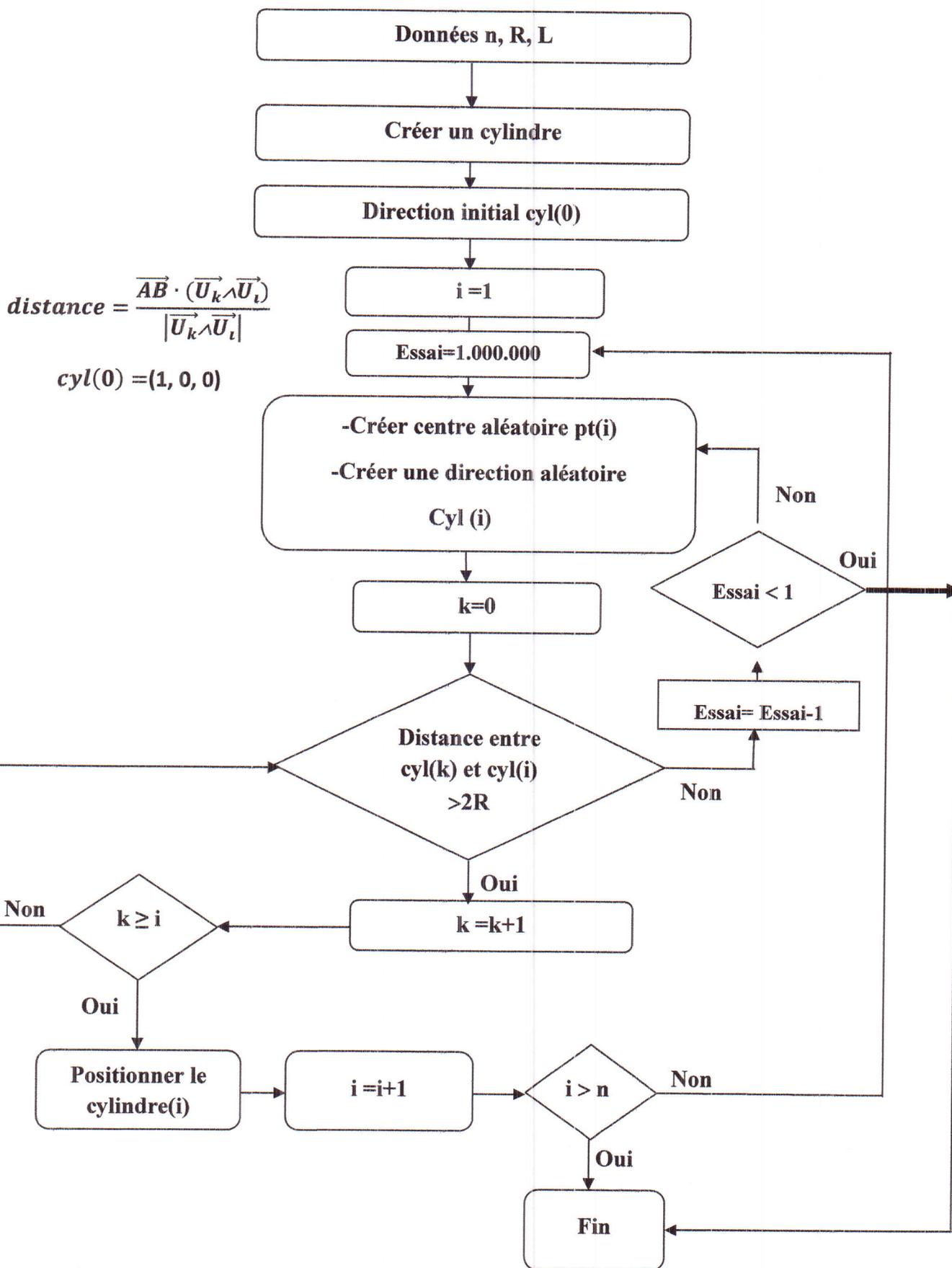


Figure III.15 : Organigramme de distribution aléatoire des boîtes

b. Caisson :(considéré comme un corps rigide) C'est la zone où se fait le compactage, le volume initiale V_i du caisson est donné par :

$$V_i = x_i \times y_i \times z_i$$

Avec : $x_i=300\text{mm}$, $y_i=300\text{mm}$, $z_i=2000\text{mm}$

Il s'agit donc de remplir (sans pré compacter) ce caisson de déchets et les compacter suivant la longueur $z=2000\text{ mm}$.

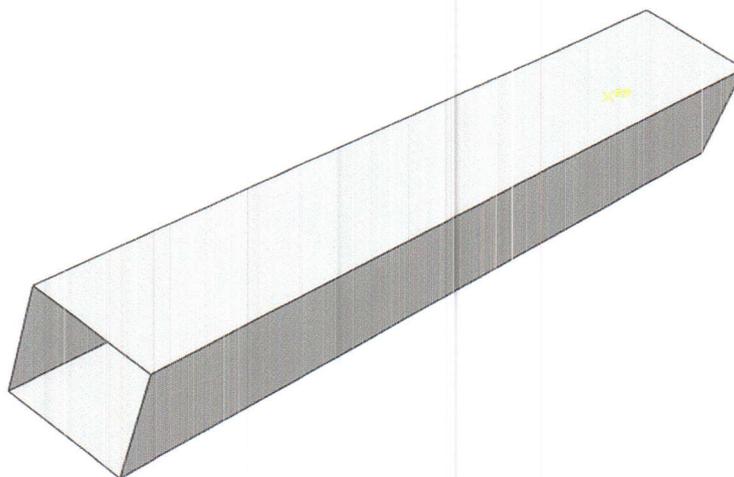


Figure III.16 : Caisson

c. Poinçon : C'est une simple représentation du vérin, comme c'est lui qui nous assure la charge à appliquer lors du compactage, ses dimensions (298× 298).

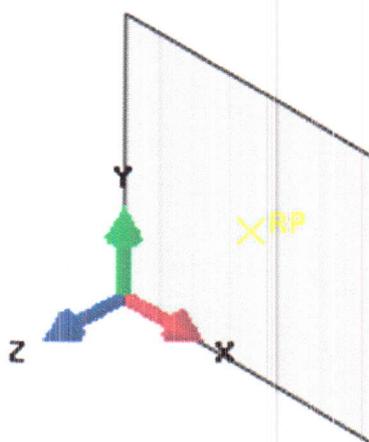


Figure III.17: Poinçon

III.3.2. Assemblage des pièces

Cette étape est assurée par le module **Assembly**, elle nous permet l'assemblage de toutes les pièces créées. Dans ce module des translations et des contraintes peuvent être utilisés afin d'assurer les liaisons entre les différentes pièces du mécanisme.

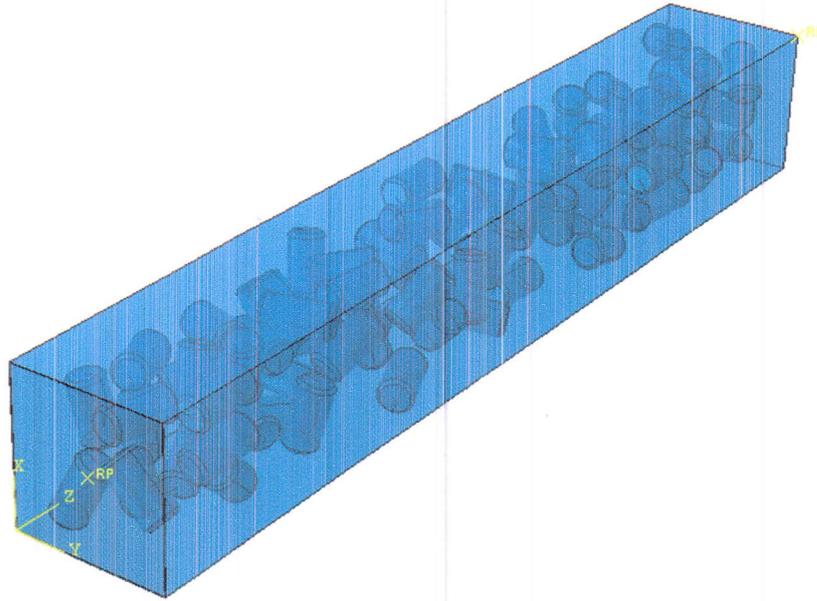


Figure III.18: Assemblage des pièces

III.3.3. Configuration de l'analyse et spécification des résultats

Dans le module **Step** on choisit la dynamique explicite comme méthode d'analyse.

III.3.4. Définition du contact

Le contacte entre les différentes pièces est défini sur le modèle **Interaction** dont le type choisi est le contact général avec une friction lisse (frottement nul).

III.3.5. Condition aux limites

Dans le module '**Load**' on définit toutes les conditions aux limites et les charges appliquées sur la structure. Pour notre système, on encastre le caisson et on libère le déplacement du poinçon suivant l'axe (z).

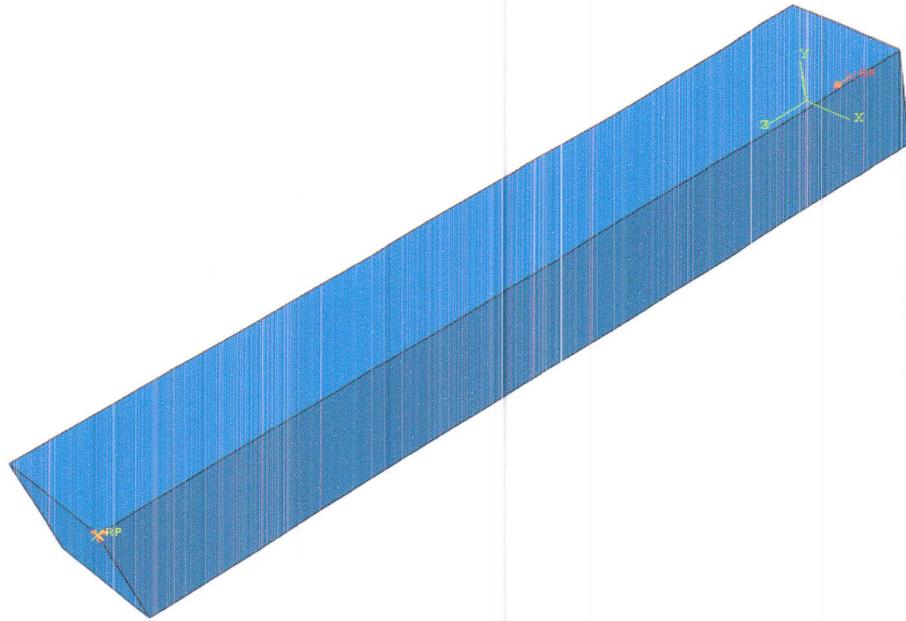
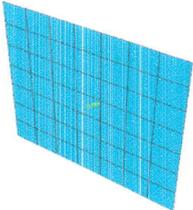
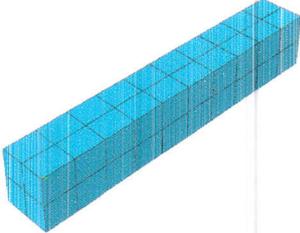
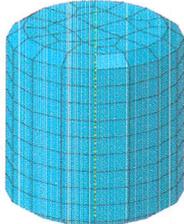


Figure III.19: Condition aux limites et chargement

III.3.6. Maillage des pièces

Tableau III.1 : Maillage des pièces

Poinçon	Caisson	Boite de boisson
		<p data-bbox="1018 1218 1380 1252">Eléments coques à 4 nœuds</p> 
<p data-bbox="357 1529 815 1563">Eléments coques rigides à 4 nœuds</p>		

La figure suivante représente le maillage de l'ensemble des pièces maillées.

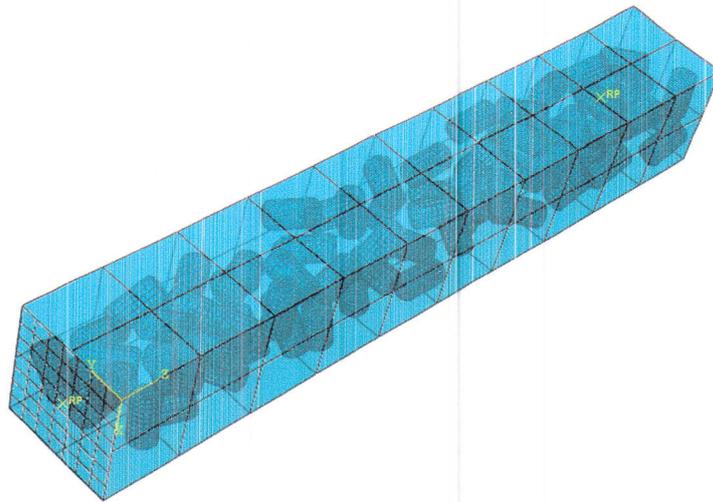


Figure III 20: Assemblage maillé

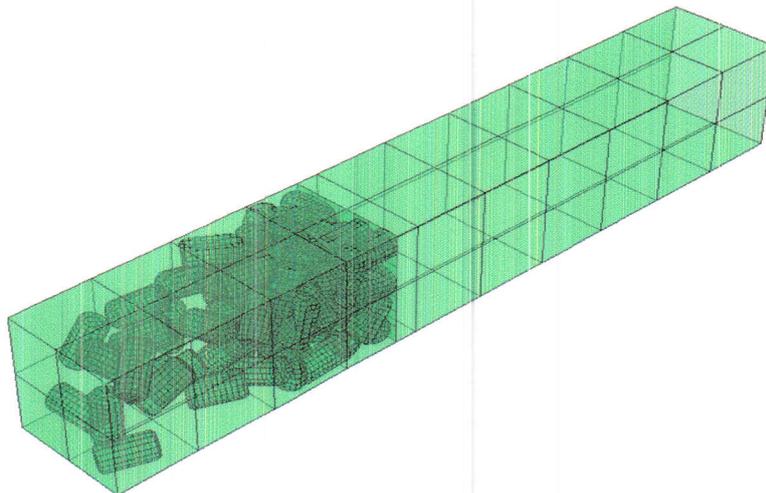


Figure III.21: Comportement des déchets pendant le compactage

III.3.7.Résultats et discussion

Les tableaux et les graphes ci-dessous représentent les résultats de nos simulations.

III.3.7.1.Variation du taux de compactage en fonction de la force du poinçon

Pour chaque simulation on mesure le déplacement du poinçon correspond à une force appliquée on obtient les résultats suivants :

Tableau III.2 : Déplacement du poinçon sous la force appliquée

F [N]	25000	20000	15000	10000	5000
Z [mm]	1973	1896	1801	1662	1515

Le taux de compactage noté T est donné par la relation suivante :

$$T = 1 - C \quad (\text{III.1})$$

Où :

$$C = \frac{V_f}{V_i} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

C : Coefficient de compression.

V_f : Volume des déchets après compactage.

V_i : Volume initial.

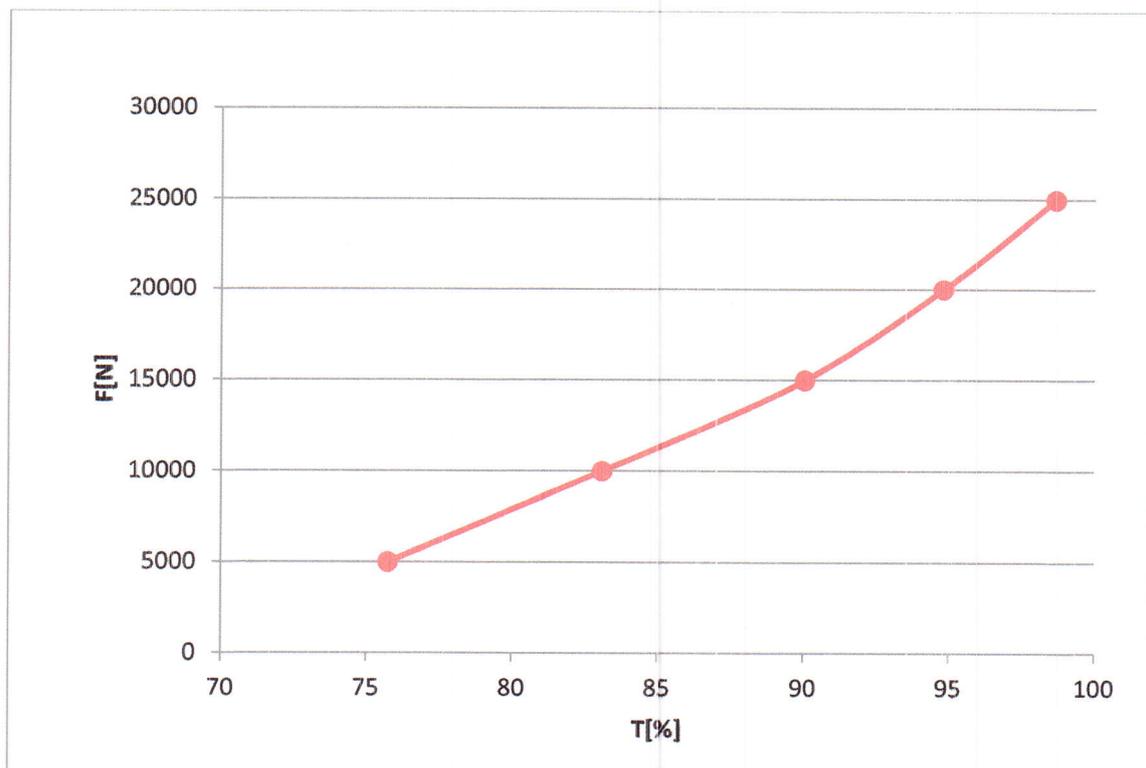


Figure III.22: Variation de taux de compactage en fonction de la force

Commentaire 1

Le graphe qui représente la variation du taux de compactage en fonction de la force c'est une courbe croissante.

Le taux de compactage augmente d'une manière réciproque avec la force appliquée.

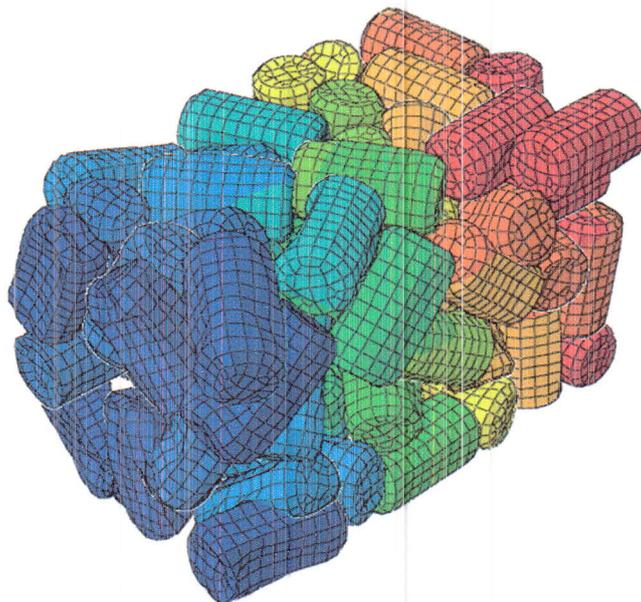


Figure III.23: Volume compacté par 5000 N

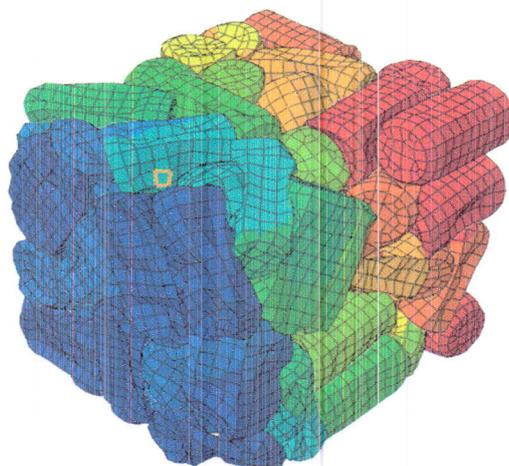


Figure III.24: Volume compacté par 10000 N

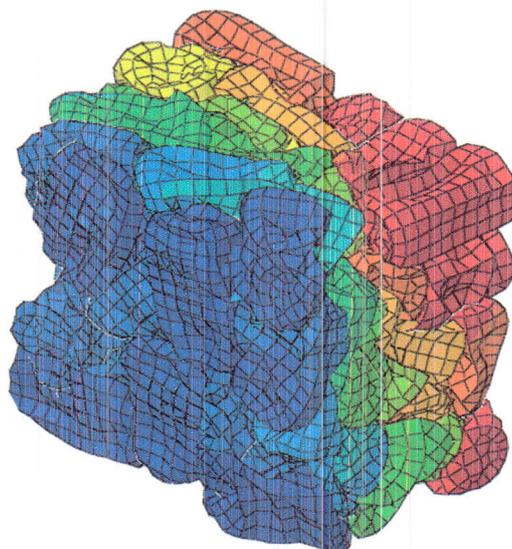


Figure III.25: Volume compacté par 15000 N

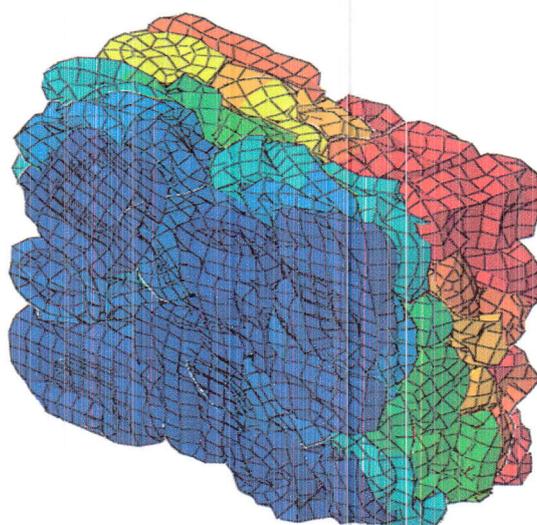


Figure III.26: Volume compacté par 20000 N

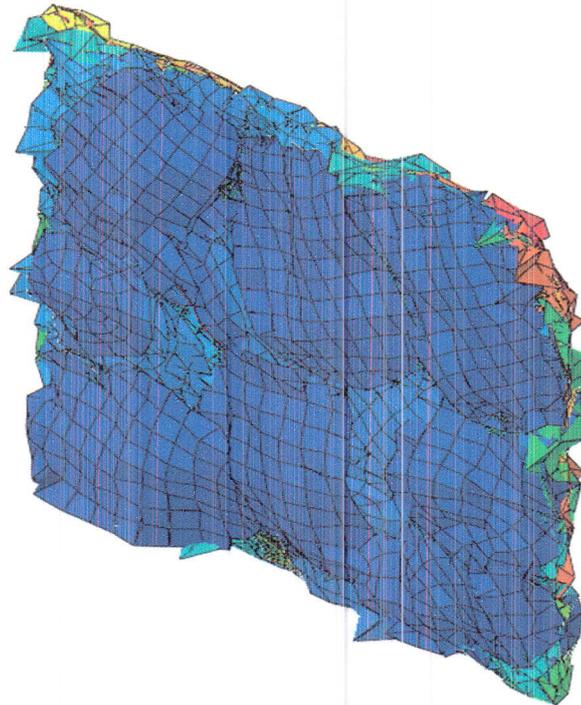


Figure III.27: Volume compacté par 5000 N

III.3.7.2.L'influence de l'épaisseur sur le taux de compactage de la boîte de boisson

Dans cette simulation on a fixé la force ($F=15000N$) en changeant à chaque fois l'épaisseur de la boîte. Les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Tableau III.3: Déplacement du poinçon sous l'épaisseur

Ep[mm]	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
Z [mm]	1801	1774	1745	1716	1689

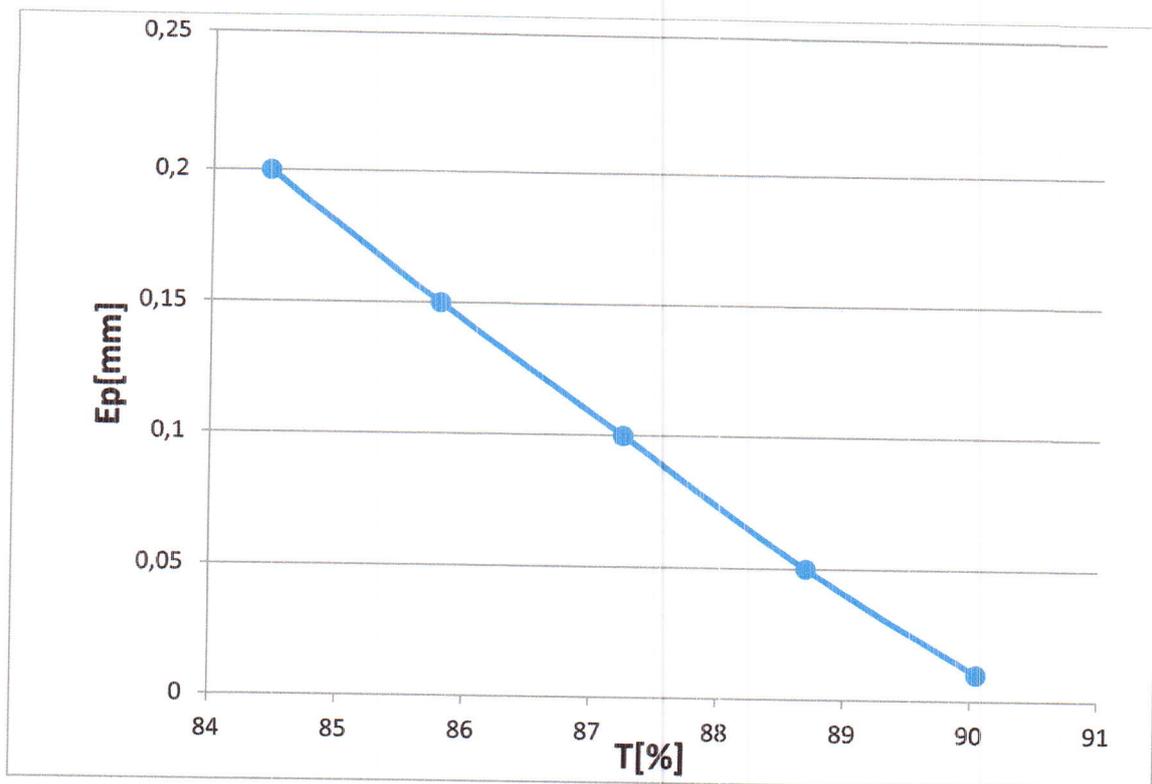


Figure III.28: L'influence de l'épaisseur sur le taux de compactage

Commentaire 2

Le graphe, représentant l'influence de l'épaisseur sur le taux de compactage, est une courbe décroissante. Lorsque l'épaisseur de la boîte augmente le taux de compactage diminue.

III.4.Conclusion

Abaqus est un outil puissant et flexible. Il est capable de traiter de manière fiable et robuste des problèmes complexes en étant réaliste grâce à la prise en compte de non linéarités très fortes et aux aspects multi physiques.

Grace à cette simulation, on a pu voir l'influence de la force appliquée et de l'épaisseur de la boîte sur le taux de compactage des déchets métalliques.

Conclusion générale

Les travaux présents dans cette étude s'articulent principalement autour de la simulation du procédé de compactage des déchets métallique de boîte de boissons.

A travers la simulation du compactage on peut mettre une relation entre les forces appliquées et le gain de volume, on peut connaître aussi l'effet de la pression du déchet sur les parois du compacteur donc un éventuel dimensionnement, on peut lier aussi les forces appliquées avec les paramètres du vérin et du moteur électrique.

Ce travail nous a permis :

Premièrement, de donner des connaissances sur les déchets, aussi on a parlé sur la technique de compactage, qui est un moyen incontournable pour la valorisation des dits déchets métallique,

Deuxièmement on a donné un aperçu général sur le comportement elasto-plastique du matériau.

Troisièmement, et finalement nous avons réalisé la simulation du procédé de compactage des déchets métallique, les résultats obtenus montrent que la variation de la force appliquée et l'épaisseur du matériau ont une influence sur le taux de compactage.

Les perspectives futures de notre travail sont vastes et pourront faire l'objet de plusieurs projets de fin d'études d'ingénieur et de DEUA dans différentes disciplines telles qu'une étude d'optimisation de la conception, dimensionnement du compacteur, simulation duprocédé en deux phases : pré-compactage et compactage pour se rapprocher plus du procédé réel.

Bibliographie

- [1] Thèse d'ingénieure Idriss Ali, université de Batna.
- [2] <https://www.google.dz/search?q=WWW.eau+de+marseille-envirennment.fr>
- [3] <https://www.google.dz/search?ei=AdIkW4GcK4LbU7fjqpAN&q=WWW.paperlink.mu%2F2018%2F04%2F09%2Frecyclage.familles+dechets-planete>.
- [4] guide régional des déchets dangereux, rapport 2007.
- [5] NIGKAM, Mémoire d'ingénieur à l'ENSP Yaoundé ,1992 in sotamenou, 2005.
- [6] <https://owl-ge.ch/travaux-d.../impact-de-la-production-des-dechets-sur-l-environnement>.
- [7] VORBURGER Julia 04146528 (écologie industrielle et valorisation des déchets). MBA gestion internationale déposé à la session d'hiver 2006.
- [8] Dongxing Wang, solidification et valorisation des sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers, lile1, 2011.
- [9] www.portaildesdechetsenregioncentre.fr/les-dechets/dechets-metalliques-16.html?
- [10] https://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich1_2.htm.
- [11] DRUCKER « soil mechanics and work hardening théorie of plasticity “ASCE, vol, 122, 1957.
- [12] OWEN DRJ.et HINTONE.E “finite element in plasticity théorie and practices.” pincriджа press, swensea, 1980.
- [13] [thesis.univ-biskra.dz/1129/5/Chapitre III 2003.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/1129/5/Chapitre%20III%202003.pdf).
- [14] TRESCA H.”Compte rendus Acad.SCI, paris, 59(1864) ,754 et 64(1867)809-cité par R.HILL, 1950.
- [15] BOIDY, E., «Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines». Thèse de Doctorat d'Etat, Institut des sciences et techniques de Grenoble (I.S.T.G), 2002.
- [16] VON MISES R. (1913) Gottinger Nackrichten, Math, Phys Klass.cité par R.HILL, 1950.