



Université d'Oran 2  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master  
En Génie Industriel

Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

# Traitement des résultats de la simulation sous ANSYS fluent

Présenté par :

**Aslani Hadj  
Gherbi Siyyid Ahmed Afif**

Membres du jury :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Herrouz Keltoum	Dr	IMSI	<b>Président</b>
BELARIFI Farid	Pr	IMSI	<b>Encadreur</b>
Charef Djilali	Dr	IMSI	<b>Examineur</b>

Année 2023/2024

## *Dédicace*

À mes chers parents, (Lhadj Maamar, Lhadja Rabiaa) qui m'ont toujours soutenu avec amour et encouragement tout au long de ma vie. Votre soutien inconditionnel a été ma force et mon inspiration.

À mes frères (Aslani) et ma sœur (Amina) dont la présence et le soutien ont été des piliers dans ma vie. Votre amour fraternel est un cadeau précieux que je chérirai toujours.

À mon cher ami (Mohamed) dont la camaraderie et le soutien ont enrichi ma vie de tant de façons. Nos liens familiaux sont une source de joie et de réconfort constants.

À mon binôme de travail (Afif) dont la collaboration et le dévouement ont rendu ce projet possible. Notre partenariat a été une expérience enrichissante que je n'oublierai jamais.

À mon encadrant, Mr Belarifi, pour sa guidance experte, son soutien constant et ses conseils avisés qui ont façonné ce travail et enrichi mon parcours académique.

Et enfin, à tous mes amis, spécialement (Wail, Kamel, Farouk, Bourahla) dont l'amitié et le soutien ont illuminé mes journées et rendu cette aventure encore plus spéciale. Votre présence dans ma vie est un trésor que je chérirai toujours.

Cette dédicace est une humble reconnaissance de l'importance de chacune de ces personnes dans mon parcours. Merci d'avoir enrichi ma vie de votre amour, de votre soutien et de votre amitié.

**Hadj Asl**

## *Dédicace*

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents. Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte. Je mets entre vos mains, la fatigue de longues années d'études, de votre amour et votre tendresse, votre soutien et votre encouragement m'ont toujours donné de la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie.

Mes chers frères (Abdou et Mohammed). Veuillez trouver dans ce travail un modeste témoignage de mon admiration et toute ma gratitude, de mon affection la plus sincère et de mon attachement le plus profond.

Mon cher binôme (Hadj) et sa famille. Qui a contribué à la réalisation de ce travail, pour son soutien moral, sa présence et surtout sa compréhension tout au long de ce travail. Je le remercie pour tous. Je te souhaite tous le bonheur, la santé et la prospérité.

Tous mes chers amis, spécialement (Mohammed Tayeb, Wail, Mohamed et Kamel). Vous m'avez toujours soutenu et vous continuez à le faire. Je vous considère beaucoup plus comme mes frères et je ne trouverais les mots pour vous exprimer mon affection et mon estime. Je vous souhaite tous le bonheur.

Et pour tous ceux à qui je dois le plus grand respect et l'amour que dieu le protège.

**Afif**

## ***Remerciements***

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers l'ensemble de l'administration et le directeur pour son soutien continu tout au long de notre parcours académique. Votre dévouement à l'excellence et votre engagement envers le succès des étudiants sont vraiment remarquables.

Un merci particulier à notre encadreur, le Professeur Farid Belarifi, pour son mentorat attentif, son expertise inestimable et sa disponibilité constante. Ses conseils éclairés ont grandement enrichi ce travail et ont contribué à façonner notre compréhension du sujet.

À Monsieur Bouzana, l'encadreur exemplaire qui guide avec passion et expertise, merci pour votre soutien inestimable tout au long de ce parcours académique.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers tous les membres du jury pour leur temps, leur expertise et leur précieuse contribution à l'évaluation de ce travail. Leurs commentaires constructifs ont été extrêmement bénéfiques pour son amélioration.

Enfin, nous voudrions remercier toutes les personnes qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien et vos encouragements ont été inestimables et ont rendu cette réalisation possible.

Ces remerciements sont une humble reconnaissance de l'importance de chacune de ces personnes dans la réussite de ce projet. Merci infiniment pour votre soutien et votre engagement envers notre développement académique et professionnel.

# Sommaire

<b>Introduction général</b> .....	1
<b>Chapitre1</b> .....	2
1. Introduction.....	2
2. Classification des engrenages .....	2
2.1. Les engrenages à axes parallèles.....	2
2.1.1. Engrenages à dentures droites.....	3
2.1.2. Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale.....	3
2.2. Les engrenages à axe concourants .....	4
2.3. Engrenages hypoïdes .....	5
2.4. Engrenage à roue et vis sans fin.....	5
2.4.1. Différents types de systèmes roue-vis sans fin .....	6
2.4.2. Conditions d'engrènements .....	6
2.5. Engrenages à axe quelconques.....	6
2.5.1. Fonctionnement des engrenages.....	7
2.5.2. Caractéristiques de la denture .....	8
3. Profil de la denture.....	9
3.1. Profil à développante de cercle .....	9
3.2. Principe de la développante de cercle (cas de denture droite).....	10
3.2.1. Propriétés de la développante de cercle .....	11
3.2.2. Equation polaire de la développante de cercle.....	12
3.3. Epaisseur de denture .....	13
4. Etude de l'engrènement .....	14
4.1. Ligne d'engrènement ou ligne d'action .....	18
4.2. Interférence .....	20
4.3. Correction de la denture.....	22
5. Jeu de fonctionnement .....	23
6. La lubrification des engrenages .....	23
7. Les techniques de lubrification .....	23
7.1 Lubrification par bain d'huile (Barbotage).....	24
7.2. Lubrification par projection d'huile.....	24

7.3. Lubrification goutte à goutte.....	25
7.4. Lubrification par circulation d'huile.....	25
7.5. Lubrification par graisseur.....	26
8. Facteurs influençant le graissage.....	26
8.1. Les vitesses.....	27
8.1.1. La vitesse de glissement.....	27
8.1.2. La vitesse de rotation.....	28
8.2. La charge et la pression de contact.....	29
8.2.1. La charge.....	29
8.2.2. La pression.....	29
9. Possibilités de graissage.....	30
10. Conclusion.....	31
<b>Chapitre 2.....</b>	<b>32</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>2. Méthode grapho analytique.....</b>	<b>32</b>
<b>3. Méthodes numériques.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Les modèles numériques Lagrangiens.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.1. Comment appliquer cette méthode.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.2. Les domaines d'application des modèles Lagrangiens.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1. Comment appliquer cette méthode.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3. Comparaison entre les deux méthodes.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4. Méthode des éléments finis.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.1. Nœuds et éléments.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.3. Choix des éléments finis.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.4. Modélisation et discrétisation.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.5. Les différentes étapes de la méthode des éléments finis.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.6. Le maillage.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.7. Les différents types des éléments finis.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.8. Convergence des résultats par éléments finis.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.9. Caractéristiques de la solution EF.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.10. Les conditions de convergence.....</b>	<b>44</b>
<b>5. La méthode du volume de fluide.....</b>	<b>45</b>

6. Etapes d'analyse.....	48
7. Discrétisation.....	50
8. Conclusion.....	50
<b>Chapitre 3.....</b>	<b>51</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>51</b>
<b>2. Caractéristiques de la géométrie simulé.....</b>	<b>51</b>
<b>3. Procédure de traitement des données avec CFD Post.....</b>	<b>53</b>
<b>4. Résultats.....</b>	<b>57</b>
<b>5. Discussions et conclusion.....</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion général.....</b>	<b>65</b>

## Liste des figures

Figure 1.1. Engrenages à axes parallèles. ....	2
Figure 1.2. Denture droite. ....	3
Figure 1.3. Engrenage conique à axe concourant. ....	4
Figure 1.4. Engrenage hypoïde. ....	5
Figure 1.5. Systèmes roues-vis sans fin. ....	6
Figure 1.6. Engrenage à axe quelconque. ....	7
Figure 1.7. Engrenages à denture droite ....	8
Figure 1.8. Cylindre primitif plan de génération. ....	9
Figure 1.9. Développante de cercle. ....	10
Figure 1.10. Schématisation de la développante de cercle.] ....	11
Figure 1.11. Propriétés de la développante de cercle. ....	11
Figure 1.12. Caractéristiques de la denture. ....	12
Figure 1.13. Schéma de l'engrènement d'un engrenage parallèle extérieur. ....	14
Figure 1.14. La longueur d'action AB. ....	16
Figure 1.15 Un engrenage juste à la limite de la conduit d'engrènement ....	17
Figure 1.16. Titre ....	18
Figure 1.17. Ligne d'engrènement (ou d'action). ....	19
Figure 1.18. Couple de dents en contact ....	19
Figure 1.19. Fonctionnement sans interférence. ....	20
Figure 1.20. Interférence de fonctionnement. ....	20
Figure 1.21. Interférence de fabrication. ....	21
Figure 1.22.a ....	21
Figure 1.22.b ....	21
Figure 1.22.c ....	21
Figure 1.23. Coefficient de correction de denture. ....	22
Figure 1.24. Fonctionnement avec jeu. ....	23
Figure 1.25. Lubrification par bain d'huile. ....	24
Figure 1.26. Lubrification par projection d'huile. ....	24
Figure 1.27. Lubrification goutte à goutte. ....	25
Figure 1.28. Lubrification par circulation d'huile ....	25
Figure 1.29. Exemple de palier avec graisseur et répartiteur de graisse. ....	26
Figure 1.30. Situation d'engrènement. ....	26
Figure 1.31 Direction de la vitesse de glissement. ....	27
Figure 1.32. Diagramme des vitesses lors d'un contact. ....	27
Figure 1.33. Variation de la vitesse de glissement lors de l'engrènement. ....	27
Figure 1.34. Répartition de la charge. ....	28



Figure 1.35. Variation de la pression en fonction De la vitesse de glissement. ....	29
Figure 2.1. représentation d'une fonction empirique.....	32
Figure 2.2. Discrétisation d'une structure en nœuds et éléments .....	38
Figure 2.3. Organigramme de résolution .....	39
Figure 2.4. Les différents types de mailles en 3 dimensions .....	41
Figure 2.5. Types de maillage.....	43
Figure 2.6. Exemple de test patch plan .....	44
Figure 2.7. Représentation schématique de l'affectation des phases dans une grille cartésienne .....	45
Figure 2.8. Chute d'une goutte à la surface d'un liquide. ....	46
Figure 2.9. Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Eléments Finis.....	47
Figure 3.1. Les caractéristiques de la simulation.....	50
Figure 3.2. Géométrie téléchargée .....	51
Figure 3.3. Choix du time step à étudié .....	52
Figure 3.4. Création des plan .....	53
Figure 3.5. Choix du contour .....	53
Figure 3.6. Création des lignes .....	54
Figure 3.7. génération de la ligne .....	55
Figure 3.8a. Résultats de la simulation .....	56
Figure 3.8b. Extraction des donnés.....	56
Figure 3.9b. Extraction des donnés.....	57
Figure 3.9a. Résultats de la simulation .....	57
Figure 3.10b. Extraction des donnés.....	58
Figure 3.10a. Résultats de la simulation .....	58
Figure 3.11b. Extraction des donnés.....	51
Figure 3.11a. Résultats de la simulation .....	59
Figure 3.12b. Extraction des donnés.....	60
Figure 3.12a. Résultats de la simulation .....	60
Figure 3.13a. Résultats de la simulation .....	61
Figure 3.13b. Extraction des donnés.....	61

## Liste des tableaux

Tableau 2.1. Applications de la MEF .....	37
Tableau 2.2. Les types d'éléments finis.....	42
Table <b>3.1.</b> Caractéristiques géométriques .....	50
Table <b>3.2.</b> Caractéristique des fluides .....	50

## Introduction générale

L'étude et la simulation de la lubrification des engrenages constituent un pilier essentiel de la recherche en ingénierie mécanique. Les engrenages, en tant qu'éléments de transmission du mouvement par contact, jouent un rôle crucial dans divers systèmes mécaniques. Assurer une lubrification adéquate des engrenages est vital pour garantir leur fonctionnement optimal, réduire l'usure et prolonger leur durée de vie. Cependant, la complexité des interactions physiques telles que le contact, la déformation et la lubrification entre les surfaces des dentures pose des défis considérables pour leur compréhension et leur optimisation.

La simulation numérique se présente comme un outil puissant pour explorer le comportement de la lubrification des engrenages. Elle permet d'analyser en détail les interactions entre les surfaces en mouvement, le film de lubrifiant et les conditions opérationnelles. En intégrant des modèles mathématiques avancés et des techniques de calcul haute performance, la simulation offre la possibilité d'évaluer l'efficacité de différentes stratégies de lubrification, d'optimiser la géométrie des dentures et de prédire avec précision les performances et la durabilité des systèmes d'engrenages.

Dans un contexte d'amélioration continue des systèmes mécaniques la nécessité de traitement des résultats de ces simulations est primordiale, c'est dans cet objectif que nous proposons dans ce travail le traitement des résultats de simulation établi avec Ansys Fluent et traité avec CFD Post. Ce mémoire est divisé en trois chapitres distincts, avec une conclusion pour synthétiser le travail de ce mémoire.

Le Chapitre 1, présente les concepts des engrenages, notamment leur classification, ainsi que leur mode de fonctionnement. Le Chapitre 2, traite des différentes méthodes d'analyse des résultats, à savoir les méthodes grapho analytique et numériques, concernant le chapitre 3, il est consacré à la présentation de CFD post et les techniques de traitement des résultats après simulation

# Chapitre1

## Fonctionnement des engrenages et leurs lubrifications

### 1. Introduction

Les engrenages sont des composants essentiels dans de nombreux mécanismes industriels, jouant un rôle clé dans la transmission de puissance et la modification des vitesses et des directions de mouvement. Leur importance se manifeste dans une multitude d'applications, des machines simples aux systèmes industriels complexes. Comprendre les principes de base des engrenages et leurs diverses utilisations est crucial pour quiconque s'intéresse aux systèmes mécaniques.

Ce chapitre explore en profondeur les différents types d'engrenages, leurs applications variées et les principes fondamentaux qui les régissent.

### 2. Classification des engrenages

Selon les positionnements relatifs des arbres, trois classes majeures d'engrenages peuvent être distinguées :

#### 2.1. Les engrenages à axes parallèles

Ce type est nommé aussi cylindrique dont les deux arbres sont parallèles. Diverses catégories sont distinguées selon la géométrie des dents suivant la génératrice. [1]

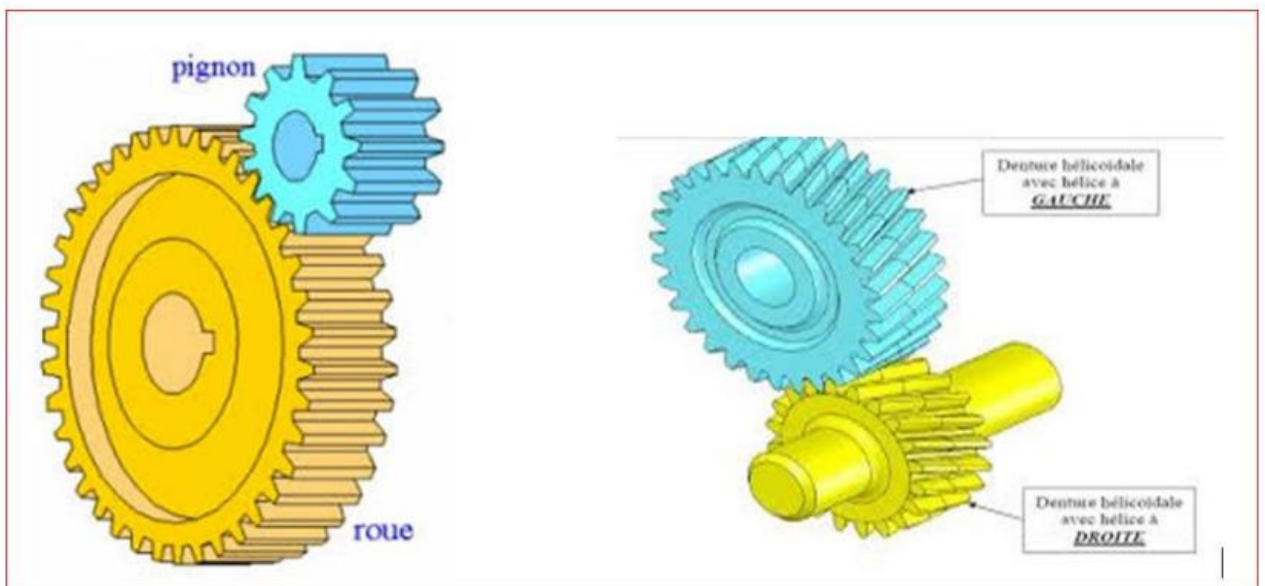


Figure 1.1. Engrenages à axes parallèles. [1]

### 2.1.1. Engrenages à dentures droites

Un engrenage cylindrique droit peut être aisément comparé à des roues cylindriques de friction. Comme elles, il assure la transmission d'un mouvement circulaire entre deux arbres parallèles rapprochés, le rapport des vitesses angulaires des arbres déterminant le rapport des diamètres des roues. Mais, alors que dans le cas des roues de friction l'entraînement, fait par adhérence, est incapable de transmettre de grands efforts et qu'il est inséparable d'un certain glissement, dans le cas d'un engrenage, la liaison, obtenue par obstacles procure un rapport de vitesses absolument fixe et peut transmettre des couples considérables. Ce type est nommé aussi cylindrique dont les deux arbres sont parallèles. Rapprochés, le rapport des vitesses angulaires des arbres déterminant le rapport des diamètres des roues [2]



Figure 1.2. Denture droite.[3]

### 2.1.2. Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale

#### ➤ **Avantage**

- Fonctionnement silencieux sans vibration.
- Efforts sur chaque dent réduit (3 ou 4 dents prises simultanément)

#### ➤ **Inconvénient**

- Ils créent des poussées axiales qui exigent des épaulements et des butées (on peut les supprimer en utilisant de roues à denture cheverons).

- Des efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (effort axiale sur les paliers et augmentation des efforts de flexion).
- Rendement un peu moins bon.
- Utilisation impossible en montage « baladeur » (ces engrenages doivent rester en contact permanent)

➤ **Condition d'engrènement**

- Même module, (quels que soit leurs diamètres ou leurs nombres de dents).
- Même angle d'hélice.
- Hélices de sens opposés. (Sur les deux roues) [4]

**2.2. Les engrenages à axe concourants**

Ce type est nommé aussi conique dont les arbres sont tels que leurs axes de rotation se coupent. Selon la géométrie des dents, on distingue les sous-catégories des : denture droite, hélicoïdal, spirale. [5]

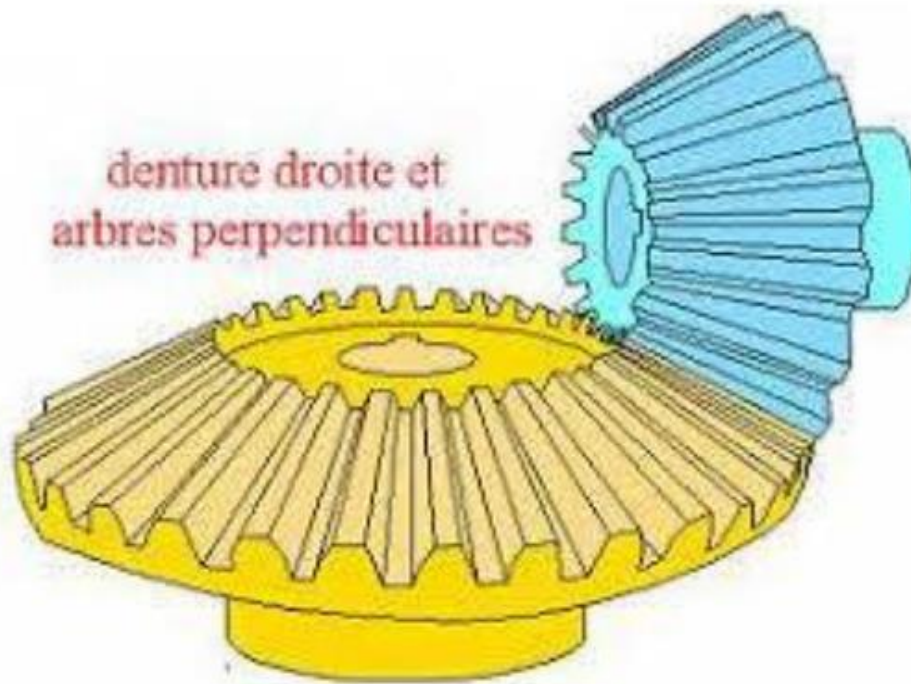


Figure 1.3. Engrenage conique à axe concourant.

### 2.3. Engrenages hypoïdes

Transmission de mouvement entre deux arbres perpendiculaires dont les axes sont écartés l'un de l'autre d'une certaine distance.

Ils sont considérés comme étant des intermédiaires entre les couples coniques et la roue à vis sans fin. [6]

#### ➤ La condition d'engrènement

- Même module.
- Les sommets des deux cônes soient confondus.

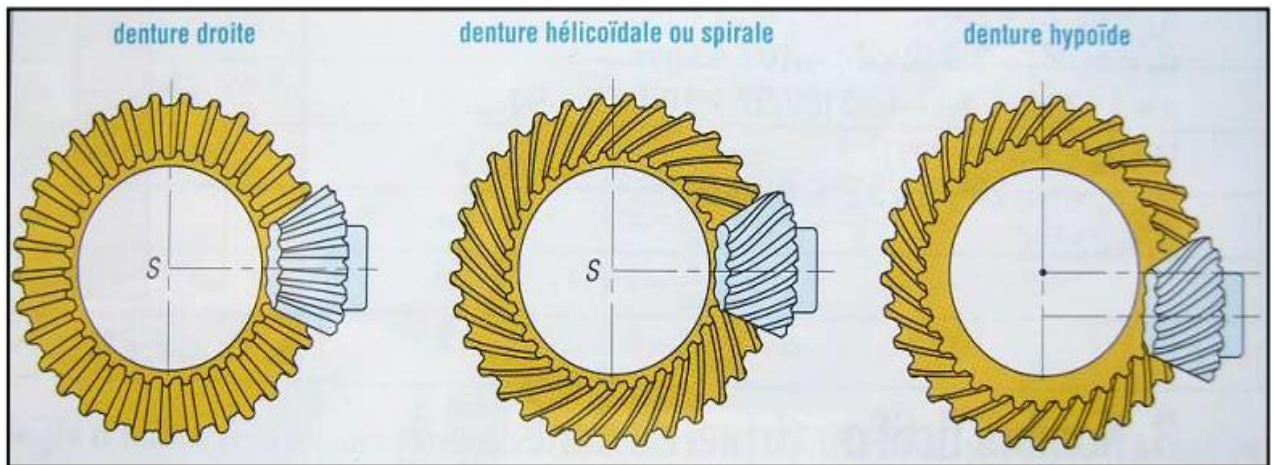


Figure 1.4. Engrenage hypoïde.

### 2.4. Engrenage à roue et vis sans fin

L'engrenage à vis sans fin est un engrenage gauche se caractérisant tout d'abord par la forme particulière de son pignon, qui se présente sous l'aspect d'une vis sans fin.

#### ➤ Avantages

- Grand rapport de réduction (jusqu'à 1/200).
- Presque toujours irréversibles d'où sécurité anti retour.
- Glissement important entre les dentures, donc usure et rendement faible (60%).
- La vis supporte un effort axial important. [7]

### 2.4.1. Différents types de systèmes roue-vis sans fin

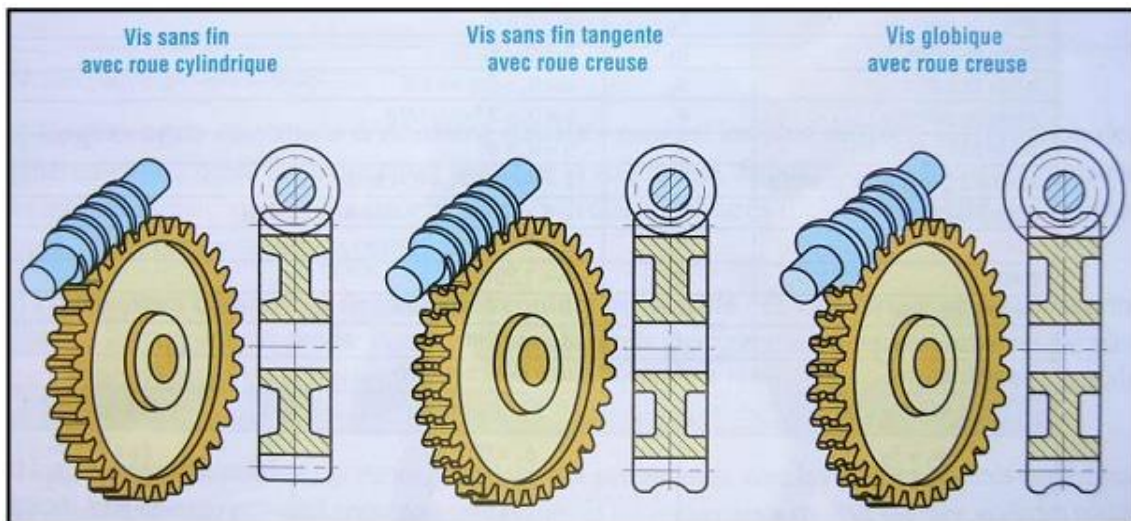


Figure 1.5. Systèmes roues-vis sans fin.

### 2.4.2. Conditions d'engrènements

- Même module axial.
- Même angle d'hélice.

**Remarque :** Une roue creuse est une roue cylindrique légèrement creusée, ce qui accroît la surface de contact entre les dents et permet d'augmenter les efforts transmissibles.

$$r = \frac{z_v}{z_r} = \frac{N_r}{N_v} \quad (1.1)$$

$$\frac{N_r}{N_v} \neq \frac{d_v}{d_r} \quad (1.2)$$

### 2.5. Engrenages à axe quelconques

Ces engrenages sont nommés aussi gauches dont les axes des arbres n'ont pas un point commun et occupe une position relative quelconque[7].



## Denture gauche

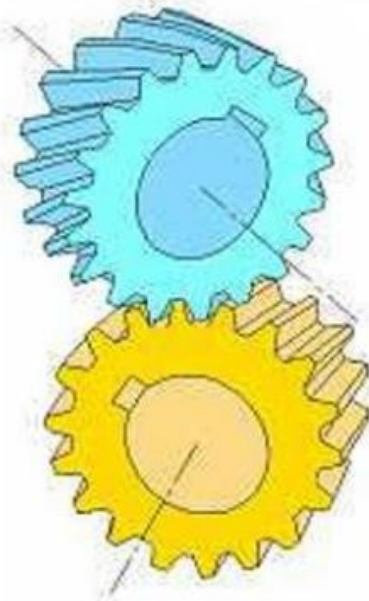


Figure 1.6. Engrenage à axe quelconque.

### 2.5.1. Fonctionnement des engrenages

Un engrenage est un mécanisme composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position relative invariable. L'une des roues entraîne l'autre par l'action des dents successivement en contact. Une combinaison d'engrenages est appelée train d'engrenages servant à transmettre la puissance entre deux arbres rapprochés avec modification du couple transmis et de la vitesse de rotation [8]. Pendant le fonctionnement de la transmission, le contact des dents des roues Une dent de l'engrenage mené commence au bas de la dent avant et au sommet de la dent Mettre en œuvre. Un engrènement est réalisé sur toute la largeur de la dent .Afin de rendre la transmission de rotation à l'arbre mené continue, le choc de couple Le nombre de dents doit apparaître avant la fin de l'absorption de couple précédente Perpendiculaire à l'axe de la roue hélicoïdale, la manière dont le contact est établi est Roues à dents droites, mais en raison de la disposition des dents d'engrenage hélicoïdal Selon les différentes spirales, leur étage de maillage sera différent dans la section parallèle, qui est différente de Les engrenages droits ont la même phase sur toute la largeur de la roue. À Contrairement aux engrenages droits, dans les engrenages hélicoïdaux, le contact des dents n'est pas établi simultanément sur toute la largeur de la dent[9].

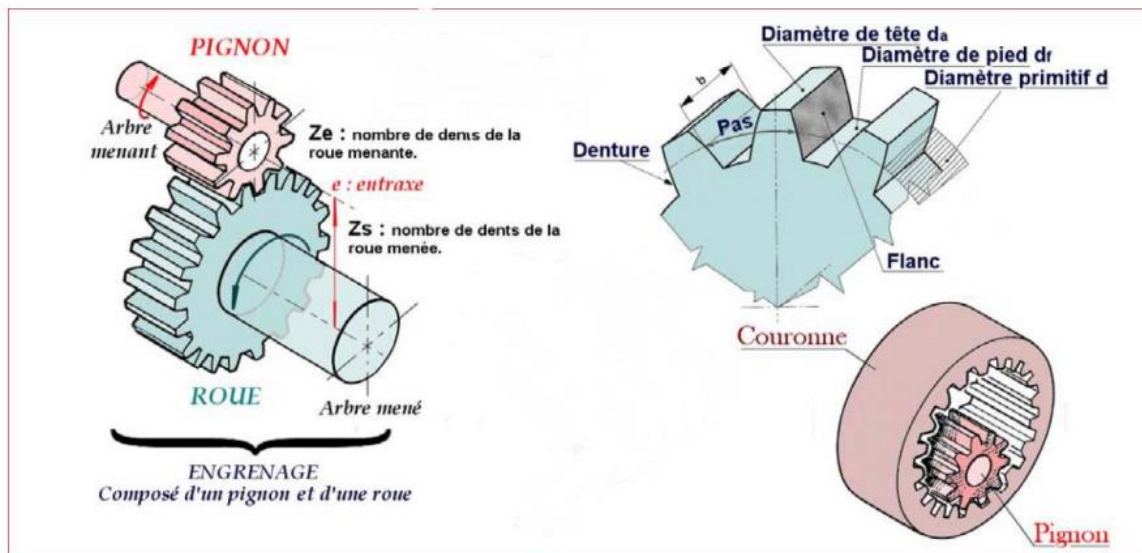


Figure 1.7. Engrenages à denture droite [10]

### 2.5.2. Caractéristiques de la denture

Les caractéristiques de la denture d'un engrenage comprennent plusieurs paramètres qui définissent la géométrie et les propriétés fonctionnelles des dents. Voici quelques-unes des caractéristiques principales :

- Profil de la Denture : Le profil de la denture détermine la forme de la surface de la dent et est essentiel pour assurer un bon engagement entre les dents des engrenages en contact.
- Module et Pas : Le module (pour les engrenages métriques) ou le pas (pour les engrenages impériaux) indique la taille des dents et est crucial pour garantir une interférence correcte entre les engrenages.
- Diamètre Primitif : Le diamètre primitif est le diamètre prédéfini autour duquel les dents sont disposées et utilisé pour calculer le rapport de transmission.
- Nombre de Dents : Le nombre de dents sur un engrenage affecte directement la vitesse de rotation et le rapport de réduction lorsqu'il est en interaction avec d'autres engrenages.
- Pas de Base : Le pas de base est la distance axiale entre deux dents consécutives mesurée le long du cercle primitif et est utilisé dans les calculs de la denture.
- Hauteur de la Dent : La hauteur de la dent représente la distance verticale entre le sommet de la dent et le fond de la denture et est cruciale pour déterminer la résistance et la durabilité de l'engrenage.
- Angle de Pression : L'angle de pression est l'angle entre la normale à la surface de la dent et la ligne de la tangente du cercle primitif. Il influence la performance de l'engrenage en termes de transmission de puissance et d'efficacité.
- Largeur de la Denture : La largeur de la denture est la distance le long de la circonférence de l'engrenage qui est en contact avec un autre engrenage. Elle détermine la capacité de charge et la répartition des contraintes sur les dents.

### 3. Profil de la denture

Les intersections des surfaces des dentures d'une roue cylindrique, avec un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la roue, sont appelées profils

On dit que deux profils sont conjugués s'ils restent constamment tangents, pendant le temps où les surfaces de dentures en contact assurent la transmission.

Le profil, utilisé pour les engrenages, est en général la développante de cercle [11].

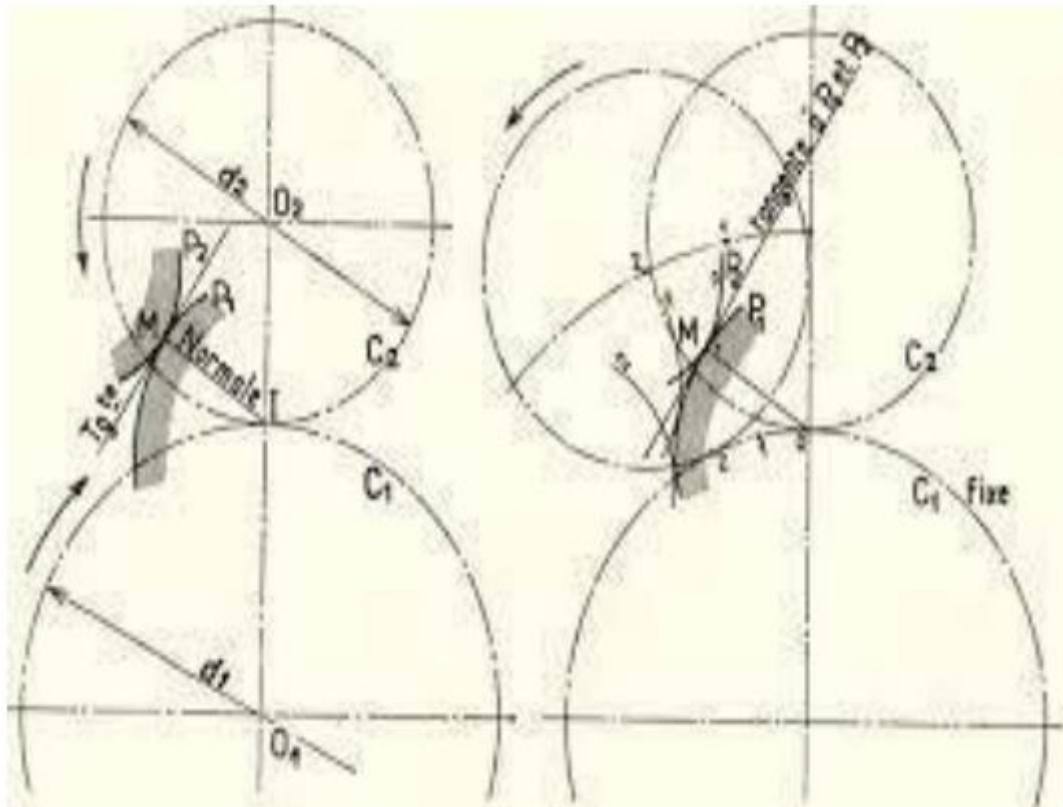


Figure 1.8. Cylindre primitif plan de génération.

#### 3.1. Profil à développante de cercle

Parmi les nombreux profils qu'il est possible de donner à une denture, on n'utilise plus, sauf rarissimes exceptions, que le profil en développante de cercle à causes de ces qualités :

- Il permet une tolérance notable sur l'entraxe des roues sans que le fonctionnement soit troublé.
- Un seul outil par module permet de tailler toutes les roues quel que soit le nombre de leurs dents.
- L'usure des surfaces actives est plus régulièrement répartie que sur un autre profil.
- Les vibrations sont plus faibles qu'avec un autre profil.

La développante d'un cercle (c), dit de base, de centre O, de diamètre D, est la trajectoire dans le repère R (O, x, y, z) lié à (c) d'un point M appartenant à une droite D et qui roule sans glisser sur C. Une développante est également l'enveloppe de la normale en M à D dans le mouvement de D par rapport à C [12].

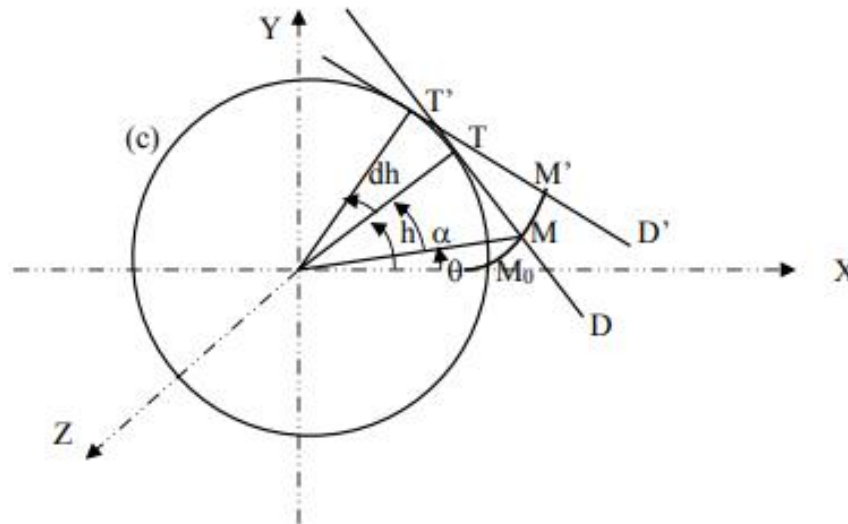


Figure 1.9. Développante de cercle.

T : centre instantané de rotation du mouvement de D par rapport à C.

C : base de ce mouvement (centre de base).

D : roulante de ce mouvement.

$\Theta$  : définit la position du point M sur le profil en développante de cercle.

H : définit la position du point T sur le cercle de base.

$\alpha$  : repère la position angulaire du point T par rapport au point M.

### 3.2. Principe de la développante de cercle (cas de denture droite)

En faisant rouler sans glisser une droite sur un cercle, chaque point de cette droite décrit, relativement au cercle, une courbe qui s'appelle une développante de cercle. Cette dernière peut aussi être matérialisée par un fil sous tension que l'on déroule d'un cercle : le bout du fil décrit la développante relativement au cercle duquel il est déroulé[13].

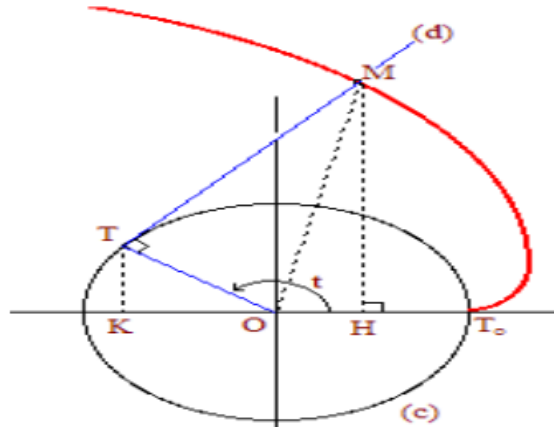


Figure 1.10. Schématisation de la développante de cercle. [13]

### 3.2.1. Propriétés de la développante de cercle

- la développante de cercle ne peut avoir de points à l'intérieur du cercle développé.
- Le point Q est un point de rebroussement de la développante.
- Deux développantes d'un même cercle sont des courbes parallèles :  
 $MM' = QQ' = M_1M_1'$ .
- La normale à la développante est tangente au cercle développé. [13]

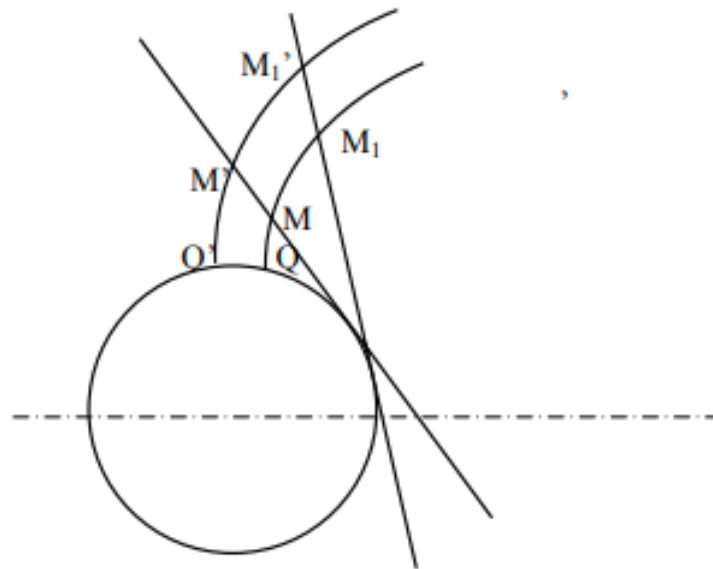


Figure 1.11. Propriétés de la développante de cercle.

### 3.2.2. Equation polaire de la développante de cercle

La Figure 1.12 représente une développante dont le point de rebroussement est Q sur le cercle de base. En un point quelconque M de rayon  $r_M$ , l'angle de la développante avec OM est l'angle d'incidence  $\alpha_M$  défini par :

$$\cos \alpha_M = \frac{r_b}{r_M} \quad (1.3)$$

$$T_M M = T_M Q = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_M \quad (1.4)$$

$$QW = T_M Q - T_M W \quad (1.5)$$

$$r_b \cdot QOM = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_M - r_b \cdot \alpha_M$$

$$r_b \cdot QOM = r_b \cdot (\operatorname{tg} \alpha_M - \alpha_M) \quad (1.6)$$

D'où :

$$QOM = \operatorname{tg} \alpha_M - \alpha_M \quad (1.7)$$

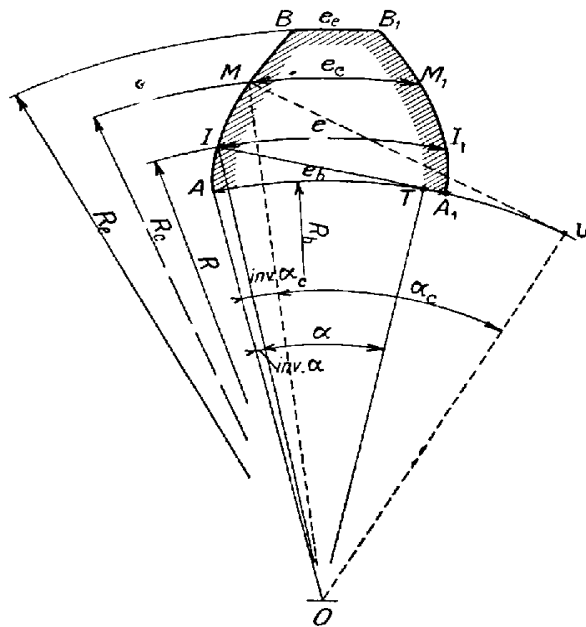


Figure 1.12. Caractéristiques de la denture.

$QOM$ : représente l'involute de  $\alpha_M$

D'où :

$$QOM = inv\alpha_M$$

$$inv\alpha_M = tg\alpha_M - \alpha_M \quad (1.8)$$

$inv\alpha_M$  Et  $\alpha_M$  sont exprimés en radians

- Au point primitif I :  $inv\alpha = tg\alpha - \alpha$
- Au point de tête, on a :  $inv\alpha_a = tg\alpha_a - \alpha_a$

La longueur de l'arc de développante  $t$  compris entre le cercle de base et un point M quelconque est :

$$t = \frac{r_b}{2} tg^2\alpha_M \quad (1.9)$$

La distance entre deux points M et M' définis par leurs angles d'incidences  $\alpha_M$  et  $\alpha_{M'}$  est :

$$\frac{r_b}{2} (tg^2\alpha_M - tg^2\alpha_{M'}) \quad (1.10)$$

### 3.3. Epaisseur de denture

La formule générale valable pour un point M situé au - dessus ou au - dessous du primitif, s'écrit :

$$e_M = r_M \left[ \frac{e}{r} + 2(inv\alpha - inv\alpha_M) \right] \quad (1.11)$$

$e$  : représente l'épaisseur au primitif

$$e = \frac{\pi.m}{2} \quad (1.12)$$

$$e_m = r_M \left[ \frac{\pi.m}{2.r} + 2(inv\alpha - inv\alpha_M) \right] \quad (1.13)$$

$$\cos\alpha_M = \left( \cos\alpha \cdot \frac{r}{r_M} \right) \quad (1.14)$$

- L'épaisseur à la tête :

$$e_a = r_a \left[ \frac{\pi.m}{2.r} + 2(inv\alpha - inv\alpha_a) \right] \quad (1.15)$$

- L'épaisseur de base :

$$\alpha_M = 0$$

$$e_b = r_b \left[ \frac{e}{r} + 2inv\alpha \right] \quad (1.16)$$

- L'épaisseur sur cercle de pointe :

Le rayon de pointe  $r_p$  est le rayon du cercle où les deux profils d'une même dent se coupent :  $e = 0$ ,

Dans ce cas, on a :

$$inv\alpha_p = inv\alpha + \frac{e}{2.r} \quad (1.17)$$

$$r_p = \frac{r \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha_p} \quad (1.18)$$

#### 4. Etude de l'engrènement

La Figure 1.13 schématise l'engrènement de deux roues  $O_1$  et  $O_2$  d'un engrenage parallèle extérieur, dans un plan perpendiculaire aux axes (nous supposons toujours que les dentures sont à développement de cercle).

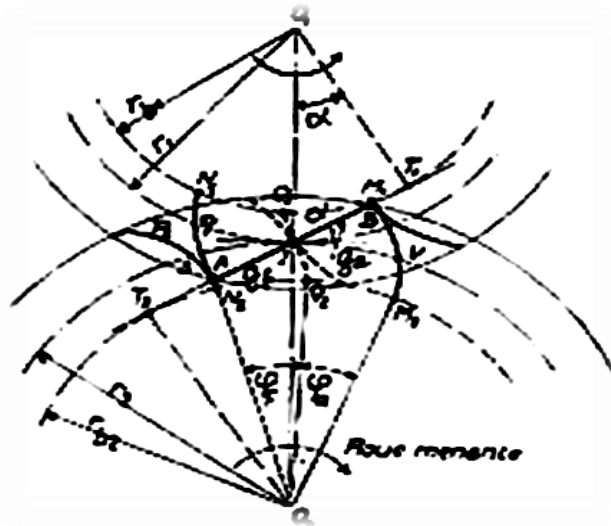


Figure 1.13. Schéma de l'engrènement d'un engrenage parallèle extérieur.

La ligne d'action est une droite passant par le point I de contact des deux cercles primitifs, tangente aux deux cercles de base et inclinée d'un angle  $\alpha$  (angle de pression) par rapport



à la tangente commune aux deux cercles primitifs en I. Considérons l'engrènement d'un couple de profils conjugués  $P_1$  et  $P_2$ . Supposons la roue  $O_2$  menant, dans le sens indiqué sur la Figure 1.13.

#### ❖ Début de l'engrènement

Le profil  $P_1$  est attaqué à sa pointe par le profil  $P_2$ . Le point d'action commençante est le point d'intersection A de la ligne d'action et du cercle de tête de la roue menée. Les points de rebroussement des profils  $P_1$  et  $P_2$  occupent alors les positions  $N_1$  et  $N_2$ .

- **Point de contact en I** : la période d'approche est celle qui est comprise entre le début de l'action et le moment où le point de contact est I. pendant cette période :
  - Le point de contact se déplace sur la ligne d'action de A à I. La longueur AI est appelée longueur d'approche (symbole :  $g_f$ ) ;
  - La roue  $O_2$  a tourné de l'angle  $\varphi_f = N_2O_2Q_2$  (notons que  $AI = N_2Q_2$ ). Pour les engrènements concourants, il suffira de passer par l'engrènement parallèle complémentaire.
  - L'arc d'approche est la longueur de l'arc parcouru par un point de l'un quelconque des deux cercles primitifs pendant la période d'approche : il est mesuré par exemple par l'arc SI de cercle primitif de la roue  $O_2$  (symbole :  $a_f$ ).

Nous avons :

$$a_f = \varphi_f \cdot r_2$$

$$g_f = \varphi_f \cdot r_{b2}$$

C'est-à-dire :

$$a_f = g_f / \cos\alpha$$

$\cos\alpha$  étant égal à  $r_{b2} / r_2$

#### ❖ Fin de l'engrènement

Le profil  $P_2$  est en contact, par sa pointe avec le profil  $P_1$ . Le point extrême d'action B est l'intersection de la ligne d'action avec le cercle de tête de la roue menant. La période de retraite est comprise entre le moment où le point de contact coïncide avec I et la fin de l'action.

Pendant cette période :

- Le point d'action se déplace sur la ligne d'action, de I à B. la longueur IB est la longueur de retraite (symbole :  $g_a$ ). La roue  $O_2$  a tourné de l'angle

$\varphi_a = Q_2 O_2 M_2$ ; Nous avons :  $IB = Q_2 M_2$  ;

➤ L'arc de retraite est la longueur de l'arc parcouru par un point de l'un quelconque des deux cercles primitifs pendant la période de retraite : il est mesuré par exemple par l'arc IV du cercle primitif de la roue  $O_2$  (symbole :  $a_a$ ).

$$g_a = \varphi_a \cdot r_{b2}$$

$$a_a = \varphi_a \cdot r_2$$

Nous obtenons :  $a_a = g_a / \cos\alpha$

L'arc de conduite est la longueur de l'arc parcouru par un point de l'un des deux cercles primitifs, depuis le début jusqu'à la fin de l'action : il est mesuré par exemple par l'arc SV (symbole :  $a_a$ ).

Nous avons donc :

$$a_\alpha = a_f + a_a = (AI + IB) / \cos\alpha = g_\alpha / \cos\alpha$$

**AB** = longueur d'action (symbole :  $g_\alpha$ ).

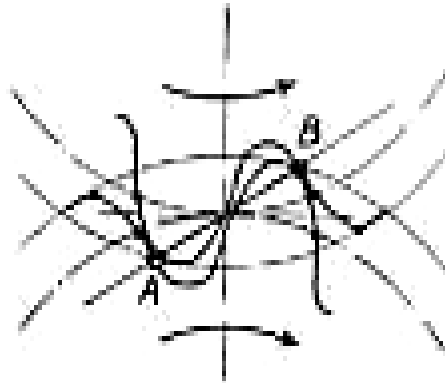


Figure 1.14. La longueur d'action AB.

Pour assurer la continuité d'engrènement, il faut évidemment que lorsque les profils conjugués  $P_1$  et  $P_2$  cessent d'être en contact, un autre couple de profils conjugués soit déjà en contact. La Figure 1.14 correspond au cas limite, la longueur d'action  $AB = g_\alpha$  étant juste égal au pas de base  $P_b$ .

Il faut évidemment que nous toujours :

- **AB > pas normal**
- **arc de conduite > pas primitif.**

Nous arrivons ainsi à la définition du rapport de conduite  $\varepsilon_\alpha$  :

$$\varepsilon_\alpha = g_\alpha / p_b = a_a / p$$

Pratiquement, il est souhaitable d'avoir une valeur de  $\epsilon_\alpha$  supérieur à 1.30.

$P_1$  (menant) et  $P_2$  (mené). Nous savons que la ligne d'action passe par le point de tangence I des deux cercles primitifs et est inclinée de la valeur de l'angle de pression  $\alpha$ . La Figure 1.15. représente un engrenage qui serait juste à la limite de la conduit d'engrènement nous avons alors :

$g_\alpha =$  pas de base  $P_b$  ou  $g_t =$  pas primitif  $p$ . Il ne faut évidemment pas se contenter de cette égalité dans le cas d'une denture droite. Il faut :  $g_\alpha > P_b$  ou  $g_t > p$

Le profil mené attaqué par son sommet.

➤ **Figure 1.15.b.** le point de contact est confondu avec le point primitif I

- Période d'approche : c'est la période comprise depuis le début de l'engrènement jusqu'au moment où le point de contact est en I.
- Longueur d'approche : longueur de ligne d'action parcouru pendant la période d'approche ( $g_f = AI$ ),

➤ **Figure 1.15.c.** fin de l'engrènement (le profil menant ne conduit plus que par son sommet).

- Période de retraite : c'est la période comprise depuis le moment où le point de contact est en I.
- La longueur de retrait : longueur de ligne d'action parcourue pendant la période de retraite ( $g_\alpha = IB$ ).

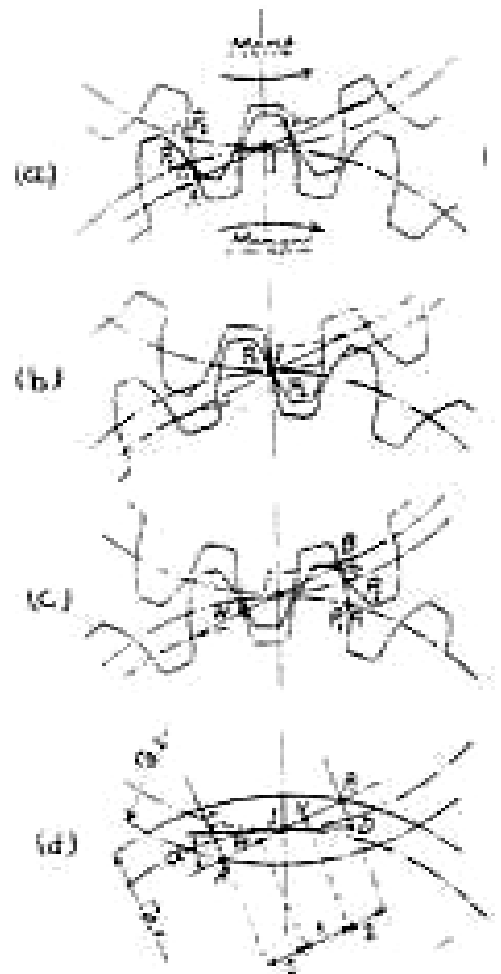


Figure 1.1. Un engrenage juste à la limite de la conduit d'engrènement

La longueur de conduite : longueur de ligne d'action parcourue pendant l'engrènement  
( $AB = AI + IB$  donc  $g_\alpha = g_f + g_\alpha$ )

L'arc de conduite : arc dont ont roulé sans glisser l'un sur l'autre les deux cercles primitifs pendant tout l'engrènement.

Le rapport de conduite ( $\epsilon_\alpha$ ) : il faut évidemment que lorsqu'un couple de profils conjugués cesse d'engrener, un autre couple au moins ait déjà commencé à engrener.

- **Définition de rapport de conduite :**

Le rapport de conduite est défini comme suit :

$$\epsilon_\alpha = g_\alpha / p_b = g_t / p$$

Dans le cas d'une denture droite, une valeur limitée inférieure pratique pourrait être fixée aux environs de  $1.25 \rightarrow 1.40$ .

Une valeur de rapport de conduite située entre 1 et 2 qu'il y a tantôt un seul couple en contact, tantôt deux couples en contact simultanément : sur la figure 1.16.

Les points V et W sont portés tel que  $AV = BW = PB$ .

Il n'y a qu'à un seul couple en contact entre VW et deux couples partout ailleurs. Nous retrouverons ces conditions sur la figure 1.16. Par contre, dans le cas de la figure 1.16. Nous avons :  $(AV = VV' = Pb)$   $g_\alpha = AB / Pb$  compris entre 2 et 3 nous avons alors tantôt deux, tantôt trois couples simultanément en contact.

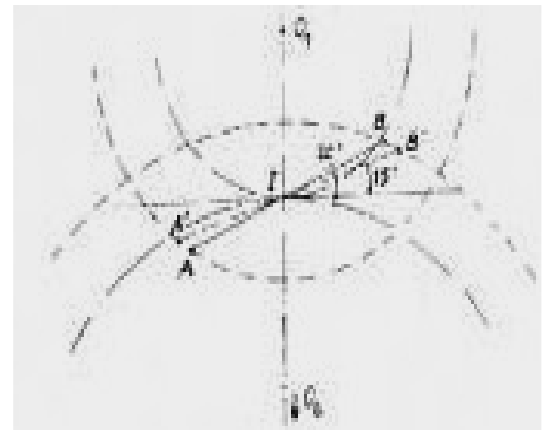


Figure 1.2. Titre

- **Remarque**

Le rapport de conduit doit avoir une valeur aussi grande que possible : Répercussion sur le silence de fonctionnement et sur la résistance des dents. Sa valeur diminue au fur et à mesure que l'angle de pression augmente : La figure 1.16. Ne diffère que par la valeur de l'angle de pression. La valeur de ces angles de pression ne doit donc pas être trop élevée pour les engrenages où l'on recherche avant tout le silence de fonctionnement. Il peut même se faire que l'on s'écarte parfois, pour certaines applications particulières, de l'angle de pression normalisé  $\alpha = 20^\circ$ . Sa valeur est d'autant plus grande que les nombre de dents sont élevés.

#### 4.1. Ligne d'engrènement ou ligne d'action

L'approche se définit comme étant la phase où le point de contact C entre une paire de dents sur la ligne d'action se déplace de T1 à O Figure 1.17. soit du début du contact jusqu'au point primitif. La retraite se définit comme étant la phase où le point de contact

C entre une paire de dents sur la ligne d'engrènement se déplace de O à T2 Figure 1.17. soit du point primitif jusqu'à la fin du contact[14].

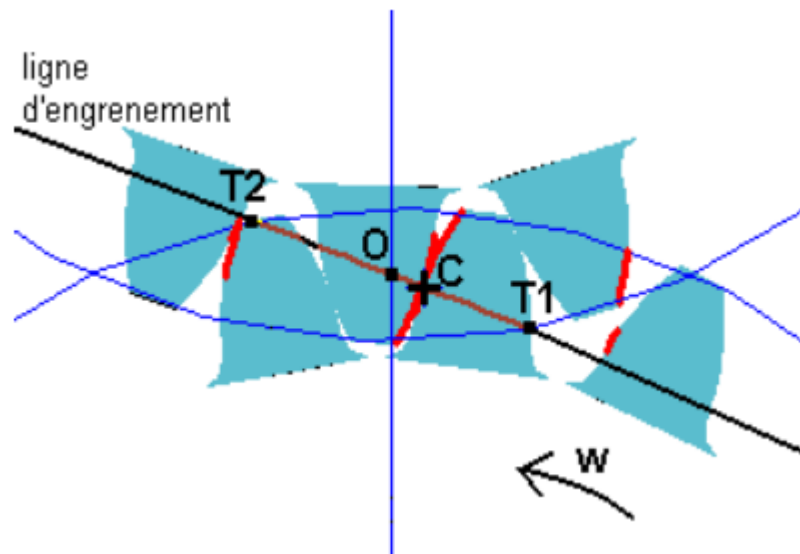


Figure 1.3. Ligne d'engrènement (ou d'action).

Pour assurer une transmission continue du mouvement, il est nécessaire qu'un nouveau couple de dents soit en approche avant que le couple précédent termine sa retraite. Il faut, qu'il y ait au moins un couple de dent qui soit toujours en prise Figure 1.18.[14]

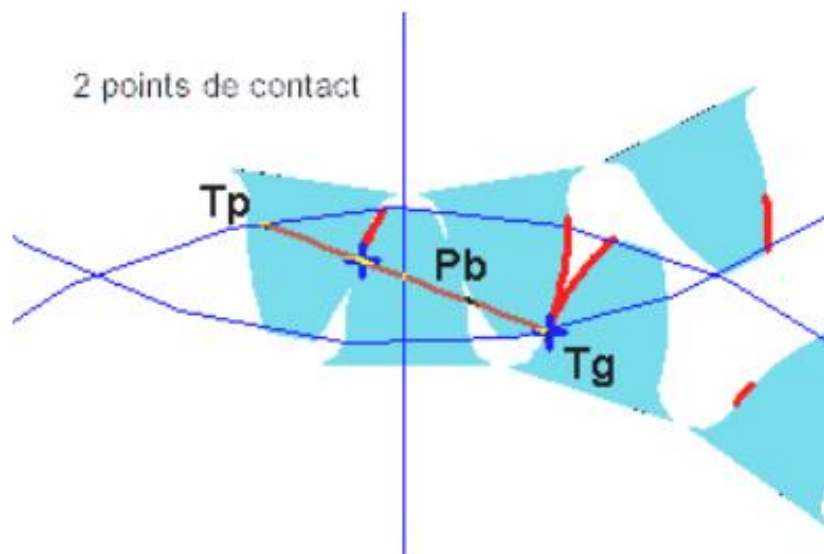


Figure 1.4. Couple de dents en contact

Cette condition s'écrit :  $TpTg > Pb$ .

$TpTg$  : Distance entre le point Tp et le point Tg le long de la ligne d'engrènement

$Pb$  : Pas de base : distance entre deux dents consécutives le long de la ligne d'engrènement[15].

## 4.2. Interférence

On a vu précédemment que pour avoir un engrènement correct, il faut que le point de contact des profils reste sur le segment T1T2.

Le mouvement se fait sans interférence, si le point de contact se fait au-delà du cercle de base [16].

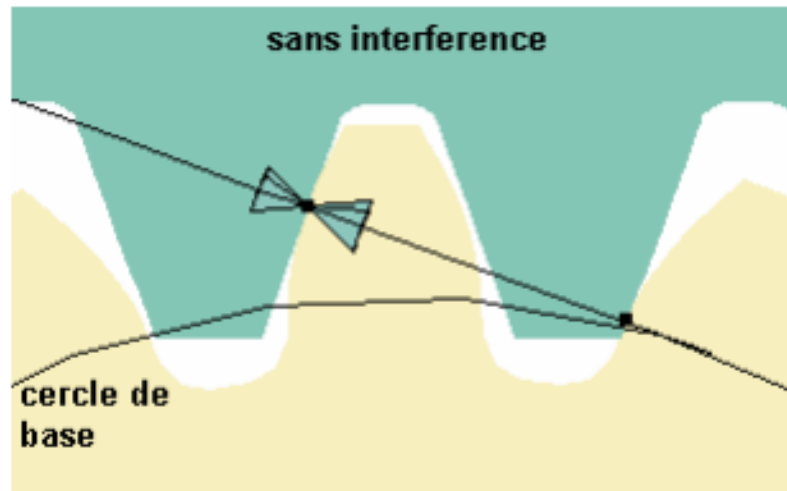


Figure 1.5. Fonctionnement sans interférence.

S'il en est autrement, c'est-à-dire que le contact se fait en dessous du cercle de base, on dit qu'il y a interférence figure 1.20.

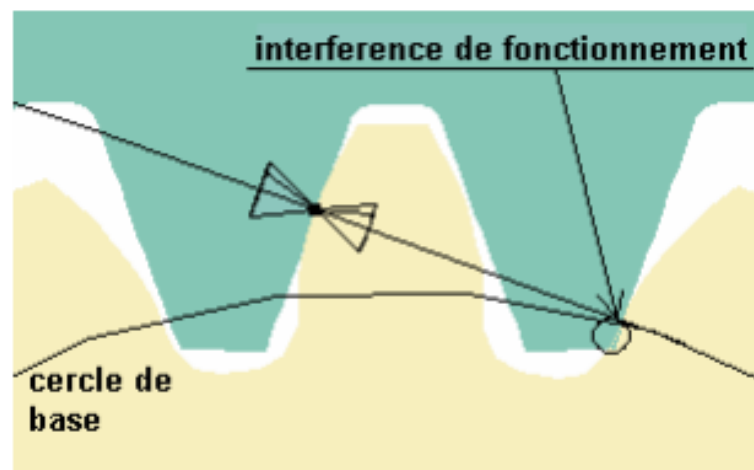


Figure 1.6. Interférence de fonctionnement.

Cela peut se produire dans deux cas :

- Lorsque le nombre des dents du pignon menant est faible devant celui de la roue menée ; il y a alors coincement des dents : c'est l'interférence de fonctionnement.
- Lors du taillage, si le nombre de dents de l'engrenage taillé est insuffisant, il y a interférence de fabrication. Ce phénomène se traduit par une diminution de la section en

pied de dent figure I-13 qui sera alors fragilisée puisque le profil de raccord de la dent interfère avec une portion du profil utile de la développante de cercle [16].

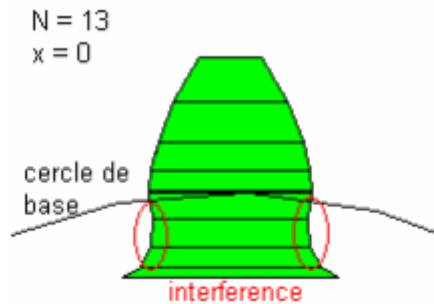


Figure 1.7. Interférence de fabrication.

Cette condition s'écrit :  $N^* = \frac{Q2}{\sin^2\phi_c}$

Où  $N^*$  est le nombre de dents minimum pour éviter ce type d'interférence.  $\phi$  est l'angle de pression.

Si le nombre de dents est imposé et inférieur à  $N^*$ , on peut résoudre le problème d'interférence de fabrication en effectuant un déport de denture  $x$ . Ceci revient à déplacer radialement la crémaillère lors du taillage.

Le facteur de déport minimum  $x = 1 - \frac{N}{N^*}$  doit être positif pour éviter l'interférence figure 1.14.a. s'il est négatif il y a interférence figure 1.14.b. On est à la limite d'interférence si :  $N = N^*$  figure I-14.c.

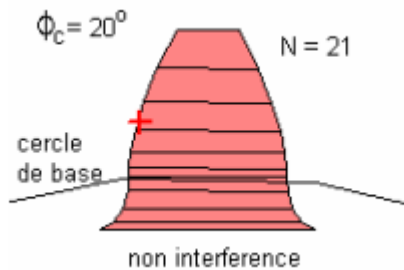


Figure 1.8.a

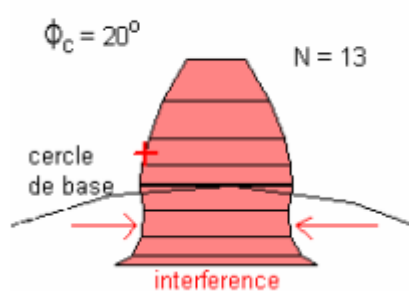


Figure 1.22. b

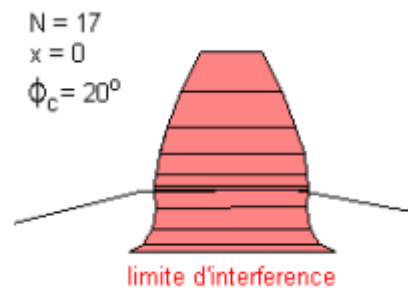


Figure 1.22.c

### 4.3. Correction de la denture

Lorsque le nombre de dents devient infini, le cercle primitif devient une ligne droite et la crémaillère obtenir.  $\phi_c$  est l'angle de pression de la crémaillère constant le long du profil de la dent.

Pour un maillage correct, la normale du contour est à toutes les positions Le contact passe toujours par le point d'origine O appelé le pôle de maillage. Données personnelles éligibles

Dans cette condition, c'est un contour conjugué, donc le mouvement obtenu est continu, et le rapport Vitesse strictement constante. Le point de contact se déplace le long de la ligne d'action (ou Ligne de maillage). L'angle de pression  $\phi_c$  donne l'inclinaison du tuyau L'angle d'engagement par rapport à une ligne perpendiculaire à la ligne centrale [17].

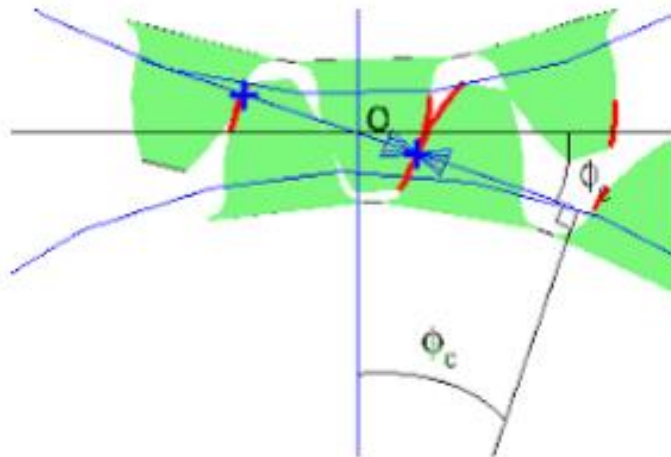


Figure 1.9. Coefficient de correction de denture.

### 5. Jeu de fonctionnement

Le jeu peut être modifié par l'entraxe, l'écart de fabrication ou Modifier l'épaisseur de la dent de l'outil de coupe. Le jeu B est nécessaire au fonctionnement normal de l'engrenage. Cela permet une bonne Lubrifiez et prévenez le blocage pendant l'expansion causée par les changements de température [18].



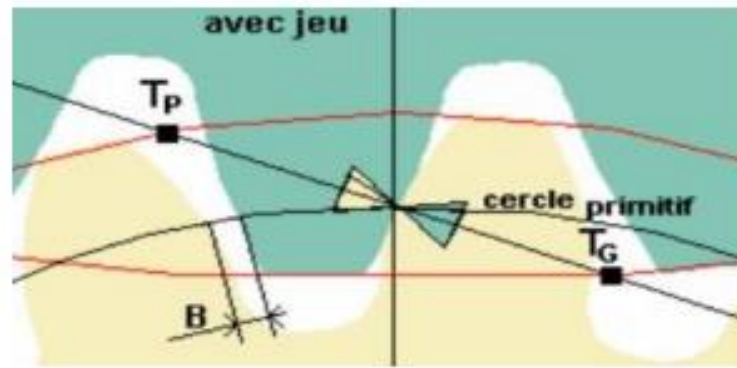


Figure 1.10. Fonctionnement avec jeu.

## 6. La lubrification des engrenages

La lubrification permet de réduire les frictions entre deux surfaces en mouvement en plaçant une couche liquide ou solide entre elles. Ce procédé permet d'optimiser les performances des mécanismes en diminuant les pertes d'énergie et de puissance, et en améliorant leurs conditions de fonctionnement. Cette méthode repose sur une discipline scientifique et technologique qui intègre les connaissances les plus récentes en mécanique des fluides, en mécanique des solides, en science des matériaux, en chimie et en physicochimie, et qui garantit la fiabilité croissante des mécanismes actuels [19]. Les caractéristiques de la lubrification sont :

- La réduction des pertes d'énergie mécanique pour abaisser le coefficient de frottement.
- La réduction de l'usure des organes ayant des surfaces frottantes.
- La protection des surfaces frottantes contre la corrosion.
- L'évacuation de la chaleur
- Augmente l'étanchéité dans certains mécanismes.
- D'évacuer les impuretés de fonctionnement.
- D'abaisser le niveau sonore.

## 7. Les techniques de lubrification

Il existe plusieurs techniques de lubrifications utilisées selon les conditions d'utilisation à savoir les charges, la vitesse et l'encombrement du système.

### 7.1 Lubrification par bain d'huile (Barbotage)

C'est la méthode de lubrification à l'huile la plus répandue pour des vitesses de rotation faible ou moyenne, mais elle nécessite une surveillance continue du niveau de l'huile.

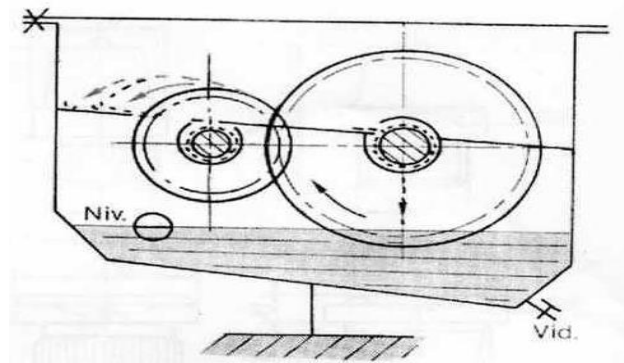


Figure 1.11. Lubrification par bain d'huile.

### 7.2. Lubrification par projection d'huile

Un disque ou un déflecteur monté à proximité de palier sur l'arbre et plongé dans l'huile projette de l'huile dans les paliers. Ce système est conseillé pour des vitesses de rotation relativement importantes.

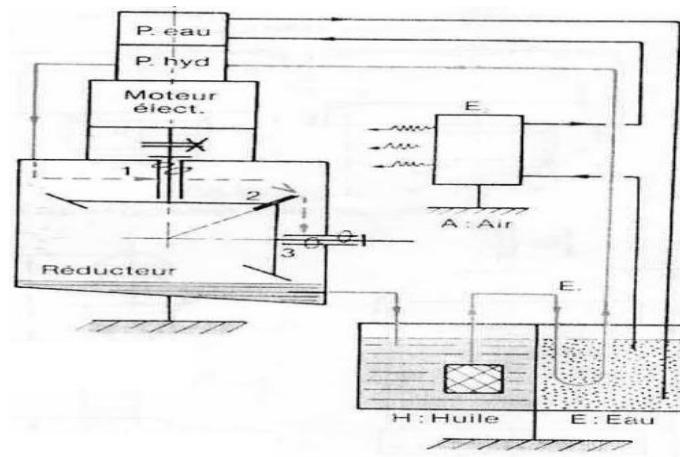


Figure 1.12. Lubrification par projection d'huile.

### 7.3. Lubrification goutte à goutte

Ce mode de lubrification convient aux charges légères à modérées et aux vitesses assez élevées. En partant d'un réservoir, l'huile est dirigée vers l'arbre en rotation, où elle est pulvérisée et s'infiltre dans le palier indiqué (2-3).

Il est également possible d'acheminer l'huile directement vers le roulement. La quantité d'huile requise dépend du type de roulement et de ses dimensions. En général, quelques gouttes par minute sont suffisantes pour garantir une lubrification adéquate.

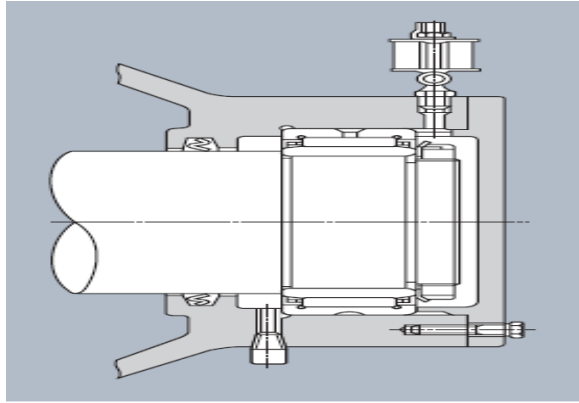


Figure 1.13. Lubrification goutte à goutte.

#### 7.4. Lubrification par circulation d'huile

Cette méthode permet d'assurer à la fois la lubrification et le refroidissement du roulement. Elle permet également le montage d'un filtre retenant les impuretés et éventuellement le montage d'un système de refroidissement de l'huile. Les trous d'évacuation doivent avoir une section suffisante pour éviter la stagnation de l'huile et être placés à l'opposé des orifices d'entrée d'huile. Figure 1.28.

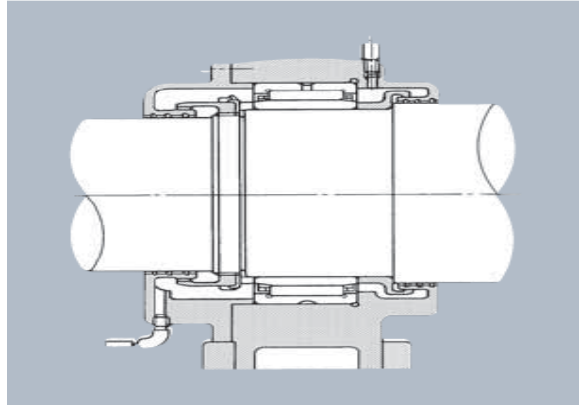


Figure 1.28. Lubrification par circulation d'huile

#### 7.5. Lubrification par graisseur

La méthode de lubrification par graisse est la plus simple à mettre en œuvre. Elle ne requiert que des systèmes d'étanchéité simples, ce qui en fait la méthode de lubrification la plus répandue. Il est essentiel de choisir une graisse optimale et de l'appliquer correctement dans le roulement. Il convient de s'assurer en permanence que la surface de guidage est entièrement graissée sur toute sa superficie, en particulier lorsque la cage est guidée par les bagues intérieure ou extérieure du roulement. De plus, il est recommandé d'utiliser des graisseurs, des répartiteurs de graisse, et autres dispositifs similaires pour faciliter le remplissage.

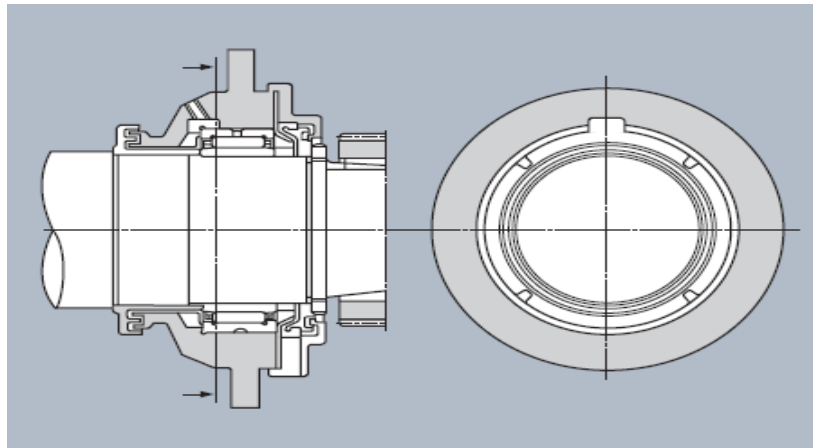


Figure 1.29. Exemple de palier avec graisseur et répartiteur de graisse.

## 8. Facteurs influençant le graissage

Un certain nombre de facteurs influe sur le graissage des engrenages qui sont [20] à savoir, les conditions de montage et de service (Les liaisons, la variation des efforts, le fini des dentures, et la précision de l'entraxe), les vitesses, les charges et les pressions de contact ainsi que la température de la dent.

### 8.1. Les vitesses

La figure 1.30 représente la différente situation cinématique de la position de la dent lors de l'engrenage.

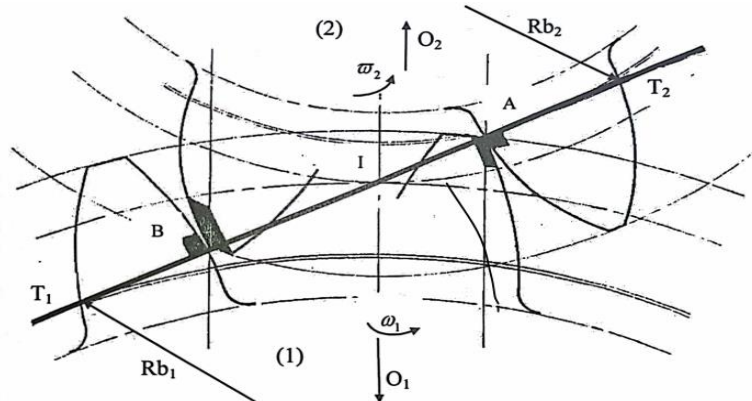


Figure 1.14. Situation d'engrènement.

#### 8.1.1. La vitesse de glissement

Dans les divers types d'engrenages, la vitesse de glissement reste perpendiculaire à la ligne d'action, comme illustré dans la figure 1.31. Cela entraîne une perturbation temporaire du film lubrifiant lorsque la vitesse de glissement s'annule, comme indiqué dans la figure 1.32. (Cas général) et la figure 1.33. (Cas des engrenages), ainsi que

lorsqu'elle change de direction. Les principes de l'hydrodynamique ne peuvent être entièrement appliqués, et la formation d'un coin d'huile entre les dents reste un problème.

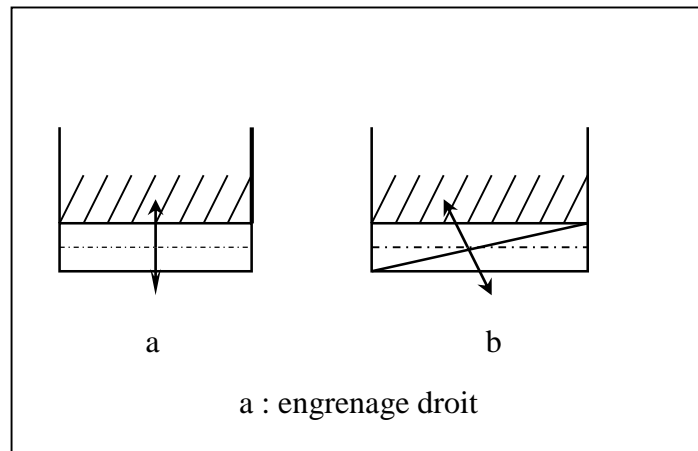


Figure 1.31. Direction de la vitesse de glissement.

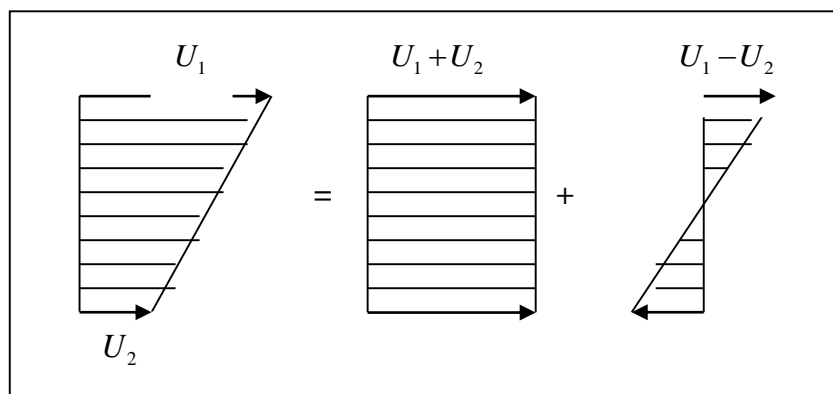


Figure 1.32. Diagramme des vitesses lors d'un contact.

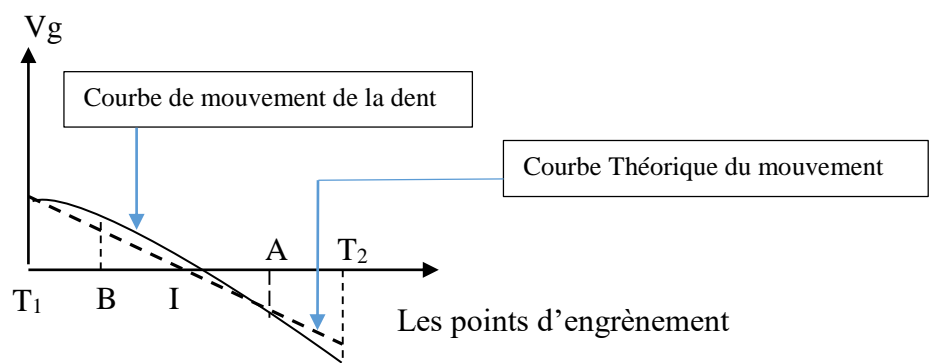


Figure 1.33. Variation de la vitesse de glissement lors de l'engrènement.

### 8.1.2. La vitesse de rotation

La vitesse de rotation joue un rôle important en raison de son effet centrifuge, qui permet d'éliminer l'huile des dentures, et affecte la sévérité des conditions de fonctionnement. Trois facteurs sont directement liés à la vitesse de rotation : la fréquence des variations de pression associées aux engrenages, la valeur de la vitesse de glissement et sa fréquence de variation.

## 8.2. La charge et la pression de contact

### 8.2.1. La charge

La force normale présente une magnitude et une direction constantes dans l'engrenage à profil de développante de cercle [21]. La répartition de cette force normale ( $W$ ) lors de l'engrènement est représentée dans la figure I.34

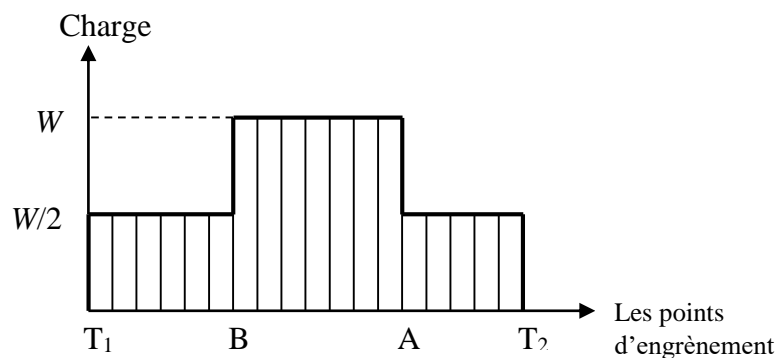


Figure 1.15. Répartition de la charge.

Sur cette figure 1.34. [22] on a le pas de la base est représenté par  $T_2B=T_1A$ . Un couple transmet seul l'effort entre les points  $A$  et  $B$ , par contre entre les segments  $T_2A$  et  $T_1B$ , deux couples se partagent la charge. Cette théorie selon Henriot [22] est émise en faisant abstraction des erreurs de dentures et des flexions des dents.

### 8.2.2. La pression

La pression de contact (de l'ordre de  $1800$  à  $10^4$   $\text{kg/cm}^2$ ) [21] entre deux dents en prises crée une aire de longueur finie due aux déformations élastiques et varie en fonction de la vitesse de glissement. Le diagramme de la figure I-35 montre des variations brusques aux points  $B$  et  $A$ , les conditions les plus difficiles de graissage étant rencontrées au début de

l'engrènement (au point A et de parcours  $T_2 A$ ), ce qui caractérise la difficulté du problème de graissage

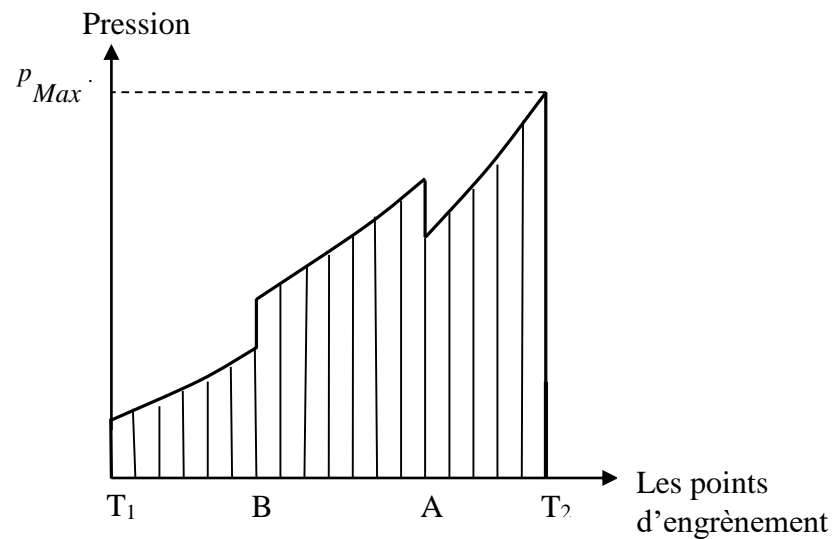


Figure 1.16. Variation de la pression en fonction De la vitesse de glissement.

## 9. Possibilités de graissage

Une synthèse des observations effectuées par différents auteurs sur l'épaisseur du film tel que G. Henriot et R. Lefèvre [22, 19] montrent :

- L'influence défavorable du glissement : l'épaisseur maximale du film se situe au point de glissement nul. Henriot l'explique par l'augmentation de la température du film, ce qui entraîne une diminution de la viscosité de l'huile.
- L'influence favorable de la viscosité : le phénomène de piézo viscosité favorise la formation du film lubrifiant.
- L'influence de la charge : elle tend à rendre le film lubrifiant insensible, à vitesse constante, et accentue les variations d'épaisseur lorsque la viscosité diminue.
- L'influence favorable de la vitesse : l'épaisseur du film varie dans le même sens que le rayon de courbure des dentures, la vitesse et la viscosité.

- L'épaisseur du film est d'autant plus réduite que la charge est élevée.

## **10. Conclusion**

La lubrification est un élément crucial dans l'industrie moderne. Avec les nombreux facteurs influençant le processus de graissage et la diversité des lubrifiants disponibles, le choix du bon lubrifiant et la détermination de la fréquence d'application sont des décisions de grande importance. En effet, ces décisions sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement des engrenages et, par extension, de l'ensemble du mécanisme et du processus industriel.

En conclusion, ce chapitre a établi les bases nécessaires pour comprendre les engrenages, leurs diverses applications et les principes fondamentaux qui les régissent. Que cette introduction serve de point de départ pour une compréhension plus approfondie des mécanismes qui font tourner le monde qui nous entoure.



## Chapitre 2

### Analyse et extraction des données numériques

#### 1. Introduction

Après avoir exploré le fonctionnement des engrenages et leur lubrification, nous abordons l'analyse et l'extraction des données numériques, essentielles pour la maintenance prédictive. Ce chapitre introduit les méthodes de collecte, traitement et analyse des données, ainsi que les outils logiciels et algorithmes utilisés. Des exemples concrets illustreront l'application de ces techniques pour optimiser les systèmes mécaniques.

#### 2. Méthode grapho analytique

En général la recherche d'une fonction expérimentale représentant, l'expérience et les conditions limites étudié repose sur une analyse et le traitement grapho-analytique des résultats d'essais. Celle-ci repose sur une méthode dite de la fonction empirique qui s'écrit sous la forme de l'équation

$$y = a \cdot x^b \quad (2.1)$$

Qui décrit avec une justesse suffisante les relations mises en évidence lors d'une étude expérimentale. Elle permet de traiter simplement les résultats obtenus lors des essais. En coordonnées logarithmiques, la courbe représentative est une droite et s'écrit :

$$\text{Log } y = \log b + b \cdot \log x \quad (2.2)$$

L'obtention d'une relation concrète mène à retrouver les valeurs numériques du coefficient (a) et de l'exposant (b). Pour cela, on exécute une série d'essais où on ne fait varier que la variable (x), les autres paramètres étant constants[23].

Le traitement peut être réalisé par deux procédés :

- Grapho-analytique ;
- Analytique.

Dans le premier cas, il faut tracer les fonctions  $y = F(x)$  en coordonnées logarithmiques comme indiqué par la figure 2.1.

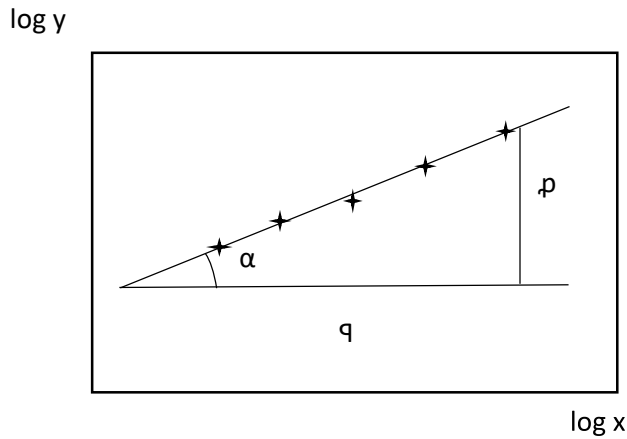


Figure 2.1. représentation d'une fonction empirique

Le procédé demande une observation rigoureuse des échelles. L'échelle entre  $x$  et  $y$  est exprimée par la relation (2.2)

$$E_y = E \cdot 10^k \quad (2.3)$$

Où,  $k$  est un nombre entier quelconque, positif, négative. Autrement dit, le facteur d'échelle sur l'abscisse et sur l'ordonnée doit être le même. On trace la droite reliant les points extrêmes avec le moins de déviation possible entre eux et cette droite. La tangente de l'angle  $\alpha$  (figure.2.1) est l'exposant recherché :

$$b = \frac{p}{q} \quad (2.4)$$

Pratiquement, on trace un triangle rectangle, et en mesurant à l'aide d'une règle les deux côtés, on trouve leur rapport. Le coefficient ( $a$ ) est déterminé par l'équation :

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^n \log y_i}{n} - b \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \log x_i}{n} \quad (2.5)$$

Où  $n$  est le nombre d'essais.

Pour trois variables, la fonction type s'écrit

$$Y = a \cdot x^{b1} \cdot z^{b2} \cdot w^{b3} \quad (2.6)$$

La procédure de la détermination des différents paramètres consiste, à préparer autant de série d'essais qu'il y a d'inconnues dans la relation (2.5). Pour chaque série, on fait varier un seul paramètre, les autres étant constants. Puis, pour chaque série, on détermine l'exposant, et à l'aide de l'équation (2.4), on détermine la valeur du coefficient (a). Donc dans le cas de trois variables x, z, w on obtiendra :

$$\begin{aligned}
 y &= a_1 \cdot x \\
 y &= a_2 \cdot z \\
 y &= a_3 \cdot w ;
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Le coefficient (a) pour l'équation générale est calculé selon les résultats des trois séries d'essais :

$$a_I = \frac{a_1}{z_c^{b_2} \cdot w_c^{b_3}} ; a_{II} = \frac{a_2}{x_c^{b_1} \cdot w_c^{b_3}} ; a_{III} = \frac{a_3}{z_c^{b_1} \cdot z_c^{b_2}}
 \tag{2.8}$$

Où x, z, w, sont les valeurs des variables correspondant aux séries d'essais ou elles étaient constantes.

Les valeurs  $a_I$ ,  $a_{II}$ ,  $a_{III}$ , peuvent être différentes à cause des erreurs mises lors des essais, c'est pourquoi, à partir de ces valeurs, on calcule la moyenne (a) qui s'écrit :

$$a = \frac{a_I + a_{II} + a_{III}}{3}
 \tag{2.9}$$

### 3. Méthodes numériques

#### 3.1. Les modèles numériques Lagrangiens

Les modèles numériques lagrangiens sont des outils de modélisation qui suivent le mouvement des particules individuelles pour simuler les phénomènes dynamiques dans divers domaines scientifiques et d'ingénierie [24].

##### 3.1.1. Comment appliquer cette méthode

L'application de la méthode lagrangienne implique plusieurs étapes, qui peuvent varier en fonction du domaine d'application spécifique. Cependant, voici une procédure générale pour appliquer la méthode lagrangienne :

- **Définition du système et des particules** : Identifiez le système que vous souhaitez modéliser et déterminez les particules ou les entités que vous souhaitez suivre dans ce système. Cela peut être des particules de fluide, des polluants, des particules solides, des microorganismes, etc.
- **Formulation des équations de mouvement** : Déterminez les équations de mouvement qui régissent le comportement des particules dans votre système. Ces équations dépendent du type de particules et des forces qui agissent sur elles, telles que la gravité, la friction, la turbulence, etc[25].
- **Intégration numérique des équations** : Utilisez des techniques numériques telles que les méthodes d'intégration numérique (comme la méthode d'Euler ou la méthode de Runge-Kutta) pour résoudre les équations de mouvement et déterminer la trajectoire des particules dans le temps.
- **Conditions aux limites** : Assurez-vous de prendre en compte les conditions aux limites du système, telles que les parois solides, les conditions initiales et les conditions aux limites périodiques.[24]
- **Interaction entre les particules et le milieu environnant** : Si nécessaire, prenez en compte l'interaction entre les particules et le milieu environnant. Par exemple, dans le cas de particules de fluide, cela peut inclure des phénomènes tels que la diffusion, la convection, la turbulence, etc.
- **Analyse des résultats** : Une fois que vous avez simulé le mouvement des particules dans votre système, analysez les résultats pour obtenir des informations sur le comportement global du système, telles que la dispersion des particules, les trajectoires de fluide, les concentrations de polluants, etc.
- **Validation et ajustement du modèle** : Comparez les résultats de votre modèle avec des données expérimentales ou des simulations d'autres modèles pour valider et éventuellement ajuster votre modèle afin qu'il reflète de manière précise le comportement du système réel. [26].

### 3.1.2. Les domaines d'application des modèles Lagrangiens

Les modèles lagrangiens sont utilisés dans une variété de domaines scientifiques et techniques où il est important de suivre le mouvement de particules individuelles ou d'entités discrètes dans un système dynamique. Voici quelques domaines d'application des modèles lagrangiens :

- **Météorologie et climatologie** : Les modèles lagrangiens sont utilisés pour étudier la dispersion des polluants atmosphériques, le transport de poussières, la formation des nuages et les trajectoires des particules dans l'atmosphère.
- **Océanographie** : Ils sont utilisés pour modéliser la circulation océanique, le transport de polluants et de nutriments, la dispersion des déchets plastiques en mer, ainsi que les mouvements des espèces marines telles que le plancton.
- **Hydrologie** : Les modèles lagrangiens sont utilisés pour étudier le transport des sédiments, la dispersion des contaminants dans les cours d'eau et les nappes phréatiques, ainsi que la dynamique des rivières et des fleuves.
- **Ingénierie environnementale** : Ils sont utilisés pour évaluer l'impact environnemental des installations industrielles, des déversements de produits chimiques et des accidents industriels, ainsi que pour concevoir des systèmes de gestion des déchets et de dépollution.
- **Biologie marine et écologie** : Les modèles lagrangiens sont utilisés pour étudier les déplacements des organismes marins, tels que les larves de poissons et les planctons, ainsi que les flux d'énergie et de matière dans les écosystèmes marins.
- **Aéronautique et astronautique** : Ils sont utilisés pour étudier la dispersion des panaches de fumée autour des aéroports et des installations industrielles, ainsi que pour simuler le mouvement des débris spatiaux et des micrométéorites dans l'espace.
- **Géophysique** : Ils sont utilisés pour étudier la dynamique des glaciers, la dispersion des cendres volcaniques, les mouvements tectoniques et la propagation des ondes sismiques dans la croûte terrestre.

### 3.2. Modèles numériques Eulériens

La méthode eulérienne est une approche de modélisation qui divise l'espace en une grille fixe et résout les équations de conservation des quantités physiques (comme la masse, la quantité de mouvement, l'énergie) sur cette grille. Plutôt que de suivre le mouvement de particules individuelles, elle décrit l'évolution des variables physiques dans des points fixes de l'espace au fil du temps. Cette méthode est largement utilisée dans divers domaines scientifiques et techniques, notamment en météorologie, en dynamique des fluides, en géophysique et dans les études environnementales[27].

### 3.2.1. Comment appliquer cette méthode

Les modèles numériques eulériens sont une classe de modèles utilisés en sciences et en ingénierie pour simuler le comportement de systèmes dynamiques. Contrairement aux modèles lagrangiens qui suivent le mouvement de particules individuelles, les modèles eulériens se concentrent sur la description de la variation des variables physiques dans des points fixes de l'espace au fil du temps. Les clés des modèles numériques eulériens sont :

- **Grilles fixes dans l'espace** : Dans les modèles eulériens, l'espace est divisé en une grille fixe de cellules ou d'éléments. Les variables physiques telles que la vitesse, la pression, la température, etc., sont définies sur ces cellules ou éléments.
- **Équations de conservation** : Les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, etc., sont résolues sur cette grille eulérienne pour prédire l'évolution des variables physiques dans le temps.
- **Interpolation et discrétisation** : Les valeurs des variables physiques entre les nœuds de la grille sont calculées à l'aide de techniques d'interpolation et de discrétisation, telles que les méthodes des différences finies, des éléments finis ou des volumes finis.
- **Advection et diffusion** : Les modèles eulériens prennent en compte l'advection (transport par l'écoulement) et la diffusion (dispersion due à des gradients de concentration) des variables physiques à travers la grille fixe.
- **Applications diverses** : Les modèles eulériens sont largement utilisés dans de nombreux domaines, y compris la météorologie pour la modélisation des phénomènes atmosphériques, l'ingénierie pour la simulation des écoulements fluides et des transferts de chaleur, la géophysique pour l'étude des mouvements tectoniques, etc[28].

### 3.3. Comparaison entre les deux méthodes

Les méthodes eulérienne et lagrangienne offrent deux approches distinctes pour modéliser les systèmes dynamiques. La méthode eulérienne repose sur une grille fixe dans l'espace où les variables physiques sont définies, décrivant ainsi l'évolution des grandeurs physiques dans des points fixes au fil du temps. En revanche, la méthode lagrangienne suit le mouvement de particules individuelles à travers le domaine, permettant ainsi une représentation précise des trajectoires des particules et des phénomènes dynamiques tels que la dispersion de polluants ou le transport de

sédiments. Alors que la méthode eulérienne peut être moins complexe et plus adaptée aux écoulements réguliers, la méthode lagrangienne est mieux adaptée pour modéliser les écoulements turbulents et les phénomènes où la trajectoire des particules est cruciale. Chacune de ces méthodes présente ses propres avantages et limitations en fonction des caractéristiques spécifiques du système à modéliser.

### 3.4. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis, un outil de calcul numérique né principalement de l'ingénierie plutôt que des mathématiques, possède une nature plus concrète que théorique. À l'origine utilisée pour l'analyse des contraintes, elle s'est progressivement étendue à d'autres domaines impliquant des milieux continus.

Dans chacune de ses applications, cette méthode s'attache à estimer des grandeurs de champ, comme indiqué par le tableau 2.1.

Application	Quantité de champ
Analyse des contraintes	Champ des contraintes ou champ des déplacements
Analyse thermique	Champ de température ou flux de chaleur
Écoulement des fluides	Fonction de courant ou fonction du potentiel de vitesse

Tableau 2.1. Applications de la MEF

La méthode des éléments finis (abrégée MEF) représente une modalité d'obtenir une solution numérique correspondant à un problème spécifique. Cette méthode n'offre pas une formule pour une certaine solution et ne peut pas résoudre une classe de problèmes. La MEF est une méthode approximative à moins qu'un certain problème pourrait être extrêmement simple conduisant ainsi à une formule exacte toujours valable[29].

#### 3.4.1. Nœuds et éléments

La Méthode des Éléments Finis (MEF) est comme si vous preniez une structure complexe et la cassiez en morceaux plus petits, un peu comme des pièces de puzzle. Ensuite, vous reliez ces morceaux ensemble en utilisant des points spéciaux, appelés "nœuds" Figure.2.2 un peu comme des punaises ou de la colle. Ces nœuds sont essentiels car ils maintiennent tous les morceaux ensemble pour former une structure unifiée et complète[30].

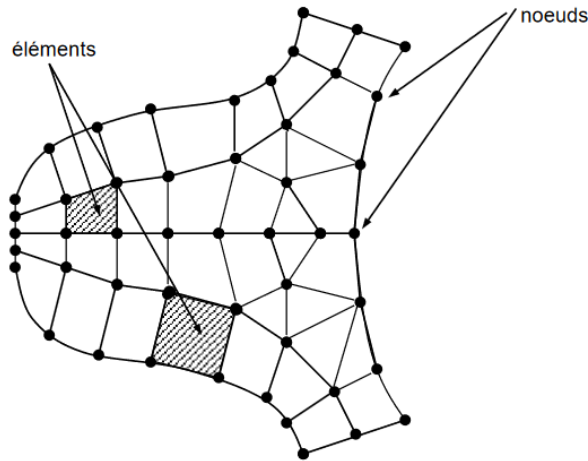
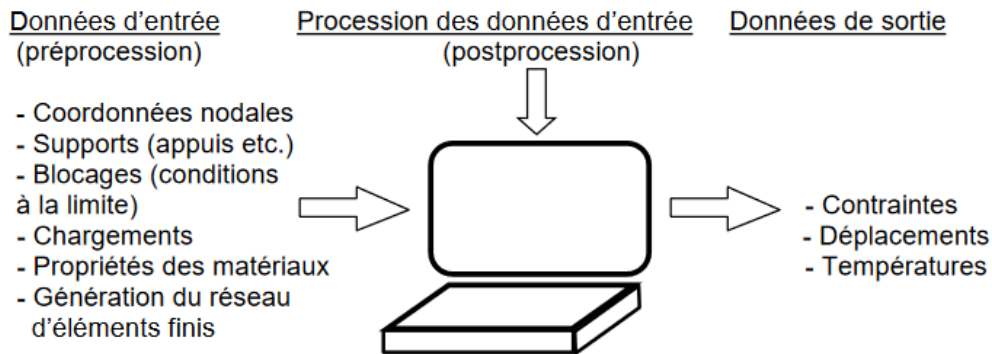


Figure 2.2. Discrétisation d'une structure en nœuds et éléments

### 3.4.2. Etapes d'analyse par la MEF



A présent il existe un grand nombre de logiciels pour l'analyse par la MEF : ANSYS, COSMOS-M, PATRAN, IDEAS [31], etc...

### 3.4.3. Choix des éléments finis

La Méthode des Éléments Finis repose sur un concept élémentaire : découper (discretiser) une forme complexe en de multiples petits domaines élémentaires de formes géométriques simples (appelés éléments finis) connectés via des points nommés nœuds. On analyse le comportement mécanique de chaque élément individuellement, puis on les assemble de manière à garantir



l'équilibre des forces et la cohérence des déplacements en chaque nœud. Elle utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation [32].

#### 3.4.4. Modélisation et discrétisation

Pour obtenir une simulation précise d'un problème, une analyse numérique requiert deux opérations fondamentales : la modélisation et la discrétisation. Ces étapes se déroulent en deux phases distinctes, comme illustré par la figure 2.3.

- **Modélisation** : Représente le passage de la réalité à un ensemble de modèles définis dans le cadre de la mécanique des milieux continus, définissant un "problème continu" insoluble.
- **Discrétisation** : Porte sur les deux aspects principaux du problème pratique, notamment :
  - La représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites.
  - Le Choix du maillage et des éléments finis.

La discrétisation, représente la transformation de toutes les théories de la mécanique des milieux continus en lois discrétisées, C'est pourquoi on dit généralement que les éléments finis sont une technique de résolution approchée des équations aux dérivées partielles [33].

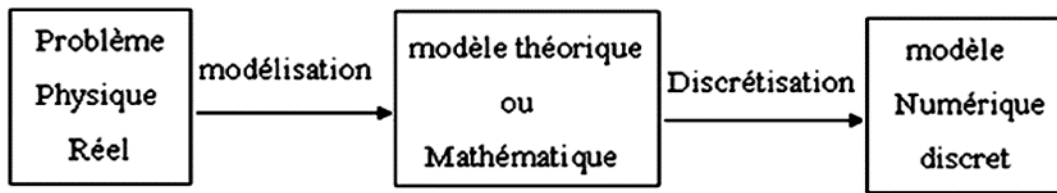


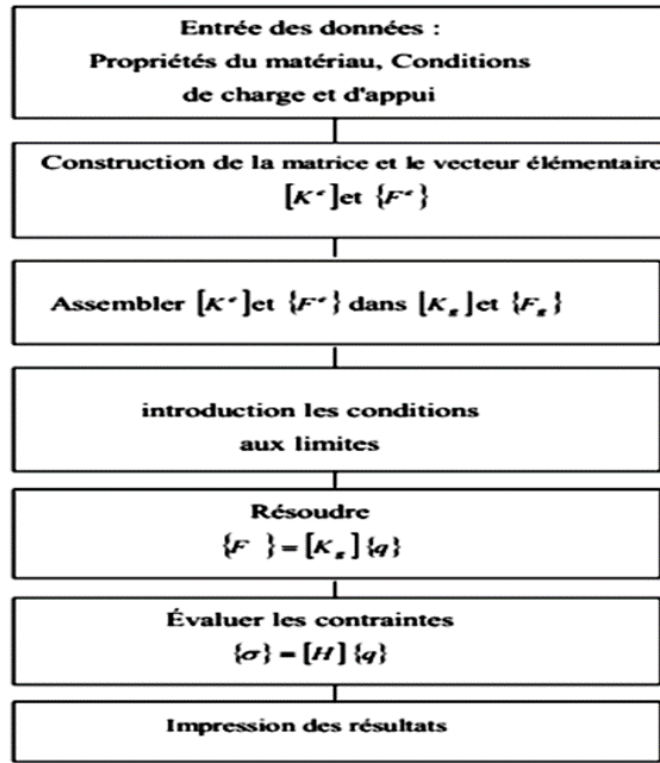
Figure 2.3. Organigramme de résolution

#### 3.4.5. Les différentes étapes de la méthode des éléments finis

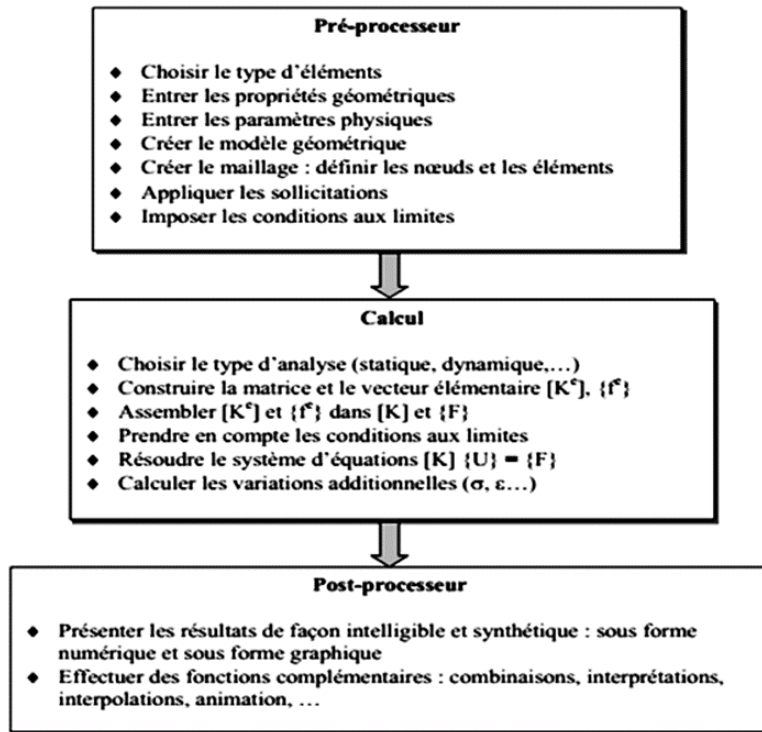
La méthode des éléments finis comprend sept étapes principales :

- Discrétisation du domaine en un maillage d'éléments finis.

- Interpolation en respectant les critères de convergence.
- Calcul des caractéristiques de chaque élément.
- Assemblage.
- Introduction des conditions aux limites essentielles et résolution ;
- Évaluation, dans chaque élément, des grandeurs utiles (contraintes, déplacements).
- Jugement de manière critique les résultats obtenus.



Organigramme 2.1. Etapes de la MEF [34]



Organigramme 2.2. Etapes de calcul de la MEF [35]

### 3.4.6. Le maillage

Le maillage est constitué d'un nuage des éléments qui sont liés entre eux par des nœuds. Il est caractérisé par sa taille  $h$  et le degré  $p$  d'interpolation. Une maille contient au minimum trois éléments. Le maillage détermine le modèle géométrique du produit, obtenu en réunissant les différents sous-domaines.

Il détermine aussi l'allure du champ de déplacement, et donc de déformation et de contrainte. Ainsi, il influe fortement sur la pertinence des résultats et doit être réalisé avec soin.

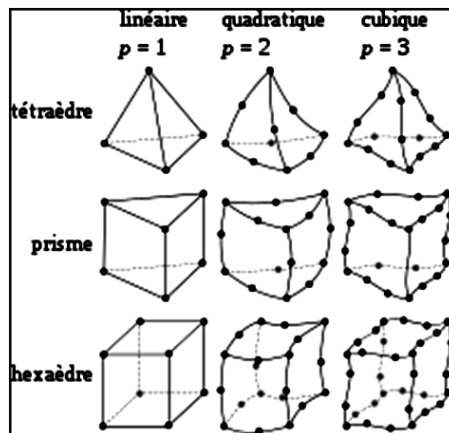


Figure 2.4. Les différents types de mailles en 3 dimensions

### 3.4.7. Les différents types des éléments finis

La MEF utilise plusieurs types d'éléments qui ont été développés au cours de temps. Ces éléments se distinguent en termes de forme géométrique (**Tableau 2.2**).

- Élément a une dimension : barres, poutres rectilignes ou courbes. (Lignes).
- Élément a deux dimensions : élasticité plane (déformation plane, contrainte plane, axisymétrie), ou encore des théories des poutres, plaques ou coques.
- Élément a trois dimensions : éléments de volume ou coques épaisses.





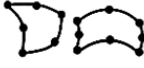







Eléments	linéaires	paraboliques (quadratiques)	Cubiques
unidimensionnels			
bidimensionnels			
tridimensionnels			
autres types	 Masse	Ressort 	Contact 

Tableau 2.2. Les types d'éléments finis [36]

### 3.4.8. Convergence des résultats par éléments finis

La convergence se réfère à la progression des résultats obtenus par la méthode des éléments finis vers les valeurs réelles à mesure que la représentation du problème par cette méthode s'améliore. Plusieurs éléments peuvent favoriser cette convergence, notamment :

- L'évolution du maillage ou plutôt la taille des éléments. C'est ce qu'on appelle la convergence  $h$ ,  $h$  est un scalaire qui représente la taille des éléments.
- Le degré  $p$  d'interpolation du polynôme caractéristique de l'élément appelé la convergence  $p$ . On dit d'un processus de raffinement de maillage qui conduit à des résultats plus exacts qu'il est  $h$  convergent et d'un processus d'augmentation du degré de l'interpolation qui produit le même effet qu'il est  $p$  convergent.

Si le code de calcul EF permet un enrichissement aisé du nombre de degrés de liberté il est dit adapté, et si cet enrichissement est automatique il est dit auto-adapté.

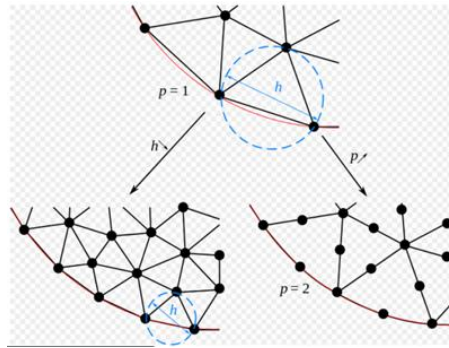


Figure 2.5. Types de maillage

### 3.4.9. Caractéristiques de la solution EF

Dans la résolution par éléments finis d'un problème d'élasticité, chaque élément différentiel du milieu continu est maintenu en équilibre, tandis que les conditions de compatibilité en termes de déformations et de contraintes sont respectées. Ci-dessous, nous présentons quelques définitions et concepts d'équilibre ainsi que de compatibilité au niveau des nœuds de la solution, ces notions sont cruciales pour appréhender la convergence des résultats de la méthode des éléments finis vers les valeurs réelles, garantissant ainsi une solution EF satisfaisante.

Dire qu'il y a une compatibilité nodale signifie que :

- Les déplacements aux nœuds communs à plusieurs éléments sont les mêmes.
- Il n'y a pas d'équilibre au passage de la frontière entre deux éléments.
- Il n'y a pas toujours et obligatoirement compatibilité au passage d'une frontière entre deux éléments. On peut utiliser des éléments incompatibles mais leur nombre ne peut pas devenir trop important.
- L'équilibre n'est pas vérifié en général dans un élément, par contre, la compatibilité l'est puisque les approximations sont polynomiales.

### 3.4.10. Les conditions de convergence

Si un maillage éléments finis est raffiné en utilisant toujours le même type d'éléments, il est possible de donner des conditions pour que la suite de solutions approchées ainsi créé converge vers la solution vraie. Si  $m$  représente l'ordre de dérivation dans les termes de l'énergie de déformation, la solution EF converge vers la solution vraie si :

- Dans l'élément, le champ approché contient un polynôme complet d'ordre  $m$ . Cela signifie que les éléments doivent pouvoir traduire un état de déplacements rigides ou un état de déformations constantes.

- Au passage des frontières inter-éléments, la continuité du champ doit être assurée jusqu'à l'ordre  $(m - 1)$ . La compatibilité inter-élément est donc nécessaire quand le maillage se raffine, au moins une compatibilité asymptotique.
- Supposons que les conditions aux limites d'un problème d'élasticité soient telles que les fonctions solutions et leurs dérivées soient constantes jusqu'à l'ordre  $m$ , alors quand le maillage est raffiné, chaque élément doit tendre vers une solution à valeurs constantes.

### 3.4.10.1. Le patch test

Initialement proposé par IRONS[37], il donne les conditions suffisantes de convergence de la solution EF. Il peut donner aussi des conditions nécessaires. C'est un test purement numérique dont la validation théorique a été apportée par STRANG.

### 3.4.10.2. Mise en œuvre

On considère un ensemble d'éléments, ensemble tel qu'il y ait au moins un point intérieur, donc qu'il y ait au moins une frontière inter-élément (figure 2.6.). Le chargement et les conditions aux limites sont tels que la solution théorique soit un état de déformations constantes.

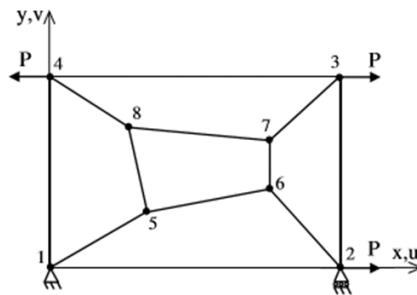


Figure 2.6. Exemple de test patch plan

## 5. La méthode du volume de fluide

La **méthode du volume de fluide** (en anglais *volume of fluid*, VOF) est une méthode utilisée en mécanique des fluides numérique pour le traitement des écoulements diphasiques. C'est l'une des méthodes standard dans ce domaine et elle est presque exclusivement utilisée avec la discrétisation en volumes finis. La méthode a été introduite en 1976 par William F. Noh et Paul Woodward [38]. La première publication dans un journal a été faite en 1981 par W. Hirt et B. D. Nichols [39].

- **Principe de la méthode**

On examine l'écoulement laminaire d'un milieu diphasique sans échanges entre phases. Le milieu est décrit par la fraction volumique  $C$  de l'une des phases. La valeur de  $C$  dans chaque cellule de calcul est une variable du problème qui est advectée avec la vitesse

## V

Le milieu multiphasique est traité comme un fluide unique dont les propriétés (masse volumique, viscosité) dans chaque cellule de calcul sont moyennées en fonction de  $C$

- la masse volumique par une expression évidente
- la viscosité dynamique par une expression *ad hoc*, ici une loi linéaire (sans justification physique, d'autres choix sont possibles)

Les équations de Navier-Stokes s'écrivent, en supposant un fluide incompressible

où  $\mathbf{F}$  est la force par unité de volume résultant des interactions entre phases :

Où  $\sigma$  est la tension superficielle et  $\mathbf{n}$  la normale à l'interface

Cette méthode permet de traiter le fractionnement du milieu et est conservative.

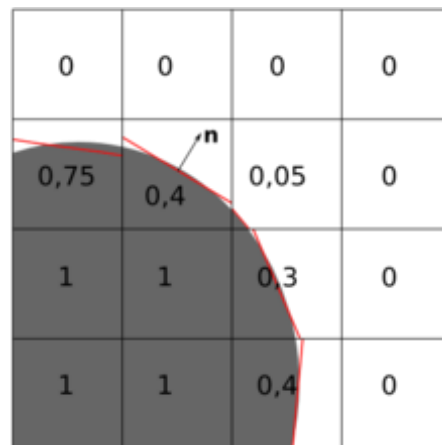


Figure 2.7. Représentation schématique de l'affectation des phases dans une grille cartésienne

- **Reconstruction géométrique**

La méthode VOF n'est pas une méthode de suivi d'interface, comme la méthode des surfaces de niveau (*Level set*) qui assure une description continue de l'interface au prix de la perte de conservativité [39,40].

Pour la reconstitution de l'interface la méthode VOF utilise :

- la méthode SLIC (*Simple line interface calculation*) où les interfaces sont alignées avec les mailles,
- la méthode PLIC (*Piecewise linear interface calculation*) basée sur la connaissance de la pente locale mais constituant une interface discontinue (voir figure ci-dessus).

Cette méthode est simple à implémenter et, comme on peut le voir sur la figure ci-contre, particulièrement bien adaptée aux milieux subissant une déformation importante et une fragmentation. Elle est disponible dans la plupart des codes industriels de mécanique des fluides numérique.

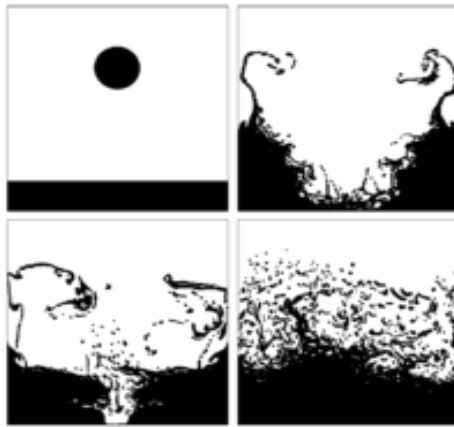


Figure 2.8. Chute d'une goutte à la surface d'un liquide.

## 6. Etapes d'analyse

Les différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF ou MVF est décrite par la figure ci-dessous.



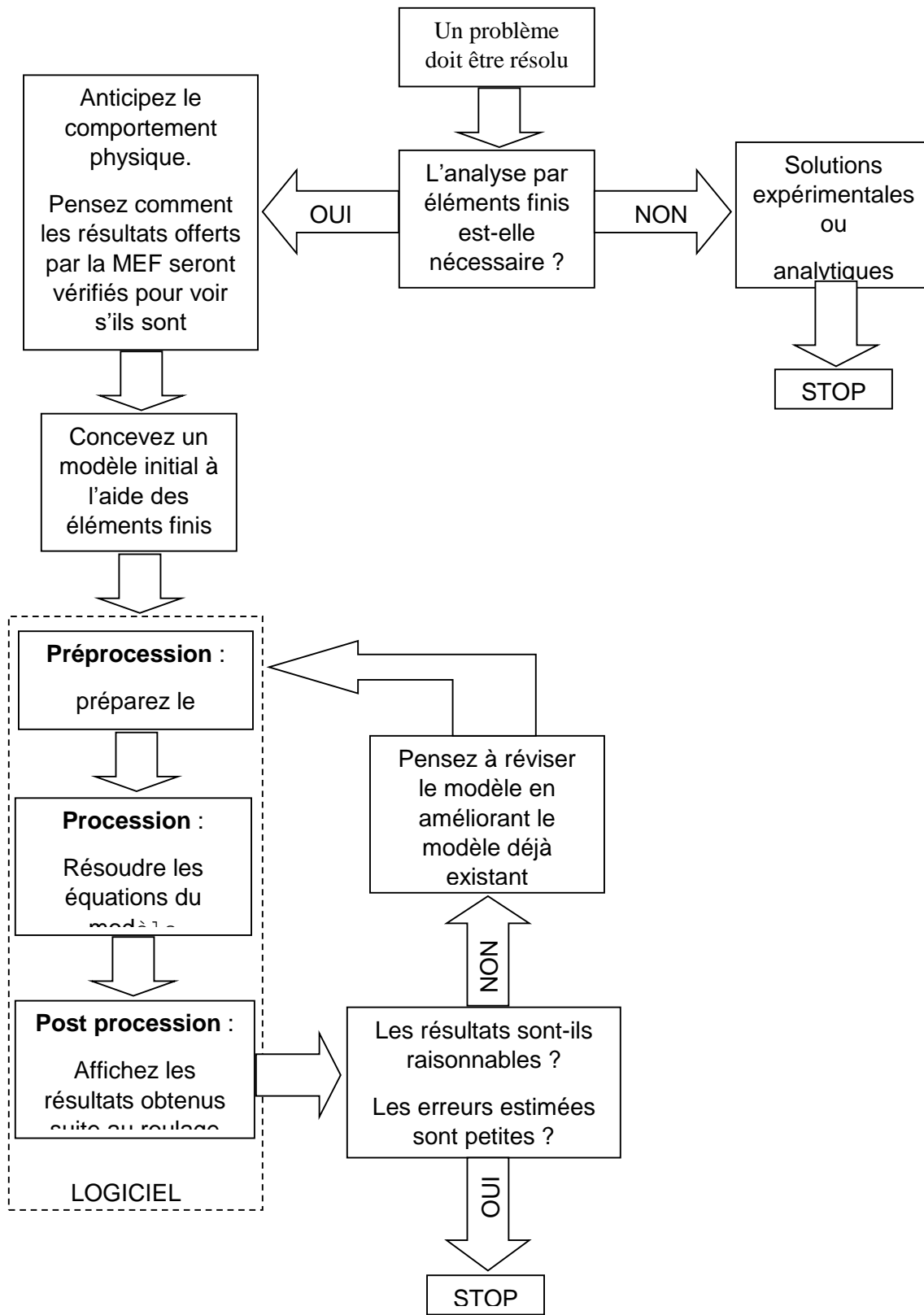


Figure 2.9. Principales étapes pour une analyse par la Méthode des Eléments Finis.

## **7. Discrétisation**

La Méthode des Eléments Finis a développé une série de types d'éléments finis qui, pour le début, peuvent être classifiés en :

- éléments finis unidimensionnels (généralement des barres) ;
- éléments finis bidimensionnels (plaques et mêmes volumes) ;
- éléments finis tridimensionnels (blocs massifs).

Les éléments finis sont générés par des points qui ne sont que des nœuds de la structure. Il existe des éléments ayant un degré supérieur à ceux cubiques (qui sont les plus performants) mais le plus couramment sont utilisés les éléments linéaires et paraboliques.

Certains éléments finis ont des nœuds intérieurs pour améliorer la précision, mais l'utilisateur ne travaille pas avec ces nœuds. Ils sont générés et ensuite condensés dans la phase de calcul des matrices de rigidité des éléments.

## **8. Conclusion**

Ce chapitre a décrit les méthodes d'analyse numérique et de simulation utilisées pour étudier la lubrification des engrenages, en particulier avec le logiciel ANSYS Fluent. Nous avons expliqué comment les simulations 3D permettent de visualiser la variation du volume de lubrifiant dans des conditions biphasées. Les étapes incluent l'importation de données CAO, la création de modèles d'éléments finis, et la visualisation des résultats. Cette approche aide à comprendre les interactions complexes des systèmes mécaniques en utilisant des simulations virtuelles, montrant l'utilité des techniques numériques pour optimiser les performances des engrenages.

## **Chapitre 3**

### **Traitement des résultats des simulations**

#### **1. Introduction**

Nous synthétisons dans ce chapitre les travaux, de la détermination des conditions limites de fonctionnement d'un couple d'engrenages selon des situations d'entrée et de sortie ainsi que de la variation du volume de fluide d'une lubrification par barbotage avec Ansys Fluent version 19R3. Ce dernier est un logiciel à usage général, utilisé pour simuler des interactions de toutes les disciplines de la physique [19], de la structure, de la vibration, de la dynamique des fluides, du transfert de chaleur et de l'électromagnétisme pour les ingénieurs.

Ainsi, ANSYS, permet de simuler des tests ou des conditions de travail, permet de tester en environnement virtuel avant de fabriquer des prototypes de produits. En outre, la détermination et l'amélioration des points faibles, la vie informatique et la prévision des problèmes probables sont possibles grâce à des simulations 3D en environnement virtuel. ANSYS peut importer des données CAO et permet également de construire une géométrie avec ses capacités de "pré-traitement". De même, dans le même préprocesseur, un modèle d'éléments finis (maillage) requis pour le calcul est généré. Après avoir défini les chargements et effectué les analyses, les résultats peuvent être visualisés sous forme numérique et graphique. Notre objectif dans l'utilisation de module de Fluent et de CFD Poste pour visualiser la variation du volume de fluide lubrifiant d'une enceinte occupé par un couple d'engrenage droit et lubrifié par un bain d'huile (Barbotage). Pour cette raison nous avons étudié six cas avec des variations des conditions d'entrée et la hauteur du lubrifiant. Cette lubrification se déroule en condition bi phasique de l'air et lubrifiant avec des caractéristiques prédéterminés.

#### **2. Caractéristiques de la géométrie simulé**

Dans ce contexte nous exécuter des simulations de lubrification d'un boîtier contient deux engrenages avec ces paramètres

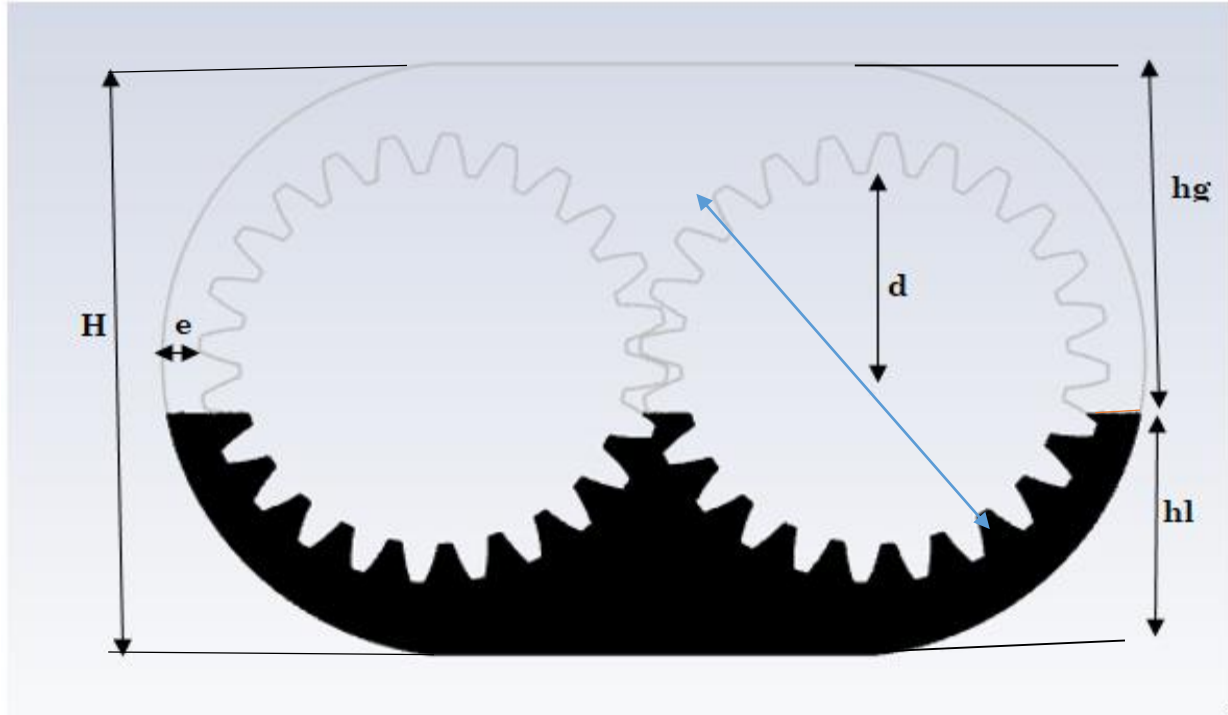


Figure 3.1. Les caractéristiques de la simulation

**Tableau 3.1.** Caractéristiques géométriques

Caractéristiques des engrenages				Différents Cas Simulés	
m (mm)	$Z_1=Z_2$	$\omega$ (rd/s)	h (mm)	e (mm)	$h_1$ (mm)
4	24	10	160	9.6	65
				9.6	95
				6.4	65
				6.4	95
				3.2	65
				3.2	95

**Tableau 3.2..** Caractéristique des fluides

Phases	Nom	Viscosité (Kg/m-s) ou Pa S	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )
Fluide Primaire	Air	$17.2 \cdot 10^{-6}$	1.225
Fluide Secondaire	Tassilia ep-90	0.324	0.96

### 3. Procédure de traitement des données avec CFD Post

-les étapes de traitement sont les suivantes :

- **Première étape :** Téléchargé la géométrie simulé avec un format du fichier cdat, selon le time step choisi, généralement ont choisi le dernier time step de la simulation ou nous avons le maximum d'information

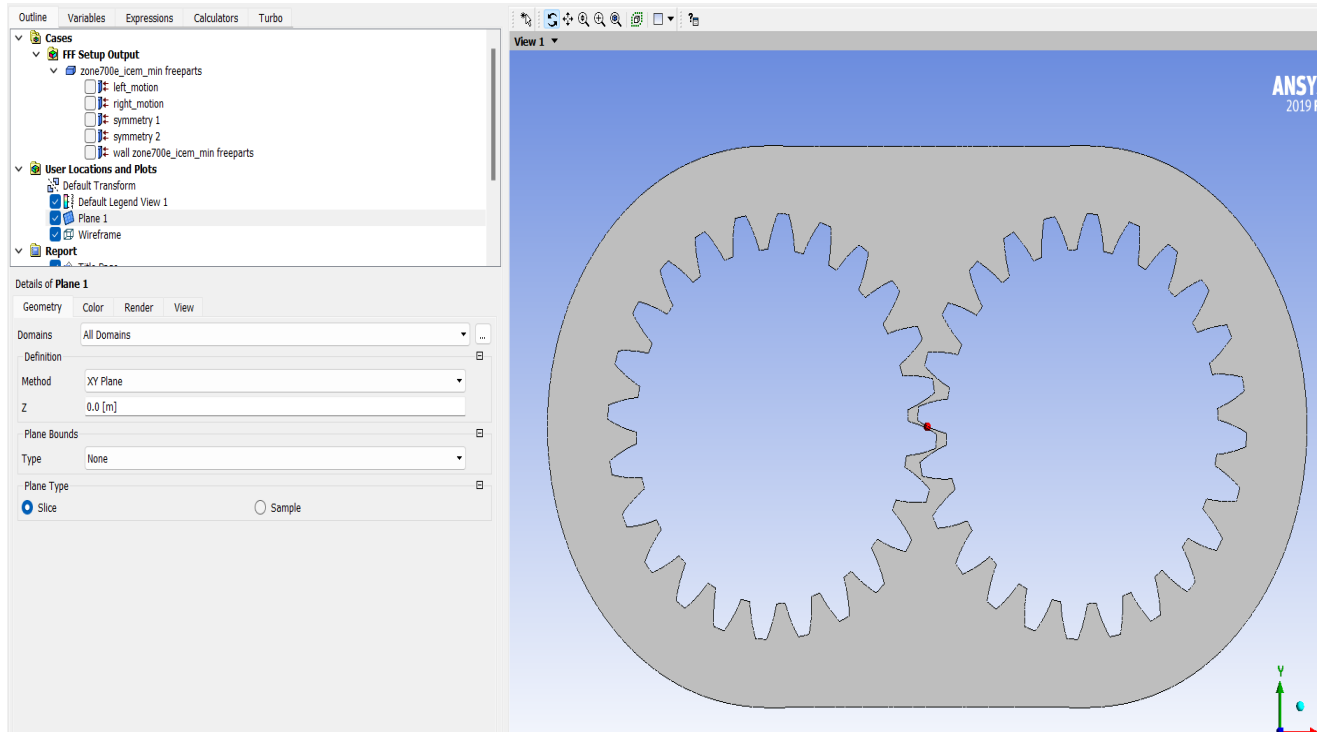


Figure 3.2. Géométrie téléchargée

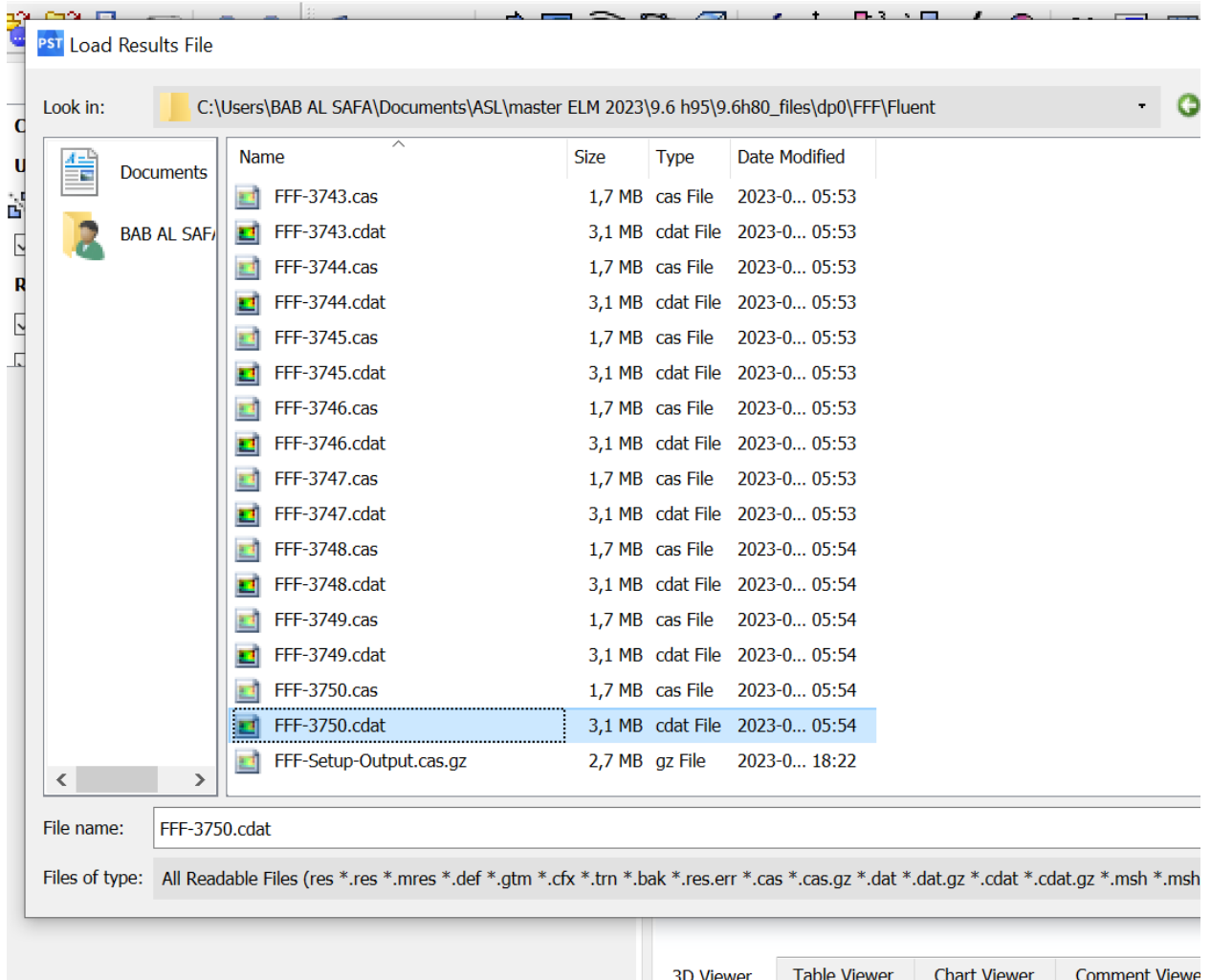


Figure 3.3. Choix du time step à étudié

➤ **Deuxième étape :** Création d'un plan pour voir les contours

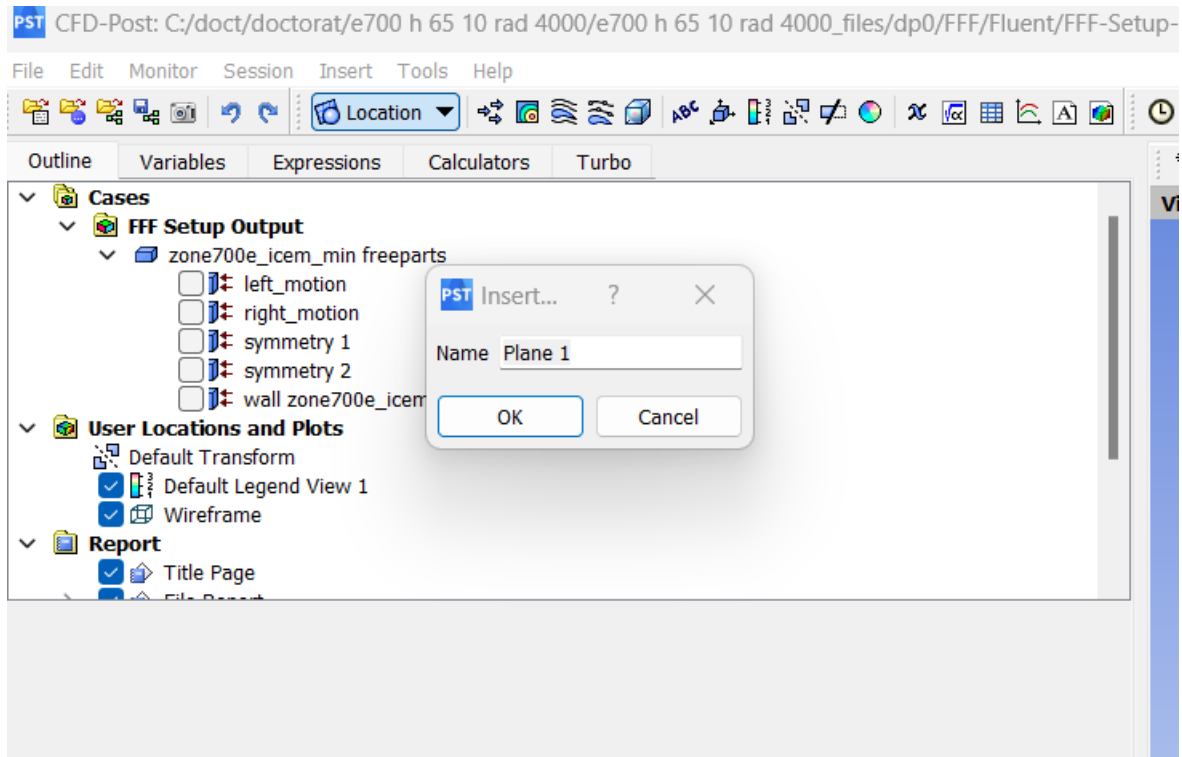


Figure 3.4. Création des plan

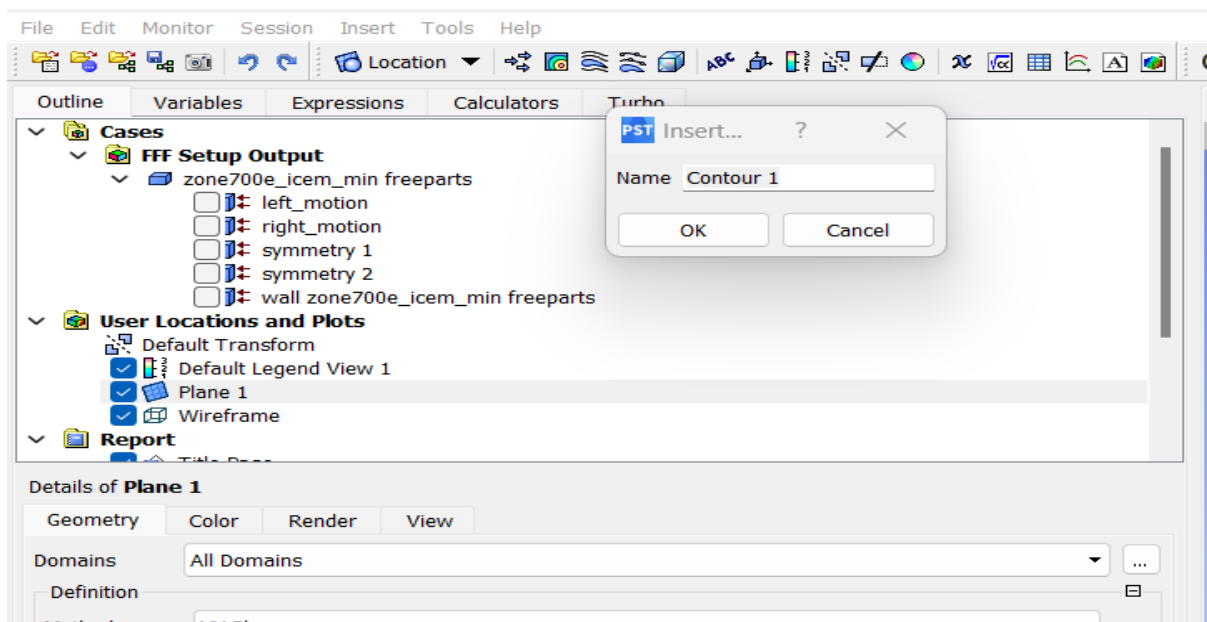


Figure 3.5. Choix du contour

- **Troisième étape** : création de ligne avec les coordonnées cartésiennes des points. Par la suite nous allons récupérer les charts des différentes lignes tracés

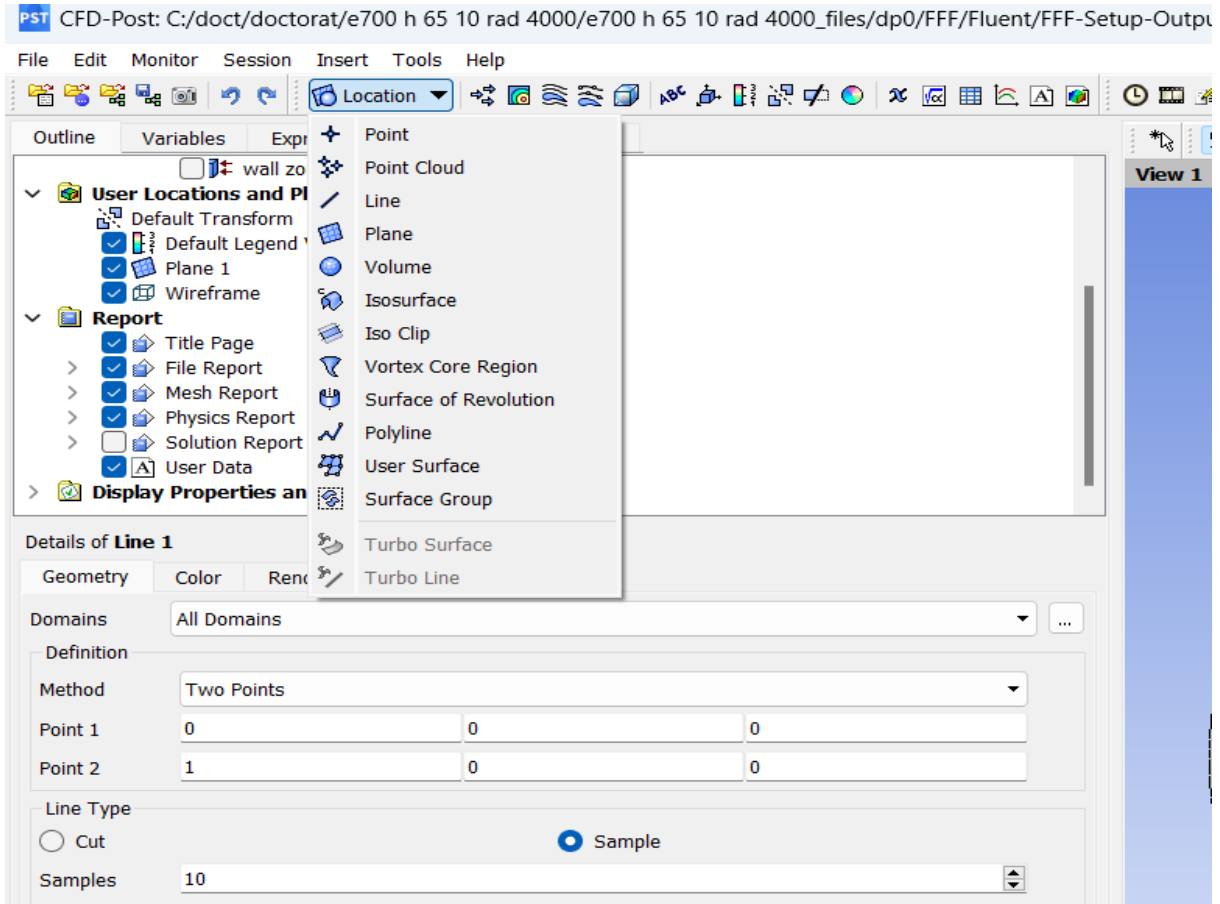


Figure 3.6. Création des lignes



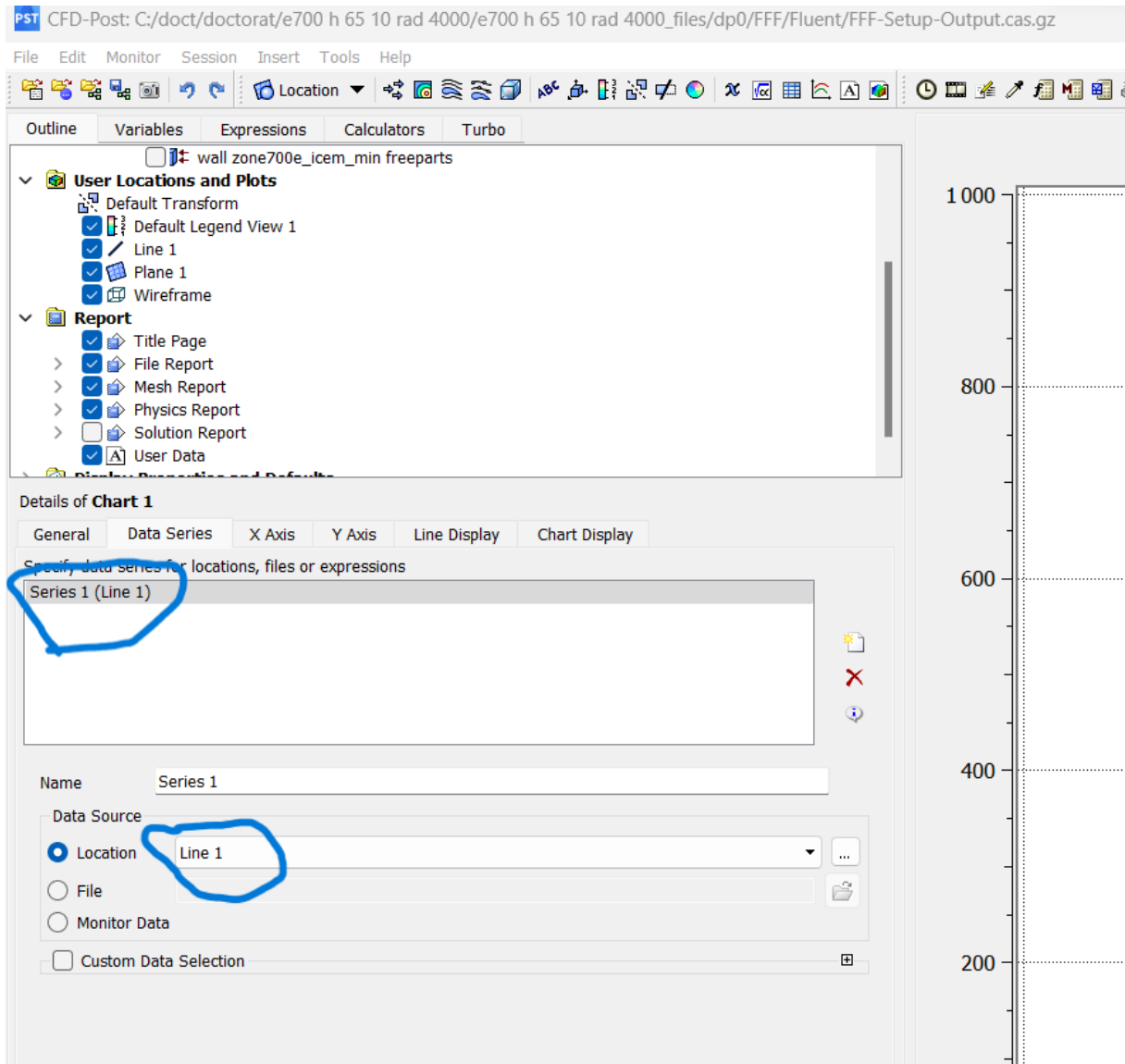


Figure 3.7. génération de la ligne

#### 4. Résultats

Les différents résultats des simulations de la répartition des fractions de volume de fluides ainsi que les traitement des données sont indiqués par les figures 7a à 12b.

- Cas pour  $e=9,6\text{mm}$  ,  $h=95\text{mm}$  avec 3750 itérations

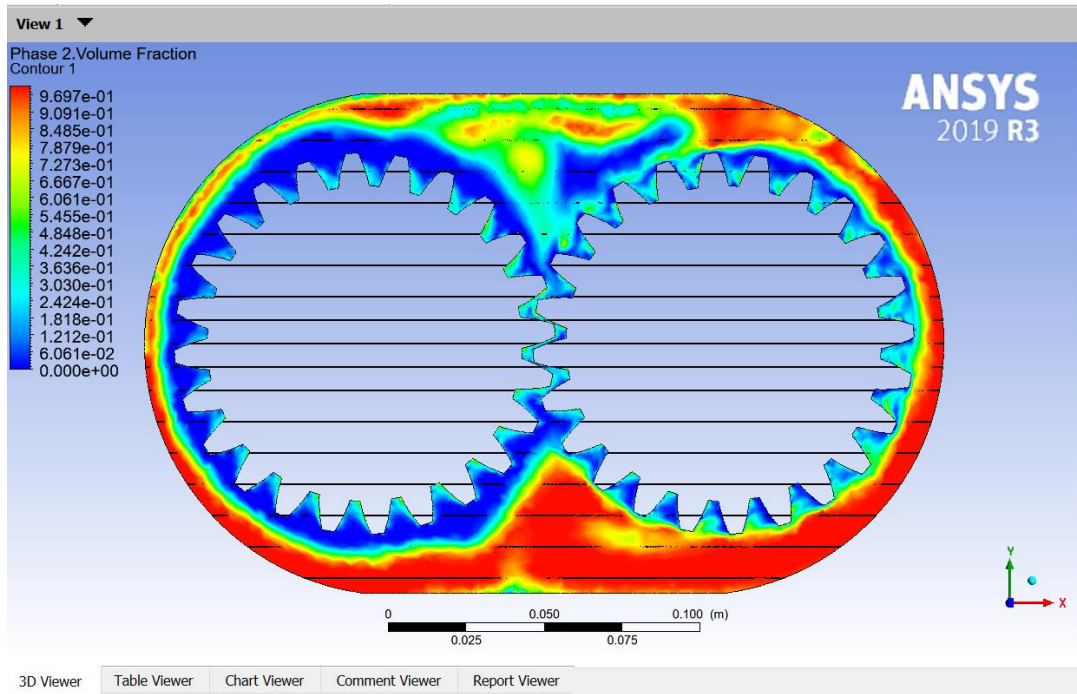


Figure 3.8 a. Résultats de la simulation

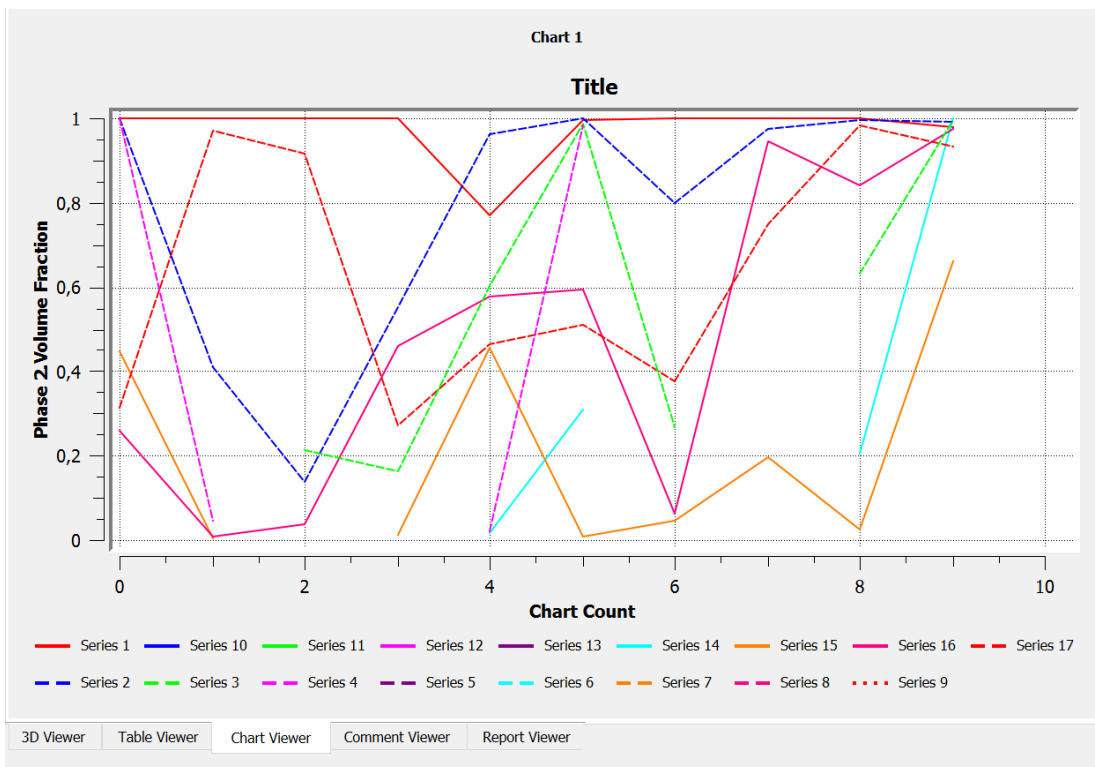


Figure 3.8b. Extraction des données

- Cas pour  $e=9,6\text{mm}$  ,  $h=65\text{mm}$  avec 3750 itérations

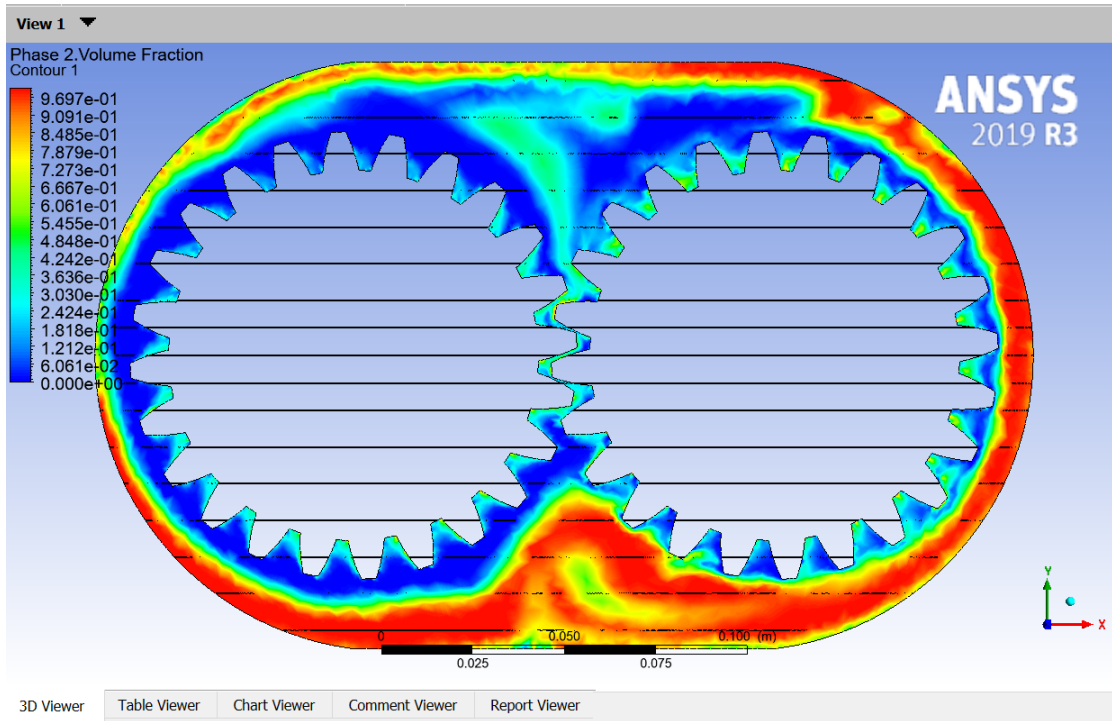


Figure 3.9a. Résultats de la simulation

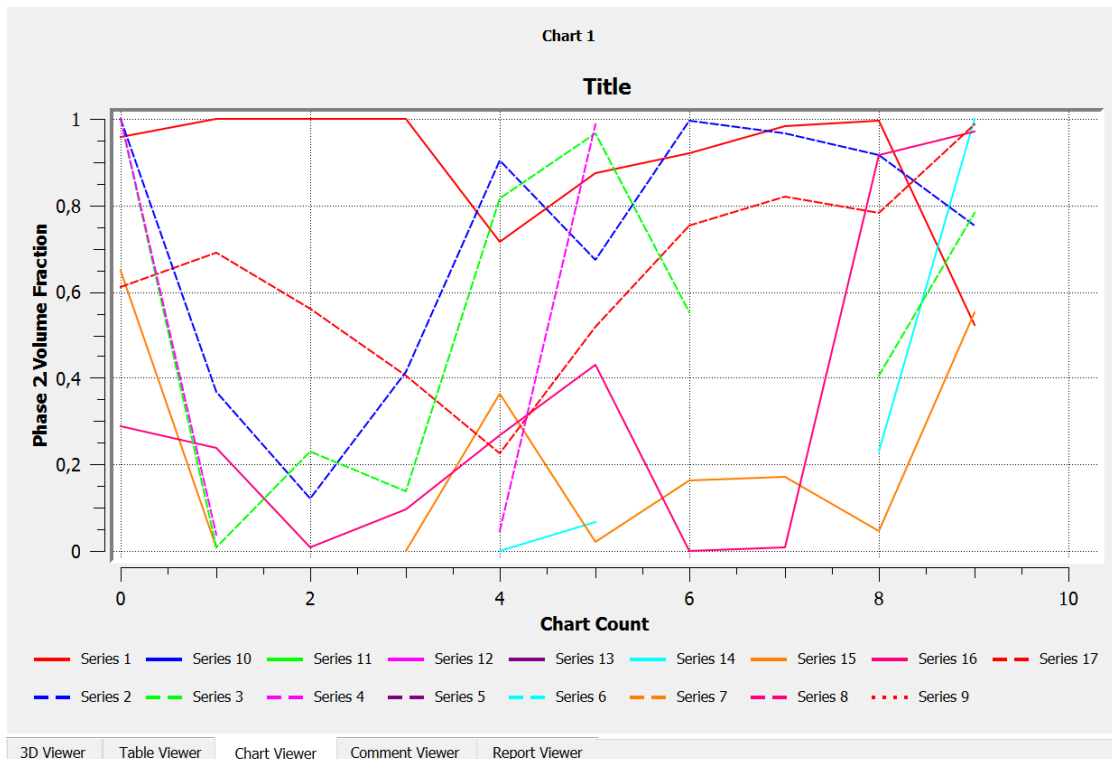


Figure3.9b. Extraction des données

- Cas pour  $e=6.4\text{mm}$  ,  $h=95\text{mm}$  avec 3750 itération )

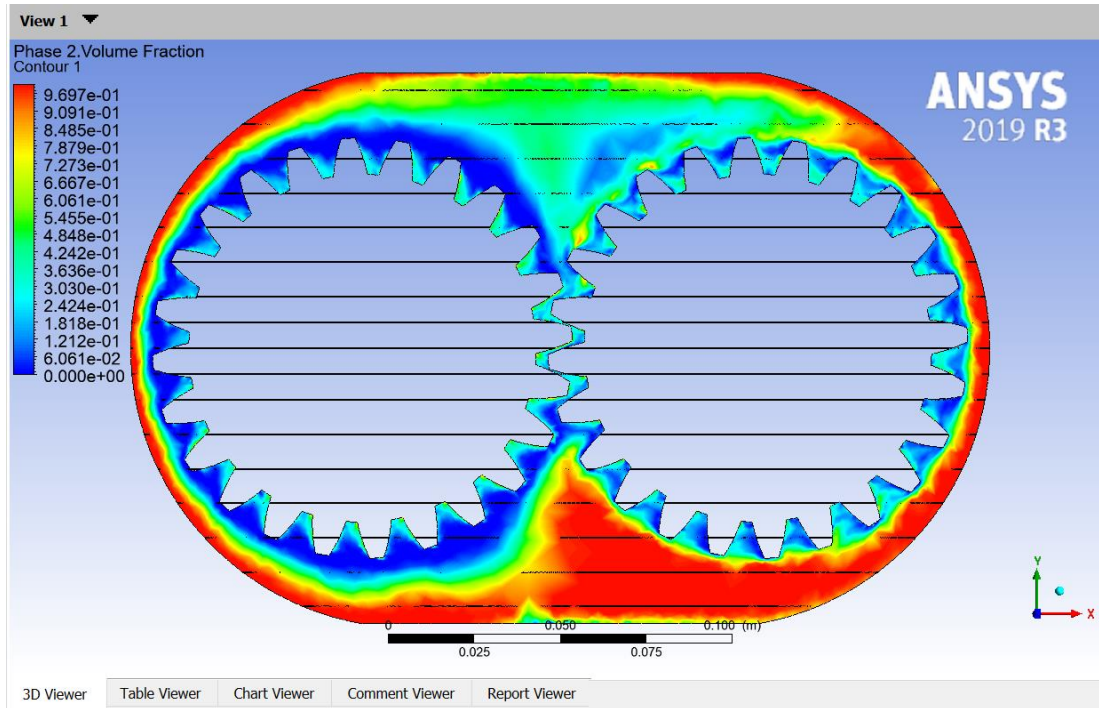


Figure 3.10a. Résultats de la simulation

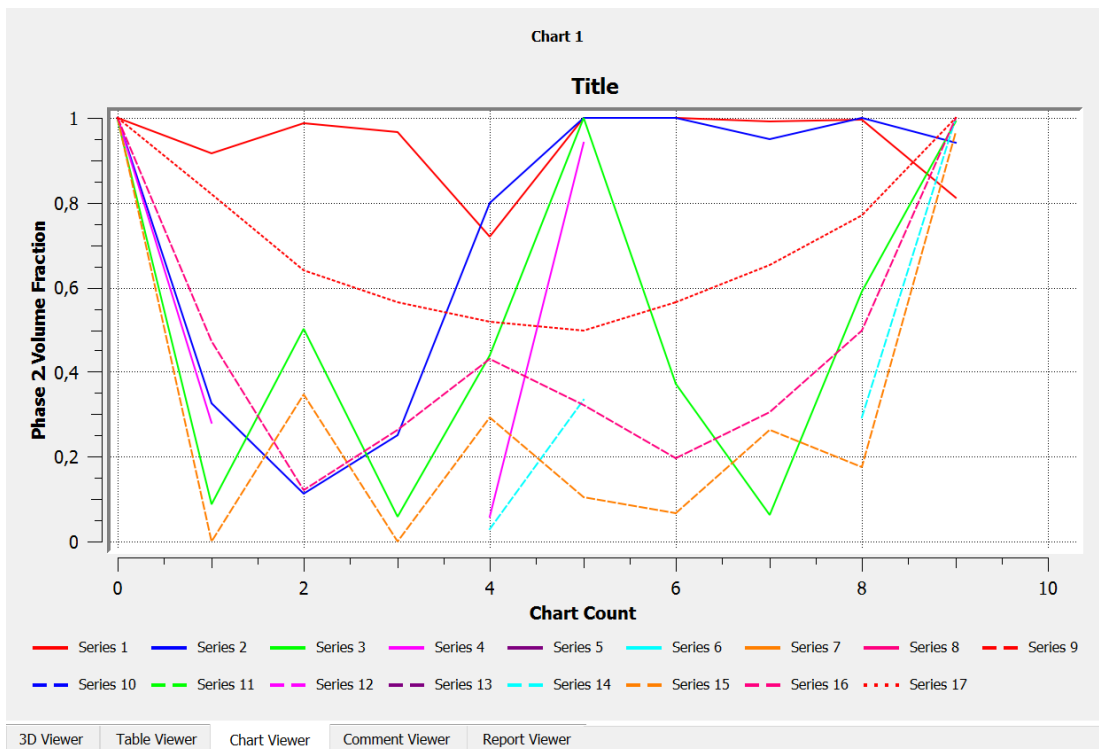


Figure3.10b. Extraction des données

- Cas pour  $e=6.4\text{mm}$ ,  $h=65\text{mm}$  avec 3750 itérations

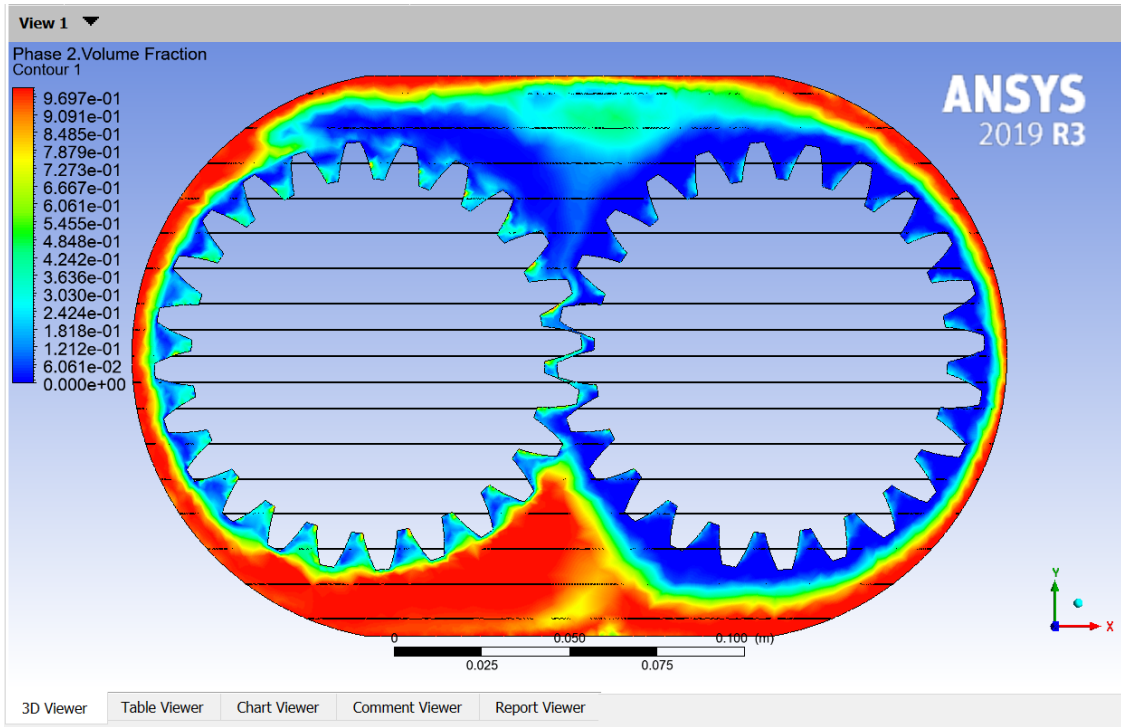


Figure 3.11a. Résultats de la simulation

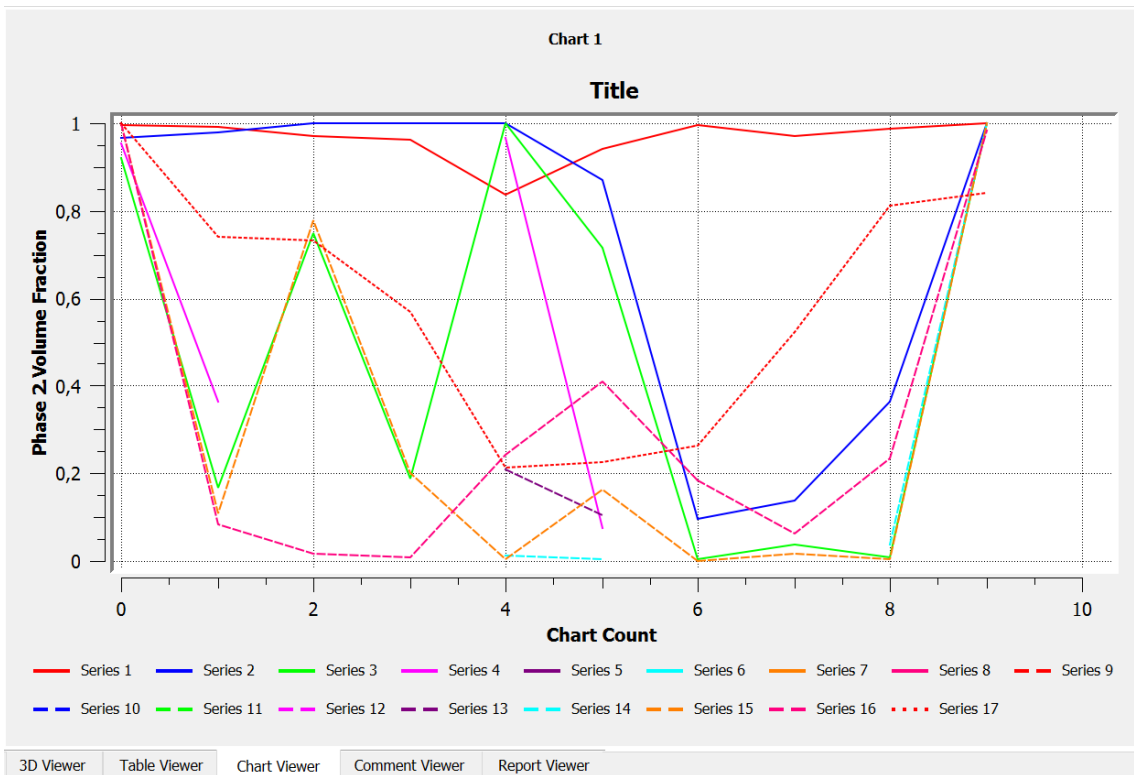


Figure3.11b. Extraction des donnés

- Cas pour  $e=3.2\text{mm}$  ,  $h=95\text{mm}$  avec 3750 itérations

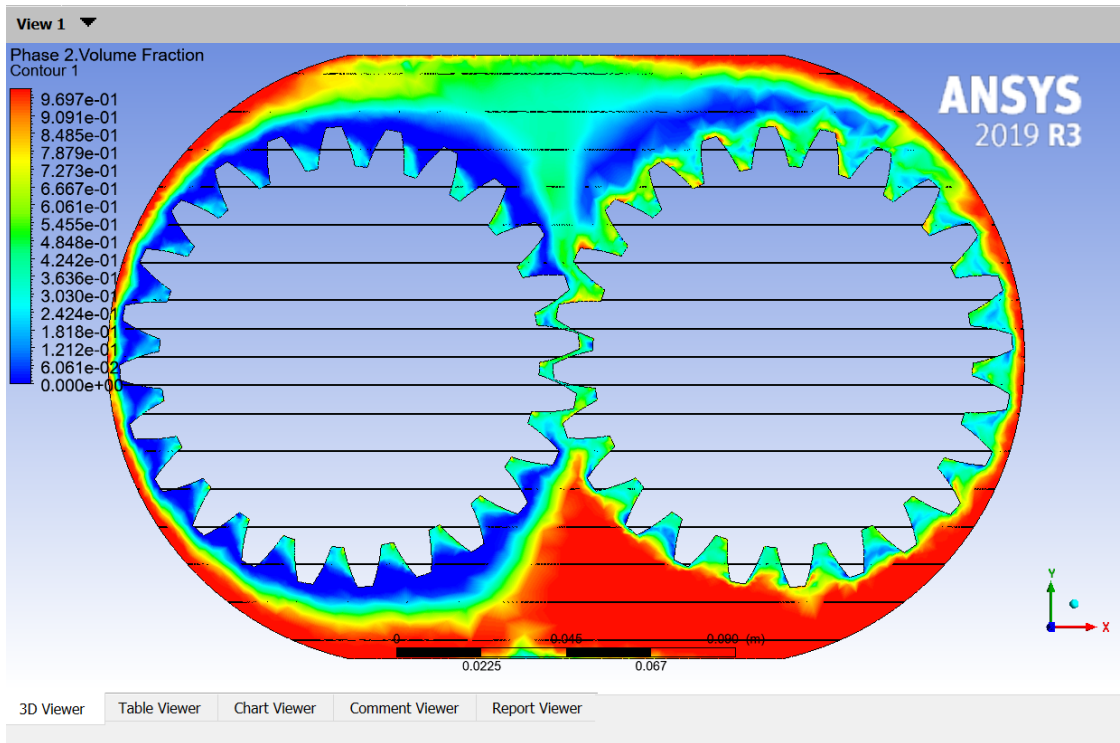


Figure 3.12a. Résultats de la simulation

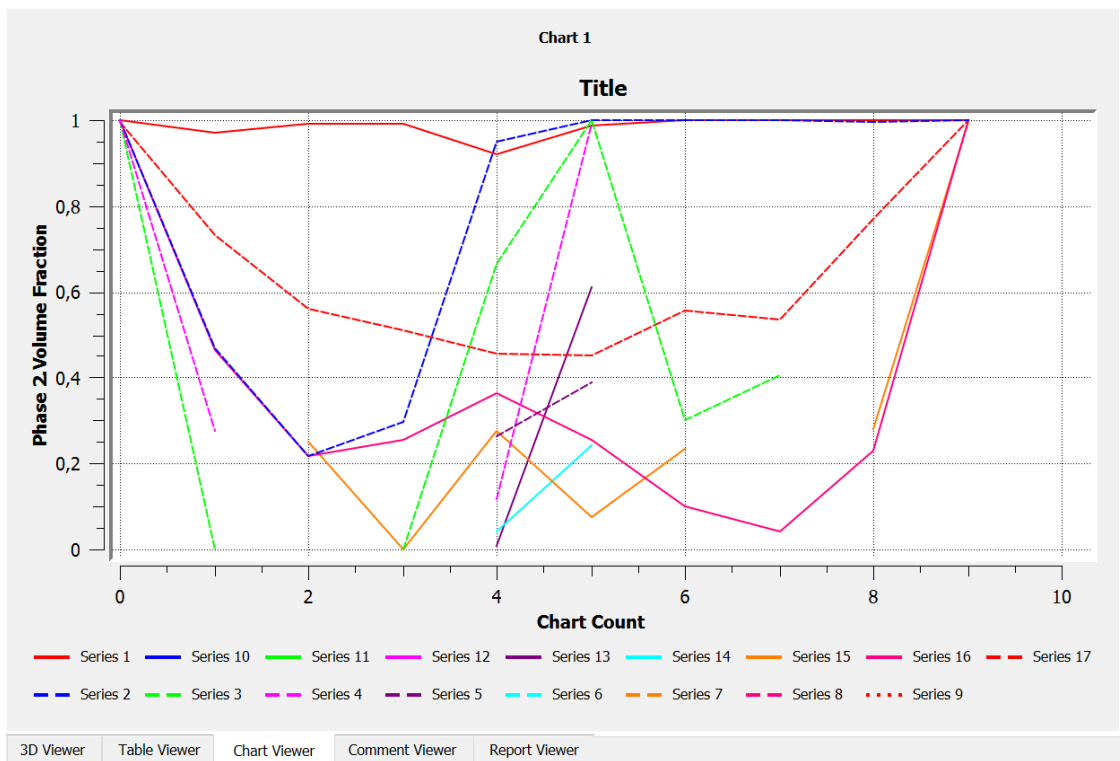


Figure3.12b. Extraction des données

- Cas pour  $e=3.2\text{mm}$  ,  $h=65\text{mm}$  avec 3750 itérations

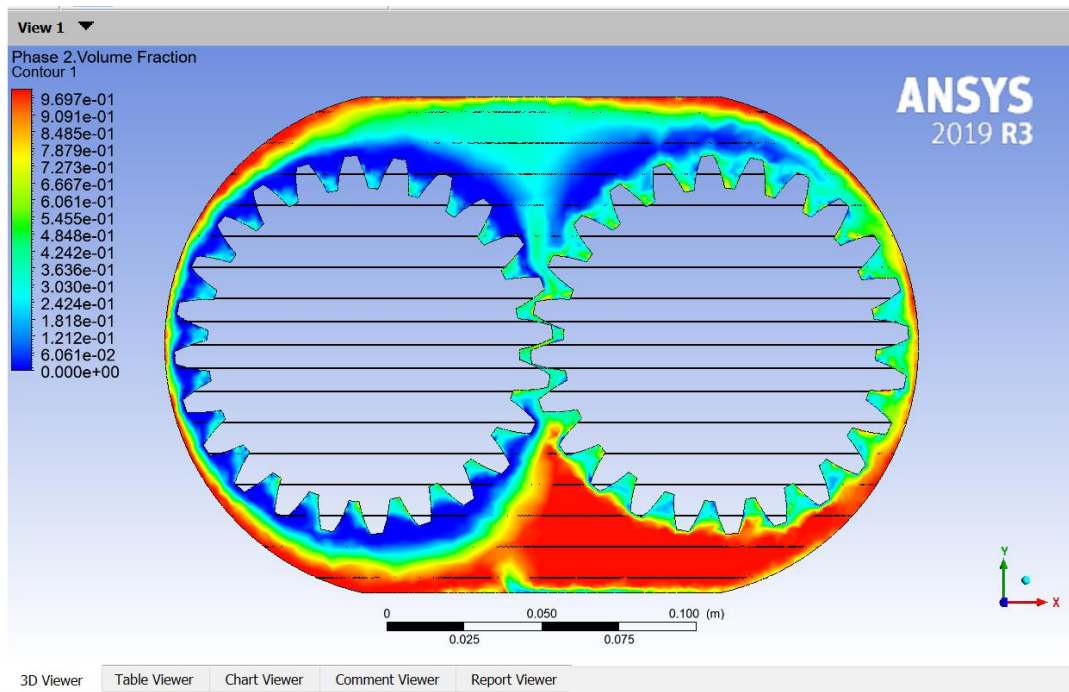


Figure 3.13a. Résultats de la simulation

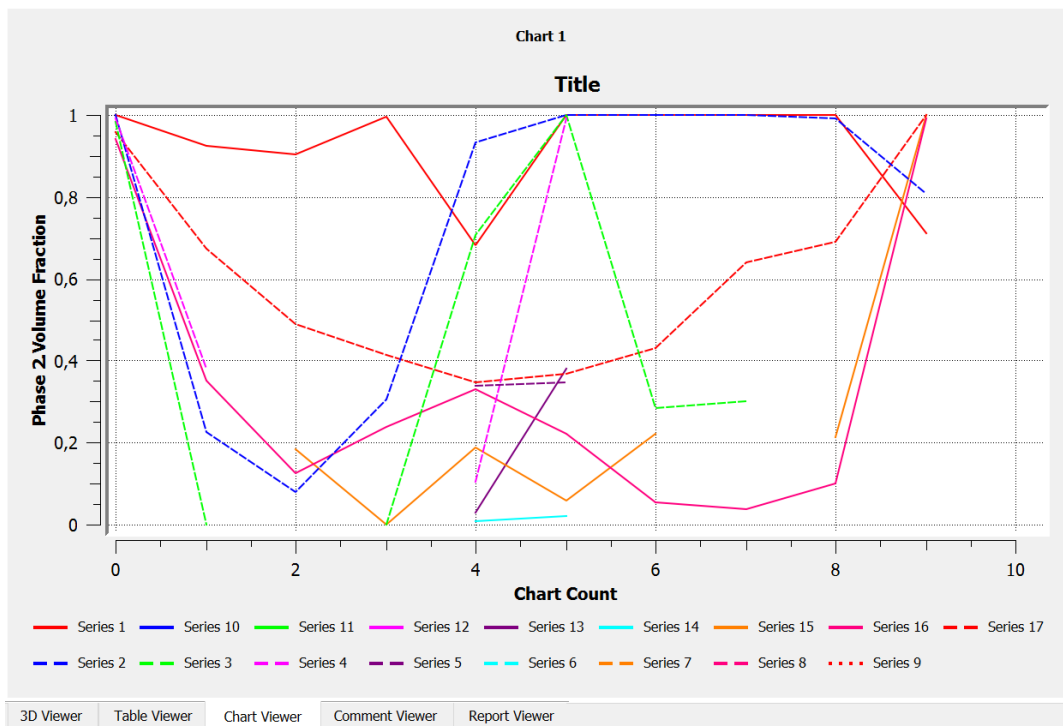


Figure3.13b. Extraction des données

## 5. Discussions et conclusion

L'extraction des données après simulations montre les possibilités offertes par cette méthode qui complémentarise l'analyse des figures de la simulations à savoir :

- Un amortissement de la lubrification d'une manière uniforme
- Le lubrifiant qui se colle sur les parois du carter avec des fractions de fluides sur les dents.
- Apparition d'une dépression au niveau des dents avec l'apparition des fractions de l'air qui prend le dessus sur le lubrifiant.
- La lubrification hydrodynamique n'est pas garantie, mais nous sommes plutôt en lubrification mixte ou limite.
- Les conditions de simulations utilisées ne permettent pas d'obtenir une répartition uniforme et une lubrification hydrodynamique. Entre autres le volume initiale du fluide doit être étudié d'une manière optimale pour garantir des conditions d'entrée et de sortie du lubrifiant d'une manière uniforme et garantir une lubrification adéquate des engrenages.
- D'où la nécessité du changement des conditions limites pour la suite de cette simulation.



## Conclusion générale

Face à la diversité des conditions de fonctionnement et des exigences de performance des engrenages, la simulation numérique se révèle être un outil indispensable pour optimiser efficacement leur lubrification. Notre travail a mis en lumière l'importance cruciale de la lubrification dans l'industrie moderne, soulignant que le choix approprié du lubrifiant et la fréquence d'application sont des décisions stratégiques pour assurer le bon fonctionnement des engrenages et, par extension, des processus industriels complexes.

Les méthodes d'analyse numérique et de simulation, telles que celles utilisées avec ANSYS Fluent, offrent une perspective précieuse. Les simulations 3D permettent de visualiser en détail la distribution du lubrifiant dans des conditions biphasées, fournissant ainsi des insights profonds sur les interactions complexes au sein des systèmes mécaniques. Cela permet non seulement de prédire les performances des engrenages sous différentes charges et vitesses, mais aussi de diagnostiquer les problèmes potentiels de lubrification avant qu'ils ne se manifestent physiquement.

Les résultats de nos simulations ont identifié plusieurs défis significatifs, tels que l'amortissement non uniforme de la lubrification, l'adhérence inégale du lubrifiant sur les dents des engrenages, et la présence de zones de dépression où l'air peut prédominer sur le lubrifiant. Ces observations soulignent l'importance critique d'ajuster les paramètres de simulation, notamment le volume initial du fluide et les conditions limites, pour garantir une distribution uniforme du lubrifiant et favoriser une lubrification hydrodynamique optimale.

Il est à remarquer que la simulation numérique représente un levier puissant pour optimiser la lubrification des engrenages dans des conditions variées et exigeantes tout en sachant exploiter les données générées par ces outils, ce qui permet d'améliorer la durabilité et l'efficacité des engrenages, mais aussi réduire les coûts de développement en optimisant les choix de lubrifiants et les stratégies d'application. Cette approche intégrée est essentielle pour répondre aux défis complexes de l'industrie moderne et assurer un fonctionnement fiable des équipements mécaniques dans divers environnements opérationnels.

## Références Bibliographiques

- [1] Dominique Dubis, Lycée Marguerite Verdun, cours, France.
- [2] Fayçal Mijiyawa « formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois application aux engrenages » thèse de doctorat l'université du québec à chicoutimi janvier 2018.
- [3] <http://pierreprovot.files.wordpress.com/2009/02/engrenage032.png>
- [4] l'ouvrier moderne « engrenages » Volume 5 ,avril 1922 published online 08 juin 2017 page 9-12
- [5] Conique Prat.ind.Méc « engrenage » Volume 16, aout 1933 published online 12june 2017 page 171-176.
- [6] J. Dufailly, Ellipses. Etude géométrique des engrenages cylindriques de transmission de puissance.
- [7] Larifi Bouthaina « Surveillance et détection des défauts des engrenages » Mémoire de master en génie électromécanique,2019/2020, Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [8] Abdoul Fall, Mise en évidence des phénomènes d'interférence dans les systèmes de transmission par engrenage, Projet de fin d'étude, Ecole supérieur Polytechnique, centre de Thiès, Département Génie électromécanique, Senegal, 2006.
- [9] G. Henriot, Traité Pratique et Théorique des engrenages, tome 1.
- [10] Eric Thomas, transmission de puissance, Cours pour les élèves de lycée JEAN ZAY, Page 6, 2014.
- [11] V. Dobrovolski et co-auteur, Eléments de machines : Automatisation du calcul des dents.
- [12] M. Aublin et co-auteurs, Systèmes mécaniques (Théorie et dimensionnement), Edition Dunod, 1998.
- [13] Haddad Belkacem, « Etude de conception d'une boite de vitesse manuelle d'une Partner Peugeot diesel 1.6 HDI» Mémoire de master en génie mécanique, 2021, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [14] Marcel Menard on, la mécanique automobile « les organes de transmission et d'utilisation », Edition chocard et associates, France 1979.
- [15] « Source ; cours Jardin-Nicolas Hervé engrenage.
- [16] Bechkri Bouchera, Analyse des défauts de dentures et leurs influences sur les transmissions mécanique par engrenage, Mémoire de magister, Université de Constantine, 2007.
- [17] J. Bergere, « Correction par déport de profil des dentures d'engrenages parallèles »,

p. 257-263.

[18] Salim Sellami « Conception Intégrée des Systèmes Mécaniques et Applications Industrielles » Mémoire de magister en génie mécanique 2010 Université MENTOURI Constantine.

[19] <https://www.sarl-dassonville.com/different-type-dusure-dun-engrenage/>

[20] Pierre Duysinx, Introduction aux engrenages à dentures droites et hélicoïdales (partie 2), LTAS – Ingénierie de Véhicules Terrestres Département Aérospatiale & Mécanique Université de Liège, 2015-2016.

[21] F.Bernard, A.Bru, éléments de construction à l'usage de l'ingénieur, Tome 4, Dunod 1966.

[22] [http://www.zpag.net/Machines\\_Simples/Engrenage\\_efforts\\_sur\\_les\\_dentures.htm](http://www.zpag.net/Machines_Simples/Engrenage_efforts_sur_les_dentures.htm)

[23] G. Gredin Travaux pratiques , ENSET 1987

[24] S. Teber, « Eléments de mécanique analytique » Master de Sciences et Technologies Mention Physique et applications (M1), université de sorbonne, (Année 2018/2019).

[25] H. Goldstein, Classical Mechanics, Addison Wesley (1980). H. Goldstein, Mécanique Classique (traduit par Annette et Charles Moubacher), Presses universitaires de France (1964).

[26] <https://lpsc.in2p3.fr/atlas/cours/MLH.pdf>

[27] X. Zhong « An improved generalized watson equation for prediction of latent heat of vaporization », Chem Eng Commun, 29 (2010)

[28] [https://www.youtube.com/watch?v=9TG\\_qODBSN8](https://www.youtube.com/watch?v=9TG_qODBSN8)

[29] Zienkiewicz, O., Chung, Y. : La méthode des éléments finis, vol. 1. McGraw Hill (1967)

[30] R. W. Clough, The Finite Element Method, in Plane Stress Analysis, Proc. 2nd A.S.C.E. Conf: on Electronic Comp, Pittsburgh, PA, septembre 1960.

[31] Erwin Stein, history of finite element method, Institute of Mechanic and computational Mechanics, Leibniz de Hannover University, Germany 2014.

[32] Oden J., Carey, G. : Éléments finis. Aspects mathématiques, vol. IV. Prentice Hall, Inc. (1983).

[33] [http://home.iitk.ac.in/~mohite/History\\_of\\_FEM.pdf](http://home.iitk.ac.in/~mohite/History_of_FEM.pdf)

[34] Lakhdar Bessais thèse Magister, « Analyse des structures par la M.E.F basée sur l'approche en déformation », Université Mohamed Khider, faculté des Sciences et de la Technologie, département : Génie Mécanique, Biskra. Décembre 2012.

[35] A. Adjloua., cours master1 Université D'oran2 Mohamed ben Ahmed, Oran, 2016.

- [36] Iron, B.M., Zienkiewicz O.C. Le système d'éléments finis isoparamétriques - un nouveau concept dans l'analyse par éléments finis. Dans : Proc. Conf. : Progrès récents dans l'analyse des contraintes, Royal Aeronautical Society (1968).
- [37] William F. Noh et Paul Woodward, « SLIC (Simple Line Interface Calculation) », *Lecture Notes in Physics*, vol. 59, 1976, p. 330–340.
- [38] C. W. Hirt et B. D. Nichols, « Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries », *Journal of Computational Physics*, vol. 1, n° 39, 1981, p. 201-225
- [39] Marcus Herrmann, « Two-Phase Flow Tutorial ] », sur *Center for Turbulence Research Stanford University*.
- [40] Kateryna Voronetska, *Simulation numérique directe des écoulements à phases dispersées*, Thèse de l'université Bordeaux 1, 2012.
- [41] Turner, M.J., Clough , R.W., Martin, H.C., Topp, L.J. : Analyse de la rigidité et de la déviation des structures complexes. *Journal des sciences aéronautiques* 23, 805–823 (1956).